

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

**LİFLİ POLİMERLER İLE GÜÇLENDİRİLMİŞ BETONARME KİRİŞLERİN SONLU
ELEMENLAR YÖNTEMİ İLE HESABI**

MEHMET AYAYDIN

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

**DANIŞMAN
PROF. DR. BİLGE DORAN**

İSTANBUL, 2019

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**LİFLİ POLİMERLER İLE GÜÇLENDİRİLMİŞ BETONARME KİRİŞLERİN SONLU
ELEMEN YÖNTEMİ İLE HESABI**

Mehmet AYAYDIN tarafından hazırlanan tez çalışması 14.03.2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Prof. Dr. Bilge DORAN
Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Bilge DORAN
Yıldız Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Sema ALACALI
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Tülay AKSU ÖZKUL
İstanbul Teknik Üniversitesi

ÖNSÖZ

Lisans ve lisansüstü eğitim hayatım boyunca mesleki anlamda bana yön veren ve bu tez çalışması süresince deneyim ve bilgisi ile bana yardımcı olan değerli danışman hocam Prof. Dr. Bilge DORAN'a en derin teşekkürlerimi sunarım.

Gerçekleştirmiş olduğu deneysel çalışma ile tezin gelişmesinde önemli bir katkısı olan Dr. İlknur DALYAN'a çok teşekkür ederim.

Son olarak tüm hayatım boyunca her türlü durumunda beni destekleyen ve yanımda olan annem, babam ve kardeşlerime tüm kalbimle teşekkür ederim.

Mart, 2019

Mehmet AYAYDIN

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ.....	vii
KISALTMA LİSTESİ.....	x
ŞEKİL LİSTESİ.....	xi
ÇİZELGE LİSTESİ	xvi
ÖZET	xvii
ABSTRACT.....	xix
BÖLÜM 1	
GİRİŞ.....	1
1.1 Literatür Özeti.....	2
1.2 Tezin Amacı	9
1.3 Hipotez.....	10
BÖLÜM 2	
LİF TAKVİYELİ YAPI MALZEMELERİ	12
2.1 Kompozit Malzeme	12
2.1.1 Matris Reçinesi	14
2.1.1.1 Seramik Matris Reçinesi	15
2.1.1.2 Polimer Matris Reçinesi	15
2.1.1.3 Metal Matris Reçinesi	21
2.1.1.4 Karbon Matris Reçinesi	22
2.1.2 Güçlendirme Lifleri	22
2.1.2.1 Güçlendirme Elemanının Dizilimi ve Yapısına Göre Kompozitler	23
2.1.2.2 Güçlendirme Elemanının Türüne Göre Kompozitler.....	26
2.1.3 Dolgu Malzemeleri ve Katkıları	32
2.2 FRP Üretim Yöntemleri	33
2.2.1 Elle Birleştirme ve Sprey Teknikleri	33

2.2.2	Pultrüsyon Yöntemi ile Üretim	34
2.2.3	İplik Sarma Yöntemi.....	35
2.2.4	Kalıba Reçine Transferi Yöntemi.....	35
2.2.5	Sıkıştırma Kalıplama Yöntemi	36
2.2.6	Vakum Torbalama Yöntemi	37
2.3	FRP Yapı Malzemelerinin Fiziksel ve Mekanik Özellikleri	37

BÖLÜM 3

BETONARME KİRİŞLERDE ONARIM VE GÜÇLENDİRME TEKNİKLERİ		44
3.1	Betonarme Kirişlerin Mantolama Tekniği ile Güçlendirilmesi	46
3.1.1	Tek Yüzey Mantolama	48
3.1.2	Üç Yüzey Mantolama.....	48
3.1.3	Dört Yüzeyden için (Tam) Mantolama.....	49
3.2	Betonarme Kirişlerin Çelik Plakalar ile Güçlendirilmesi.....	50
3.3	Betonarme Kirişlerin Mekanik Yöntemlerle Güçlendirilmesi	52
3.4	Betonarme Kirişlerin FRP ile Güçlendirilmesi	54
3.4.1	Uygulama Öncesi Hazırlık	54
3.4.2	FRP Uygulaması	55
3.4.2.1	Dış Yüzeyden Yapılan Güçlendirmeler (EBR).....	55
3.4.2.2	Yakın Yüzeyden Yapılan Güçlendirmeler (NSM)	60

BÖLÜM 4

DENEYSEL ÇALIŞMA VE BÜNYESEL MODELLEME TEKNİKLERİ		62
4.1	DeneySEL Çalışma	62
4.2	Bünyesel Model Önerileri	66
4.2.1	LUSAS-ver 15.0 Yazılımı ve Önerilen Sanal Malzeme Modeli.....	67
4.2.1.1	Plastik Malzeme Modeli.....	68
4.2.1.2	Hasar Mekanizması	69
4.2.1.3	Malzeme Parametreleri	73
4.2.1.4	Sayısal Model	76
4.2.2	ABAQUS-ver 6.14 Yazılımı ve Önerilen Malzeme Modeli.....	79
4.2.2.1	Beton için Elastoplastik Hasar Modeli.....	80
4.2.2.2	Hasar Mekanizması	84
4.2.2.3	Malzeme Parametreleri	89
4.2.2.4	Sayısal Model Geometrisi ve Sonlu Eleman Ağı.....	91
4.3	Sayısal Analiz Sonuçları ve Değerlendirmeler	93
4.3.1	K20R Kirişi	95
4.3.2	K20KG00 Kirişi.....	99
4.3.3	K20KG50 Kirişi.....	106
4.3.4	K20KGU Kirişi	113
4.3.5	K40R Kirişi	120
4.3.6	K40KG00 Kirişi.....	124
4.3.7	K40KG70 Kirişi.....	130
4.3.8	K40KGU Kirişi	135

BÖLÜM 5

SONUÇ VE ÖNERİLER	147
KAYNAKLAR	149
ÖZGEÇMİŞ	159



SİMGE LİSTESİ

A	Malzeme parametresi
d	Hasar parametresi
d_c	Basınç durumu için hasar parametresi
d_{max}	En büyük agrega çapı
d_t	Çekme durumu için hasar parametresi
D_0^{el}	Başlangıç malzeme matrisi
E_c	Betonun elastisite modülü
E_k	Kompozit malzemede eksenel doğrultudaki elastisite modülü
E_l	Güçlendirme lifleri için elastisite modülü
E_p	CFRP'nin elastisite modülü
E_r	Matris reçinesinin elastisite modülü
E_s	Donatı çeliğinin elastisite modülü
E_x	CFRP'nin x doğrultusundaki elastisite modülü
E_y	CFRP'nin y doğrultusundaki elastisite modülü
E_z	CFRP'nin z doğrultusundaki elastisite modülü
E_0	Başlangıç elastisite modülü
F	Akma fonksiyonu
f_c	Betonun basınç dayanımı
f_t	Betonun çekme dayanımı
f_y	Akma dayanımı
f_{ck}	Betonun karakteristik basınç dayanımı
f_{cr}	Çatlak başlangıç gerilmesi
G	Akış potansiyeli
G_f	Kırılma enerjisi
G_{xy}	x-y düzlemindeki kayma modülü
G_{xz}	x-z düzlemindeki kayma modülü
G_{yz}	y-z düzlemindeki kayma modülü
h	Sonlu eleman boyutu
h_x	x doğrultusundaki sonlu eleman uzunluğu
h_y	y doğrultusundaki sonlu eleman uzunluğu
h_z	z doğrultusundaki sonlu eleman uzunluğu

K_c	Çekme meridyeni üzerindeki ikinci gerilme sabitinin basınç meridyeni üzerindeki ikinci gerilme sabitine oranı
$\bar{p}$	Hidrostatik basınç gerilmesi
$\bar{S}$	Efektif gerilme deviatörü
T_g	Cam geçiş sıcaklığı
V_l	Güçlendirme liflerinin hacimsel oranı
V_r	Reçinenin hacimsel oranı
$\bar{q}$	von Mises eşdeğer efektif gerilmesi
$q(CM)$	Basınç meridyeni üzerindeki ikinci gerilme sabiti
$q(TM)$	Çekme meridyeni üzerindeki ikinci gerilme sabiti
ε	Birim şekil değiştirme
ε_b	Basınç etkisindeki birim şekil değiştirme
ε_c	Basınç birim şekil değiştirmesi
ε_p	Maksimum gerilmeye karşı gelen birim şekil değiştirme
ε_t	Çekme birim şekil değiştirmesi
ε_{cr}	Çatlak başlangıç birim şekil değiştirmesi
ε_{rup}	Göçme birim şekil değiştirmesi
ε^{pl}	Plastik birim şekil değiştirme
$\tilde{\varepsilon}^{pl}$	Pekleşme ve/veya yumuşama birim şekil değiştirmesi
$\tilde{\varepsilon}_c^{pl}$	Basınç etkisindeki eşdeğer plastik birim şekil değiştirme
$\tilde{\varepsilon}_t^{pl}$	Çekme etkisindeki eşdeğer plastik birim şekil değiştirme
ε_1	Birim şekil değiştirme
σ	Gerilme
σ_b	Basınç etkisindeki gerilme
σ_p	Deneysel olarak elde edilen maksimum gerilme
σ_y	Akma gerilmesi
σ_{b0}	İki eksenli basınç etkisindeki akma dayanımı
σ_{c0}	Tek eksenli basınç etkisindeki akma dayanımı
σ_{t0}	Göçme anındaki tek eksenli çekme gerilmesi
$\bar{\sigma}$	Efektif gerilme
$\bar{\sigma}_c$	Efektif basınç kohezyon gerilmesi
$\bar{\sigma}_t$	Efektif çekme kohezyon gerilmesi
$\hat{\sigma}_{max}$	Maksimum asal efektif gerilme
$\bar{\sigma}_c(\tilde{\varepsilon}_c^{pl})$	Basınç etkisindeki efektif kohezyon gerilmesi
$\bar{\sigma}_t(\tilde{\varepsilon}_t^{pl})$	Çekme etkisindeki efektif kohezyon gerilmesi
σ_1	Çekme gerilmesi
σ_1, S_1	1 doğrultusundaki asal gerilme
σ_2, S_2	2 doğrultusundaki asal gerilme
σ_3, S_3	3 doğrultusundaki asal gerilme
ν	Poisson oranı
ν_s	Donatı çeliğine ait poisson oranı
ν_{xy}	x-y düzlemi için poisson oranı
ν_{xz}	x-z düzlemi için poisson oranı
ν_{yz}	y-z düzlemi için poisson oranı
ϵ	Ekzantriklik

ψ	Genleşme açısı
τ^*	Başlangıç hasar eşiği
μ	Viskozite
η	Hasar oranı



KISALTMA LİSTESİ

AFRP	Aramid Fibre Reinforced Polymer
BRS2	İki Düğüm Noktalı Çubuk Eleman
CDP	Concrete Damaged Plasticity
CFRP	Carbon Fibre Reinforced Polymer
C3D8R	Altı Yüzlü Üç Boyutlu Gerilme Elemanı
EBR	Externally Bonded Reinforcement
FRP	Fibre Reinforced Polymer
GFRP	Glass Fibre Reinforced Polymer
HM	High Modulus
HX8M	Sekiz Düğüm Noktalı Altı Yüzlü Eleman
KLP	Karbon Lifli Polimer
NSM	Near Surface Mounting
RC	Reinforced Concrete
S4R	Dört Düğüm Noktalı Kabuk Eleman
T3D2	Üç Boyutlu İki Düğüm Noktalı Çubuk Eleman
UV	Ultraviolet

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2. 1	Kompozit malzemenin şematik olarak temsili 13
Şekil 2. 2	Kompozit malzemenin gerilme-şekil değiştirme davranışı 13
Şekil 2. 3	Matris reçinesi türüne göre kompozitler 14
Şekil 2. 4	Metal reçineli kompozitlerde takviye elemanı türleri 22
Şekil 2. 5	Lif yapısı ve dağılımına göre kompozitlerin sınıflandırılması 23
Şekil 2. 6	Parçacık lifli kompozit 23
Şekil 2. 7	Lif takviyeli kompozitler a) tek doğrultulu sürekli lifler, b) iki doğrultulu sürekli elyaflar, c) süreksiz kısa lifler, d) tek doğrultulu süreksiz lifler..... 24
Şekil 2. 8	Tabakalı kompozit malzemeler a) tek doğrultulu tabakalı kompozit, b) farklı doğrultularda yönlendirilmiş yarı izotropik kompozit malzeme 25
Şekil 2. 9	Sandviç panel kompozit malzeme yapısı 26
Şekil 2. 10	Karbon esaslı polimer türleri a) levha, b) kumaş, c) şerit, d) donatı çubuğu, e) öngermeli tendon 27
Şekil 2. 11	Çekme gerilmesi etkisinde bazı lif türlerinin davranışları..... 29
Şekil 2. 12	Farklı formlardaki cam lifleri 30
Şekil 2. 13	Elle birleştirme ve spreyc yöntemi a) elle birleştirme tekniği, b) spreyc ile birleştirme tekniği..... 34
Şekil 2. 14	Pultrüsyon işlem aşamaları..... 34
Şekil 2. 15	İplik sarma yöntemi ile kompozit malzeme üretimi 35
Şekil 2. 16	Reçine transferi yöntemi ile üretim 36
Şekil 2. 17	Sıkıştırma Kalıplama Yöntemi 36
Şekil 2. 18	Vakum Torbalama Kalıplama Yöntemi 37
Şekil 2. 19	FRP malzemelerinin gerilme etkisindeki davranışları..... 40
Şekil 3. 1	Betonarme Kirişlerde Mantolama güçlendirmesi..... 46
Şekil 3. 2	Kiriş güçlendirmesinde V ve Z demir bağlantıları..... 46
Şekil 3. 3	Güçlendirme donatısı ankraj uygulamaları..... 47
Şekil 3. 4	Mevcut beton ile yeni betonun kenetlenmesi..... 47
Şekil 3. 5	Betonarme kirişlerin eğilme bölgesinin güçlendirilmesi..... 48
Şekil 3. 6	Betonarme kirişlerin üst yüzeylerinin güçlendirilmesi..... 48
Şekil 3. 7	Üç taraftan mantolama tekniği..... 49
Şekil 3. 8	Betonarme kirişlerin dört yüzeyden güçlendirilmesi..... 49

Şekil 3. 9	Betonarme kirişlerin çelik plakalar ile güçlendirilmesi	50
Şekil 3. 10	Çelik levhaların ankrajlanması	52
Şekil 3. 11	Kirişlerin mekanik bağlayıcılar ile güçlendirilmesi	53
Şekil 3. 12	Kaynak yoluyla güçlendirme mekanizmasının oluşturulması.....	53
Şekil 3. 13	Boyuna donatılar ile güçlendirme.....	54
Şekil 3. 14	Kirişlerde güçlendirme takviyesi a) alt yüzey güçlendirme, b) U tipi güçlendirme	56
Şekil 3. 15	Eğilme bölgesi güçlendirilen kirişlerde kırılma türleri	57
Şekil 3. 16	Güçlendirme biçimleri a) Yan yüzey güçlendirmesi, b) U tipi sargı, c) Tam sargı.....	58
Şekil 3. 17	FRP şerit uygulaması	59
Şekil 3. 18	Islak uygulama tekniği	60
Şekil 3. 19	Yakın Yüzey Montajı a) oyuk açılması, b) açılan oyuğa epoxy doldurulması, c) güçlendirme çubuğunun oyuk içerisine yerleştirilmesi	61
Şekil 4. 1	Betonarme kirişlerin geometrik özellikleri ve donatı detayları	63
Şekil 4. 2	Betonarme kirişlerde güçlendirme biçimleri a) K20KG00 ve K40KG00 b) K20KG50 ve K40KG70 c) K20KGU ve K40KGU	64
Şekil 4. 3	Birinci grup numunelere ait deney sonuçları.....	65
Şekil 4. 4	İkinci grup numunelere ait deney sonuçları	66
Şekil 4. 5	Akma kriterleri a) von Mises b) geliştirilmiş von Mises	69
Şekil 4. 6	Malzemede görülen birim şekil değiştirme yumuşaması a) plastisite modeli, b) sürekli ortam hasar modeli.....	70
Şekil 4. 7	Hasar modeli için betona ait tek eksenli gerilme – birim şekil değiştirme ilişkisi	71
Şekil 4. 8	Sonlu eleman tipleri a) sekiz düğüm noktalı katı eleman (HX8M), b) iki düğüm noktalı çubuk eleman (BRS2).....	76
Şekil 4. 9	K20KGU kirişine ait sayısal model.....	77
Şekil 4. 10	Birinci grup numunelere ait sayısal modellerde analizin sonlandırıldığı adıma ait örtü betonunda gerilme – birim şekil değiştirme ilişkileri.....	78
Şekil 4. 11	İkinci grup numunelere ait sayısal modellerde analizin sonlandırıldığı adıma ait örtü betonunda gerilme – birim şekil değiştirme ilişkileri.....	78
Şekil 4. 12	Deviatorik düzlemde CDP modelinin tarif ettiği akma yüzeyi	83
Şekil 4. 13	Gerilme düzleminde CDP modeline ait akma yüzeyi.....	84
Şekil 4. 14	Betonun tek eksenli yükleme etkisindeki davranışı a) çekme, b) basınç.....	85
Şekil 4. 15	Betonun gerilme – şekil değiştirme ilişkileri a) EP1, b) EP2, c) EP3	86
Şekil 4. 16	Betonun basınç durumunda tek eksenli gerilme – birim şekil değiştirme ilişkisi	87
Şekil 4. 17	Betonun tek eksenli çekme gerilmesi – birim şekil değiştirme ilişkisi.....	87
Şekil 4. 18	Donatı çeliğine ait gerilme – birim şekil değiştirme ilişkisi.....	88
Şekil 4. 19	Karbon lifli polimere ait gerilme birim şekil değiştirme ilişkisi.....	88
Şekil 4. 20	Betonarme kirişlere ait sayısal model.....	92
Şekil 4. 21	Sonlu eleman tipleri a) C3D8R, b) T3D2, c) S4R.....	93
Şekil 4. 22	Sayısal modellerde sonlu eleman ağı.....	93
Şekil 4. 23	K20R kirişi için yük – yer değiştirme ilişkileri	96

Şekil 4. 24	K20R kirişinde sanal malzeme modeli için deformasyon durumu (a) ve EPH1 yaklaşımı için gerilme dağılımı (b).....	96
Şekil 4. 25	K20R kirişinde CDP malzeme modeli için deformasyon durumu (a) ve EP1 (b) ve EP2 (c) yaklaşımları için betonda gerilme dağılımı	97
Şekil 4. 26	K20R kirişinde EP3 (a) ve EPH2 (b) yaklaşımları için betonda gerilme dağılımı.....	97
Şekil 4. 27	K20R kirişinde EPH1 (a) ve EPH2 (b) yaklaşımları için birim şekil değiştirme dağılımı.....	98
Şekil 4. 28	K20R kirişinde EP1 (a), EP2 (b) ve EP3 (c) yaklaşımları için birim şekil değiştirme dağılımı	98
Şekil 4. 29	K20R kirişinde çekme çatlaklarının dağılımı	99
Şekil 4. 30	K20KG00 kirişi için yük – yer değiştirme ilişkisi	100
Şekil 4. 31	K20KG00 kirişinde EPH1 (a) ve EPH2 (b) yaklaşımları için betonda gerilme dağılımı.....	101
Şekil 4. 32	K20KG00 kirişinde EP1 (a), EP2 (b) ve EP3 (c) yaklaşımları için betonda gerilme dağılımı	101
Şekil 4. 33	K20KG00 kirişinde EPH1 (a) ve EPH2 (b) yaklaşımları için CFRP’de gerilme dağılımı.....	102
Şekil 4. 34	K20KG00 kirişinde EP1 (a), EP2 (b) ve EP3 (c) yaklaşımları için CFRP’de gerilme dağılımı	102
Şekil 4. 35	K20KG00 kirişinde EPH1 (a) ve EPH2 (b) yaklaşımları için betonda birim şekil değiştirme dağılımı	103
Şekil 4. 36	K20KG00 kirişinde EP1 (a), EP2 (b) ve EP3 (c) yaklaşımları için betonda birim şekil değiştirme dağılımı	103
Şekil 4. 37	K20KG00 kirişinde EPH1 (a) ve EPH2 (b) yaklaşımları için birim şekil değiştirme dağılımı	104
Şekil 4. 38	K20KG00 kirişinde EP1 (a), EP2 (b) ve EP3 (c) yaklaşımları için CFRP’de birim şekil değiştirme dağılımı	105
Şekil 4. 39	K20KG00 kirişinde çekme hasarlarının dağılımı.....	106
Şekil 4. 40	K20KG50 için yük – yer değiştirme ilişkisi.....	107
Şekil 4. 41	K20KG50 kirişinde EPH1 (a) ve EPH2 (b) yaklaşımları için betonda gerilme dağılımı.....	107
Şekil 4. 42	K20KG50 kirişinde EP1 (a), EP2 (b) ve EP3 (c) yaklaşımları için betonda gerilme dağılımı	108
Şekil 4. 43	K20KG50 kirişinde EPH1 (a) ve EPH2 (b) yaklaşımları için CFRP’de gerilme dağılımı.....	109
Şekil 4. 44	K20KG50 kirişinde EP1 (a), EP2 (b) ve EP3 (c) yaklaşımları için CFRP’de gerilme dağılımı	109
Şekil 4. 45	K20KG50 kirişinde EPH1 (a) ve EPH2 (a) yaklaşımları için betonda birim şekil değiştirme dağılımı	110
Şekil 4. 46	K20KG50 kirişinde EP1 (a), EP2 (b) ve EP3 (c) yaklaşımları için betonda birim şekil değiştirme dağılımı	110
Şekil 4. 47	K20KG50 kirişinde EPH1 (a) ve EPH2 (b) yaklaşımları için CFRP’de birim şekil değiştirme dağılımı	111

Şekil 4. 48	K20KG50 kirişinde EP1 (a), EP2 (b) ve EP3 (c) yaklaşımları için CFRP’de birim şekil değiştirme dağılımı	112
Şekil 4. 49	K20KG50 kirişi için çekme hasarlarının dağılımı	113
Şekil 4. 50	K20KGU kirişi için yük – yer değiştirme ilişkisi.....	114
Şekil 4. 51	K20KGU kirişinde EPH1 (a) ve EPH2 (b) yaklaşımları için betonda gerilme dağılımı.....	114
Şekil 4. 52	K20KGU kirişinde EP1 (a), EP2 (b) ve EP3 (c) yaklaşımları için betonda gerilme dağılımı	115
Şekil 4. 53	K20KGU kirişinde EPH1 (a) ve EPH2 (b) yaklaşımları için CFRP’de gerilme dağılımı.....	115
Şekil 4. 54	K20KGU kirişinde EP1 (a), EP2 (b) ve EP3 (c) yaklaşımları için CFRP’de gerilme dağılımı	116
Şekil 4. 55	K20KGU kirişinde EPH1 (a) ve EPH2 (b) yaklaşımları için betonda birim şekil değiştirme dağılımı	117
Şekil 4. 56	K20KGU kirişinde EP1 (a), EP2 (b) ve EP3 (c) yaklaşımları için betonda birim şekil değiştirme dağılımı	117
Şekil 4. 57	K20KGU kirişinde EPH1 (a) ve EPH2 (b) yaklaşımları için CFRP’de birim şekil değiştirme dağılımı	118
Şekil 4. 58	K20KGU kirişinde EP1 (a), EP2 (b) ve EP3 (c) yaklaşımları için CFRP’de birim şekil değiştirme dağılımı	119
Şekil 4. 59	K20KGU kirişi için çekme hasarlarının dağılımı.....	120
Şekil 4. 60	K40R kirişi için yük –yer değiştirme ilişkisi.....	121
Şekil 4. 61	K40R kirişinde EPH1 (a) ve EPH2 (b) yaklaşımları için betonda gerilme dağılımı.....	122
Şekil 4. 62	K40R kirişinde EP1 (a), EP2 (b) ve EP3 (c) yaklaşımları için betonda gerilme dağılımı.....	122
Şekil 4. 63	K40R kirişinde EPH1 (a) ve EPH2 (b) yaklaşımları için betonda birim şekil değiştirme dağılımı	122
Şekil 4. 64	K40R kirişinde EP1 (a), EP2 (b) ve EP3 (c) yaklaşımları için betonda birim şekil değiştirme dağılımı	123
Şekil 4. 65	K40R kirişi için çekme hasarlarının dağılımı.....	123
Şekil 4. 66	K40KG00 kirişi için yük – yer değiştirme ilişkisi	124
Şekil 4. 67	K40KG00 kirişinde EPH1 (a) ve EPH2 (b) yaklaşımları için betonda gerilme dağılımı.....	125
Şekil 4. 68	K40KG00 kirişinde EP1 (a), EP2 (b) ve EP3 (c) yaklaşımları için betonda gerilme dağılımı	125
Şekil 4. 69	K40KG00 kirişinde EPH1 (a) ve EPH2 (b) yaklaşımları için CFRP’de gerilme dağılımı.....	126
Şekil 4. 70	K40KG00 kirişinde EP1 (a), EP2 (b) ve EP3 (c) yaklaşımları için CFRP’de gerilme dağılımı	126
Şekil 4. 71	K40KG00 kirişinde EPH1 (a) ve EPH2 (b) yaklaşımları için betonda birim şekil değiştirme dağılımı	127
Şekil 4. 72	K40KG00 kirişinde EP1 (a), EP2 (b) ve EP3 (c) yaklaşımları için betonda birim şekil değiştirme dağılımı	127

Şekil 4. 73	K40KG00 kirişinde EPH1 (a) ve EPH2 (b) yaklaşımları için CFRP’de birim şekil değiştirme dağılımı	128
Şekil 4. 74	K40KG00 kirişinde EP1 (a), EP2 (b) ve EP3 (c) yaklaşımları için CFRP’de birim şekil değiştirme dağılımı	129
Şekil 4. 75	K40KG00 kirişi için çekme hasarlarının dağılımı	129
Şekil 4. 76	K40KG70 kirişi için yük – yer değiştirme ilişkisi	130
Şekil 4. 77	K40KG70 kirişinde EPH1 (a) ve EPH2 (b) yaklaşımları için betonda gerilme dağılımı.....	131
Şekil 4. 78	K40KG70 kirişinde EP1 (a), EP2 (b) ve EP3 (c) yaklaşımları için betonda gerilme dağılımı	131
Şekil 4. 79	K40KG70 kirişinde EPH1 (a) ve EPH2 (b) yaklaşımları için CFRP’de gerilme dağılımı.....	132
Şekil 4. 80	K40KG70 kirişinde EP1 (a), EP2 (b) ve EP3 (c) yaklaşımları için CFRP’de gerilme dağılımı	132
Şekil 4. 81	K40KG70 kirişinde EPH1 (a) ve EPH2 (b) yaklaşımları için betonda birim şekil değiştirme dağılımı	133
Şekil 4. 82	K40KG70 kirişinde EP1 (a), EP2 (b) ve EP3 (c) yaklaşımları için betonda birim şekil değiştirme dağılımı	133
Şekil 4. 83	K40KG70 kirişinde EPH1 (a) ve EPH2 (b) yaklaşımları için CFRP’de birim şekil değiştirme dağılımı	134
Şekil 4. 84	K40KG70 kirişinde EP1 (a), EP2 (b) ve EP3 (c) yaklaşımları için CFRP’de birim şekil değiştirme dağılımı	134
Şekil 4. 85	K40KG70 kirişi için çekme hasarlarının dağılımı	135
Şekil 4. 86	K40KGU kirişi için yük – yer değiştirme ilişkisi.....	136
Şekil 4. 87	K40KGU kirişinde EPH1 (a) ve EPH2 (b) yaklaşımları için betonda gerilme dağılımı.....	136
Şekil 4. 88	K40KGU kirişinde EP1 (a), EP2 (b) ve EP3 (c) yaklaşımları için betonda gerilme dağılımı	137
Şekil 4. 89	K40KGU kirişinde EPH1 (a) ve EPH2 (b) yaklaşımları için CFRP’de gerilme dağılımı.....	137
Şekil 4. 90	K40KGU kirişinde EP1 (a), EP2 (b) ve EP3 (c) yaklaşımları için CFRP’de gerilme dağılımı	138
Şekil 4. 91	K40KGU kirişinde EPH1 (a) ve EPH2 (b) yaklaşımları için betonda birim şekil değiştirme dağılımı	139
Şekil 4. 92	K40KGU kirişinde EP1 (a), EP2 (b) ve EP3 (c) yaklaşımları için betonda birim şekil değiştirme dağılımı	139
Şekil 4. 93	K40KGU kirişinde EPH1 (a) ve EPH2 (b) yaklaşımları için CFRP’de birim şekil değiştirme dağılımı	140
Şekil 4. 94	K40KGU kirişinde EP1 (a), EP2 (b) ve EP3 (c) yaklaşımları için CFRP’de birim şekil değiştirme dağılımı	140
Şekil 4. 95	K40KGU kirişi için çekme hasarlarının dağılımı.....	141

ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 2. 1	Termoplastik reçinelerin 23°C sıcaklık altındaki bazı özellikleri 16
Çizelge 2. 2	23° C de polyester reçinelerin bazı özellikleri 17
Çizelge 2. 3	23°C de epoksi reçinelerin bazı özellikleri 19
Çizelge 2. 4	Vinil ester reçinelere ait bazı özellikler (23°C)..... 20
Çizelge 2. 5	Vinil ester, epoksi ve polyester reçinelerinin kıyaslanması 20
Çizelge 2. 6	Karbon liflerinin üretim derecesine göre bazı özellikleri 27
Çizelge 2. 7	PAN ve Pitch öncü maddeli liflerin özellikleri 28
Çizelge 2. 8	Bazı cam lifi türlerine ait özellikler 30
Çizelge 2. 10	CaCO ₃ ilave edilen polyester reçinenin özelliklerinde meydana gelen değişiklikler 33
Çizelge 2. 11	Güçlendirme elemanlarının tipik yoğunlukları 38
Çizelge 2. 12	Bazı FRP yapı malzemelerinin termal genleşme katsayıları..... 39
Çizelge 2. 13	Bazı FRP türlerine ait kesme dayanımları 43
Çizelge 4. 1	CFRP güçlendirme malzemesinin fiziksel ve mekanik özellikleri.....64
Çizelge 4. 2	Betonarme kirişlerde göçme türleri..... 65
Çizelge 4. 3	Çekirdek betonuna ait malzeme parametreleri..... 74
Çizelge 4. 4	Sanal malzeme kabulü yapılan örtü betonu için malzeme parametreleri 74
Çizelge 4. 5	Donatı çeliğine ait malzeme parametreleri 75
Çizelge 4. 6	CFRP güçlendirme malzemesine ait malzeme parametreleri..... 75
Çizelge 4. 7	Hesap ve gerilme – birim şekil değiştirme eğrilerinden hesaplanan kırılma enerjileri 79
Çizelge 4. 8	EP1 ve EP2 için betona ait malzeme parametreleri..... 89
Çizelge 4. 9	EP3 için betona ait malzeme parametreleri 90
Çizelge 4. 10	EPH2 için betona ait malzeme parametreleri..... 91
Çizelge 4. 11	Birinci grup numuneler için maksimum yük ve bu yüke karşı gelen yer değiştirme değerlerinin deney sonuçları ile kıyaslanması 94
Çizelge 4. 12	İkinci grup numuneler için maksimum yük ve bu yüke karşı gelen yer değiştirme değerlerinin deney sonuçları ile kıyaslanması 94
Çizelge 4. 12	İkinci grup numuneler için maksimum yük ve bu yüke karşı gelen yer değiştirme değerlerinin deney sonuçları ile kıyaslanması (Devamı)..... 95

LİFLİ POLİMERLER İLE GÜÇLENDİRİLMİŞ BETONARME KİRİŞLERİN SONLU ELEMENLAR YÖNTEMİ İLE HESABI

Mehmet AYAYDIN

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Bilge DORAN

Bu tez çalışması kapsamında, karbon lif takviyeli polimerler (CFRP) ile farklı şekillerde güçlendirilmiş dört noktalı eğilme etkisindeki betonarme kirişlerin, üç boyutlu doğrusal olmayan sonlu elemanlar analizi için farklı bünyesel modelleme teknikleri üzerinde çalışılmıştır. Önerilen modelleme teknikleri kullanılarak gerçekleştirilen nümerik analizler sonrasında betonarme kirişlere ait yük-yer değiştime eğrileri, Yıldız Teknik Üniversitesi'nin 2016-05-01-DOP06 no'lu Bilimsel Araştırma Projesi kapsamında gerçekleştirilen deney sonuçları ile karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Bu amaçla öncelikle günümüzde güçlendirme uygulamalarında yaygın olarak kullanılmakta olan FRP yapı malzemeleri, bu malzemelerin türleri, malzemeye ait fiziksel ve mekanik özellikler ve üretim teknikleri ile ilgili bilgiler aktarılmıştır. Daha sonra betonarme kirişlerde geleneksel olarak gerçekleştirilen onarım ve güçlendirme teknikleri ile birlikte FRP ile yapılan güçlendirme uygulamaları incelenmiştir. Ayrıca sayısal modelleme teknikleri üzerinde çalışılmıştır.

Sayısal modelleme çalışmasının ilk kısmında sanal malzeme modeli kullanılmıştır. Önerilen malzeme modeli, plastisite ve hasar mekaniği yaklaşımlarını birlikte dikkate alan elasto-plastik hasar mekaniğinden türetilmiş ve gerekli malzeme parametreleri kullanılarak betonarme kirişlerin gerilme şekil değiştirme davranışları temsil edilmeye

alışılmıştır. Bu kapsamda malzemenin elastik ötesi davranışı plastisite teorisi ile ifade edilirken, malzeme bünyesinde oluşan ve kademeli olarak artan rijitlik kaybı izotropik hasar bağıntıları ile açıklanmıştır. Plastik şekil değiştirme, akma yüzeyindeki çekme ve basınc etkisini ayrı ayrı dikkate alan geliştirilmiş von Mises plastisite modeli ile hasar mekaniği ise Oliver vd. (1990) izotropik hasar modeli kullanılarak ifade edilmiştir. Nümerik çalışmanın ikinci kısmında, ilk olarak Lubliner vd. (1989) tarafından önerilen daha sonra Lee ve Fenves (1998) tarafından geliştirilen plastisite temelli izotropik hasar mekaniği yaklaşımı olan CDP bünyesel malzeme modeli kullanılmıştır. Çekme etkisinde çatlama, basınc etkisinde ezilme hasarını ayrı ayrı dikkate alma zelliliğine sahip olan bu malzeme modeli ile elastoplastik hasar yaklaşımı ve hasar etkisinden bağımsız olarak elastoplastik yaklaşım ayrı ayrı kullanılmış ve betonarme kirişlere ait davranışlar tahmin edilmeye çalışılmıştır. Söz konusu modelleme teknikleri kullanılarak deneyleri geekleştirilmiş toplamda 8 adet betonarme kirişe ait sayısal modeller oluşturulmuş ve kirişlere ait eğilme davranışı ve yük-yer değiştirme ilişkileri deneysel olarak elde edilmiş veriler ile karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: CFRP ile güçlendirme, doğrusal olmayan sonlu eleman analizi, elasto-plastik hasar modeli, betonarme kirişler, bünyesel modelleme teknikleri

**FINITE ELEMENT ANALYSIS FOR REINFORCED CONCRETE BEAMS
STRENGTHENED WITH FIBRE REINFORCED POLYMER**

Mehmet AYAYDIN

Department of Civil Engineering

MSc. Thesis

Adviser: Prof. Dr. Bilge DORAN

In this thesis, different constitutive modeling techniques for the analysis of three dimensional nonlinear finite elements analysis of reinforced concrete (RC) beams which state under four-point bending effect strengthened with carbon fibre reinforced (CFRP) polymers in different shapes has been studied. The load-displacement curves for reinforced concrete (RC) beams obtained from the numerical analysis with different modeling techniques have been compared with the experimental results of Yıldız Technical University Scientific Research Project (project no: 2016-05-01-DOP06). For this purpose, a brief explanations about FRP construction materials which are widely used in strengthening applications nowadays, types of these materials, physical and mechanical properties and production techniques are presented. Strengthening applications of reinforced concrete (RC) beams with FRP were investigated along with the conventional repair and strengthening techniques. In the numerical modeling section, different modeling methods have been proposed for reinforced concrete beams.

In the first part of the numerical modeling study, virtual material model was used. The proposed material model is derived from the elasto-plastic damage mechanics which consider the plasticity and damage mechanics approaches together and tried to be represent the stress-strain behavior of reinforced concrete beams by using the

necessary material parameters. In this context, behavior of the material beyond the elastic range was predicted by the plasticity theory, while the reduction of stiffness which occurs in the material and gradually increases was explained by the damage relations. For the plastic strain, modified von Mises plasticity model which is considering the tensile and compressive effect on yield surface separately was used and Oliver et al. (1990) isotropic damage model was used for the expression of damage mechanism. In the second part of the numerical study, Concrete Damaged Plasticity constitutive material model which is consider plasticity-based isotropic damage mechanics approach was used. This material model proposed by Lubliner et al. (1989) firstly and then developed by Lee and Fenves (1998). With this material model which has the property of taking into consideration the cracking damage in tension and crushing damage in compression separately, the elastoplastic damage approach and independent of the damage effect, the elastoplastic approach has been used and the behaviors of the reinforced concrete beams have been tried to be estimated. Numerical models of 8 reinforced concrete beams were created by using the proposed modeling techniques and the flexural behavior and load-displacement relations of the beams were compared with the experimentally obtained data.

Keywords: CFRP strengthening, nonlinear finite element analysis, elasto-plastic damage model, reinforced concrete beams, constitutive modeling techniques

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Lifli polimer (FRP) kompozit yapı malzemeleri ilk olarak 1960'lı yıllarda havacılık ve uzay çalışmalarında kullanılmaya başlanmıştır. Bu alanda sergiledikleri başarılı performans sebebiyle bu malzemeler zamanla diğer sektörlerde de kendisine kullanım alanı bulmuştur. İnşaat mühendisliği alanındaki kullanımı ise 1980'li yıllardan itibaren yaygınlaşmaya başlamıştır. Günümüzde yapısal elemanların onarım ve güçlendirilmesi uygulamalarında yaygın olarak kullanılmakta olan FRP yapı malzemeleri yüksek mukavemet değerleri, düşük ağırlıkları, kısa sürede ve kolay uygulanabilirlikleri, korozyon ve alkali etkisi gibi çevresel etkenlere karşı yüksek direnç gösterebilme yetenekleri sayesinde son yıllarda geleneksel güçlendirme yöntemlerine kıyasla daha fazla tercih edilmektedir.

Özellikle betonarme kirişlerde dış yüzeyden CFRP plaka, levha, şerit veya kumaş ile yapılan güçlendirme tekniği birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir [1-4]. Gerçekleştirilen nümerik ve deneysel çalışmalar neticesinde CFRP ile güçlendirilen betonarme kirişlerde eğilme ve kesme dayanımı, rijitlik, süneklik ve yük taşıma kapasitesi gibi özelliklerde güçlendirilmemiş elemanlara göre önemli miktarda iyileşme gözlemlenmiştir [5-10].

Bu tez çalışması kapsamında, CFRP kumaşlar ile farklı şekillerde güçlendirilen 4 noktalı eğilme etkisindeki betonarme kirişler için doğrusal olmayan sonlu eleman analizleri gerçekleştirilmiş ve kirişlere ait gerçek davranış sayısal modelleme teknikleri ile tahmin

edilmeye çalışılmıştır. Sayısal modeller, önerilen bünyesel malzeme modelleri ve hasar mekaniği yaklaşımları ile oluşturulmuştur.

1.1 Literatür Özeti

Bu bölümde literatürde yer alan hasar mekaniği yaklaşımı ile önerilen bazı hasar modelleri ve FRP güçlendirme malzemesi ile farklı yöntemler kullanılarak güçlendirilmiş betonarme kirişlerin davranışlarını temsil eden sayısal modelleme çalışmaları aktarılmıştır.

Oliver vd. [11] araştırmaları kapsamında, betonun farklı gerilme veya birim şekil değiştirme koşulları için çekme etkisindeki kırılma ve birim şekil değiştirme lokalizasyonuna özellikle dikkat ederek göçme mekanizmasının simülasyonunu sağlamak amacıyla izotropik hasar modellerinin türetilmesini amaçlamıştır. Çalışma sonucunda elde edilen algoritmalar büyük ölçekli hesaplamalar için basit ve kullanılabilir olarak değerlendirilmiştir.

Lee ve Fenves [12] yaptıkları araştırma kapsamında, beton için döngüsel ve monotonik yük etkisinde sürekli hasar mekaniği ve plastisite temelinde bir plastik hasar modeli geliştirmeyi amaçlamıştır. Önerilen modelde Lubliner vd. [13] tarafından geliştirilmiş olan ve çekme ve basınç durumları için iki farklı hasar değişkeni tanımlanan Barcelona modelinde önerilen akma fonksiyonu, çoklu hasar değişkenleri kullanılarak modifiye edilmiştir. Gerçekleştirilen deneyler ve nümerik analizler sonrasında sonuçların uyumlu olduğu ve önerilen modelin kullanılabilir olduğu gözlemlenmiştir.

Comi ve Prego [14] araştırmalarında beton için bir izotropik hasar modeli önermiştir. Önerilen modelde betonun çekme ve basınç etkisindeki davranışı için iki farklı hasar değişkeni bulunmaktadır. Nümerik ve deneysel veriler göz önüne alındığında önerilen model ile hasar etkenli rijitlikte meydana gelen düşüş, maksimum gerilmeye ulaştıktan sonra malzemenin dayanımında meydana gelen azalma ve çekme ve basınç etkisinde malzemenin göstermiş olduğu davranış farklılığı tespit edilmiştir. Modelin betonun hasar etkisindeki davranışını temsil edebileceği belirtilmiştir.

Oller vd. [15] betonun doğrusal olmayan sonlu eleman analizi için geliştirdikleri bir plastik hasar modelini incelemiştir. Standart plastisite teorisini içeren, elastik ve plastik rijitlik düşüşünü dikkate alan modelin akma fonksiyonu ve hasar parametreleri çalışmada verilmiş ve önerilen model ile bir örnek uygulama yapılarak doğruluğu gösterilmiştir.

Mazars [16] araştırmasının ilk bölümünde mikro düzeyde betonun bazı özelliklerini inceleyip bu düzeyde oluşan hasarın, malzemenin mekanik davranışının ana olgusu olduğunu belirlemiştir. Daha sonra ise çekme etkisi için (d_t) ve basınç etkisi için (d_c) iki farklı hasar parametresi kullanan bir izotropik elastik hasar modeli önermiştir. Termodinamik çerçevede oluşturulan model ile lineer elastik hasar mekaniği ve kırılma mekaniğinin kalibrasyonu neticesinde çatlak oluşumunun ve gelişimin tarif edilebileceği belirlenmiştir.

Akram vd. [17] çalışmalarında deneyleri tamamlanmış olan 10 adet FRP ile güçlendirilmiş betonarme kirişe ait sayısal modelleri CASTEM yazılımı ile oluşturmuş ve kirişlere ait yük yer değiştirme davranışları ile hasar ve çatlak oluşumlarını incelemiştir. Beton için bir başka çalışma kapsamında önerilen izotropik hasar modeli kullanılmıştır. Modellerde donatı çeliğinin elastik ve tam plastik, beton ile donatı ara yüzünün elastoplastik ve FRP nin lineer elastik davranışı esas alınmıştır. Çalışma kapsamında CFRP ile 3 farklı şekilde (U şeklinde tam sargı, kiriş eğilme bölgesi yan yüzeylerinin yarısına kadar yapılan kısmi sargı ve sadece eğilme bölgesine yapılan sargı) güçlendirme yapılmış kirişler ve güçlendirme malzemesinin türünün kirişin davranışına etkisini belirlemek amacıyla GFRP ile sadece eğilme bölgesi güçlendirilmiş kirişler modellenmiştir. Sonlu eleman analizi sonrasında, sayısal modeller ile deneysel veriler karşılaştırılmış ve sonuçların uyumlu olduğu kanıtlanmıştır.

Bsusu vd. [18] araştırmaları kapsamında, CFRP levha ile güçlendirilmiş eğilme etkisindeki betonarme kirişlerde, göçme ve hasar oluşumunu gözlemlemek için 3B doğrusal olmayan sonlu eleman analizi gerçekleştirmiştir. Bu amaçla başka bir çalışmada elde edilen deneysel veriler ve malzeme özelliklerinin sonlu eleman modelleri ile kalibrasyonu sağlanmıştır. Sayısal modeller ABAQUS yazılımı kullanılarak

oluşturulmuştur. Betonun hasar plastisitesi, beton ve CFRP arasındaki ayrışmayı modellemek için kohezyonlu davranış ve CFRP güçlendirme levhalarının doğrusal olmayan Hashin hasar modeli dikkate alınmıştır. Gerçekleştirilen analiz sonucunda, literatürden elde edilen deneysel veriler ile uyumlu sonuçlar elde edilmiş ve modeller ile göçme ve hasar oluşumu doğru bir şekilde tahmin edilebilmiştir.

Al-Rousan [19] çalışmasında betonarme kirişlerde farklı şekil ve miktarda CFRP kullanılması durumunda; eğilme momenti kapasitesi, maksimum yer değiştirme, çekme etkisinde CFRP nin şekil değiştirme yeteneği, betonun basınç etkisindeki şekil değiştirmesi ve betonarme kirişlerin enerji absorbe etme yeteneğini araştırmıştır. Bu kapsamda bir doktora tez çalışmasından elde edilen deneysel veriler ile ANSYS yazılımı kullanılarak oluşturulan sayısal modellere ait doğrusal olmayan sonlu eleman analizleri karşılaştırılmıştır. Beton için William ve Warnke bünyesel malzeme modeli ve SOLID65 sonlu elemanı kullanılmıştır. Güçlendirme donatısı için LINK8 eleman, CFRP güçlendirme elemanı için ise SOLID46 eleman kullanılarak nümerik modeller oluşturulmuştur. Yakınsama çalışmasının tamamlanmasından sonra deney düzeneğini temsil edecek şekilde 4 noktalı eğilme etkisinde sayısal modellerin analizi gerçekleştirilmiş ve deneysel veriler sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Venkateswarlu ve Natarajan [20] araştırmaları kapsamında, lif takviyeli kompozitler kullanarak güçlendirilmiş betonarme kirişlerin davranışını incelemek amacıyla nümerik analizler gerçekleştirmiştir. Çalışmada 130 mm genişlik, 200 mm yükseklik ve 2500 mm uzunluğa sahip, 1 adet güçlendirilmemiş kontrol kirişi ve 12 adet güçlendirilmiş kiriş numunesine ait sayısal modeller ABAQUS yazılımı kullanılarak oluşturulmuştur. Betonarme kirişlerde GFRP ve CFRP sadece eğilme bölgesine farklı uzunluk ve tabaka sayısı göz önüne alınarak uygulanmıştır. Modellerde beton 8 düğüm noktalı C3D8R, CFRP ve GFRP güçlendirme malzemesi S8R, donatı çeliği ise 2 düğüm noktalı T3D2 elemanı ile temsil edilmiştir. Gerçekleştirilen analizler sonrasında, güçlendirme elemanının tabaka sayısının artması durumunda, yük taşıma kapasitesi ve yer değiştirme kontrolü kapasitesinin arttığı ve CFRP kullanılması durumunda GFRP güçlendirme malzemesine göre daha iyi bir performans elde edildiği belirlenmiştir.

Tao ve Chen [21] yapmış oldukları çalışmada, beton ile FRP arasındaki bağlanma davranışını incelemişlerdir. Bu amaçla 45 mm genişlikteki prizma numunelerin basit kesme testinin sonlu eleman modelleri ABAQUS yazılımı ile oluşturulmuştur. Çalışmada beton için bir hasar modeli önerilmiş ve FRP ile beton arasındaki bağlanma ilişkisi elde edilmiştir. Önerilen modelde, hasarın etkisi rijitlikteki azalmadan ziyade plastik şekil değiştirme olarak belirlenmiştir. Gerçekleştirilen analizlerin ardından önerilen hasar modelinin FRP ile beton arasındaki bağ ilişkisini doğru bir şekilde tahmin edebildiği belirlenmiştir. Ayrıca çalışma içeriğinde literatürdeki diğer hasar modellerinden de bahsedilmiş ve bu modellerin tahminleri, test verileri ile karşılaştırılmıştır.

Coronado ve Lopez [22] araştırmalarında, FRP ile güçlendirilmiş beton elemanların göçme türlerinden birisi olan sıyrılma durumunu tahmin edebilmek için sayısal ve deneysel yöntemleri irdelemişlerdir. Bu amaçla çatlak şeridi boyunca yumuşama eğrisi elde edebilmek için üç noktalı eğilme testi yapmışlardır. Çalışmada beton için bir plastik hasar modeli kullanılmıştır. Sayısal modeller ABAQUS yazılımı ile oluşturulmuş, beton, epoksi ve FRP düzlem şekil değiştirme elemanı olarak modellenmiştir. İlgili malzemelere ait özellikler çalışma kapsamında yapılan deneylerden alınmıştır. Sonlu eleman hassasiyeti ve yakınsama çalışmasının ardından sonuçların sonlu eleman sayısından bağımsız hale gelmesi sağlanmıştır. Oluşturulan sayısal modeller yardımı ile çatlak şeridinin kırılma enerjisinin ve çekme dayanımı ile tanımlanan yumuşama eğrisinin sıyrılma göçmesini tahmin edebileceği belirlenmiştir.

Obadiat vd. [23] çalışmalarında CFRP ile çekme bölgesi farklı uzunluklarda güçlendirilmiş ve deneysel çalışması yapılmış kiriş numunelerine ait sonlu eleman modelleri oluşturmuştur. Araştırma kapsamında betonun çekme etkisinde çatladığı ve basınç etkisinde ise ezildiğini varsayan bir plastik hasar modeli kullanılmıştır. CFRP nin lineer elastik izotropik veya ortotropik malzeme olması ve beton ile CFRP arasında tam veya kohezyonlu kenetlenme olması durumlarının farklı varyasyonları incelenmiştir. Sonlu eleman modellerinde, beton, donatı çeliği ve CFRP 4 düğüm noktalı lineer tetrahedral eleman, ara yüz tabakası ise üç boyutlu 8 düğüm noktalı kohezyon elemanı ile tanımlanmıştır. Doğrusal olmayan analizler sonrasında kirişlere ait yük yer değiştirme

eğrileri, çatlak oluşumları ve kırılma biçimleri belirlenmiş ve deneysel veriler ile kıyaslanmıştır.

Hawileh [24] araştırması kapsamında, deneyleri başka bir çalışma tarafından gerçekleştirilen 4 noktalı eğilme etkisinde yakın yüzey montajı adı verilen yöntemle sadece eğilme bölgesi CFRP ile güçlendirilmiş betonarme kirişlerin, eğilme etkisindeki davranışı ve yük yer değiştirme ilişkisini incelemek amacıyla üç boyutlu sayısal modeller oluşturmuştur. Çalışmada sonlu eleman yöntemini kullanan ANSYS yazılımı tercih edilmiştir. Sayısal modeller oluşturulurken beton ve dolgu malzemeleri için 8 düğüm noktalı SOLID65 eleman, donatı çeliği ve CFRP çubuklar için 2 düğüm noktalı LINK8 eleman, mesnetler için ise SOLID45 eleman kullanılmıştır. Beton ile çelik donatı ve CFRP çubuklar ve beton ile dolgu malzemesi arasındaki etkileşim sırasıyla COMBIN14 yay elemanı ve INTER205 ara yüz elemanı kullanılarak sağlanmıştır. Betonun doğrusal olmayan davranışı William ve Warnke beton modeli, donatı çeliğinin elastik ötesi davranışı ise von Mises akma kriteri kullanılarak belirlenmiştir. Yapılan analizlerin ardından önerilen sayısal modeller ile deneysel verilerin uyumlu olduğu tespit edilmiş ve söz konusu nümerik modellerin kullanılabilir olduğu belirlenmiştir.

Omran ve El-Hacha [25] çalışmalarında 200×400×5150 mm boyutlarında, farklı oranlarda ön gerilme etkisindeki CFRP şeritler ile yakın yüzey montajı tekniğini kullanarak yalnızca eğilme bölgesi güçlendirilmiş 4 kiriş için ANSYS yazılımı aracılığıyla sonlu eleman modelleri geliştirmiştir. Yapılan analizler sonrasında deney ve sayısal modellere ait açıklık ortası yük yer değiştirme ilişkisi, kirişlere ait kırılma biçimleri ve nihai yük değerleri karşılaştırılmıştır. Önerilen model ile ön germe etkisindeki CFRP şeritler ile güçlendirilmiş betonarme kirişlerin davranışının belirlenebileceği kanıtlanmıştır.

Chen vd. [26] araştırmalarında FRP ile güçlendirilmiş betonarme kirişlerde beton ile enine donatı, çekme donatısı ve FRP arasındaki ara yüz kabullerinin etkilerini ayrı ayrı belirlemek amacıyla ANSYS sonlu eleman yazılımı ile modelleme yaparak yer değiştirme kontrollü yükleme yapmış ve güçlendirilmiş kirişlerin doğrusal olmayan analizlerini gerçekleştirmiştir. Çalışma neticesinde beton ile FRP arasında tam kenetlenme olması durumunda, kirişin kesme kapasitesinin deneysel verilere göre fazla olduğu, eğilme

donatısı ile beton arasındaki kenetlenmenin kesme kuvveti kapasitesini, çatlakların dağılımını ve açısını etkilediği ve enine donatı ile beton arasındaki bağın güçlü olmasının kesme kapasitesini farklı şekillerde etkileyebileceği tespit edilmiştir.

Sasmal vd. [27] çalışmalarında FRP ile güçlendirilen betonarme kirişlerin doğrusal olmayan davranışını ANSYS sonlu eleman yazılımını kullanarak belirlemiş ve literatürden edindikleri deney verileri ile kıyaslamıştır. Sayısal modellerde beton için SOLID65, donatı çeliği için LINK8, mesnetler için SOLID45, FRP için ise SHELL41 ve SOLID46 sonlu eleman tipleri kullanılmıştır. Araştırma kapsamında epoksi ve ara yüz tabakasının varlığı, FRP nin farklı sayıda tabakalardan oluşması ve FRP için kullanılan sonlu eleman tipinin farklı olması gibi değişkenlerin kirişlerin davranışına etkisi incelenmiştir. Gerçekleştirilen analizler sonrasında dikkate alınan değişkenler ile birlikte kirişlerin yük yer değiştirme ilişkisi, çatlakların dağılımı belirlenmiş ve deney sonuçları ile kıyaslanmıştır.

Kotynia vd. [28] yaptıkları araştırmalarında, CFRP ile dıştan farklı şekillerde (U ve L) güçlendirilmiş 4,2 m açıklığa sahip 10 adet betonarme kirişin yük - yer değiştirme ilişkisi, kırılma biçimleri, nihai yük taşıma kapasiteleri, yük - şekil değiştirme ilişkileri ve CFRP ile beton arasındaki ara yüz davranışını belirlemek için deney verileri ve sayısal model sonuçlarını kıyaslamıştır. Sayısal modellerde betonun ve beton ile CFRP arasındaki ara yüzün davranışı sırasıyla doğrusal olmayan hipoelastik ve kayma kenetlenme modeli ile temsil edilmiştir. Modeller ADINA sonlu eleman yazılımı ile oluşturulmuş ve doğrusal olmayan analizler sonrasında deney verileri ile paralel sonuçların elde edildiği belirlenmiştir.

Martinelli vd. [29] çalışmalarında mekanik bağlantılı FRP ile eğilme bölgesi güçlendirilmiş kirişlerin davranışını incelemiştir. Literatürden alınan deneysel verileri doğrulamak amaçlı bir sonlu eleman modeli geliştirilmiş, FRP ile beton arasındaki kayma-gerilme ilişkisi, donatı çeliğinin gerilme-şekil değiştirme ilişkisi ve çatlak gelişimi ile sonuçlanan çekme rijitliğinin, güçlendirilmiş kirişlerin davranışı üzerindeki etkisi sayısal modeller ve deneysel veriler kullanılarak belirlenmiştir.

Soliman vd. [30] eğilme bölgesi yakın yüzey montajı (NSM) tekniği kullanılarak FRP ile güçlendirilmiş betonarme kirişlerin davranışını araştırmıştır. Çalışma kapsamında toplam

20 kiriş deneyi yapılmıştır. Kullanılan donatı çeliği miktarı, FRP çubukların cinsi (CFRP ya da GFRP), FRP çubuğunu kenetlenme uzunluğu, FRP donatı çapı ve örtü betonu içerisinde açılan oluğun ebatları gibi değişkenlerin kirişlerin davranışı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Çalışmanın ikinci kısmında yer değiştirme kontrollü üç boyutlu doğrusal olmayan sonlu eleman analizi gerçekleştirilmiş ve deneysel veriler ile sayısal modeller kıyaslanmıştır. Yük-yer değiştirme ve yük-şekil değiştirme ilişkisi, nihai yük taşıma kapasitesi ve göçme biçimleri açısından deney sonucunda elde edilen sonuçlar ile sayısal model sonuçlarının örtüştüğü belirtilmiştir.

Abdesselam [31] çalışmasında artan eğilme yükü etkisinde, dıştan FRP ile güçlendirilmiş betonarme kirişin doğrusal olmayan sonlu eleman analizini gerçekleştirmiştir. Basınç ve çekme etkisindeki beton için elasto plastik model ile birlikte akma yüzeyi ve kırılma sınırını belirlemek amacıyla sırasıyla Drucker–Prager ve Rankine kırılma kriterleri kullanılmıştır. Çatlamış betonun davranışı yayılı çatlak modeli, donatı çeliğinin davranışı ise bilineer izotropik pekleşme modeli ve von Mises akma kriteri ile temsil edilmiştir. Önerilen sonlu eleman modeli ile yapılan analizler neticesinde, FRP ile çekme bölgesi güçlendirilmiş kirişin eğilme kapasitesi ve rijitliğinin arttığı ayrıca tabaka sayısındaki artışın eğilme kapasitesini etkilediği (tek kat FRP ile %7 artış sağlanırken, dört tabaka kullanıldığında %27 artış gözlemlenmiştir) belirlenmiştir.

Jankowiak [32] farklı şekillerde ön yükleme etkisine maruz kalan, CFRP ile eğilme bölgesi güçlendirilmiş betonarme kirişlerde ön yüklemenin etkinliğini araştırmıştır. Araştırma kapsamında dört noktalı eğilme yükü etkisindeki kiriş deneyleri gerçekleştirilmiş ve doğrusal olmayan sonlu eleman modelleri ile deney sonuçları kıyaslanmıştır. Sayısal modellerde şu kabuller yapılmıştır; beton için plastik hasar modeli, donatı çeliği için izotropik pekleşmeli lineer elasto plastik malzeme kabulü, CFRP için lineer elastik izotropik malzeme kabulü ve CFRP ile beton arasında tam kenetlenme ilişkisi. Araştırma sonucunda en etkili güçlendirmenin ön yükleme yapıldıktan sonra sağlandığı belirtilmiş ve beton için kullanılan hasar yaklaşımının etkili ve güvenilir olduğu belirtilmiştir.

Hawileh vd. [33] farklı konum ve ebatlardaki ağ açıklıkları içeren ve farklı biçimlerde CFRP kompozit tabakalar ile kesme güçlendirilmesi yapılmış betonarme derin kirişler için

doğrusal olmayan üç boyutlu sonlu elman modelleri geliştirmiştir. Sonlu eleman modellerinde beton için katı (solid) elemanlar, CFRP için kabuk (shell) elemanlar, donatı çeliği için link elemanlar kullanılarak fiziksel modeller temsil edilmeye çalışılmıştır. Beton ile CFRP arasındaki kenetlenme durumu ara yüz elemanları ile sağlanmıştır. Sonlu eleman modelleri ile literatürden deneysel verileri alınan CFRP ile güçlendirilmiş ve güçlendirilmemiş ağ açıklıklı derin kirişlerin davranışı kıyaslanmıştır. Önerilen model ile öngörülen göçme yükü ve yer değiştirme kapasitesi sırasıyla %3,2 ve %14 hata sınırında tahmin edilebilirken, güçlendirilmiş kirişlerin yük taşıma kapasitesi güçlendirilmemiş kirişlere göre %74 artmıştır. Sonuç olarak sonlu eleman modelinin maliyet ve zaman açısından deneysel çalışmalara alternatif olabileceği belirtilmiştir.

1.2 Tezin Amacı

Betonarme yapılarda taşıma kapasitesi, eğilme ve/veya kesme dayanımı, süneklik ve rijitlik gibi özelliklerin ilgili yönetmeliklerin kuralları çerçevesinde tasarım aşamasında dikkate alınması ve tasarımlarının bu kurallara uyularak yapılması gerekmektedir. Bu türden özellikleri karşılayamayan yapılar ya yıkılıp yeniden yapılmalı ya da eğer performans seviyesi güçlendirmeye olanak sağlıyorsa söz konusu yapıların güçlendirilmesi seçeneği tercih edilmelidir. Güçlendirme bir betonarme yapının kolon, döşeme ve kiriş gibi elemanlarına uygulanabilmektedir. Geleneksel olarak yapılan birçok güçlendirme tekniğinin yanında 1980'li yıllardan itibaren güçlendirme uygulamalarında kullanılmakta olan FRP yapı malzemeleri ile güçlendirme, bu alanda önemli bir konum edinmiştir ve günden güne daha da önem kazanmaktadır. Birçok türde FRP yapı malzemesi bulunurken, mühendislik yapılarının onarım ve güçlendirilmesinde karbon, cam ve aramit esaslı kompozit malzemeler en fazla tercih edilen türlerdir. Bu malzemeler donatı çubuğu, şerit, plaka, levha veya kumaş formunda olabilirken yüzey dışı veya yakın yüzey montaj teknikleri ile güçlendirme uygulamalarında farklı şekillerde kullanılabilir.

Bu tez çalışması kapsamında, karbon lifli polimer (CFRP) kumaş kullanılarak güçlendirilmiş ve kontrol kirişlerine ait sayısal modeller, iki farklı bünyesel modelleme tekniği ile gerekli malzeme parametrelerinin kullanılması neticesinde oluşturulmuştur.

Bünyesel modelleme çalışmasının ilk kısmında LUSAS [34] yazılımı kullanılarak dört noktalı düşey yük etkisindeki betonarme kirişlerin doğrusal olmayan sonlu eleman analizleri, betonun çekme ve basınç etkisindeki davranışını ayrı ayrı dikkate alan geliştirilmiş von Mises plastisite modeli ve Oliver izotropik hasar modelinin kalibrasyonunu ile yük kontrollü olarak gerçekleştirilmiştir. İkinci kısımda ise ABAQUS [35] yazılımı kullanılarak beton için önerilmiş olan CDP bünyesel malzeme modeli kullanılarak elastoplastik ve elastoplastik hasar yaklaşımları için ayrı ayrı çözüm elde edecek şekilde betonarme kirişlerin yer değiştirme kontrollü olarak doğrusal olmayan analizleri gerçekleştirilmiştir. Her iki bünyesel modelleme yöntemi ile elde edilen analiz sonuçları neticesinde betonarme kirişlerin yapısal davranışları belirlenmiş ve yük-yer değiştirme ilişkileri deneysel olarak elde edilmiş sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.

1.3 Hipotez

Bu tez çalışması kapsamında, karbon lifili polimer (CFRP) kumaşlar ile farklı şekillerde güçlendirilmiş betonarme kirişler için üç boyutlu sonlu eleman modelleri oluşturulmuştur. İki farklı bünyesel modelleme yönteminin kullanıldığı çalışmanın ilk kısmında, elasto-plastik hasar yaklaşımı kullanılmıştır. Bu kapsamda, betonun elastik ötesi davranışını belirlemek için çekme ve basınç gerilmeleri etkisinde malzemenin davranışındaki farklılıkları ayrı ayrı dikkate alan geliştirilmiş von Mises akma kriteri kullanılırken, çekme gerilmeleri etkisiyle oluşan mikro düzeydeki çatlakların malzeme bünyesinde ilerlemesi ve büyümesi neticesinde malzemede meydana gelen rijitlik kaybı Oliver vd. (1990) tarafından önerilen izotropik hasar modeli kullanılarak tahmin edilmiştir. Bünyesel modellemenin ikinci kısmında ise Lubliner vd. (1989) tarafından beton için önerilen ve daha sonra Lee ve Fenves (1998) tarafından geliştirilen CDP malzeme modeli kullanılmıştır. Çekme etkisinde çatlama, basınç etkisinde ezilme hasarlarını ayrı ayrı dikkate alma yeteneklerine sahip olan bünyesel malzeme modeli plastisite temelinde bir izotropik hasar modeli kullanmaktadır. Bu malzeme modeli elastoplastik hasar yaklaşımı yanında elastoplastik yaklaşımla da çözüm yapılmasına imkan tanımaktadır. Bu nedenle bünyesel modelleme çalışmasının bu kısmında beton için önerilen CDP malzeme modeli ile betonun hem elastoplastik hem de elastoplastik

hasar davranışlarını dikkate alarak ayrı ayrı analizleri gerçekleştirilmiştir. Önerilen bünyesel modelleme teknikleri için ilgili malzeme parametreleri kullanılarak dört noktalı eğilme yükleri etkisinde gerçekleştirilen doğrusal olmayan analizler neticesinde kirişlere ait davranışların belirlenebileceği, elde edilen yük – yer değiştirme sonuçlarının deneysel olarak elde edilmiş sonuçlar ile karşılaştırıldığında uyumlu olduğu anlaşılmıştır.



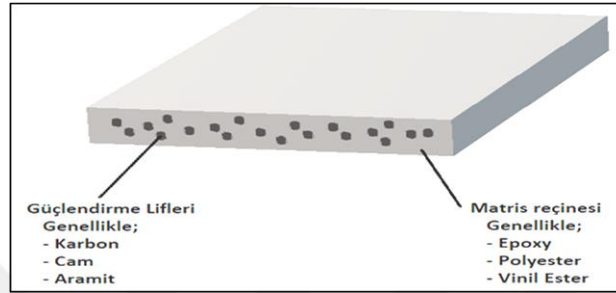
LİF TAKVİYELİ YAPI MALZEMELERİ

Lif takviyeli polimerler (FRP) yapı malzemesi olarak otomotiv, uzay, havacılık, savunma sanayii gibi birçok sektörde geniş bir kullanım alanına sahiptir. Günümüzde ise özellikle inşaat mühendisliği alanındaki güçlendirme uygulamalarında sıkça karşımıza çıkmaktadır. Bu alanda betonarme yapılar için birçok güçlendirme yöntemi bulunmaktadır. Çelik plakalarla güçlendirme, betonarme mantolama, çelik donatı sargılama yöntemleri bu yöntemler arasında yer alan geleneksel güçlendirme teknikleridir. FRP yapı malzemelerinin bu alandaki performansı anlaşıldıktan sonra, bu malzemeler ile yapılan güçlendirme uygulamaları geleneksel yöntemlerin yerini almaya başlamıştır. Maliyet açısından FRP yapı malzemelerinin maliyetleri çeliğe göre fazla olabilir ancak FRP kompozitlerin yüksek mekanik özellikleri, çevresel etkilere karşı dirençleri (örn; korozyon, alkali etkisi, nem), kolay uygulanabilir olması, hafifliği vb. özellikleri bu alanda FRP ye yönelişin en önemli etkenlerindendir.

2.1 Kompozit Malzeme

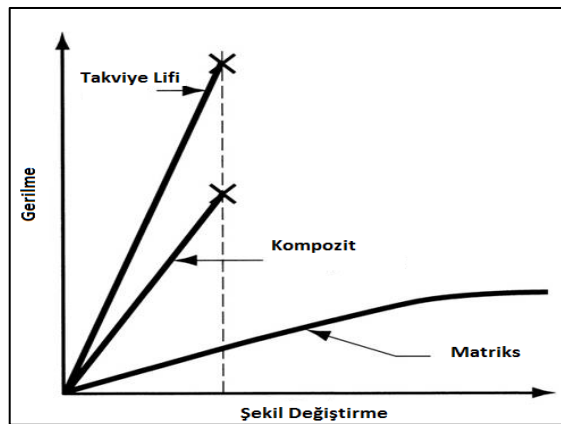
Kompozit genel tanımı itibariyle iki ya da daha fazla yapı malzemesinin bir araya getirilmesi ile birlikte kendi bileşenlerinden farklı özellikler sergileyen ve belirli bir amaç için istenen performansı sağlayacak şekilde üretilen yapı malzemeleridir (Şekil 2.1). Kompozit malzeme sınıfı içerisinde yer alan lif takviyeli polimerler (FRP) ile ilgili yapılan araştırmalar neticesinde özellikle inşaat mühendisliği uygulamaları için bu malzemelerin performans açısından çelik ve alüminyum gibi geleneksel metallere göre

birçok yönden daha avantajlı olduğu anlaşılmıştır. FRP malzemelerini oluşturan güçlendirme lifleri ve reçine çok farklı karakteristik özelliklere sahipken, bir araya getirilip kompozit malzemeyi oluşturduklarında yüksek mukavemet, korozyona karşı direnç, yangına karşı yüksek performans, dayanıklılık, yüksek tokluk, darbe direnci, alkali etkisi vs. gibi özel durumların her biri için kullanım imkanı sunmaktadır. Şekil 2.2’de reçine, güçlendirme elemanı ve kompozit malzeme için temsili olarak gerilme-şekil değiştirme ilişkisi verilmiştir.



Şekil 2. 1 Kompozit malzemenin şematik olarak temsili

Lif takviyeli kompozitlerin temel bileşenleri güçlendirme lifleri ve bu lifleri sararak bağlayıcı görevi üstlenen matris reçinesidir. Ayrıca kompozit malzeme içerisinde bulunabilecek diğer bileşen maddeleri çeşitli katkıları ve dolgu malzemeleridir. Kaplamalar ve katkı malzemeleri liflerin matris reçinesi içerisinde ıslanmasını sağlar ve bunun yanında lif matris ara yüzü boyunca bağ oluşumuna katkıda bulunurlar. Tabi en önemli görevlerinden birisi de lifler ile reçine arasındaki yük aktarımını kolaylaştırmasıdır. Dolgu malzemelerinin rolü ise malzeme maliyetini düşürmek ve boyutsal stabiliteye katkı sağlamaktır. Dolgu malzemeleri kullanım alanı çok fazla değildir sadece bazı polimerik reçinelerle birlikte kullanılabilir [36].



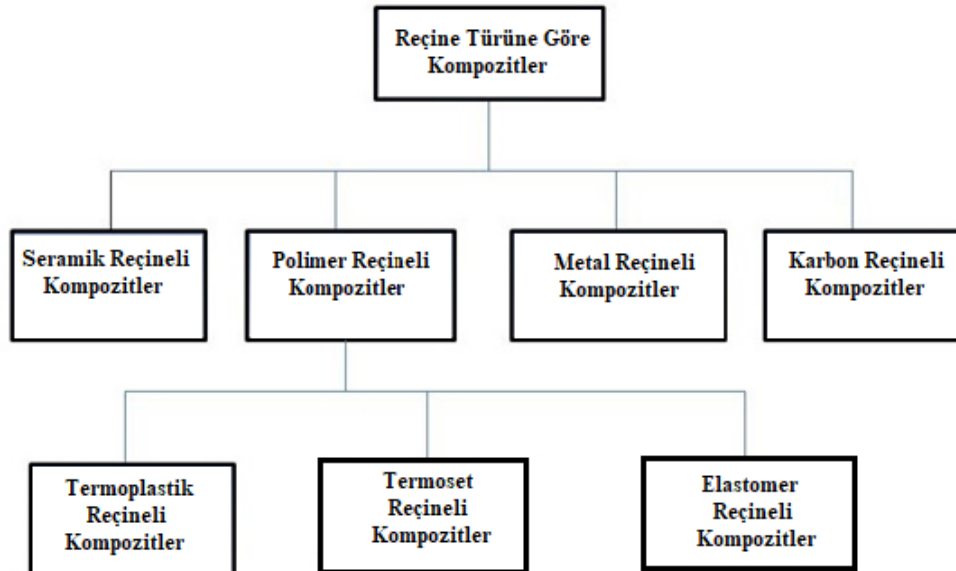
Şekil 2. 2 Kompozit malzemenin gerilme-şekil değiştirme davranışı [37]

2.1.1 Matris Reçinesi

Matris reçinesi liflerin gömülü olduğu sürekli fazdır. Reçine malzemeye uygulanan yüklerin liflere üniform olarak aktarılmasını sağlar ve kompozit malzemenin yüzeyini çevresel etkilerle oluşabilecek korozyona ve aşınma etkisine karşı korur. Üniform yük dağılımını sağlayabilmek için reçine ile güçlendirme elemanı arasındaki adezyon faktörü olmasa olmazdır. Fakat bazı özel durumlar için örneğin; balistik bileşenler içeren aramit lif takviyeli reçinelerde, takviye elemanı ve reçine arasındaki adezyonun çok düşük seviyelerde olması istenmektedir [38].

Matris reçinesinin bir diğer özelliği de hasar toleransını ve uzun süreli durabiliteyi koruyabilmek adına kırılma tokluğu ya da süneklik özellikleri göstererek enerji absorbe edebilmesi ve gerilme yoğunluğu azaltmasıdır. Yüksek performans özellikleri sergileyen reçine basınç yüklemesine maruz kaldığında ise liflerin burulmasını engellemek için en az 3 GPa optimum dayanım özelliği ve yeterli kayma modülüne sahip olmalıdır [38].

Mühendislik uygulamalarında hedeflenen performansı sağlamak için seçilen matris reçinesi ve güçlendirme elemanı olarak kullanılan liflerin seçimi oldukça önem arz etmektedir. Lif takviyeli kompozitlerin kullanılan reçine türüne göre sınıflandırılması Şekil 2.3'te gösterilmiştir.



Şekil 2. 3 Matris reçinesi türüne göre kompozitler

2.1.1.1 Seramik Matris Reçinesi

Seramik matris reçineleri diğer türlere göre kıyaslama yapıldığında oldukça hassas oldukları görülecektir. En çok kullanılan seramik matrisler silikon karbit, alüminyum oksit, mullit ve silikon nitrittir. Özellikle çeşitli faktörlerle malzeme hacminde meydana gelen artıştan dolayı dayanımları önemli ölçüde azalmaktadır. Seramiklerin kırılma fiziksel yapısından dolayı çekme ve eğilme dayanımlarını belirleyebilmek oldukça zordur. Kusur hassasiyeti dolayısıyla oluşan gerilme mukavemeti gibi basit bir özelliğin belirlenmesinde bile karşılaşılan zorluklar düşünüldüğünde, önemli gerilme etkileri altında neredeyse hiç kullanılamamaları sürpriz bir durum olmayacaktır [39].

2.1.1.2 Polimer Matris Reçinesi

Polimer matris reçineleri ve lif takviyesinin kombinasyonu ile oluşan kompozitler, düşük maliyetleri ve basit imalat yöntemlerinin etkisiyle oldukça popülerdirler. Yüksek gerilme dayanımı, yüksek rijitlik, çevresel etkilere dayanıklılık ve yüksek kırılma tokluğu, polimer reçine içeren kompozitlerin en önemli özelliklerindendir.

- **Termoplastik Reçineler**

Termoplastik reçineler birbirini takip eden ısıtma-soğutma işlemleri ile şekil verilerek katı formunu alan reçinelerdir. Oldukça geniş kullanım alanları vardır. Bazı istisnalar dışında sıvı fazdaki yüksek viskozite ve moleküler durumu nedeniyle güçlendirme elemanları olan liflerin reçine içerisinde ıslanması zordur. Bu durum iyi bir kompozit malzeme elde edilmesinin önüne geçmektedir. Bu reçinelerin üretim aşamasında yüksek basınç ve sıcaklık çok önemlidir. Termoplastik reçineler ile en yaygın kompozit üretim yöntemi ısıtılmış kalıplar yardımıyla kuru tabakaları termoplastik filmlerle değiştirmektir [40].

Termoplastik reçineler işlem sıcaklığına kadar ısıtılarak arzu edilmesi durumunda farklı bir şekle dönüştürülebilir. Bu malzemeler genellikle yüksek sıcaklık dayanımı ve kimyasal stabilitede termosetlerden daha zayıf olmasına rağmen, çatlamaya ve darbeye karşı daha dirençlidir. Kullanımı yaygın olan bazı termoplastik reçineler ve 23°C da belirlenen bu reçinelere ait özellikler Çizelge 2.1’de verilmiştir.

Termoplastik reçineler yapısal elamanların rehabilitasyonu için gerçekleştirilen uygulamalarda kullanılmamaktadır fakat termoplastik polimer poliakrilonitrilden oluşturulan termoplastik poliakrilik lif, yüksek dayanım ve elastisite modülü gibi özellikler gösterme kabiliyeti olan karbon lifinin imalatı için PAN öncü oluşumu olarak kullanılmaktadır [41].

Çizelge 2. 1 Termoplastik reçinelerin 23°C sıcaklık altındaki bazı özellikleri [36]

Özellik	Polieter Keton (PEEK)	Polifenilen Sülfid (PPS)	Polisülfon (PSUL)	Polietermit (PEI)	Poliamit-imid (PAI)
Yoğunluk (g/cm ³)	1,30-1,32	1,36	1,24	1,27	1,4
Akma (A) ya da Çekme(Ç) Dayanımı (MPa)	100 (A)	82,7 (Ç)	70,3 (A)	105 (A)	185,5 (Ç)
Çekme Modülü (GPa)	3,24	3,3	2,48	3	3,03
Poisson Oranı	0,4	-	0,37	-	-
Eğilme Dayanımı	170	152	106,2	150	212
Eğilme Modülü (GPa)	4,1	3,45	2,69	3,3	4,55

• Termoset Reçineler

Termoset matris reçineleri termoplastiklere göre farklı özellikler sergilemektedir. Polyester, vinilester, epoksiler ve fenolik reçineler başlıca termoset reçineleri oluşturmaktadır.

Termoset reçineleri termoplastiklerin aksine yapısal elemanların onarımında veya güçlendirilmesinde kullanılmaktadır. Termoplastiklerden farklı olarak bu malzemelerin üretimi sıvı ya da yarı katı öncü oluşum maddesi olarak gerçekleştirilir. Ayrıca termoplastikler gibi sıcaklık etkisi ile yeniden şekillendirilemezler. İnşaat mühendisliği alanında uygulamalarında kullanımı en yaygın olan termoset reçineler epoksi reçineleri ve vinilester reçineleridir [41].

a) Polyester Reçineler

Doymamış polyesterler en önemli ve kullanımı en yaygın termoset reçine türlerinden birisidir. Moleküler yapısına bakıldığında polyester reçineler birçok çapraz karbon (C=C) bağına sahiptir. Bu bağların yoğunluğu polyester reçinenin temel özelliklerini belirlemektedir. Kür işlemine maruz kalmış reçinenin cam geçiş sıcaklığı (Glass transition temperature) (T_g) ve termal açıdan stabilitesi çapraz bağların sayısı ile ilişkilidir. Çapraz bağların yoğunluğunun artması bu özelliklerin gelişmesini sağlamaktadır. Fakat diğer taraftan yoğunluktaki artış darbe dayanımının ve şekil değiştirme kopma değerlerinin olumsuz olarak etkilenmesine neden olur. Polyester reçinelere ait bazı özellikler Çizelge 2.2’de verilmiştir. Polyester reçinenin temel karakteristik özellikleri üzerinde belirleyici bir diğer etken de kullanılan seyreltici tipi ve bu seyrelticinin miktarıdır. Stiren en yaygın kullanıma sahip seyreltici türüdür çünkü diğer tür seyrelticilere göre düşük viskozite, yüksek çözücü özellik ve düşük maliyet gibi avantajları vardır. Bu seyrelticiler özel olarak bir ihtiyaç doğduğunda kullanılırlar aksi halde ek maliyet getirdiklerinden ötürü pek fazla tercih edilmezler [42].

Çizelge 2. 23° C de polyester reçinelerin bazı özellikleri [36]

Özellik	
Yoğunluk (g/cm ³)	1,1-1,43
Çekme Dayanımı MPa	34,5-103,5
Çekme Modülü GPa	2,10-3,45
Uzama (%)	1,0-5,0
Kür Rötresi (%)	5-12

b) Epoksi Reçineler

Kimyasal bileşimi içerisinde epoksi grubu bulunan reçinelerdir. Epoksi grupları genellikle bir oksijen atomu ve iki karbon atomundan oluşmaktadır. Piyasada yaygın olarak kullanılan epoksi matrislerinde tek bir molekülde birden fazla epoksi grubuna rastlanmaktadır. Bu nedenle bu reçineler epoksi grupları arasındaki etkileşim vasıtasıyla sertleşme reaksiyonu esnasında çapraz olarak bağlanabilirler. Epoksi gruplarının

bağlandığı molekülün türü epoksi reçinelerin sınıflandırılmasında önemli bir göstergedir. Bu sınıflandırmada epoksi reçineler alifatik ve aromatik olarak isimlendirilir [42].

121 °C' ye kadar olan sıcaklıklarda yüksek performans sergileyebilen epoksi reçineleri kompozit malzemelerin dayanım, dayanıklılık ve kimyasal etkilere karşı dinçlerine önemli katkılar sunmaktadır. Polyester reçinelerin aksine bu reçinlerde katalizör kullanılarak kür işlemi gerçekleştirilmez. Katalizör yerine sertleştirici bir malzeme kullanılmaktadır. Reçine ile belirli bir oranda karıştırılan sertleştirici ilave reaksiyon gerçekleştirir. Reaksiyonu tam olarak gerçekleştirebilmek için doğru oranlarda karışım kullanılması önem arz etmektedir. Karışım oranı doğru olarak ayarlanmazsa epoksi reçinesi tam olarak sertleşmeyecek ve karakteristik özelliklerini tam olarak sergileyemeyecektir [43]. Termoset reçineler ile kıyaslandığında epoksi reçinelerin bazı avantajları söz konusudur bunlar;

- Kür işlemi süresince uçucu madde bulunmaması
 - Kür esnasında meydana gelen düşük büzülme
 - Kimyasal ve çözücü etkilerine karşı üst düzey direnç gösterme
 - Katkı, güçlendirme lifleri ve diğer maddelerle yüksek adezyon kabiliyeti
- şeklindedir [42].

Gevrek özellik gösterme ve gerilme kopma değerinin düşük olması çapraz bağlanmış reçinelerin ortak problemidir. Kompozit malzemenin hasara karşı dayanıklı olması hedeflendiği için bu değerlerde iyileştirme yapılmalıdır. Bu epoksi reçinesi içerisine elastomer katarak gerçekleştirilebilir. Elastomer epoksinin tokluğunu artıracaktır fakat cam geçiş sıcaklığı (T_g) ve çözücü direnci önemli oranda azaltacaktır. Bu yüzden bu tür iyileştirme çalışmalarında elastomer kullanırken pozitif etkisinin yanında bu gibi olumsuz sonuçların da göz önünde bulundurulması gereklidir [42]. Epoksi reçinelerin tipik bazı özellikleri Çizelge 2.3'te gösterilmiştir.

Çizelge 2. 3 23°C de epoksi reçinelerin bazı özellikleri [36]

Özellik	
Yoğunluk (g/cm ³)	1,2-1,3
Çekme Dayanımı (MPa)	55-130
Çekme Modülü (GPa)	2,75-4,10
Poisson Oranı	0,2-0,33
Termal Genleşme Katsayısı (°C başına 10 ⁻⁶ m/m)	50-80
Kür Rötresi (%)	1,0-5,0

c) Vinil Ester Reçineler

Vinil ester reçineler, kimyasal olarak sahip oldukları epoksi omurgası ve bu omurganın moleküler zincirinin son kısmında yer alan, ester bağları ile bağlanmış vinil grupları içeren reçine türüdür. Maruz kaldıkları çok fazlı reaksiyonlar boyunca bu reçinler polyesterler gibi çapraz bağlanmayı başarırlar. Bunun yanında polyesterlerden daha iyi çevresel direnç, dayanım ve lif ile reçine arasında daha iyi bir adezyon sağlarlar. Tabiki bunlar vinil ester reçinelerin sahip oldukları epoksi omurgası sayesinde. Bu nedenle genellikle epoksi vinil ester olarak isimlendirilmektedirler. Kür esnasındaki büzölmeleri polyesterlerden daha az epoksilerden daha fazladır. Ekonomik açıdan ise maliyetleri epoksi ve polyester arasındadır [44]. Vinil ester reçinelerin bazı karakteristik özellikleri Çizelge 2.4’de verilmiş ve Çizelge 2.5’te epoksi ve polyester reçineleri ile karşılıklı olarak kıyaslanmıştır.

Çizelge 2. 4 Vinil ester reçinelere ait bazı özellikler (23°C) [36]

Özellik	
Yoğunluk (g/cm ³)	1,12-1,32
Çekme Dayanımı MPa	73-81
Çekme Modülü GPa	3,0-3,5
Uzama (%)	3,5-5,5
Kür Rötresi (%)	5,4-10,3

Çizelge 2. 5 Vinil ester, epoksi ve polyester reçinelerinin kıyaslanması [45]

Reçine Türü	Avantaj	Dezavantaj
Polyester Reçineler	Kullanım kolaylığı Düşük maliyet (1 - 2 £/kg)	Düşük mekanik özellikler
		Düşük olmayan kür çekmesi
		Sınırlı çalışma süresi
Epoksi Reçineleri	Yüksek değerlerde mekanik ve termal özellikler	Yüksek maliyet (3 - 15 £/kg)
	Su etkisine karşı yüksek direnç	
	Uzun çalışma süresi	Kritik arışım oranı
	Yüksek sıcaklıklara karşı direnç	
Vinil Ester Reçineleri	Düşük kür süresi	
	Kimyasal ve çevresel etkilere karşı yüksek direnç	Yüksek styrene içeriği
		Polyesterlere göre yüksek fiyat (2 - 4 £/kg)
	Karakteristik olarak polyesterlerden daha yüksek mekanik özellik	Yüksek kür çekmesi

d) Fenolik Reçineler

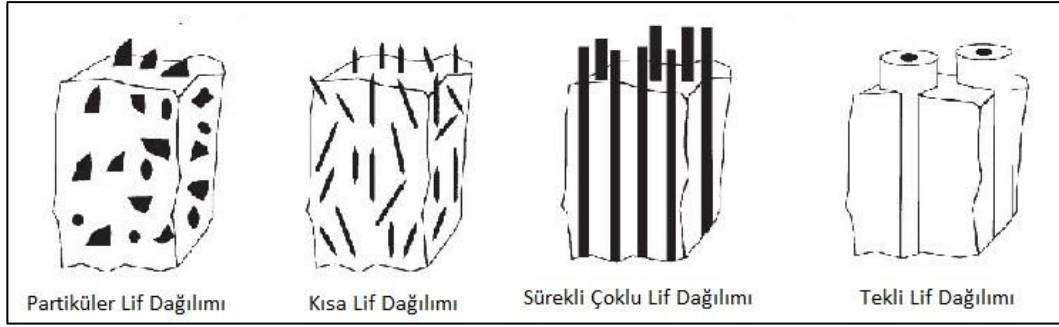
Fenolik reçineler özellikle yüksek sıcaklık etkisinin hakim olduğu uygulamalarda kullanılmaktadır. Bileşimindeki maddeler fenol ve formaldehittir ve bu iki bileşenin reaksiyonu sonucunda üretilmektedir. Fenolik reçine fiziksel olarak gevrek bir yapıdadır ve yüksek büzülme karakteristiğine sahiptir. Uygulama esnasında dolgu malzemesi kullanımı gerekmektedir. Yüksek sıcaklığın etkisiyle bu reçineler katı halden direkt gaz hale geçerler. Uçak ve otomotiv sanayii yaygın olarak kullanıldıkları sektörlerdir [46].

- **Elastomer Reçineler**

Elastomer malzemeler çekme ya da basınç etkisiyle şekil değiştiren ve bu etkilerin kaybolmasıyla tekrardan eski yapısal formuna dönebilen malzemelerdir. Genellikle elastomer reçineler hidro karbon temelli polimerlerdir. En fazla kullanılan elastomer reçineler; stiren-bütadien (SBR), polibütadien kauçuk (BR), doğal kauçuk (NR) ve etilen-propilendir. Elastomerlerin isimleri farklı olsa da ortak özellikleri iyi bir elastisite, esneklik ve tokluk gibi karakteristiklerdir. Tabi ki bunu yanında her bir elastomer kendine özel bazı özellikleri de barındırır. Katkı maddelerinin kullanımıyla beraber bu özellikler geliştirilebilir [42].

2.1.1.3 Metal Matris Reçinesi

Metal reçineli gelişmiş kompozit malzemelerde, reçine bileşenini oluşturan malzeme düşük yoğunluk değerlerine sahip demir metali içermeyen bir alaşımdan (Örn; Alüminyum) oluşmaktadır. Kompozit malzemenin güçlendirme elemanını yüksek performans değerlerine sahip karbon, metal ya da seramikler oluşturur. Metal reçineli kompozitler güçlendirme elemanın tipi ve reçine içerisindeki dizilimine bağlı olarak sınıflandırılabilir (Şekil 2.4). Güçlendirme elemanları silikon karbit (SiC), alüminyum oksit (Al_2O_3), bor ya da grafit olabilir [47].



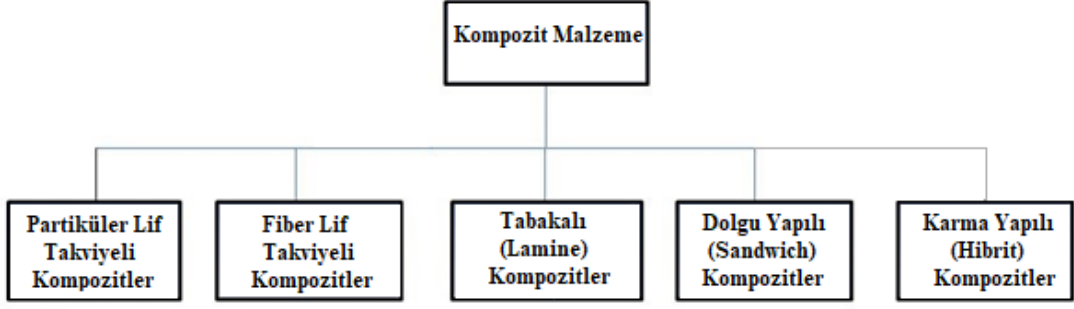
Şekil 2. 4 Metal reçineli kompozitlerde takviye elemanı türleri [48]

2.1.1.4 Karbon Matris Reçinesi

Karbon reçine ve takviye elemanlarının oluşturduğu kompozitler bu reçine içerisinde belirli bir düzende yerleşmiş karbon ya da seramik liflerinden oluşmaktadır. En önemli türü karbon-karbon bileşiminden oluşan kompozittir. Tarihsel olarak karbon takviye elemanı içeren bu kompozitler, yüksek sıcaklık etkisine maruz kaldıklarında gösterdikleri dayanıklılık nedeniyle kullanılmışlardır. Karbon reçineleri kırılgan bir yapıdadırlar. Tek doğrultuda yönlendirilmiş karbon güçlendirme elemanı içeren karbon reçineli kompozit malzemeler enine doğrultuda ve kalınlık boyunca düşük elastisite modülü ve dayanım özelliğine sahiptir. Çok farklı fiziksel özellikler sergileyen karbon-karbon kompozitleri vardır ve bu özellikler kullanılan güçlendirme elemanının türüne, öncü malzemeye ve üretim sırasındaki işlemlere göre değişebilmektedir [39].

2.1.2 Güçlendirme Lifleri

FRP kompozit malzemelerinde kullanılan takviye elemanları kompozit malzemenin yüksek rijitlik ve dayanım özellikleri kazanmasındaki temel etkenlerdir. Güçlendirme elemanlarının en önemli görevi malzemeye uygulanan yükü taşımaktır. FRP de kullanılan güçlendirme elemanları; karbon, cam, aramit (kevlar), bor ve doğal liflerdir. FRP de kullanılacak lifin cinsi kadar bu elemanların kompozit malzeme içerisindeki dizilişi ve yapısı da önemlidir. Şekil 2.5'te kompozit malzemelerin güçlendirme elemanının dizilimi ve yapısına göre sınıflandırması verilmiştir.



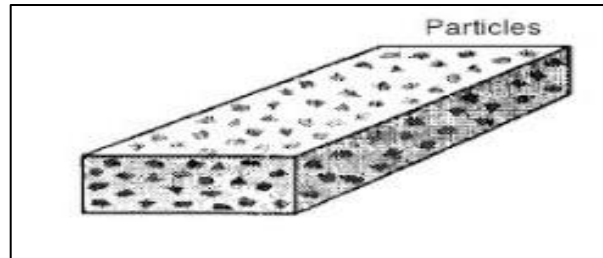
Şekil 2. 5 Lif yapısı ve dağılımına göre kompozitlerin sınıflandırılması

2.1.2.1 Güçlendirme Elemanının Dizilimi ve Yapısına Göre Kompozitler

- **Partiküler Lif Takviyeli Kompozitler**

Kompozit reçinesi içerisinde mikro boyutlarda olan güçlendirme malzemelerinin parçacıklar halinde bulunması ile oluşurlar. Malzeme bünyesindeki partiküller tek veya iki boyutlu olabildiği gibi sıfır boyutlu olarak kabul edilen mikroskobik parçacıklar da olabilmektedir. Reçine içerisinde dağılan parçacıkların boyutu 1 μm 'den büyük ve elyaf hacim oranı %25'den fazla olmamaktadır. En yaygın olarak kullanılan parçacık türleri Al_2O_3 ve SiC 'den oluşan seramiklerdir. Bu tür kompozit malzemeler izotropik özellikler sergiler. Malzemeye üzerine etkiyen yük matris reçinesi ve parçacıklar tarafından karşılanır [49]. Partikül takviyeli kompozit malzeme şematik olarak Şekil 2.6'da verilmiştir.

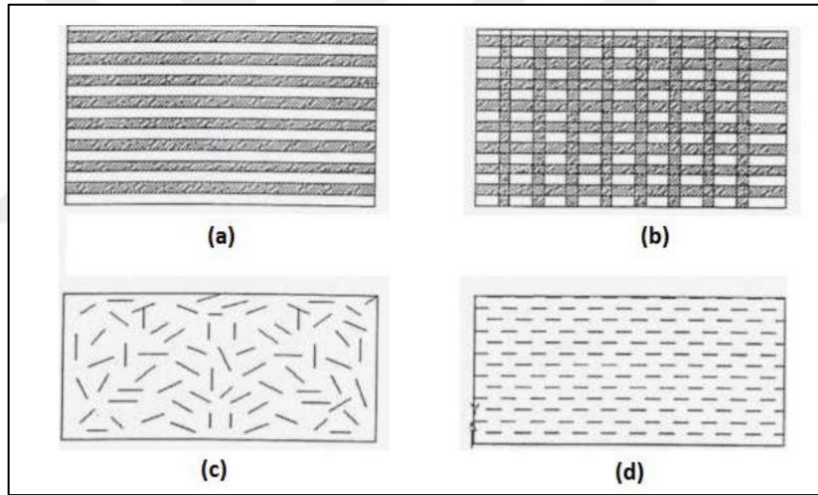
Bu türden kompozit malzemeler metal, seramik ve polimerlerin birleşiminden oluşabilmektedir. Metal parçacıkların kompozit malzemedeki kullanılması durumunda, iyi bir ısı ve elektrik iletkenliği elde edilebilir. Metal reçine içerisinde seramik parçacık içeren malzemelerin rijitlikleri ve yüksek sıcaklıklara karşı direnci fazla olmaktadır [49].



Şekil 2. 6 Parçacık lifli kompozit [39]

- **Fiber Lif Takviyeli Kompozitler**

Bu kompozit malzemeler reçine içerisine fiber lif veya elyaf takviye edilmesi ile elde edilir. Mühendislik uygulamalarında lif biçiminde üretilen bazı malzemelerin rijitlik ve dayanımları kütleli formundaki değerlerinden çok fazla olabilmektedir. Örneğin; karbon liflerin çekme dayanımı kütle formundaki grafitten 50 kat, rijitliği ise 3 kat daha fazladır. Liflerin bu tür özelliklerinin keşfedilmesinden sonra lif takviye edilmiş kompozitler yaygın olarak kullanılmaya başlamıştır. Bu ürünler günümüzde birçok sektörde kendine yer bulmaktadır. Lifler kompozit malzeme içerisinde sürekli veya süreksiz olarak farklı biçimlerde bulunabilmektedir. Kompozit malzemenin performansını belirleyen en önemli faktörler liflerin şekli, uzunluğu, doğrultusu, matris reçinesinin mekanik davranışı ve lif ile reçine ara yüz özellikleridir. Değişik biçimlerde yönlendirilmiş lifli kompozit malzemeler şematik olarak Şekil 2.7’de verilmiştir [49].



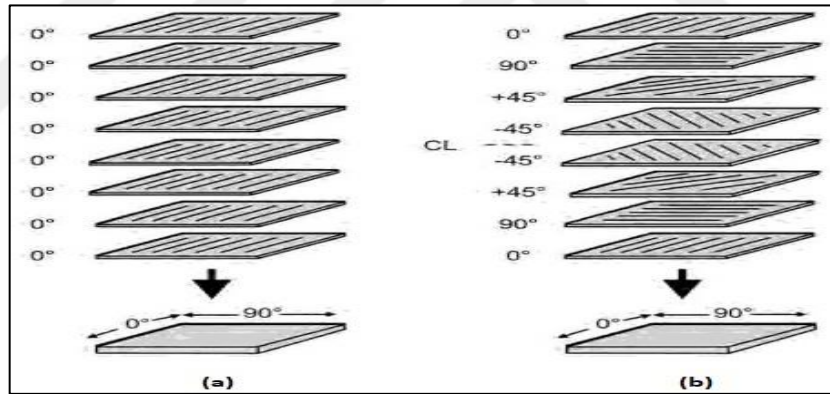
Şekil 2. 7 Lif takviyeli kompozitler a) tek doğrultulu sürekli lifler, b) iki doğrultulu sürekli elyaflar, c) süreksiz kısa lifler, d) tek doğrultulu süreksiz lifler [49]

Uzun sürekli liflerin tek doğrultuda birbirlerine paralel olacak şekilde yerleştirilmeleri sonucunda elyaf doğrultusunda yüksek dayanım elde edilirken, enine doğrultuda oldu düşük mukavemet sağlanmaktadır. İki doğrultuda yerleştirilen güçlendirme lifleri ile her iki doğrultuda eşit mukavemet sağlanırken, matris reçinesi içerisinde homojen dağılımı sağlanan kısa lifler ile izotropik bir malzeme elde etmek mümkün olacaktır. Liflerin yönelmelerinin yanında dayanımları da kompozit malzeme için önem arz etmektedir [49].

Bu kompozit malzemelerde lifler ile reçine arasındaki kenetlenme yapısı malzeme dayanımını etkileyen önemli bir etkidir. Matris reçinesi içerisinde boşluk bulunması durumunda, lifler ile reçine arasındaki temas azalacaktır. Ayrıca malzeme bünyesine nüfuz eden nem de lifler ile reçine arasındaki kenetlenmeyi olumsuz etkileyen bir başka faktördür [49].

- **Tabakalı Kompozitler**

En eski ve en geniş kullanım alanına sahip kompozit malzeme türüdür. Bu kompozitler farklı özellikler sergileyen en az iki tabakanın belirli teknikler ile birleştirilmesi ile oluşmaktadır. Bu kompozit malzeme türünde farklı doğrultularda yönlendirilmiş elyaflardan oluşan tabakalar aracılığı ile çok yüksek dayanımlar ve çok yönlü yük taşıma özellikleri elde edilebilmektedir. Düşük maliyet, yüksek mukavemet ve hafiflik bu malzemelerin metallere göre daha fazla tercih edilme nedenleridir [49]. Şekil 2.8’de tek doğrultuda (a) ve farklı doğrultularda (b) yönlendirilmiş tabakalı kompozit malzemeler şematik olarak verilmiştir.

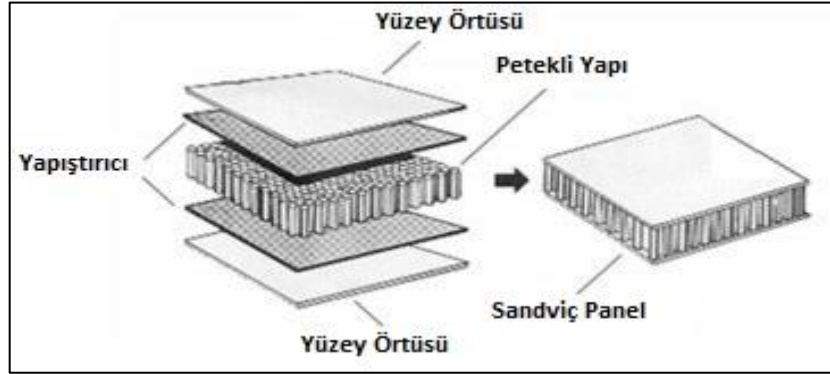


Şekil 2. 8 Tabakalı kompozit malzemeler a) tek doğrultulu tabakalı kompozit, b) farklı doğrultularda yönlendirilmiş yarı izotropik kompozit malzeme [47]

- **Dolgu Yapılı (Sandviç) Kompozitler**

Bu tür kompozit malzemeler 1940 yılından sonra havacılık alanında özellikle de uçak gövdelerinin yapımında kullanılmaya başlanmıştır. Kompozit malzeme alt ve üst yüzeylerinden yapıştırıcı malzeme kullanarak bal peteği biçimindeki dolgu elemanının kaplanması ile oluşmaktadır (Şekil 2.9). Tabakalar arasında dolgu elemanı kullanılması neticesinde malzemenin eğilme dayanımı ve atalet momenti önemli ölçüde artmaktadır.

Karakteristik olarak yüksek mekanik özellikler, yüksek rijitlik ve mukavemet/ağırlık oranları ile son derece hafif bir yapı malzemesi olarak günümüzde denizcilik, uzay ve havacılık sektöründe geniş bir kullanım alanına sahiptir.



Şekil 2. 9 Sandviç panel kompozit malzeme yapısı [50]

- **Karma Yapılı (Hibrit) Kompozitler**

Bu malzemeler üç ya da daha fazla kompozit malzeme bileşenin özel bir amaca yönelik olarak daha iyi performans ve daha düşük maliyet amacıyla birleştirilmesi neticesinde elde edilmektedir. Bu kompozit malzeme türü yeni olmamakla birlikte özellikle otomotiv sektöründeki uygulamalarda büyüyen ve genişleyen bir kullanım alanına sahiptir [51].

2.1.2.2 Güçlendirme Elemanının Türüne Göre Kompozitler

- **Karbon Takviyeli (CFRP) Kompozitler**

Güçlendirme elemanı olarak karbon lifli polimerler günümüzde yapısal mühendislik uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. CFRP kompozitler levha, kumaş, şerit ve öngermeli tendon malzeme biçimlerinde olabilmektedir (Şekil 2.10). Temel yapısı itibarıyla karbon lifler, karbon atomlarının düzlemsel olarak iki boyutlu dizilerinin atomik seviyesini içeren katı yarı kristal yapıdaki organik malzemelerdir. Söz konusu iki boyutlu tabakalar grafitik form olarak isimlendirilir. Bu nedenle karbon lifleri çoğu zaman grafit lif olarak da anılmaktadır. Karbon liflerinin üretimi yapılırken standart modüllü, orta derece modüllü, yüksek dayanım özellikli ve ultra yüksek modüllü seçeneklerinden birisi seçilebilir ve buna göre üretim gerçekleştirilebilir [52]. Çizelge 2.6'da bu derecelendirmeye göre karbon liflerinin bazı karakteristik özellikleri verilmiştir.



Şekil 2. 10 Karbon esaslı polimer türleri a) levha, b) kumaş, c) şerit, d) donatı çubuğu, e) öngermeli tendon

Çizelge 2. 6 Karbon liflerinin üretim derecesine göre bazı özellikleri [52]

Karbon Lifinin Sınıfı	Yoğunluk g/cm ³	Çekme Modülü GPa	Çekme Dayanımı MPa	Maksimum Uzama %
Standart	1,7	250	3700	1,2
Yüksek Dayanımlı	1,8	250	4800	1,4
Yüksek Modüllü	1,9	500	3000	0,5
Ultra Yüksek Modüllü	2,1	800	2400	0,2

Karbon liflerinin çapları 5 ile 10 µm arasındadır ve karakteristik olarak siyah renklidirler. İki boyutlu atomik yapıları sayesinde enlemesine olarak izotropik özellikler sergilemektedirler. Yüksek sıcaklık etkisinde (1200-2400 °C) üç temel malzeme kullanılarak üretilir. Bu malzemeler: Doğal selülozik rayon tekstil lifleri, sentetik poliakrilonitril (PAN) tekstil lifleri ya da zift bileşimindeki Pitch'tir. Pitch temelli lifler petrol işleme süreçlerinin ardından elde edilen karbon lifleridir ve malzeme maliyeti

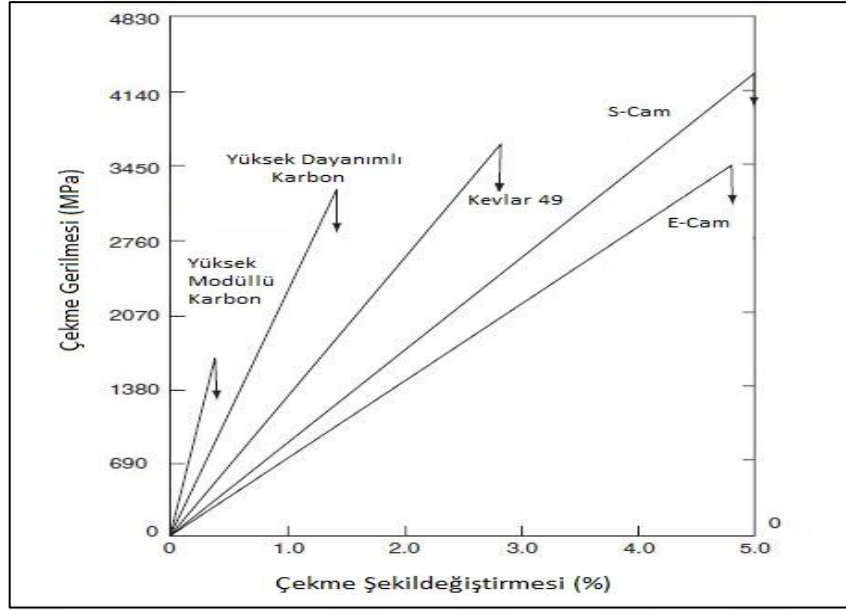
olarak PAN ve rayon temelli liflerden ucuzdur [52]. Çizelge 2.7’de yaygın olarak kullanılan PAN ve Pitch lif çeşitlerine ait özellikler verilmiştir.

Genel olarak karbon liflerinin özelliklerine bakıldığında, çok yüksek (200-800 GPa) elastisite modülüne sahip olduğu görülecektir. Bu malzemeler nem etkisine maruz kaldıklarında dirençli bir davranış sergileyebilirken, kimyasal çözeltilere karşı yüksek dayanım özelliği gösterirler. Karakteristik olarak karbon lifleri iletken özelliktedir. Ayrıca karbon liflerinin en önemli özelliklerinden birisi de korozyona karşı gösterdikleri üst düzey dirençtir [53]. Karbon lifler çekme gerilmelerine maruz kaldıklarında diğer takviye lifleri gibi elastik bir davranış sergilerler. Şekil 2.11’de çekme gerilmeleri altında bazı karbon ve farklı türden lif çeşitlerine ait gerilme-şekil değiştirme ilişkileri verilmiştir.

Çizelge 2. 7 PAN ve Pitch öncü maddeli liflerin özellikleri [54]

Özellik	Yüksek Modüllü Karbon (Pitch)	Orta Düzey Modüllü Karbon (PAN)	Düşük Modüllü Karbon (PAN)
Çekme Dayanımı (Mpa)	2,4 ^a	2,9 ^a	5,7 ^a
Çekme Modülü (Gpa)	830	390	290
Maksimum Şekil Değiştirme (%)	0,3	0,7	1,8
Yoğunluk (g/cm ³)	2,2	1,8	1,8
Çap (µm)	10	6,5	5,1

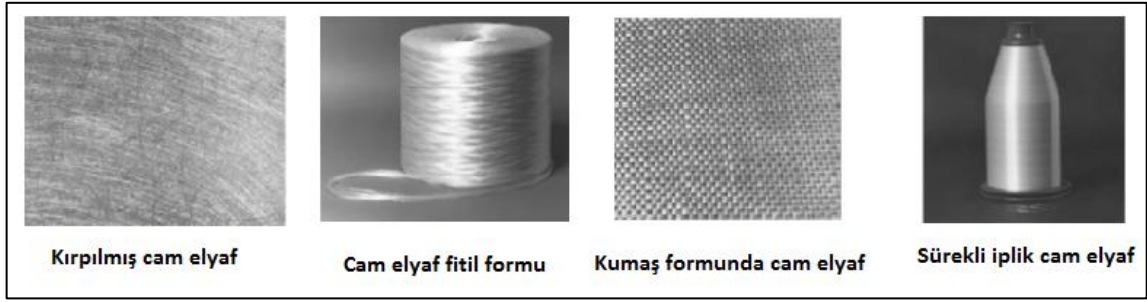
(^a; Emprenye edilmiş iplikte ölçülmüştür.)



Şekil 2. 11 Çekme gerilmesi etkisinde bazı lif türlerinin davranışları [36]

- **Cam Takviyeli (GFRP) Kompozitler**

Kompozit malzemelerin keşfedilmesinden sonra cam lif takviyeli kompozitler en popüler olan ve yaygın olarak kullanılan FRP çeşitlerinden birisi olmuştur. Cam lifler genellikle E-cam türünde standart olarak üretilirler. E-cam lifleri büyük oranda elektrik uygulamaları için kullanılmaktadır. Yüksek dayanım için üretilen S-cam liflerinin çekme etkisine karşı mukavemetleri E-cam liflerinden yaklaşık olarak %33 daha fazladır. Bir diğer cam lif türü ise C-camdır. Bu malzemenin özelliği kimyasal etkilere karşı dirençli olmasıdır. Tüm cam sınıfındaki lifler yüksek mukavemet yoğunluk oranına sahiptir. 375 °C ye kadar sıcaklığa maruz kalan cam lifleri mukavemetlerini % 50 gibi bir yüzdeyle koruyabilirler. Bu değer 500-540 °C ye çıkarıldığında yaklaşık olarak %25'e düşmektedir [55]. Cam liflerin üretim şekillerine bağlı olarak farklı formlardaki yapıları Şekil 2.12'de bazı cam lif türlerine ait karakteristik özellikler ise Çizelge 2.8'de verilmiştir. Güçlendirme uygulamalarında cam lifli kompozitler genellikle şerit, levha, kumaş ve donatı çubuğu biçiminde kullanılmaktadır.



Şekil 2. 12 Farklı formlardaki cam lifleri [56]

Çizelge 2. 8 Bazı cam lifi türlerine ait özellikler [41]

Lif Türü	Elastisite Modülü (GPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Nihai Şekil Değişirme (%)
E-cam	72,4	2400	3,5
A-cam	72,4	3030	3,5
S-2-cam	88,0	4600	5,7

(A: Alkali etkisine karşı dirençli cam lif türü, S-2: S-cam sınıfının farklı bir kaplama içeren türü)

- **Aramit Takviyeli (AFRP) Kompozitler**

Organik lif sınıfında olan aramit lifleri dayanım ve rijitlik değerleri ile karbon ve cam lifleri arasındadır. En fazla kullanılan aramit lif türü kevlar'dır. Çizelge 2.9'da kevlar liflerinin bazı cinslerine ait özellikler verilmiştir. Bu kompozit malzemeler üst düzey tokluk değerine sahip olması neticesinde balistik koruma amaçlı uygulamalarda sık sık tercih edilmektedir. Aramit liflerinin önemli bir avantajı da kırılma süreci boyunca yüksek şekil değiştirme kopma değerleri sayesinde, basınç etkisi altında plastik deformasyon gösterebilme ve yüksek miktarlarda enerji absorbe edebilme yetenekleridir. Cam ve karbon liflerinin aksine yüzey uygulamalarına tabii tutulmaları oldukça zordur. Aramit lifleri iyi bir darbe ve çekme dayanımına sahiptir. Lifleri kaplayan matris reçine malzemesi ile aramit lifleri arasındaki yetersiz adezyon olması neticesinde enine çekme ve boyuna basınç dayanımı zayıflar [47].

Çizelge 2. 9 Aramit liflere ait bazı özellikler [47]

Lif tipi	Çekme Dayanımı (MPa)	Çekme Modülü (GPa)	Uzama (%)	Yoğunluk (gr/cm ³)	Çap (µm)
Kevlar29	3620	83	4,0	1,44	12
Kevlar49	3790	131	2,8	1,44	12
Kevlar149	3440	186	2,0	1,47	12

(ksi ve msi birimleri cinsinden verilen çekme dayanımı ve çekme modülü sırasıyla MPa ve GPa birimlerine çevrilmiştir.)

- **Bor Takviyeli Kompozitler**

Bor liflerinin en fazla öne çıkan özelliği 379-414 GPa arasında değişen son derece yüksek değerdeki çekme modülü değeridir. Birleştirme işlemleri ile elde edilen bor lifleri burkulma direnci açısından üst düzey performans gösterirler ve bor lifleri ile güçlendirilmiş kompozit malzemenin basınç dayanımına katkıda bulunurlar. Bor liflerinin en olumsuz yanı hiç kuşkusuz yüksek fiyatlarıdır. Bu nedenle kullanımı çok nadir görülmektedir [36].

- **Seramik Lif Takviyeli Kompozitler**

Metal ve seramik reçineli kompozitlerde ve yüksek sıcaklık etkisinin hakim olduğu uygulamalarda güçlendirme elemanı olarak kullanılan silikon karbid (SiC) ve alüminyum oksit (Al₂O₃) seramik lifleri, en fazla ön plana çıkan liflerdir. Bu liflerin erime sıcaklıkları sırasıyla 2830 °C ve 2045 °C dir. Mekanik olarak silikon karbid 650 °C nin üzerinde iyi dayanım özellikleri sergilerken, alüminyum oksit için bu sıcaklık 1370 °C ye kadar çıkar ve bu sıcaklığa kadar mukavemet değerlerini muhafaza edebilir. Silikon karbid lifleri elektriği ve sıcaklığı alüminyum oksitten daha iyi iletirken, termal genleşme katsayısı alüminyum oksit liflerinde daha yüksektir [36].

- **Doğal Lif Takviyeli Kompozitler**

En fazla ön plana çıkan doğal lif türleri olan ipek ve ketenin çekme dayanımı ve çekme modülü, sentetik lifler (karbon, cam, aramit) ile kıyaslandığında oldukça düşük değerlerdedir. Çevreci bakış açısıyla doğal lifler cezbedicidir. Bu yüzden geleneksel

kompozit liflerinin ithal olarak kullanıldığı ülkeler için doğal lifler, istenen mukavemet değerlerini karşılayabilecekleri uygulamalarda güçlendirme elemanı olarak kullanılabilir. Sentetik liflerle kıyaslandığında mekanik olarak yetersiz olsalar da doğal liflerin kullanımının bazı avantajları söz konusudur. Bunlar; düşük maliyet, düşük yoğunluk, sürdürülebilir karakteristik özellikler ve insan sağlığı açısından avantajlarıdır [57].

- **Hibrit Kompozitler**

Matris reçinesi içerisinde farklı özellikler sergileyen iki veya daha fazla güçlendirme elemanının kullanıldığı kompozit malzemelerdir. Örneğin, kevlar güçlendirme lifleri maliyet açısından ucuzdur. Yüksek tokluk değerlerine sahip olan bu malzeme düşük basınç dayanımına sahiptir. Bir diğer malzeme olan grafit ise iyi bir basınç mukavemeti, düşük tokluk ve yüksek maliyete sahiptir. Bu iki farklı lif türü tek bir kompozit malzemede kullanıldığında tokluk açısından grafitten daha iyi ve düşük maliyetli, basınç dayanımı açısından ise kevlandan daha iyi bir hibrit malzeme elde edilebilir [58]. Başka bir kompozit örneği de uzun karbon ve cam liflerle elde edilen hibrit malzemelerdir (Şekil 2.14). Bu malzeme yüksek rijitlik ve dayanım özelliklerine sahipken tatmin edici seviyelerde tokluk değerleri sergilemektedir. Hibrit malzeme, güçlendirme liflerinin ayrı ayrı kullanıldığı kompozitlere göre çoklu performans sergileme yeteneğine sahipken maliyet açısından da avantajlı olmaktadır.

2.1.3 Dolgu Malzemeleri ve Katkılar

Dolgu malzemeleri matris reçinesinden daha ucuz olduğu için bazı durumlarda reçine yerine kullanılabilir. Dolgu malzemesi kullanımının başlıca avantajları şunlardır: maliyeti düşürmek, viskoziteyi kontrol etmek, daha pürüzsüz yüzeyler elde etmek, malzemenin modüllerini yükseltmek ve kalıplama işlemi sırasında oluşan rötreyi azaltmaktır. En fazla kullanılan dolgu malzemelerinden birisi olan kalsiyum karbonat (CaCO_3) vinil ester ve polyester reçinesi için kullanılmaktadır. Kil, mika ve mikroküre cam diğer dolgu malzemelerine örnek olarak verilebilir. Takviye elemanı kullanılmamış matris reçinesi içerisine katılan dolgu malzemeleri modül değerlerini güçlendirirken dayanım ve darbe direnci gibi özelliklerin olumsuz etkilenmesine neden olur. Kalsiyum karbonat ilave

edilen doymamış polyester reçinenin özelliklerinde meydana gelen değişiklik Çizelge 2.10’da gösterilmiştir [36].

Çizelge 2. 10 CaCO₃ ilave edilen polyester reçinenin özelliklerinde meydana gelen değişiklikler [36]

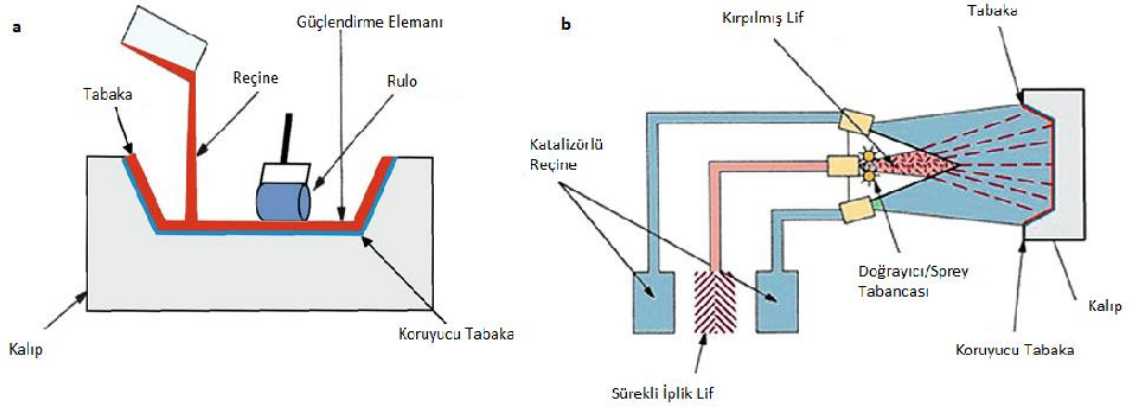
Özellik	Dolgunsuz Polyester	% 30 Dolgu İlave Edilmiş Polyester
Yoğunluk (g/cm ³)	1,3	1,48
Eğilme Dayanımı (MPa)	121	62
Eğilme Modülü (GPa)	4,34	7,1

FRP içerisine dolgu malzemelerinin yanı sıra bazı katkılar da ilave edilebilmektedir. Bu katkı malzemeleri: aşınma önleyici katkılar, adezyon artırıcı katkılar, antioksidanlar, UV dengeleyici katkılar, pigment ve boyalar vb. dir.

2.2 FRP Üretim Yöntemleri

2.2.1 Elle Birleştirme ve Sprey Teknikleri

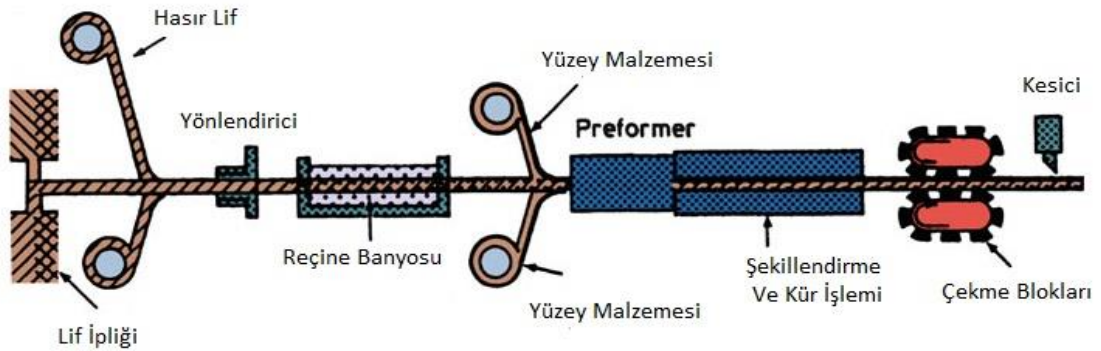
Elle birleştirme yöntemi en basit ve en fazla kullanılan FRP üretim tekniğidir. Lifler kalıp üzerine yerleştirilir ve matris reçinesi fırça veya sprej yardımıyla liflerin üzerine sürülür veya püskürtülür. Sıklıkla uygulanan yöntem matris elemanı ve kırılmış liflerin sprej yardımıyla kalıba püskürtülmesidir. Her iki yöntemde de reçine ve lifler kalıba yerleştirildikten sonra rulo yardımıyla lifler reçineye iyice emdirilir. Şekil 2.13’te bu işlemler şematik olarak gösterilmiştir. İşlem sırasında süreci kısaltmak amacıyla katalizör katkıları kullanılmaktadır. Tüm bu uygulamaların ardından kür işlemi oda sıcaklığında gerçekleştirilmektedir [56].



Şekil 2. 13 Elle birleştirme ve sprej yöntemi a) elle birleştirme tekniği, b) sprej ile birleştirme tekniği [56]

2.2.2 Pultrüsyon Yöntemi ile Üretim

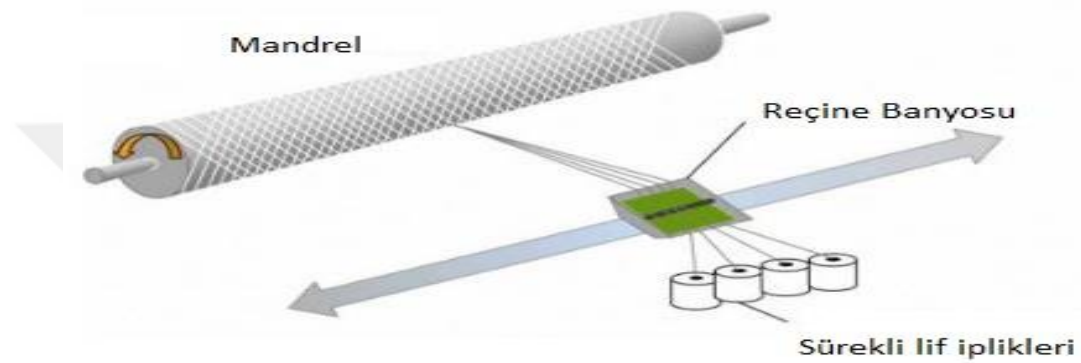
Bu üretim yönteminde genellikle aksel açıdan yönlendirilmiş FRP kompozit malzemeleri üretilir. Üretime başlarken sürekli liflere enine doğrultudaki mukavemet eksikliğini ortadan kaldırmak için hasır ya da iki doğrultulu kumaş eklenebilir. Elde edilen lif birleşimi, içerisinde katalizör de olan reçine banyosunun içerisinde geçirilir. Matris malzemeye iyice doyurulan ürün ısıtılma işleminden önce yapısındaki fazla reçineden arındırılmak üzere bir dizi silme işlemine maruz tutulur. Silme işleminin ardından üretim fazlası olan reçine tekrardan reçine banyosuna yönlendirilir. Kolimatör vasıtasıyla ısıtma işleminin ardından son şekli verilen malzeme reçinenin kür sürecinin ardından kompozit yapısına ulaşır. Üretim hattının sonunda kesici alet vasıtasıyla kesilir. Üretim süresi 10-200 cm/dk dır ve bu süre kullanılan reçine ve üretimi yapılan malzemenin enkesit alanına bağlı olarak farklılıklar gösterebilir. Şekil 2.14 te bu üretim süreci şematik olarak gösterilmiştir [56].



Şekil 2. 14 Pultrüsyon işlem aşamaları [56]

2.2.3 İplik Sarma Yöntemi

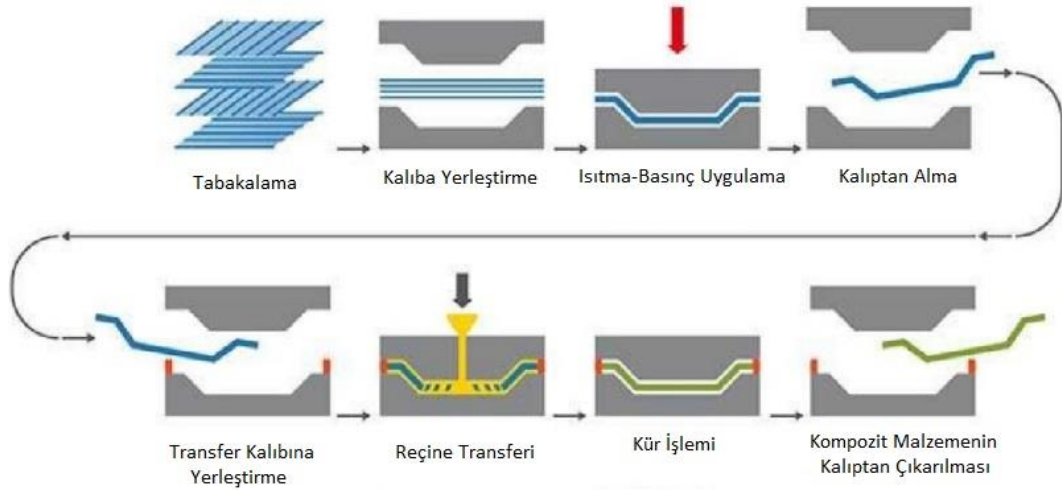
İplik sarma yöntemi sürekli lifler ile sıvı formdaki matris reçinesinin birleştirilmesi ile gerçekleştirilen üretim yöntemidir. Sürekli lifler reçine ile dolu havuza çekilir ve ıslanan lifler dönen bir mandrelin etrafına sarılır. Kompozit malzemenin sarma modeli ve açısı makine ile kontrol edilir. Kullanılan sürekli lifler cam, karbon, aramit (kevlar) ve doğal lifler olabilirken, matris reçinesi epoksi ve doymamış polyesterdir [59]. Bu üretim tekniği şematik olarak Şekil 2.15'te verilmiştir.



Şekil 2. 15 İplik sarma yöntemi ile kompozit malzeme üretimi [60]

2.2.4 Kalıba Reçine Transferi Yöntemi

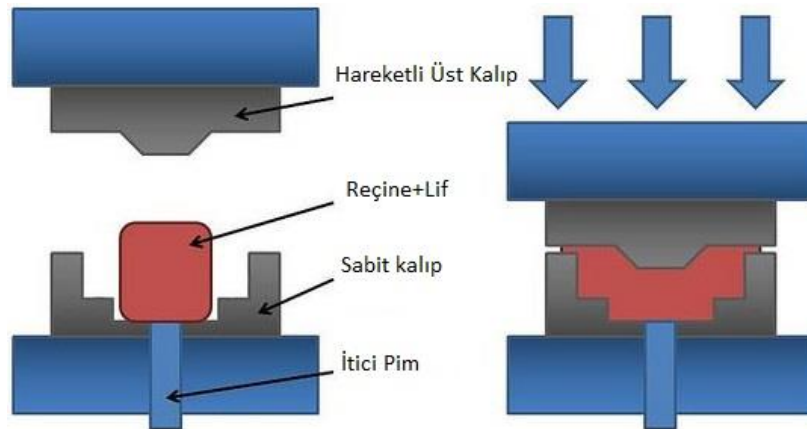
Kalıp içerisine reçine aktarılması yöntemi genellikle uçak, otomobil ve uzay araçlarının kompleks parçalarının imalatı için kullanılmaktadır. Bu üretim tekniği elde yatırma ve sıkıştırma kaplama yöntemine göre daha seri üretim ve daha düşük maliyet avantajları sunmaktadır. Üretimin başlangıcında güçlendirme elemanı, iki parçadan oluşan kalıbın içine yerleştirilir ve bir kap yardımıyla katalize edilmiş haldeki reçine kalıbın içine aktarılır. Kür sürecinin ardından kompozit malzeme elde edilmiş olur (Şekil 2.16). Reçine transferi yönteminde polyster, vinil ester, epoksi ve fenolik reçine kullanılabilirken takviye elemanı olarak dokuma demeti, örgülü hasır, tek doğrultulu elemanlar ve kumaş formundaki takviyeler kullanılır [59].



Şekil 2. 16 Reçine transferi yöntemi ile üretim [61]

2.2.5 Sıkıştırma Kalıplama Yöntemi

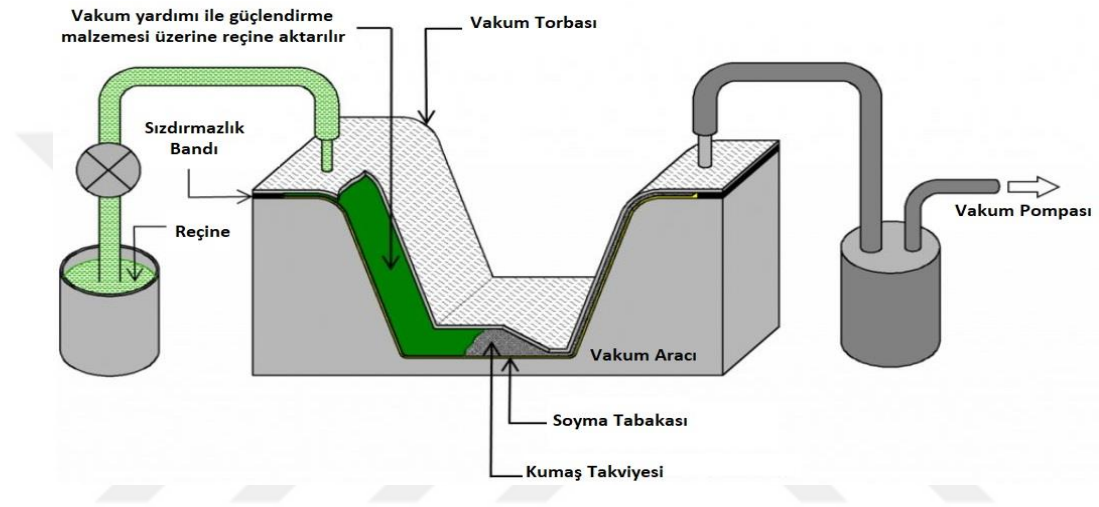
Sıkıştırma kalıplama yönteminde kapalı olan iki metal kalıba basınç uygulanarak kompozit malzeme elde edilir. Sürecin başlangıcında açık olan kalıp boşluğuna kompozit malzeme bileşenleri yerleştirilir. Kalıp kapatılır ve konsolidasyon uygulanarak kompozit malzeme sıkıştırılır. Sıkıştırma işlemi genellikle bir fırında meydana gelen kür işlemleri süresince devam eden bir süreçtir. Isı ve basıncın etkisiyle boşluk oranı çok az ve lif hacmi çok yüksek olan FRP malzemesinin üretimi tamamlanmış olur [62]. Yöntem şematik olarak Şekil 2.17’de verilmiştir.



Şekil 2. 17 Sıkıştırma Kalıplama Yöntemi [63]

2.2.6 Vakum Torbalama Yöntemi

Vakum yardımıyla reçine transferi yöntemi kapalı kalıplama sürecidir. Bu yöntem geleneksel olarak kullanılan FRP üretim yöntemi olan reçine transferi yönteminin farklı bir versiyonu olup daha düşük maliyetle üretim yapmak ve bazı tasarım zorluklarını aşabilmek için geliştirilmiştir. Reçine transferi yönteminden farklı olarak sabit kalıbın diğer tarafında esnek bir vakum torbası vardır (Şekil 2.18). Reçinenin vakum torbasına iletilmesi süresince vakum torbası yardımıyla basınç ve sızdırmazlık sağlanır [64].



Şekil 2. 18 Vakum Torbalama Kalıplama Yöntemi [65]

2.3 FRP Yapı Malzemelerinin Fiziksel ve Mekanik Özellikleri

Daha önceki bölümlerde de bahsedildiği gibi kompozit malzeme iki temel bileşenden oluşmaktadır. Bunlar matris reçinesi ve güçlendirme elemanı olan liflerdir. Lifler kompozit malzeme hacminin %30-70'lik kısmını oluştururken ağırlık olarak liflerin toplam kompozit malzeme ağırlığına katkısı yaklaşık olarak %50 oranındadır. Liflerin karakteristik yapıları gereği görevi malzemeye uygulanan yükleri taşımak, rijitlik ve dayanım gibi özellikleri FRP malzemesine kazandırmaktır [66]. Diğer bileşen olan matris reçinesi ise lifleri bir arada tutmanın yanı sıra malzemeye uygulanan yüklerin liflere aktarılmasını sağlar ve çevresel kaynaklı etkilere karşı kompozit malzemeyi korur. İnşaat mühendisliği yapısal uygulamalarında yaygın olarak kullanılan FRP çeşitleri karbon (CFRP), cam (GFRP) ve aramit (AFRP) takviyeli polimerlerdir.

- **Yoğunluk**

FRP kompozit malzemelerinin inşaat mühendisliği açısından en önemli özelliklerinden birisidir. Özellikle çelik kullanılarak yapılan güçlendirme uygulamaları ile karşılaştırıldığında FRP yapı malzemelerinin kullanımı, düşük yoğunluk özellikleri sayesinde yapının ya da elemanın sabit yükünü daha az artırdığı için avantajlı olmaktadır.

Lif hacim oranı %50-75 alınarak elde edilen toplam FRP yoğunlukları (kg/m^3), kullanılan reçine ve güçlendirme elemanı cinsine göre Çizelge 2.11’de verilmiş ve donatı çeliği ile kıyaslanmıştır [67].

Çizelge 2. 11 Güçlendirme elemanlarının tipik yoğunlukları [67]

Reçine/FRP	CFRP	GFRP	ARFP	Çelik
Polyester	1430-1650	1750-2170	1310-1430	7850
Epoxy	1440-1670	1760-2180	1320-1450	
Vinil Ester	1440-1630	1730-2150	1300-1410	

Tablodaki verilerden de görüleceği üzere FRP malzemelerin yoğunlukları donatı çeliğine kıyasla oldukça düşüktür. İnşaat mühendisliği uygulamalarında bu durum yapının ya da elemanın sabit yükünü azaltacağından önemli avantajlar sunmaktadır.

- **Elastisite Modülü**

İnşaat mühendisliği açısından değerlendirildiğinde, karbon liflerinde donatı çeliğine göre daha yüksek elastisite modülü değerleri görülmektedir. Özellikle yüksek modüllü (HM) olarak üretilmiş olan karbon lifleri donatı çeliğine göre oldukça yüksek değerlerde elastisite modülüne sahiptir. Diğer güçlendirme elemanları olan aramit lifleri, donatı çeliğe ile yaklaşık olarak aynı olurken cam liflerinin elastisite modülleri yaklaşık olarak %50 daha azdır.

Tek doğrultulu kompozit malzemelerde eksenel doğrultudaki elastisite modülü (E_k) aşağıdaki bağıntı ile bulunabilir.

$$E_k = E_r V_r + E_l V_l \quad (2.1)$$

E_r ve E_l sırasıyla reçine ve liflerin elastisite modüllerini, V_r ve V_l ise reçine ve liflerin hacimsel oranlarını ifade etmektedir [66].

- **Uzama**

Genel olarak FRP kompozit malzemeleri elastik davranış sergilediği için uzama değerleri donatı çeliğine göre daha düşüktür. FRP türlerinden Cam lifli kompozitler gerilme etkisi altında çelikten daha az, yüksek dayanımlı karbon lifli kompozitlerden ise daha fazla uzama yeteneğine sahiptir. Aramit lifli kompozitler ise bu grup içerisinde en düşük uzama değerlerine sahip olan FRP türüdür.

- **Termal Genleşme Katsayısı**

Tek doğrultuda yönlendirilmiş FRP malzemelerde, lif doğrultusu ile enine doğrultuda termal genleşme katsayıları birbirlerine göre farklı değerlere sahiptir. Tabi ki burada kullanılan lif türü, miktarı ve reçine tipi de önemlidir. Çizelge 2.12’de tek doğrultulu lif yapısındaki FRP malzemelerde boyuna ve enine doğrultu için termal genleşme katsayısı değerleri verilmiştir. Negatif katsayılı genleşme artan sıcaklık etkisiyle büzüşmeyi, azalan sıcaklıkla genleşmeyi göstermektedir [68].

Çizelge 2. 12 Bazı FRP yapı malzemelerinin termal genleşme katsayıları [68]

Doğrultu	Termal Genleşme Katsayısı ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)		
	CFRP	GFRP	AFRP
Boyuna (α_L)	(-1,00-0)	(6-10)	((-6,0)-(-2,0))
Enine (α_T)	(22-50)	(19-23)	60-80

(*Kullanılan lif hacmi oranı 0,5-0,70 olarak kabul edilmiştir.)

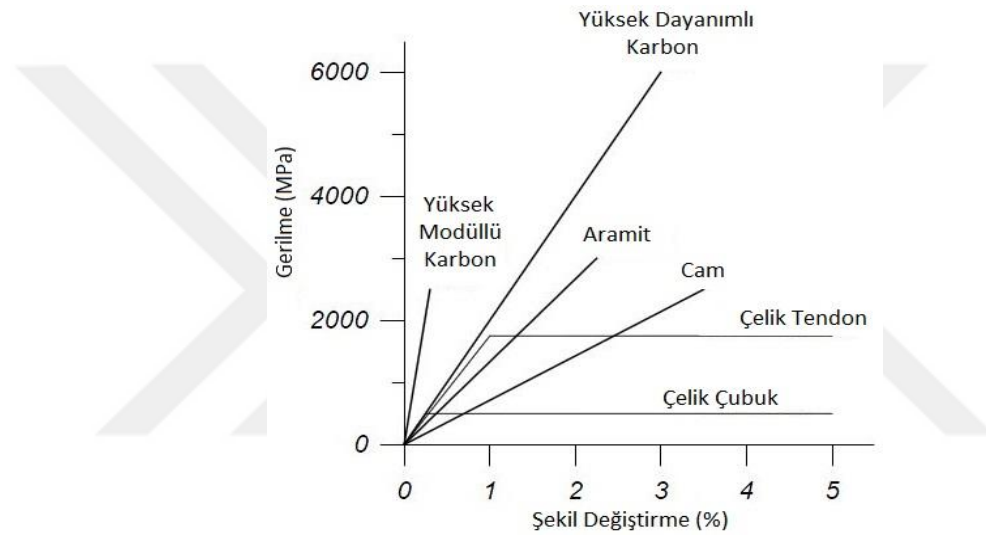
- **Sıcaklık Etkisindeki Davranış**

Yüksek sıcaklık etkisi altında kompozit malzemeyi oluşturan liflerin ve reçinenin karakteristik davranışları birbirinden farklıdır. Karbon lifleri 275 °C nin üzerindeki sıcaklıklara kadar yük taşıma yeteneğine sahipken, cam ve aramit için bu sıcaklık değerleri sırasıyla 1000 °C ve 175 °C dir. Kompozit malzemenin diğer bileşen olan reçinenin ise T_g

(Cam geçiş sıcaklığı) zerindeki sıcaklıklarda (genellikle 60-82°C) moleküler yapısında önemli değişiklikler meydana gelmektedir. Kritik mühendislik uygulamalarında beton yüzeyi ile FRP arasında yük aktarımını polimer malzeme sağladığından, sıcaklığın FRP malzemesi üzerindeki etkisi uygulama öncesinde göz önünde bulundurulmalıdır [68].

- **Çekme Etkisindeki Davranış**

Çekme gerilmeleri altında FRP malzemeleri kopma düzeyine dek elastik davranış gösterir yani donatı çeliği gibi elastik ötesi davranış sergilemezler (şekil 2.19). Plastik şekil değiştirme görülmeyen FRP yapı malzemelerinde kopma gevrek ve ani olarak gerçekleşmektedir.



şekil 2. 19 FRP malzemelerinin gerilme etkisindeki davranışları [53]

FRP kompozitlerde reçineyle kaplanan güçlendirme lifleri malzemeye uygulanan yükü taşıyan ana bileşen olduğu için kullanılan lifin cinsi, miktarı ve kompozit malzeme içindeki doğrultusu ve dizilimi çekme özelliklerini etkileyen başlıca etkenlerdir [68].

- **Basınç Etkisindeki Davranış**

Güçlendirme malzemesi olarak kullanılan FRP malzemelerinin basınç dayanımı açısından performansı çekme dayanımından daha düşük olmaktadır. Malzemeye eksenel doğrultuda basınç uygulanması durumunda, kompozit malzemede kullanılan lif türü, liflerin malzeme hacmi içerisindeki dağılımı ve kullanılan reçine tipine de bağlı olarak, enine doğrultuda çekme kırılması, mikro düzeyde gerçekleşen lif burkulması ve kesme kırılması gibi göçme biçimleri görülmektedir. Basınç dayanımı malzemede kullanılan

güçlendirme liflerinin türlerine göre değerlendirilecek olursa, karbon esaslı (CFRP) polimerlerde basınç dayanımı, çekme dayanımının %78 'i kadar olurken, cam (GFRP) ve aramit takviyeli polimerlerde sırasıyla %55 ve % 20 oranlarında olmaktadır [68].

- **Durabilite**

Durabilite yük etkisinde çevresel şartlardan dolayı oluşan çatlama, korozyon, yıpranma gibi etkenlere belirli bir süre dayanma kabiliyetidir. FRP yapı malzemelerinde polimerin kimyasal yapısındaki bozulmalar zamanla malzemenin özelliklerinde değişikliklere sebep olacaktır. Bu değişikliklerin sebepleri genellikle nem etkisi, malzeme içerisine solüsyonların girişi veya alkali etkisi gibi çevresel kaynaklı problemlerdir [69]. Bu konuda malzeme için herhangi bir dayanıklılık özelliğinin belirlenmesindeki en temel problem söz konusu bilgilerin toplanma aşamasındaki geçen süredir. İnşaat mühendisliği uygulamalarında FRP malzemesi için çevresel etkenlerin temel hedefi olan polimerlerin birçok çeşidi vardır. Bu polimerlerin imalatı sırasında kullanılan katkı malzemeleri kompozit malzemenin durabilitesini etkileyecek ve sonuç olarak malzemenin servis ömrünü de değiştirecektir [70]. Örneğin epoksi katmanlı silikat, nanokompozitlerin üretim aşamasında polimerin yapısına katılması sonucunda malzemenin geçirgenliği azalmış, mekanik özellikleri artmıştır [71].

Malzemenin durabilitesi hakkında bir ön bilgiye sahip olabilmek için laboratuvar ortamında yapılan deneyler dikkate alınmalı ve özel olarak durum bazında (alkali etkisi, UV etkisi, yüksek sıcaklık etkisi, donma-çözülme vb.) detaylı incelemeler yapılmalıdır [70].

Durabilite açısından kompozit malzemenin diğer bileşeni olan takviye liflerinin çevresel etkilere karşı davranışları da bilinmelidir. Örneğin, karbon lifleri alkali ve asidik ortamlarda kendi özelliklerini koruyabilirken cam lifleri bu ortamlarda zarar görebilir. İletken özelliği açısından CFRP iletken karakterliken AFRP ve GFRP elektriği iletmez. Donatı çeliği ile CFRP malzeme arasında oluşabilecek galvanik korozyonu engellemek için çelik ile FRP malzemenin temasına engel olunmalıdır. Bu sayede betonarme elamanların servis ömrü bu tür hasarlardan etkilenmeyecektir [68].

- **Sünme – Kopma Davranışı**

Belirli bir zaman aralığında yük etkisi altında kalan FRP malzemesi, dayanıklılık süresini aştıktan sonra aniden kopabilir bu tür kopma şekline sünme kopması adı verilmektedir. Çevresel etkenlerle malzeme bünyesine nüfuz eden zararlı maddeler malzemenin durabilitesini etkilerken bu türden bir kopmanın da daha erken oluşmasına neden olacaktır. Karbon lifleri sünme kopmasına karşı en dirençli lif türü iken cam lifleri en zayıf lif türüdür [68].

- **Yorulma Davranışı**

Mühendislik uygulamalarında kullanılan FRP malzemeleri içinde yorulma direnci en yüksek olan CFRP'dir. CFRP'nin karakteristik bir özelliği olan dayanıklılık limiti başlangıçtaki nihai statik dayanımının % 60-70 i arasındadır. Aramit lifleri iyi bir yorulma direncine sahipken, cam lifleri çevresel faktörlerin de etkisiyle yorulma açısından en zayıf olan lif türüdür [68].

- **Kesme Davranışı**

Tek doğrultuda yönlendirilmiş FRP malzemelerinin lif doğrultusunda çekme dayanımları oldukça yüksek olmasına rağmen Çizelge 2.13'te de görüleceği gibi farklı FRP türleri eğer tek doğrultulu olarak mühendislik uygulamalarında kullanılırsa kesme kuvvetlerini karşılama açısından önemli problemler ortaya çıkacaktır. FRP malzemesinin kesme dayanımındaki zafiyetini ortadan kaldırmak için uygulanan yükü de dikkate alacak şekilde lif doğrultuları $\pm 45^\circ$ olacak şekilde ayarlanabilirse malzemenin kesme dayanımı artırılmış olacaktır. Tabi bu durumda tüm tabakaların bu şekilde tasarlanması malzemenin çekme dayanımı açısından olumsuz sonuçlar doğuracaktır. Bunun önüne geçmek için sadece bazı tabakaların lif doğrultularının verilen açı değerlerinde olması çekme dayanımı açısından ortaya çıkacak problemleri ortadan kaldıracaktır [72].

Çizelge 2. 13 Bazı FRP türlerine ait kesme dayanımları [72]

FRP	Kesme Dayanımı (MPa)
Carbon/Epoksi	93
Cam/Vinil ester	16
Aramit/Epoksi	34



BETONARME KİRİŞLERDE ONARIM VE GÜÇLENDİRME TEKNİKLERİ

Betonarme yapılarda güçlendirme, genel olarak tasarım öncesinde yapılan hatalar, yapıların kullanım amaçlarının zamanla değişmesi, herhangi bir sebep dolayısıyla yapının ya da yapıya ait bazı elemanların hasar görmesi, deprem vb. sebeplerden ötürü yapı elemanlarının tamamı ya da hasar durumuna göre belirli bir kısmının onarılması ya da güçlendirilmesidir. Güçlendirme betonarme bir yapının kolon, kiriş ve döşeme elemanlarının tümüne uygulanabilmektedir. Diğer yapı elemanları gibi hasar görmüş, rijitliği, dayanımı ya da sünekliği yeterli olmayan betonarme kirişler de farklı şekil ve tekniklerle güçlendirilebilir.

Betonarme kirişlerde görülen hasar tipleri genel olarak belirlenecek olursa; yatay ve düşey yükler nedeniyle oluşan hasarlar, hasarın ilerlemesi neticesinde ani olarak göçme mekanizmasının oluşmasına neden olan kesme kuvvetleri nedeniyle oluşan kesme çatlağı ve kolon - kiriş birleşim bölgelerinde oluşan hasarlardır [73].

Bünyesinde ileri düzeyde çatlak barındırmayan ancak hafif çatlaklar tespit edilmiş kirişler için onarım/güçlendirme, epoksi ya da çimento şerbeti kullanılarak yapılabilir. Betonun ezilmesi, donatının sıyrılması veya kopması gibi ağır hasarların görüldüğü durumlarda, onarım daha ileri teknikler kullanılarak yapılmalıdır. İleri düzeydeki hasar durumlarında, betonarme kirişin bir süreliğine askıya alınması gerekmektedir [74]. Betonarme kirişlerde ileri düzey hasar durumlarının güçlendirilmesine geçmeden önce, düşük hasar seviyesi olarak kabul edilen çatlakların onarımından bahsedilmelidir. Bu çatlaklara

zamanında müdahale etmek yapı elemanının performansı açısından çok önemlidir. Çünkü kılcal düzeydeki bu çatlaklardan sızan su ya da nem donatı çeliğinin zaman içerisinde korozyona uğramasına neden olur. Korozyona uğramış donatılar ile beton arasında aderans kaybı görülür ve zamanla beton ve donatı artık beraber çalışamayacak hale gelir. Daha ileri düzeyde ise örtü betonunun yapısal elemandan tamamen ayrılması gibi durumlar ile karşılaşılabilir. Bahsedilen bu düşük düzeyli hasarların güçlendirilme yöntemleri aşağıda verilmiştir.

- **Epoksi Reçineleri ile Güçlendirme**

Epoksi reçineleri yapıştırma özelliği çok güçlü olan yapı malzemeleridir. Çekme dayanımları 50-110 kg/cm² arasında değişirken, kopma birim uzama oranları % 15-50 arasındadır. Yapı malzemesi olarak su, asit ve alkali etkilerine karşı oldukça dirençlidir. Sentetik reçineler kimyasal moleküler yapışma sağlar. Uygulama yapılan yüzeylerin pürüzlü olması durumunda performans açısından daha iyi netice alınır çünkü daha geniş bu durumda daha geniş bir etki alanı çalışır durumda olacaktır. Sürekli olarak uygulanmış epoksi reçinesi çatlağın her iki yüzünü birbirine bağlar ve gerilme yığılmalarını önler. Epoksi yapı malzemesine polisülfid ilave edilmesi durumunda, elastik bir yapıştırıcı malzeme elde edilir ve 200 kg/cm² 'ye kadar ulaşan çekme dayanımları görülebilir. Epoksi reçinesi sıcaklığa karşı oldukça hassastır bu yüzden yüksek sıcaklık değerlerinde dayanım kaybı göstermektedir. Güçlendirmede genellikle 5 mm genişliğe sahip çatlaklarda tek başına kullanılabilirken, daha geniş çatlakların onarımı söz konusu olduğunda epoksi, dolgu malzemesi ile birlikte kullanılmalıdır [75].

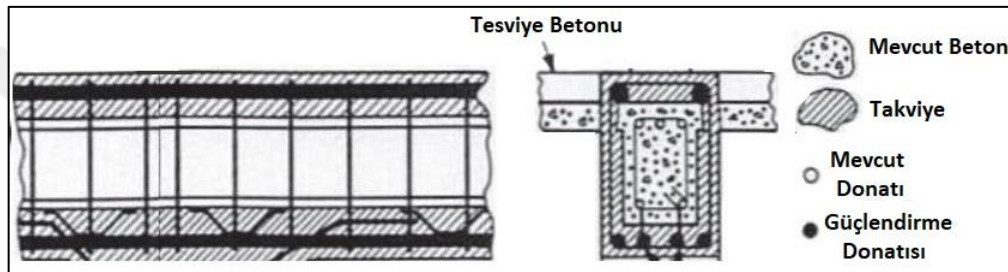
- **Çimento Şerbeti ile Güçlendirme**

Çimento şerbeti ile yapılan güçlendirme uygulamalarında 0,1 mm veya daha büyük çatlaklar basınç etkisi altında onarılabilir. Çimento şerbeti yapımında başlangıç dayanımı yüksek portland çimentosu ve normal beton içerisine sülfat – alüminat ilavesiyle elde edilen genleşen (ekspansif) çimento kullanılması, daha iyi sonuçlar elde edilmesini sağlayacaktır. Başlangıç dayanımı yüksek çimento kullanılması onarımın daha hızlı yapılmasını sağlarken, genleşen çimentonun tercih edilmesi durumunda ise çatlakların

içerisine sızan şerbetin genişlemesi neticesinde tüm boşlukların doldurulması sağlanır [75].

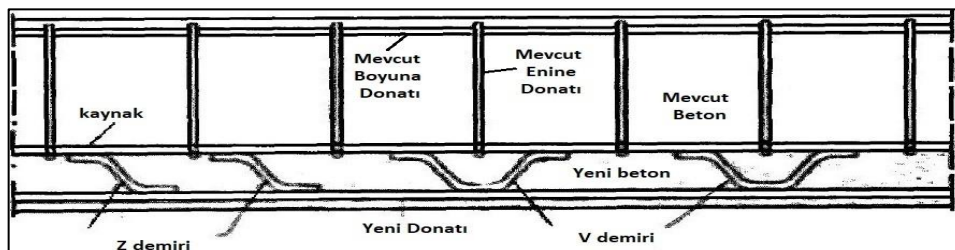
3.1 Betonarme Kirişlerin Mantolama Tekniği ile Güçlendirilmesi

Bu yöntem farklı nedenlerle betonarme kirişlerde meydana gelen hasarların onarılmasında kullanılan tekniklerden birisidir. Özetle; hasar görmüş mevcut elemanın çevresine, enine ve boyuna donatı içeren yeni bir betonarme tabakasının ilave edilmesi ile eleman kesitinin büyütülmesi ve elemanın güçlendirilmesidir [76]. Şekil 3.1’de kiriş güçlendirmesi şematik olarak verilmiştir.

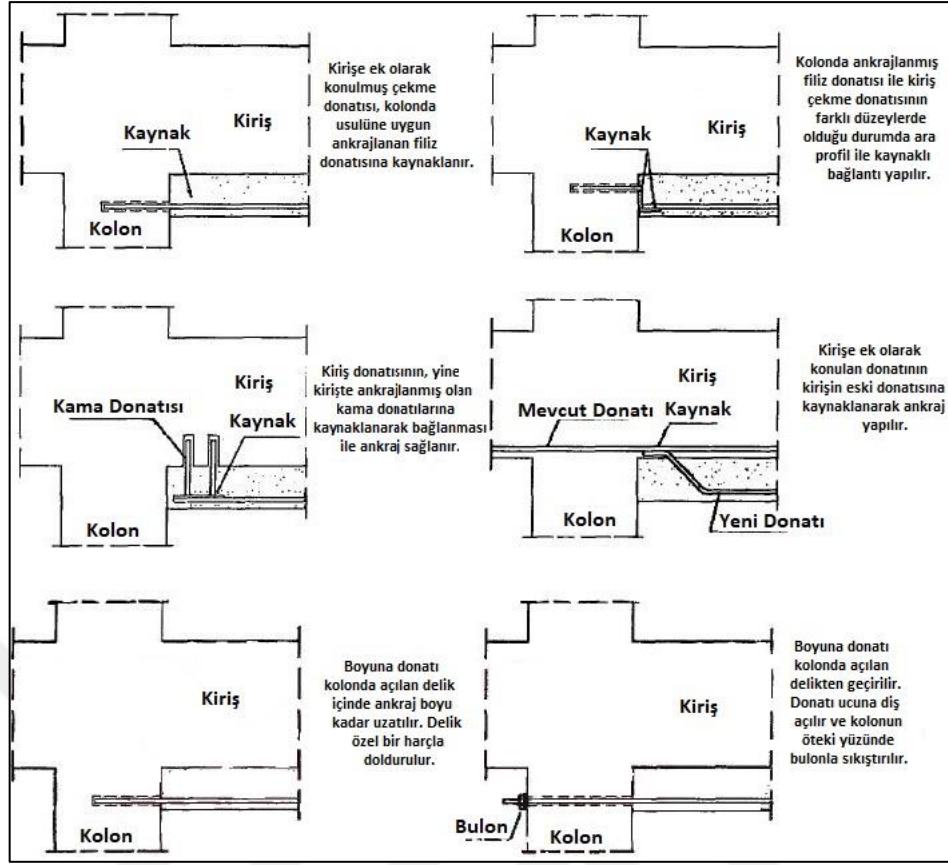


Şekil 3. 1 Betonarme Kirişlerde Mantolama güçlendirmesi

Mantolama tam ve kısmi olarak gerçekleştirilebilir. Tam mantolamada kiriş yüzeylerinin tamamı ya da eğilme bölgesi ve yan yüzeyleri güçlendirilirken, kısmi mantolamada sadece kirişin çekme bölgesi veya üst yüzeyi güçlendirilir. Güçlendirme yapılırken, güçlendirme donatısı ile mevcut kirişin donatıları arasında mutlaka bir bağ bulunmalıdır. Bu boyuna donatılara kaynaklanan V ve Z demir bağlantıları ile sağlanabilir (Şekil 3.2). Ayrıca kiriş boyuna donatısı ya kolona kenetlenerek ya da kolonun karşı tarafına geçirilerek süreklilik sağlanmalıdır. Kiriş alt yüzüne yerleştirilen güçlendirme donatılarının ankrajı için yapılan farklı uygulamalar Şekil 3.3’te verilmiştir.

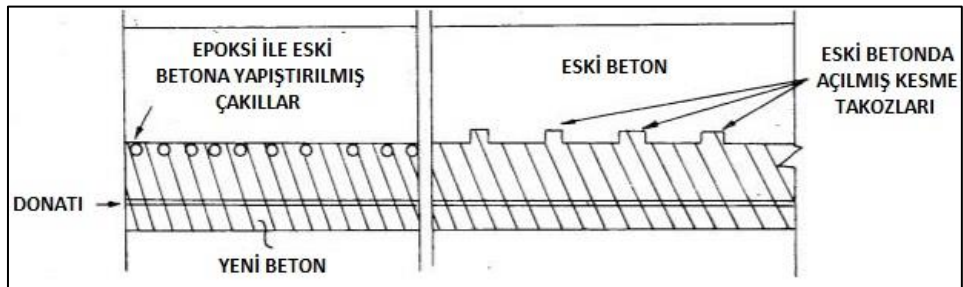


Şekil 3. 2 Kiriş güçlendirmesinde V ve Z demir bağlantıları [77]



Şekil 3. 3 Güçlendirme donatısı ankraj uygulamaları [77]

Mantolama tekniği ile kirişlerin güçlendirmesinde, önemli olan uygulamalardan birisi de mevcut beton ile yeni betonun birlikte çalışması için her ikisi arasında da tam bir kenetlenme sağlanmasıdır. Bu amaçla, uygulama yapılırken mevcut beton üzerine epoksi ile çakıllar yapıştırılabilir veya mevcut betonda kesme takozları oluşturulur (Şekil 3.4) [75].



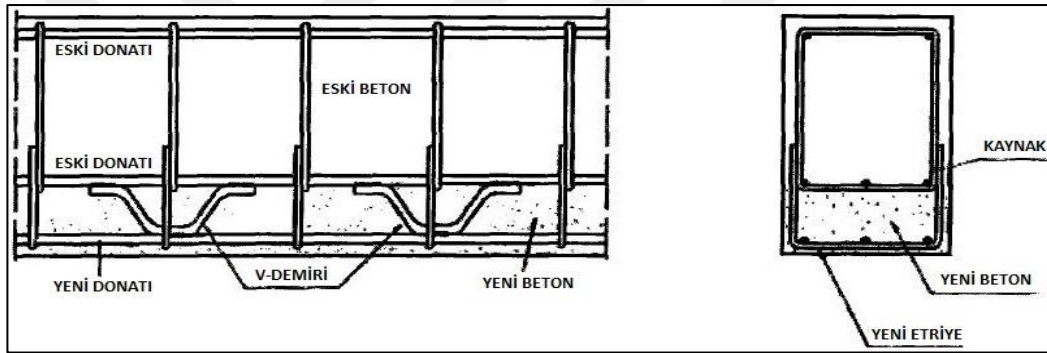
Şekil 3. 4 Mevcut beton ile yeni betonun kenetlenmesi [75]

Güçlendirme yapılan kirişlerde, dengeli donatı oranının kirişin donatı yüzdesinden büyük olması gerekmektedir. Bu şart sağlanmadığı takdirde kirişte gevrek kırılma oluşacak ve

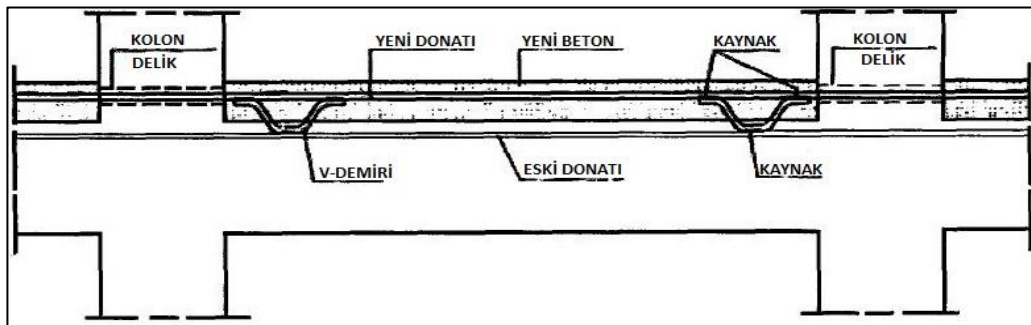
nihayetinde yapının süneklik ve depreme karşı direnci olumsuz yönde etkilenecektir [75].

3.1.1 Tek Yüzey Mantolama

Betonarme kirişlerin eğilme dayanımlarını artırmak için çekme bölgesinin (Şekil 3.5) ya da deprem yükleri etkisinde kiriş elemanlarda oluşacak negatif momentlere karşı güçlendirme amacıyla kirişlerin üst yüzeylerinin (Şekil 3.6) mantolanmasıdır. Uygulama yapılırken, örtü betonu kaldırılmalı ve güçlendirme yapılacak bölge yüzey pürüzlerinden arındırılmalıdır. Ayrıca daha önceki kısımda bahsedilmiş olan, mevcut beton ile yeni beton arasındaki kenetlenme, güçlendirme donatıları ile kirişlerin mevcut boyuna donatıları arasındaki bağlantı ve boyuna donatıların sürekliliği dikkat edilmesi gereken hususlardır.



Şekil 3. 5 Betonarme kirişlerin eğilme bölgesinin güçlendirilmesi [77]

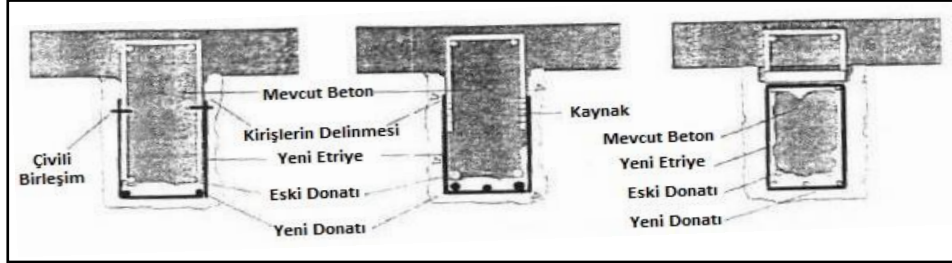


Şekil 3. 6 Betonarme kirişlerin üst yüzeylerinin güçlendirilmesi [77]

3.1.2 Üç Yüzey Mantolama

Bu yöntemde güçlendirme elamanı olarak sonradan montajı yapılan enine donatılar mevcut etriyelere bağlanır. Oluşturulan kenetlenme çok güçlü olmadığından, kirişlerin

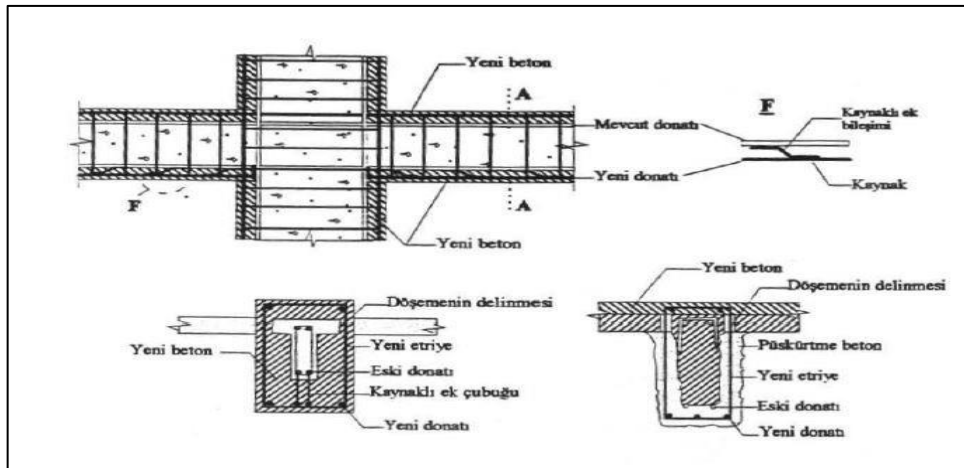
bu teknik yerine dört yüzeyden güçlendirilmesi performans açısından daha verimli bir çözüm olacaktır. Eğer bu yöntem tercih ediliyorsa püskürtme beton kullanılması uygulama açısından uygun olacaktır (Şekil 3.7) [78].



Şekil 3. 7 Üç taraftan mantolama tekniği [78]

3.1.3 Dört Yüzey için Tam Mantolama

Bu yöntemin kullanılması ile betonarme kirişlerin eğilme ve kesme dayanımları önemli ölçüde artmaktadır. Uygulama yapılırken, enine donatılar döşemelerde açılan boşluklardan geçirilir ve kiriş kuşatılır. Betonlama işlemi bu açıklıklardan yapılabilmektedir (Şekil 3.8) [78]. Uygulama ile birlikte donatı alanı artarken kiriş kesiti de büyüyecektir. Kuvvetli kolon zayıf kiriş ilkesine uymak açısından güçlendirme uygulaması genellikle kolonların da kirişlerle birlikte mantolanması ile yapılır [79].



Şekil 3. 8 Betonarme kirişlerin dört yüzeyden güçlendirilmesi [79]

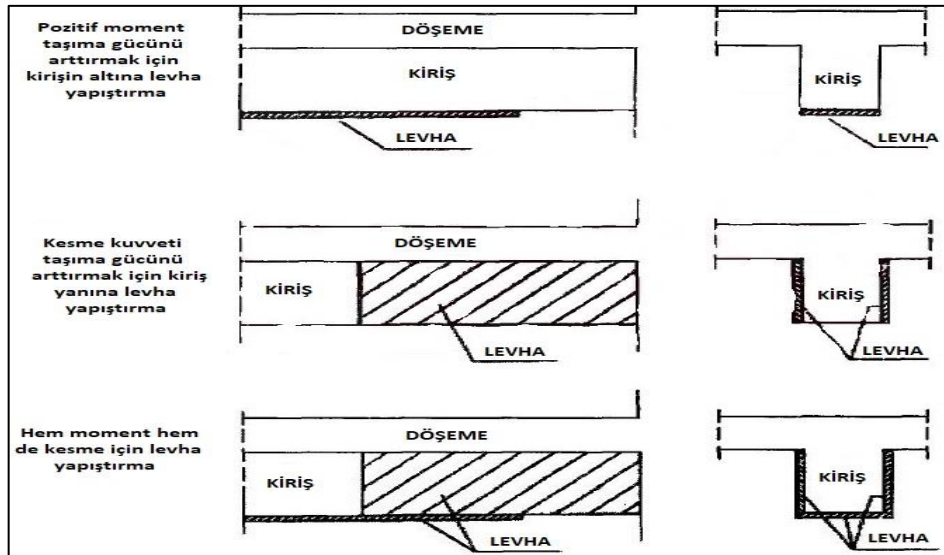
Betonarme kirişlerde, eğilme kapasitesinin artırılması için yapılan güçlendirme çalışmalarında, mesnet bölgelerinde ilgili elemanın kesme kapasitesinin de artacağı bilinmeli ve bu hususta gerekli tedbirler alınmalıdır. Yani kapasite tasarım ilkesi hesaba

katılmalıdır. Ayrıca hasar görmemiş kirişlerde uygulama yapılırken, güçlendirilmiş kesitin dayanım ve rijitliği %10 azaltılmalıdır. Hasarlı kirişlerde ise yaklaşık olarak %20 oranında alınacak olan rijitlik düşüşü uygun olacaktır [80].

3.2 Betonarme Kirişlerin Çelik Plakalar ile Güçlendirilmesi

Betonarme kirişlerin güçlendirilmesinde kullanılan tekniklerden birisi de çelik plakalar kullanılarak yapılan güçlendirmedir. Yöntemde çelik plakalar kiriş yüzeylerine epoksi esaslı yapıştırıcılar kullanılarak yapıştırılır. Sıyrılma problemlerini önlemek adına bulonlama ya da kaynak yapma yöntemleri tercih edilebilir. Bu yöntem kullanılarak yapılan güçlendirme uygulamalarında, süneklik talebi karşılanabilirken bazı durumlarda çelik plakalar dayanım açısından yetersiz kalabilmektedir. Gerekli dayanımı sağlamak için levhanın et kalınlığı artırılabilir ancak bu durumda da maliyet, taşıma ve montaj gibi sorunlar açığa çıkacaktır [81].

Güçlendirme, betonarme kirişte oluşan ya da oluşabilecek hasar durumları göz önüne alınarak, kesme dayanımını artırmak amacıyla kiriş yan yüzeylerine, eğilme mukavemetini artırmak için çekme bölgesine ya da her üç yüzeye birlikte uygulanabilir. Şekil 3.9'da her üç uygulamaya ait şematik gösterim verilmiştir.



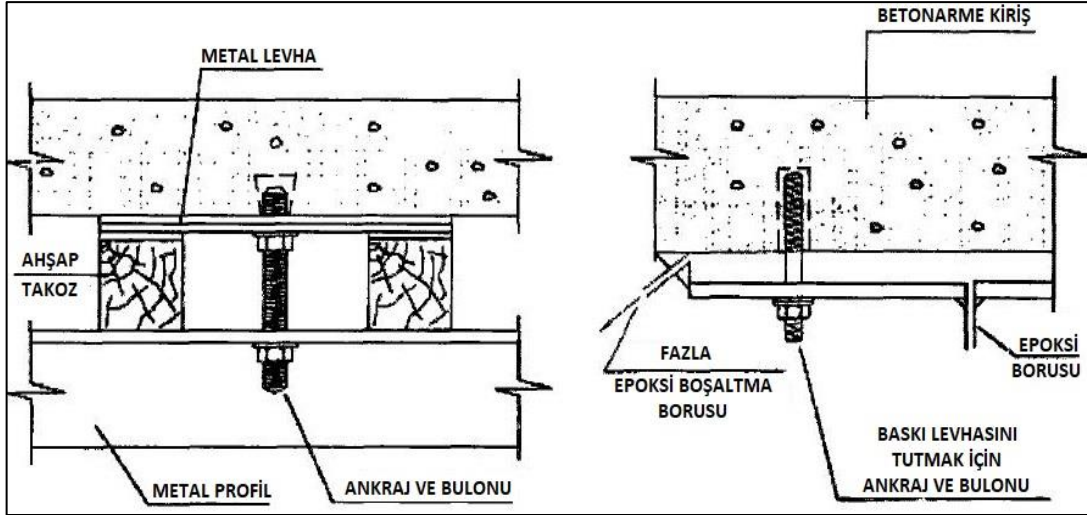
Şekil 3. 9 Betonarme kirişlerin çelik plakalar ile güçlendirilmesi [77]

Uygulamasında kullanılan plakaların kalınlıkları 2-10 mm arasında değişmektedir. Et kalınlığı 3 mm den fazla olan plakaların güçlendirmede kullanılması durumunda,

betonarme kirişin yüzeyi ya da yüzeyleri genleşme özelliği gösteren çimento hamuruyla düzeltilmeli ve kama ankraj cıvataları kullanılmalıdır. Epoksi yapı malzemesi olarak belirli bir sıcaklıktan sonra dayanımını önemli ölçüde yitirdiğinden, yangın ve korozyon gibi dış etkenlere karşı gerekli tedbirler alınmalıdır [82].

Epoksi kullanımı ile güçlendirme yapıldığında, beton ile çelik plakaların kenetlenme sürecinde epoksi reçinesi sertleşinceye kadar plakalar mengenelerle beton yüzüne doğru sıkıştırılmaktadır. Daha iyi bir kenetlenme ilişkisi sağlamak için levhaların beton yüzüne ankrajı sağlanabilir [78]. Çelik plakaların betonarme kiriş yüzeyine ankrajla monatajı Şekil 3.10'da verilmiştir. Ankraj uygulaması ile levha ve beton yüzeyi arasında kenetlenme sağlanırken, uygulamada aşağıdaki adımlar takip edilir [75]:

- Çelik plakaların yüzeylerindeki mevcut pürüzler giderilir.
- Beton yüzeyi de aynı şekilde jet taşı gibi mekanik aletler kullanılarak pürüzlerinden arındırılır. Eğer beton yüzeyinde boşluklar ya da oyuklar var ise bunlar epoksi harcı kullanılarak doldurulur.
- Kirişte ya da döşemede açılan oyuklara ankraj bulonları yerleştirilir.
- Levha ve beton yüzeylerindeki deliklerin üst üste gelmesi için aynı işlem levhalara da uygulanır. Eğer enjeksiyon tekniği kullanılacak ise levhalarda enjeksiyon borularının karşısına denk gelen yerlerde delikler açılmalıdır.
- Enjeksiyon tekniğinin kullanılması halinde, çelik plakaların yüzeyleri tiner ile temizlenmeli ardından enjeksiyon ve taşıma borularının montajı yapılmalıdır.
- Levha ve enjeksiyon borularının etrafı epoksi harcı kullanılarak kapatılmalı ve son olarak epoksi harcı enjeksiyon borularından enjekte edilmelidir.

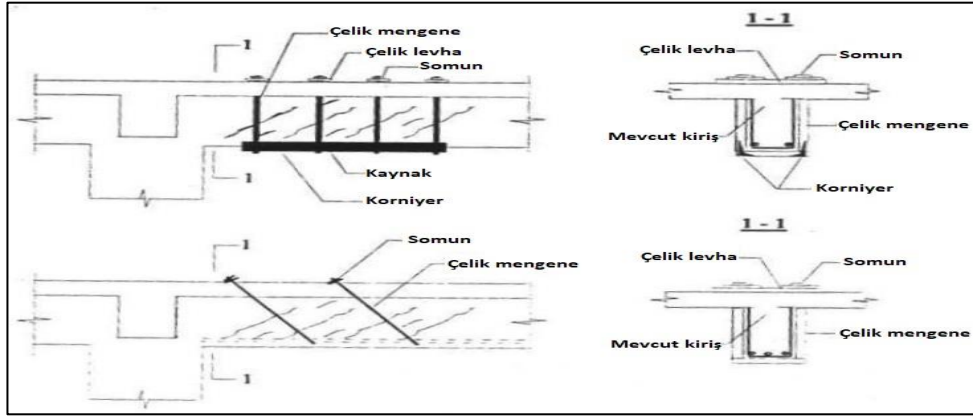


Şekil 3. 10 Çelik levhaların ankrajlanması [77]

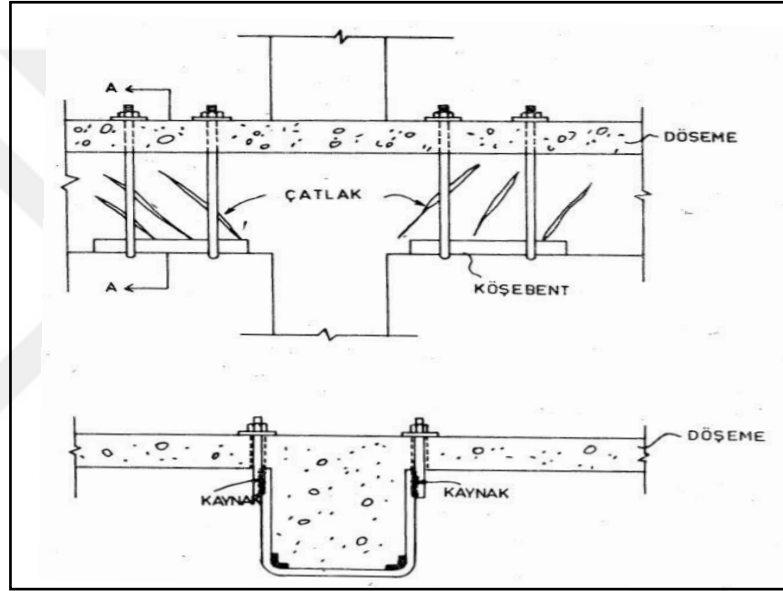
3.3 Betonarme Kirişlerin Mekanik Yöntemlerle Güçlendirilmesi

Bu yöntem genellikle kesme kuvveti kapasitesi düşük olan kirişlerde, mesnet bölgelerinde oluşan eğik çatlaklara karşı betonarme kirişlerin güçlendirilmesinde kullanılmaktadır. Uygulamanın amacı, kirişlerde oluşmuş bu çatlakların daha da büyümelerinin önüne geçmek ve mesnet bölgelerinde oluşan kesme kuvvetlerinin taşınmasını sağlamaktır [75]. Uygulama şematik olarak Şekil 3.11’de verilmiştir.

Söz konusu güçlendirme yöntemi, çatlakların mekanik bağlayıcılar ile dikilmesi işlemi gibi görülebilir. Güçlendirme mekanizması çatlakları kesen çubuklar ve çubuk uçlarının uygun bir biçimde bağlanması ile oluşur. Mekanik bağlayıcıların süreksiz olmasından ötürü gerilme birikimleri oluşabildiği gibi uç kısımlarda bulunan somunlar beton yüzeyinde ezilme ve kırılmalara neden olabilmektedir. Mekanik bağlayıcılarda yük aktarımı bağladıkları yüzeyler arasındaki sürtünme kuvveti ile sağlanır. Kiriş bünyesindeki çatlaklara dik doğrultuda bir kuvvet uygulandığında, başka bir ifadeyle vidalar sıkıştırıldığı zaman etkili olarak çalışmaya başlarlar. Eğer çatlaklarda genişleme eğilimi varsa, çubuklarda ilave gerilmeler oluşacaktır. Çubuklarda oluşan ek gerilmelere karşılık gelen birim uzama miktarı kadar çatlaklar açılabilir [75]. Çelik çubuklar doğrudan döşemede açılan boşluklardan geçirilip somunla bağlandığı gibi kaynak tekniği kullanarak da güçlendirme mekanizması oluşturulabilir (Şekil 3.12).

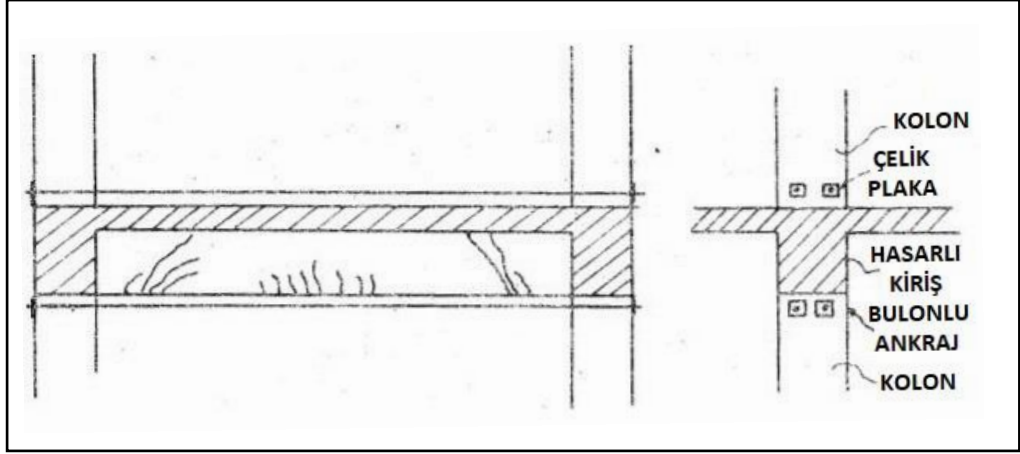


Şekil 3. 11 Kirişlerin mekanik bağlayıcılar ile güçlendirilmesi [78]



Şekil 3. 12 Kaynak yoluyla güçlendirme mekanizmasının oluşturulması [75]

Bu yöntemde çoğunlukla enine donatı çubukları kullanılsa da boyuna donatı kullanarak da çatlamış bir kirişin daha fazla hasar görmesinin önüne geçilebilir. Uygulama kirişin dış yüzeyinden yapılmaktadır. Çelik boyuna donatılar hasar görmüş kirişin hem alt yüzeyinden hem de üst yüzeyinden bulonlar kullanılarak, kirişin kolonlarla birleştiği bölgelere ankrajanır ve çubuklar gerdirilir. Bu gerilme etkisiyle betonarme kirişteki mevcut çatlaklar belirli bir miktar kapatılabilir. Bu sayede kiriş rijitliği kısmen artarken, düşey doğrultuda söz konusu kirişin yapacağı yer değiştirme azalmış olacaktır. Şekil 3.13'te bahsedilen güçlendirme yöntemi şematik olarak verilmiştir.



Şekil 3. 13 Boyuna donatılar ile güçlendirme [75]

3.4 Betonarme Kirişlerin FRP ile Güçlendirilmesi

Hasar görmüş veya performans açısından yetersiz olan yapısal elemanların FRP yapı malzemeleri kullanılarak güçlendirilmesi son yıllarda yaygın olarak gerçekleşmektedir. Geleneksel güçlendirme yöntemlerine kıyasla, FRP yapı malzemelerinin mekanik dayanımlarının çok yüksek olması, sahadaki pratik uygulanabilirliği, diğer yöntemlere göre daha kısa sürede uygulamasının tamamlanabilmesi, düşük ağırlığı, korozyon ve alkali etkisine karşı dirençli olması gibi birçok etken bu yöntemin ön plana çıkmasına sebep olmaktadır. Yapısal güçlendirme uygulamalarında, FRP yapı malzemeleri tabaka, kumaş, şerit ya da donatı çubuğu formunda kullanılabilir.

FRP malzemeleri genel olarak polimerik matris içerisindeki karbon, cam ya da aramid liflerinden oluşmaktadır. Dış yüzeyden güçlendirme yapılması durumunda genellikle eğilmeye karşı güçlendirme, basınç etkisindeki elemanlarda sargı etkisini iyileştirme ve aynı zamanda elemanın sünekliğini artırma ve kesme dayanımı açısından güçlendirme amaçlanmaktadır [83].

3.4.1 Uygulama Öncesi Hazırlık

FRP ile güçlendirilen veya onarılan beton elemanların davranışı, uygulama yapılacak beton yüzeyin sağlam olmasına ve güçlendirmeye uygun şekilde hazırlanmasına bağlıdır. Doğru hazırlanmayan beton yüzeyi, FRP nin öngörülen yük aktarımına erişmeden beton

yüzeyinden ayrılmasına veya sıyrılmasına neden olacaktır [68]. Uygulama öncesi hazırlıkta genel olarak aşağıdaki hususlara dikkat edilmesi gerekmektedir. Bunlar [84];

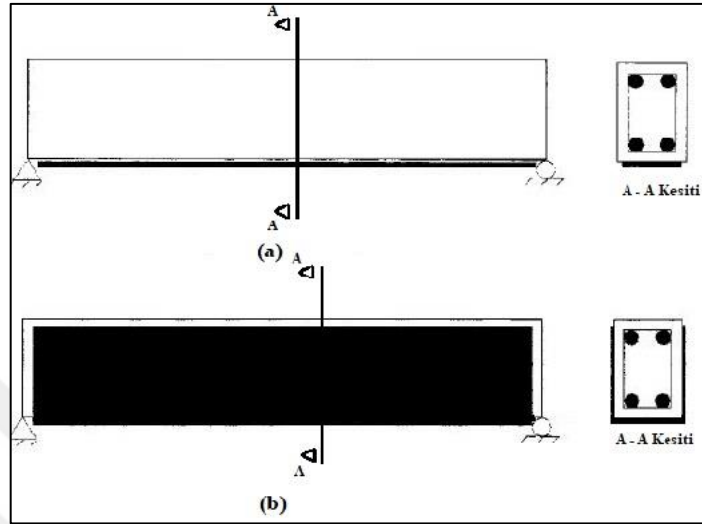
- ✓ Kullanılan FRP türüne göre beton yüzeyin pürüzlülüğü ayarlanmalıdır. Bu işlem yüksek basınçlı kumlama veya öğütme teknikleri ile yapılabilmektedir. Hangi yöntem tercih edilirse edilsin beton kalitesine zarar verecek uygulamalardan kaçınılmalıdır.
- ✓ Güçlendirilecek elemanda çelik donatının korozyonu, betonda çatlaklar veya boşluklar gibi potansiyel hasar mekanizmalarının daha önceden onarılmış olması gerekmektedir.
- ✓ Beton yüzeyinin pürüzlülüğü kullanılacak FRP tipine göre değişebilmektedir. Şeritler veya tabaklı kompozitler yüzey pürüzlerinden fazla etkilenmezken, levha veya kumaş tipi FRP malzemeleri esnek bir yapıya sahip olduğundan herhangi bir yüzey bozukluğundan etkilenebilmektedir.
- ✓ Islak uygulama işlemlerinde beton yüzeyin pürüzlülüğü ile ilgili bazı sınırlamalar olduğundan reçine ile birlikte macun kullanılmalıdır. Yüzey onarımı üretici firmanın şartnamesine uyularak macun vasıtasıyla gerçekleştirilebilir.
- ✓ Güçlendirme uygulamasından önce yüzeylerin tozdan arındırılması gerekmektedir. Bu işlem basınçlı hava ile gerçekleştirilebilir.
- ✓ Levha veya kumaş formunda FRP kullanılıyor ise güçlendirilecek elemandaki keskin köşeler yuvarlaklaştırılmalıdır.
- ✓ Astar kullanımı normal durumlarda gerekli olmamaktadır. Eğer yapıştırıcı üreticisi tarafından önerilirse üretici firmanın şartnamesine göre kullanılabilir.

3.4.2 FRP Uygulaması

3.4.2.1 Dış Yüzeyden Yapılan Güçlendirmeler (EBR)

FRP ile yapılan güçlendirme uygulamalarında en yaygın kullanılan yöntemdir. Uygulama genel olarak beton yüzeyin hazırlığının tamamlanmasının ardından, kompozit

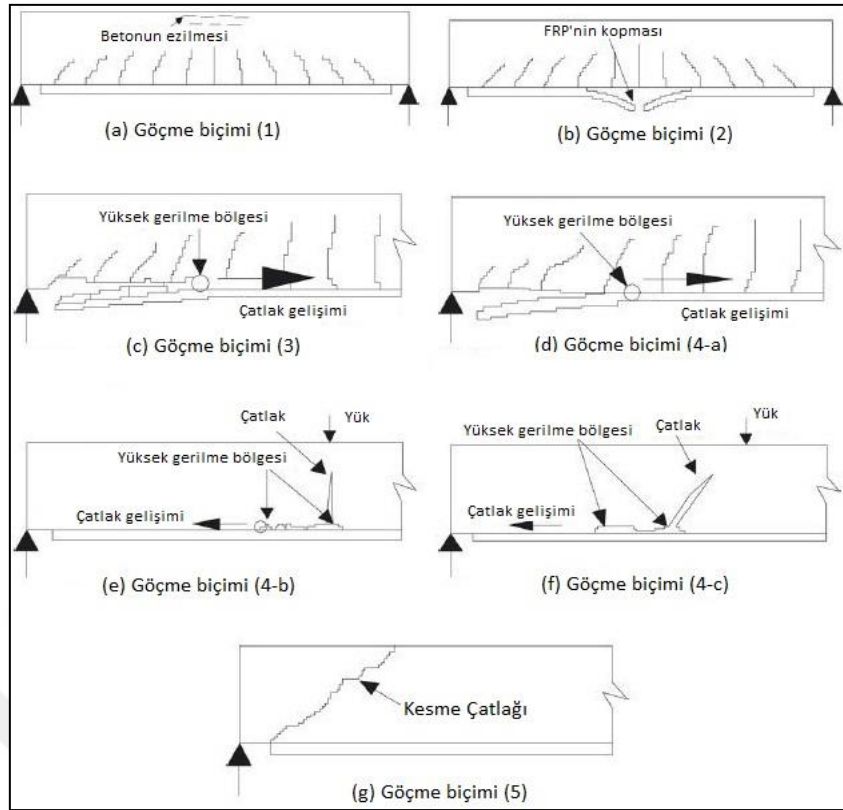
malzemelerin farklı teknikler kullanılarak elemana yapıştırılması şeklinde gerçekleşmektedir. Eğilme etkisine karşı yapılan güçlendirme uygulamalarında, FRP yapı malzemeleri yalnızca elemanın çekme bölgesine uygulanabildiği gibi U şeklinde sargılama yapılarak da kullanılabilir (Şekil 3.14).



Şekil 3. 14 Kirişlerde güçlendirme takviyesi a) alt yüzey güçlendirme, b) U tipi güçlendirme

Güçlendirilmiş elamanın eğilme mukavemeti artarken, kesme kuvvetlerine karşı direnci de artmaktadır. Elemanda kesme kırılması oluşmasını engellemek için kesitin tasarım kesme dayanımı ile ihtiyaç duyulan kesme dayanımı karşılaştırılmalıdır. Kesit yetersiz ise kesite enine doğrultuda yönlendirilmiş FRP tabakaları takviye edilebilir [85].

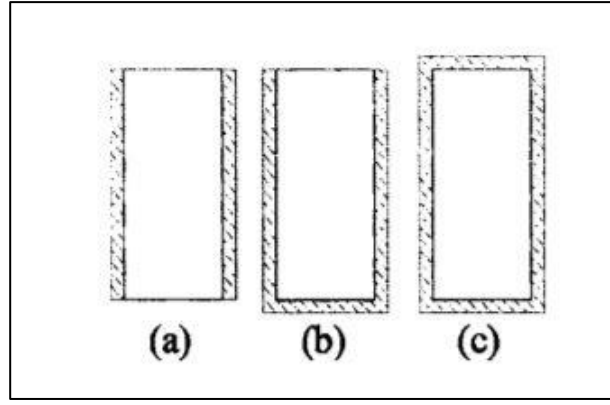
Betonarme kirişlerin eğilme davranışlarının yanı sıra kirişlerde meydana gelen göçme biçimleri birçok araştırmacı tarafından incelemiştir. Bu göçme türleri (Şekil 3.15); betonun ezilmesi ile birlikte gerçekleşen eğilme kırılması (1), çekme donatısının akmasından sonra FRP tabakasının kopması (2), FRP ucunda örtü betonunun ayrılması (3), FRP ucunda gerçekleşen ara yüz sıyrılması (4-a), eğilme çatlakları sebebiyle gerçekleşen ara yüz sıyrılması (4-b), kesme çatlakları nedeniyle gerçekleşen ara yüz sıyrılması (4-c) ve kesme kırılması (5) şeklindedir [85].



Şekil 3. 15 Eğilme bölgesi güçlendirilen kirişlerde kırılma türleri [85]

Kirişlerde kesme kuvvetleri etkisi ile oluşan diyagonal çatlaklar eğilme çatlaklarına göre daha geniş ve belirgin olmaktadır. Kesme mukavemeti yetersizliği nedeniyle oluşan bu hasarlar, betonarme elemanda kesme kırılmalarına yol açmaktadır. Aniden gerçekleşen bu kırılma biçimi yapısal elemanlar için çok tehlikelidir. Bu nedenle bu tür yapısal elemanlarda bir takım güçlendirme çalışmaları yapılmalıdır.

Kirişlerde kesme güçlendirmesi yapılırken FRP malzemesi her iki yan yüzeye, U şeklinde veya kirişin tüm yüzeylerini içerisine alacak şekilde tam sargılama şeklinde uygulanmaktadır (Şekil 3.16) [86]. Bu tür güçlendirme uygulamalarında genellikle FRP kumaş, şerit ve levhalar kullanılmaktadır.



Şekil 3. 16 Güçlendirme biçimleri a) yan yüzey güçlendirmesi, b) U tipi sargı, c) tam sargı [86]

Dış yüzeyden yapılan güçlendirme uygulamaları kullanılan FRP türüne göre değişiklik gösterebilmektedir. Hazır üretim malzemeler olan şerit ve tabakaların betona kenetlenmesi için sadece yapıştırıcı kullanılırken, bu yapıştırıcı çoğunlukla yüksek viskozite özelliğine sahip olan tiksotropik malzemedir. Islak uygulama yönteminde kullanılan levha ve kumaşlar için ise düşük viskoziteli bir malzeme olan reçine kenetlenme ve emprenye fonksiyonlarını gerçekleştirmektedir. Yapıştırıcı uygulaması aşamasında ortam sıcaklığı ve bağıl nem miktarının yapıştırıcı üreticisi tarafından verilen sınırlar içerisinde yer almasına dikkat edilmelidir. Hazır üretim ve ıslak uygulama yöntemleri dışında farklı özel yöntemlerle (otomatik sargılama, ön gerilmeli eleman ile güçlendirme, ısıtma cihazı kullanarak yerinde kürleme, vakum ile emprenye etme gibi) de uygulama yapılabilmektedir [84].

- **Şerit ve Tabakalar için Uygulama (Hazır Üretim)**

Yapıştırıcı malzeme karıştırma işleminin ardından beton yüzeyine ince bir tabaka halinde, FRP tabakasının ise ortasına bir çizgi boyunca sürülür. FRP ye yapıştırıcı sürülmesinin nedeni boşluk oluşma ihtimalini en aza indirmektir. Yapıştırıcı sürme işleminin ardından merkezden dışarıya doğru basınç uygulanarak FRP nin beton yüzeyine yapışması sağlanır (Şekil 3.17). Kür süresi boyunca malzemeye ilave basınç uygulanmasına gerek yoktur [84].



Şekil 3. 17 FRP şerit uygulaması [84]

- **Levha ve Kumaşlar için Uygulama (Islak Uygulama)**

Uygulamaya başlarken beton yüzeyin pürüzsüzlüğünü ayarlamak için macun veya bazı durumlarda astar ile birlikte macun beton yüzeye uygulanır. Bu uygulama yapılırken üretici firmanın önerdiği süreç takip edilmelidir. Daha sonra alt kaplama ismi verilen, düşük viskoziteli reçinenin bir rulo veya dişli mala yardımıyla beton yüzeyine belirli bir kalınlıkta sürülmesi işlemi gerçekleştirilir. Ardından levha veya kumaş, yapıştırıcı üzerine boşluk oluşumunu engelleyecek şekilde elle baskı uygulayarak yapıştırılır (Şekil 3.18). Son adım olarak, emprenye ve presleme işlemi FRP üzerine rulo fırça yardımıyla yapıştırıcı sürülerek gerçekleştirilir. Bu işleme üst kaplama adı verilmektedir. Bu uygulamaya alternatif olarak FRP kumaş veya levha, bir doyurma makinası kullanılarak reçine ile emprenye edilebilir. Bu sayede FRP daha iyi kontrollü bir şekilde doyurulması sağlanır. Islanan FRP alt tabaka üzerine yerleştirilir ve süreç tamamlanır [84].



Şekil 3. 18 Islak uygulama tekniği [84]

3.4.2.2 Yakın Yüzeyden Yapılan Güçlendirmeler (NSM)

Bu yöntemle ilgili olarak yapılan ilk çalışma 1949 yılında yayımlanmıştır [87]. Köprü döşemelerinin güçlendirilmesi amaçlanan çalışmada çelik donatılar döşeme içerisine yerleştirilmiştir. Ancak çelik donatının zaman içerisinde korozyona uğraması nedeniyle donatı çeliği kullanılarak yapılan araştırmalar sınırlı kalmıştır. Çevresel etkilere karşı daha dirençli olan FRP yapı malzemelerinin yaygın olarak kullanılmaya başlanmasından sonra, betonarme kirişlerin güçlendirilmesinde bu yöntemin tercih edildiği çalışmalar artmaya başlamıştır.

Yakın yüzey montajı tekniği (NSM) kullanılarak eğilme ve kesme dayanımı artırılan betonarme elemanların yük taşıma kapasitesi birçok araştırmacı tarafından araştırılmıştır [88-91]. Bu yöntemde FRP güçlendirme malzemesinin beton yüzeyinden sıyrılma ihtimalinin ve çevresel kaynaklı etkenlerden zarar görme riskinin daha az olması ve daha kısa sürede uygulanabilir olması, dış yüzeyden yapılan güçlendirmelere göre avantajlı yönleridir [88]. Güçlendirme uygulamasında, dairesel veya dikdörtgen biçimli çubuklar veya plakalar beton yüzeyi içerisine açılmış olan oyuklara yerleştirilir. Yapıştırıcı vasıtası ile FRP nin oyuk içerisindeki beton ile kenetlenmesi sağlanır ve yerinde kür gerçekleştirilir [68]. Uygulama süreci şematik olarak Şekil 3.19 da verilmiştir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 3. 19 Yakın yüzey montajı a) oyuk açılması, b) açılan oyuğa epoxy doldurulması, c) güçlendirme çubuğunun oyuk içerisine yerleştirilmesi [92]

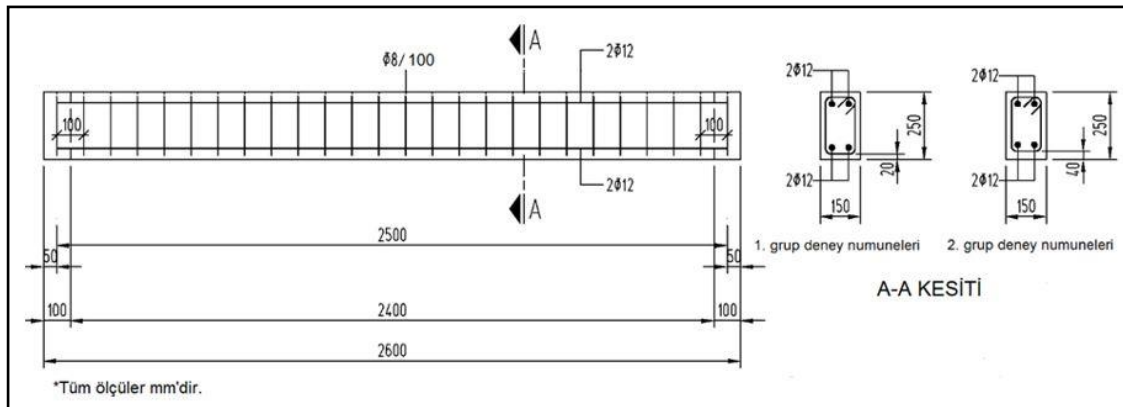
DENEYSEL ÇALIŞMA VE BÜNYESEL MODELLEME TEKNİKLERİ

Bu tez çalışmasında, sayısal olarak modellenen betonarme kirişlerin eğilme davranışları ve yük – yer değiştirme ilişkilerinin belirlenmesi amacıyla farklı modelleme yöntemi ve yazılımlar irdelenmiştir. Plastisite ve hasar mekaniği yaklaşımının beraberce dikkate alındığı sayısal modelleme çalışmasının ilk kısmında plastik birim şekil değiştirmeler akma yüzeyindeki çekme ve basınç etkisini ayrı ayrı dikkate alan geliştirilmiş von Mises plastisite modeli, hasar mekaniği ise Oliver vd. [11] tarafından önerilen izotropik hasar modeli ile ifade edilmiştir. Çalışmanın ikinci kısmında ise, ilk olarak Lubliner vd. [13] tarafından önerilen ve daha sonra Lee ve Fenves [12] tarafından beton için geliştirilmiş olan elastoplastik hasar modeli (CDP) bünyesel malzeme modeli kullanılmıştır. Elastoplastik ve elastoplastik hasar yaklaşımlarının ayrı ayrı incelendiği ikinci kısımda betonun farklı gerilme – birim şekil değiştirme davranışları için betonarme kirişlerin gerçek davranışları sayısal analizlerle tahmin edilmeye çalışılmıştır. Bünyesel modelleme tekniklerine geçmeden önce öncelikle bu çalışma kapsamında sayısal olarak modellenen betonarme kirişler için yapılan deneysel çalışma özetlenmiştir.

4.1 Deneysel Çalışma

Bu tez çalışmasında Dalyan (2019) [93] tarafından eğilme etkisinde deneyleri gerçekleştirilmiş olan karbon lif takviyeli polimer kumaş (CFRP) ile güçlendirilen betonarme kirişlerin sayısal modelleri oluşturulmuş ve önerilen bünyesel modelleme teknikleri ile sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak doğrusal olmayan analizleri

gerçekleştirilmiştir. Dalyan (2019) [93] tarafından gerçekleştirilen deneysel çalışmada, 150×250×2600 mm boyutlarında olan ve donatı detayları aynı toplamda 8 adet betonarme kiriş, her bir grupta 4 adet numune olmak üzere iki farklı grupta incelenmiştir (Şekil 4.1). İki numune grubunu birbirinden ayıran temel farklılık örtü betonu kalınlığıdır. 1. grup numunelerde örtü betonu kalınlığı 20 mm iken, 2. grup numunelerde bu değer 40 mm'dir. Her bir grupta birer adet güçlendirilmemiş referans kirişi (K20R ve K40R) bulunurken, diğer üçer numune CFRP ile farklı şekillerde güçlendirilmiştir.



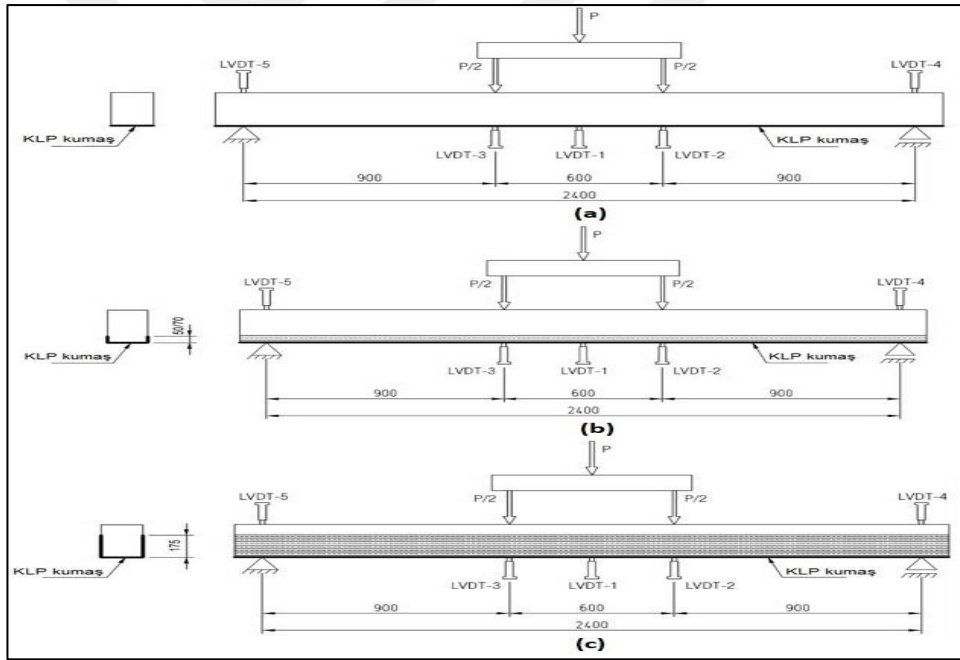
Şekil 4. 1 Betonarme kirişlerin geometrik özellikleri ve donatı detayları [93]

Silindir numunesi dayanımı 20 MPa olan C20 betonu ve S420 donatı sınıfı çelik kullanılan betonarme kirişlerde, Çizelge 4.1'de fiziksel ve mekanik özellikleri verilen ve sadece kiriş eksenini doğrultusunda lif yönlendirmesine sahip karbon lifli polimer kumaşlar güçlendirme amacıyla betonarme kirişlere uygulanmıştır. İncelenen betonarme kirişlerde güçlendirme, sadece çekme bölgesinin altına (K20KG00 ve K40KG00), eğilme bölgesi ile birlikte örtü betonunu içine alacak şekilde 1. ve 2. gruptaki numuneler (K20KG50 ve K40KG70) için sırasıyla 50 mm ve 70 mm yüksekliklerde yan yüzeylere ve tam sargılama adı verilen eğilme bölgesi ile beraber kiriş yan yüzeylerini 175 mm yükseklikte sargılayacak şekilde U biçiminde (K20KGU ve K40KGU) uygulanmıştır [93]. Şekil 4.2'de betonarme kirişler için yapılan güçlendirme biçimleri verilmiştir.

Çizelge 4. 1 CFRP güçlendirme malzemesinin fiziksel ve mekanik özellikleri [93]

Karbon Lifle Güçlendirilmiş Polimer (CFRP)	
Özellik	Değer
Toplam Lif Ağırlığı	300 g/m ²
Tasarım Kesit Kalınlığı	0,166 mm
Lif Çekme Dayanımı	4900 MPa
Elastisite Modülü	230000 MPa

Deneyler her iki mesnet bölgesinden 900 mm uzaklıkta olacak şekilde, 400 kN yükleme kapasitesine sahip hidrolik yükleme cihazı kullanılarak 2 mm/dk'lık yükleme hızı ile iki düşey tekil yük etkisinde gerçekleştirilmiştir. Deneyler neticesinde güçlendirme amacıyla uygulanan karbon lifli polimer malzemenin uygulanma biçimi ve örtü betonu kalınlığının betonarme kirişlerin eğilme davranışına etkisi araştırılmıştır [93].



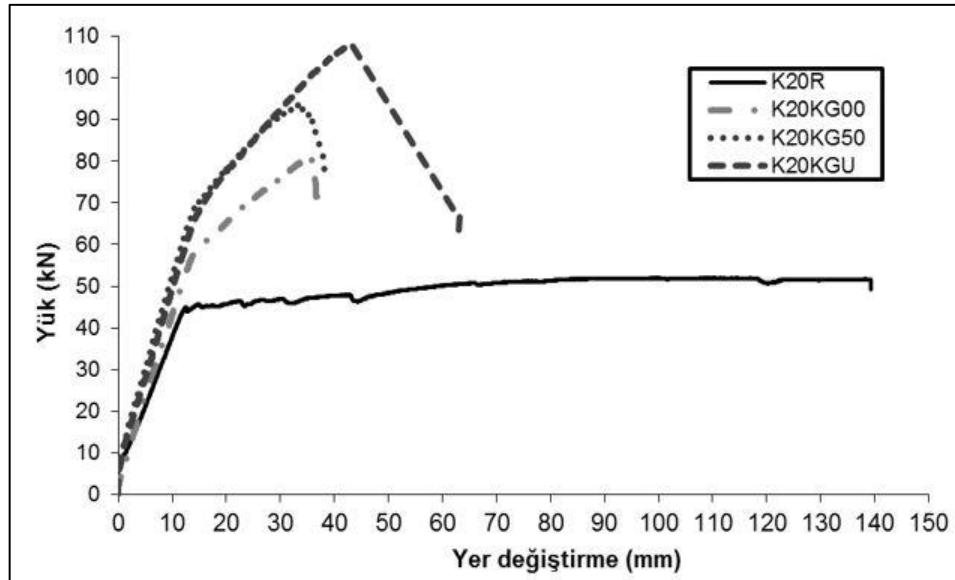
Şekil 4. 2 Betonarme kirişlerde güçlendirme biçimleri a) K20KG00 ve K40KG00 b) K20KG50 ve K40KG70 c) K20KGU ve K40KGU [93]

Yapılan deneyler neticesinde betonarme kirişlere ait göçme mekanizmaları ve yük – yer değiştirme ilişkileri belirlenmiştir. Kirişlere ait göçme türleri Çizelge 4.2’de verilmiştir. Betonarme kirişlerde, güçlendirme etkisiyle yük taşıma kapasitesinde önemli miktarda artışlar gözlenirken, kirişlerin yer değiştirme yapabilme yetenekleri önemli ölçüde

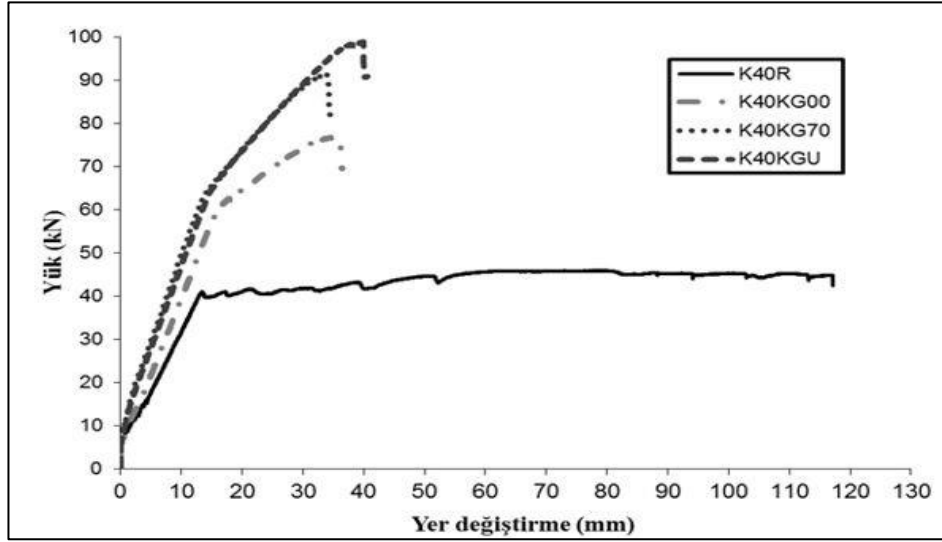
azalmıştır. 1. ve 2. grup numunelere ait deneyler sonrasında elde edilen yük – yer değiştirme eğrileri sırasıyla Şekil 4.3 ve Şekil 4.4’te verilmiştir.

Çizelge 4. 2 Betonarme kirişlerde göçme türleri

Grup No	Numune	Özellik	Maksimum Yük (kN)	Maksimum Yük İçin Yer Değiştirme (mm)	Göçme Türü
1	K20R	Kontrol numunesi	51,97	117,024	Eğilme göçmesi ve betonun ezilmesi
	K20KG00	Güçlendirilmiş	80,43	35,72	CFRP’nin sıyrılması ve kopması
	K20KG50	Güçlendirilmiş	93,56	33,88	CFRP’nin sıyrılması ve kopması
	K20KGU	Güçlendirilmiş	108,19	43,15	CFRP’nin sıyrılması ve kopması
2	K40R	Kontrol numunesi	45,87	79,83	Eğilme göçmesi ve betonun ezilmesi
	K40KG00	Güçlendirilmiş	76,78	34,63	CFRP’nin sıyrılması ve kopması
	K40KG70	Güçlendirilmiş	91,43	33,82	CFRP’nin sıyrılması ve kopması
	K40KGU	Güçlendirilmiş	98,95	40,06	CFRP’nin sıyrılması ve kopması



Şekil 4. 3 Birinci grup numunelere ait deney sonuçları [93]



Şekil 4. 4 İkinci grup numunelere ait deney sonuçları [93]

4.2 Bünyesel Model Önerileri

Bu tez çalışması kapsamında iki farklı bünyesel modelleme tekniği kullanılarak deneyleri gerçekleştirilmiş betonarme kirişlerin davranışları tahmin edilmeye çalışılmıştır. Modelleme çalışmasının ilk kısmında, örtü betonu için sanal malzeme modeli kullanılmış, betonunun gerilme – birim şekil değiştirme ilişkisi için bir plastisite modeli ve çekme gerilmeleri etkisiyle malzeme bünyesinde oluşan rijitlik kaybının tahmin edilebilmesini sağlayan hasar mekaniği yaklaşımının birleştirilmesi neticesinde elde edilen elastoplastik hasar yaklaşımı (EPH1) kullanılmıştır. Bu kapsamda betonarme kirişlere ait gerilme – birim şekil değiştirme ilişkisi, önerilen yaklaşımdaki malzeme ve hasar parametrelerinin kalibrasyonu neticesinde belirlenmiş ve analizler LUSAS [34] yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. İkinci kısımda, beton için plastisite modeli ve hasar mekaniği yaklaşımlarını birlikte dikkate alan CDP modeli kullanılarak betonun davranışı tahmin edilmeye çalışılmıştır. Bünyesel modelleme çalışmasının bu kısmı için ABAQUS [35] yazılımı kullanılmış ve betonun üç farklı tek eksenli gerilme - birim şekil değiştirme ilişkisi için sayısal modeller oluşturulmuştur. Bu gerilme – birim şekil değiştirme ilişkileri, betonun çekme ve basınç etkisinde ideal elastoplastik davranışı (EP1), çekme etkisinde ideal elastoplastik, basınç etkisinde elastoplastik davranışı (EP2), çekme ve basınçta elastoplastik davranışı (EP3) şeklindedir (Böl. 4.2.2.2, Şekil 4.15). Bünyesel modelleme çalışmasının ikinci kısmında son olarak betonun elastoplastik davranışı ve malzemede

oluşan hasar etkisini CDP malzeme modelinin önerdiği şekilde çekme ve basınç durumu için ayrı ayrı dikkate alacak şekilde elastoplastik hasar yaklaşımı (EPH2) kullanılmış ve sayısal analizler tamamlanmıştır.

4.2.1 LUSAS-ver 15.0 Yazılımı ve Önerilen Sanal Malzeme Modeli

Bünyesel modelleme çalışması kapsamında ilk olarak sanal malzeme modeli ile modelleme yapılmış ve elde edilen sonuçlar deneysel olarak belirlenmiş sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Sanal malzeme modeli ile yapılan bu çalışma LUSAS-ver 15.0 [34] yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sanal malzeme modeline geçmeden önce analizlerin yapıldığı yazılım ile ilgili genel bilgiler aktarılmıştır.

LUSAS [34] yazılımı sonlu elemanlar yöntemini kullanarak çelik ve betonarme inşaat mühendisliği yapılarının ve kompozit yapıların analizi, tasarımı ve yapısal davranışlarının değerlendirilmesine olanak sağlayan dünyanın önde gelen yazılımlarından birisidir. LUSAS Bridge, LUSAS Civil & Structural, LUSAS Analyst, LUSAS Composite ve LUSAS Academic isimleri ile beş farklı yazılım paketini kullanıcıların hizmetine sunan yazılım, doğrusal olmayan, dinamik, termal, kontak vb. analizleri gerçekleştirebilme kabiliyetine sahiptir. Metaller, plastikler, kompozit malzemeler, zemin ve beton gibi malzemeler için doğrusal olmayan malzeme modellerine sahip olan yazılımda, elastoplastik, hasar, çatlama, sünek kırılma ve sünme gibi analizler gerçekleştirilebilmektedir [94].

Söz konusu sanal malzeme modelinin kullanıldığı beton, fiziksel olarak heterojen özelliklere sahip kompozit bir malzeme türüdür. Bu yapı malzemesinin temel bileşenlerinden birisi ve en büyük boyutlu malzeme olan bileşeni iri agregalardır. Betonun bünyesel olarak modellenmesinde söz konusu agregaların bir ölçüsü olarak en büyük agrega çapını ifade eden d_{max} kullanılmaktadır. Literatürde yer alan çalışmalar göz önüne alındığında beton için geliştirilmiş bünyesel malzeme modellerinin uygulanabilirlik sınırları eleman boyutunun en büyük agrega çapının 3 - 5 katı olduğunu göstermektedir. Analizlerde dikkate alınan sonlu eleman boyutu bu kritik değerin üzerinde seçildiği takdirde sayısal çözümler yakınsak ve elde edilen sonuçlar oldukça hassas olmaktadır. Ancak verilen kritik değerden daha küçük boyutlarda sonlu eleman boyutu seçimi, sayısal analizlerde malzeme bütünlüğünün sağlanamaması ve hali ile

çözümün stabilitesini kaybetmesi ile sonuçlanacaktır. Bu boyutlarda kullanılacak herhangi bir elemanda da beton için önerilen bağıntıların geçerliliğinin olmayacağı bilinen bir gerçektir. Bu sebeple boyut bağımlılığı ismi verilen ve kırılma mekaniği temelindeki yaklaşımlar kullanılmaktadır. Bu bağıntılarda yer alan temel parametre betonun tek eksenli çekme gerilmeleri etkisindeki çatlak oluşumunu ifade eden G_f kırılma enerjisidir. Çekme etkisinin yanında kesme kuvvetleri etkisiyle oluşan çatlaklardan kaynaklanan enerji değerleri de sonuçları değiştirebilme potansiyeline sahiptir [93].

Bu tez çalışması kapsamında sayısal olarak modellenen betonarme kirişlerde örtü betonu olarak isimlendirilen bölge bünye bağıntılarının uygulanabilmesine imkan tanımaktadır. Sayısal modelleme çalışmasının ilk aşamasında kırılma mekaniği yaklaşımlarına alternatif olacak şekilde bir sanal malzeme modelinin kullanılması tercih edilmiştir. Bu sebeple sanal malzeme modeli ile modellenen örtü betonuna ait mekanik özellikler olan elastisite modülü ve dayanım değerleri çelik donatı üzerinde kalan çekirdek betonundan daha düşük olacaktır. Bu çalışma kapsamında bu değerlerin belirlenebilmesi için parametrik çalışmalar yapılmış ve deney kirişleri sayısal olarak başarılı bir şekilde modellenmiştir.

4.2.1.1 Plastik Malzeme Modeli

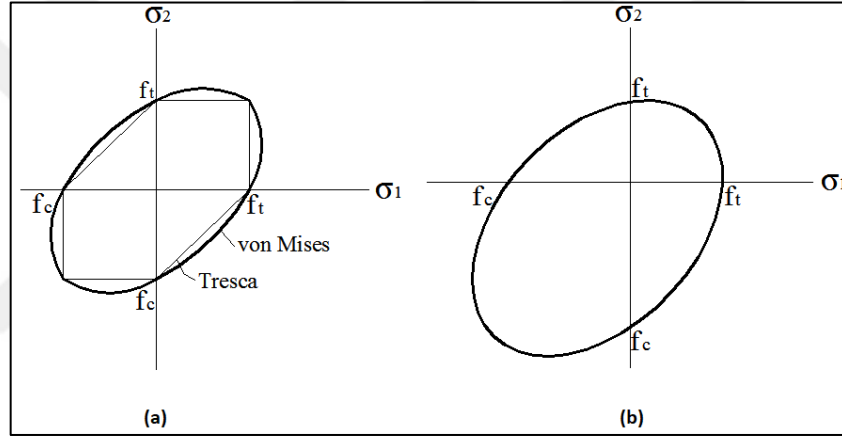
Çalışma kapsamında, donatı çeliğinin plastik davranışı için von Mises kırılma kriteri kullanılırken, betonun elastik ötesi durumdaki gerilme - birim şekil değiştirme ilişkisi geliştirilmiş von Mises plastisite modeli ile belirlenmiştir. Beton için kullanılan elastoplastik hasar yaklaşımı nedeniyle malzemenin sergilediği toplam birim şekil değiştirme, elastik ve plastik birim şekil değiştirmeye ek olarak hasar etkisindeki birim şekil değiştirmesinin toplamı olacaktır. Beton karakteristik olarak çekme ve basınç etkisi altında farklı davranışlar sergilediği için kullanılan geliştirilmiş von Mises kırılma kriteri sayesinde bu iki durum sayısal modellerde ayrı ayrı dikkate alınabilmektedir. Şekil 4.5'te f_c ve f_t sırasıyla malzemenin basınç ve çekme dayanımını göstermek üzere gerilme düzlemi üzerinde geliştirilmiş von Mises plastisite modelinin önerdiği akma yüzeyi ve von Mises modeli karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

σ_1 , σ_2 ve σ_3 asal gerilmeleri belirtmek üzere çekme etkisindeki bir deney numunesi için akma gerilmesi ile asal gerilmeler ($S_1: \sigma_1, S_2: \sigma_2, S_3: \sigma_3$) arasındaki ilişki aşağıdaki denklem ile verilmektedir [95]:

$$2f_t^2 = (S_1 - S_2)^2 + (S_2 - S_3)^2 + (S_3 - S_1)^2 \quad (4.1)$$

von Mises kırılma kriteri ile malzemenin akma sınır gerilmesini belirleyen (Denklem 4.1) bağıntıda akma tek eksenli çekme ve basınç etkisinde eşit düzeydeki gerilmelerde meydana gelmektedir. Bu çalışmanın ilk kısmı kapsamında önerilen plastisite modeli ile çekme ve basınç etkisini ayrı ayrı dikkate alan geliştirilmiş von Mises kriterinde ise akma gerilmeleri aşağıdaki bağıntı ile belirlenmektedir [96]:

$$2f_d f_t = (S_1 - S_2)^2 + (S_2 - S_3)^2 + (S_3 - S_1)^2 + 2(f_c - f_t)(S_1 + S_2 + S_3) \quad (4.2)$$



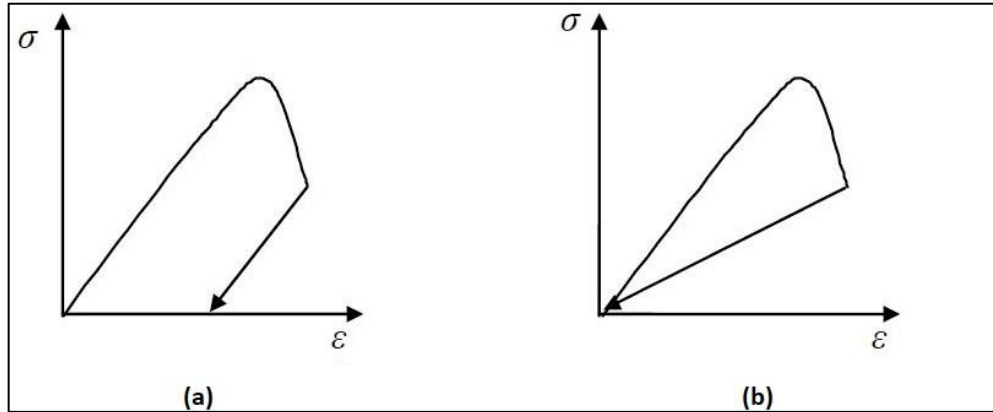
Şekil 4. 5 Akma kriterleri a) von Mises b) geliştirilmiş von Mises [97]

4.2.1.2 Hasar Mekanizması

Genel tanımı itibariyle hasar mekanizması, gerilme etkisi altındaki bir malzemede mikro düzeydeki çatlak veya boşlukların zamanla gelişmesi, malzeme içerisinde ilerlemesi ve yayılması sonucunda malzeme bünyesinde meydana gelen bozulma şeklinde tanımlanabilir. Bilimsel açıdan ilk olarak Kachanov [98] tarafından 1958 yılında hasar parametreleri kullanılarak öne sürülen hasar yaklaşımı, 1963 yılında Rabotnov [99] tarafından metallerin sünme problemleri için kullanılmıştır. Daha sonradan sürekli ortam hasar mekaniği yaklaşımı şeklinde tanımlanan bu teori, yük etkisine maruz kalan malzeme bünyesinde açığa çıkan mikro düzeydeki çatlakların oluşumundan önce malzemede meydana gelen bozulma bir hasar değişkeni ile tanımlamıştır. Bu gelişmenin

ardından bu değişkene bağlı olarak makro düzeyde oluşan çatlakların başlangıcını tahmin edebilmek adına birçok araştırma yapılmış ve bu amaçla çeşitli bağıntılar geliştirilmiştir. Lemaitre ve Chaboche [100], Hult [101] ve Leckie ve Hayrust [102] sünme problemleri için, Lemaitre [103] ve Chaboche [104] farklı şekillerdeki yorulma problemleri için ve diğer birçok araştırmacı çeşitli mühendislik problemleri için sürekli hasar mekaniği yaklaşımını kullanmıştır.

Sürekli hasar mekaniği modellerinde hasar, rijitlik gibi makro düzeydeki malzemeye ait mekanik özelliklerin düşüşüne sebep olan bir durum olarak tanımlanmaktadır. Malzeme rijitliğindeki düşüş fiziksel olarak mikro düzeydeki çatlak ve boşlukların yayılmasının malzeme üzerindeki etkisi olarak düşünülebilir. Sürekli hasar mekaniği ile plastisite teorisini birbirinden ayıran temel farklılık, plastisite teorisinde elastik ötesi durumda gerçekleşen deformasyonların kalıcı şekil değiştirmelere sebep olması iken sürekli hasar mekaniğinde malzeme bünyesinde oluşan hasarın elastik rijitliği azaltmasıdır (Şekil 4.6). Bu iki mekanizma arasındaki ayrım basitleştirilecek olursa; plastisite teorisinde kalıcı olan şekil değiştirmeler kusur veya bir diğer ifadeyle dislokasyon hareketi oluştururken, sürekli hasar mekaniğinde hasar, atomları arasındaki bağların kopması veya çatlak oluşumu nedeniyle ayrılması veya sıyrılmasından kaynaklanmaktadır [105].



Şekil 4. 6 Malzemede görülen birim şekil değiştirme yumuşaması a) plastisite modeli, b) sürekli ortam hasar modeli [105]

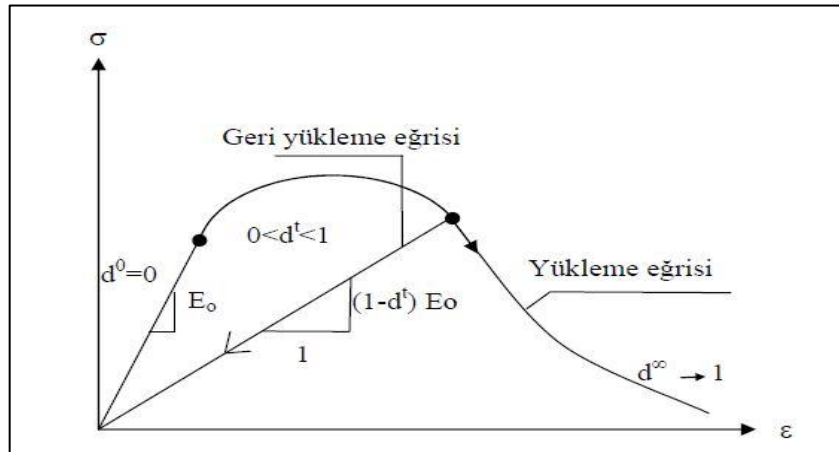
Sürekli hasar mekaniği yaklaşımlarından olan izotropik hasar modelleri, malzeme bünyesinde meydana gelen rijitlik kaybının izotropik olduğunu, yani farklı doğrultulara karşılık gelen rijitlik modüllerinin, yükleme doğrultusundan bağımsız olarak orantılı bir

şekilde azaldığı varsayımına dayanmaktadır. İzotropik elastik malzeme, birbirinden bağımsız iki elastik kısıtlama ile karakterize olduğundan, genel bir izotropik hasar modelinde iki hasar değişkeni söz konusu olmaktadır. Tek değişkenli hasar modellerinde, tüm rijitlik katsayılarının göreceli olarak azalmasının aynı olduğu yani, poisson oranının hasardan etkilenmediği varsayımı yapılmaktadır.

Bu tez çalışması kapsamında, bünyesel modelleme çalışmasının ilk kısmı için önerilen hasar yaklaşımı Oliver vd. [11] tarafından öne sürülen izotropik hasar modelidir. Bu hasar modelinde, malzeme bünyesinde meydana gelen bozulma veya hasar, tek bir skaler değişken “ d ” ile ifade edilir ve malzemenin doğrusal olmayan davranışı bu değişken ile tayin edilir. Malzemenin sekant rijitliğinin bir ölçüsü olan bu değişken, hasarsız durum için 0, tamamen hasarlı durum için 1 değerini alacak şekilde 0 ile 1 arasında değişen ($0 \leq d \leq 1$) değerler almaktadır. Şekil 4.7’de beton için önerilen hasar modeline ait tek eksenli gerilme – şekil değiştirme ilişkisi ve hasar değişkeninin değişimi verilmiştir [11].

σ ve ϵ gerilme ve birim şekil değiştirmeleri, d hasar değişkenini, E_0 ise başlangıç elastisite modülünü gösterecek şekilde, tek eksenli gerilme durumu için önerilen izotropik hasar modeline ait bünye denklemi en basit formuyla aşağıdaki gibidir [11];

$$\sigma = (1 - d)E_0 : \epsilon \quad (4.3)$$



Şekil 4. 7 Hasar modeli için betona ait tek eksenli gerilme – birim şekil değiştirme ilişkisi [11]

LUSAS [34] yazılımında beton için geliştirilmiş olan Oliver izotropik hasar modeli ile malzeme bünyesindeki hasar oluşumunu temsil edebilmek için üç farklı parametrenin belirlenmesi gerekmektedir. Bu parametreler; başlangıç hasar eşiği, malzeme parametresi ve hasar oranıdır.

“ τ^* ” başlangıç hasar eşiği parametresi, betonun tek eksenli çekme deneyinin sonuçları kullanılarak belirlenir. Bu parametreye ait matematiksel ifade denklem 4.4’te verilmiştir [11]. Çekme çatlaklarının oluşumu ile beraber doğrusal olmayan davranışın başlangıç durumunu tarif eden bu parametre elasto-plastik davranışın hakim olduğu malzeme analizlerinde bir fonksiyon olarak akma gerilmesi gibi dikkate alınmaktadır. Hasar eşiği ayrıca doğrusal elastik davranışın sınır düzeyi olarak da tanımlanabilmektedir [95].

$$\tau^* = \frac{f_t}{\sqrt{E_0}} \quad (4.4)$$

Verilen bağıntıda f_t çekme dayanımını, E_0 ise malzemeye ait başlangıç elastisite modünü göstermektedir.

Çalışma kapsamında E_0 başlangıç elastisite modülü Köksal ve Karakoç [106] tarafından önerilen denklem 4.5’teki gibi belirlenmiştir. Bu bağıntıda ε_0 birim şekil değiştirme değeri, f_c betonun karakteristik basınç dayanımı olmak üzere $\sigma = f_c$ durumundaki birim şekil değiştirme değerine karşı gelecek şekilde 0,002 olarak kabul edilmiştir.

$$E_0 = \frac{2f_c}{\varepsilon_0} \approx 1000 f_c \quad (4.5)$$

Bir diğer parametre olan “ A ” malzeme parametresi, doğrusal olmayan sonlu eleman analizleri için elde edilen sonuçların sonlu eleman boyutlarından bağımsız olmasını sağlamak için kullanılan bir parametredir. Burada h sonlu eleman karakteristik uzunluğunu, G_f ise kırılma enerjisini ifade etmektedir (Denklem 4.6) [11].

$$A = \left(\frac{G_f E_0}{h f_t^2} - \frac{1}{2} \right)^{-1} \geq 0 \quad (4.6)$$

Bu tez çalışması kapsamında, “A” malzeme parametresi verilen bu bağıntıdan farklı olarak sadece sonlu eleman karakteristik uzunluğuna bağlı olacak şekilde (Denklem 4.7) Köksal vd. [107] tarafından önerilen bağıntıdaki gibi belirlenmiştir.

$$A = \frac{h}{310} \quad (4.7)$$

Burada kullanılan h değeri,

$$h = \sqrt[3]{h_x h_y h_z} \quad (4.8)$$

sayısal modellerde beton için kullanılan sonlu elemanların x, y ve z doğrultularındaki boyutlarına bağlı olacak aşağıdaki şekilde belirlenmiştir.

Hasar modeli için önerilen son parametre ise “ η ” hasar oranıdır. Betonun basınç dayanımı f_c ve çekme dayanımı f_t ye bağlı olarak aşağıdaki gibi belirlenmiştir [11]:

$$\eta = \frac{f_c}{f_t} \quad (4.9)$$

Sayısal modelleme çalışması kapsamında beton için önerilen G_f kırılma enerjisi,

$$G_f = 15,48 d_{\max} \frac{f_t^2}{E_0} \quad (4.10)$$

bağıntısı ile belirlenmiştir. Bu bağıntıda “ $d_{\max}$ ” en büyük agrega çapını belirtmektedir [106]. Dalyan (2019) [93] tarafından gerçekleştirilen deneysel çalışmada en büyük agrega boyutunun ($d_{\max}$) 16 mm olduğu belirlenmiş ve bu çalışma kapsamında Denklem 4.10 için bu değer dikkate alınmıştır.

4.2.1.3 Malzeme Parametreleri

Beton

Sayısal modelleme bölümünün ilk kısmını oluşturan betonun sanal malzeme modeli ile temsili ve önerilen elastoplastik hasar yaklaşımı (EPH1) için gerekli olan malzeme parametreleri daha önceki kısımda verilen Oliver vd. [11] tarafından önerilen hasar modeli ve geliştirilmiş von Mises plastisite bağıntıları kullanılarak belirlenmiştir. Çekirdek betonu ve sanal malzeme kabulü yapılan örtü betonu için belirlenen malzeme parametreleri sırasıyla Çizelge 4.3 ve Çizelge 4.4’te verilmiştir.

Çizelge 4. 3 Çekirdek betonuna ait malzeme parametreleri [93]

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

Çizelge 4. 4 Sanal malzeme kabulü yapılan örtü betonu için malzeme parametreleri [93]

Kiriş Numunesi	Malzeme	Özellik						
		Elastik		Plastik			Hasar	
		E_c (MPa)	ν	f_{ck} (MPa)	f_t (MPa)	τ	A	η
K20R	Örtü Beton	225	0,2	4,95	0,495	0,033	0,19	10
K20KG00	Örtü Beton	2000	0,2	6	0,6	0,013	0,19	10
K20KG50	Örtü Beton	2500	0,2	7	0,7	0,014	0,19	10
K20KGU	Örtü Beton	3000	0,2	7,5	0,75	0,014	0,19	10
K40R	Örtü Beton	225	0,2	4,95	0,495	0,033	0,25	10
K40KG00	Örtü Beton	2000	0,2	6	0,6	0,013	0,25	10
K40KG70	Örtü Beton	2500	0,2	7	0,7	0,014	0,25	10
K40KGU	Örtü Beton	3000	0,2	7,5	0,75	0,014	0,25	10

Donatı Çeliği ve CFRP

Modelleme çalışması kapsamında, donatı çeliği ile beton ve karbon lif takviyeli polimer kumaş ile beton arasında tam kenetlenme ilişkisi dikkate alınmıştır. Donatı çeliğinde herhangi bir pekleşme etkisinin göz önüne alınmadığı yani donatının ideal elasto plastik davranış sergilediği, CFRP güçlendirme malzemesinin ise göçme durumuna kadar elastik olarak çalıştığı varsayılmıştır. Çizelge 4.5'te Donatı çeliğine ait malzeme parametreleri verilmiştir. Sayısal modellerde kiriş eksen x, düşey eksen y eksen olacak şekilde CFRP (Çizelge 4.6) için gerekli olan malzeme parametreleri deneysel olarak gerçekleştirilen çalışmadan alınmış ve modelleme aşamasında kullanılmıştır.

Çizelge 4. 5 Donatı çeliğine ait malzeme parametreleri

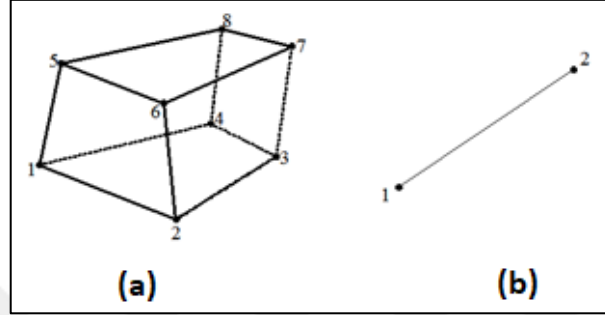
Özellik	E_s (MPa)	ν_s	f_y (MPa)
Elastik	200000	0,3	-
Plastik	-	-	420

Çizelge 4. 6 CFRP güçlendirme malzemesine ait malzeme parametreleri

Karbon Lifli Polimer (CFRP)	E_x (MPa)	E_y (MPa)	E_z (MPa)	ν_{xy}	ν_{xz}	ν_{yz}	G_{xy} (MPa)	G_{xz} (MPa)	G_{yz} (MPa)
Eğilme Bölgesinde	230000	1	1	0,3	0,3	0,3	1	76667	1
Kiriş Yan Yüzeylerinde	230000	1	1	0,3	0,3	0,3	76667	1	1

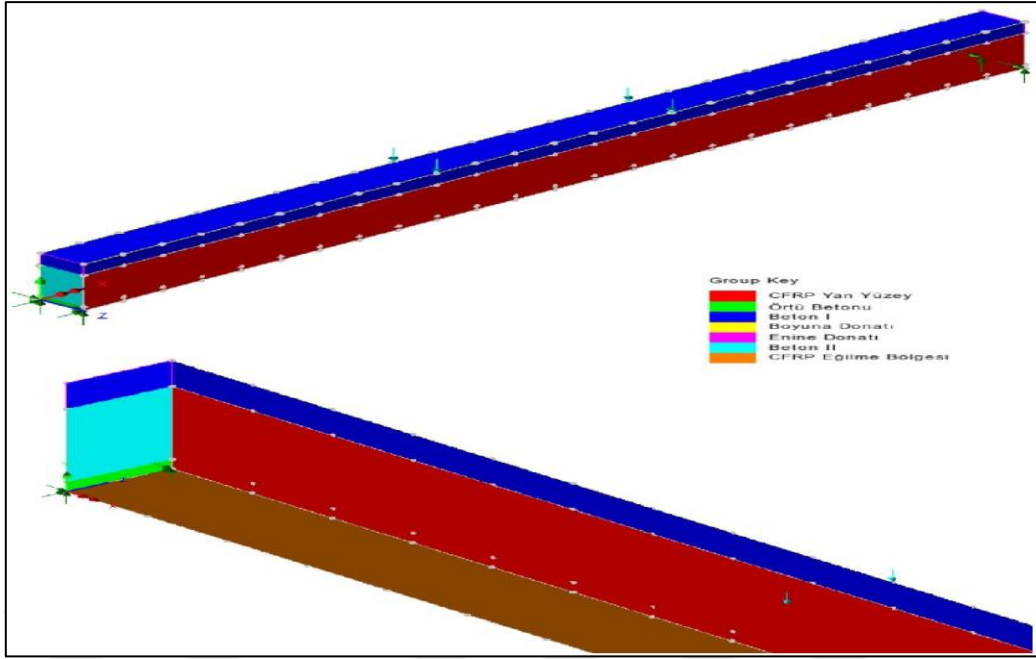
4.2.1.4 Sayısal Model

LUSAS [34] yazılımı kullanılarak oluşturulan sayısal modellerde, beton ve CFRP güçlendirme malzemesi için sekiz düğüm noktalı ve altı yüzeyle (HX8M) katı elemanlar, donatı çubukları için ise iki düğüm noktalı izoparametrik çubuk elemanlar (BRS2) kullanılmıştır. Betonarme kirişlere ait sonlu eleman modellerinde kullanılan bu elemanlar Şekil 4.8’de verilmiştir.



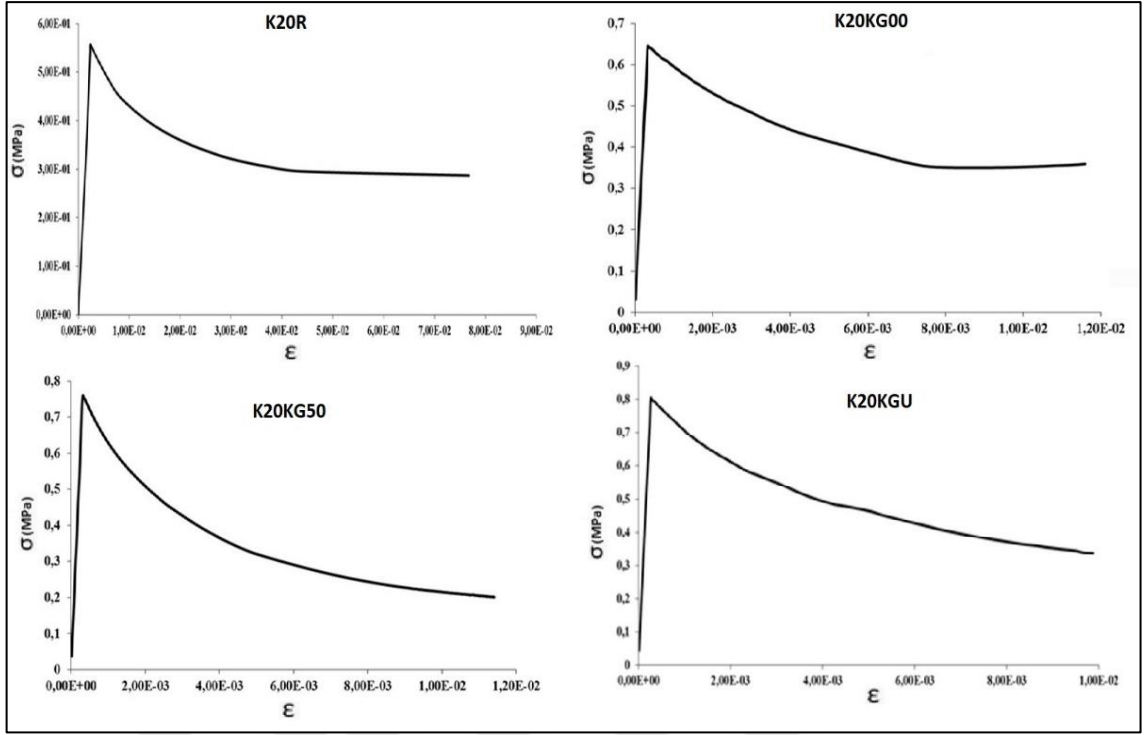
Şekil 4. 8 Sonlu eleman tipleri a) sekiz düğüm noktalı katı eleman (HX8M), b) iki düğüm noktalı çubuk eleman (BRS2) [97]

Bünyesel modelleme çalışması kapsamında, verilen sonlu eleman tipleri kullanılarak toplam sekiz adet betonarme kirişe ait sonlu eleman modelleri deney düzeneğini temsil edecek şekilde betonarme kirişlerin her iki ucundan mesnetlenmesi ile oluşturulmuştur. Sanal malzeme modeli ve elastoplastik hasar (EPH1) yaklaşımını dikkate alacak şekilde belirlenen malzeme parametreleri kullanılarak 4 noktalı düşey yük etkisi altında yük kontrollü olarak betonarme kirişlerin üç boyutlu doğrusal olmayan analizleri gerçekleştirilmiştir. Söz konusu modelleme çalışması kapsamında, oluşturulan sayısal modelleri temsilen K20KGU kirişi için oluşturulan model şematik olarak Şekil 4.9’da verilmiştir.

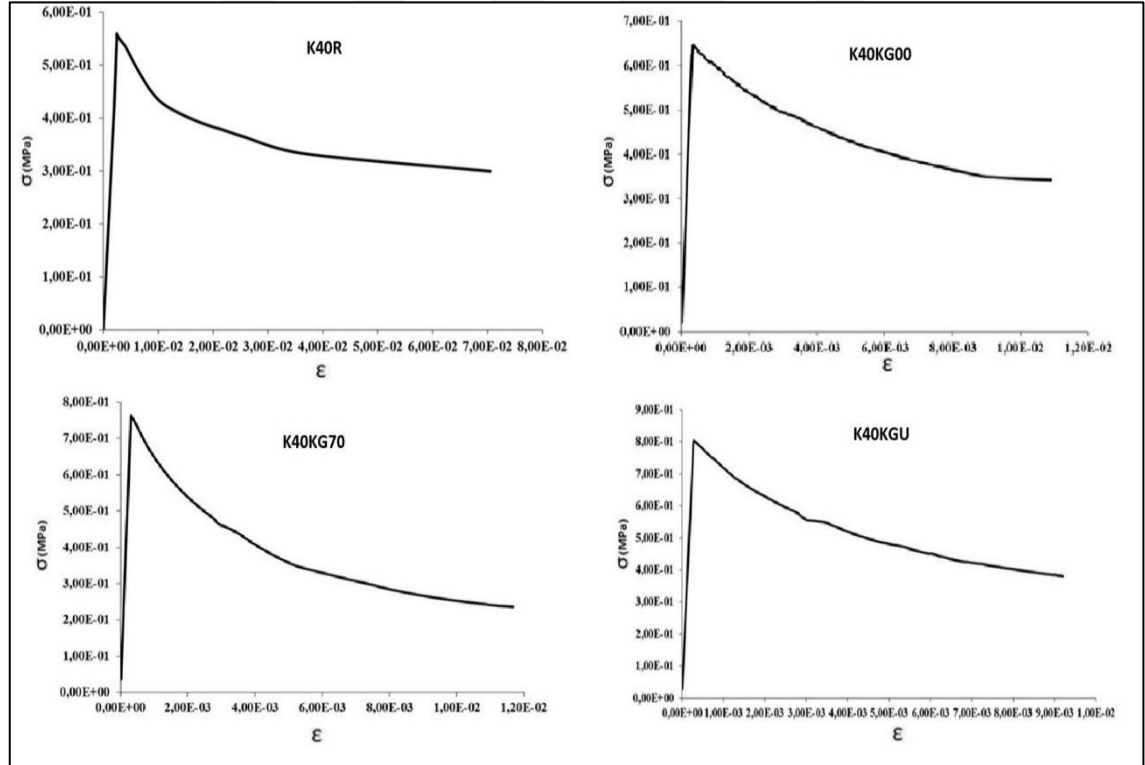


Şekil 4. 9 K20KGU kirişine ait sayısal model

Çalışmada önemli problemlerden biri analizin nerede kesileceğidir. Analizin sonlandırılacağı adımın belirlenmesi amacıyla bu bünyesel modelleme çalışması kapsamında, önerilen sanal malzeme modeli ile temsil edilen örtü betonunda kırılma enerjileri (G_f) hesaplanmıştır. Bu amaçla tüm kiriş numuneleri için oluşturulan sayısal modellerde örtü betonuna ait gerilme – birim şekil değiştirme eğrileri çizilmiş eğrilerin altında kalan alan ile 10 mm genişliğinde kabul edilen çatlak aralığı çarpılmış ve yaklaşık olarak kırılma enerjileri hesaplanmıştır. Bu şekilde bulunan kırılma enerjisi analitik olarak önerilmiş Denklem 4.10 ile belirlenen hesap değeri ile kıyaslanmış ve sayısal analiz sonucu elde edilen kırılma enerjisi bu değere eşit veya çok yakın olduğu adımda analiz sona erdirilmiştir. 1. ve 2. Grup numunelere ait sayısal modellerde analizlerin sonlandırıldığı adımlara ait örtü betonundaki gerilme –birim şekil değiştirme eğrileri sırasıyla Şekil 4.10 ve Şekil 4.11’de verilmiştir.



Şekil 4.10 Birinci grup numunelere ait sayısal modellerde analizin sonlandırıldığı adıma ait örtü betonunda gerilme – birim şekil değiştirme ilişkileri [93]



Şekil 4. 11 İkinci grup numunelere ait sayısal modellerde analizin sonlandırıldığı adıma ait örtü betonunda gerilme – birim şekil değiştirme ilişkileri [93]

Sayısal analizlerinin kesildiği adıma ait örtü betonunda verilen gerilme – birim şekil değiştirme eğrilerinden faydalanarak 10 mm çatlak açıklığı için Denklem 4.10'daki bağıntı ile hesaplanan kırılma enerjileri Çizelge 4.7'de verilmiştir.

Çizelge 4. 7 Hesap ve gerilme – birim şekil değiştirme eğrilerinden hesaplanan kırılma enerjileri [93]

	Gerilme - Birim Şekil Değiştirme Eğrisi	Denklem 4.10
Model	$G_f =$ Eğri altında kalan alanx10mm (N/mm)	Hesap (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

Tez çalışması kapsamında, sanal malzeme modeli kullanılarak söz konusu betonarme kirişler için gerçekleştirilen analizler ile kirişlerin eğilme davranışları, yük – yer değiştirme ilişkileri, yükleme sonrası betonarme kirişlerde oluşan gerilme dağılımları, CFRP güçlendirme malzemesi için gerilme dağılımları ve birim şekil değiştirme değerleri belirlenmiştir. Analiz sonuçları ikinci bünyesel modelleme çalışmasının aktarılmasından sonra karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

4.2.2 ABAQUS-ver 6.14 Yazılımı ve Önerilen Malzeme Modeli

Sayısal modelleme çalışmasının ikinci kısmında tez çalışması kapsamında incelenen karbon lifli polimer kumaşlar ile farklı şekillerde güçlendirilmiş betonarme kirişlere ait sayısal modeller ABAQUS-ver 6.14 [35] yazılımı kullanılarak oluşturulmuştur. Beton için CDP malzeme modelinin kullanıldığı bünyesel modelleme çalışması kapsamında, elastoplastik hasar yaklaşımının yanında yine bu malzeme modeli ile hasar etkisini dikkate almadan betonun farklı gerilme – birim şekil değiştirme davranışları için betonarme kirişlerde güçlendirme biçimi ve örtü betonu kalınlığının kirişlerin eğilme davranışı ve yük – yer değiştirme ilişkisine etkisi araştırılmıştır. Söz konusu bünyesel

malzeme modeline geçmeden önce öncelikle analizlerin gerçekleştirildiği ABAQUS [35] yazılımı hakkında genel bilgiler aktarılmıştır.

ABAQUS [35] yazılımı sonlu elemanlar yönteminin kullanıldığı bir ticari yazılım paketidir. Otomotiv, havacılık ve endüstriyel alanlarda yaygın olarak kullanılan bu yazılım, başlangıç olarak doğrusal olmayan fiziksel davranışları dikkate almak için tasarlanmıştır. Oldukça geniş malzeme modelleme kabiliyeti ve kişiselleştirilebilme gibi avantajları nedeniyle akademik ve araştırma kurumları arasında da tercih edilmektedir. Yazılım paketi üç temel üründen oluşmaktadır. Bunlar; geleneksel kapalı integrasyon şemalarını kullanarak çözüm yapan ABAQUS/Standart, açık integrasyon şemalarını kullanarak yüksek oranda doğrusal olmayan durumları içeren dinamik ve yarı statik analizlerin çözümünde kullanılan ABAQUS/Explicit ve analiz ürünleri için entegre bir modelleme ve görselleştirme ortamı sağlayan ABAQUS/CAE' dir [108].

4.2.2.1 Beton için Elastoplastik Hasar Modeli

ABAQUS/Standart [35] ile oluşturulan sayısal modellerde, beton için geliştirilmiş olan elastoplastik hasar modeli (CDP) malzeme modeli olarak kullanılmıştır. Bu malzeme modeli betonun elastik olmayan davranışını temsil edebilmek için izotropik plastisite ile birlikte izotropik hasarlı elastisite dikkate aldığı için kırılma süreci sırasında meydana gelen geri dönüşümsüz hasarın açıklanabilmesi mümkün olabilmektedir. CDP malzeme modelinde betonun çekme etkisinde çatlama, basınç etkisinde ise ezilme mekanizmaları dikkate alınmaktadır. Söz konusu malzeme modelinde akma yüzeyinin oluşumu bu iki kırılma mekanizmasına bağlı pekleşme değişkenleri ile kontrol edilmektedir [109]. Bu nedenle sayısal modelde betonun plastisite parametrelerinin yanında basınç ve çekme etkisindeki tek eksenli gerilme – birim şekil değiştirme eğrilerinin tanımlanması gerekmektedir.

CDP malzeme modelinde plastisitenin tarif edilebilmesi için akış potansiyeli, akma yüzeyi ve viskozitenin belirlenmesi gereklidir. Plastisitenin sayısal modelde temsil edilebilmesi için toplamda 5 parametrenin dikkate alındığı CDP modelinde gerekli olan malzeme parametreleri; ψ (genleşme açısı), ϵ (ekzantriklik), σ_{bo}/σ_{co} , K_c ve μ (viskozite) dir. Söz konusu parametreler aşağıda detaylı olarak aktarılmıştır.

Efektif Gerilme Sabitleri

CDP malzeme modeli için önerilen akma ve plastik akış bağıntılarının tanımlanmasından önce bu fonksiyonlarda yer alan efektif gerilme sabitlerinin belirlenmesi gerekmektedir. D_0^{el} başlangıç (hasarsız duruma ait) malzeme matrisi, ϵ ve ϵ^{pl} sırasıyla birim şekil değiştirme ve plastik birim şekil değiştirmeyi göstermek üzere efektif gerilme aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır [109]:

$$\bar{\sigma} = D_0^{el} : (\epsilon - \epsilon^{pl}) \quad (4.11)$$

Plastik akış potansiyeli fonksiyonu ve akma yüzeyi, efektif gerilme tensörünün iki gerilme sabitini kullanmaktadır. Söz konusu iki sabit hidrostatik basınç gerilmesi ve Mises eşdeğer efektif gerilmesidir. Bu iki gerilme sabiti Denklem 4.12 ve Denklem 4.13'te sırasıyla verilmiştir [109].

$$\bar{p} = -\frac{1}{3} \text{trace}(\bar{\sigma}) \quad (4.12)$$

$$\bar{q} = \left(\sqrt{1,5 \times (\bar{S} : \bar{S})} \right) \quad (4.13)$$

Burada $\bar{S}$ ile gösterilen ifade efektif gerilme deviatörüdür ve aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır [109]:

$$\bar{S} = \bar{\sigma} + \bar{p} \cdot I \quad (4.14)$$

Plastik Akış

CDP malzeme modeli için kullanılan ve G ile gösterilen akış potansiyeli Drucker – Prager modelinin hiperbolik fonksiyonudur. Bu fonksiyon aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır [109]:

$$G = \sqrt{(\epsilon \sigma_{to} \tan \psi)^2 + \bar{q}^2} - \bar{p} \cdot \tan \psi \quad (4.15)$$

Burada;

ψ , yüksek basınçta p-q düzleminde ölçülen genleşme açısı,

σ_{to} , göçme durumundaki tek eksenli çekme gerilmesi,

ϵ , eksantriklik olarak isimlendirilen bu parametre fonksiyonun asimptota yaklaşma oranını tanımlayan bir parametredir.

Düzgün ve sürekli olan bu akış potansiyeli akış doğrultusunun her zaman eşsiz olarak tanımlanmasını sağlamaktadır. Fonksiyon, yüksek basınç gerilmeleri etkisinde doğrusal Drucker – Prager akış potansiyeline asimptotik olarak yaklaşmaktadır [109].

Akma Fonksiyonu

CDP bünyesel malzeme modeli için akma fonksiyonu ilk olarak Lubliner vd. [13] tarafından önerilmiş, Lee ve Fenves [12] tarafından çekme ve basınç etkisi altındaki farklı mukavemet oluşumunu dikkate alacak şekilde geliştirilmiştir. Bu model için efektif gerilmeler cinsinden akma fonksiyonu aşağıdaki gibi ifade edilmektedir [109]:

$$F = \frac{1}{1-a} \left(\bar{q} - 3a\bar{p} + \beta(\tilde{\epsilon}^{pl}) (\hat{\sigma}_{max}) - \gamma(-\hat{\sigma}_{max}) \right) - \bar{\sigma}_c(\tilde{\epsilon}_c^{pl}) = 0 \quad (4.16)$$

$$a = \frac{\sigma_{bo}/\sigma_{co} - 1}{2(\sigma_{bo}/\sigma_{co}) - 1} \quad (4.17)$$

$$\beta = \frac{\bar{\sigma}_c(\tilde{\epsilon}_c^{pl})}{\bar{\sigma}_t(\tilde{\epsilon}_t^{pl})} (1-a) - (1+a) \quad (4.18)$$

$$\gamma = \frac{3(1-K_c)}{2K_c - 1} \quad (4.19)$$

Burada,

$\tilde{\epsilon}_c^{pl}$ ve $\tilde{\epsilon}_t^{pl}$, sırasıyla basınç ve çekme etkisindeki eşdeğer plastik birim şekil değiştirmeleri,

$\hat{\sigma}_{max}$, maksimum asal efektif gerilme,

σ_{bo}/σ_{co} , iki eksenli basınç etkisindeki başlangıç akma dayanımının, tek eksenli basınç etkisindeki başlangıç akma dayanımına oranı,

K_c , akma başlangıcında, basınç sabiti “ p ” ye verilen her değer için maksimum asal gerilme negatif olacak şekilde ($\hat{\sigma}_{max} < 0$) çekme meridyeni üzerindeki ikinci gerilme sabiti “ $q(TM)$ ” ‘nin basınç meridyeni üzerindeki ikinci gerilme sabiti “ $q(CM)$ ” ‘ye oranıdır,

$\bar{\sigma}_t(\tilde{\epsilon}_t^{pl})$ ve $\bar{\sigma}_c(\tilde{\epsilon}_c^{pl})$ sırasıyla çekme ve basınç etkisi altındaki efektif kohezyon gerilmeleridir ve bu gerilme değerleri akma yüzeyinin boyutunu belirlemektedir. Efektif kohezyon gerilmeleri (4.22) ve (4.23) bağıntılarındaki gibi hesaplanmaktadır [109].

E_0 başlangıç elastisite modülü, d_t ve d_c çekme ve basınç durumlarındaki hasar parametrelerini belirtmek üzere sırasıyla çekme ve basınç yüklemeleri etkisi altında gerilme – birim şekil değiştirme ilişkileri aşağıdaki gibi ifade edilmektedir [109]:

$$\sigma_t = (1 - d_t) E_0 (\epsilon_t - \tilde{\epsilon}_t^{pl}) \quad (4.20)$$

$$\sigma_c = (1 - d_c) E_0 (\epsilon_c - \tilde{\epsilon}_c^{pl}) \quad (4.21)$$

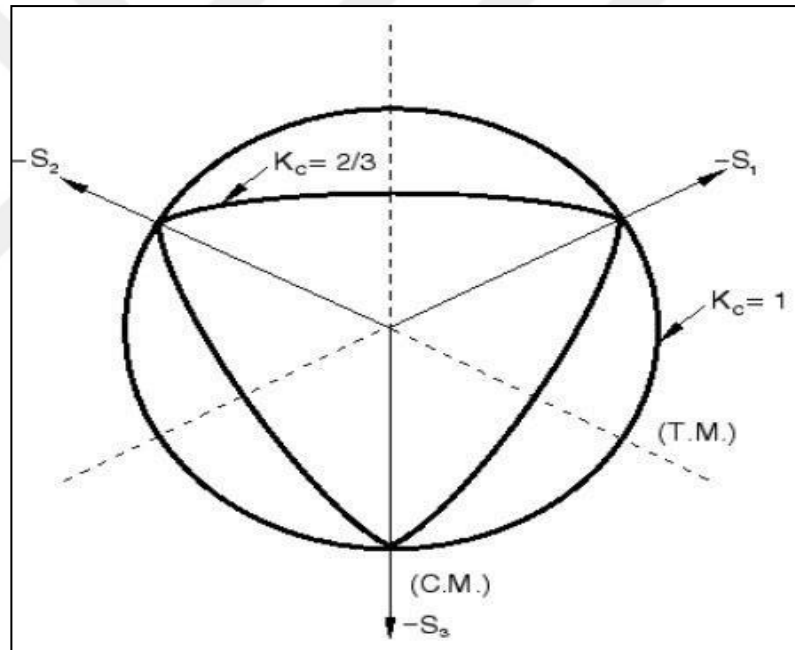
Efektif çekme ve basınç kohezyon gerilmeleri,

$$\bar{\sigma}_t = \frac{\sigma_t}{1 - d_t} = E_0 (\epsilon_t - \tilde{\epsilon}_t^{pl}) \quad (4.22)$$

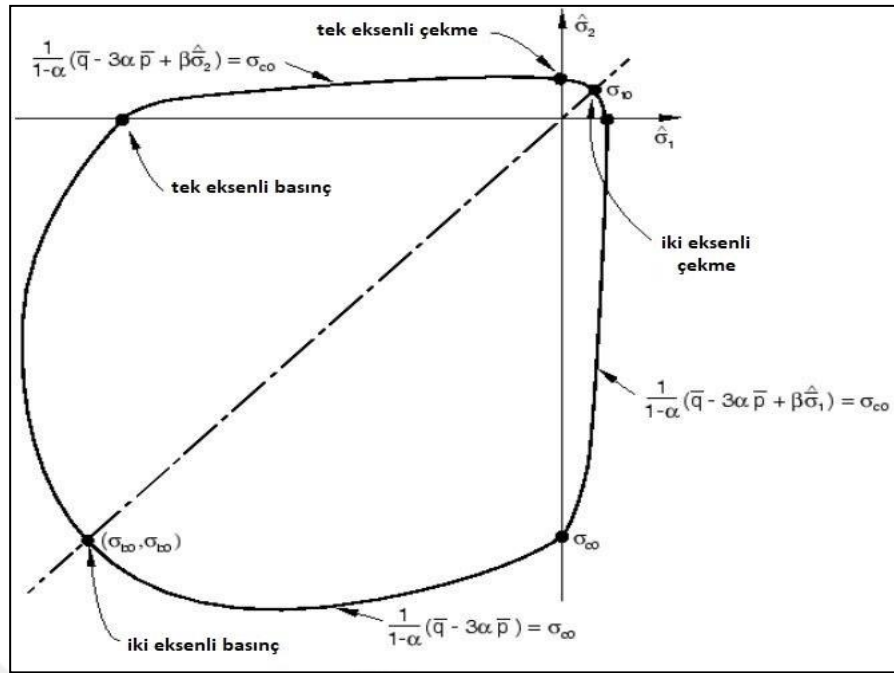
$$\bar{\sigma}_c = \frac{\sigma_c}{1 - d_c} = E_0 (\epsilon_c - \tilde{\epsilon}_c^{pl}) \quad (4.23)$$

şeklindedir.

CDP malzeme modeline ait K_c nin farklı değerlerine karşılık gelecek şekilde deviatorik eksenleri üzerindeki ve gerilme düzlemindeki akma yüzeyleri sırasıyla Şekil 4.12 ve Şekil 4.13'te verilmiştir.



Şekil 4. 12 Deviatorik düzlemde CDP modelinin tarif ettiği akma yüzeyi [109]



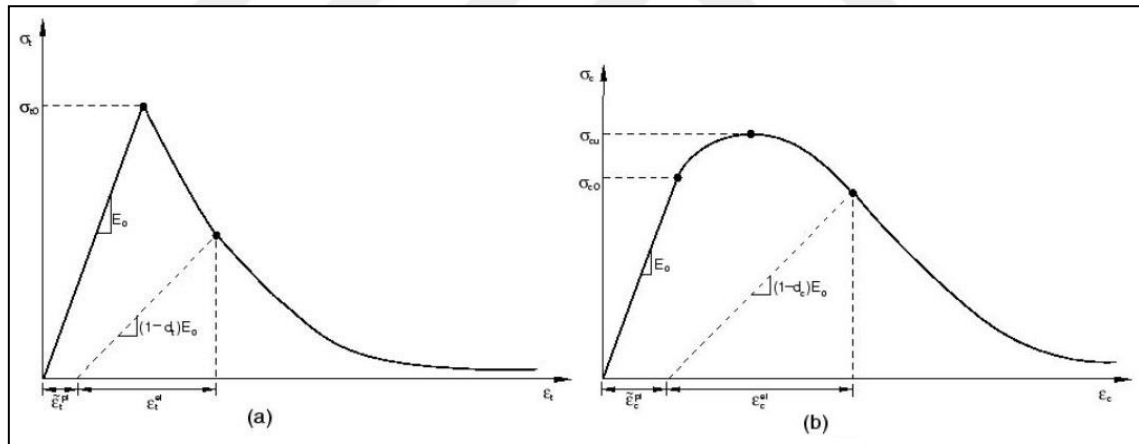
Sonuç olarak Cauchy gerilme tensörü ile efektif gerilme tensörü arasındaki ilişki skaler hasar parametresinin değişimine bağlı olarak Denklem 4.27'deki gibi hesaplanabilmektedir [110].

$$\sigma = (1 - d)\bar{\sigma} \quad (4.27)$$

Basınç ve çekme durumlarındaki hasar sırasıyla eşdeğer birim şekil değiştirmelere karşılık gelen birbirinden bağımsız iki pekleşme değişkeni $\tilde{\varepsilon}_c^{pl}$ ve $\tilde{\varepsilon}_t^{pl}$ ile karakterize edilmektedir. Çekme etkisinde çatlama ve basınç etkisinde ezilme, pekleşme değişkenlerinin artan değerleri ile temsil edilmektedir. Bu değişkenler aynı zamanda akma yüzeyinin oluşumu ve elastik rijitlikteki düşüşü kontrol etmektedir [110].

Beton için Gerilme – Birim Şekil Değiştirme İlişkisi

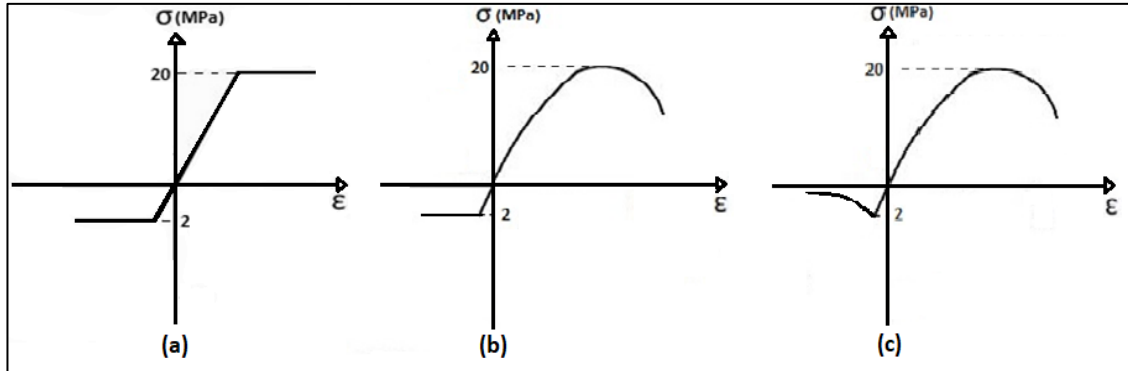
CDP malzeme modeli betonun bünyesel davranışını temsil edebilmek amacıyla tek eksenli çekme ve basınç durumları için ayrı ayrı gerilme – birim şekil değiştirme ilişkilerini kullanmaktadır. Şekil 4.14'te tek eksenli çekme (a) ve basınç (b) yüklemeleri durumlarındaki bu ilişkiler şematik olarak verilmiştir [109].



Şekil 4. 14 Betonun tek eksenli yükleme etkisindeki davranışı a) çekme, b) basınç [109]

ABAQUS [35] ile oluşturan sayısal modellerde, beton için elastoplastik yaklaşım ve elastoplastik hasar yaklaşımları ayrı ayrı kullanılmıştır. Elastoplastik yaklaşım kendi içerisinde üç farklı durum olarak dikkate alınmıştır. Bunlar; betonun çekme ve basınç etkisinde ideal elasto-plastik (EP1), basınç etkisinde elasto-plastik, çekme etkisinde ideal elasto-plastik (EP2) ve son durumda çekme ve basınç etkisinde elasto-plastik (EP3) davranış şeklindedir (Şekil 4.15). Elastoplastik hasar yaklaşımında (EPH2) ise betonun

çekme ve basınç etkisindeki elastoplastik davranışına ek olarak önerilen izotropik hasar modeli ile elastik rijitlik düşüşü dikkate alınmıştır. CDP malzeme modeli betonun çekme ve basınç etkisindeki davranışı için tek eksenli gerilme – birim şekil değiştirme ilişkilerini kullandığı için bu ilişkilerin elde edilmesi gerekmektedir. Bu amaçla teorik olarak önerilmiş gerilme – birim şekil değiştirme eğrileri kullanılmıştır.



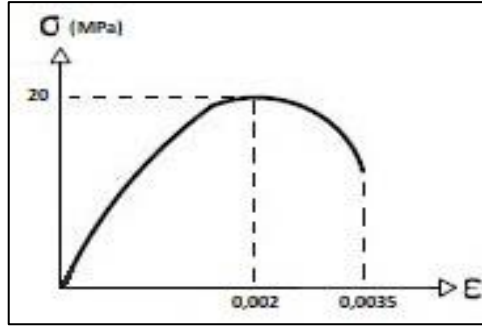
Şekil 4. 15 Betonun gerilme – şekil değiştirme ilişkileri a) EP1, b) EP2, c) EP3

Basınç Gerilmeleri için Tek Eksenli Gerilme – Birim Şekil Değiştirme İlişkisi

Elastoplastik durum için basınç gerilmeleri etkisinde betonun davranışını temsil edebilmek adına Saenz [111] tarafından önerilen gerilme – birim şekil değiştirme ilişkisi kullanılmıştır. E_0 ise başlangıç elastisite modülü (Denklem 4.5), σ_b ve ϵ_b sırasıyla basınç etkisindeki gerilme ve birim şekil değiştirme değerleri, σ_p ve ϵ_p deneysel olarak belirlenmiş maksimum gerilme ve bu değere karşılık gelen birim şekil değiştirme değerlerini belirtmek üzere bu ilişki aşağıdaki bağıntıda verilmiştir.

$$\sigma_b = \frac{E_0 \epsilon_b}{1 + \left(\frac{E_0 \epsilon_p}{\sigma_p} - 2 \right) \left(\frac{\epsilon_b}{\epsilon_p} \right) + \left(\frac{\epsilon_b}{\epsilon_p} \right)^2} \quad (4.28)$$

Burada, E_0 başlangıç elastisite modülü 20000 MPa, σ_p deneysel olarak belirlenmiş karakteristik silindir numunesi dayanımı 20 MPa, bu gerilme değerine karşılık gelen birim şekil değiştirme değeri ϵ_p ve göçme birim şekil değiştirmesi ϵ_{rup} için Eurocode-2 [112]'de önerilen sırasıyla 0,002 ve 0,0035 değerleri kullanılmıştır. Gerilme – birim şekil değiştirme ilişkisi şematik olarak Şekil 4.16'da verilmiştir.



Şekil 4. 16 Betonun basınç durumunda tek eksenli gerilme – birim şekil değiştirme ilişkisi

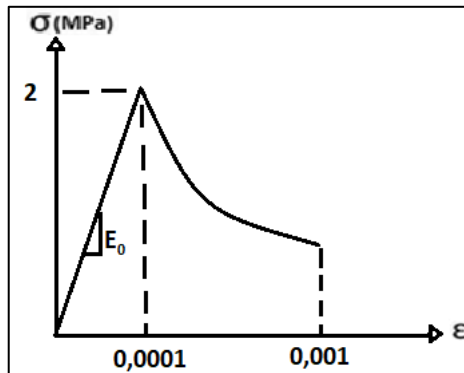
Çekme Gerilmeleri için Tek Eksenli Gerilme – Birim Şekil Değiştirme İlişkisi

Betonun çekme gerilmelerinin etkisindeki tek eksenli elastoplastik davranışı için Wang ve Hsu [113] tarafından önerilen gerilme – birim şekil değiştirmesi kullanılmıştır. σ_1 çekme gerilmesi değeri, ϵ_1 birim şekil değiştirme, E_0 betonun elastisite modülü, f_{cr} ve ϵ_c ise çatlak başlangıç gerilmesi ve bu değere karşılık gelen birim şekil değiştirme değeri olmak üzere gerilme – birim şekil değiştirme ilişkisi aşağıdaki gibidir:

$$\sigma_1 = E_0 \epsilon_1 \quad \epsilon_1 \leq \epsilon_{cr} \quad (4.29)$$

$$\sigma_1 = f_{cr} \left(\frac{\epsilon_{cr}}{\epsilon_1} \right)^{0,4} \quad \epsilon_1 \geq \epsilon_{cr} \quad (4.30)$$

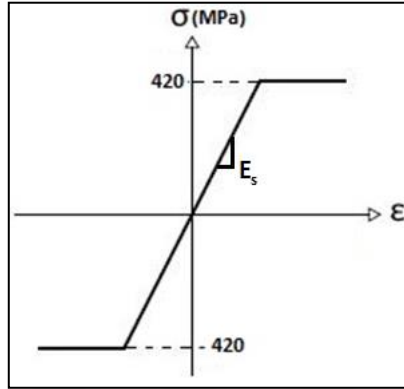
Burada, betonun elastisite modülü (E_0) 20000 MPa, çatlak başlangıç gerilmesi (f_{cr}) ise 2 MPa olarak alınmıştır. Çatlak başlangıcı (ϵ_{cr}) ve göçme birim şekil değiştirmesi için ABAQUS kullanıcı kılavuzunda [109] önerilen sırasıyla “0,0001” ve “0,001” değerleri dikkate alınmıştır. Çekme etkisinde betonun gerilme şekil değiştirme ilişkisi Şekil 4.17’ de verilmiştir.



Şekil 4. 17 Betonun tek eksenli çekme gerilmesi – birim şekil değiştirme ilişkisi

Donatı Çeliği için Gerilme – Birim Şekil Değişirme İlişkisi

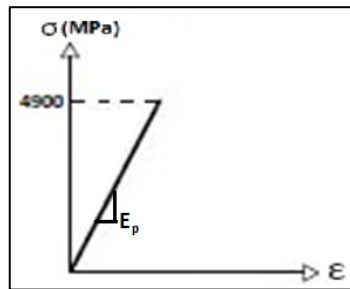
Karbon lifli polimerler güçlendirilen ve kontrol kirişlerinde kullanılan boyuna ve enine donatılar S420 sınıfı çeliktir. Donatı çeliğinin elastisite modülü (E_s) 200000 MPa, akma dayanımı (σ_y) 420 MPa olmak üzere çekme ve basınç etkisindeki gerilme – birim şekil değiştirme ilişkisi ideal elastoplastik olarak dikkate alınmıştır (Şekil 4.18).



Şekil 4. 18 Donatı çeliğine ait gerilme – birim şekil değiştirme ilişkisi

CFRP için Gerilme – Birim Şekil Değişirme İlişkisi

Sayısal modellerde güçlendirme malzemesi olarak kullanılan karbon lif takviyeli polimer kumaşın (CFRP) yırtılma dayanımına kadar elastik olarak davrandığı kabul edilmiştir. Güçlendirme lifleri sadece kiriş eksenini doğrultusunda olan polimer malzemenin kalınlığı 0,166 mm'dir. Malzemeye ait elastisite modülü (E_p) 230000 MPa, çekme dayanımı ise 4900 MPa olacak şekilde deneysel çalışmadan alınmıştır. Malzemeye ait gerilme – birim şekil değiştirme ilişkisi Şekil 4.19'da verilmiştir.



Şekil 4. 19 Karbon lifli polimere ait gerilme birim şekil değiştirme ilişkisi

4.2.2.3 Malzeme Parametreleri

CDP bünyesel malzeme modeline ait plastisite parametreleri için ABAQUS kullanıcı kılavuzunda [109] önerilen değerler kullanılmıştır. Betonun çekme ve basınç etkisindeki gerilme - birim şekil değiştirme parametreleri ise daha önceki kısımda açıklandığı şekilde tek eksenli basınç ve çekme durumları için belirlenen eğrilerden faydalanılarak elde edilmiştir. Oluşturulan sayısal modellerde betonun elastoplastik davranışı için üç farklı duruma ait malzeme parametreleri, elastoplastik hasar modeli için ise elastoplastik davranışa ilaveten çekme ve hasar durumlarındaki hasarın ayrı ayrı dikkate alınmasını sağlayan skaler hasar parametreleri belirlenmiştir.

Beton

ABAQUS [35] yazılımı ile sayısal olarak modellenen betonarme kirişlerde betonun elastoplastik davranışı için üç farklı gerilme – birim şekil değiştirme ilişkisi incelenmiştir. Çizelge 4.8’de betonun çekme ve basınç gerilmeleri etkisinde ideal elastoplastik (EP1) ve basınç etkisinde elastoplastik, çekme etkisinde ideal elastoplastik (EP2) davranışları için parametreler verilirken, Çizelge 4.9’da ise çekme ve basınç etkisinde elastoplastik (EP3) davranışa ait malzeme parametreleri verilmiştir.

Çizelge 4. 8 EP1 ve EP2 için betona ait malzeme parametreleri

EP1 ve EP2	Parametre	Değer
Elastik Parametreler	E (MPa)	20000
	Poisson Oranı (ν)	0,2
Plastisite Parametreleri	Genleşme Açısı (ψ)	36
	Ekzantrisite (ϵ)	0,1
	$fb0/fc0$	1,16
	K_c	0,667
	Viskozite (μ)	0

Çizelge 4. 9 EP3 için betona ait malzeme parametreleri

EP3	Parametre	Değer
Elastik Özellikler	E (MPa)	20000
	Poisson Oranı (ν)	0,2
Plastisite Parametreleri	Genleşme Açısı (ψ)	36
	Ekzantrsite (ϵ)	0,1
	fb0/fc0	1,16
	K_c	0,667
	Viskozite (μ)	0,0005

Betonun elastoplastik (EP3) davranışının dikkate alındığı durumda tek eksenli çekme gerilmesi – birim şekil değiştirmesi ilişkisinden kaynaklanan yakınsama sorunlardan uzaklaşmak amacıyla ABAQUS kullanıcı kılavuzunun [109] da önerdiği şekilde viskozite parametresine müdahale edilmiştir. Bu durumda bu parametrenin değeri 0 yerine 0,0005 olarak değiştirilmiştir.

İzotropik hasar modeli ile betonun çekme ve basınç etkisindeki hasarın ayrı ayrı dikkate alındığı elastoplastik hasar yaklaşımında (EPH2) plastisite ve tek eksenli gerilme – birim şekil değiştirme (basınç ve çekme) ilişkilerine ek olarak sırasıyla çekme ve basınç durumunda hasarı belirleyen “ d_t ” ve “ d_c ” parametrelerinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu parametreler tek eksenli çekme ve basınç durumları için önerilen gerilme – birim şekil değiştirme eğrilerinden aşağıdaki bağıntılar yardımıyla belirlenmiştir [110]:

$$d_t = 1 - \frac{\sigma}{f_t} \quad (4.31)$$

$$d_c = 1 - \frac{\sigma}{\sigma_p} \quad (4.32)$$

Burada, “ σ ” tek eksenli gerilme - birim şekil değiştirme eğrisi üzerinde elastik ötesi durum için herhangi bir gerilme değerini gösterirken, “ σ_p ” ve “ f_t ” sırasıyla basınç ve çekme gerilme - birim şekil değiştirme eğrilerinde yumuşamanın başladığı andaki gerilme değerlerini ifade etmektedir. Elastoplastik hasar yaklaşımı (EPH2) için betona ait malzeme parametreleri Çizelge 4.10’da verilmiştir.

Çizelge 4. 10 EPH2 için betona ait malzeme parametreleri

EPH2	Parametre	Değer
Elastik Özellikler	E (MPa)	20000
	Poisson Oranı (ν)	0,2
Plastisite Parametreleri	Genleşme Açısı (ψ)	36
	Ekzantrisite (ϵ)	0,1
	f_{b0}/f_{c0}	1,16
	K_c	0,667
	Viskozite (μ)	0,0005
Hasar Parametreleri	d_t	0 - 0,602
	d_c	0 - 0,139

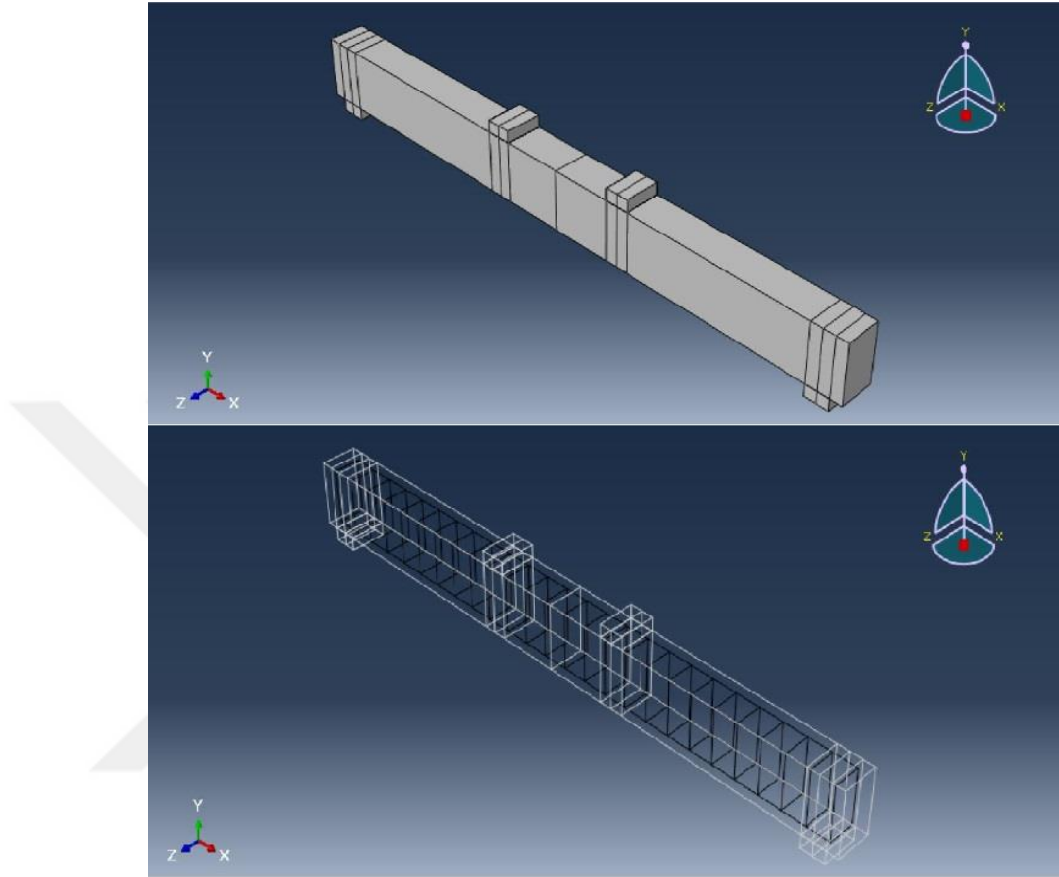
Donatı Çeliği ve CFRP

ABAQUS yazılımı [35] ile sayısal olarak modellenen betonarme kirişlerde donatı çeliğinin ideal elastoplastik davranış sergilediği, güçlendirme elemanı olarak kullanılan karbon lifli polimer malzemenin ise kopma dayanımına kadar elastik davrandığı kabul edilmiştir. Sayısal modellerde donatı çeliği ve CFRP için kullanılan malzeme parametreleri sırasıyla Çizelge 4.5 ve Çizelge 4.6’da verilmiştir.

4.2.2.4 Sayısal Model Geometrisi ve Sonlu Eleman Ağı

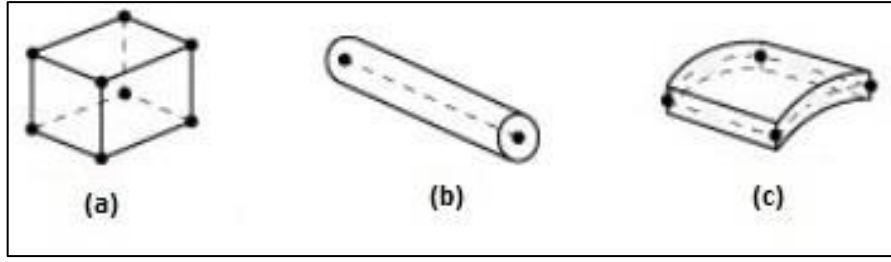
Önceki kısımda verilen malzeme parametreleri dikkate alınarak incelenen 2 farklı grup numuneye ait toplamda 8 adet olmak üzere FRP ile farklı biçimlerde güçlendirilmiş ve kontrol kirişlerine ait sayısal modeller ABAQUS [35] yazılımı ile 3 boyutlu olarak oluşturulmuştur. Betonarme kirişlerin boyutları deneysel olarak incelenen numune ebatlarıyla (2600×250×150 mm) uyumlu olacak şekilde dikkate alınmıştır. Kirişler deney koşullarında olduğu gibi iki çelik plaka (2×100×50×150 mm) üzerine oturtulmuş ve plakalar sınır koşullarına uygun olacak şekilde mesnetlenmiştir. Yer değiştirme kontrollü olarak gerçekleştirilen analizlerde, kirişlerin üst yüzeyinde yükleme etkisi ile betonun ezilmesinin önüne geçebilmek adına mesnet plakaları ile aynı boyutlarda çelik yükleme plakaları (2×100×50×150 mm) oluşturulmuştur. Güçlendirme yapılan kirişlerde karbon lifli polimer (CFRP) ile beton arasında tam kenetlenme ilişkisi göz önüne alınırken, tüm kiriş modellerinde donatı yerleşimi deney numuneleri ile uyumlu olacak şekilde

belirlenmiş, enine ve boyuna donatılar ile beton arasındaki ara yüz ilişkisi gömülü eleman kabulü ile temsil edilmeye çalışılmıştır. Betonarme kirişlere ait sayısal model şematik olarak Şekil 4.20’ de verilmiştir.

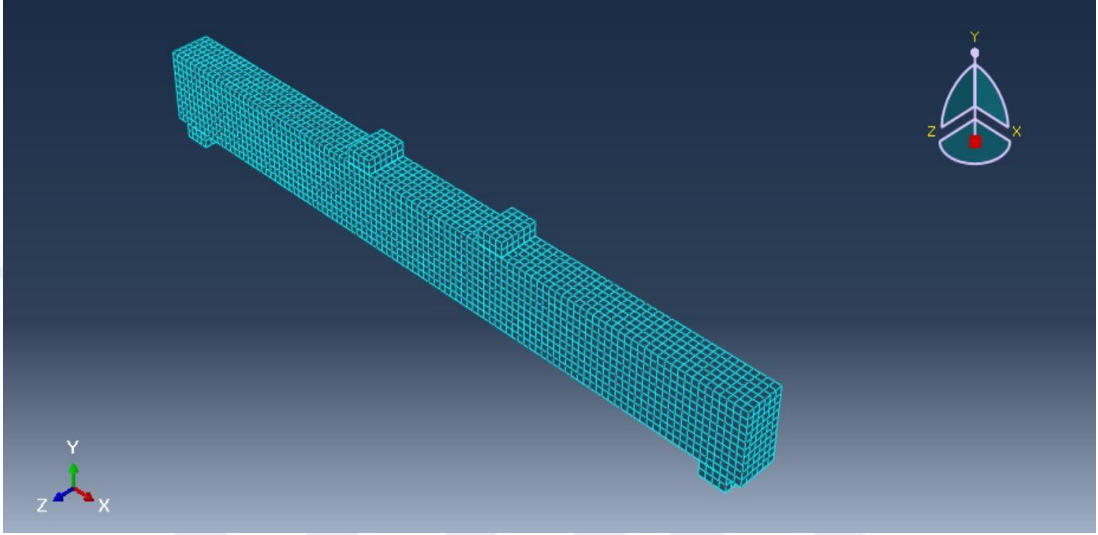


Şekil 4. 20 Betonarme kirişlere ait sayısal model

Sayısal modellerde beton ve çelik plakalar (yükleme ve mesnet) için toplamda sekiz düğüm noktasına sahip ve altı yüzlü üç boyutlu gerilme elemanı “C3D8R”, enine ve boyuna donatılar için iki düğüm noktalı ve üç boyutlu çubuk elemanı olan “T3D2”, karbon lifli polimerler için ise dört düğüm noktalı kabuk eleman “S4R” dörtgen elemanı kullanılmıştır. Sayısal modellerde kullanılan sonlu eleman tipleri ve sonlu eleman ağı sırasıyla Şekil 4.21 ve Şekil 4.22’de verilmiştir.



Şekil 4. 21 Sonlu eleman tipleri a) C3D8R, b) T3D2, c) S4R [109]



Şekil 4. 22 Sayısal modellerde sonlu eleman ağı

4.3 Sayısal Analiz Sonuçları ve Değerlendirmeler

Bünyesel modelleme çalışması kapsamında, iki farklı yöntem ve yazılım ile sayısal modelleri oluşturulan betonarme kirişlerin doğrusal olmayan analizleri gerçekleştirilmiş ve her iki yöntem için analiz sonuçları elde edilmiştir. Birinci ve ikinci grup numuneler için göçme anında elde edilen yük – yer değiştirme değerleri deney sonuçları ile kıyaslanmış karşılaştırmalı olarak sırasıyla Çizelge 4.11 ve Çizelge 4.12’de verilmiştir. Bünyesel modelleme çalışmasının ikinci kısmında kullanılan elastoplastik hasar yaklaşımı (EPH2) için analizlerin sonlandırılacağı adım, LUSAS [34] yazılımda sanal malzeme modeli (EPH1) yöntemi kullanılarak kırılma enerjisi ile bulunan sonuçlar dikkate alınarak belirlenmiştir. Bütün kirişler için yük – yer değiştirme ilişkileri, gerilme dağılımları, şekil değiştirme dağılımları ve hasar durumları bu kısımda ayrı ayrı irdelenmiştir. ABAQUS [35] yazılımında EP1, EP2 ve EP3 için gerçekleştirilen analizler deney numunelerinin maksimum yer değiştirme değerleri dikkate alınarak sonlandırılmıştır.

Çizelge 4. 11 Birinci grup numuneler için maksimum yük ve bu yük değerine karşı gelen yer değiştirme değerlerinin deney sonuçları ile kıyaslanması

Numune		Sayısal Model					
	K20R	Deney	EP1	EP2	EP3	EPH1	EPH2
	Yük (kN)	51,97	63,71	63,75	55,69	61,2	53,03
	Yer Değiştirme (mm)	117,02	139,11	139,09	90,11	114,88	114,49
Hata (%)	Yük için	-	22,59	22,67	7,16	17,76	2,04
	Yer Değiştirme için	-	18,87	16,29	22,99	1,83	2,16
K20KG00							
	Yük (kN)	80,43	99,42	98,69	84,72	80,83	79,84
	Yer Değiştirme (mm)	35,72	38,01	37,98	36,02	34,15	31,46
Hata (%)	Yük için	-	23,61	22,70	5,33	0,50	0,73
	Yer Değiştirme için	-	6,41	6,33	0,84	4,40	11,93
K20KG50							
	Yük (kN)	93,56	109,35	108,32	95,2	93,45	90
	Yer Değiştirme (mm)	33,88	35,11	35	35	33,71	33,5
Hata (%)	Yük için	-	17,07	15,77	1,75	0,12	3,81
	Yer Değiştirme için	-	3,63	3,31	3,31	0,50	1,12
K20KGU							
	Yük (kN)	108,19	127,42	125,17	114,7	101,60	100,36
	Yer Değiştirme (mm)	43,15	43,08	43,13	43,2	32,39	32,4
Hata (%)	Yük için	-	17,77	15,69	6,02	6,09	7,23
	Yer Değiştirme için	-	0,16	0,05	0,12	24,94	24,91

Çizelge 4. 12 İkinci grup numuneler için maksimum yük ve bu yük değerine karşı gelen yer değiştirme değerleri ve deney sonuçları ile kıyaslanması

Numune		Sayısal Model					
	K40R	Deney	EP1	EP2	EP3	EPH1	EPH2
	Yük (kN)	45,87	59,4	59,34	49,71	54,62	48,70
	Yer Değiştirme (mm)	79,83	117,48	118,25	75,97	113,21	88,31
Hata (%)	Yük için	-	29,50	29,37	8,37	19,08	6,17
	Yer Değiştirme için	-	47,16	48,12	4,84	41,82	10,62
K40KG00							
	Yük (kN)	76,78	95,07	94,44	79,98	73,05	76,00
	Yer Değiştirme (mm)	34,63	37,99	37,99	36,00	31,99	31,99
Hata (%)	Yük için	-	23,82	23,00	4,17	4,86	1,02
	Yer Değiştirme için	-	9,70	9,70	3,96	7,62	7,62
K40KG70							
	Yük (kN)	91,43	107,13	105,92	92,52	92,88	89,45
	Yer Değiştirme (mm)	33,82	34,16	34,16	33,65	35,65	33,68
Hata (%)	Yük için	-	17,17	15,85	1,19	1,59	2,17
	Yer Değiştirme için	-	1,01	1,01	0,50	5,41	0,41

Çizelge 4. 12 İkinci grup numuneler için maksimum yük ve bu yük değerine karşı gelen yer değiştirme değerlerinin deney sonuçları ile kıyaslanması (Devamı)

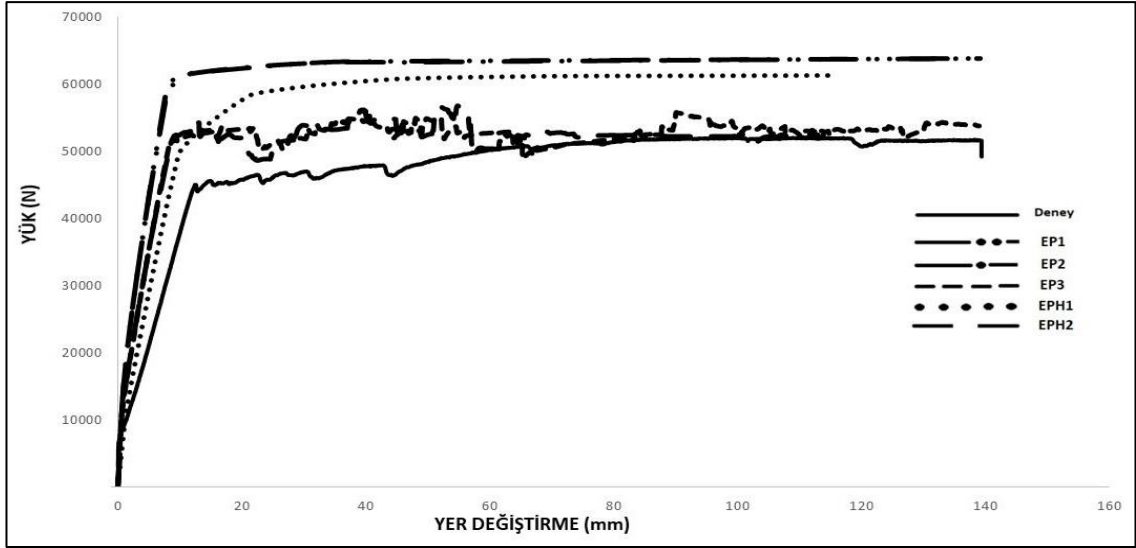
Numune		Sayısal Model					
	K40KGU	Deney	EP1	EP2	EP3	EPH1	EPH2
	Yük (kN)	98,95	120,72	118,58	108,88	92,02	93,63
	Yer Değiştirme (mm)	40,06	41,23	41,27	41,27	30,31	30,30
Hata (%)	Yük için	-	22,00	19,84	10,04	7,00	5,38
	Yer Değiştirme için	-	2,92	3,02	3,02	24,34	24,36

4.3.1 K20R Kirişi

Birinci grup numuneler için kontrol kirişi olarak kullanılan bu betonarme kiriş 20 mm net beton örtüsüne sahiptir. Herhangi bir güçlendirme yapılmayan bu kirişte 4 noktalı düşey yük etkisi altında, yük ve yer değiştirme kontrollü gerçekleştirilen sonlu eleman analizlerinin sonuçları belirlenmiştir.

Yük – Yer Değiştirme İlişkisi

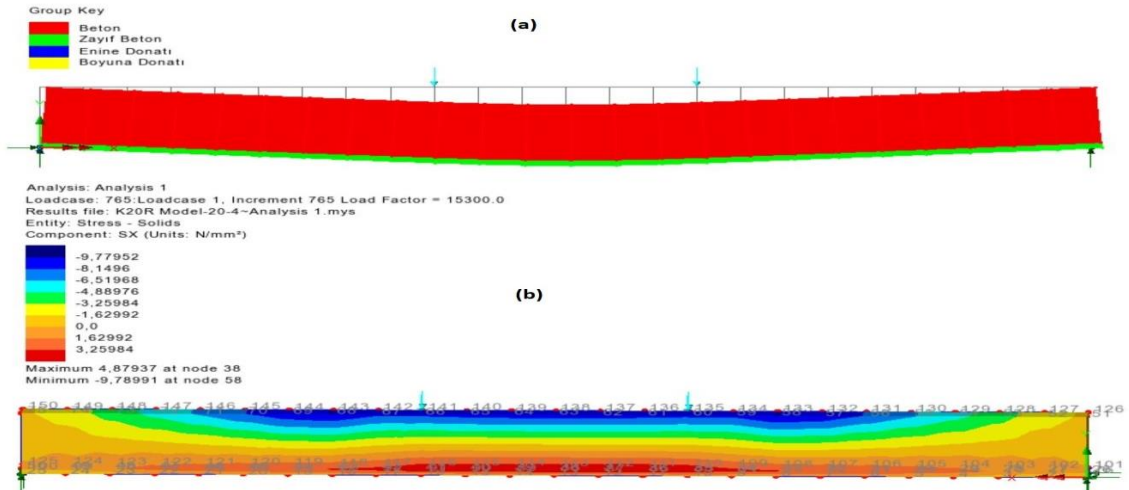
LUSAS [34] ve ABAQUS [35] yazılımları ile toplamda 5 farklı yaklaşımla (EPH1, EPH2, EP1, EP2 ve EP3) analizleri gerçekleştirilen bu kiriş numunesine ait yük – yer değiştirme ilişkisi deney sonucu ile karşılaştırmalı olarak Şekil 4.23'te verilmiştir. Deneysel çalışmada bu kiriş numunesinin açıklık ortasındaki maksimum düşey yer değiştirme miktarı 138,76 mm olurken bu durumda 49,19 kN'luk yük değeri belirlenmiş ve kiriş bu anda göçmüştür. Sayısal analizler sonucunda maksimum yük kapasitesi açısından kıyaslandığında deney sonucuna göre en başarılı sonuç EPH2 yaklaşımı ile elde edilmiştir fakat bu durum için açıklık ortası düşey yer değiştirme miktarı deney sonucuna göre düşük kalmıştır. EPH2'de maksimum yük değeri deney sonucuna göre % 2,04 daha fazla olurken, bu yüke karşılık gelen yer değiştirme miktarının % 2,16 daha düşük olduğu belirlenmiştir (Çizelge 4.11).



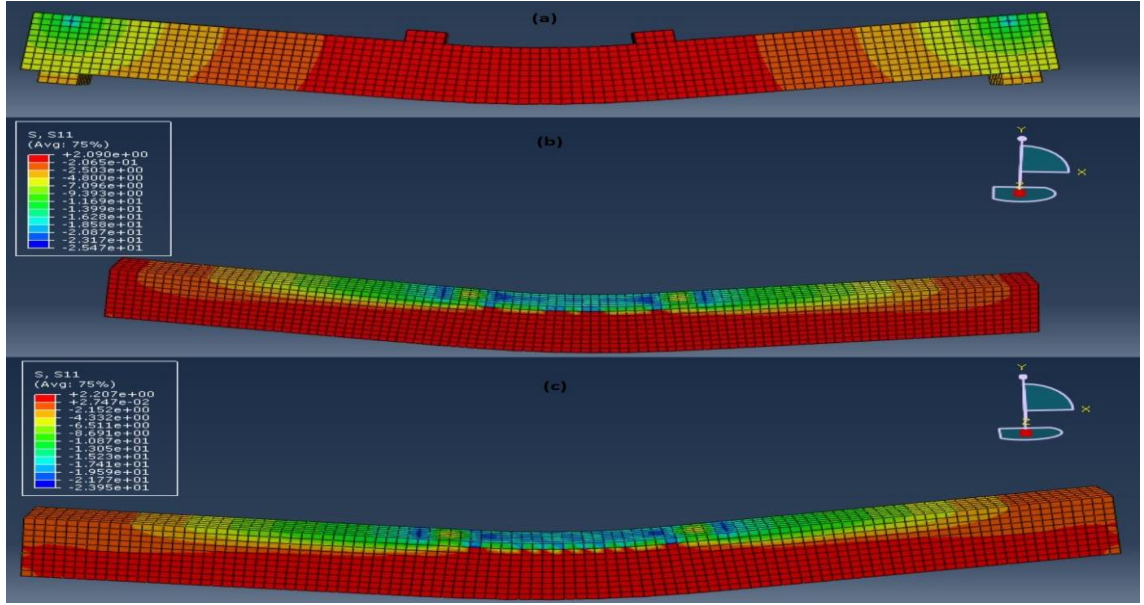
Şekil 4. 23 K20R kirişi için yük – yer değiştirme ilişkileri

Gerilme Dağılımları

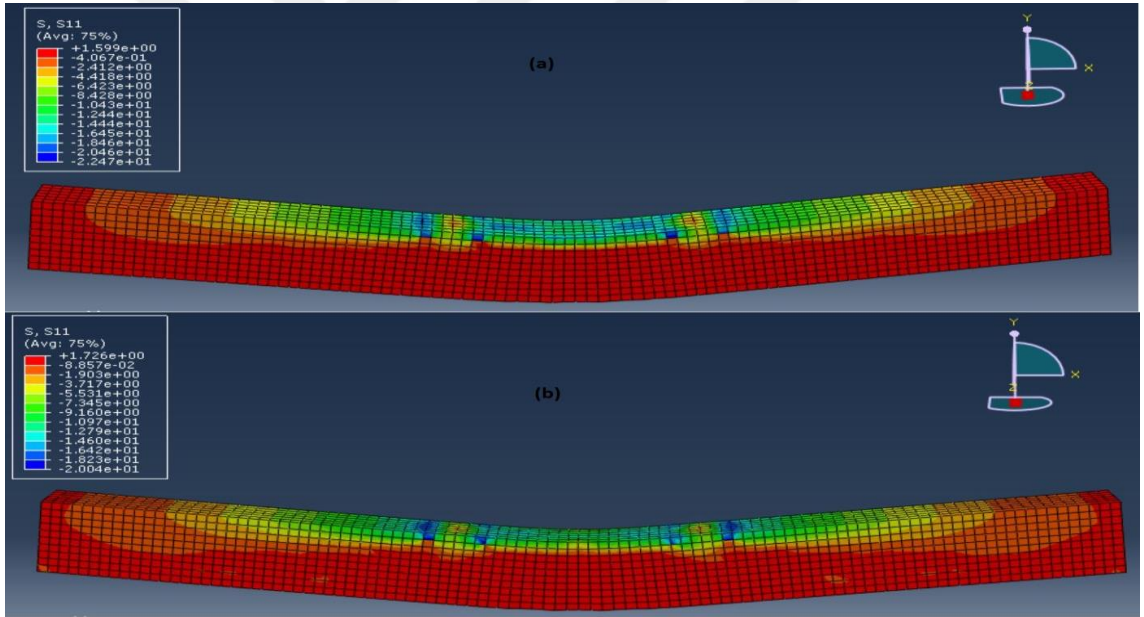
K20R numunesi için oluşturulan sayısal modellerde deney çalışmasında olduğu gibi kiriş alt bölgesinde çekme, üst yüzeyinde ise basınç gerilmelerinin etkin olduğu görülmektedir. Bu kısımda sayısal modellerde belirlenen şekil değiştirmiş durum ve kırılganlık gerilme dağılımları incelenmiştir. Sanal malzeme modeli için kirişe ait şekil değiştirmiş durum ve gerilme dağılımı Şekil 4.24'te verilmiştir. Şekil 4.25'te CDP malzeme modelinin kullanıldığı durum için kirişe ait şekil değiştirmiş durum, EP1 ve EP2 için gerilme dağılımları verilirken, EP3 ve EPH2 için elde edilen gerilme dağılımları Şekil 4.26'da verilmiştir.



Şekil 4. 24 K20R kirişinde sanal malzeme modeli için şekil değiştirmiş durum (a) ve EPH1 yaklaşımı için gerilme dağılımı (b)



Şekil 4. 25 K20R kirişinde CDP malzeme modeli için şekil değiştirmiş durum (a) ve EP1 (b) ve EP2 (c) yaklaşımları için betonda gerilme dağılımı

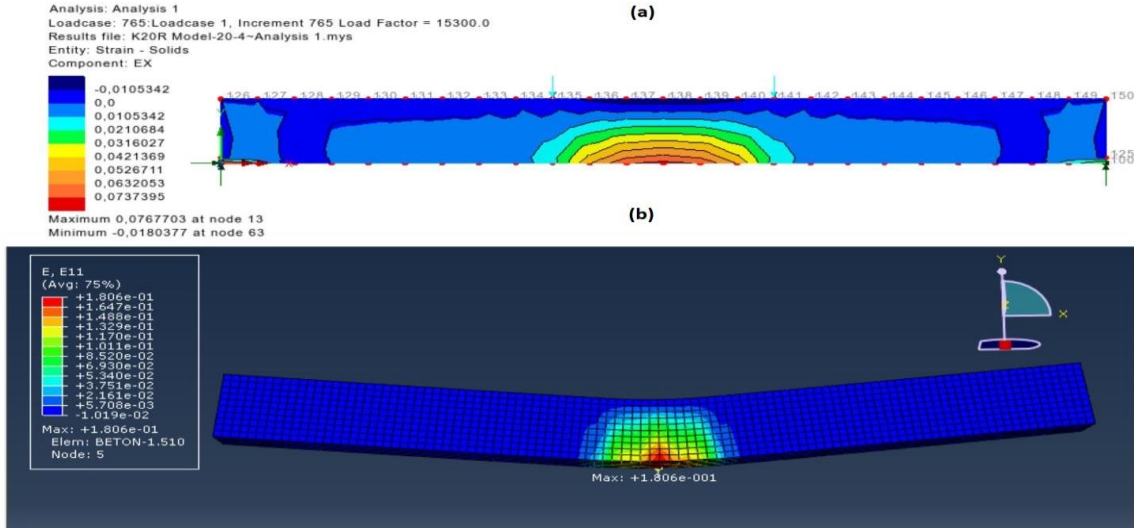


Şekil 4. 26 K20R kirişinde EP3 (a) ve EPH2 (b) yaklaşımları için betonda gerilme dağılımı

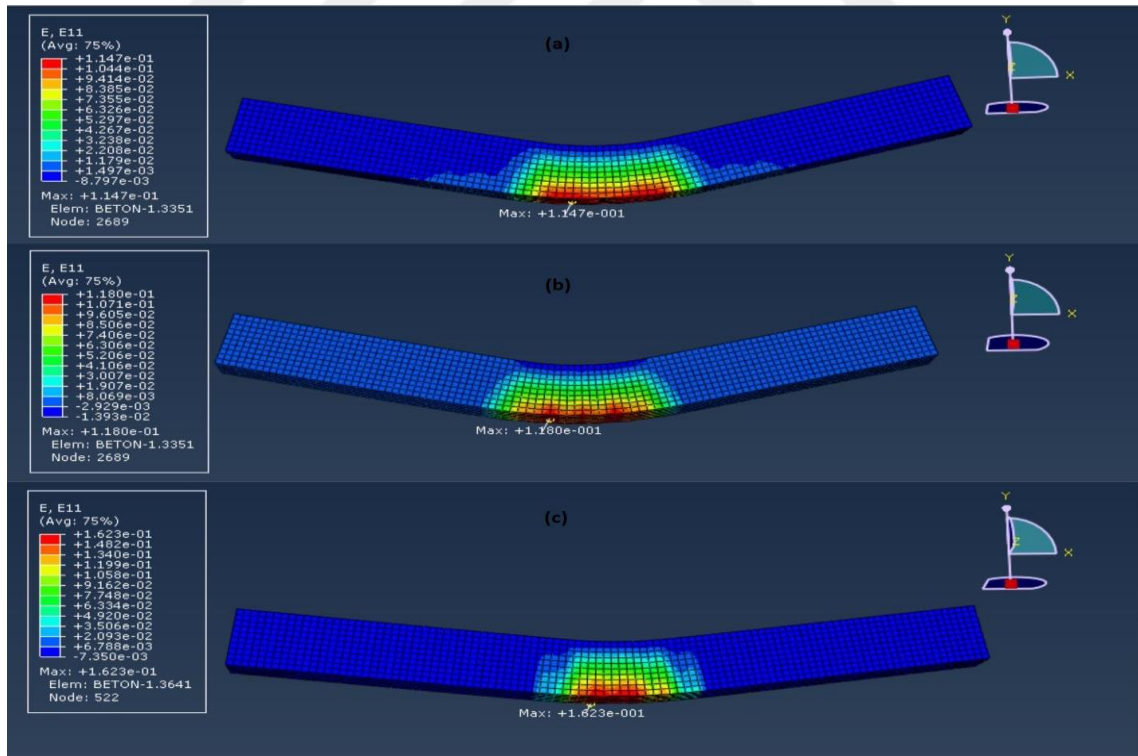
Birim Şekil Değiştirme Değeri ve Dağılımı

Her iki modelleme ile kontrol kirişine ait betondaki toplam birim şekil değiştirme değerleri ve kiriş boyunca dağılımları belirlenmiştir. Elastoplastik hasar yaklaşımları için Çizelge 4.7’de verilen kırılma enerjisi “ G_f ” değerlerine göre sonlandırılan analizlerde maksimum toplam birim şekil değiştirme değerleri EPH1 ve EPH2 için sırasıyla 0,0737 ve 0,1806 olarak bulunmuştur. Bu değerlerin kirişin açıklık ortası (çekme bölgesinde)

kesitlere ait olduğu belirlenmiştir (Şekil 4.27). EP1, EP2 ve EP3 için belirlenen toplam birim şekil değiştirme değerleri ise sırasıyla 0,1147, 0,1180 ve 0,1623 şeklindedir. Bu üç yaklaşım için elde edilen birim şekil değiştirme dağılımları Şekil 4.28’de verilmiştir.



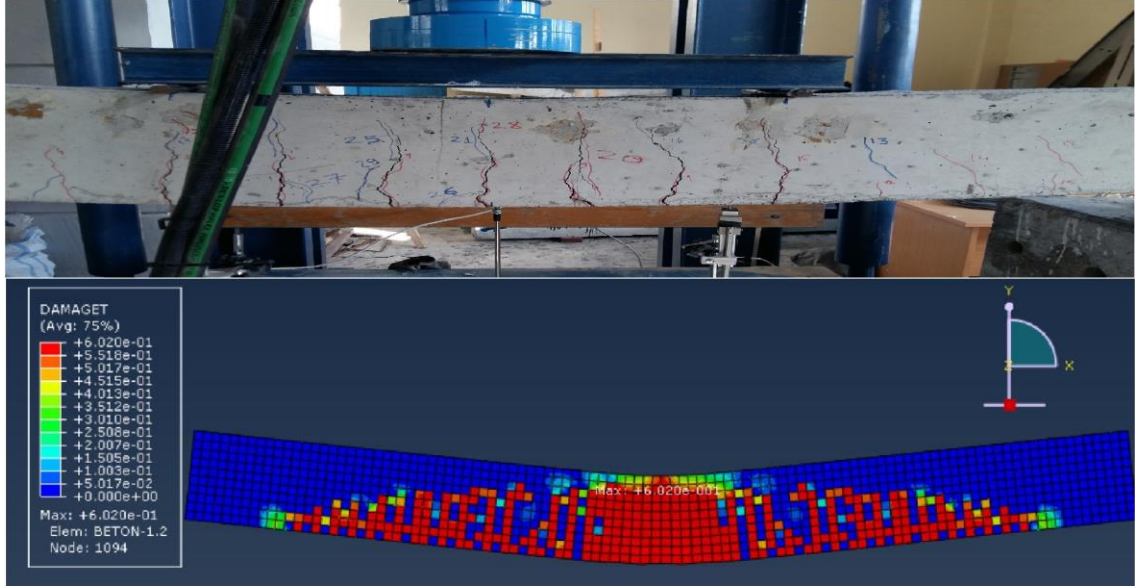
Şekil 4. 27 K20R kirişinde EPH1 (a) ve EPH2 (b) yaklaşımları için birim şekil değiştirme dağılımı



Şekil 4. 28 K20R kirişinde EP1 (a), EP2 (b) ve EP3 (c) yaklaşımları için birim şekil değiştirme dağılımı

Hasar Dağılımı

Kontrol kirişinde örnek olması açısından ABAQUS yazılımı ile elde edilen sonuçlara bağlı hasar dağılımı Şekil 4.29’da deney numunesi ile karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Sayısal modele ait elde edilen çatlak gelişimi ve yaklaşık çatlak lokasyonları deneysel sonuçlar ile benzer eğilimlidir.



Şekil 4. 29 K20R kirişinde çekme hasarlarının dağılımı

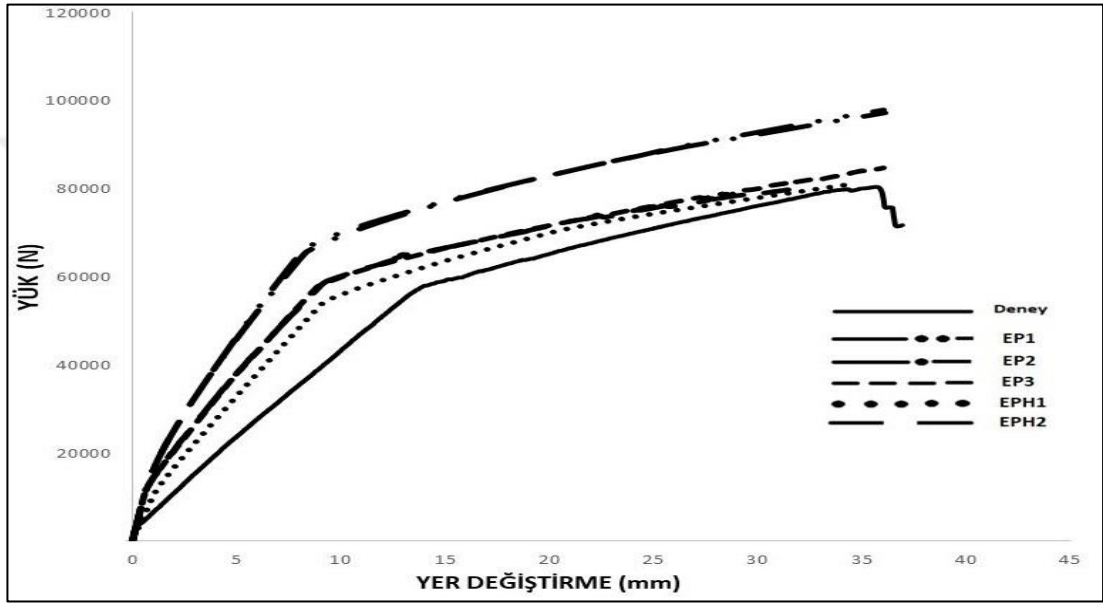
4.3.2 K20KG00 Kirişi

20 mm lik örtü betonu kalınlığına sahip bu kirişte, eğilme bölgesi karbon lifli polimer kumaş ile kiriş alt yüzeyi boyunca sargılanmıştır. Deney çalışmasında eğilme davranışı belirlenen söz konusu kiriş numunesi için farklı bünyesel modelleme teknikleri ile sayısal modeller oluşturulmuş, deney sonuçları ve birbirleri ile karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

Yük – Yer Değiştirme İlişkisi

LUSAS [34] ve ABAQUS [35] yazılımları ile sırasıyla yük ve yer değiştirme kontrollü olarak gerçekleştirilen analizler sonrasında kirişe ait yük – yer değiştirme davranışı belirlenmiştir. EPH2 yaklaşımı için yapılan analiz, Çizelge 4.7’de verilen kırılma enerjisi “ G_f ” değerleri göz önüne alınarak sonlandırılan EPH1’in yaptığı yer değiştirme değerine ulaşmadan sonlanmıştır. EP1, EP2 ve EP3 yaklaşımları için yapılan analizler ise deneyde kirişin yaptığı maksimum yer değiştirme noktasında sonlandırılmıştır. Deneysel

çalışmada bu kirişte göçme anında 71,74 kN'luk yük değeri tespit edilirken, açıklık ortasının maksimum yer değiştirme değeri 36,93 mm olarak belirlenmiştir. Kirişe ait yük – yer değiştirme ilişkisi sayısal model sonuçları ile karşılaştırmalı olarak Şekil 4.30'da verilmiştir. Sayısal analizler sonucunda maksimum yük değeri için deney sonucuna en yakın olacak şekilde en başarılı sonuç EPH1 yaklaşımı ile elde edilmiştir fakat bu durum için açıklık ortası düşey yer değiştirme miktarı deney sonucuna göre düşük kalmıştır. EPH1'de maksimum yük değeri deney sonucuna göre % 0,50 daha fazla olurken, yer değiştirme miktarı % 4,40 daha düşük olarak belirlenmiştir (Çizelge 4.11).

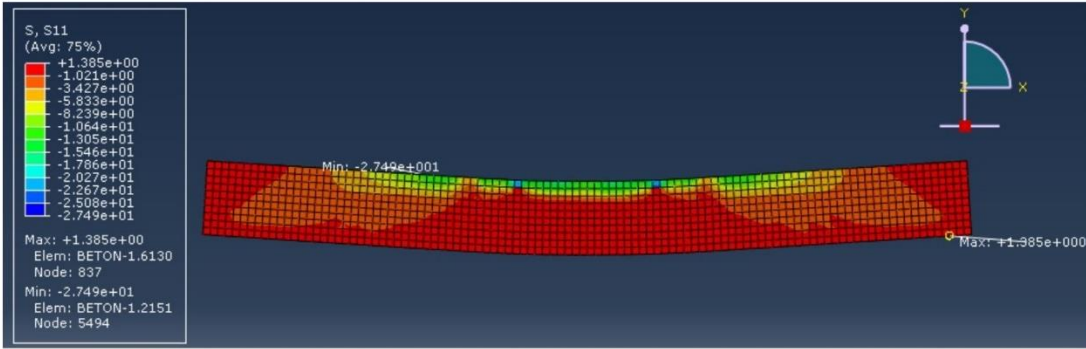
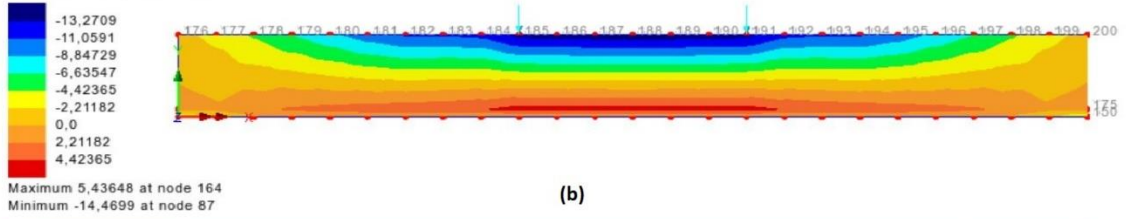


Şekil 4. 30 K20KG00 kirişi için yük – yer değiştirme ilişkisi

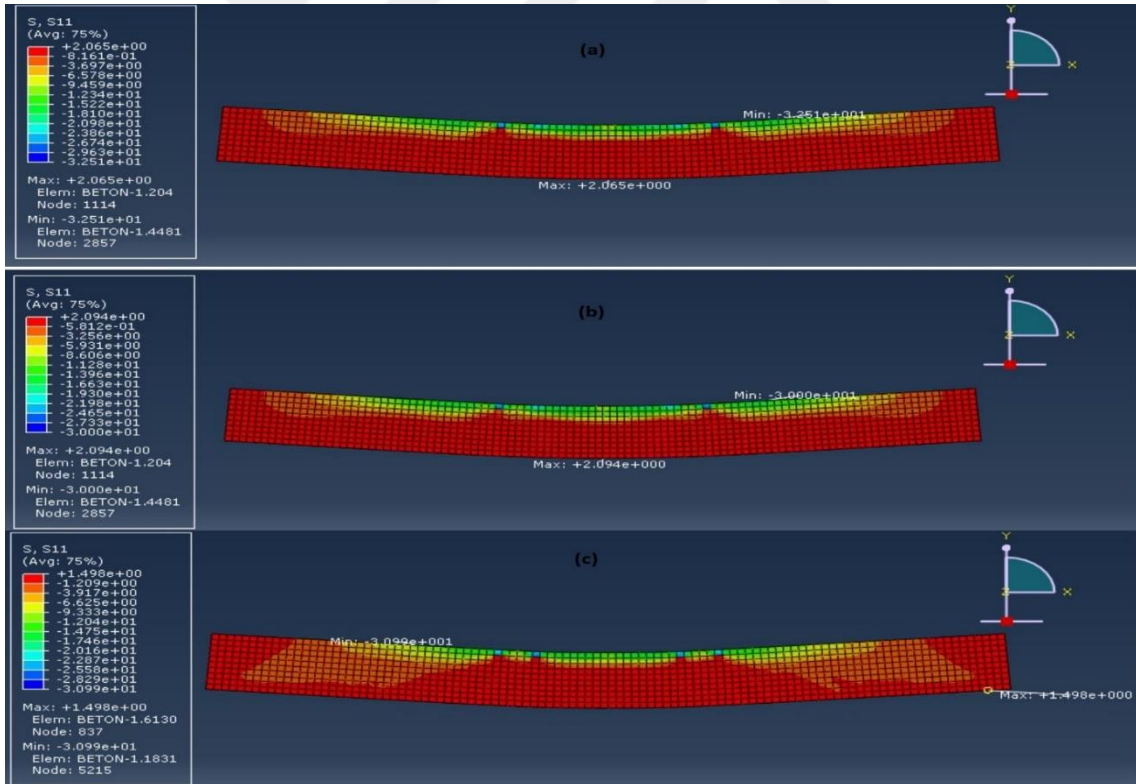
Gerilme Dağılımları

CFRP ile sadece eğilme bölgesi güçlendirilen bu kiriş için gerilme dağılımları belirlenmiştir. Beton için gerilme dağılımları EPH1 ve EPH2 ve EP1, EP2 ve EP3 için sırasıyla Şekil 4.31 ve Şekil 4.32'de verilmiştir.

Analysis: Analysis 1
Loadcase: 116: Loadcase 1, Increment 116 Load Factor = 20261.7
Results file: K20KG00 Model-11-5-Solid~Analysis 1.mys
Entity: Stress - Solids
Component: SX (Units: N/mm²)

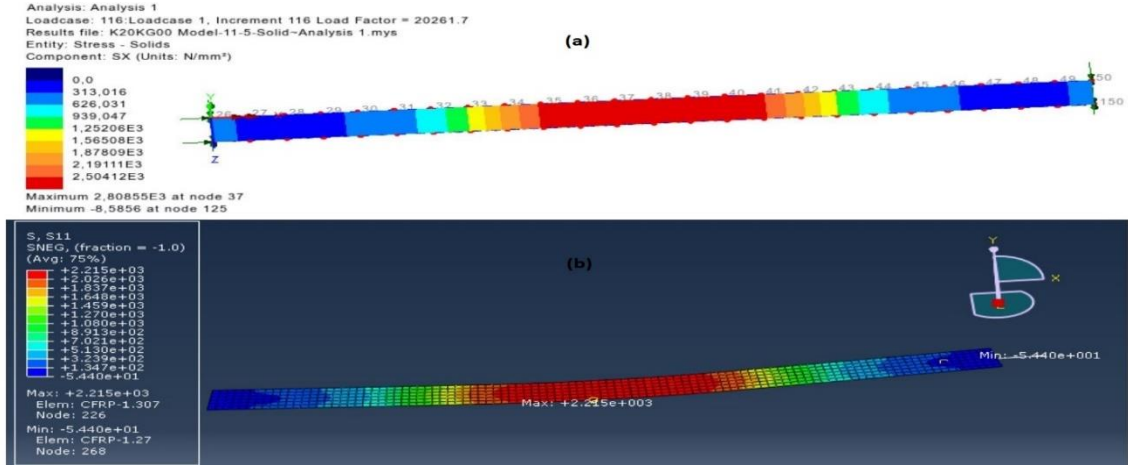


Şekil 4. 31 K20KG00 kirişinde EPH1 (a) ve EPH2 (b) yaklaşımları için betonda gerilme dağılımı

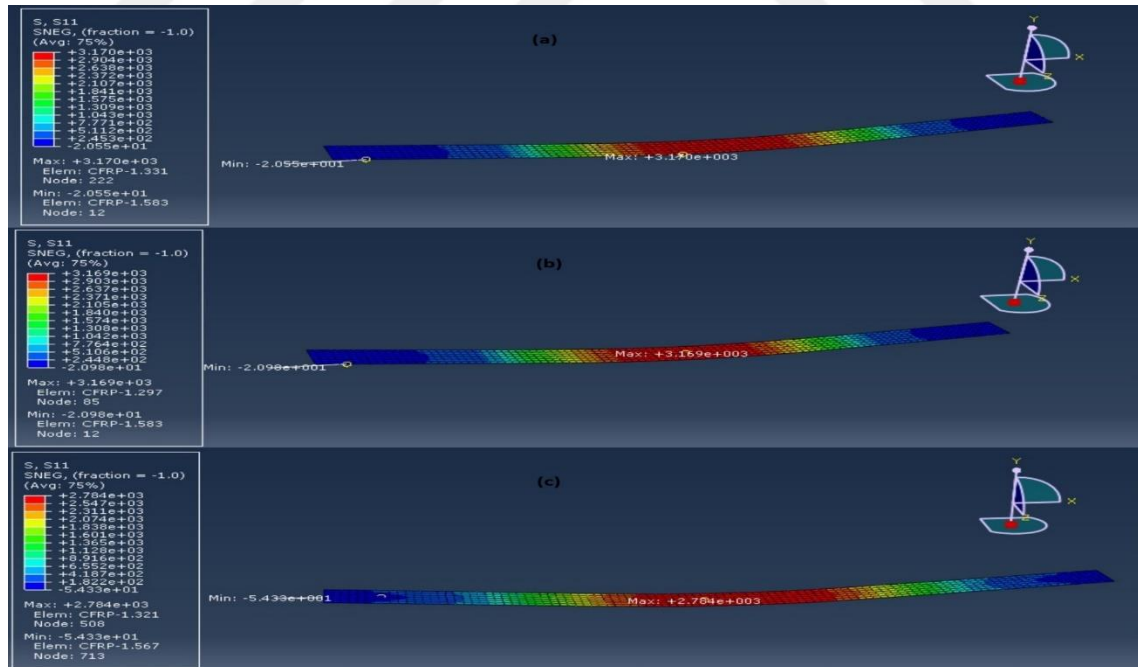


Şekil 4. 32 K20KG00 kirişinde EP1 (a), EP2 (b) ve EP3 (c) yaklaşımları için betonda gerilme dağılımı

K20KG00 kirişi için betondaki gerilme dağılımlarının yanında güçlendirme malzemesi olan CFRP'nin gerilme değerleri de kontrol edilmelidir. EPH1'de CFRP'de belirlenen maksimum gerilme değeri yaklaşık 2808 MPa, EPH2'de ise bu değer 2215 MPa olarak belirlenmiştir. Bu iki yaklaşım için CFRP'de belirlenen gerilme dağılımları Şekil 4.33'te verilmiştir. Maksimum gerilme değerleri EP1, EP2 ve EP3 için ise sırasıyla 3170, 3169 ve 2784 MPa olarak bulunmuş ve Şekil 4.34'te verilmiştir.



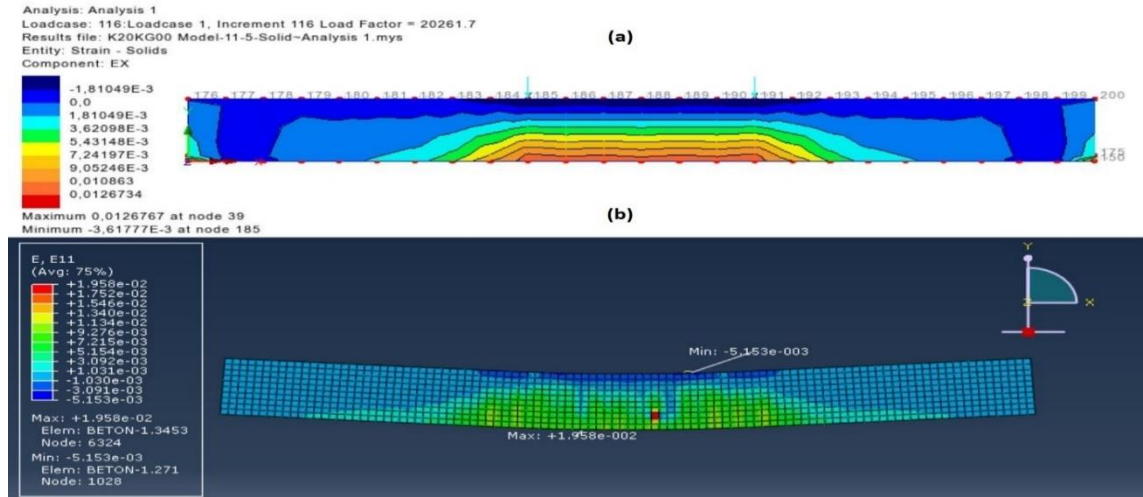
Şekil 4. 33 K20KG00 kirişinde EPH1 (a) ve EPH2 (b) yaklaşımları için CFRP'de gerilme dağılımı



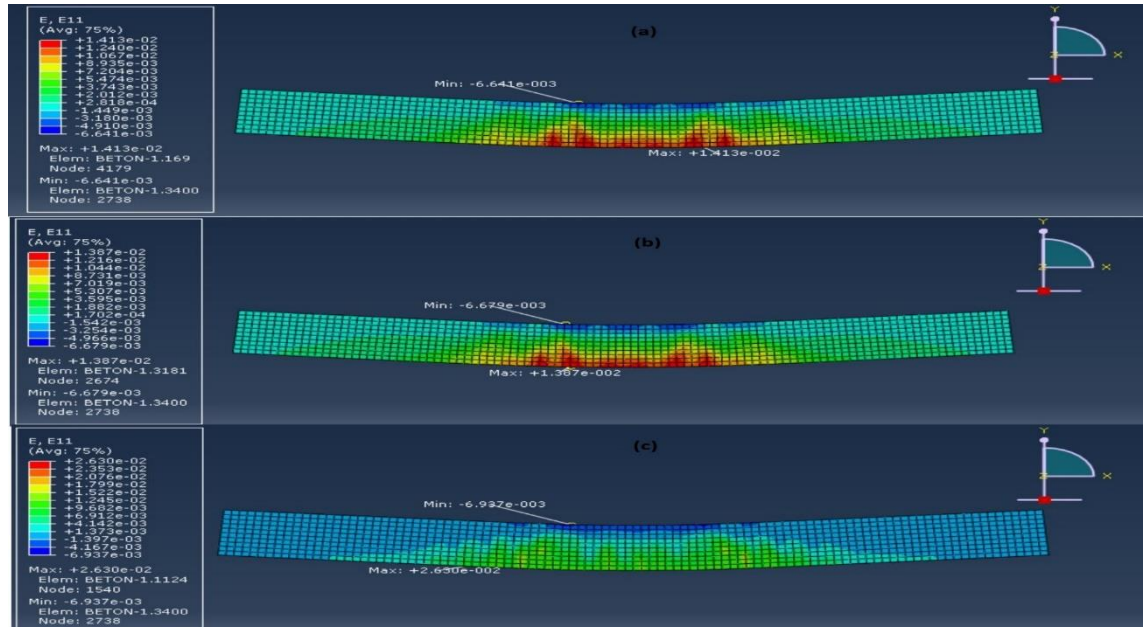
Şekil 4. 34 K20KG00 kirişinde EP1 (a), EP2 (b) ve EP3 (c) yaklaşımları için CFRP'de gerilme dağılımı

Birim Şekil Değişirme Değeri ve Dağılımları

CFRP ile sadece çekme bölgesi güçlendirilen K20KG00 kirişinde beton için elde edilen birim şekil değiştirme değerleri ve dağılımları EPH1 ve EPH2 ve EP1, EP2, EP3 için sırasıyla Şekil 4.35 ve Şekil 4.36'da verilmiştir. EPH1 ve EPH2 için elde edilen maksimum birim şekil değiştirme değerleri yaklaşık olarak sırasıyla 0,0127 ve 0,0196 (mm/mm)'dir. EP1, EP2 ve EP3 yaklaşımları için ise bu değerler sırasıyla 0,0141, 0,0139 ve 0,0263 (mm/mm)'dir.

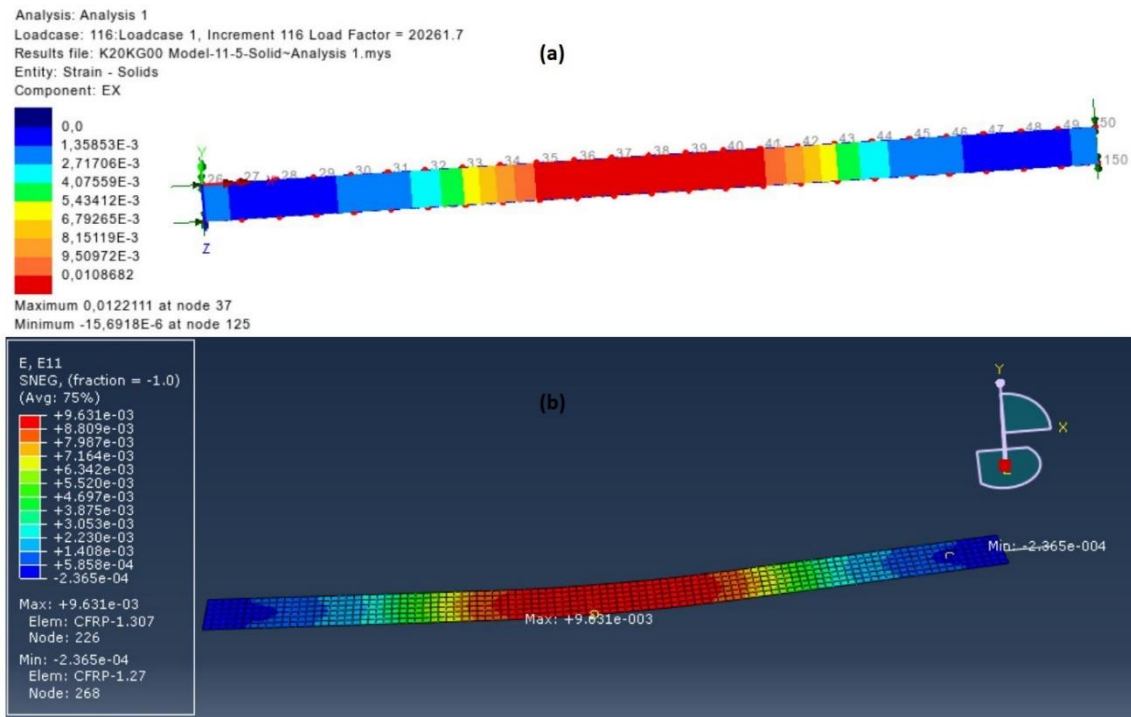


Şekil 4. 35 K20KG00 kirişinde EPH1 (a) ve EPH2 (b) yaklaşımları için betonda birim şekil değiştirme dağılımı



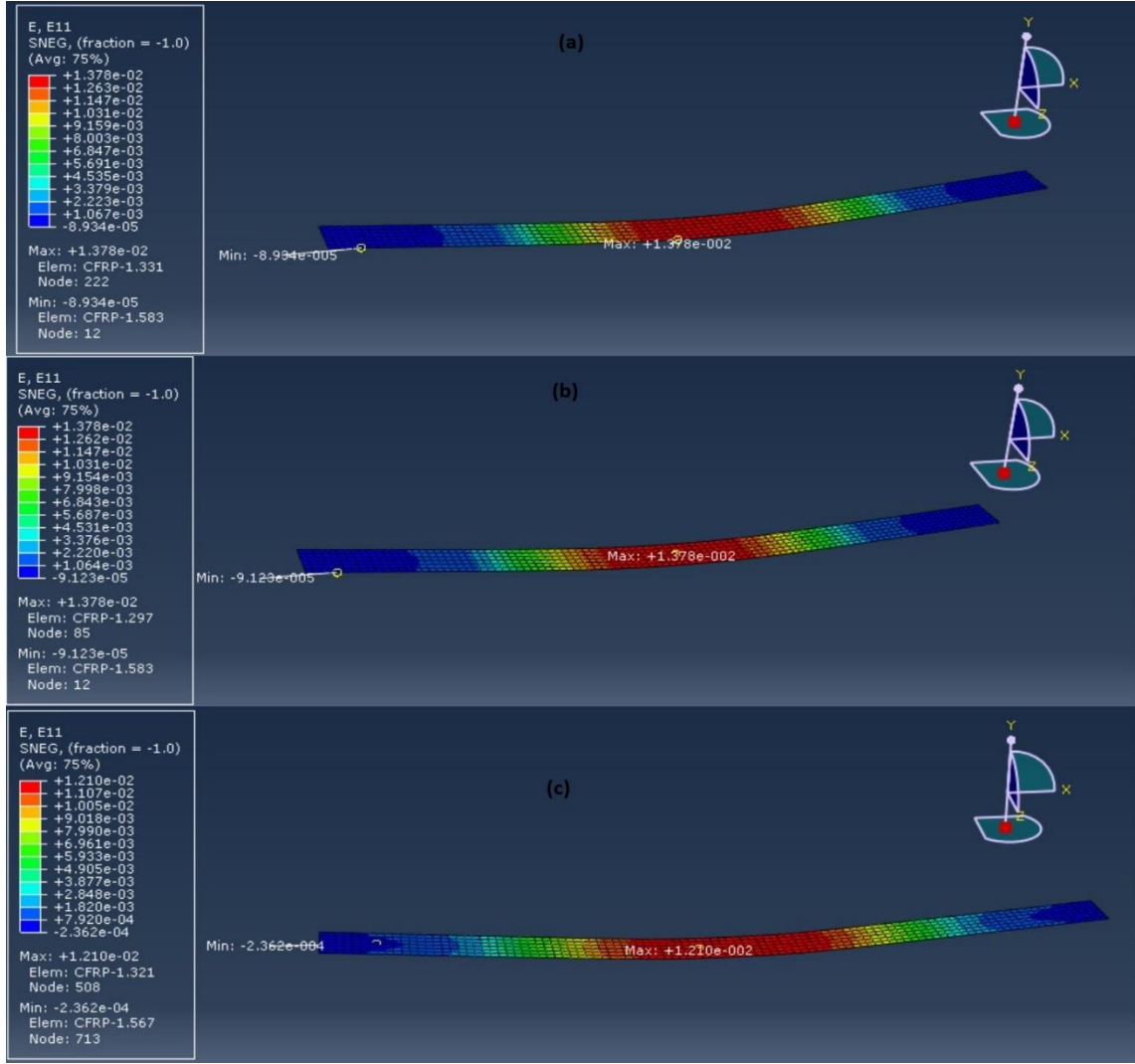
Şekil 4. 36 K20KG00 kirişinde EP1 (a), EP2 (b) ve EP3 (c) yaklaşımları için betonda birim şekil değiştirme dağılımı

Sayısal modellerde betonun yanı sıra CFRP'nin de birim şekil değiştirme değerleri belirlenmiştir. Çizelge 4.1'de mekanik özellikleri verilen CFRP'nin kopma birim şekil değiştirme değeri " ϵ_{rup} " çekme dayanımının elastisite modülüne oranı ile belirlenmiştir ve bu değer yaklaşık olarak 0,0213 mm/mm'dir. Sayısal modellerin hiçbirinde CFRP maksimum birim şekil değiştirme değeri kopma birim şekil değiştirme değerine ulaşamamıştır. EPH1 ve EPH2 yaklaşımlarını esas alan sayısal modeller için CFRP'nin ulaştığı maksimum birim şekil değiştirme değerleri sırasıyla 0,0122 ve 0,0096 (mm/mm)'dir. Şekil 4.37'de bu iki yaklaşım için CFRP 'nin birim şekil değiştirme dağılımı şematik olarak verilmiştir.



Şekil 4. 37 K20KG00 kirişinde EPH1 (a) ve EPH2 (b) yaklaşımları için birim şekil değiştirme dağılımı

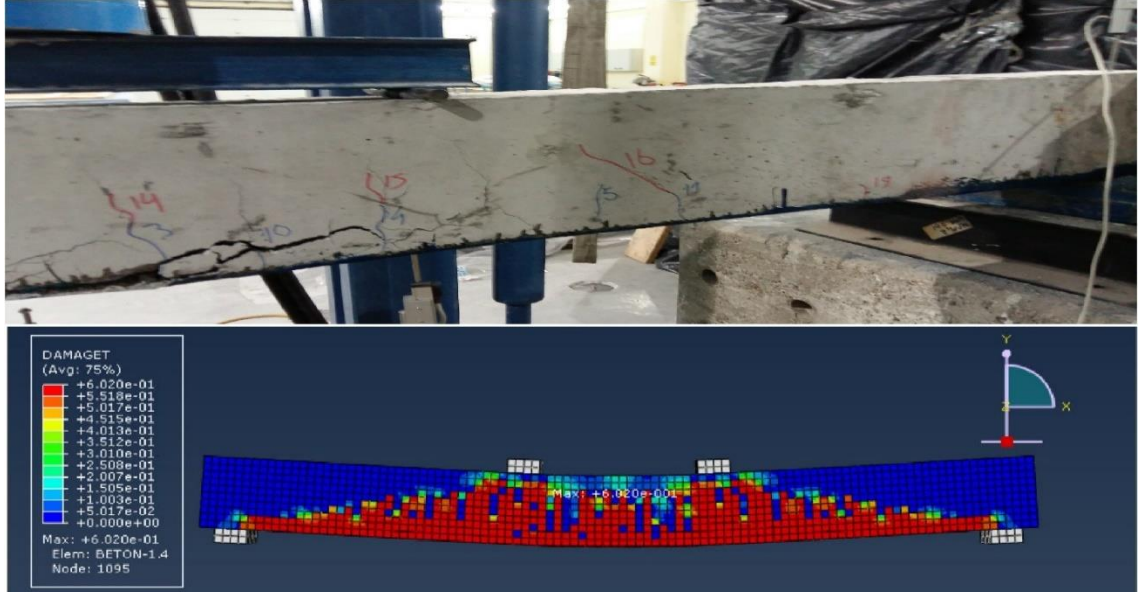
EP1, EP2 ve EP3 yaklaşımlarının kullanıldığı sayısal modellerde ise bu yaklaşımlar için CFRP kumaşta gözlemlenen maksimum birim şekil değiştirme miktarları sırasıyla 0,0138, 0,0138 ve 0,0121 (mm/mm)'dir. Söz konusu yaklaşımlar kullanılarak CFRP için elde edilen birim şekil değiştirme dağılımları Şekil 4.38'de verilmiştir.



Şekil 4. 38 K20KG00 kirişinde EP1 (a), EP2 (b) ve EP3 (c) yaklaşımları için CFRP’de birim şekil değiştirme dağılımı

Hasar Dağılımı

Sadece kiriş alt yüzeyi CFRP ile güçlendirilen K20KG00 kirişi için örnek olması açısından ABAQUS yazılımı ile elde edilen sonuçlara bağlı hasar dağılımı Şekil 4.39’da deney numunesi ile karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Sayısal modele ait elde edilen çatlak gelişimi ve yaklaşık çatlak lokasyonları deneysel sonuçlar ile benzer eğilimlidir.



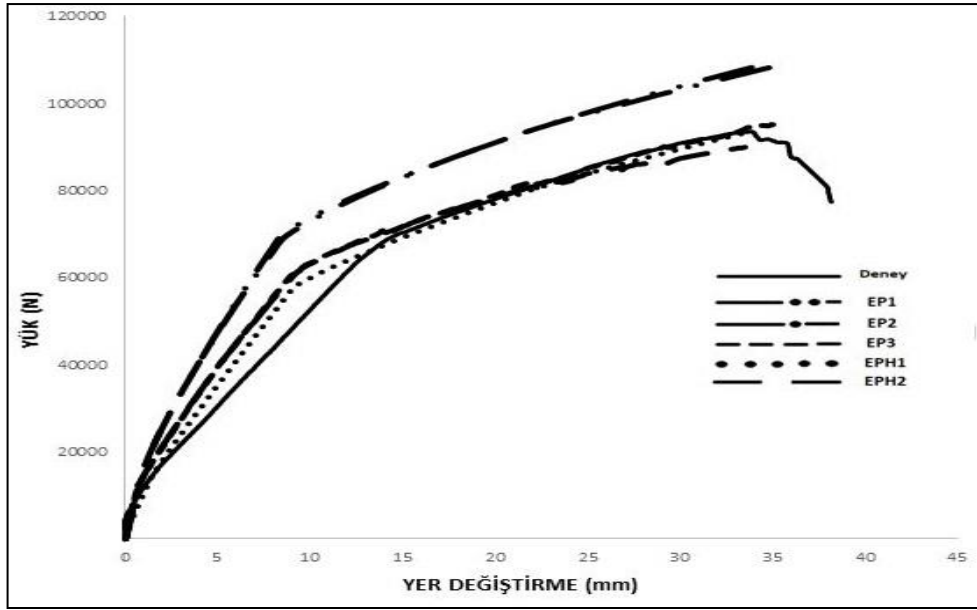
Şekil 4. 39 K20KG00 kirişinde çekme hasarlarının dağılımı

4.3.3 K20KG50 Kirişi

Bu betonarme kirişte güçlendirme malzemesi kirişin alt yüzeyi ile birlikte her iki yan yüzeyini 50 mm yükseklikte içerisine alacak şekilde sargılanmıştır. 5 farklı yaklaşım dikkate alınarak (EPH1, EPH2, EP1, EP2 ve EP3) sayısal model sonuçları belirlenmiş ve deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Yük – Yer Değiştirme İlişkisi

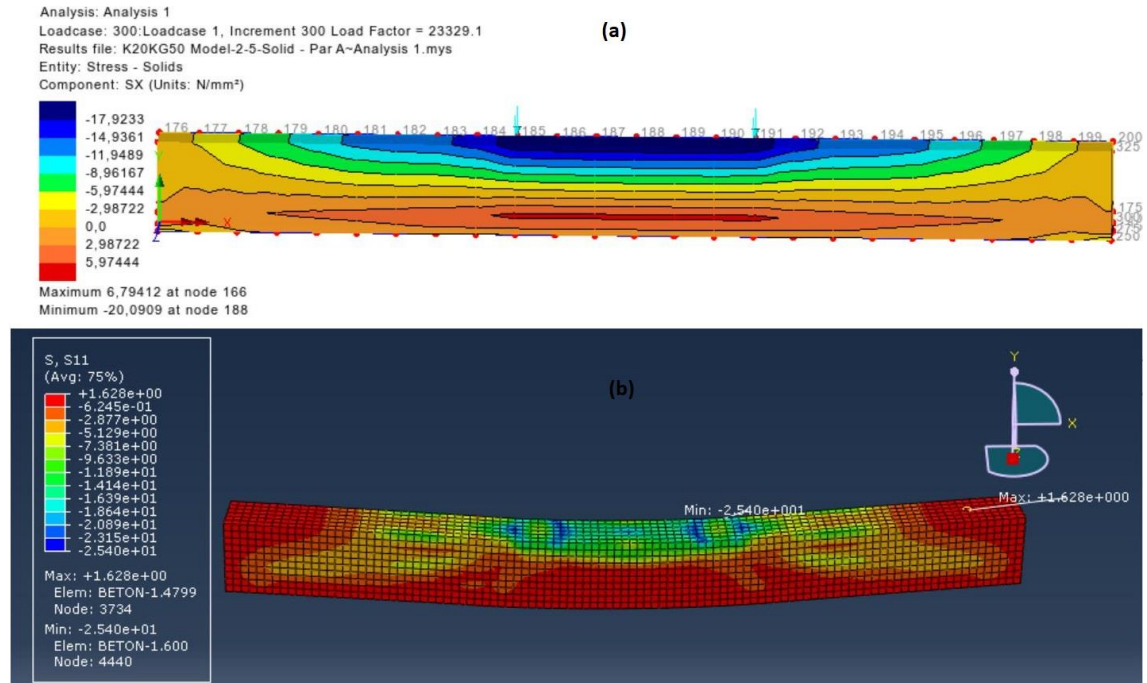
Deney çalışmasında göçme durumu için yaklaşık olarak 77,37 kN'luk yük değeri tespit edilen bu kirişte, açıklık ortasındaki maksimum yer değiştirme miktarı 38,20 mm olarak belirlenmiştir. EPH2'deki analiz sonuçları, Çizelge 4.7'deki kırılma enerjilerinin kıyaslanması ile belirlenen analiz sonlandırma adımına karşı gelen yer değiştirme değeri için belirlenmiştir. EP1, EP2 ve EP3 yaklaşımlarının kullanıldığı sayısal modellerde, analizler deney numunesinin maksimum yük değerine karşı gelen yer değiştirme miktarına kadar devam ettirilmiştir. Kirişin sayısal model ve deney numunesine ait yük – yer değiştirme ilişkisi Şekil 4.40'ta şematik olarak verilmiştir. Sayısal analizler sonucunda maksimum yük taşıma kapasitesi için deney sonucuna en yakın olacak şekilde en başarılı sonuç EPH1 yaklaşımı ile elde edilmiştir. EPH1'de maksimum yük değeri ve bu değere karşı gelen yer değiştirme deney sonucuna kıyasla sırasıyla % 0,12 ve % 0,50 oranlarında daha düşük olarak belirlenmiştir (Çizelge 4.11).



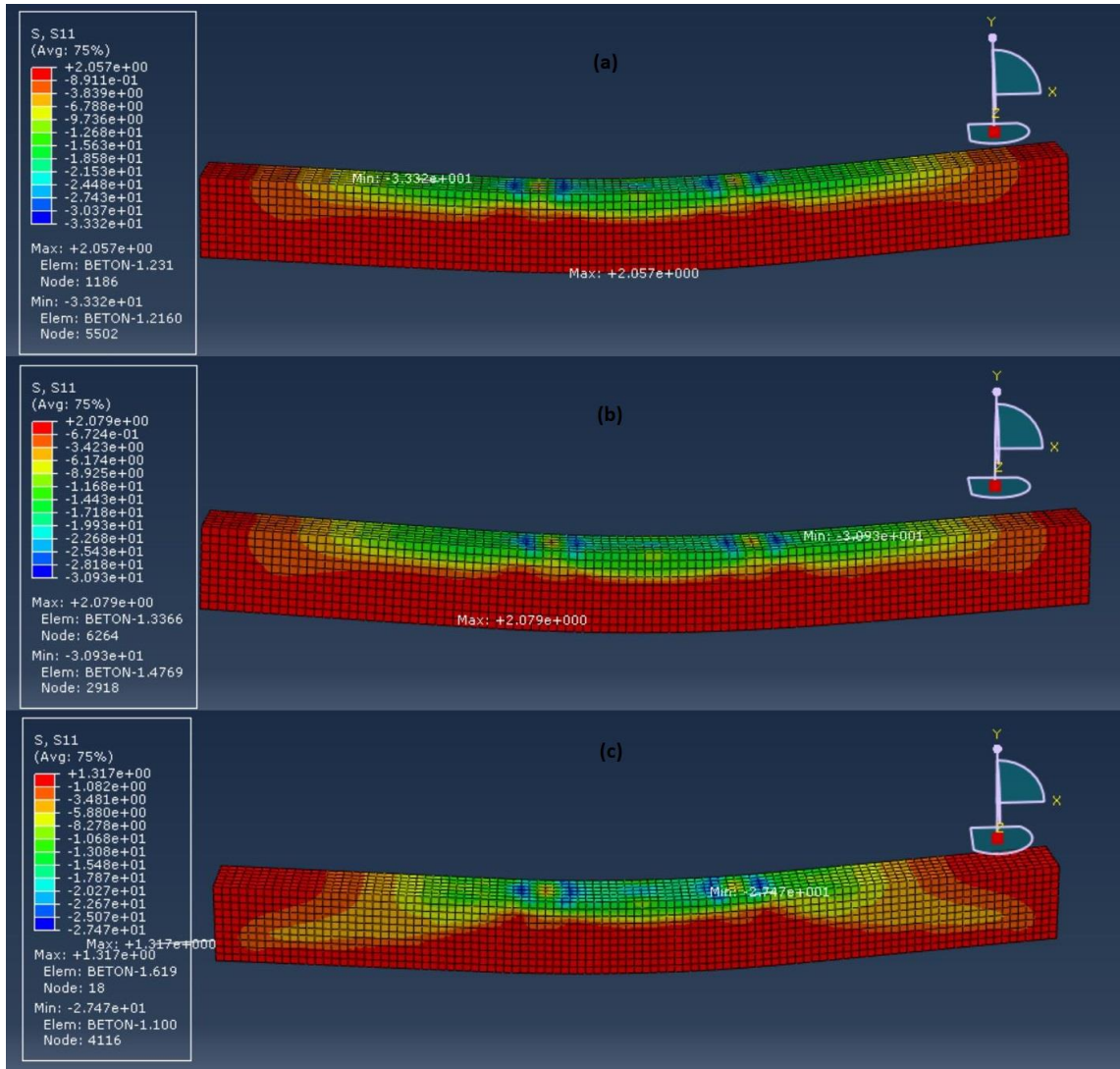
Şekil 4. 40 K20KG50 için yük – yer değiştirme ilişkisi

Gerilme Dağılımları

CFRP ile eğilme bölgesi ve kiriş yan yüzeyleri 50 mm yüksekliğinde güçlendirilen bu kiriş için gerilme dağılımları belirlenmiştir. Analizler sonrasında betondaki gerilme dağılımları EPH1 ve EPH2 için Şekil 4.41’de, diğer üç yaklaşım olan EP1, EP2 ve EP3 için ise Şekil 4.42’de verilmiştir.

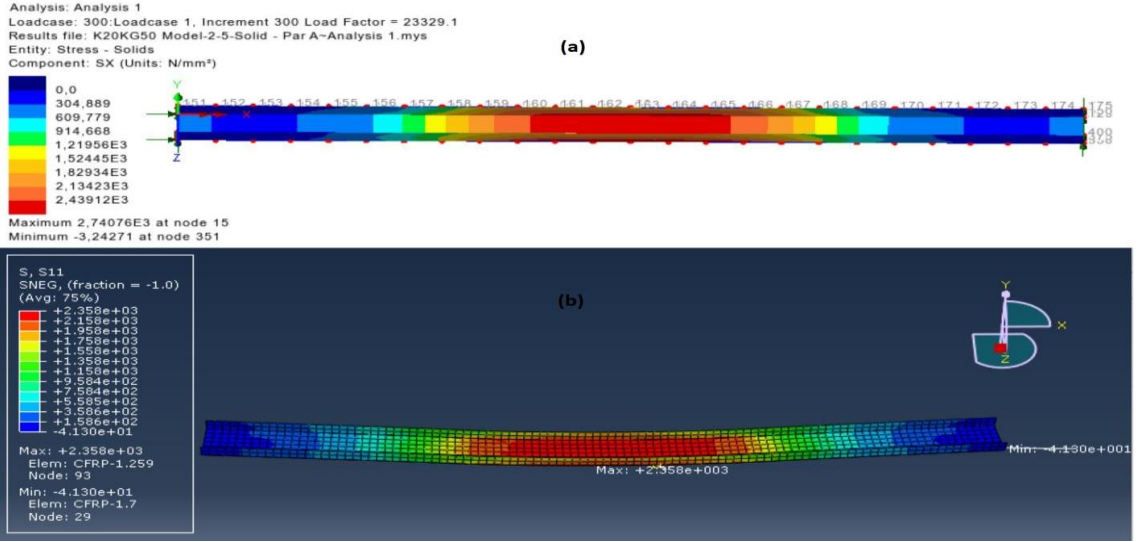


Şekil 4. 41 K20KG50 kirişinde EPH1 (a) ve EPH2 (b) yaklaşımları için betonda gerilme dağılımı

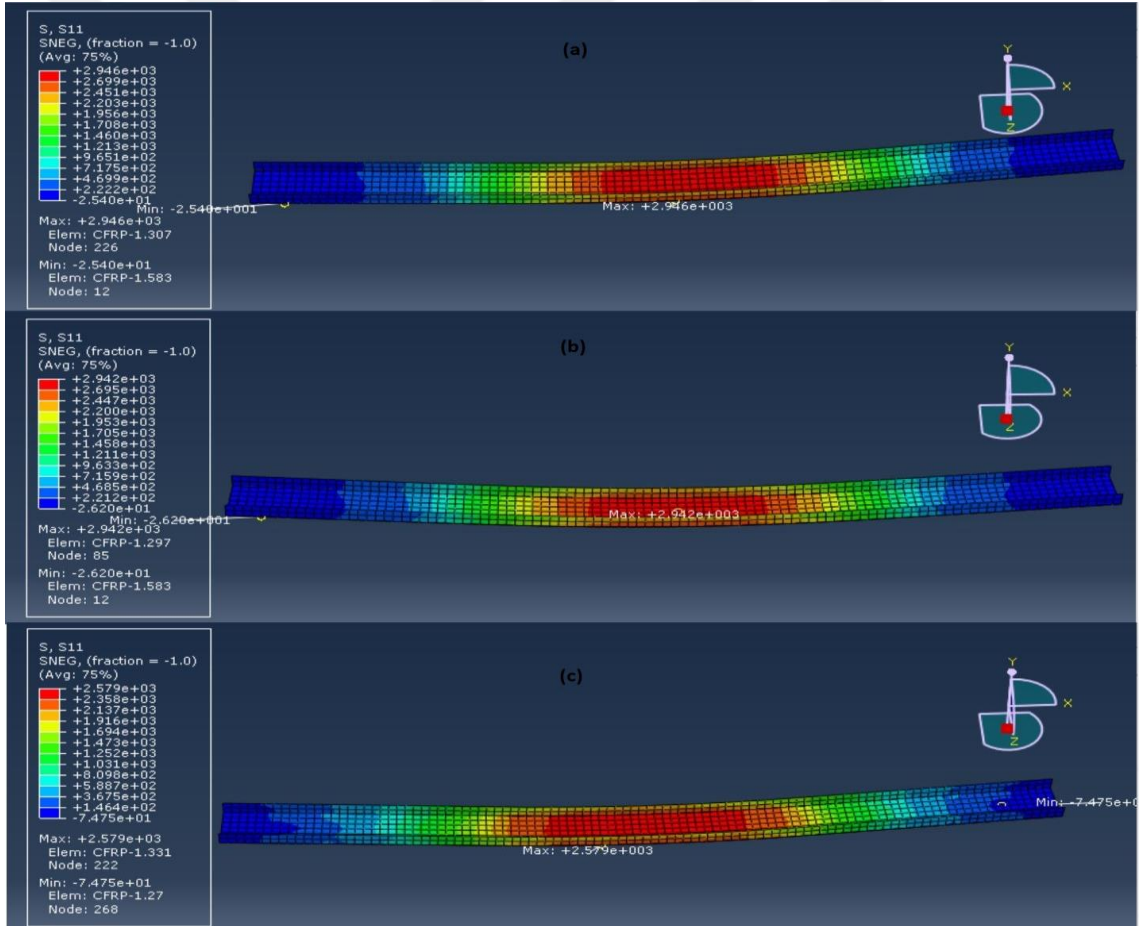


Şekil 4. 42 K20KG50 kirişinde EP1 (a), EP2 (b) ve EP3 (c) yaklaşımları için betonda gerilme dağılımı

Sayısal analizlerde CFRP güçlendirme malzemesi için de gerilme dağılımları belirlenmiştir. EPH1 ve EPH2 yaklaşımlarının kullanıldığı modellerde CFRP kumaşta belirlenen maksimum gerilme değerleri sırasıyla 2741 ve 2358 MPa olarak belirlenmiştir. Bu yaklaşımlar için CFRP’de oluşan gerilme dağılımları Şekil 4.43’te verilmiştir. EP1, EP2 ve EP3 yaklaşımları için gerçekleştirilen analizlerde ise CFRP için belirlenen maksimum gerilme değerleri sırasıyla 2946, 2942 ve 2579 MPa olarak belirlenmiş ve Şekil 4.44’de gerilme dağılımları şematik olarak verilmiştir.



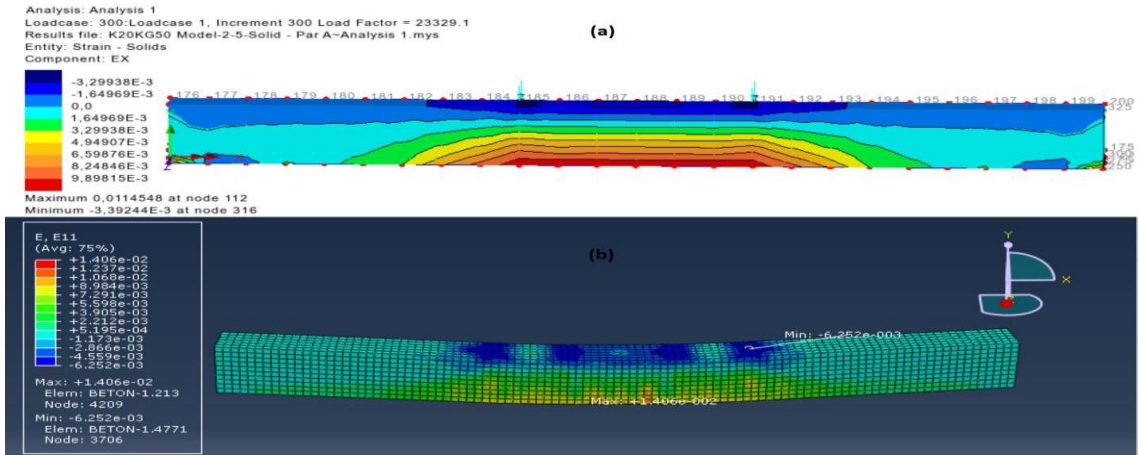
Şekil 4. 43 K20KG50 kirişinde EPH1 (a) ve EPH2 (b) yaklaşımları için CFRP’de gerilme dağılımı



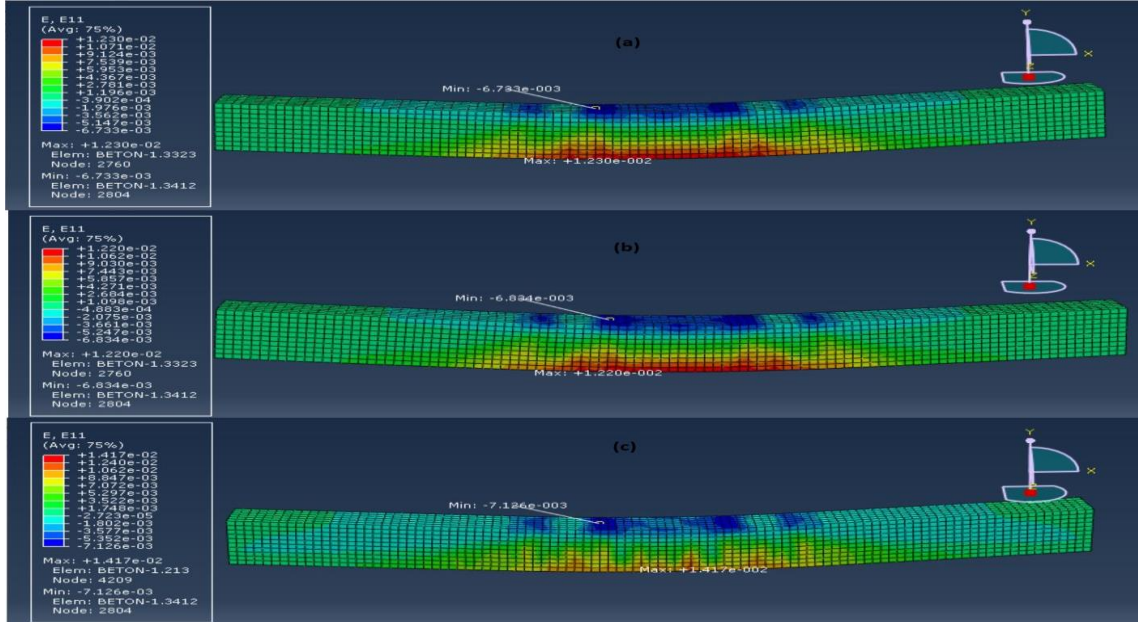
Şekil 4. 44 K20KG50 kirişinde EP1 (a), EP2 (b) ve EP3 (c) yaklaşımları için CFRP’de gerilme dağılımı

Birim Şekil Değişirme Değeri ve Dağılımları

CFRP kullanılarak eğilme bölgesi ile birlikte 50 mm yükseklikte yan yüzeyleri sargılanan K20KG50 kirişinde beton için elde edilen birim şekil değiştirme değerleri ve dağılımları elastoplastik hasar yaklaşımları olan EPH1 ve EPH2 ve EP1, EP2 ve EP3 için sırasıyla Şekil 4.45 ve Şekil 4.46'da verilmiştir. EPH1 ve EPH2 için elde edilen maksimum birim şekil değiştirme değerleri yaklaşık olarak sırasıyla 0,0115 ve 0,0141 (mm/mm)'dir. EP1, EP2 ve EP3 yaklaşımları için ise bu değerler sırasıyla 0,0123, 0,0122 ve 0,0142 (mm/mm) olarak belirlenmiştir.

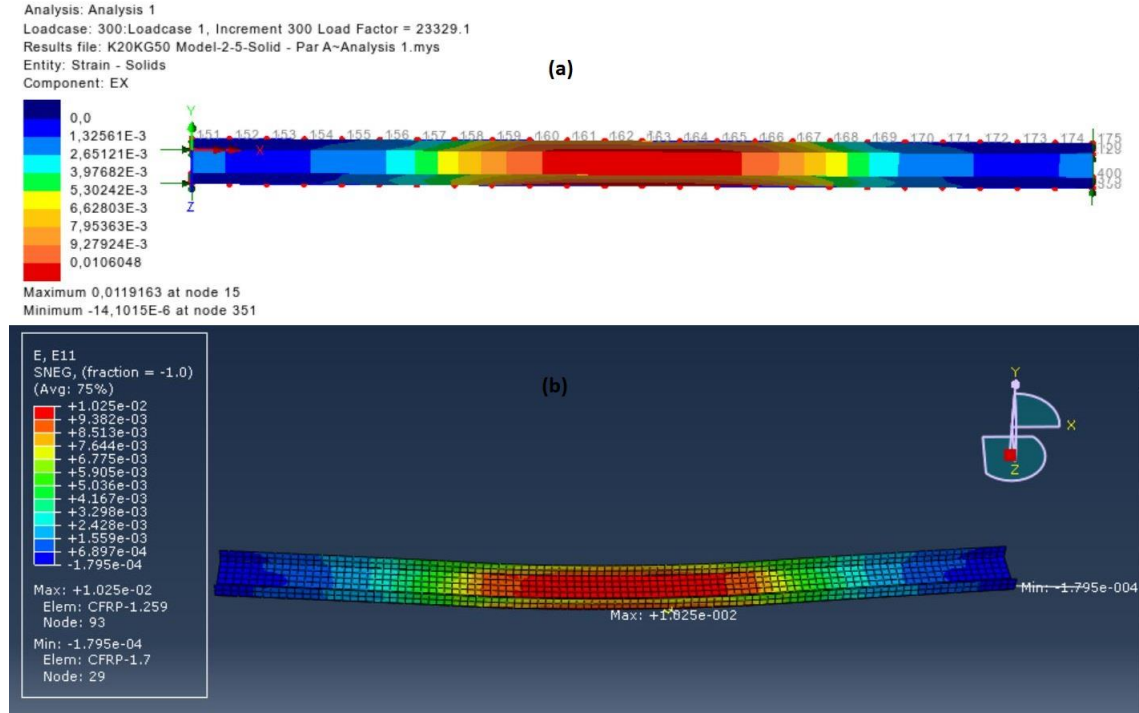


Şekil 4. 45 K20KG50 kirişinde EPH1 (a) ve EPH2 (a) yaklaşımları için betonda birim şekil değiştirme dağılımı



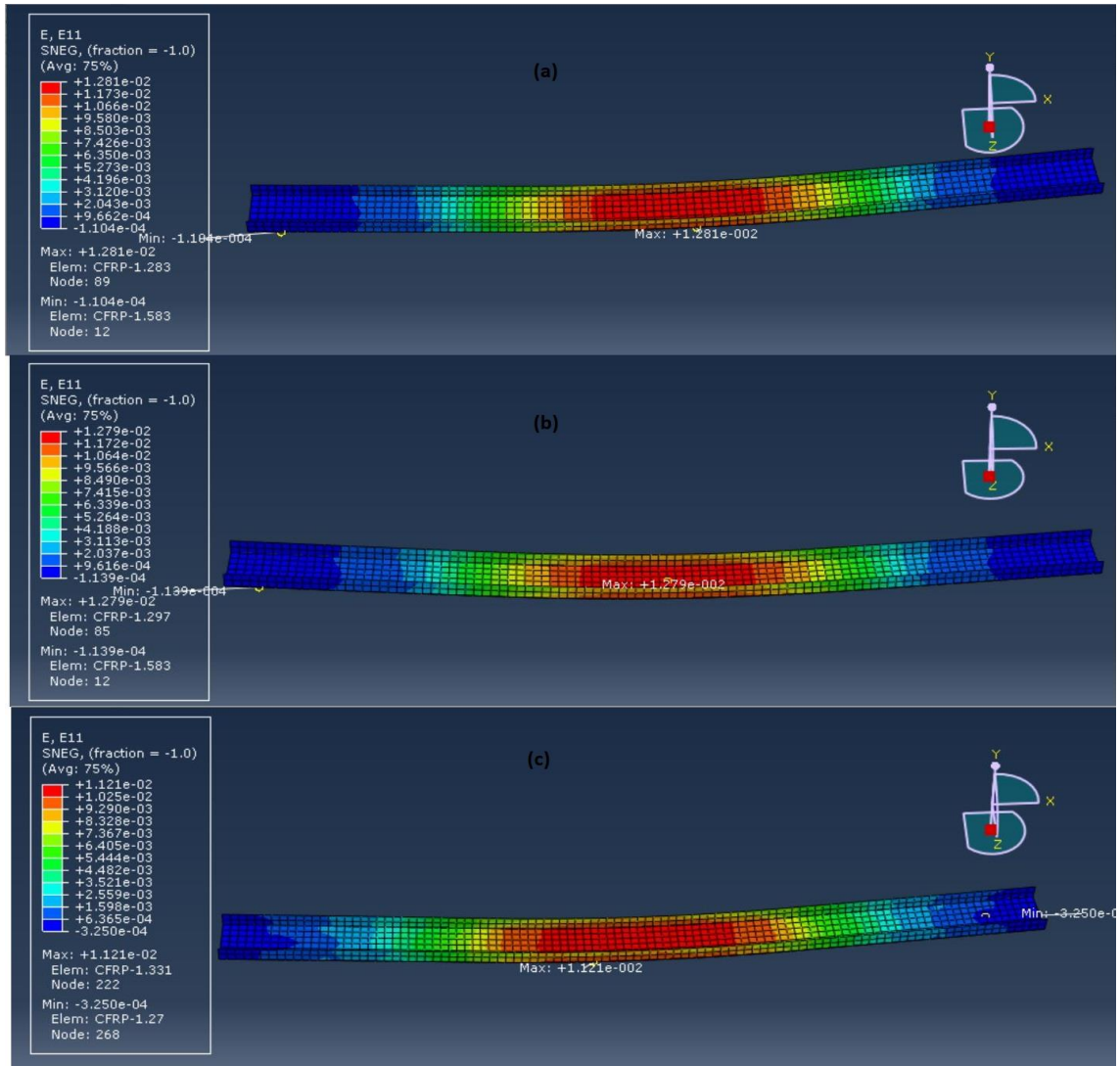
Şekil 4. 46 K20KG50 kirişinde EP1 (a), EP2 (b) ve EP3 (c) yaklaşımları için betonda birim şekil değiştirme dağılımı

Analizler sonucunda CFRP kopma birim şekil değıştirme değeri ne “ ϵ_{rup} ” (0,0213 mm/mm) ulaşmamıştır. EPH1 ve EPH2 yaklaşımlarını dikkate alan sayısal modeller için CFRP’nin ulaştığı maksimum birim şekil değıştirme değeri sırasıyla 0,0119 ve 0,0103 (mm/mm)’dir. Şekil 4.47’de bu iki yaklaşım için CFRP ‘nin birim şekil değıştirme dağılımı şematik olarak verilmiştir.



Şekil 4. 47 K20KG50 kirişinde EPH1 (a) ve EPH2 (b) yaklaşımları için CFRP’de birim şekil değıştirme dağılımı

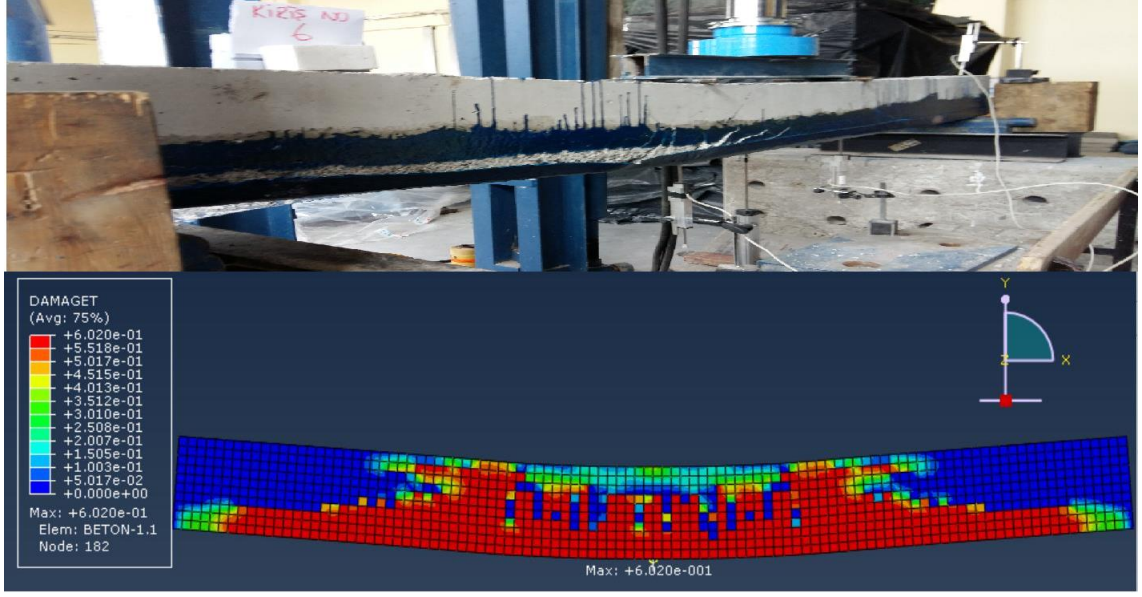
EP1, EP2 ve EP3 yaklaşımları için CFRP’de belirlenen maksimum birim şekil değıştirme değeri ise sırasıyla 0,0128, 0,0127 ve 0,0112 (mm/mm)’dir. Söz konusu yaklaşımlar kullanılarak CFRP için elde edilen birim şekil değıştirme dağılımları Şekil 4.48’de verilmiştir.



Şekil 4. 48 K20KG50 kirişinde EP1 (a), EP2 (b) ve EP3 (c) yaklaşımları için CFRP’de birim şekil değiştirme dağılımı

Hasar Dağılımı

Kiriş alt yüzeyi ile birlikte 50 mm yükseklikte yan yüzeyleri CFRP ile güçlendirilen K20KG50 kirişi için örnek olması açısından ABAQUS yazılımı ile elde edilen sonuçlara bağlı hasar dağılımı Şekil 4.49’da deney numunesi ile karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Sayısal modele ait elde edilen çatlak gelişimi ve yaklaşık çatlak lokasyonları deneysel sonuçlar ile benzer eğilimlidir.



Şekil 4. 49 K20KG50 kirişi için çekme hasarlarının dağılımı

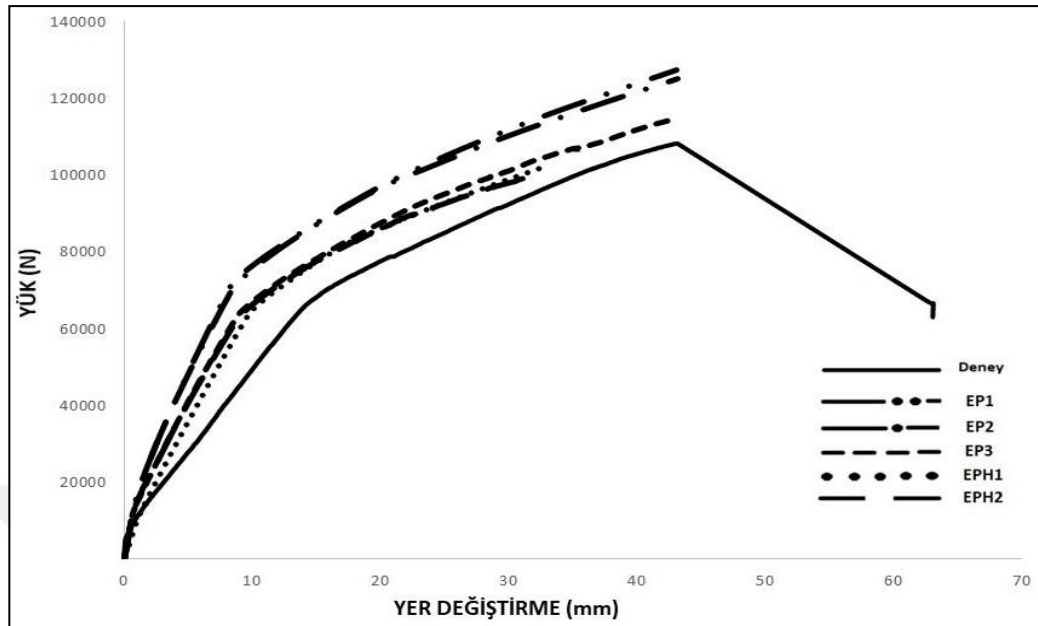
4.3.4 K20KGU Kirişi

Örtü betonu kalınlığı 20 mm olan birinci grup numunelerin son kirişi olan K20KGU kirişinde güçlendirme, kiriş alt yüzeyi ile birlikte yan yüzeylerde 175 mm yükseklikte olacak şekilde yapılmıştır. Sanal malzeme modeli ve CDP bünyesel malzeme modeli kullanılarak oluşturulan sayısal modellerin sonuçları, deney sonuçları ve birbirleri arasında karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

Yük – Yer Değiştirme İlişkisi

Deney çalışmasında göçme durumunda 63,3 kN’luk yük tespit edilen bu kirişte, açıklık ortasındaki maksimum düşey yer değiştirme miktarı 63,07 mm olarak belirlenmiştir. EPH2’deki analiz sonuçları, Çizelge 4.7 ‘deki kırılma enerjilerinin kıyaslanması ile belirlenen analiz sonlandırma adımına karşı gelen yer değiştirme değeri için belirlenmiştir. EP1, EP2 ve EP3 yaklaşımlarının kullanıldığı sayısal modellerde, analizler deney numunesinin maksimum yük değerine karşı gelen yer değiştirme miktarına kadar devam ettirilmiştir. Kirişin sayısal modelleri ve deney numunesine ait yük – yer değiştirme ilişkisi Şekil 4.50’de şematik olarak verilmiştir. Sayısal analizler sonucunda maksimum yük taşıma kapasitesi açısından deney sonucuna göre en başarılı sonuç EP3 yaklaşımı ile elde edilmiştir. EP3’te maksimum yük değeri ve bu değere karşı gelen yer

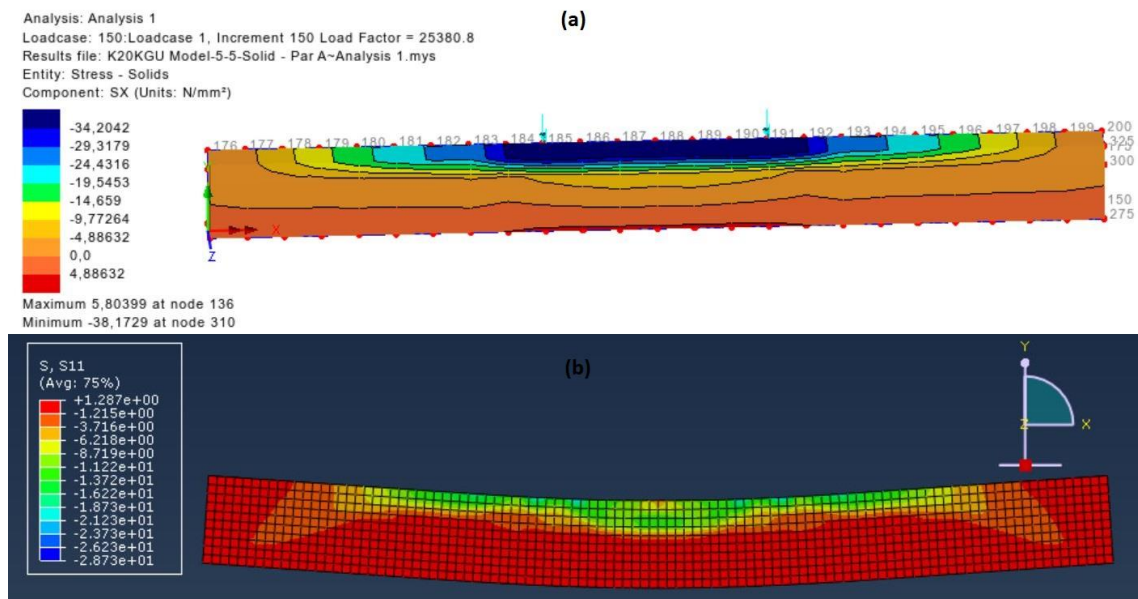
değiştirme değerleri deney sonucuna göre sırasıyla % 6,02 ve % 0,12 oranlarında daha fazla olarak belirlenmiştir (Çizelge 4.11).



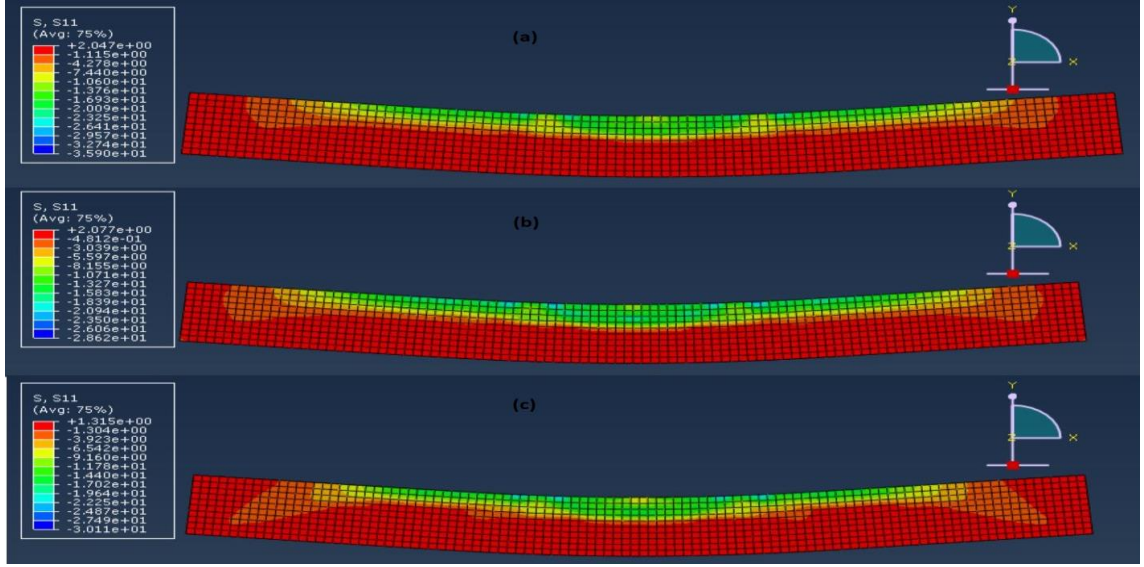
Şekil 4. 50 K20KGU kirişi için yük – yer değiştirme ilişkisi

Gerilme Dağılımları

Sayısal modellerin doğrusal olmayan analizleri sonrasında betondaki gerilme dağılımları EPH1 ve EPH2 için Şekil 4.51’de, diğer üç yaklaşım olan EP1, EP2 ve EP3 için ise Şekil 4.52’de verilmiştir.

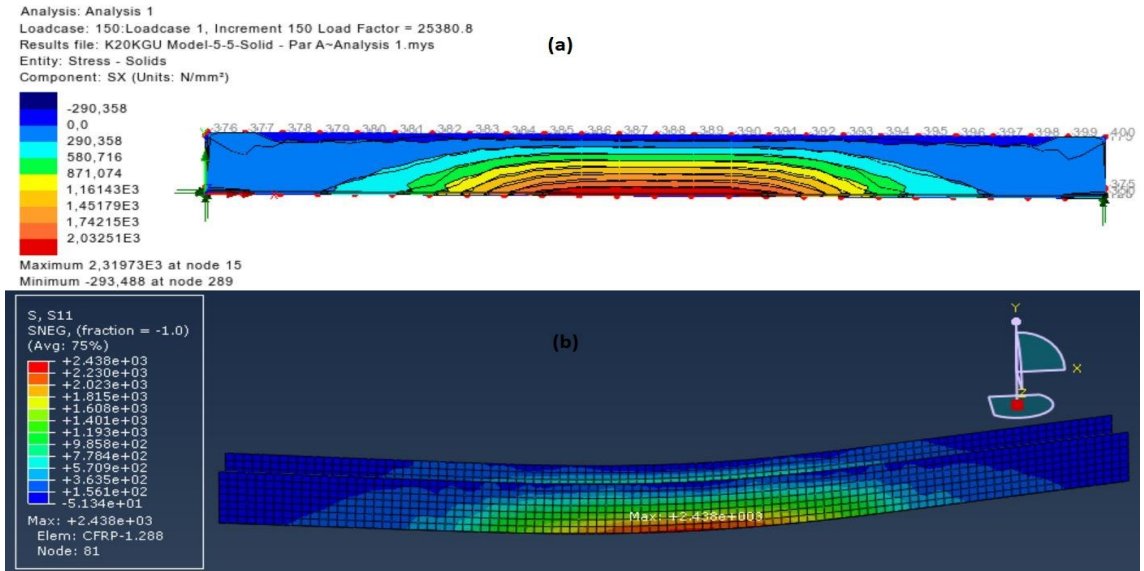


Şekil 4. 51 K20KGU kirişinde EPH1 (a) ve EPH2 (b) yaklaşımları için betonda gerilme dağılımı

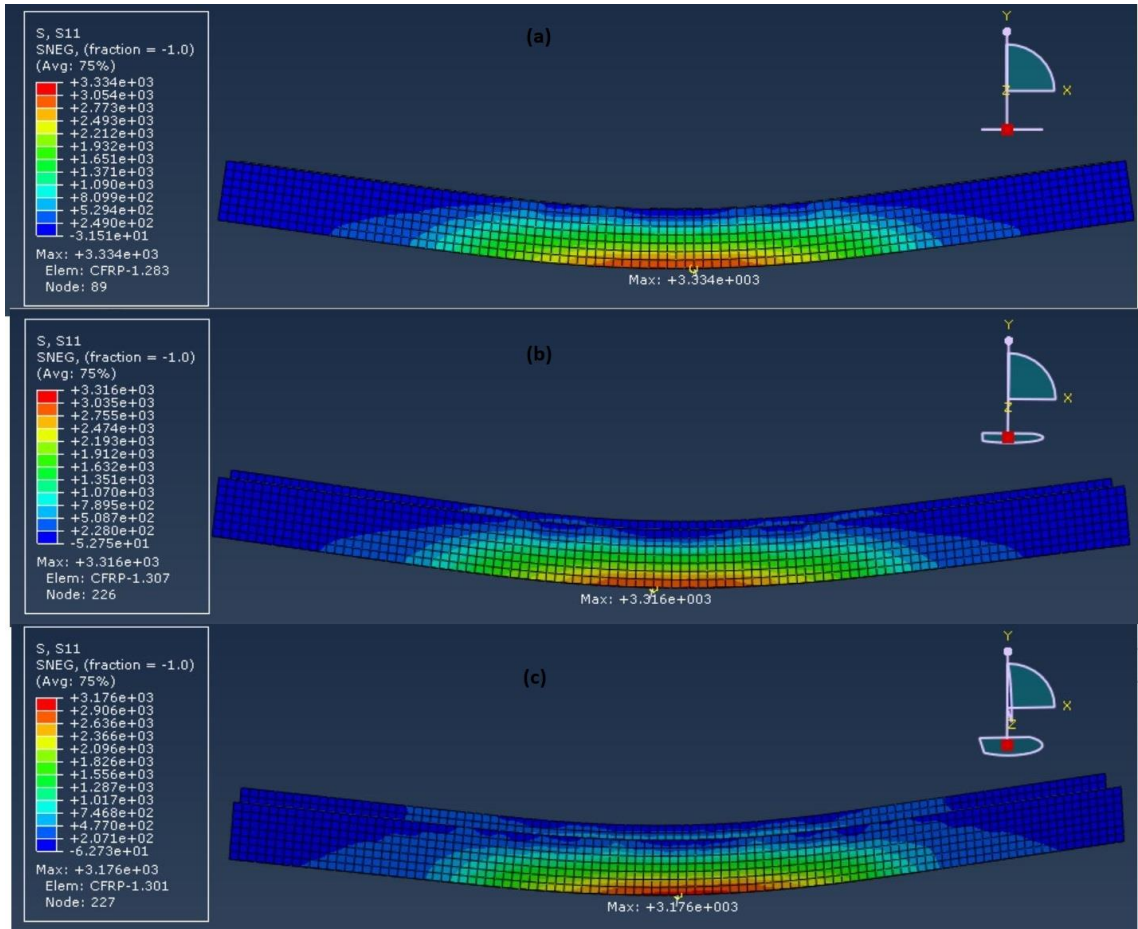


Şekil 4. 52 K20KGU kirişinde EP1 (a), EP2 (b) ve EP3 (c) yaklaşımları için betonda gerilme dağılımı

EPH1 ve EPH2 yaklaşımlarının kullanıldığı modellerde CFRP kumaşa belirlenen maksimum gerilme değerleri sırasıyla 2320 ve 2438 MPa olarak belirlenmiştir. Bu yaklaşımlar ile CFRP’de belirlenen gerilme dağılımları Şekil 4.53’te verilmiştir. EP1, EP2 ve EP3 yaklaşımları için gerçekleştirilen analizlerde ise karbon lifli polimer kumaşa belirlenen maksimum gerilme miktarları sırasıyla 3334, 3316 ve 3176 MPa olarak belirlenmiş ve Şekil 4.54’te gerilme dağılımları şematik olarak verilmiştir.



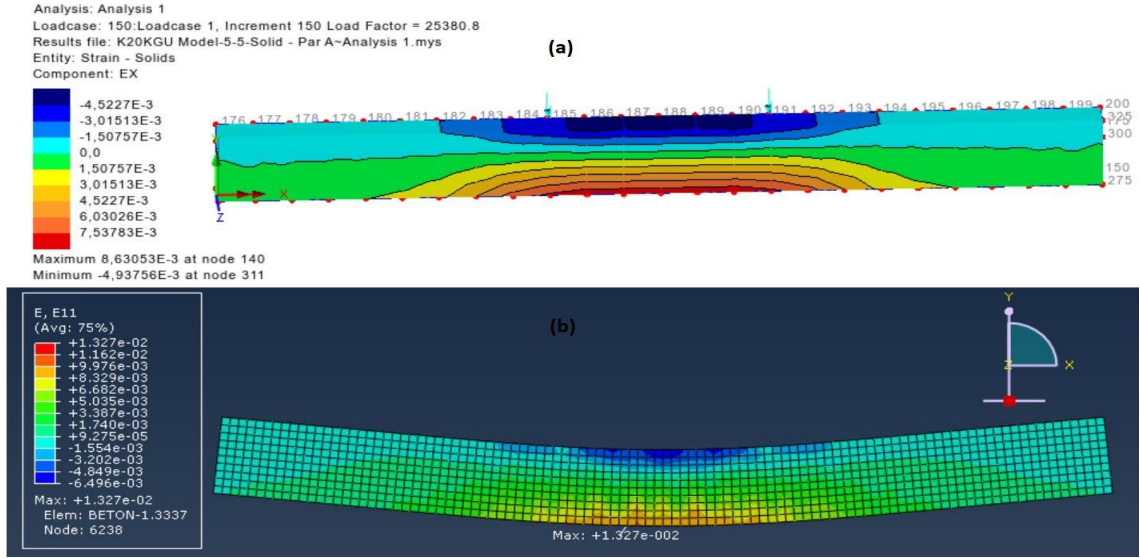
Şekil 4. 53 K20KGU kirişinde EPH1 (a) ve EPH2 (b) yaklaşımları için CFRP’de gerilme dağılımı



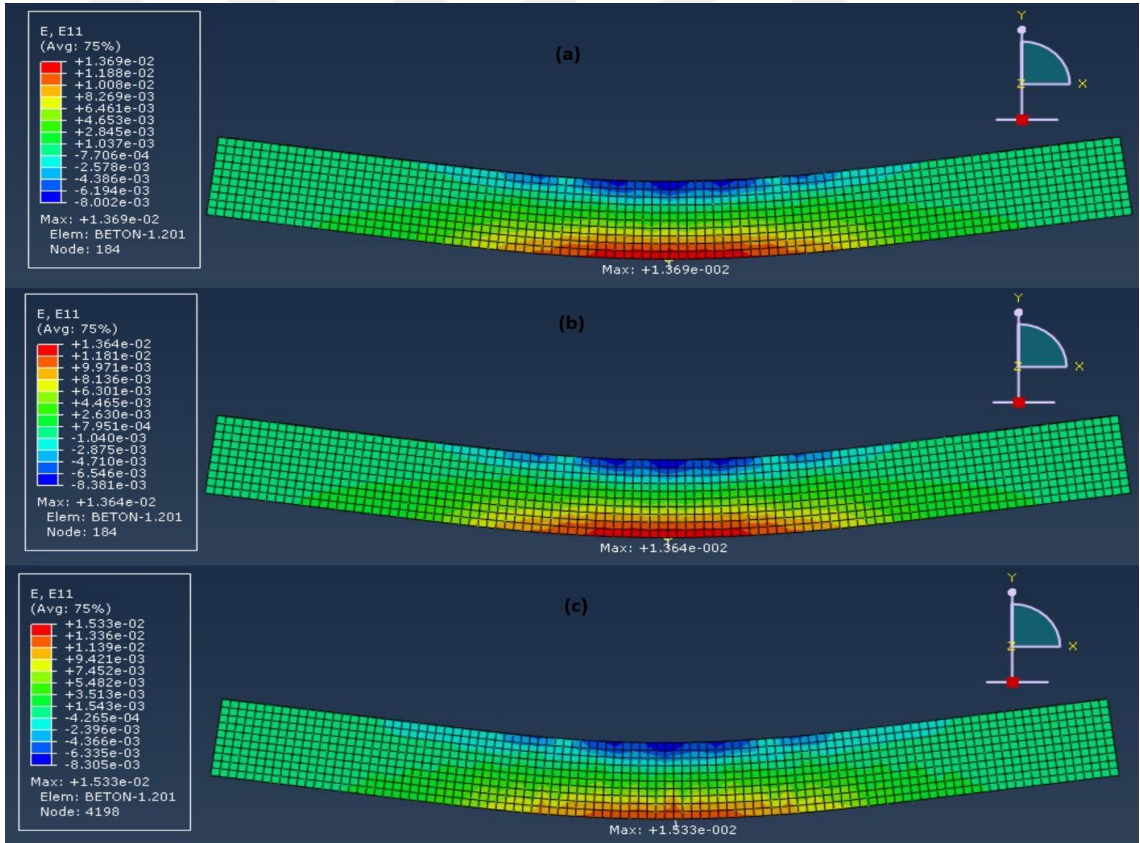
Şekil 4. 54 K20KGU kirişinde EP1 (a), EP2 (b) ve EP3 (c) yaklaşımları için CFRP’de gerilme dağılımı

Birim Şekil Değiştirme Değeri ve Dağılımları

K20KGU kirişinde beton için elde edilen birim şekil değiştirme değeri ve dağılımları EPH1, EPH2 ve EP1, EP2, EP3 için sırasıyla Şekil 4.55 ve Şekil 4.56’da verilmiştir. EPH1 ve EPH2 için elde edilen maksimum birim şekil değiştirme değerleri yaklaşık olarak sırasıyla 0,0086 ve 0,0133 (mm/mm)’dir. EP1, EP2 ve EP3 yaklaşımları için ise bu değerler sırasıyla 0,0137, 0,0136 ve 0,0153 (mm/mm) olarak belirlenmiştir.

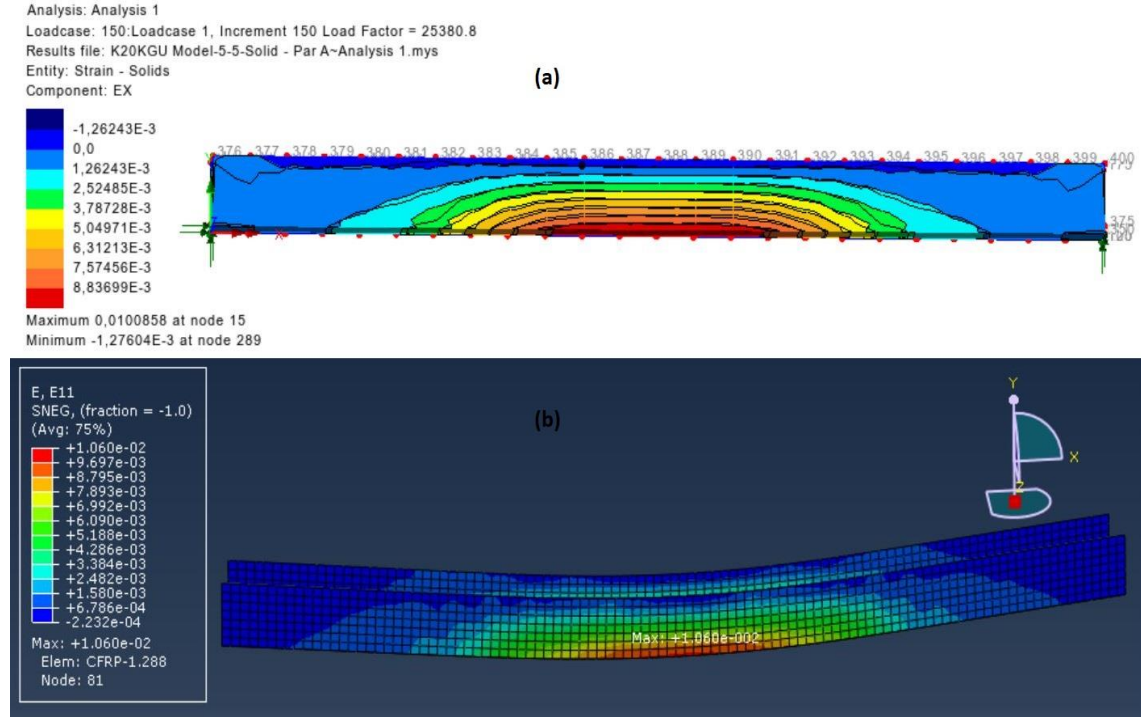


Şekil 4. 55 K20KGU kirişinde EPH1 (a) ve EPH2 (b) yaklaşımları için betonda birim şekil değiştirme dağılımı



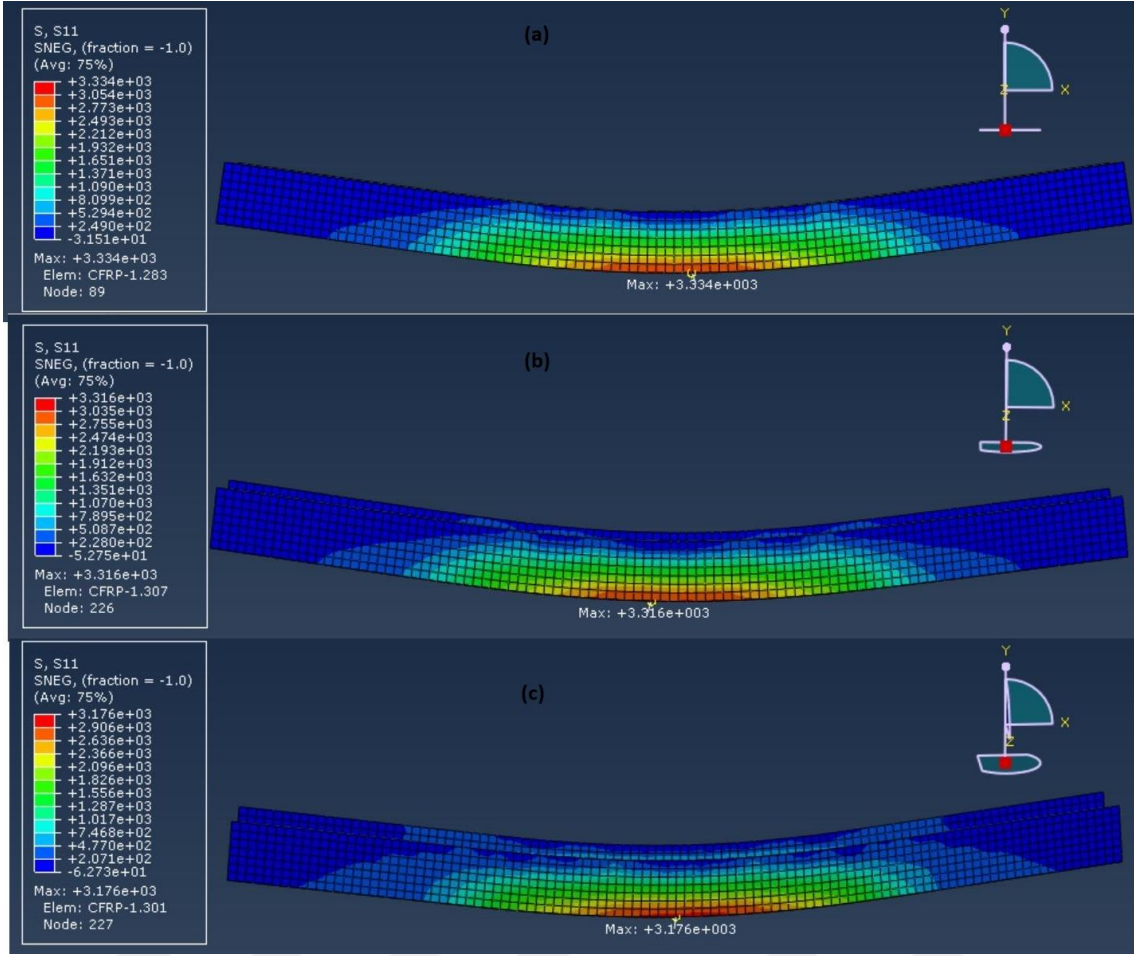
Şekil 4. 56 K20KGU kirişinde EP1 (a), EP2 (b) ve EP3 (c) yaklaşımları için betonda birim şekil değiştirme dağılımı

Analizler sonucunda CFRP’de kopma birim şekil değiştirme değerine “ ϵ_{rup} ” (0,0213 mm/mm) ulaşmamıştır. EPH1 ve EPH2 yaklaşımlarını esas alan sayısal modeller için CFRP nin maksimum birim şekil değiştirme değerleri sırasıyla 0,0100 ve 0,0106 (mm/mm)’dir. Şekil 4.57’de bu iki yaklaşım için CFRP’nin birim şekil değiştirme dağılımı şematik olarak verilmiştir.



Şekil 4. 57 K20KGU kirişinde EPH1 (a) ve EPH2 (b) yaklaşımları için CFRP’de birim şekil değiştirme dağılımı

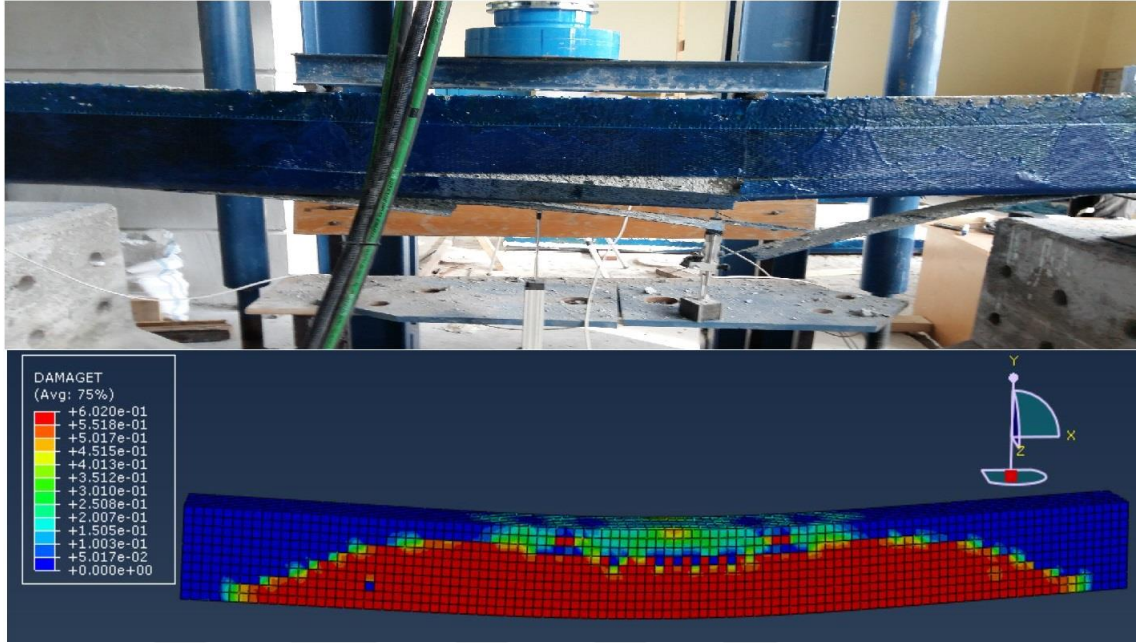
EP1, EP2 ve EP3 yaklaşımları için CFRP’de belirlenen maksimum birim şekil değiştirme değerleri ise sırasıyla 0,0145, 0,0144 ve 0,0138 (mm/mm)’dir. Söz konusu yaklaşımlar kullanılarak CFRP için elde edilen birim şekil değiştirme dağılımları Şekil 4.58’de verilmiştir.



Şekil 4. 58 K20KGU kirişinde EP1 (a), EP2 (b) ve EP3 (c) yaklaşımları için CFRP’de birim şekil değiştirme dağılımı

Hasar Dağılımı

Birinci grup numunelerin son kirişi olan K20KGU kirişinde örnek olması açısından ABAQUS yazılımı ile elde edilen sonuçlara bağlı hasar dağılımı Şekil 4.59’da deney numunesi ile karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Sayısal modele ait elde edilen çatlak gelişimi ve yaklaşık çatlak lokasyonları deneysel sonuçlar ile benzer eğilimlidir.



Şekil 4. 59 K20KGU kirişi için çekme hasarlarının dağılımı

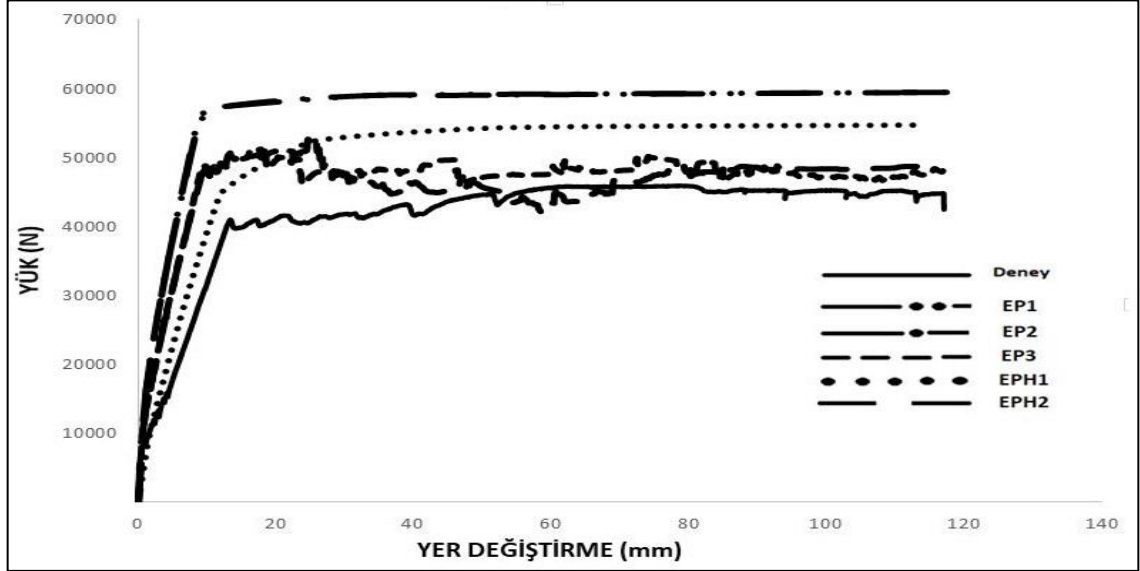
4.3.5 K40R Kirişi

İkinci grup numuneler için kontrol numunesi olarak kullanılan ve 40 mm örtü betonu kalınlığına sahip olan bu betonarme kirişte oluşturulan sayısal modeller yardımıyla yük – yer değiştirme ilişkileri belirlenmiş ve deney sonucu ile karşılaştırılmıştır. Aynı zamanda sayısal modeller ile gerçekleştirilen doğrusal olmayan analizler sonrasında kirişe ait gerilme, birim şekil değiştirme ve hasar dağılımları belirlenmiştir.

Yük – Yer Değiştirme İlişkisi

Deney çalışmasında göçme durumu için 42,39 kN'luk yük değeri tespit edilmiş olan bu kirişte, açıklık ortasındaki maksimum düşey yer değiştirme miktarı 117,13 mm olarak belirlenmiştir. EPH2'deki analiz sonuçları, Çizelge 4.7'deki kırılma enerjilerinin kıyaslanması ile belirlenen analiz sonlandırma adımı karşı gelen yer değiştirme değeri için belirlenmiştir. EP1, EP2 ve EP3 yaklaşımlarının kullanıldığı sayısal modellerde, analizler deney numunesinin maksimum yer değiştirme miktarına kadar devam ettirilmiştir. Kirişin sayısal modelleri ve deney numunesine ait yük – yer değiştirme ilişkisi Şekil 4.60'da şematik olarak verilmiştir. Sayısal analizler sonucunda maksimum

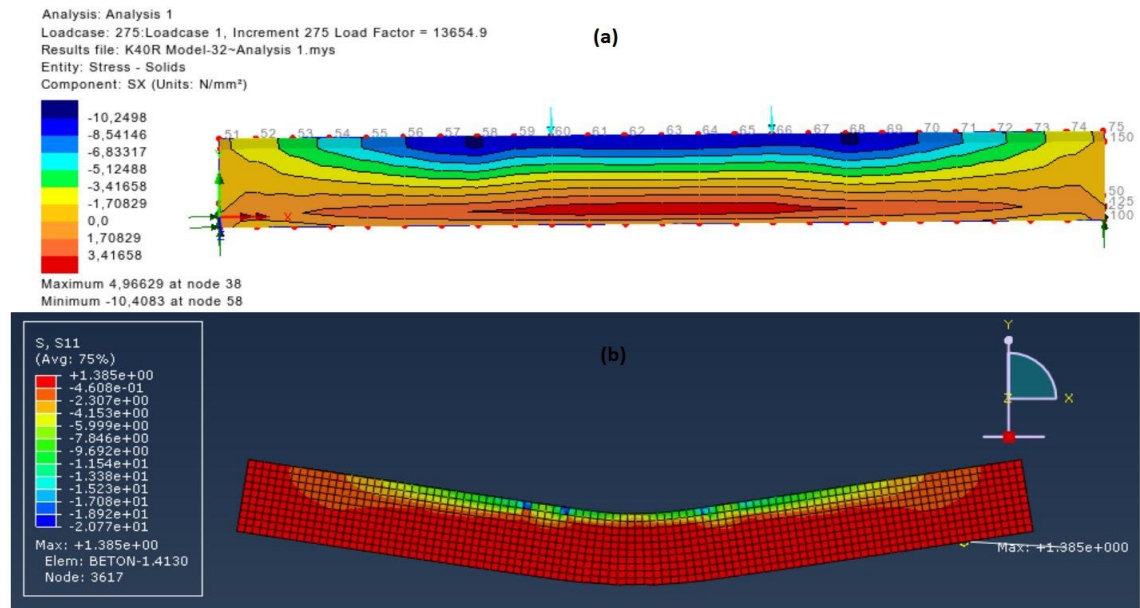
yük taşıma kapasitesi açısından deney sonucuna göre en başarılı sonuç EPH2 yaklaşımı ile elde edilmiştir. EPH2’de maksimum yük taşıma kapasitesi ve buna karşı gelen yer değiştirme değerleri deney sonucuna göre sırasıyla % 6,17 ve % 10,62 oranlarında daha fazla olarak belirlenmiştir (Çizelge 4.12).



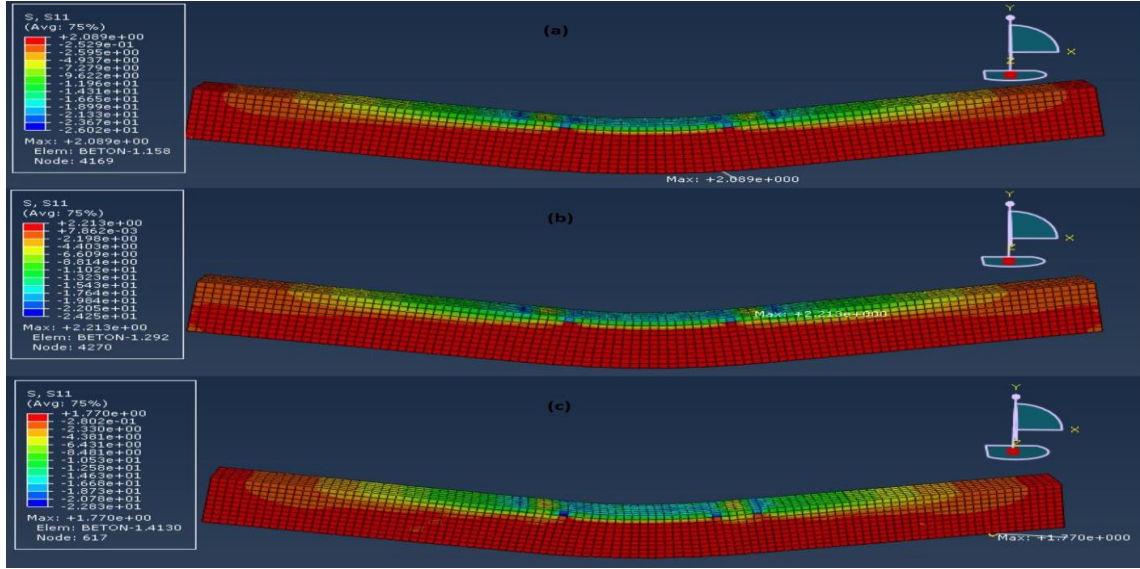
Şekil 4. 60 K40R kirişi için yük –yer değiştirme ilişkisi

Gerilme Dağılımları

Analizler sonrasında betondaki gerilme dağılımları EPH1 ve EPH2 için Şekil 4.61’de, diğer üç yaklaşım olan EP1, EP2 ve EP3 için ise Şekil 4.62’de verilmiştir.



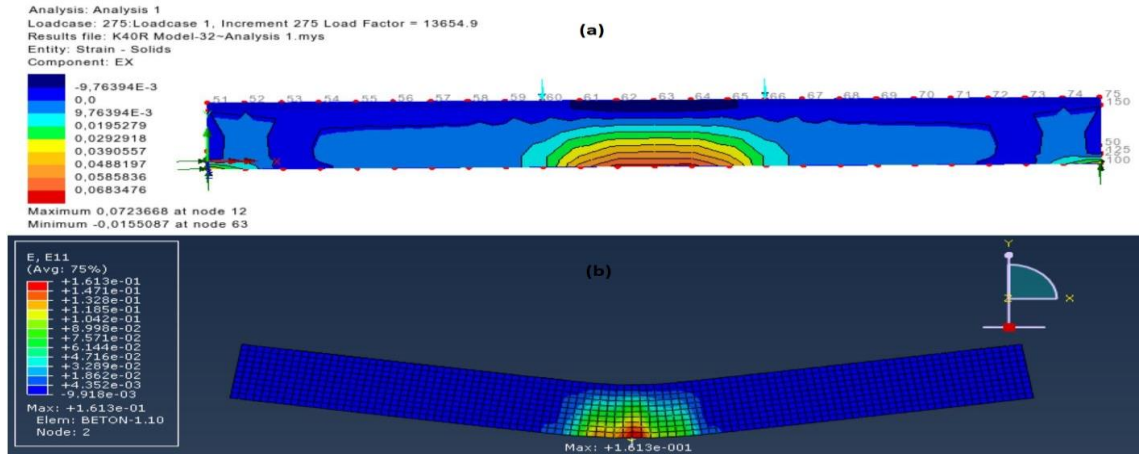
Şekil 4. 61 K40R kirişinde EPH1 (a) ve EPH2 (b) yaklaşımları için betonda gerilme dağılımı



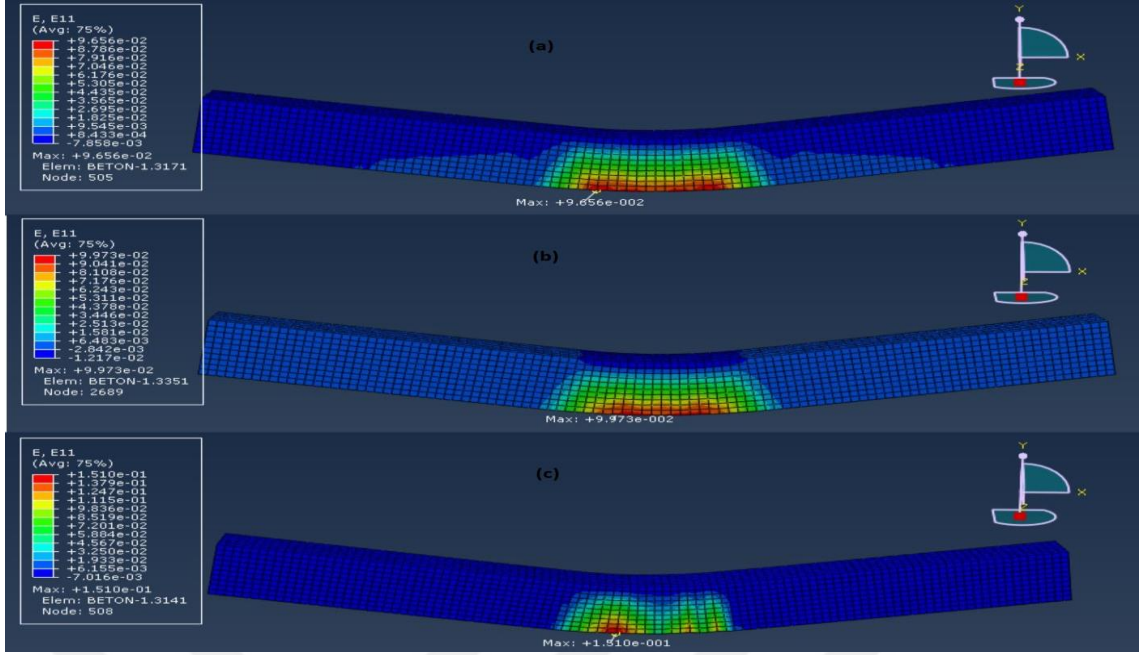
Şekil 4. 62 K40R kirişinde EP1 (a), EP2 (b) ve EP3 (c) yaklaşımları için betonda gerilme dağılımı

Birim Şekil Değiştirme Değeri ve Dağılımları

K40R kontrol kirişinde beton için elde edilen birim şekil değiştirme değerleri ve dağılımları elastoplastik hasar yaklaşımları EPH1 ,EPH2 ve elastoplastik yaklaşımlar EP1, EP2 ve EP3 için sırasıyla Şekil 4.63 ve Şekil 4.64'te verilmiştir. EPH1 ve EPH2 için betonda belirlenen maksimum birim şekil değiştirme değerleri yaklaşık olarak sırasıyla 0,072 ve 0,016 (mm/mm)'dir. EP1, EP2 ve EP3 yaklaşımları için ise bu değerler sırasıyla 0,097, 0,099 ve 0,151 (mm/mm) olarak belirlenmiştir.



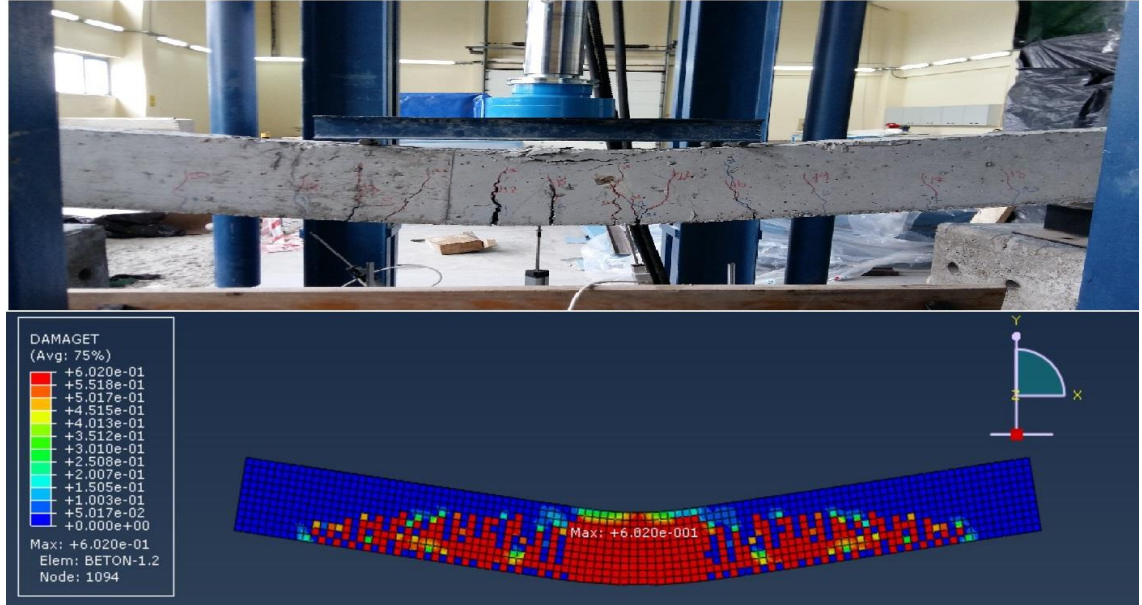
Şekil 4. 63 K40R kirişinde EPH1 (a) ve EPH2 (b) yaklaşımları için betonda birim şekil değiştirme dağılımı



Şekil 4. 64 K40R kirişinde EP1 (a), EP2 (b) ve EP3 (c) yaklaşımları için betonda birim şekil değiştirme dağılımı

Hasar Dağılımı

İkinci grup numunelerin kontrol kirişi olan K40R kirişinde örnek olması açısından ABAQUS yazılımı ile elde edilen sonuçlara bağlı hasar dağılımı Şekil 4.65'te deney numunesi ile karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Sayısal modele ait elde edilen çatlak gelişimi ve yaklaşık çatlak lokasyonları deneysel sonuçlar ile benzer eğilimlidir.



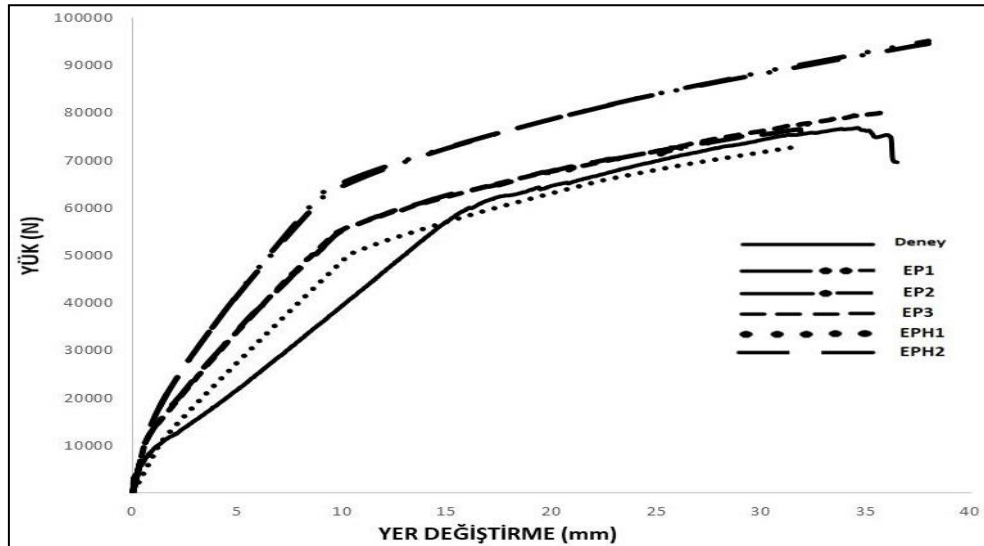
Şekil 4. 65 K40R kirişi için çekme hasarlarının dağılımı

4.3.6 K40KG00 Kirişı

Sadece eğilme bölgesi CFRP ile güçlendirilen ve 40 mm örtü betonu kalınlığına sahip olan bu betonarme kiriş için sayısal modeller yardımıyla yük – yer değiştirme ilişkileri belirlenmiş ve deney sonucu ile karşılaştırılmıştır. Aynı zamanda gerçekleştirilen doğrusal olmayan analizler sonrasında kirişe ait gerilme, birim şekil değiştirme ve hasar dağılımları belirlenmiştir.

Yük – Yer Değiştirme İlişkisi

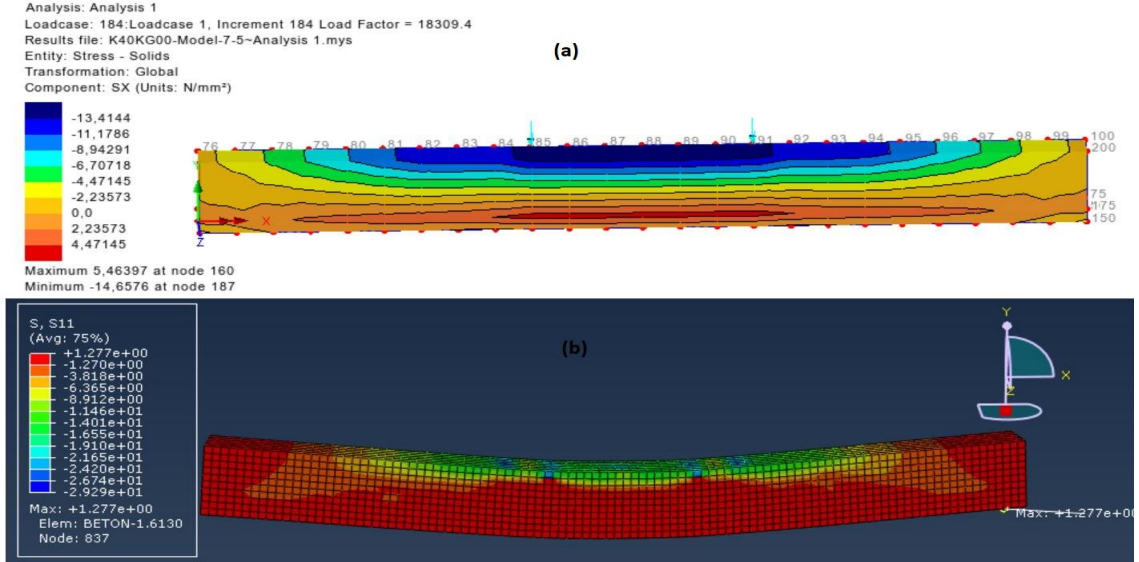
Deney çalışmasında 69,50 kN'luk göçme yükü tespit edilen bu kirişte, açıklık ortasındaki maksimum düşey yer değiştirme miktarı 36,51 mm olarak belirlenmiştir. EPH2'deki analiz sonuçları, Çizelge 4.7'deki kırılma enerjilerinin kıyaslanması ile belirlenen analiz sonlandırma adımına karşı gelen yer değiştirme değeri için belirlenmiştir. EP1, EP2 ve EP3 yaklaşımlarının kullanıldığı sayısal modellerde, analizler deney numunesinin maksimum yük değerine karşı gelen yer değiştirme miktarına kadar devam ettirilmiştir. Kirişin sayısal modelleri ve deney numunesine ait yük – yer değiştirme ilişkisi Şekil 4.66'da şematik olarak verilmiştir. Sayısal analizler sonucunda maksimum yük taşıma kapasitesi açısından deney sonucuna göre en başarılı sonuç EPH2 yaklaşımı ile elde edilmiştir. EPH2'de maksimum yük ve bu yüke karşı gelen yer değiştirme değerleri deney sonucuna göre sırasıyla % 1,02 ve % 7,62 oranlarında daha düşük olarak belirlenmiştir (Çizelge 4.12).



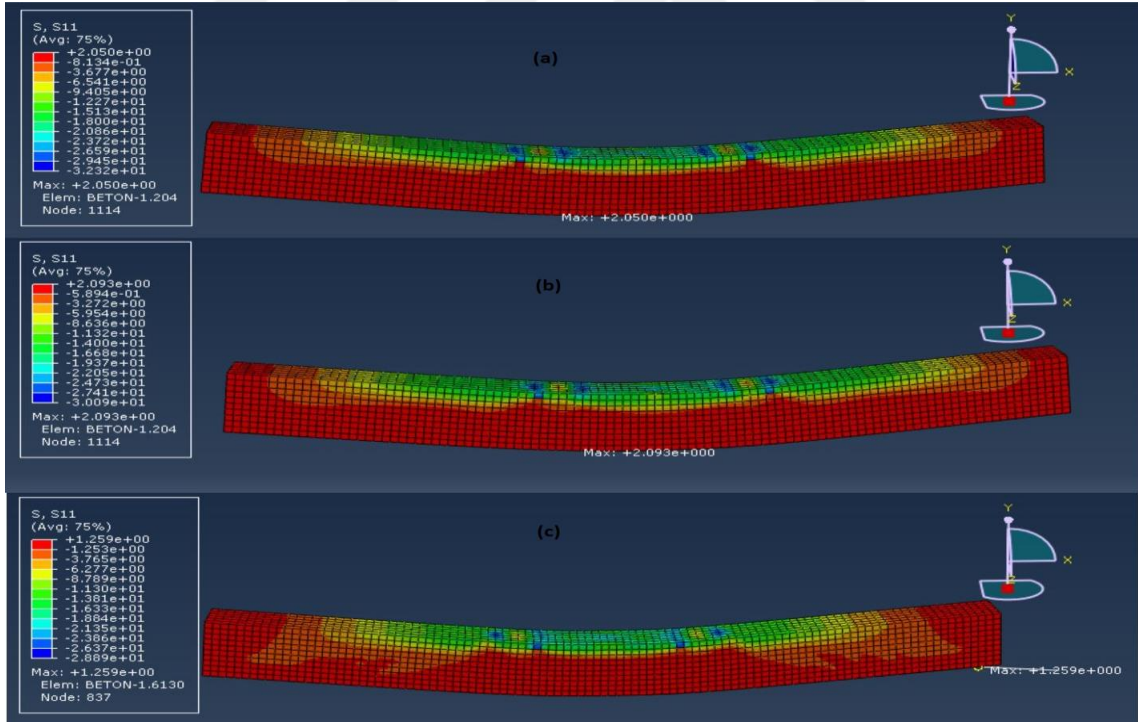
Şekil 4. 66 K40KG00 kirişi için yük – yer değiştirme ilişkisi

Gerilme Dağılımları

Analizler sonrasında betondaki gerilme dağılımları EPH1 ve EPH2 için Şekil 4.67, diğer üç yaklaşım olan EP1, EP2 ve EP3 için ise Şekil 4.68’de verilmiştir.

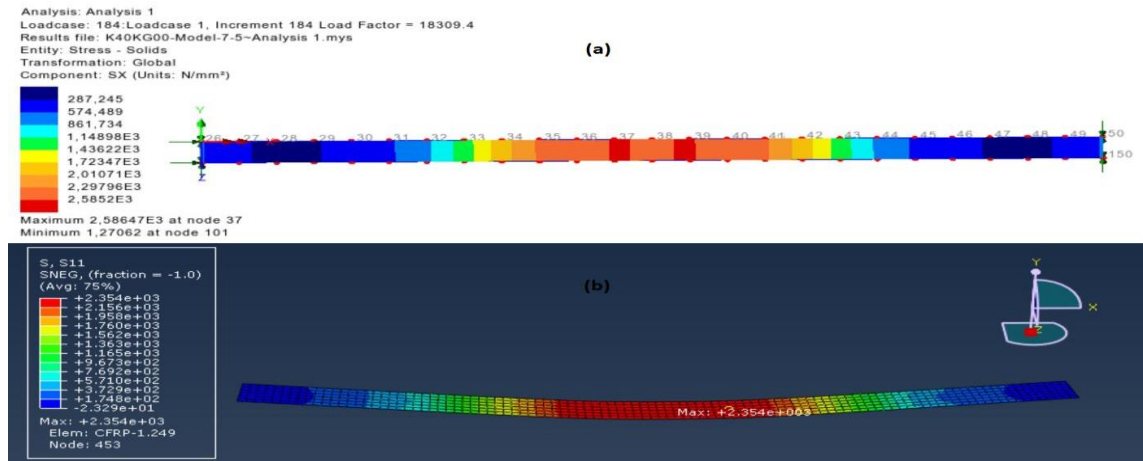


Şekil 4. 67 K40KG00 kirişinde EPH1 (a) ve EPH2 (b) yaklaşımları için betonda gerilme dağılımı

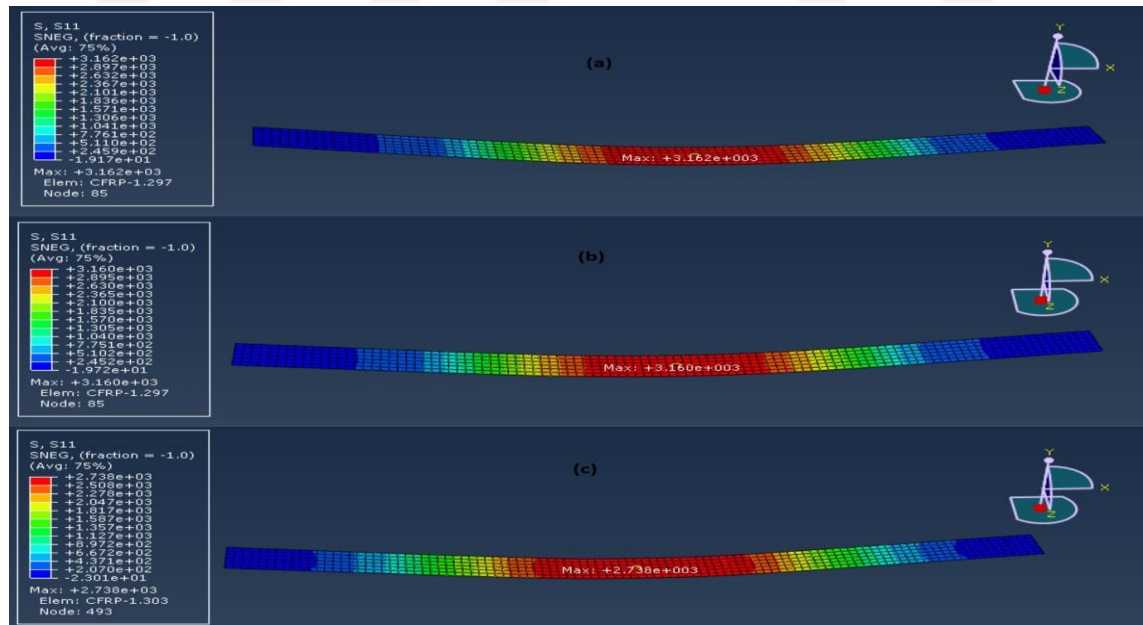


Şekil 4. 68 K40KG00 kirişinde EP1 (a), EP2 (b) ve EP3 (c) yaklaşımları için betonda gerilme dağılımı

EPH1 ve EPH2 yaklaşımlarının kullanıldığı modellerde CFRP’de belirlenen maksimum gerilme değerleri sırasıyla 2586 ve 2354 MPa olarak belirlenmiştir. Bu yaklaşımlar ile CFRP için belirlenen gerilme dağılımları Şekil 4.69’da verilmiştir. EP1, EP2 ve EP3 yaklaşımları için gerçekleştirilen analizlerde ise karbon lifli polimer kumaşta belirlenen maksimum gerilme miktarları sırasıyla 3162, 3160 ve 2738 MPa’dır. Şekil 4.70’te bu yaklaşımlar kullanılarak elde edilen CFRP malzemesinin gerilme dağılımları şematik olarak verilmiştir.



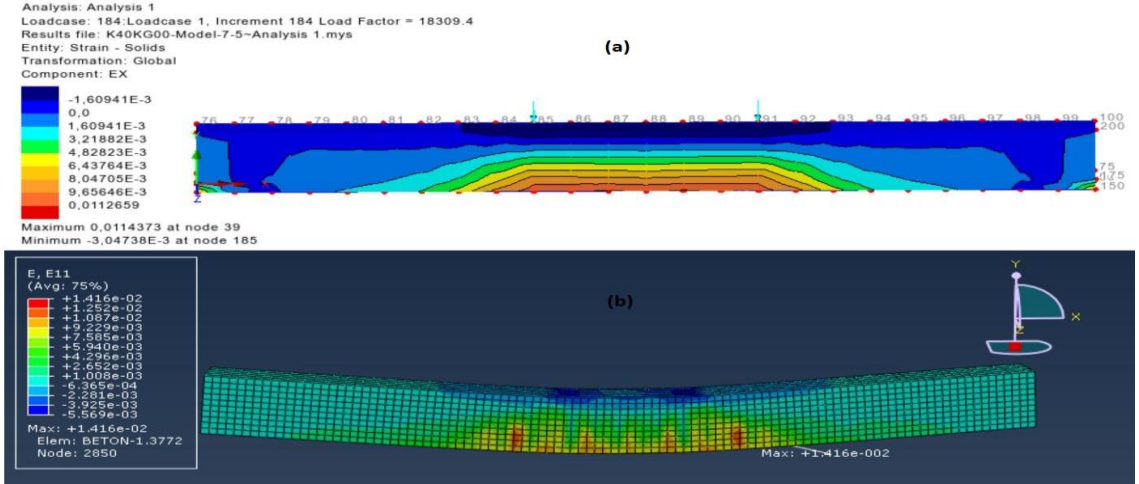
Şekil 4. 69 K40KG00 kirişinde EPH1 (a) ve EPH2 (b) yaklaşımları için CFRP’de gerilme dağılımı



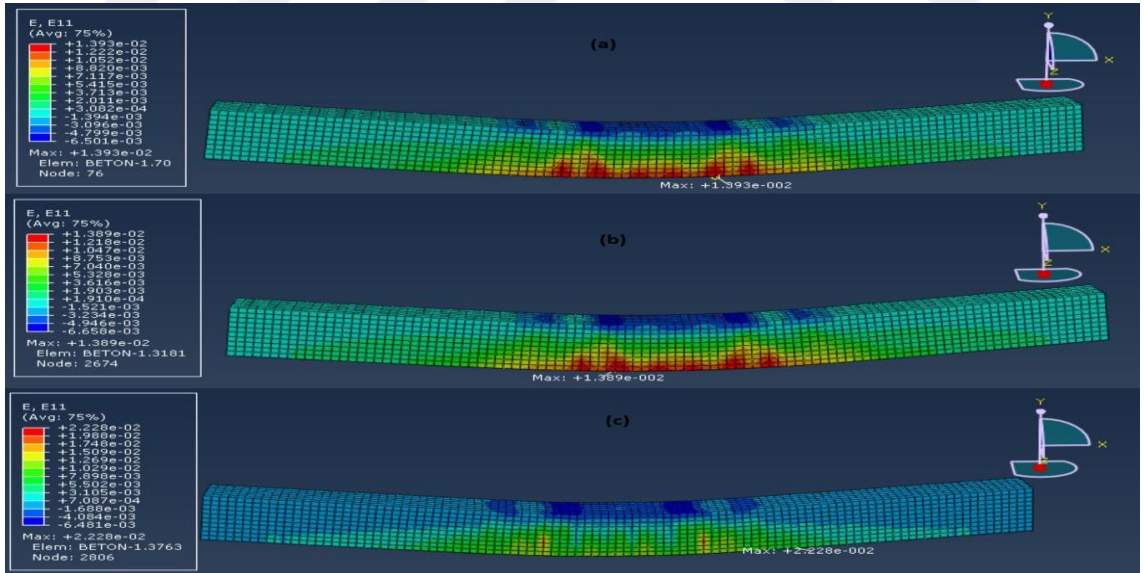
Şekil 4. 70 K40KG00 kirişinde EP1 (a), EP2 (b) ve EP3 (c) yaklaşımları için CFRP’de gerilme dağılımı

Birim Şekil Değişirme Değeri ve Dağılımları

K40KG00 kirişinde beton için elde edilen birim şekil değiştirme değer ve dağılımları EPH1, EPH2 ve EP1, EP2 ve EP3 için sırasıyla Şekil 4.71 ve Şekil 4.72’de verilmiştir. EPH1 ve EPH2 için elde edilen maksimum birim şekil değiştirme değerleri yaklaşık olarak sırasıyla 0,0114 ve 0,0142 (mm/mm), EP1, EP2 ve EP3 yaklaşımları için ise sırasıyla 0,0139, 0,0138 ve 0,0223 (mm/mm) olarak belirlenmiştir.

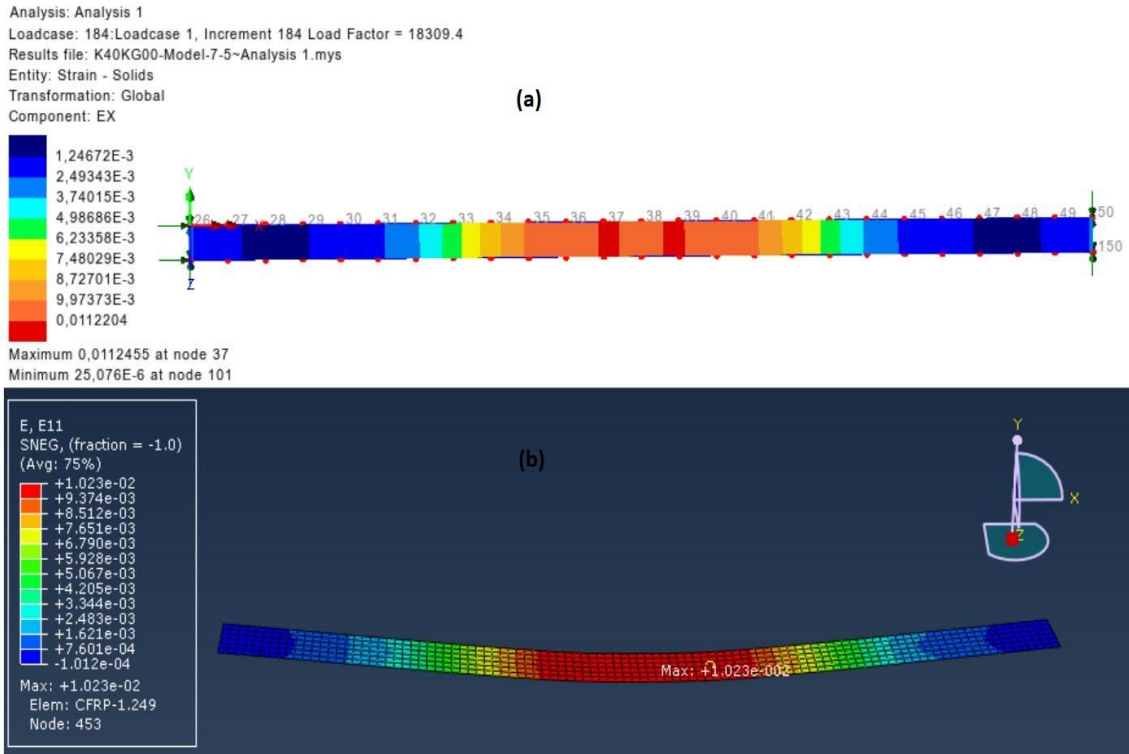


Şekil 4. 71 K40KG00 kirişinde EPH1 (a) ve EPH2 (b) yaklaşımları için betonda birim şekil değiştirme dağılımı



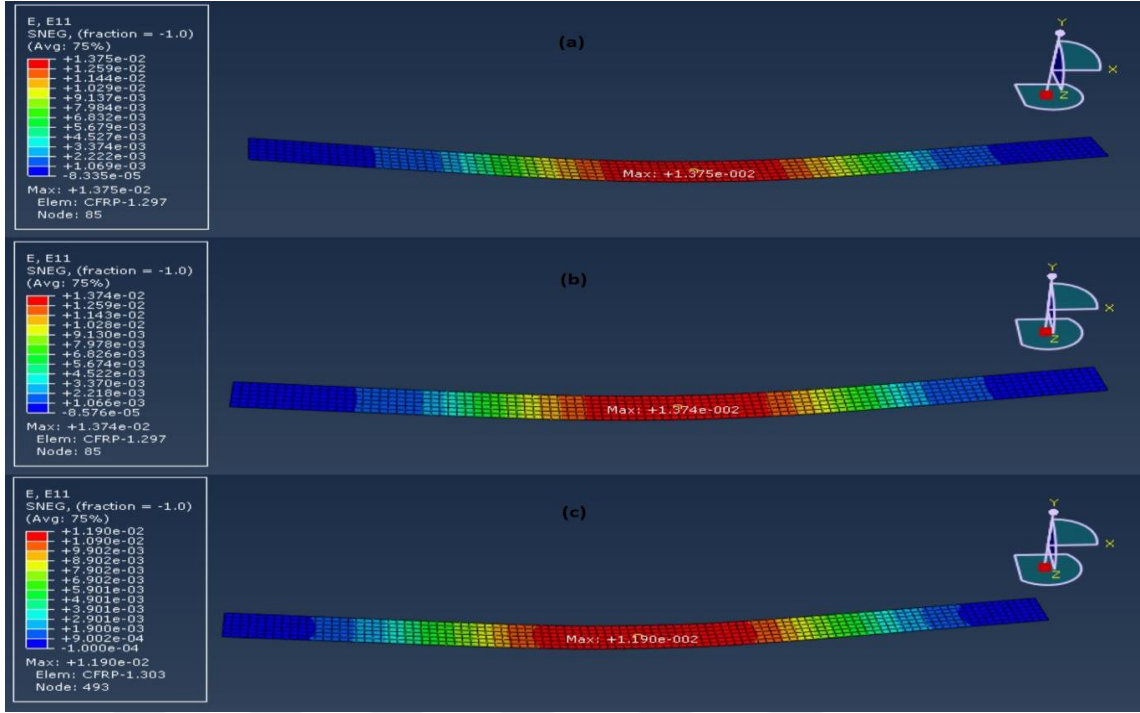
Şekil 4. 72 K40KG00 kirişinde EP1 (a), EP2 (b) ve EP3 (c) yaklaşımları için betonda birim şekil değiştirme dağılımı

K20KG00 için betonun yanı sıra CFRP'nin de birim şekil değiştirme değerleri incelenmiştir. Analizler sonucunda CFRP kopma birim şekil değiştirme değerine " ϵ_{rup} " (0,0213 mm/mm) ulaşmamıştır. EPH1 ve EPH2 yaklaşımlarını esas alan sayısal modeller için CFRP nin ulaştığı maksimum birim şekil değiştirme değerleri sırasıyla 0,0112 ve 0,0102 (mm/mm)'dir. Şekil 4.73'te bu iki yaklaşım için CFRP'nin birim şekil değiştirme dağılımı şematik olarak verilmiştir.



Şekil 4. 73 K40KG00 kirişinde EPH1 (a) ve EPH2 (b) yaklaşımları için CFRP'de birim şekil değiştirme dağılımı

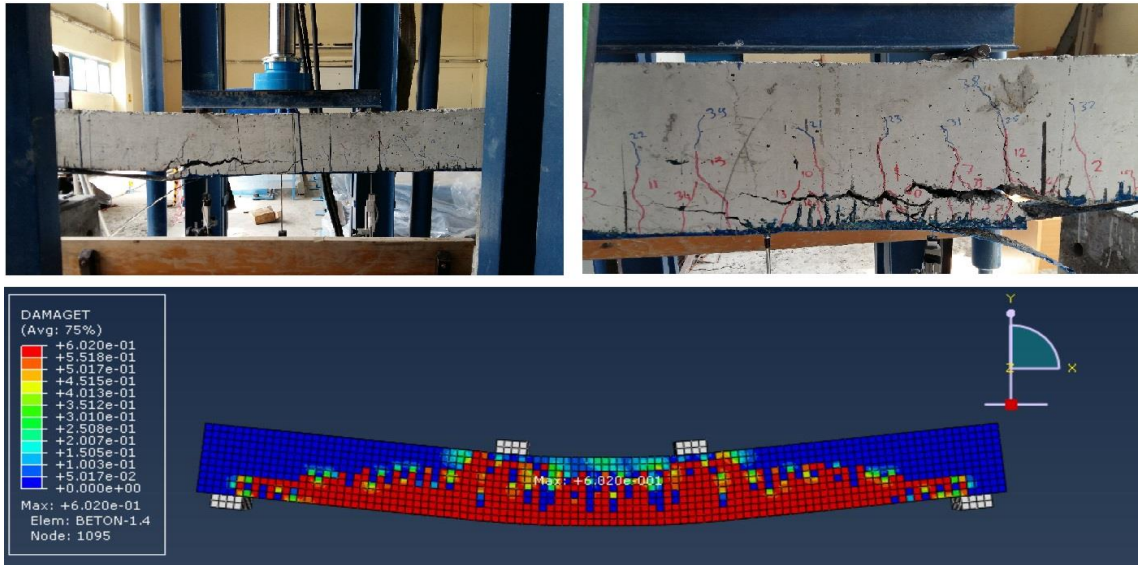
EP1, EP2 ve EP3 için CFRP'de belirlenen maksimum birim şekil değiştirme değerleri ise sırasıyla 0,0138, 0,0137 ve 0,0119 (mm/mm)'dir. Söz konusu yaklaşımlar kullanılarak CFRP için elde edilen birim şekil değiştirme dağılımları Şekil 4.74'de verilmiştir.



Şekil 4. 74 K40KG00 kirişinde EP1 (a), EP2 (b) ve EP3 (c) yaklaşımları için CFRP’de birim şekil değiştirme dağılımı

Hasar Dağılımı

K40KG00 kirişinde örnek olması açısından ABAQUS yazılımı ile elde edilen sonuçlara bağlı hasar dağılımı Şekil 4.75’te deney numunesi ile karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Sayısal modele ait elde edilen çatlak gelişimi ve yaklaşık çatlak lokasyonları deneysel sonuçlar ile benzer eğilimlidir.



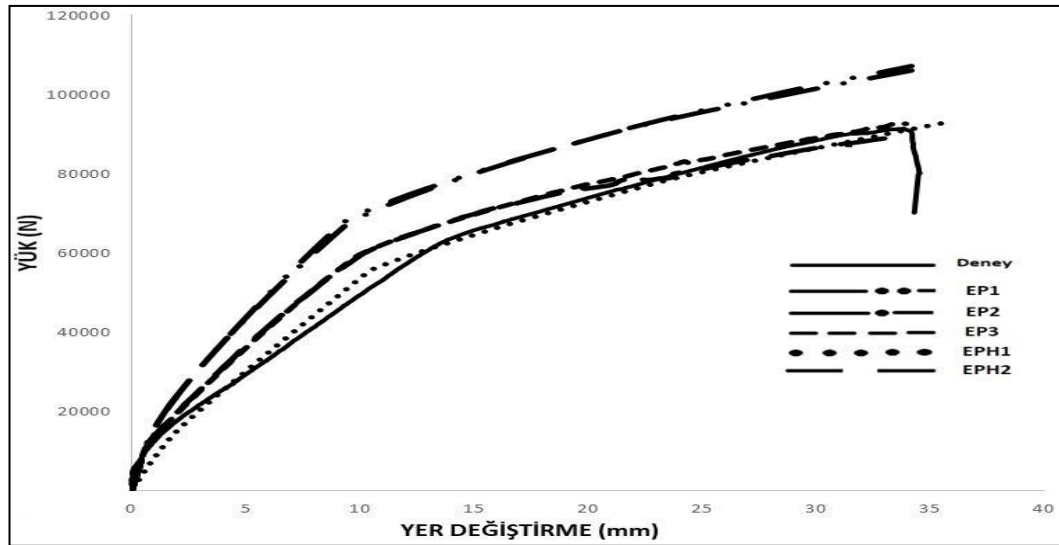
Şekil 4. 75 K40KG00 kirişi için çekme hasarlarının dağılımı

4.3.7 K40KG70 Kirişı

Eğilme bölgesi ve yan yüzeyleri 70 mm yükseklikte CFRP sargılanan 40 mm örtü betonu kalınlığına sahip olan bu betonarme kiriş için sayısal analizler yardımıyla yük – yer değiştirme ilişkileri belirlenmiş ve deney sonucu ile karşılaştırılmıştır. Doğrusal olmayan analizler sonrasında kirişe ait gerilme, birim şekil değiştirme ve hasar dağılımları belirlenmiştir.

Yük – Yer Değiştirme İlişkisi

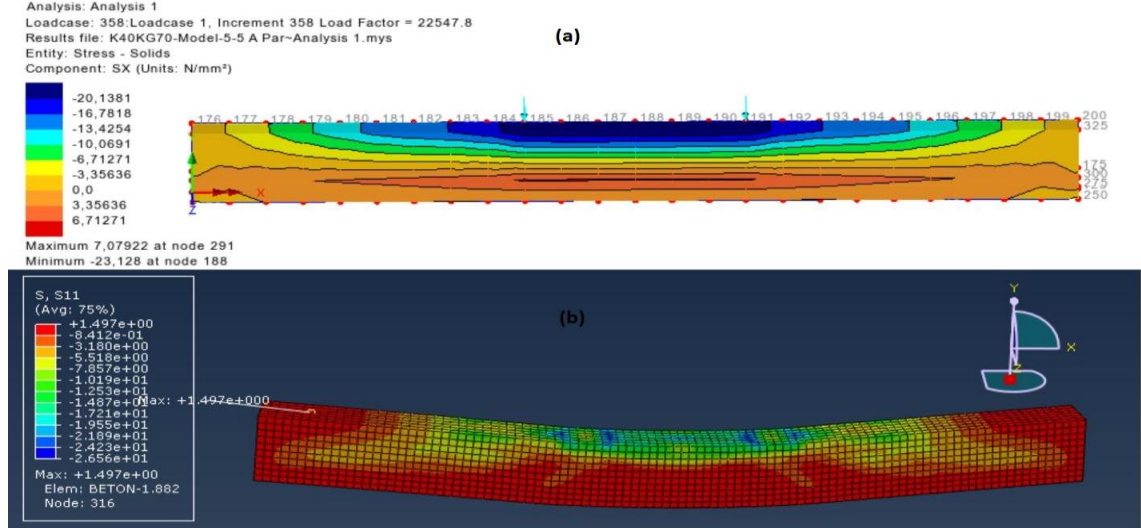
Deney çalışmasında göçme anı için 70,11 kN'luk yük değeri tespit edilen bu kirişte, açıklık ortasındaki düşey yer değiştirme miktarının maksimum değeri 34,56 mm olarak belirlenmiştir. EPH2'deki analiz sonuçları, Çizelge 4.7'deki kırılma enerjilerinin kıyaslanması ile belirlenen analiz sonlandırma adımına karşı gelen yer değiştirme değeri için belirlenmiştir. EP1, EP2 ve EP3 yaklaşımlarının kullanıldığı sayısal modellerde, analizler deney numunesinde görülen maksimum yer değiştirme miktarına kadar devam ettirilmiştir. Kirişin sayısal modelleri ve deney numunesine ait yük – yer değiştirme ilişkisi Şekil 4.76'da şematik olarak verilmiştir. Sayısal analizler sonucunda maksimum yük taşıma kapasitesi açısından deney sonucuna göre en yakın sonuç EP3 yaklaşımı ile elde edilmiştir. EP3'te maksimum yük kapasitesi deney sonucuna göre % 1,19 daha büyük olurken bu yük değerine karşı gelen yer değiştirme değerinin % 0,50 oranında daha düşük olarak belirlenmiştir (Çizelge 4.12).



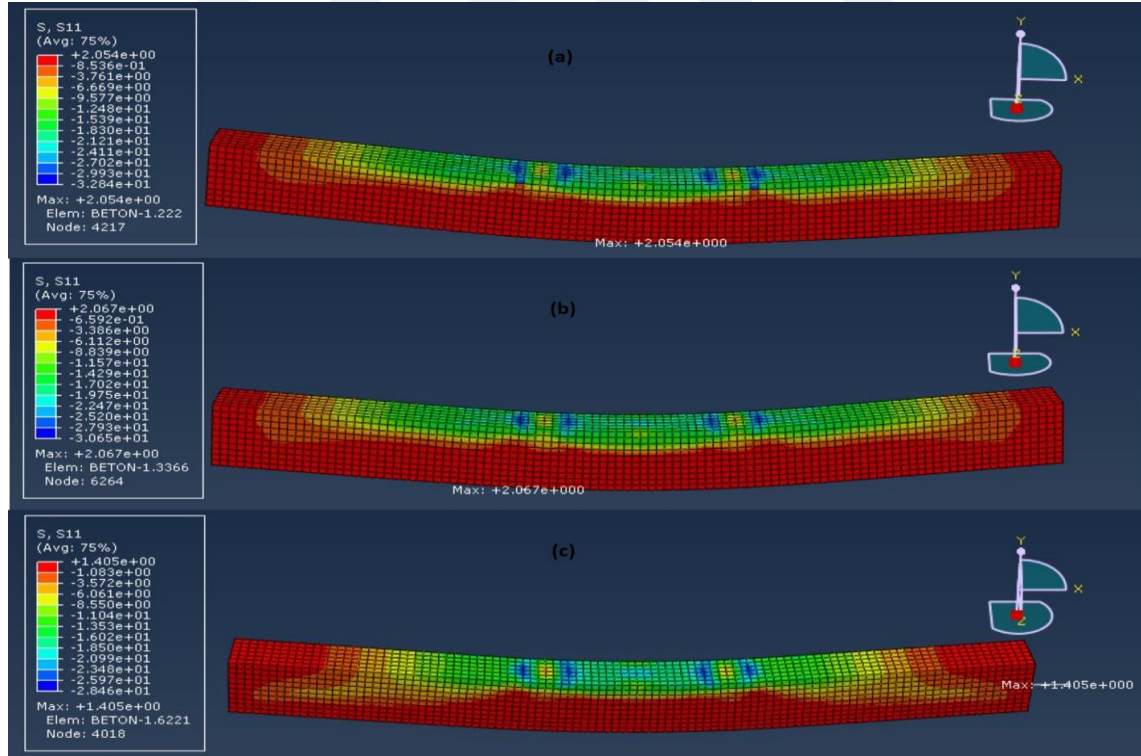
Şekil 4. 76 K40KG70 kirişi için yük – yer değiştirme ilişkisi

Gerilme Dağılımları

Sayısal modellerin doğrusal olmayan analizleri sonrasında betondaki gerilme dağılımları EPH1 ve EPH2 için Şekil 4.77, diğer üç yaklaşım olan EP1, EP2 ve EP3 için ise Şekil 4.78’de verilmiştir.

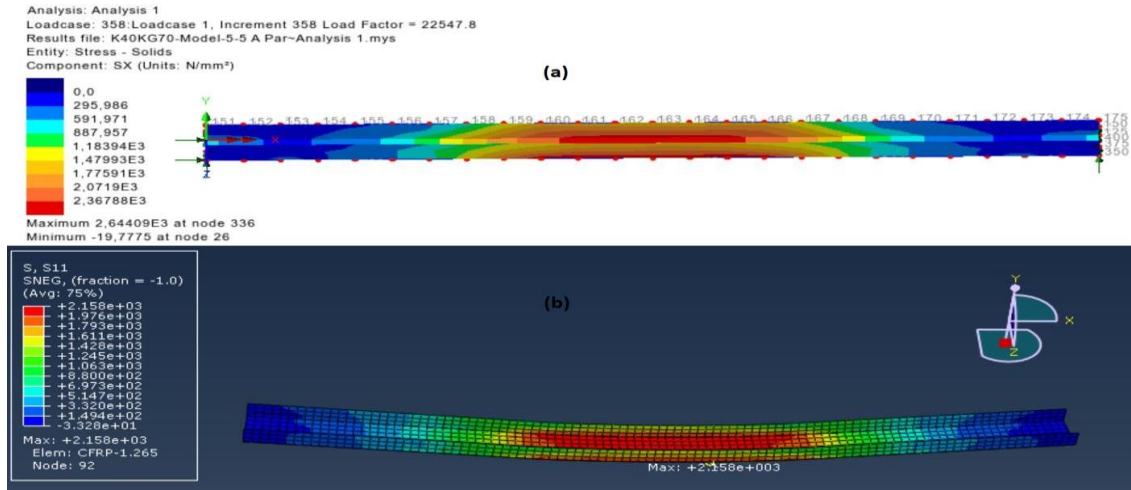


Şekil 4. 77 K40KG70 kirişinde EPH1 (a) ve EPH2 (b) yaklaşımları için betonda gerilme dağılımı

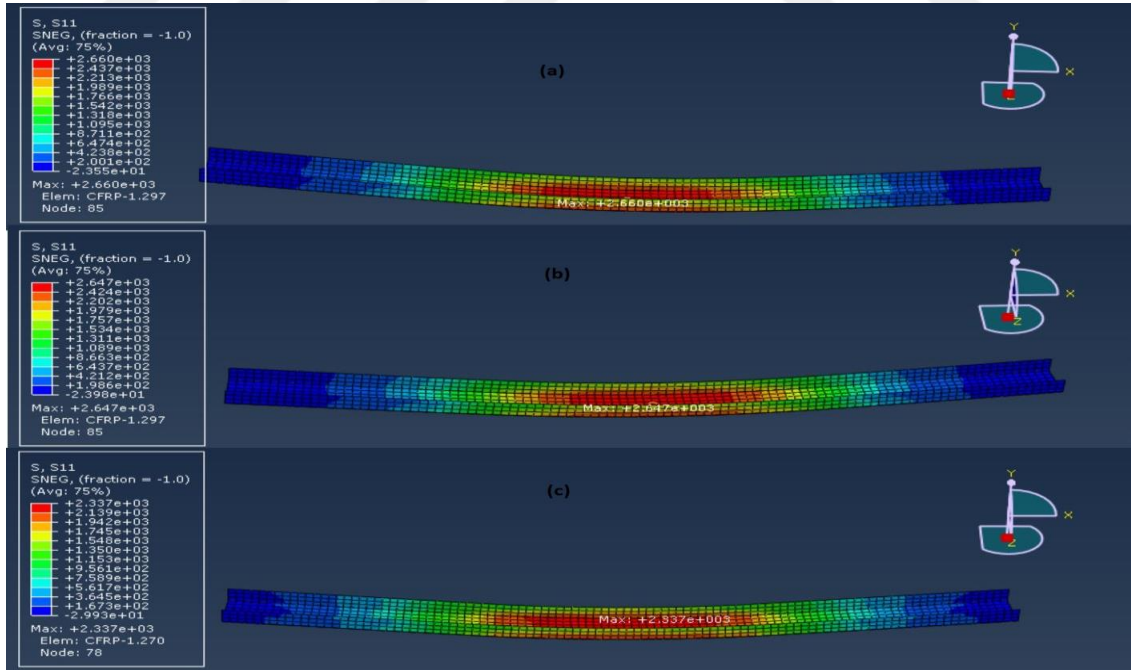


Şekil 4. 78 K40KG70 kirişinde EP1 (a), EP2 (b) ve EP3 (c) yaklaşımları için betonda gerilme dağılımı

EPH1 ve EPH2 yaklaşımlarının kullanıldığı modellerde CFRP’de belirlenen maksimum gerilme değerleri sırasıyla 2645 ve 2158 MPa olarak belirlenmiştir. Bu yaklaşımlar ile CFRP için belirlenen gerilme dağılımları Şekil 4.79’da verilmiştir. EP1, EP2 ve EP3 yaklaşımları için gerçekleştirilen analizlerde ise CFRP’de maksimum gerilme miktarları sırasıyla 2660, 2647 ve 2337 MPa olarak belirlenmiştir. Şekil 4.80’de bu yaklaşımlar için CFRP malzemenin gerilme dağılımları şematik olarak verilmiştir.



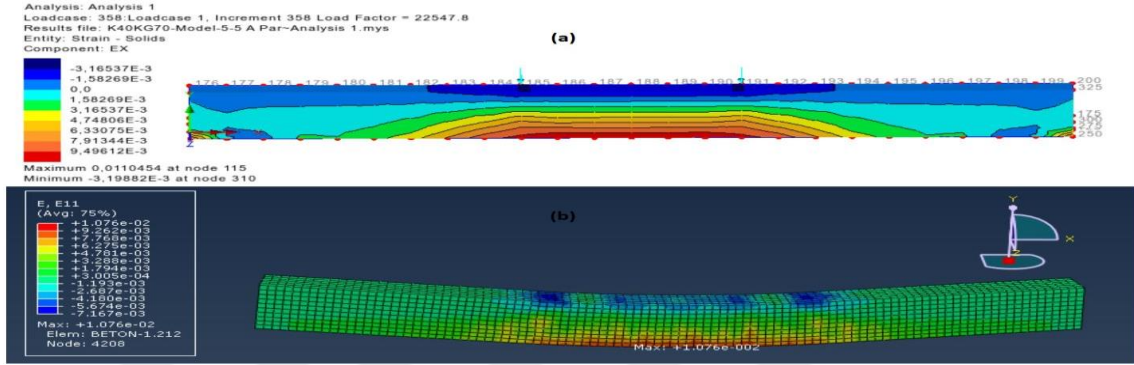
Şekil 4. 79 K40KG70 kirişinde EPH1 (a) ve EPH2 (b) yaklaşımları için CFRP’de gerilme dağılımı



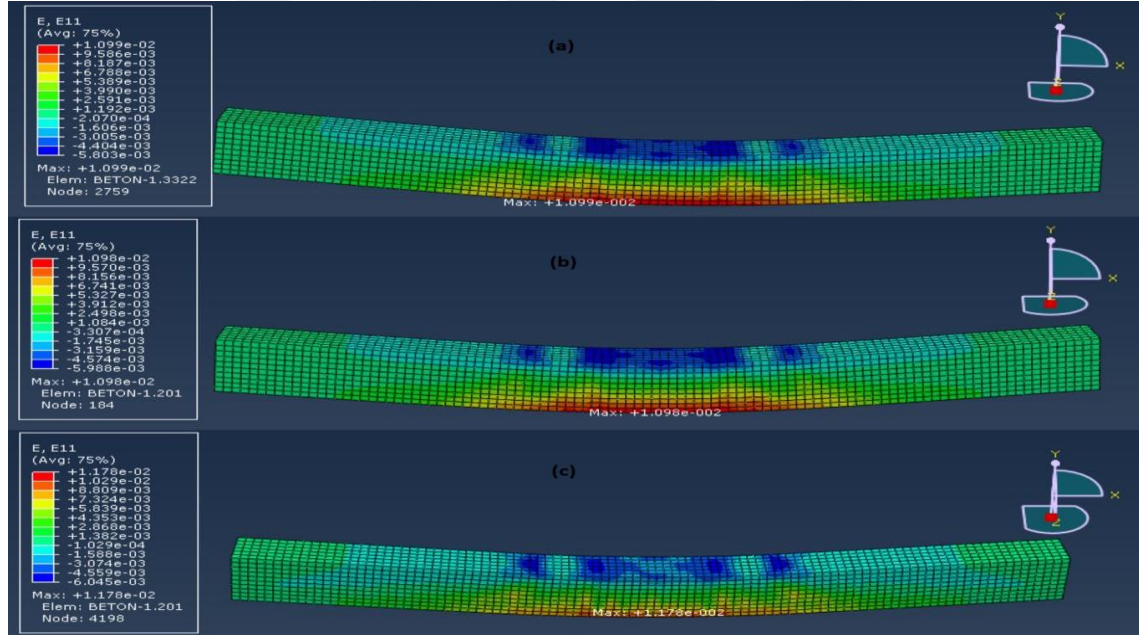
Şekil 4. 80 K40KG70 kirişinde EP1 (a), EP2 (b) ve EP3 (c) yaklaşımları için CFRP’de gerilme dağılımı

Birim Şekil Değişirme Değer ve Dağılımları

K40KG70 kirişinde beton için elde edilen birim şekil değiştirme değeri ve dağılımları EPH1, EPH2 ve EP1, EP2 ve EP3 için sırasıyla Şekil 4.81 ve Şekil 4.82’de verilmiştir. EPH1 ve EPH2 için elde edilen maksimum birim şekil değiştirme değerleri yaklaşık olarak sırasıyla 0,0110 ve 0,0107 (mm/mm)’dir. EP1, EP2 ve EP3 yaklaşımları için ise bu değerler sırasıyla 0,0109, 0,0110 ve 0,0118 (mm/mm) olarak belirlenmiştir.

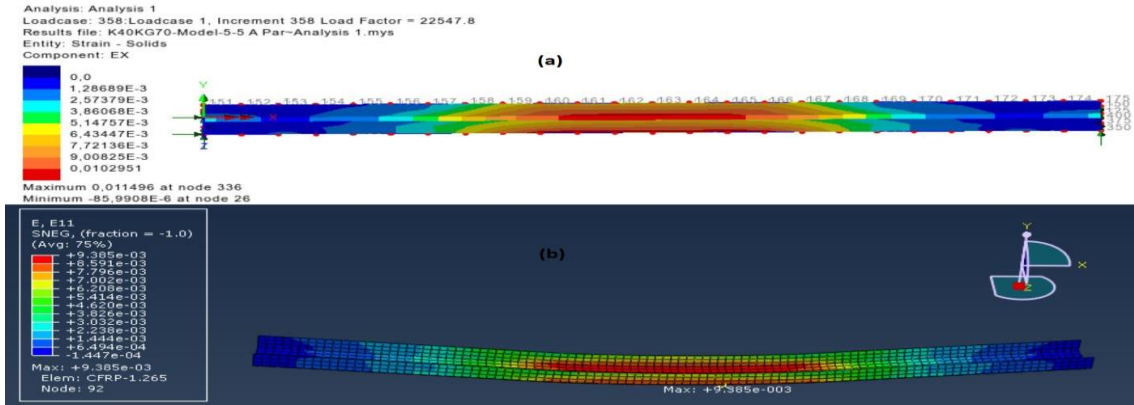


Şekil 4. 81 K40KG70 kirişinde EPH1 (a) ve EPH2 (b) yaklaşımları için betonda birim şekil değiştirme dağılımı



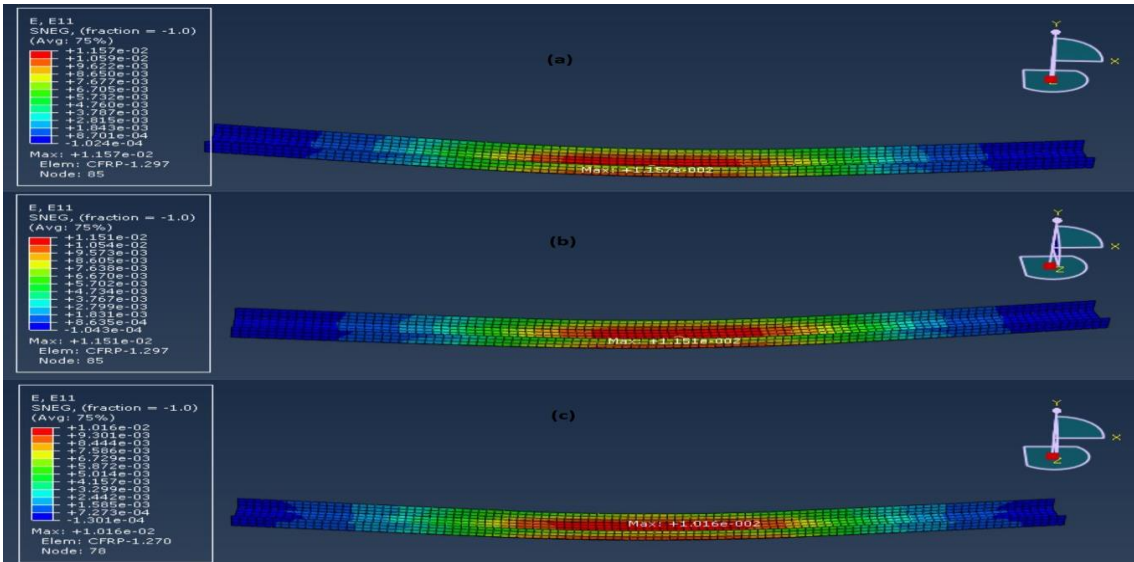
Şekil 4. 82 K40KG70 kirişinde EP1 (a), EP2 (b) ve EP3 (c) yaklaşımları için betonda birim şekil değiştirme dağılımı

Gerçekleştirilen analizler sonucunda CFRP kopma birim şekil değiştirme değerine “ ϵ_{rup} ” (0,0213 mm/mm) ulaşmamıştır. EPH1 ve EPH2 yaklaşımlarını esas alan sayısal modeller için CFRP’nin ulaştığı maksimum birim şekil değiştirme değerleri sırasıyla 0,0115 ve 0,0094 (mm/mm)’dir. Şekil 4.83’te bu iki yaklaşım için CFRP’nin birim şekil değiştirme dağılımı şematik olarak verilmiştir.



Şekil 4. 83 K40KG70 kirişinde EPH1 (a) ve EPH2 (b) yaklaşımları için CFRP’de birim şekil değiştirme dağılımı

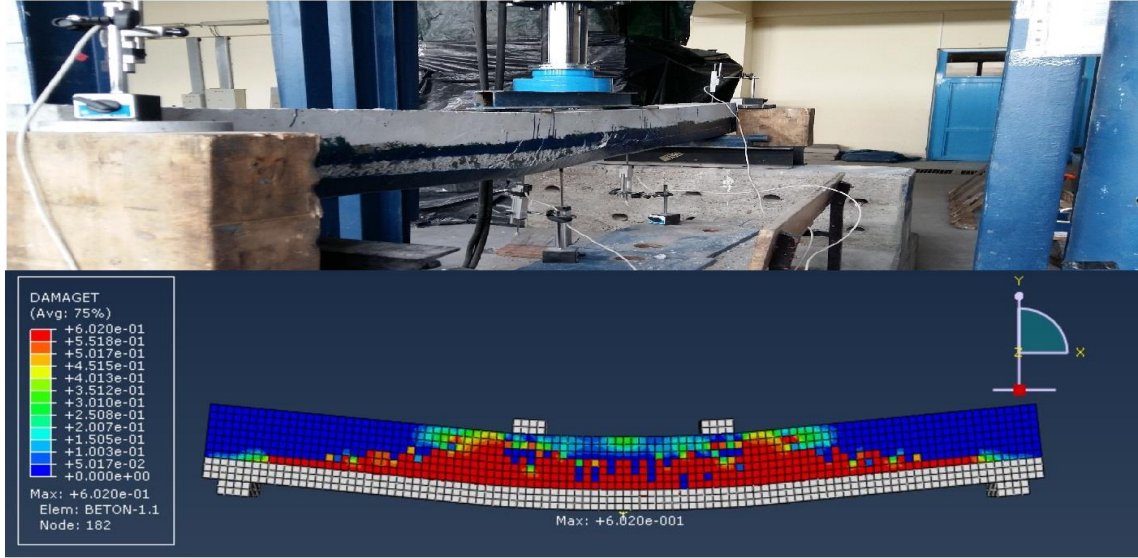
EP1, EP2 ve EP3 yaklaşımları için CFRP’nin ulaştığı maksimum birim şekil değiştirme değerleri sırasıyla 0,0138, 0,0137 ve 0,0119 (mm/mm)’dir. Söz konusu yaklaşımlar kullanılarak CFRP için elde edilen birim şekil değiştirme dağılımları Şekil 4.84’te verilmiştir.



Şekil 4. 84 K40KG70 kirişinde EP1 (a), EP2 (b) ve EP3 (c) yaklaşımları için CFRP’de birim şekil değiştirme dağılımı

Hasar Dağılımı

K40KG70 kirişinde örnek olması açısından ABAQUS yazılımı ile elde edilen sonuçlara bağlı hasar dağılımı Şekil 4.85'te deney numunesi ile karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Sayısal modele ait elde edilen çatlak gelişimi ve yaklaşık çatlak lokasyonları deneysel sonuçlar ile benzer eğilimlidir.



Şekil 4. 85 K40KG70 kirişi için çekme hasarlarının dağılımı

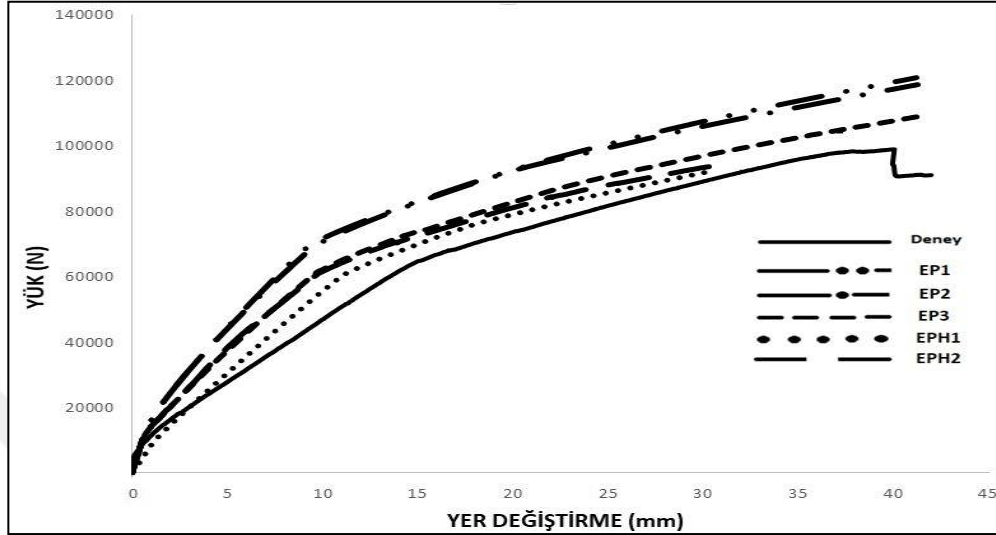
4.3.8 K40KGU Kirişi

Tam sargılama yöntemi ile U biçiminde CFRP ile sargılanan 40 mm örtü betonu kalınlığına sahip olan bu betonarme kiriş için sayısal analizler sonucunda yük – yer değiştirme ilişkileri belirlenmiş ve deney sonucu ile karşılaştırılmıştır. Doğrusal olmayan analizler sonrasında kirişe ait gerilme, birim şekil değiştirme ve hasar dağılımları belirlenmiştir.

Yük – Yer Değiştirme İlişkisi

Deney çalışmasında göçme durumu için 91,04 kN'luk yük değeri tespit edilen bu kirişte, açıklık ortasındaki maksimum düşey yer değiştirme miktarı yaklaşık 42 mm olarak belirlenmiştir. EPH2'deki analiz sonuçları, Çizelge 4.7'deki kırılma enerjilerinin kıyaslanması ile belirlenen analiz sonlandırma adımına karşı gelen yer değiştirme değeri için belirlenmiştir. EP1, EP2 ve EP3 yaklaşımlarının kullanıldığı sayısal modellerde analizler, deney numunesinde görülen maksimum yer değiştirme miktarına kadar devam ettirilmiştir. Kirişin sayısal modelleri ve deney numunesine ait yük – yer değiştirme ilişkisi Şekil 4.86'da şematik olarak verilmiştir. Sayısal analizler sonucunda maksimum

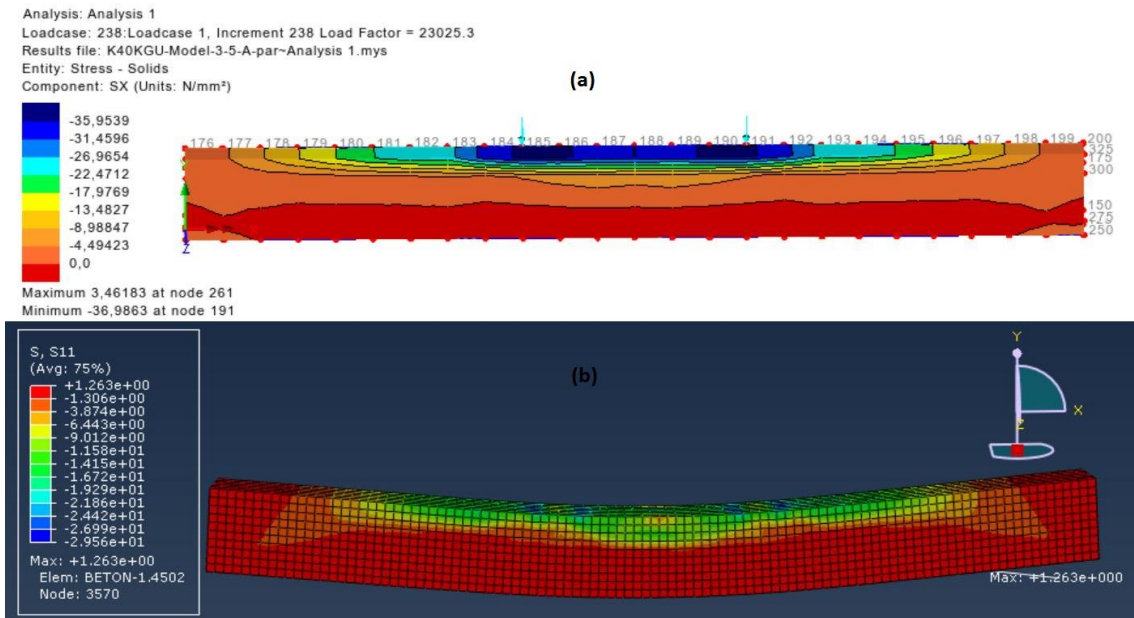
yük taşıma kapasitesi değeri için deney sonucuna göre en yakın sonuç EPH2 yaklaşımı ile elde edilmiştir. EPH2’de maksimum yük ve bu yüke karşı gelen yer değiştirme değerleri deney sonucuna göre sırasıyla % 5,38 ve % 24,36 oranlarında daha düşük olarak belirlenmiştir (Çizelge 4.12).



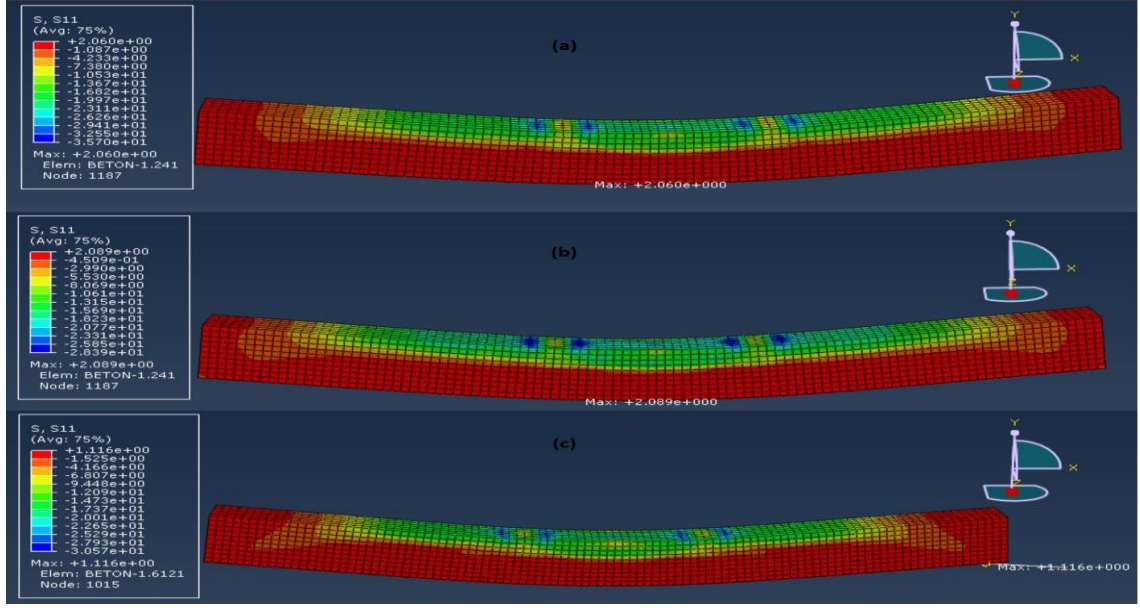
Şekil 4. 86 K40KGU kirişi için yük – yer değiştirme ilişkisi

Gerilme Dağılımları

Doğrusal olmayan analizler sonrasında betondaki gerilme dağılımları EPH1 ve EPH2 için Şekil 4.87, diğer üç yaklaşım olan EP1, EP2 ve EP3 için ise Şekil 4.88’de verilmiştir.

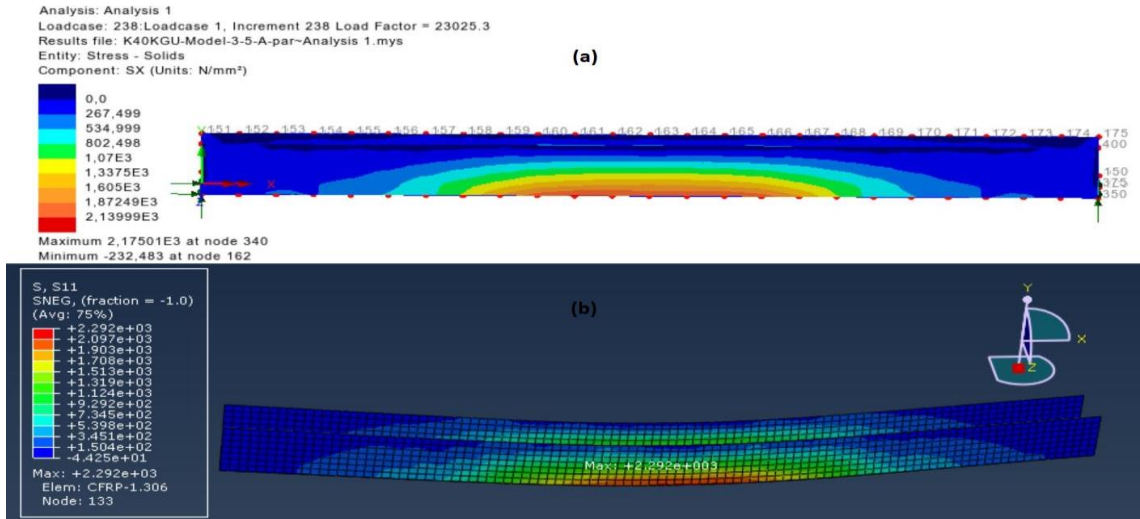


Şekil 4. 87 K40KGU kirişinde EPH1 (a) ve EPH2 (b) yaklaşımları için betonda gerilme dağılımı

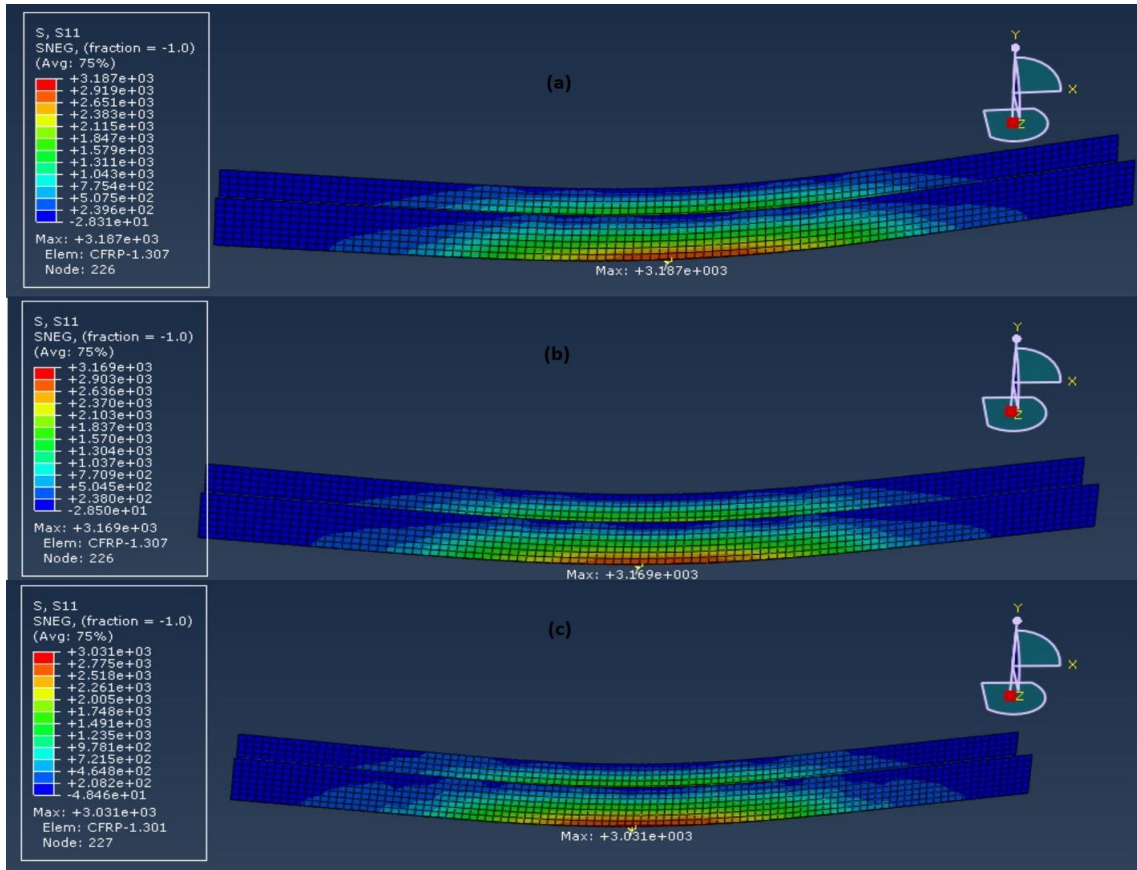


Şekil 4. 88 K40KGU kirişinde EP1 (a), EP2 (b) ve EP3 (c) yaklaşımları için betonda gerilme dağılımı

EPH1 ve EPH2 yaklaşımlarının kullanıldığı modellerde CFRP’de maksimum gerilme değerleri sırasıyla 2175 ve 2292 MPa olarak belirlenmiştir. Bu yaklaşımlar ile CFRP için belirlenen gerilme dağılımları Şekil 4.89’da verilmiştir. EP1, EP2 ve EP3 yaklaşımları için gerçekleştirilen analizlerde ise CFRP’deki maksimum gerilme değerleri sırasıyla 3187, 3169 ve 3031 MPa olarak belirlenmiştir. Şekil 4.90’da bu yaklaşımlar için CFRP malzemenin gerilme dağılımları şematik olarak verilmiştir.



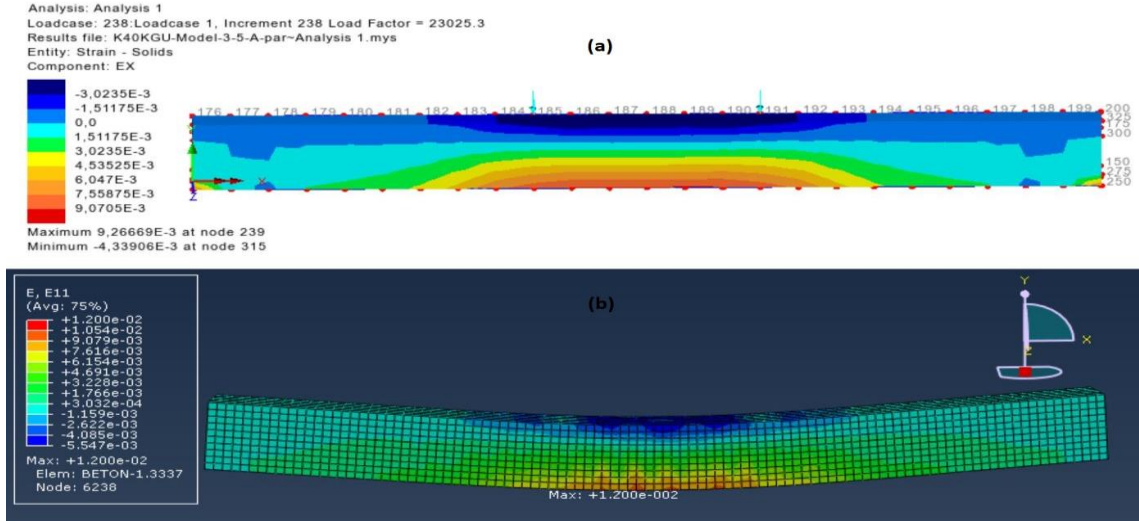
Şekil 4. 89 K40KGU kirişinde EPH1 (a) ve EPH2 (b) yaklaşımları için CFRP’de gerilme dağılımı



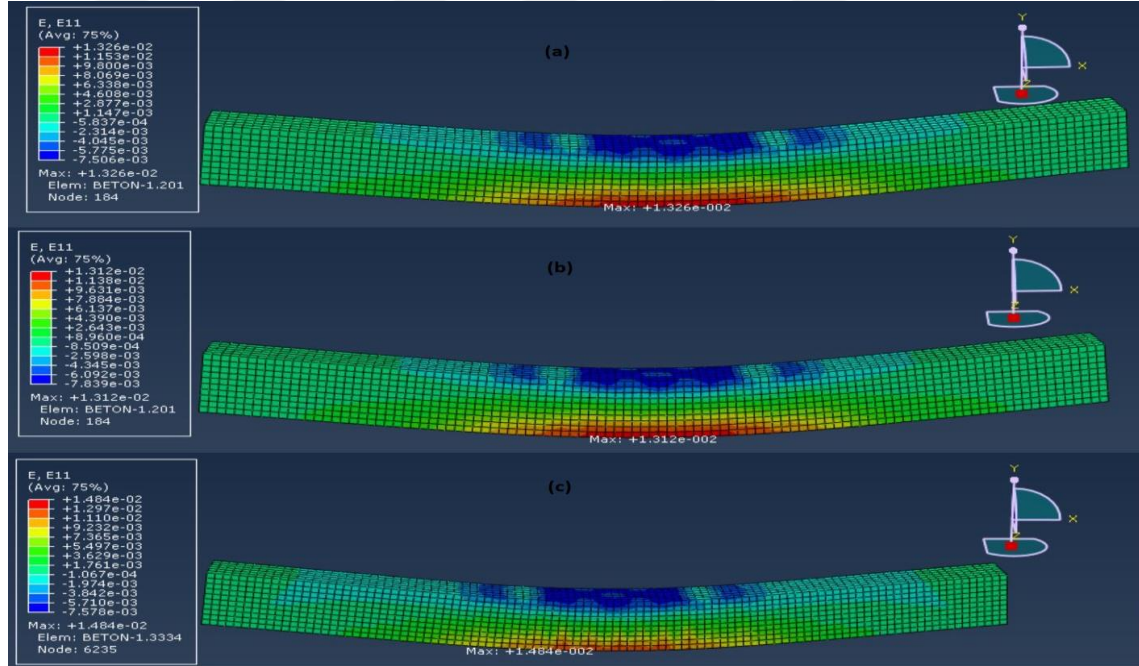
Şekil 4. 90 K40KGU kirişinde EP1 (a), EP2 (b) ve EP3 (c) yaklaşımları için CFRP’de gerilme dağılımı

Birim Şekil Değiştirme Değer ve Dağılımları

K40KGU kirişinde beton için elde edilen birim şekil değiştirme değerleri ve dağılımları EPH1, EPH2 ve EP1, EP2 ve EP3 için sırasıyla Şekil 4.91 ve Şekil 4.92’de verilmiştir. EPH1 ve EPH2 için elde edilen maksimum birim şekil değiştirme değerleri yaklaşık olarak sırasıyla 0,0093 ve 0,012 (mm/mm)’dir. EP1, EP2 ve EP3 yaklaşımları için ise bu değerler sırasıyla 0,0133, 0,0131 ve 0,0148 (mm/mm) olarak belirlenmiştir.

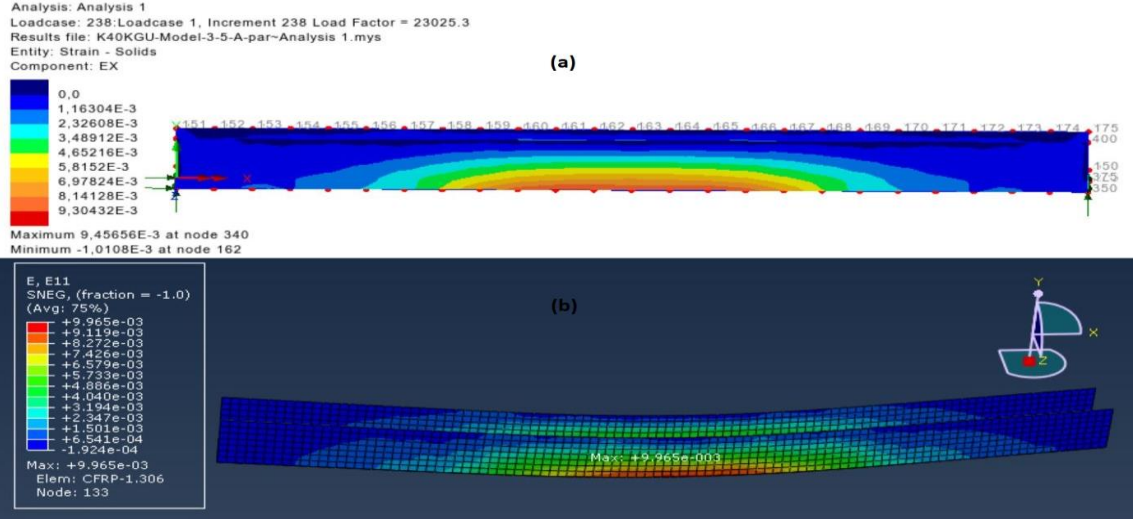


Şekil 4. 91 K40KGU kirişinde EPH1 (a) ve EPH2 (b) yaklaşımları için betonda birim şekil değiştirme dağılımı



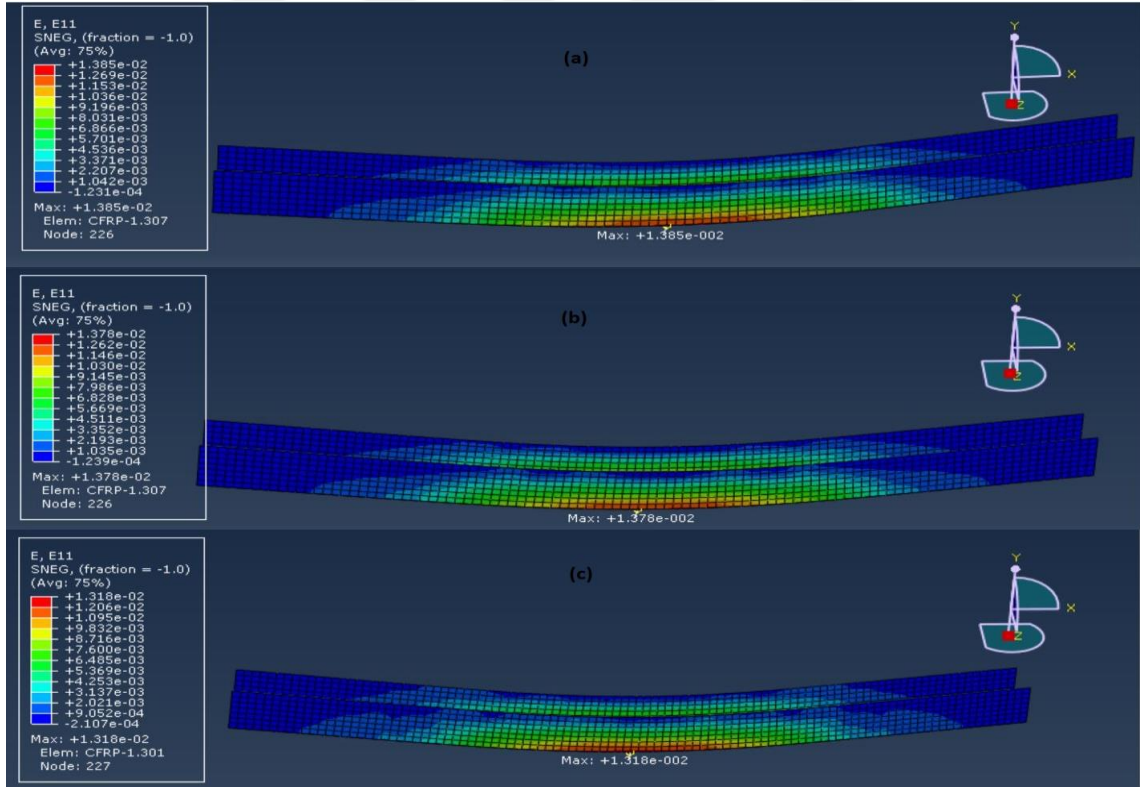
Şekil 4. 92 K40KGU kirişinde EP1 (a), EP2 (b) ve EP3 (c) yaklaşımları için betonda birim şekil değiştirme dağılımı

Analizler sonucunda CFRP kopma birim şekil değiştirme değerine " ϵ_{rup} " (0,0213 mm/mm) ulaşmamıştır. EPH1 ve EPH2 yaklaşımlarını esas alan sayısal modellerde CFRP'nin ulaştığı maksimum birim şekil değiştirme değerleri sırasıyla 0,0094 ve 0,0099 (mm/mm)'dir. Şekil 4.93'te bu iki yaklaşımlar için CFRP'nin birim şekil değiştirme dağılımı şematik olarak verilmiştir.



Şekil 4. 93 K40KGU kirişinde EPH1 (a) ve EPH2 (b) yaklaşımları için CFRP’de birim şekil değiştirme dağılımı

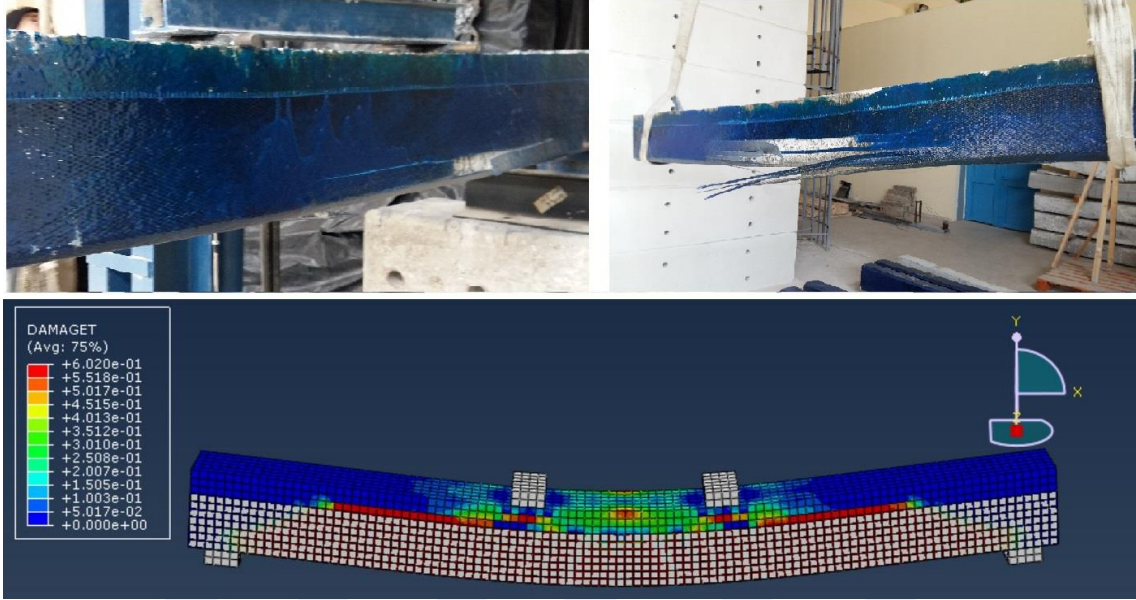
CFRP için maksimum birim şekil değiştirme değerleri EP1, EP2 ve EP3 için sırasıyla 0,0138, 0,0137 ve 0,0132 (mm/mm)’dir. Söz konusu yaklaşımlar kullanılarak CFRP için elde edilen birim şekil değiştirme dağılımları Şekil 4.94’te verilmiştir.



Şekil 4. 94 K40KGU kirişinde EP1 (a), EP2 (b) ve EP3 (c) yaklaşımları için CFRP’de birim şekil değiştirme dağılımı

Hasar Dağılımı

K40KGU kirişinde örnek olması açısından ABAQUS yazılımı ile elde edilen sonuçlara bağlı hasar dağılımı Şekil 4.95'te deney numunesi ile karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Sayısal modele ait elde edilen çatlak gelişimi ve yaklaşık çatlak lokasyonları deneysel sonuçlar ile benzer eğilimlidir.



Şekil 4. 95 K40KGU kirişi için çekme hasarlarının dağılımı

4.3.9 Değerlendirmeler

Farklı bünyesel modelleme tekniğinin kullanıldığı bu çalışma kapsamında, gerçekleştirilen sayısal analizler sonucunda her bir deney kirişi için aşağıdaki değerlendirmeler yapılmıştır.

- **K20R Kirişi**

Örtü betonu kalınlığı 20 mm olan bu kontrol kirişinde, deneysel olarak belirlenen maksimum yük taşıma kapasitesi 51,97 kN olurken bu değere karşı gelen açıklık ortası düşey yer değiştirme miktarı 117,02 mm olarak belirlenmiştir. Sayısal analizler sonrasında EP1, EP2, EP3, EPH1 ve EPH2 yaklaşımları için maksimum yük taşıma kapasiteleri sırasıyla 63,71, 63,75, 55,69, 61,2 ve 53,03 kN bulunurken, deneysel çalışmaya en yakın sonucu % 2,04'lük hata oranı ile EPH2 yaklaşımı vermiştir. Bu yaklaşım için maksimum yük değerine karşı gelen açıklık ortası yer

değiştirme miktarı 114,49 mm olarak bulunmuş ve bu değerin deneysel olarak elde edilmiş yer değiştirme değerinden %2,16 oranında daha düşük olduğu belirlenmiştir. Deney çalışması sonrasında elde edilen süneklik oranı bu kiriş için yaklaşık olarak 11,56 olurken, EP1, EP2, EP3, EPH1 ve EPH2 yaklaşımları için sırasıyla 17,47, 17,49, 17,38, 12,76 ve 14,25 olarak belirlenmiştir. Süneklik açısından deney sonucuna en yakın sonuç EPH1 yaklaşımı ile elde edilmiştir.

- **K20KG00 Kirişi**

Birinci grup numuneler arasında sadece eğilme bölgesi güçlendirilen bu kirişte, deney sonrasında maksimum yük taşıma kapasitesi referans kirişine oranla % 54,76 artarak 80,43 kN olurken, bu yüke karşı gelen açıklık ortası düşey yer değiştirmesi % 69,48 oranında azalmış ve 35,72 mm olarak belirlenmiştir. EP1, EP2, EP3, EPH1 ve EPH2 yaklaşımları için sayısal analizler sonucunda belirlenen maksimum yük taşıma kapasiteleri sırasıyla 99,42, 98,69, 84,72, 80,83 ve 79,84 kN olarak belirlenmiş, deney çalışmasına kıyasla en yakın sonuç % 0,50'lik hata oranıyla EPH1 yaklaşımı ile elde edilmiştir. Bu yaklaşım için maksimum yüke karşı gelen açıklık ortası yer değiştirme miktarı deneysel çalışmaya kıyasla % 4,40'lik hata ile 34,15 mm olarak belirlenmiştir. Sadece çekme bölgesi sargılanan bu kiriş için deneysel çalışmada elde edilen süneklik oranı yaklaşık 2,84 olurken referans kirişine göre % 75,43 oranında bir azalma meydana gelmiştir. EP1, EP2, EP3, EPH1 ve EPH2 yaklaşımları için sayısal analizlerde elde edilen süneklik oranları ise yaklaşık olarak sırasıyla 4,8, 4,68, 4,24, 4,06 ve 3,70 bulunmuştur. Süneklik oranları deney çalışması ile kıyaslandığında en yakın sonuç % 30,28'lik hata oranıyla EPH2 yaklaşımı ile elde edilmiştir.

- **K20KG50 Kirişi**

Bu kirişte güçlendirme işlemi, eğilme bölgesi ile birlikte örtü betonunu içerisine alacak şekilde yan yüzeylerde 50 mm yükseklikte yapılmıştır. Deney çalışması neticesinde maksimum yük taşıma kapasitesi kontrol kirişine oranla % 80,03 artarak 93,56 kN değerine ulaşmıştır. Bu yük değerine karşı betonarme kirişteki açıklık ortası düşey yer değiştirme miktarı ise % 71,04 azalarak 33,88 mm

olmuştur. EP1, EP2, EP3, EPH1 ve EPH2 yaklaşımları ile gerçekleştirilen sayısal analizlerde söz konusu kirişin maksimum yük taşıma kapasiteleri sırasıyla 109,53, 108,32, 95,2, 93,45 ve 90 kN olarak belirlenmiştir. Bu yaklaşımlar arasında deneysel çalışma sonucunda elde edilen maksimum yük kapasitesine en yakın sonuç % 0,12'lik hatayla EPH1 yaklaşımıyla elde edilmiştir. Bu yaklaşım için açıklık ortası düşey yer değiştirme değeri ise % 0,50'lik hatayla 33,71 mm olarak belirlenmiştir. Kısmi sargılama yapılan söz konusu kirişte deney çalışması sonrasında süneklik oranı yaklaşık olarak 2,73 olarak bulunurken bu değer kontrol kirişine göre % 76,38 daha düşük olmuştur. EP1, EP2, EP3, EPH1 ve EPH2 yaklaşımları ile sayısal analizler sonucunda elde edilen süneklik oranları ise sırasıyla 4,39, 4,38, 3,88, 3,74 ve 3,72 şeklindedir. Deney sonucuna en yakın süneklik oranı % 36,26'lık hatayla EPH2 yaklaşımı ile elde edilmiştir.

- **K20KGU Kirişi**

Tam sargılama adı verilen yöntem ile eğilme bölgesi ve yan yüzeylerin 175 mm yükseklikte CFRP ile güçlendirildiği bu kirişte deney çalışması neticesinde maksimum yük taşıma kapasitesi referans kirişine oranla % 108,18 artarak 108,19 kN olarak bulunmuştur. Maksimum yüke karşı gelecek şekilde bu betonarme kirişin yaptığı açıklık ortası düşey yer değiştirme miktarı yine kontrol kirişine oranla % 63,12 azalarak 43,15 mm'lik değere ulaşmıştır. EP1, EP2, EP3, EPH1 ve EPH2 yaklaşımları ile gerçekleştirilen analizler neticesinde belirlenen yük taşıma kapasiteleri sırasıyla 127,42, 125,17, 114,7, 101,60 ve 100,36 kN olarak bulunmuştur. Maksimum yük kapasitesi açısından deney çalışmasına en yakın sonuç % 6.02'lik hata ile EP3 yaklaşımıyla elde edilmiştir. Bu yaklaşım için elde edilen maksimum yüke karşı gelen açıklık ortası yer değiştirme değeri deney sonucundan % 0,12 oranında daha düşük olacak şekilde 43,20 mm olarak bulunmuştur. Süneklik açısından değerlendirildiğinde deney neticesinde belirlenen süneklik oranı yaklaşık olarak 4,51 olurken, referans kirişi ile kıyaslandığında % 60,99 daha düşük olduğu belirlenmiştir. Sayısal analizler neticesinde belirlenen süneklik oranları ise EP1, EP2, EP3, EPH1 ve EPH2 için sırasıyla 5,74, 5,75, 5,20, 3,45 ve 3,72 şeklindedir. Bu değerler göz önüne

alındığında deney sonucuna en yakın süneklik oranı % 15,3'lük hata ile EP3 yaklaşımının kullanıldığı sayısal modelde elde edilmiştir.

- **K40R Kirişi**

İkinci grup numuneler için kontrol kirişi olarak kullanılan bu kiriş, 40 mm'lik örtü betonu kalınlığına sahiptir. Deney çalışması neticesinde maksimum yük taşıma kapasitesi K20R kirişine göre % 11,74 azalarak 45,87 kN olurken bu değere karşı kirişin açıklık ortası yer değiştirme miktarı 79,83 mm olmuştur. Söz konusu kiriş için EP1, EP2, EP3, EPH1 ve EPH2 yaklaşımları için ayrı ayrı gerçekleştirilen sayısal analizler neticesinde belirlenen maksimum yük taşıma kapasiteleri sırasıyla 59,4, 59,34, 49,71, 54,62 ve 48,70 kN olarak belirlenmiştir. Deney çalışması neticesinde elde edilen maksimum yük taşıma kapasitesine en yakın sonuç % 6,17'lik hatayla EPH2 yaklaşımı ile bulunmuştur. Bu yaklaşım için maksimum yüke karşı gelen yer değiştirme miktarı ise 88,31 mm olarak belirlenmiştir. Deney çalışması neticesinde bu kirişte süneklik oranı yaklaşık olarak 8,5 olurken, EP1, EP2, EP3, EPH1 ve EPH2 yaklaşımları ile gerçekleştirilen sayısal analizler neticesinde süneklik oranları yaklaşık olarak sırasıyla 11,78, 11,83, 12,12, 9,20 ve 11,55 bulunmuştur. Deney sonucu ile kıyaslandığında en yakın sonuç % 8,24'lük hatayla EPH1 yaklaşımı ile elde edilmiştir.

- **K40KG00 Kirişi**

İkinci grup numuneler arasında sadece çekme bölgesi CFRP ile güçlendirilen bu kirişte deney neticesinde elde edilen maksimum yük taşıma kapasitesi K40R kirişine göre % 67,39 artarak 76,78 kN olurken, bu yük değerine karşı gelen açıklık ortası düşey yer değiştirme değeri ise 34,63 mm bulunmuştur. EP1, EP2, EP3, EPH1 ve EPH2 yaklaşımlarıyla gerçekleştirilen sayısal analizler neticesinde söz konusu kiriş için belirlenen maksimum yük taşıma kapasiteleri sırasıyla 95,07, 94,44, 79,98, 73,05 ve 76,00 kN bulunmuştur. Bu yaklaşımlar arasında deneysel olarak elde edilen maksimum yük kapasitesi değerine en yakın sonuç % 1,02'lik hata ile EPH2 yaklaşımının kullanıldığı sayısal modelde elde edilmiştir. EPH2 yaklaşımı için maksimum yük değerine karşı gelen açıklık ortası yer değiştirme

miktarı ise 31,99 mm olarak bulunmuştur. Deney çalışması sonrasında söz konusu kirişin süneklik oranı yaklaşık olarak 2,24 olurken, EP1, EP2, EP3, EPH1 ve EPH2 yaklaşımlarının kullanıldığı sayısal modellerde bu değer sırasıyla 4,47, 4,47, 3,91, 3,33 ve 3,91 olarak bulunmuştur. Söz konusu yaklaşımlar dikkate alındığından süneklik açısından deney çalışmasına en yakın sonuç % 48,66'lık hatayla ile EPH1 yaklaşımı ile elde edilmiştir.

- **K40KG70 Kirişi**

Eğilme bölgesi ile birlikte kiriş yan yüzeylerinin 70 mm yükseklikte CFRP ile sargılandığı bu kirişte, deneysel çalışma neticesinde kirişin maksimum yük taşıma kapasitesi K40R kirişine göre % 99,32 artarak 91,43 kN'luk değere ulaşmıştır. Bu yük kapasitesine karşı gelen açıklık ortası yer değiştirme miktarı ise 33,82 mm olmuştur. EP1, EP2, EP3, EPH1 ve EPH2 yaklaşımları için yapılan sayısal analizlerde kirişin maksimum yük taşıma kapasitesi sırasıyla 107,13, 105,92, 92,52, 92,88 ve 89,45 kN olmuştur. Deneysel çalışma ile kıyaslandığında maksimum yük taşıma kapasitesini en başarılı şekilde tahmin edebilen yaklaşım % 1,19'luk hata ile EP3 yaklaşımı olurken, bu yaklaşım için kirişin bu yük değerine karşı yaptığı açıklık ortası yer değiştirme miktarı 33,65 mm olarak bulunmuştur. Deneysel çalışmada betonarme kirişin süneklik oranı yaklaşık 2,47 iken, EP1, EP2, EP3, EPH1 ve EPH2 yaklaşımları için bulunan süneklik oranları sırasıyla 3,60, 3,60, 3,47, 3,57 ve 3,44'tür. Bu yaklaşımlar için bulunan süneklik oranlarının deney çalışması ile kıyaslanması durumunda en başarılı sonucun % 39,27'lik hata ile EPH2 yaklaşımının kullanıldığı sayısal analizler ile elde edilebileceği belirlenmiştir.

- **K40KGU Kirişi**

40 mm örtü betonu kalınlığına sahip ve U şeklinde tam sargılama yöntemi ile güçlendirilen bu kirişte, deney çalışması sonucunda 98,95 kN'luk maksimum yük taşıma kapasitesine ulaşılmıştır. Bu yük değeri K40R kirişi ile kıyaslandığında % 115,72'lik bir artışın olduğu belirlenirken bu değere karşı gelen yer değiştirme değeri 40,06 mm olmuştur. EP1, EP2, EP3, EPH1 ve EPH2 yaklaşımlarının kullanıldığı sayısal analizler sonucunda betonarme kirişin maksimum yük taşıma

kapasitesi sırasıyla 120,72, 118,58, 108,88, 92,02 ve 93,63 kN olarak bulunmuştur. Bu yaklaşımlar arasında deney sonucuna en yakın maksimum yük kapasitesi değeri % 5,38'lik hatayla EPH2 yaklaşımı ile elde edilmiştir fakat bu yaklaşımın kullanıldığı sayısal modelde bu yük değerine karşı gelen açıklık ortası yer değiştirmesi miktarı deney sonucundan % 24,36 daha düşük olacak şekilde 30,30 mm bulunmuştur. Deney çalışmasında bu kirişin süneklik oranı yaklaşık 2,84 bulunurken, EP1, EP2, EP3, EPH1 ve EPH2 yaklaşımları için sayısal analizler sonrasında bulunan oranlar sırasıyla 4,58, 4,59, 4,34, 2,64 ve 3,19 şeklindedir. Bu yaklaşımlar ile elde edilen süneklik oranı değerleri deney sonrasında elde edilen sonuç ile kıyaslandığında % 7,04'lük hata oranıyla en başarılı sonuç EPH1 yaklaşımı ile elde edilmiştir.

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışması kapsamında, CFRP ile farklı şekillerde güçlendirilmiş betonarme kirişler için farklı bünyesel modelleme teknikleri kullanılarak sayısal analizler yapılmış ve sonuçlar irdelenmiştir. Bünyesel modelleme çalışmasının ilk kısmında, çekme donatısı altında kalan, çok düşük çekme gerilmeleri etkisiyle çatlayan ve bu nedenle tasarım hesapları yapılırken dikkate alınmayan örtü betonu için sanal malzeme modeli kabulü yapılmış, betonun elasto-plastik hasar (EPH1) davranışını temsil edebilmek için geliştirilmiş von Mises kırılma kriteri ve Oliver izotropik hasar modeli birlikte dikkate alınmıştır. Bu kapsamda örtü betonu için bünyesel malzeme modelinin ihtiyaç duyduğu parametreler parametrik çalışmalar sonucunda belirlenmiştir. LUSAS yazılımı ile yük kontrollü olarak gerçekleştirilen üç boyutlu doğrusal olmayan sonlu eleman analizlerinde, beton ve güçlendirme malzemesi olan CFRP için hexahedral (HX8M) katı elemanlar kullanılırken donatı çeliği için iki düğüm noktalı çubuk elemanı (BRS2) kullanılmıştır.

Bünyesel modelleme çalışmasının ikinci kısmında, beton için ilk olarak Lubliner vd. (1989) tarafından önerilen daha sonra Lee ve Fenves (1998) tarafından geliştirilmiş olan CDP bünyesel malzeme modeli kullanılmıştır. Bu kapsamda, beton için elastoplastik ve elastoplastik hasar yaklaşımları kullanılmıştır. Elastoplastik malzeme kabulünde betonun üç farklı gerilme birim şekil değiştirme ilişkisi (EP1, EP2 ve EP3) dikkate alınarak sayısal modeller oluşturulmuştur. Elastoplastik hasar yaklaşımında (EPH2) ise plastik malzeme

modeline ek olarak CDP bünyesel malzeme modelinin önerdiği şekilde çekme ve basınç etkisinde oluşacak rijitlik kaybı için hasar parametreleri ayrı ayrı belirlenmiş ve sayısal analizler gerçekleştirilmiştir. ABAQUS yazılımı ile yer değiştirme kontrollü olarak gerçekleştirilen doğrusal olmayan sonlu eleman analizlerinde, beton üç boyutlu gerilme eleman (C3D8R), donatı çeliği üç boyutlu çubuk eleman (T3D2), CFRP ise dört düğüm noktalı kabuk eleman (S4R) ile temsil edilmiştir.

Bu tez çalışması kapsamında genel olarak aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

- Bünyesel modelleme çalışması kapsamında, örtü betonu için sanal malzeme modeli kabulü ile elastoplastik hasar yaklaşımının dikkate alındığı sayısal modeller ve CDP bünyesel malzeme modeli ile betonun farklı gerilme birim şekil değiştirme davranışları için oluşturulan sayısal modeller ile gerçekleştirilen analiz sonuçlarının deney sonuçları ile benzer eğilimde olduğu belirlenmiştir.
- Elastoplastik hasar yaklaşımlarının (EPH1 ve EPH2) dikkate alındığı modellerde doğrusal olmayan sonlu eleman analizlerinin sonlandırılması için özellikle kirişlerin güçlendirilmesi durumunda örtü betonunun belirleyici olduğu tespit edilmiştir. Bu nedenle EPH1 yaklaşımının kullanıldığı sayısal modellerde örtü betonu için geliştirilen zayıflatılmış sanal malzeme yaklaşımında kırılma enerjisi değerine ulaşıldığı zamana kadar analizler devam ettirilmiştir. Kiriş üzerindeki en kritik bölgede (sanal malzeme – örtü betonu) gerilme – birim şekil değiştirme ilişkilerinden faydalanarak kırılma enerjileri hesaplanmış ve bu değerler hesap yöntemi ile belirlenen G_f değerlerine ulaştığı zaman analizler sonlandırılmıştır. Bünyesel modelleme çalışmasının ikinci kısmında EPH2 yaklaşımı ile oluşturulan sayısal modellerde analizler EPH1 yaklaşımı için kırılma enerjisi değerlerinden faydalanılarak belirlenen analizlerin sonlandırıldığı yer değiştirme değerinde sonlandırılmıştır. EP1, EP2 ve EP3 yaklaşımlarının kullanıldığı sayısal analizlerde ise analizler deney numunelerinin nihai yer değiştirme değerlerine kadar devam ettirilmiştir.
- Sayısal analizler sonrasında, artan örtü betonu kalınlığının betonarme kirişlerin yük taşıma kapasitesi ve yer değiştirme kabiliyetlerini olumsuz yönde etkilediği

belirlenmiştir. Ayrıca kontrol kirişlerine kıyasla CFRP ile sargılanan kirişlerde sargı miktarının artışı ile doğru orantılı olarak yük taşıma kapasitesinin arttığı ancak kirişlerin açıklık ortası yer değiştirme miktarlarının ve süneklik oranı değerlerinin önemli oranda azaldığı tespit edilmiştir. Buna rağmen güçlendirme biçimleri arasında yapısal elemandan istenilen seviyede bir sünek davranışın elde edilebilmesi için CFRP ile yapılan tam sargı biçiminin diğer güçlendirme biçimlerine göre süneklik oranını daha fazla arttıracığı düşünülmektedir.



KAYNAKLAR

- [1] Triantafillou, T.C., (1998). "Shear Strengthening of Reinforced Concrete Beams Using Epoxy-Bonded FRP Composites", *Structural Journal*, 95(2): 107-115.
- [2] Norris, T., Saadatmanesh, H. ve Ehsani, M.R., (1997). "Shear and Flexural Strengthening of R/C Beams with Carbon Fiber Sheets", *Journal of Structural Engineering*, 123(7): 903-911.
- [3] Khalifa, A. ve Nanni, A., (2000). "Improving Shear Capacity of Existing RC T-Section Beams Using CFRP Composites", *Cement and Concrete Composites*, 22(3): 165-174.
- [4] Sena-Cruz, J.M., Barros, J.A.O., Coelho, M.R.F. ve Silva, L.F.F.T., (2012). "Efficiency of Different Techniques in Flexural Strengthening of RC Beams under Monotonic and Fatigue Loading", *Construction and Building Materials*, 29: 175-182.
- [5] Zhang, Z. ve Hsu, C.T., (2005). "Shear Strengthening of Reinforced Concrete Beams Using Carbon-Fiber-Reinforced Polymer Laminates", *Journal of Composites for Construction*, 9(2): 158-169.
- [6] Li, L.J., Guo, Y.C., Liu, F. ve Bungey, J.H., (2006). "An Experimental and Numerical Study of the Effect of Thickness and Length of CFRP on Performance of Repaired Concrete Beams", *Construction and Building Materials*, 20(10): 901-909.
- [7] Attari, N., Amziane, S. ve Chemrouk, M., (2012). "Flexural Strengthening of Concrete Beams Using CFRP, GFRP and Hybrid FRP Sheets", *Construction and Building Materials*, 37: 746-757.
- [8] 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.
- [9] 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.

- [10] Niu, H. ve Wu, Z., (2005). "Numerical Analysis of Debonding Mechanisms in FRP-Strengthened RC Beams", *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 20(5): 354-368.
- [11] Oliver, J., Cervera, M., Oller, S. and Lubliner, J., (1990). Isotropic Damage Models and Smeared Crack Analysis of Concrete, *Proc. 2nd ICCAADCS (2)*, 945-958.
- [12] Lee, J. ve Fenves, G.L., (1998). "Plastic-Damage Model for Cyclic Loading of Concrete Structures", *Journal of Engineering Mechanics*, 124(8): 892-900.
- [13] Lubliner, J., Oliver, J., Oller, S. ve Onate, E., (1989). "A Plastic-Damage Model for Concrete", *International Journal of Solids and Structures*, 25(3): 299-326.
- [14] Comi, C. ve Prego, U., (2001). "Fracture Energy Based Bi-Dissipative Damage Model for Concrete", *International Journal of Solids and Structures*, 38(36-37): 6427-6454.
- [15] Oller, S., Onate, E., Oliver, J. ve Lubliner, J., (1990). "Finite Element Nonlinear Analysis of Concrete Structure Using a Plastic-Damage Model", *Engineering Fracture Mechanics*, 35(1-3): 219-231.
- [16] Mazars, J., (1986). "A Description of Micro and Macroscale Damage of Concrete Structures", *Engineering Fracture Mechanics*, 25(5-6):729-737.
- [17] 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(12):8573-8584.
- [18] Bsisu, K.A., Hussein, H.H. ve Sargand, S.M., (2017). "The Use of Hashin Damage Criteria, CFRP-Concrete Interface and Damage Plasticity Models in 3D Finite Element Modeling of Retrofitted Reinforced Concrete Beams with CFRP Sheets", *Arab Journal for Science and Engineering*, 42(3):1171-1184.
- [19] 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 Material*, 51(4):437-446.
- [20] Venkateswarlu, C. ve Natarajan, C., (2015). "Performance Assesment of RC Beams with CFRP and GFRP Sheets", *Advances in Structural Engineering*, 3: 1987-2000.
- [21] Tao, Y. ve Chen, J.F., (2015). "Concrete Damage Plasticity Model for Modeling FRP to Concrete Bond Behavior", *Journal of Composites for Construction*, 19(1): 04014026
- [22] Coronado, C.A. ve Lopez, M.M., (2007). "Damage Approach for the Prediction of Debonding Failure on Concrete Elements Strengthened with FRP", *Journal of Composites for Construction*, 11(4):391-400.
- [23] Obadiat, Y.T., Heyden, S. Ve Dahlblom, O., (2010). "The Effect of CFRP and CFRP/Concrete Interface Models When Modelling Retrofitted RC Beams with FEM", *Composite Structures*, 92(6):1391-1398.

- [24] Hawileh, R.A., (2012). "Nonlinear Finite Element Modeling of RC Beams Strengthened with NSM FRP Rods", *Construction and Building Materials*, 27(1):461-471.
- [25] Omran, H.Y. ve El-Hacha, R., (2010). "Finite Element Modeling of RC Beams Strengthened in Flexure with Prestressed NSM CFRP Strips", *The 5th International Conference on FRP Composites in Civil Engineering*, 27-29 September 2010, Beijing, 718-721.
- [26] Chen, G.M., Chen, J.F. ve Teng, J.G., (2012). "On the Finite Element Modelling of RC Beams Shear-Strengthened with FRP", *Construction and Building Materials*, 32:13-26.
- [27] Sasmal, S., Kalidoss, S. ve Srinivas, V., (2012). "Nonlinear Finite Element Analysis of FRP Strengthened Reinforced Concrete Beams", *Journal of the Institution of Engineers (India)*, 93(4):241-249.
- [28] Kotynia, R., Baky, H.A., Neale, K.W. ve Ebead, U.A., (2008). "Flexural Strengthening of RC Beams with Externally Bonded CFRP Systems: Test Results and 3D Nonlinear FE Analysis", *Journal of Composites for Construction*, 12(2):190-201.
- [29] Martinelli, E., Napoli, A., Nunziata, B. ve Realfonzo, R., (2014). "RC Beams Strengthened with Mechanically Fastened Composites: Experimental Results and Numerical Modeling", *Journal of Polymer Science*, 6:613-633.
- [30] Soliman, S.M., El-Salakawy, E. ve Benmokrane, B., (2010). "Flexural Behaviour of Concrete Beams Strengthened with Near Surface Mounted Fibre Reinforced Polymer Bars", *Canadian Journal of Engineering*, 37(10):1371-1382.
- [31] Abdesselam, Z., (2012). "Numerical Modeling of Strengthened Concrete Beams", *International Journal of Civil and Structural Engineering*, 2(4):1122-1128
- [32] Jankowiak, I., (2012). "Analysis of RC Beams Strengthened by CFRP Strips – Experimental and FEA Study", *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 12(3):376-388.
- [33] Hawileh, R.A., El-Maaddawy, T.A. ve Naser, M.Z., (2012). "Nonlinear Finite Element Modeling of Concrete Deep Beams with Openings Strengthened with Externally Bonded Composites", *Materials and Design*, 42:378-387.
- [34] FEA Ltd, (2015). LUSAS Finite Element System, Surrey, United Kingdom.
- [35] Dassault Systems Simulia, (2014). ABAQUS Software, United States of America.
- [36] Mallick, P.K., (2007). *Fiber Reinforced Composites Materials Manufacturing and Design*, Third Edition, CRC Press, New York.
- [37] Günaslan, S.E., Karaşin, A. ve Öncü, M.E., (2014). "Properties of FRP Materials for Strengthening", *International Journal of Innovative Science Engineering and Technology*, 1(9): 656-660.

- [38] Pilato, L.A., Michno, M.J., (1994). Advance Composite Materials, ISBN: 9783540575634, Springer Science and Business Media, Berlin.
- [39] Kutz, M., (2015). Mechanical Engineers' Handbook Materials and Engineering Mechanics, Fourth Edition, John Wiley and Sons, New Jersey.
- [40] Nijssen, R.P.L., (2015). Composite Materials, First Edition, VKCN Publication, Netherlands.
- [41] Holloway, L.C. ve Teng, J.G., (2008). Strengthening and Rehabilitation of Civil Infrastructures Using Fibre Reinforced Polymer (FRP) Composites, First Edition, Woodhead Publishing, Cambridge.
- [42] Balasubramanian, M., (2013). Composite Material and Processing, ISBN: 9781439880548, CRC Press, Florida.
- [43] Sloan, J., (2016). Composites 101: Fibers and Resins, <https://www.compositesworld.com/articles/composites-101-fibers-and-resins>, 4 Ağustos 2018.
- [44] Dorworth, L.C., Gardiner, G.L. ve Mellema, G.M., (2009). Essentials of Advanced Composite Fabrication and Repair, ISBN: 9781560277521, Aviation Supplies and Academic, United States of America.
- [45] Ataş, C., Kompozit Üretim Teknolojileri Ders Notları, <http://kisi.deu.edu.tr/cesim.atas/>, 4 Ağustos 2018.
- [46] Hoa, S.V., (2009). Principles of the Manufacturing of Composite Materials, ISBN: 9781932078268, DEStech Publications, Pennsylvania.
- [47] Campbell, F.C., (2010). Structural Composite Materials, ISBN: 9781615030378 First Edition, ASM International, United States of America.
- [48] Clyne, T.W. ve Withers, P.J., (1993), An Introduction to Metal Matrix Composites, ISBN: 0521418089, Cambridge University Press, New York.
- [49] Onat, A., (2015). Kompozit Malzemeler Ders Notu, http://content.lms.sabis.sakarya.edu.tr/Uploads/78375/31395/kompozit_malzemeler_ders_notu.pdf, 5 Ağustos 2018.
- [50] Tuncel, D. (2015). Balpeteği Kompozitler, <https://www.slideshare.net/DuranTuncel1/balpetei-kompozitler-56210673>, 13 Ağustos 2018.
- [51] Black, S., (2018). Hybrid Composites: Tailoring for Specific Performance, <https://www.compositesworld.com/blog/post/hybrid-composites-tailoring-for-specific-performance->, 4 Ağustos 2018.
- [52] Bank, L.C., (2006). Composite for Construction Structural Design with FRP Materials, ISBN: 9780471681267, John Wiley and Sons, New Jersey.
- [53] Carolin, A., (2003). Carbon Fibre Reinforced Polymers for Strengthening of Structural Elements, Doctoral Dissertation, Lulea University of Technology Department of Civil and Mining Engineering, Sweden.
- [54] Nanni, A., (1993), Fiber Reinforced Plastic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures, Elsevier Science Publishers B.V, Amsterdam.

- [55] Brigante, D., (2014). New Composite Materials: Selection Design and Applications, ISBN: 9783319016375, Springer Science and Business Media, Switzerland.
- [56] Chawla,K.K., (2012). Composite Materials: Science and Engineering, ISBN: 9780387743653 Third Edition, Springer Science and Business Media, New York.
- [57] Strong, A.B., (2008). Fundamentals of Composite Manufacturing Materials Methods and Applications, Second Edition ISBN: 9780872638549, Society of Manufacturing Engineers, United States of America.
- [58] Zor, M., (2018). Kompozit Malzemelerle ilgili Genel Bilgiler, http://kisi.deu.edu.tr//mehmet.zor/composite%20materials/2-Genel_bilgiler.pdf, 5 Ağustos 2018.
- [59] Sapuan, S.M., (2017). Composite Materials: Concurrent Engineering Approach, ISBN: 9780128026458, Elsevier, Cambridge.
- [60] Hebei Maple Fiberglass Industry Co. Limited, How are FRP/GRP Pipe Filament Winding Machine Working, <http://www.frpmachining.com/faqs/frpgrp-pipe-filament-winding-machine>, 13 Ağustos 2018.
- [61] Katcon Advanced Materials, HP-RTM (High Pressure Resin Transfer Molding), <http://www.katcon.com/advancedmaterials/hp-rtm-high-pressure-resin-transfer-molding/>, 13 Ağustos 2018.
- [62] Advanced Composites Inc. ,Compression Molding, <https://advancedcomposites.com/composites-manufacturing/compression-molding/>, 17 Ekim 2017.
- [63] Slideshare, Composite Moulding Technique, <https://www.slideshare.net/corematerials/composite-forming-techniques>, 13 Ağustos 2018.
- [64] Uddin,N., (2013). Developments in Fiber Reinforced Polymer (FRP) Composites for Civil Engineering, First Edition ISBN: 9780857098955, Woodhead Publishing Limited, Cambridge.
- [65] CSIR-National Aerospace Laboratories, Resin Transfer Moulding Processes, <https://www.nal.res.in/en/techniques/resin-transfer-moulding-processes>, 13 Ağustos 2018.
- [66] Tuatka, C., (2005). Use of Fiber Reinforced Polymer Composite in Bridge Structures, Master Thesis, Massachusetts Institute of Technology Civil and Environmental Engineering, Cambridge.
- [67] Fib Bulletin 14, (2007). FRP Reinforcement in RC Structures, Technical Report, Switzerland.
- [68] ACI Committee 440, (2008). Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures, ACI, First Printing, United States of America.

- [69] Karbhari, V.M., Chin, J.W., Hunston, D., Benmokrane, B., Juska, T., Morgan, R., Lesko, J.J., Sorathia, U. ve Reynaud, D., (2003). "Durability Gap Analysis for Fiber Reinforced Polymer Composites in Civil Infrastructure", *Journal of Composites for Construction*, 7(3): 238-247.
- [70] Hollaway, L.C., (2010). "A Review of the Present and Future Utilisation of FRP Composites in the Civil Infrastructure with Reference to Their Important in Service Properties", *Construction of Building Materials*, 24(12): 2419-2445.
- [71] Hackman, I. ve Hollaway L.C., (2006). "Epoxy Layered Silicate Nanocomposites in Civil Engineering. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 37(8):1161–1170.
- [72] Friberg, E. ve Olsson, J., (2014). Application of Fibre Reinforced Polymer Materials in Road Bridges - General Requirements and Design Considerations, Master Thesis of Structural Engineering and Building Technology Programmes, Chalmers University of Technology, Göteborg.
- [73] Altun, F., Vekli, M., Özcan, D.M. ve Haktanır, T., (2002). " Mantolu Betonarme Kirişlerin Taşıma Gücünün Deneysel İncelenmesi", ECA2002 Uluslararası Yapı ve Deprem Mühendisliği Sempozyumu, 14 Ekim 2002, Ankara.
- [74] Celep, Z. ve Kumbasar, N., (2000). Deprem Mühendisliğine Giriş ve Depreme Dayanıklı Yapı Tasarımı, Beta Dağıtım, İstanbul.
- [75] Bayülke, N., (1984). Depremlerde Hasar Gören Yapıların Onarım ve Güçlendirilmesi, İnşaat Mühendisleri Odası, Ankara.
- [76] Alkan Çakıroğlu, M., (2007). Betonarme Kirişlerin Güçlendirilmesinde Püskürtme Betonun Alternatif Bir Yöntem Olarak Kullanılması, Doktora Tezi, SDÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- [77] Yiğit, Y., (2002). Betonarme Yapılarda Onarım ve Güçlendirme Yöntemleri ve Bir Güçlendirme Uygulaması, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [78] Keskin, E., (2005). Betonarme Yapıların Onarımı, Güçlendirmesi ve Lifle Güçlendirilmiş Polimerler, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [79] Demir, H., (1999). Depremde Hasar Görmüş Betonarme Yapıların Onarım ve Güçlendirilmesi, Emlak Pazarlama ve Proje Yönetimi ve Servis A.Ş., İstanbul.
- [80] Ersoy, U., (2007). "Betonarme Yapıların Onarımı ve Güçlendirilmesi Uygulama ve Araştırmalar", Altıncı Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, 16-20 Ekim 2007, İstanbul.
- [81] Acar, D., (2014). Çelik Levha ve Karbon Kumaşlarla Güçlendirilmiş Betonarme Kirişlerin Davranış ve Dayanımı, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [82] Öztürk, H., (1998). Betonarme Yapılarda Onarım ve Güçlendirme Teknikleri ve Çeşitli Tekniklerle Onarılıp Güçlendirilen Betonarme Kirişlerin Davranışlarının

Karşılaştırılmalı Olarak İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.

- [83] Khalifa, A., Gold, W.J., Nanni, A. ve Abdel Aziz, M.I., (1998). "Contribution of Externally Bonded FRP to Shear Capacity of RC Flexural Members", *Journal of Composite for Construction*, 2(4): 195-202.
- [84] Fib Bulletin 14, (2001). Externally Bonded FRP Reinforcement for RC Structures, Technical Report, Switzerland.
- [85] Esfahani, M.R., Kianoush, M.R. ve Tajari, A.R., (2007). "Flexural Behaviour of Reinforced Concrete Beams Strengthened by CFRP Sheets", *Engineering Structures*, 29(10): 2428-2444.
- [86] Leung, C.K.Y., Chen, Z., Lee, S., Ng, M., Xu, M. ve Tang, J., (2007). "Effect of Size on the Failure of Geometrically Similar Concrete Beams Strengthened in Shear with FRP Strips", *Journal of Composites for Construction*, 11(5): 487-496.
- [87] Asplund, S.O., (1949). "Strengthening Bridge Slabs with Grouted Reinforcement", *Journal Proceedings*, 45(1): 397-406.
- [88] De Lorenzis, L. Ve Teng, J.G., (2007). "Near – Surface Mounted Reinforcement: An Emerging Technique for Strengthening Structures", *Composite Part B: Engineering*, 38(2): 119-143.
- [89] Soliman, S.M., El-Salakawy, E. ve Benmokrane, B., (2010). "Flexural Behaviour of Concrete Beams Strengthened with Near Surface Mounted Fibre Reinforced Polymer Bars", *Canadian Journal of Engineering*, 37(10): 1371-1382.
- [90] Barros, J.A.O., Dias, S.J.E. ve Lima, J.L.T., (2007). "Efficacy of CFRP Based Techniques for the Flexural and Shear Strengthening of Concrete Beams", *Cement and Concrete Composites*, 29(3): 203-217.
- [91] Hassan, T. ve Rizkalla, S., (2003). "Investigation of Bond in Concrete Structures Strengthened with Near Surface Mounted Carbon Fiber Reinforced Polymer Strips", *Journal of Composites for Construction*, 7(3): 248-257.
- [92] Hassan, T.K. ve Rizkalla, S.H., (2004). "Bond Mechanism of NSM FRP Bars for Flexural Strengthening of Concrete Structures", *Structural Journal*, 101(6): 830-839.
- [93] Dalyan, İ., (2019). Lifli Polimerle Farklı Biçimlerde Güçlendirilmiş Betonarme Kirişlerin Eğilme Performansının Belirlenmesi, Doktora Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [94] LUSAS Software, Software Information and Products, <http://www.lusas.com/>, 26 Aralık 2018.
- [95] Aktan, S., (2016). Düzlem İçi Yükler Etkisindeki Yığma Duvarlarda Bünyesel Modelleme, Doktora Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

- [96] Rogget, T.R. ve Sieck, C.F., (1983). "The Use of Nonsap to Compare the von Mises and Modified von Mises Yield Criteria", Computer and Structures, 17(5-6):705-710.
- [97] Ayaydın, M., Dalyan, İ. ve Doran, B., (2018). "Nonlinear Analysis of RC Beams Wrapped with CFRP", 3. International Conference on Civil and Environmental Engineering", 24-27 April 2018, Cesme.
- [98] Kachanov, L.M., (1958). "On the Creep Fracture Time", Izv. Akad. Nauk USSR Otd. Tech., (in Russian), 8: 26-31.
- [99] Rabotnov, I. N., (1963). "On the equations of state for creep", Progress in applied mechanics-the prager anniversary volume, MacMillan, New York, 307-315.
- [100] Lemaitre, J. ve Chaboche, J.L., (1975). "A Nonlinear Model of Creep Fatigue Cumulation and Interaction", Proc. IUTAM, Symposium on Mechanics of Viscoelastic Media and Bodies, 291-301.
- [101] Hult, J., (1974). "Creep in Continua and Structures", Topics in Applied Continuum Mechanics, Springer, N.Y., 137.
- [102] Leckie, F.A. ve Hayhurst, D., (1974). "Creep Rupture of Structures", Proc. Royal Society, A340: 323-347.
- [103] Lemaitre, J., (1971). "Evaluation of Dissipation and Damage in Metals Submitted to Dynamic Loading", ICM 1, Kyoto, Japan.
- [104] Chaboche, J. L., (1974). "Une Loi Differentielle d 'Endommagement de Fatigue avec Cumulation Non-lineaire", Rev. Francaise Mecanique, 50-51.
- [105] Kolari, K., (2007). Damage Mechanics Model for Brittle Failure of Transversely Isotropic Solids (Finite Element Implementation), VTT Publications 628, Espoo, Finland.
- [106] Koksai, H.O. ve Karakoç, C., (1999). "An Isotropic Damage Model for Concrete", International Journal of Solids and Structures, 25(3): 299-326
- [107] Koksai, H.O., Doran, B., Ozsoy, A.E. ve Alacalı, S.N., (2004). "Nonlinear Modeling of Concentrically Loaded Blockwork Masonry Columns", Canadian Journal of Civil Engineering, 31: 1012-1023.
- [108] General Information About ABAQUS, PDC Software Documentation, <https://www.pdc.kth.se/software/software/Abaqus/index.html>, 13 Aralık 2018.
- [109] ABAQUS Analysis User's Guide (6.14), Dassault Systems Simulia, RI, USA.
- [110] Jankowiak, T. ve Lodygowski, T., (2005). "Identification of Parameters of Concrete Damaged Plasticity Constitutive Model", Foundations of Civil and Environmental Engineering, 6: 53-69.
- [111] Tao, Y. ve Chen, J.F., (2015). "Concrete Damaged Plasticity Model for Modeling FRP to Concrete Bond Behavior", Journal of Composites for Construction, 19(1).

- [112] Eurocode 2: Design of Concrete Structures, (2004). Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings, Brussels.
- [113] Wang, T. ve Hsu, T.T.C., (2001). "Nonlinear Finite Element Analysis of Concrete Structures Using New Constitutive Models", Computers and Structures, 79(32): 2781-2791.



ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Mehmet AYAYDIN
Doğum Tarihi ve Yeri : 30.05.1992, Erzincan
Yabancı Dili : İngilizce
E-posta : mehmet_ayaydin@hotmail.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Lisans	İnşaat Mühendisliği	Yıldız Teknik Üniversitesi	2016
Lise	Fen Bilimleri	Özel Otlukbeli Hacı Ali Akın Lisesi	2010

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
2016-2017	Biskon Yapı A.Ş	İnşaat Mühendisi

YAYINLARI

Bildiri

1. Ayaydın, M., Dalyan, İ. ve Doran, B., “Nonlinear Analysis of RC Beams Wrapped with CFRP”, 3. International Conference on Civil and Environmental Engineering, İzmir, Cesme, 24-27 April 2018, pp.1-12.

