

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

**I-KESİTLİ ÇELİK-BETONARME KOMPOZİT KİRİŞLERİN
HM-CFRP İLE ONARIM VE GÜÇLENDİRİLMESİNE
YÖNELİK METOT GELİŞTİRİLMESİ**

DOKTORA TEZİ

İnş.Müh. Elif AĞCAKOCA

Enstitü Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

Enstitü Bilim Dalı : YAPI

Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Muharrem AKTAŞ

Şubat 2012

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**I KESİTLİ ÇELİK-BETONARME KOMPOZİT
KİRİŞLERİN HM-CFRP İLE ONARIM VE
GÜÇLENDİRİLMESİNE YÖNELİK METOT
GELİŞTİRİLMESİ**

DOKTORA TEZİ


İnşaat Y. Müh. Elif AĞCAKOCA

Enstitü Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

Bu tez ... /... /2012 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.



**Prof. Dr.
Muhammed TEKİN
Jüri Başkanı**



**Yrd. Doç. Dr.
Muharrem AKTAŞ
Üye**



**Doç. Dr.
A.Necati YELGİN
Üye**



**Doç. Dr.
Mehmet SARIBIYIK
Üye**



**Doç. Dr.
Murat PALA
Üye**

TEŞEKKÜR

Öncelikle tez çalışmalarım sırasında benden bilgi ve yardımlarını esirgemeyen, her aşamada şevkle ve heyecanla bizzat çalışmaların içinde bulunan, dürüstlüğü ve çalışkanlığı ile örnek bir insan olan tez danışmanım Yrd. Doç. Dr. Muharrem AKTAŞ'a en içten teşekkürü bir borç bilirim.

Çalışmalarımnda, anlayışı, sabrı ve bilgisi ile her zaman yanımda olan hayat arkadaşşıma, eşime minnettirim.Yorucu tez çalışmam sırasında yeterince zaman ayıramadığıım, en güzel anlarında yanımda olamadığıım oğluma da sevgilerimi sunarım.

Hayatım boyunca bana her konuda destek olan anneme, babama ve kardeşlerime, ayrıca kısa süre önce kaybettiğıim sevgili babaanneme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Zor zamanlarımda bana gösterdikleri destek ve anlayıştan dolayı, başta Yrd. Doç. Dr. Yusuf SÜMER olmak üzere, sevgili mesai arkadaşlarıma da teşekkür ederim.

Sakarya Üniversitesi BAP Komisyonuna, Tabossan, YKS, As Cıvata, Gurit, Siemens şirketlerine tezime verdikleri destekten dolayı teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	.ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	ix
TABLolar LİSTESİ	xiii
ÖZET.....	xv
SUMMARY.....	xvi

BÖLÜM 1.

GİRİŞ	1
1.1. Literatür Çalışması	4
1.1.1. FRP malzemesinin çelikle birleşim detaylarının incelenmesi	4
1.1.2. Kirişlerin güçlendirilmesinde FRP kullanımı	6
1.1.3. FRP malzemesinin farklı yerlerde kullanımı	13
1.2. FRP'ye Genel Bakış	15

BÖLÜM 2.

KOMPOZİT KİRİŞLER.....	18
2.1. Çalışmada Kullanılan Kompozit Kiriş ve Tasarımı.....	19
2.2. Kompozit Kiriş – Çelik Levhalı Kiriş Benzeşimi	22

BÖLÜM 3.

DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	26
3.1. Giriş.....	26
3.2. Malzeme Özellikleri.....	27
3.2.1. Betonun malzeme özellikleri	27
3.2.2. Çeliğin malzeme özelliği	28

3.2.3. Yapıştırıcı malzemesinin tayini ve özelliği.....	29
3.2.3.1. MBT-Mbrace Laminate Adesivo marka yapıştırıcı deneyleri	30
3.2.3.2. Sikadur-30 marka yapıştırıcı deneyleri	31
3.2.3.3. Spabond 345 marka yapıştırıcı deneyleri	32
3.2.4. HM-CFRP'nin malzeme özellikleri.....	33
3.3. Deney Ekipmanlarının Özellikleri	34
3.4. Deney Düzenineğinin Hazırlanması	35
3.5. Deney Kirişlerinin Hazırlanması	37
3.5.1. Kompozit kirişin hazırlanması.....	37
3.5.1.1. Kayma kamalarının hazırlanması	37
3.5.1.2. Sac kalıp hazırlanması.....	38
3.5.1.3. Hasır donatının hazırlanması.....	39
3.5.1.4. Beton dökümü	41
3.5.2. Çelik kirişin hazırlanması	42
3.5.3. HM-CFRP ile güçlendirilmiş kirişin hazırlanması	42
3.6. Kiriş Eğilme Deneyleri	43
3.6.1. Kompozit kiriş deneyi.....	43
3.6.2. Referans kiriş deneyi.....	46
3.6.3. HM-CFRP ile güçlendirilmiş kiriş deneyi	50

BÖLÜM 4.

DOĞRUSAL OLMAYAN SONLU ELEMANLAR ANALİZİ VE NUMERİK

MODELİN DOĞRULANMASI	55
4.1. Doğrusal Olmayan Sonlu Eleman Analizi.....	55
4.1.1. Implicit (standart) çözüm - explicit (kesin) çözüm.....	57
4.1.2. Malzeme modelleri	57
4.1.2.1. Çelik malzeme modeli.....	57
4.1.2.2. HM-CFRP malzeme modeli	59
4.1.2.3. Arayüz malzeme modeli.....	61
4.1.2.4. Yapıştırıcı malzeme modeli.....	62
4.1.3. Sonlu elemanlar modeli eleman tipleri	65
4.1.3.1. S4R eleman tipi	66

4.1.3.2. C3D8R eleman tipi	67
4.1.3.3. COH3D8 eleman tipi	67
4.1.4. Geometrik modelleme ve sınır şartları	68
4.1.4.1. Sonlu eleman ağı sıklığı	68
4.2. Numerik Modelin Doğrulanması	70
4.2.1. Deneylele Numerik Modellerin Karşılaştırılması	71
4.2.1.1. Referans kiriş deney-numerik model karşılaştırması	71
4.2.1.2. HM-CFRP ile güçlendirilmiş kiriş deney-numerik model karşılaştırması	73
BÖLÜM 5.	
PARAMETRİK ÇALIŞMA	78
5.1. Faydalı Mesafenin Kiriş Dayanımına Katkısı	80
5.1.1. IPE 160 kiriş	80
5.1.2. IPE 270 kiriş	90
5.2. HM-CFRP Oranının Kiriş Dayanımına Katkısı	96
5.2.1. IPE 120 kiriş	97
5.2.2. IPE 160 kiriş	99
5.2.3. IPE 220 kiriş	101
5.2.4. IPE 270 kiriş	105
5.2.5. IPE 330 kiriş	109
5.2.6. IPE 400 kiriş	111
5.2.7. IPE 500 kiriş	115
BÖLÜM 6.	
SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRMELER	125
KAYNAKLAR	129
ÖZGEÇMİŞ	132

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

AFRP	Aramid lif takviyeli polimer
b_{eff}	Çalışan tabliye genişliği
CFRP	Karbon lif takviyeli polimer
C30	Karakteristik basınç dayanımı 30 MPa olan beton kalitesi
D_b	Beton tabliyenin taşıyabileceği basınç kuvveti
d	Betonarme tabliye kalınlığı
d_1	Kayma kaması çapı
d_2	Kayma kaması başlık çapı
E	Çelik elastisitemodülü
E_b	Betonelastisitemodülü
e	Kompozit kesitte basınç ve çekme kuvvetleri arasındaki mesafe
e_1	Enine doğrultuda kamalar arası mesafe
e_2	Boyuna doğrultuda kamalar arası mesafe
e_{nn}^{ck}	Çatlaktaki birim şekil değiştirme
F_a	Çelik profilin alanı
FRP	Fiber takviyeli polimer
f_y	Çelik akma gerilmesi
GFRP	Cam lif takviyeli polimer
H	Kiriş kayma kuvveti
H_{lu}	Kayma kaması taşıma gücü
h	Kama başlık dahil uzunluğu
h_{ao}	Çelik profilin üst noktasından tarafsız eksene olan mesafe
HM-CFRP	Yüksek elastik modüle sahip karbon lifli fiber
K_{nn}	Elemanın normal yönündeki rijitlik matrisi

K_{ss}	Elemanın kayma yönündeki rijitlik matrisi
K_{tt}	Elemanın kayma yönündeki rijitlik matrisi
M_u	Kesit taşıma kapasitesi
n_H	Kama sayısı
P_1	Gerilme bileşikleri
P_2	Gerilme bileşikleri
P_3	Gerilme bileşikleri
P_4	Gerilme bileşikleri
P_5	Gerilme bileşikleri
P_6	Gerilme bileşikleri
T_c	Elemanın başlangıç kalınlığı
t_n	Elemanın normal yönündeki gerilme
t_s	Elemanın kayma yönündeki gerilme
t_t	Elemanın kayma yönündeki gerilme
t_a	Kayma kamasının kaynaklandığı profilin başlık kalınlığı
y	Tarafsız eksenin mesafesi
Z	Çelik profilin taşıyabileceği çekme kuvveti
σ	Normal gerilme
σ_F	Çelik profil akma değeri
σ_{br}	Betonun eşdeğer küp basınç dayanımı
α	Azaltma katsayısı
α_a	ACI'ya göre azaltma katsayısı
α_b	ACI'ya göre azaltma katsayısı
α_H	Güvenlik katsayısı
ε	Birim şekil değiştirme
ε_n	Elemanın normal yönündeki şekil değiştirme
ε_s	Elemanın kayma yönündeki şekil değiştirme
ε_t	Elemanın kayma yönündeki şekil değiştirme

ρ	HM-CFRP kesme davranışı için kesme faktörü
δ_n^0	Elemanın normal yönündeki mak. gerilmeye karşı gelen deplasman
δ_s^0	Elemanın kayma yönündeki mak. gerilmeye karşı gelen deplasman
δ_t^0	Elemanın kayma yönündeki mak. gerilmeye karşı gelen deplasman
δ_n^{0f}	Elemanın dayanımını yitirdiğinde normal yönünde ulaştığı deplasman
δ_s^f	Elemanın dayanımını yitirdiğinde kayma yönünde ulaştığı deplasman
δ_t^f	Elemanın dayanımını yitirdiğinde kayma yönünde ulaştığı deplasman
t_n^0	Elemanın normal yönünde hasar başladığında oluşan gerilme
t_s^0	Elemanın kayma yönünde hasar başladığında oluşan gerilme
t_t^0	Elemanın kayma yönünde hasar başladığında oluşan gerilme

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Kompozit kiriş	19
Şekil 2.2. Kompozit kiriş gerilme diyagramları ve iç kuvvetler	19
Şekil 2.3. Başlıklı saplama geometrik büyüklükler	20
Şekil 2.4. Çelik levhalı kiriş.....	23
Şekil 2.5. Çelik levhalı kiriş gerilme diyagramları ve iç kuvvetler	24
Şekil 2.6. Betonarme ve çelik levhalı kirişler.....	25
Şekil 3.1. Beton numune deneyleri	27
Şekil 3.2. Çelik I kiriş ve levhanın gerilme-şekil değiştirme grafikleri.....	29
Şekil 3.3. MBT-Mbrace Lamine Adesivo yapıştırıcı için numune hazırlanması.....	30
Şekil 3.4. Kupon testi numunesi şekli.....	31
Şekil 3.5. Sikadur-30 yapıştırıcı için numune hazırlanması	31
Şekil 3.6. Veri toplama sistemi cihazları	34
Şekil 3.7. Deney aletleri.....	34
Şekil 3.8. Yük verici piston, yük geçişini sağlayan mafsalı aparat ve yük dağıtıcı	35
Şekil 3.9. Deney düzeneği	36
Şekil 3.10. Betonarme döşemeli kompozit kiriş	37
Şekil 3.11. Kayma kamaları uygulanma tekniği	38
Şekil 3.12. Sac kalıbın hazırlanması.....	39
Şekil 3.13. Hasır donatının yerleştirilmesi	40
Şekil 3.14. Hasır donatı çekme deneyi sonuçları	40
Şekil 3.15. Kompozit kiriş tabliye betonu dökümü	41
Şekil 3.16. Çelik levhalı kiriş	42
Şekil 3.17. Çelik kirişe HM-CFRP yapıştırılması	43
Şekil 3.18. HM-CFRP'nin mingenelerle sabitlenmesi	43
Şekil 3.19. Kompozit kiriş yükleme öncesi	44

Şekil 3.20. Kompozit kirişin yüklenme sonrası hali.....	45
Şekil 3.21. Kompozit kirişin orta nokta yük-deplasman grafiği	46
Şekil 3.22. Referans kiriş deney öncesi.....	47
Şekil 3.23. Referans kiriş deney sonrası.....	47
Şekil 3.24. Referans kirişin orta nokta yük- deplasman grafiği	48
Şekil 3.25. Kompozit kiriş - Referans kiriş orta nokta yük- deplasman grafikleri....	49
Şekil 3.26. HM-CFRP ile güçlendirilmiş çelik levhalı kiriş deney sonrası.....	50
Şekil 3.27. HM-CFRP ile güçlendirilmiş kirişin orta nokta yük-deplasman grafiği.....	51
Şekil 3.28. HM-CFRP'li kiriş gerilme diyagramları ve iç kuvvetler	51
Şekil 3.29. Referans kiriş - HM-CFRP ile güçlendirilmiş kiriş orta nokta yük-deplasman grafikleri	53
Şekil 4.1. Çeliğin gerilme-şekil değiştirme eğrisi	58
Şekil 4.2. İdeal elasto-plastik malzeme diyagramı.....	59
Şekil 4.3. HM-CFRP için kırılma sonrası matematik model.....	60
Şekil 4.4. Kesme faktörü-çatlak birim şekil değiştirme diyagramı	61
Şekil 4.5. Yapıştırıcı için Çekme-ayrılma modelleme örneği	61
Şekil 4.6. Lineer elastik bölgede gerilme-birim şekil değiştirme diyagramı	63
Şekil 4.7. Yapıştırıcının kesme etkisindeki gerilme-birim şekil değiştirme grafiği.....	64
Şekil 4.8. Yapıştırıcı için hasar ilerlemesi bölgesinde kullanılan matematik model	65
Şekil 4.9. Lineer ve kuadratik eleman integrasyon noktaları	66
Şekil 4.10. Azaltılmış integrasyonlu lineer ve kuadratik eleman.....	66
Şekil 4.11. S4R, C3D8 ve COH3D8 eleman tipleri	67
Şekil 4.12. Farklı sonlu eleman ağı sıklığı ile modellemeler	69
Şekil 4.13. Referans kirişte sonlu eleman ağı sıklığının davranışa etkisi	70
Şekil 4.14. ABAQUS solu elemanlar modelinde referans kirişin yükleme öncesi durumu.....	71
Şekil 4.15. ABAQUS solu elemanlar modelinde referans kirişin yükleme sonrası durumu.....	72
Şekil 4.16. Referans kirişin deney ve ABAQUS çözümü yük-deplasman grafikleri	72

Şekil 4.17. ABAQUS solu elemanlar modelinde HM-CFRP'li kirişin yükleme öncesi durumu.....	73
Şekil 4.18. ABAQUS solu elemanlar modelinde HM-CFRP'li kirişin yükleme sonrası durumu	74
Şekil 4.19. HM-CFRP'li kirişin deney ve ABAQUS çözümü yük-deplasman grafikleri	74
Şekil 4.20. HM-CFRP, epoksi ve çelik malzemesinin yükleme altındaki gerilme dağılımı.....	76
Şekil 5.1. IPE 160 L=3000mm kirişi.....	80
Şekil 5.2. HM-CFRP kopma dayanımına ulaşmadan epoksi sıyrılması	84
Şekil 5.3. IPE 270 L=3000mm kirişi.....	86
Şekil 5.4. IPE 120 L=3000mm kirişi.....	91
Şekil 5.5. IPE 120 L=3000mm kirişi güçlendirme oranı %14 için yük-deplasman grafiği.....	94
Şekil 5.6. IPE 160 L=3000mm kirişi.....	99
Şekil 5.7. IPE 160 L=3000mm kirişi güçlendirme oranı %10.9 için yük-deplasman grafiği.....	98
Şekil 5.8. IPE 220 L=3000mm kirişi.....	99
Şekil 5.9. IPE 220 L=3000mm kirişi güçlendirme oranı %15 için yük-deplasman grafiği.....	102
Şekil 5.10. IPE 220 L=6000mm kirişi.....	103
Şekil 5.11. IPE 220 L=6000mm kirişi güçlendirme oranı %8 için yük-deplasman grafiği.....	104
Şekil 5.12. IPE 270 L=3000mm kirişi.....	105
Şekil 5.13. IPE 270 L=3000mm kirişi güçlendirme oranı %8.9 için yük-deplasman grafiği	106
Şekil 5.14. IPE 270 L=6000mm kirişi.....	107
Şekil 5.15. IPE 270 L=6000mm kirişi güçlendirme oranı %7.3 için yük-deplasman grafiği	108
Şekil 5.16. IPE 330 L=6000mm kirişi.....	109
Şekil 5.17. IPE 330 L=6000mm kirişi güçlendirme oranı %8.8 için yük-deplasman grafiği	110
Şekil 5.18. IPE 400 L=6000mm kirişi.....	111

Şekil 5.19. IPE 400 L=6000mm kirişi güçlendirme oranı %6.7 için yük- deplasman grafiği	112
Şekil 5.20. IPE 400 L=12000mm kirişi.....	113
Şekil 5.21. IPE 400 L=12000mm kirişi güçlendirme oranı %3.5 için yük- deplasman grafiği	114
Şekil 5.22. IPE 500 L=6000mm kirişi.....	115
Şekil 5.23. IPE 500 L=6000mm kirişi güçlendirme oranı %5.1 için yük- deplasman grafiği	116
Şekil 5.24. IPE 500 L=12000mm kirişi.....	117
Şekil 5.25. IPE 500 L=12000mm kirişi güçlendirme oranı %4.2 için yük deplasman grafiği	118
Şekil 5.26. IPE 500 L=12000mm kirişi.....	117
Şekil 5.27. IPE 500 L=12000mm kirişi HM-CFRP oranı %4.2 için yük-deplasman grafiği	118
Şekil 5.28. IPE 120- IPE500 kirişlerinde faydalı mesafenin kiriş dayanımına katkı grafiği.....	119
Şekil 6.1. Optimum HM-CFRP miktar	126

TABLolar LİSTESİ

Tablo 3. 1.	Beton numunelerin basınç deney sonuçları.....	28
Tablo 3. 2.	Çelik malzemenin deney sonunda elde edilen mekanik özellikler ..	29
Tablo 3. 3.	Kupon testi numuneleri çekme deneyi sonuçları	32
Tablo 3. 4.	HM-CFRP'nin mekanik özellikleri.....	33
Tablo 3. 5.	Kompozit kiriş - referans kiriş karşılaştırması	49
Tablo 3. 6.	Referans kiriş - HM-CFRP'li kiriş karşılaştırması.....	53
Tablo 4. 1.	Yapıştırıcı malzeme özellikleri	63
Tablo 5. 1.	Faydalı mesafe için yapılan numerik modellerde kullanılan profil tipleri	80
Tablo 5. 2.	IPE 160 L=3000mm kirişi faydalı mesafenin kiriş dayanımına katkısı	81
Tablo 5. 3.	IPE 270 L=3000mm kirişi faydalı mesafenin kiriş dayanımına katkısı	91
Tablo 5. 4.	HM-CFRP oranının kiriş dayanımına katkısını incelemek için yapılan numerik modellerde kullanılan profil tipleri	96
Tablo 5. 5.	IPE 120 L=3000mm kirişi HM-CFRP oranının kiriş dayanımına katkısı	97
Tablo 5. 6.	IPE 160 L=3000mm kirişi HM-CFRP oranının kiriş dayanımına katkısı	99
Tablo 5. 7.	IPE 220 L=3000mm kirişi HM-CFRP oranının kiriş dayanımına katkısı	101
Tablo 5. 8.	IPE 220 L=6000mm kirişi HM-CFRP oranının kiriş dayanımına katkısı	103
Tablo 5. 9.	IPE 270 L=3000mm kirişi HM-CFRP oranının kiriş dayanımına katkısı	105

Tablo 5. 10. IPE 270 L=6000mm kiriş HM-CFRP oranının kiriş dayanımına katkısı	107
Tablo 5. 11. IPE 330 L=6000mm kiriş HM-CFRP oranının kiriş dayanımına katkısı	109
Tablo 5. 12. IPE 400 L=6000mm kiriş HM-CFRP oranının kiriş dayanımına katkısı	111
Tablo 5. 13. IPE 400 L=12000mm kiriş HM-CFRP oranının kiriş dayanımına katkısı	113
Tablo 5. 14. IPE 500 L=6000mm kiriş HM-CFRP oranının kiriş dayanımına katkısı	115
Tablo 5. 15. IPE 500 L=12000mm kiriş HM-CFRP oranının kiriş dayanımına katkısı	117
Tablo 6. 1. Maksimum dayanım artışlarını sağlayan güçlendirme oranları	127

ÖZET

Anahtar kelimeler: Çelik Kiriş, HM-CFRP, Güçlendirme, ABAQUS, Numerik Model

Çelik köprülerde, korozyondan dolayı kesit kaybına uğrayan veya artan trafik yüklerinden dolayı mevcut kesitleri yetersiz kalan sistemlerde, çözüm olarak kirişin yenisiyle değiştirilmesi veya güçlendirilmesi seçenekleri söz konusudur. Kirişin yenisiyle değiştirilmesi, trafik akışını uzunca bir süre aksatması ve ekonomik olmaması dolayısıyla, güçlendirilmesine karşı dezavantajlıdır.

Fiber Takviyeli Polimer (FRP) malzemelerinin korozyona dayanıklı olması, ince ve hafif olması, sistemin ağırlığını fazla artırmaması, yorulmanın sebep olduğu çatlakları önlemesi gibi nedenlerden dolayı, güçlendirmede tercih edilmektedir. Çeliğin dayanıklı bir malzeme olmasından dolayı, güçlendirilmesinde kullanılacak FRP malzemesinin de yüksek dayanıma sahip olması gerekmektedir. Son yıllarda üretilen Yüksek Modüllü Karbon Takviyeli Polimer (HM-CFRP)'in çelik kirişlerin güçlendirilmesinde iyi bir performans göstereceği düşünülmektedir.

Bu çalışmanın amacı; çelik kirişlerin HM-CFRP ile güçlendirilmesi ile rijitlikte ve dayanımda mukavemet kazanmasını sağlamak, güçlendirilecek kirişte istenilen dayanım artışı için gerekli HM-CFRP miktarını bulmak ve çelik kesit ile HM-CFRP'nin birlikte çalışmasını sağlamak için gerekli faydalı bağlanma boyunu belirlemektir. Bunun için, belirli sayıda kiriş üzerinde yükleme deneyleri yapılmış ve kirişlerin yüklemeler altındaki davranışları incelenmiştir. Kirişlerin ABAQUS sonlu elemanlar programı ile numerik modelleri yapılarak bilgisayar çözümleri, deney sonuçlarıyla yeter yakınlıkta olacak şekilde doğrulanmıştır. Doğrulanmış numerik modelleme ile değişik boyutlardaki kirişlerle çözüm yapılarak gerekli veriler elde edilmiştir.

DEVELOPING METHOD FOR REPAIRING AND STRENGTHENING I-SECTION STEEL-CONCRETE COMPOSITE BEAMS WITH HM-CFRP

SUMMARY

Keywords: Steel beam, HM-CFRP, Strengthening, ABAQUS, Numeric Model

There are two options to solve problems of steel bridges, which are suffering from loss in cross section due to corrosion or those whose cross sections are insufficient as a result of increasing traffic loadings: either to change the beam with a new one or to strengthen the beam. To change the beam is disadvantageous for strengthening as it blocks the traffic flow for a long time and it is uneconomical.

Fiber Reinforced Polymer (FRP) materials are preferred in strengthening processes as these materials are resistive against corrosion, thin and light, i.e., they do not cause a significant increase in the weight of the system, and good for preventing the fatigue cracks. As the steel has high strength, FRP material used for strengthening should also have high strength. It is thought that High Modulus Carbon Fiber Reinforced Polymer (HM-CFRP) produced in recent years shows a high performance in strengthening of steel beams.

The aim of this study is to increase the rigidity, durability and strength of steel beams by strengthening them with HM-CFRP, to find the correct amount of HM-CFRP to have the required increase in durability of beam, and to determine the useful length of connection in order to achieve a good working condition for HM-CFRP with steel cross section. For this purpose, loading studies were performed on a number of beams and the behaviors of those beams under loading conditions were investigated. The numeric models of beams were made by ABAQUS finite element program and the solutions were verified by experimental results in close proximity. The necessary data were obtained by using the verified numeric model and having many numbers of solutions for beams of different sizes.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Yapıların güçlendirilmesindeki başlıca sebepler arasında, hesaplarda küçük alınmış yükler yerine, gerçek yük değerlerine karşı dayanıklılığını arttırmak, işlev değişimi veya iyileştirme nedeniyle yük taşıma kapasitesini arttırmak, yetersiz detaylandırmaya bağlı ortaya çıkan erken kırılmaları önlemek, korozyon veya yaşlanmayla oluşan bozulmalara bağlı yük taşıma kapasitesinde meydana gelen kayıpları ortadan kaldırmak gibi etkenler sayılabilir. Bir başka güçlendirme gereği de değişen deprem yönetmelikleri sonucu ortaya çıkmaktadır.

Çelik köprülerde ise, güçlendirme durumu daha çok elemanlardaki paslanmadan ve trafik yüklerindeki artıştan dolayı olmaktadır. Korozyondan dolayı kesit kaybına uğrayan veya artan trafik yüklerinden dolayı mevcut kesitleri yetersiz kalan sistemlerde, çözüm olarak kirişin yenisiyle değiştirilmesi, hasarlı bölgeye çelik plaka kaynaklanması veya bulonlanması yaygın uygulamalardandır.

Önerilen bu çözümlerin, zaman alması, ekonomik olmaması, ayrıca trafik akışını uzunca bir süre aksattığı gözlemlenmiştir. Yüksek maliyet, malzemelerin ağır olması ve yorulma performansının düşük olması gibi sebeplerden dolayı bu güçlendirme şekilleri pek tercih edilmemektedir [1].

Güçlendirme tekniklerinden biri olan, kesitin yenisi ile değiştirilmesi veya yeni kesitin kaynakla sisteme birleştirilmesi ise gerilme yığılımı, kaynağın kesite zarar vermesi gibi sebeplerden dolayı pek tercih edilmemektedir.

Bilimin yeni malzeme arayışı ile fiber teknolojisinin güçlendirme alanına girmesi, güçlendirmede yeni bir sayfa açmıştır. FRP malzemelerinin korozyona dayanıklı olması ve özellikle çelik köprü kirişlerinin devamlı korozyona maruz kalmalarından dolayı ayrı bir tercih sebebi olmaktadır. FRP malzemesi, ince ve hafif olması

nedeniyle sistemin ağırlığını fazla artırmamaktadır. Ayrıca yorulmanın sebep olduğu çatlakları da önlemektedir. Bu nedenle güçlendirme tekniği olarak FRP malzemesinin kullanılması bir avantaj daha sağlamaktadır.

Çeliğin betonarmeden daha dayanıklı bir malzeme olmasından dolayı, güçlendirilmesinde kullanılacak FRP malzemesinin de betonarmenin güçlendirilmesinde kullanılan FRP malzemelerinden daha yüksek dayanıma sahip olması gerekmektedir. Karbon Takviyeli Polimer (CFRP), çeliği güçlendirmede yeterli olamamaktadır. İstenilen performansa erişebilmek için fazla miktarda CFRP kullanılması gibi bir sorun karşımıza çıkmaktadır. Bu soruna, son zamanlarda üretilen HM-CFRP'nin çözüm olacağı düşünülmektedir. Yapılan literatür araştırmalarında, ülkemizde bugüne kadar çelik kirişlerin güçlendirilmesinde HM-CFRP'nin kullanıldığı çalışmaya rastlanmamıştır.

Ülkemizin deprem kuşağında yer alması ve 2003 yılı itibarı ile sadece demiryollarımızda 1432 adet çelik köprü olması, bu konuda araştırma yapılması için bir teşvik kaynağı olmuştur.

Yapı elemanlarının FRP tekstiller ve kompozit laminatlar ile güçlendirilmesi ile ilgili Türkiye Deprem Yönetmeliğinde (DBYBHY-2007) betonarme kolonların ve kirişlerin güçlendirilmesi konusunda kurallar yer alırken, çelik yapıların güçlendirilmesine değinilmemiştir. Yurt dışında bu malzemelerin kullanımına yönelik ACI 440'ta taslak bir yönetmeliğin varlığının yanı sıra, İngiltere Karayolları İdaresi tarafından kullanılan bir takım kurallar yer almaktadır. Ayrıca, kompozit malzemelerin betonarme elemanlara yapıştırılarak güçlendirilmesi ile ilgili Avrupa Birliği bünyesinde EUROCOMP tasarım ve el kitabı da mevcuttur.

Bu çalışmanın amacı; çelik kirişlerin HM-CFRP ile güçlendirilmesi ile rijitlikte ve dayanımda mukavemet kazanmasını sağlamak, güçlendirilecek kirişte istenilen dayanım artışı için gerekli HM-CFRP miktarını bulmak ve çelik kesit ile HM-CFRP'nin birlikte çalışmasını sağlamak için gerekli faydalı bağlanma boyunu belirlemektir.

Bunun için kullanılacak yöntem; kirişler üzerinde yükleme deneyi yapmak ve kirişlerin yüklemeler altındaki davranışlarını incelemek, kirişlerin numerik modellerini yaparak bilgisayar çözümlerini deney sonuçlarıyla doğrulamak, doğrulanan numerik modelleme ile değişik boyutlarda ve çok sayıda çözüm yapılarak çalışma için gerekli verileri oluşturmaktır.

Birinci bölümde; kompozit ve çelik kirişlerin FRP malzemesi ile güçlendirilmesi sonucu kesitin dayanımındaki değişiklikler ile ilgili daha önce yapılan araştırmalar incelenmiş ve çeşitli başlıklar altında sınıflandırılarak sunulmuştur. Devamında ise FRP malzemesinin tarihi gelişimi ve genel özellikleri üzerinde durulmuştur.

İkinci bölümde; kompozit kirişler hakkında bilgiler verilmiş, çalışmada kullanılan kompozit kirişin tasarımı yapılmış, kompozit kirişi temsil etmeye güçlendirme deneylerinde kullanılacak basınç başlığı çelik levha olan kiriş kesiti kompozit kirişle aynı dayanıma sahip olacak şekilde boyutlandırılmıştır.

Üçüncü bölümde; kompozit kiriş (betonarme tabliyeli), referans kiriş (basınç başlığı çelik levhalı), çekme başlığı HM-CFRP ile güçlendirilmiş kiriş olmak üzere 5 adet kiriş üzerinde yapılan 4 nokta yükleme deneyleri anlatılmıştır. Deneylerde kullanılan malzemelerin ve ekipmanların özellikleri hakkında bilgi verilmiştir. Numunelerin hazırlanma ve deney düzeneğinin kurulma aşamaları anlatılmıştır. Deney sonuçları yük-deplasman grafikleri olarak düzenlenmiştir.

Dördüncü bölümde; üçüncü bölümde deneyleri yapılmış olan kirişlerin sonlu eleman modellerinin oluşturulması anlatılmıştır. Kullanılan malzeme modelleri ve sonlu elemanların özellikleri verilmiştir. Çalışmada kullanılan ABAQUS programında hazırlanan modellemelerden elde edilen sonuçlarla deney sonuçları kabul edilebilir yakınlıkta olacak şekilde, numerik modeller doğrulanmaya çalışılmıştır. Bu doğrulamada numerik modelden ve deneylerden elde edilen yük-deplasman grafikleri kıyaslanmıştır.

Beşinci bölümde; doğrulanan numerik modellerle parametrik çalışmalara devam edilmiştir. Belirli boyut ve uzunluklardaki kirişlerin çekme başlıkları belirli kalınlık ve uzunlukta HM-CFRP ile güçlendirilerek kirişlerin dayanımlarında meydana gelen değişimler incelenmiştir. Gerçek numune üzerinde sınırlı sayıda yapılmış olan laboratuvar deneyleri, doğrulanmış numerik model ile çok geniş bir deney seti üzerinde test edilmiştir.

Altıncı bölümde; parametrik çalışmaların sonuçları özetlenmiş ve değerlendirmeler yapılmıştır.

1.1. Literatür Çalışması

Dünyada çelik köprülerin sayısındaki artış ve ülkemizin deprem bölgesinde olmasından kaynaklanan ihtiyaçlardan dolayı, çelik köprüler hakkında çalışmalar gittikçe artmaktadır. Çelik yapılardaki tamir ve onarım, daha çok kaynak yapımı ve bulon değiştirilmesi veya kesitlerin yenisi ile değiştirilmesi şeklinde olmaktadır. Gelişen teknolojiye de yardım alan bilim adamları farklı malzeme ve teknikleri araştırmışlardır. Bu araştırmalar FRP malzemesinin güçlendirmedeki önemini gözler önüne sermiştir. FRP malzemesini konu olan çalışmalar ve sonuçları aşağıda özetlenmeye çalışılmıştır.

1.1.1. FRP malzemesinin çelikle birleşim detaylarının incelenmesi

Rizkalla, Dawood ve Schnerch'in yaptıkları çalışmada, öncelikle malzemelerin özelliklerinin belirlenmesi için küçük boyuttaki numuneler üzerinde deneyler yapılmıştır. Daha sonra gerçek boyutta üç adet çelik-betonarme kompozit kiriş üzerinde inceleme yapılmış ve kompozit kirişin dayanımında ve rijitliğinde meydana gelen değişiklikler incelenmiştir. Deneysel çalışmalara devam edilip, kompozit kirişlerin yorulma ve göçme davranışları, çelik yüzey ile HM-CFRP arasındaki yüzeyde meydana gelen kesme kuvvetleri incelenmiştir. Ayrıca HM-CFRP plakaların birbirine bağlanma ve plakanın uç detayları hakkında çalışmalar yapılmıştır. HM-CFRP'nin, kompozit kirişlerde elastik rijitliğin, akma yükünün ve

taşıma kapasitesinin artmasında büyük rol oynadığı deneysel çalışmalar ile görülmüştür. HM-CFRP en iyi uç bağlantı detayı olarak da, uç kısımlarına verilmiş ters V şeklinin olduğunu göstermişlerdir [2].

Schnerch, Stanford, Sumner ve Rizkalla'nın yaptıkları çalışmada, çelik yapıların FRP malzemeleriyle güçlendirilmesi sonucu FRP ile çelik arasındaki bağlantı davranışının, betonarme yapıların FRP malzemeleriyle güçlendirilmesinden oluşan bağlantı davranışından farklı olduğu vurgulanmıştır. Çelik ile FRP malzemesi arasında çok yüksek gerilmeler oluşmaktadır. Çeliğin daha dayanıklı bir malzeme olmasından dolayı, güçlendirilmesinde kullanılacak FRP malzemesinin de betonarmenin güçlendirilmesinde kullanılan FRP malzemelerinden daha yüksek dayanıma sahip olması gerekmektedir. Farklı marka epoksiler ile farklı uzunluklarda CFRP'ler kullanılarak deneyler yapılmıştır. Deneyde kullanılan kirişler, çelik profil üzerine çelik levha kaynatılarak elde edilmiştir. Kesitin performansında en etkili faktörler, yüzey hazırlığı ve epoksi dayanımıdır. Dayanımı en yüksek olan yapıştırıcının en iyi sonuç verdiği gözlenmiştir. Bu çalışmada, yüzey hazırlama yöntemleri, çelik ile FRP arasındaki bağlantı gerilmelerini hesaplamada kullanılan mevcut yöntemler ve bunların tasarım için önemi tartışılmıştır. Bu yöntemlerin sonuçları deneysel çalışmaların sonuçlarıyla karşılaştırılmış ve birbiriyle örtüştürülmeye çalışılmıştır. Bu konu hakkında gelecekte yapılacak çalışmaların yönünün ne olması gerektiği konusunda öneriler sunulmuştur [3].

Dawood ve Rizkalla'nın yaptıkları çalışmada, deneyler iki aşamada gerçekleşmiştir. İlk aşamadaki deneyler, kupon testi olarak adlandırılan numuneler üzerinde yapılmıştır. CFRP'nin uçları düz ve eğimli olacak şekilde kesilmiştir. CFRP plakaların uç detaylarının kopma davranışı üzerine etkisi, yerleştirilen gerilim pulları ile ölçülmüştür. İkinci aşamadaki deney, gerçek köprü kirişi boyutunda çelik kirişin çekme başlığına, iki parça halinde yerleştirilen HM-CFRP'nin birleştirilmesi için, üzerine yeni bir HM-CFRP yapıştırılmasının etkisini incelemek için yapılmıştır. Betonarme tabliyeyi benzeştirmek için çelik profilin üzerine çelik levha kaynatılmıştır. Birleşim detayı olarak, iki ucunda da eğim kullanılan uç detayının en iyi sonucu verdiği gözlenmiştir. Güçlendirilmiş çelik kirişin akma yükünde % 37 - 43

oranında artış sağlanmıştır. Bu artışın, lineer ötesi davranışta moment-eğrilik grafiğinde oldukça önem kazandığını vurgulamışlardır [4].

Schnerch, Dawood, Rizkalla ve Sumner'ın yaptıkları çalışmada, CFRP malzemesinin çelik ile en uygun şekilde birleştirilmesi ve sıyrılmının önlenmesi için öneriler verilmiştir. Kirişin göçme yükünün belirlenmesinde, en önemli noktanın çelik ile yapıştırıcının bağlantı yerindeki davranışı olduğu vurgulanmıştır. HM-CFRP ile güçlendirilmiş kompozit kirişte, hareketli yük taşıma kapasitesindeki artışı şu şekilde açıklamışlardır; güçlendirme, kiriş eğilme rijitliğinde artış meydana getirirken, kesitin çekme başlığındaki şekil değiştirmelerde azalma meydana getirmektedir, dolayısıyla şekil değiştirmeleri limite getirecek hareketli yük artacaktır. Yapıştırıcının kalınlığının bağlantıya olan etkisi vurgulanmış, kelepçe yapılması ve yüzeyin temizliği konusunda tavsiyeler verilmiştir. Çelik-betonarme köprü kirişlerinin HM-CFRP ile güçlendirilmesi istendiğinde, malzemelerin yük altında nasıl davrandığı konusunda bu makaleden faydalanılabilir [5].

1.1.2. Kirişlerin güçlendirilmesinde FRP kullanımı

Tavakkolizadeh ve Saadatmaneshs'in yaptıkları çalışmada, çekme başlığına zarar verilmiş çelik-betonarme kompozit kirişlerin çekme başlıkları CFRP ile güçlendirilmiş ve davranışları incelenmiştir. Statik yükleme altında 3 adet gerçek boyutta deney numunesine dört nokta deneyi yapılmıştır. Çekme başlığı hasar oranları %25, %50 ve %100 olacak şekilde numunelerinin çekme başlığı sırası ile 43, 86 ve 171mm kesilerek uygulanmıştır. %25 hasarlı kirişe 1 kat, %50 hasarlı kirişe 3 kat ve %100 hasarlı kirişe 5 kat CFRP üst üste yapıştırılmıştır. Kirişlerin yük taşıma kapasitelerinde sırası ile %20, %80 ve %10 artış sağlanmıştır. Yapılan güçlendirme ile elastik rijitliklerde yine aynı sıra ile %91, %102 ve %86 oranında artış gözlenmiştir. Deney sonuçları nümerik olarak da karşılaştırılmıştır [6].

Arıkan ve Sahir'in yaptıkları çalışmada, çelik yapıların en büyük sorunlarından biri olan korozyon üzerinde durulmuştur. Korozyondan dolayı kesit kayıplarını temsil etmek üzere çekme başlığından belli miktarda parçalar çıkartılmıştır. Bu parçaların

çıkarıldığı yerlerin çevresi CFRP malzemesi ile güçlendirilmiştir. CFRP, kirişlerin dayanımı yanında, rijitliklerinde de artış sağlamıştır [7].

Çelik köprülerin veya iletişim kulelerinin kullanım amaçlarındaki değişiklikler, korozyondan dolayı kesitlerinin değiştirilmesi ya da dayanımlarının arttırılması gerekebilir. Çelik yapıların güçlendirme tekniklerinde bazı dezavantajlar olabilmektedir. Mesela kesitin yenisi ile değiştirilmesi korozyonun devam etmesini engellemediği gibi, yorulmaya karşı da yeterli dayanım sağlanmış olmaz. Gargia, Chiminelli, Lizaranzu ve Jimenez'in yaptıkları çalışmada, FRP ile güçlendirmiş kesitlerin dayanımında ve rijitliğinde artış sağlanmıştır [8].

Tavakkolizadeh ve Saadatmaneshs'in yaptıkları çalışmada, CFRP malzemesinin hafif olmasının ve korozyona dayanıklı olmasının avantajı üzerinde durulmuştur. Gerçek boyutlu kirişler ile yapılan 3 adet deneyde, çekme başlığına 1, 3 ve 5 kat CFRP uygulanmıştır. Burada farklı olarak kesite zarar verme işlemi yapılmamıştır. Güçlendirilmiş kirişlerin taşıma kapasitelerinde sırasıyla %44, %51 ve %76 oranında artış sağlanmıştır. Ancak elastik rijitliklerinde artış gözlenememiştir. Analitik modelde kirişlerin süneklikleri karşılaştırıldığında, güçlendirilmiş kirişlerin güçlendirilmemiş kirişten daha az sünek davranış sergilediği gözlenmiştir. Deney sonuçları numerik olarak da karşılaştırılmıştır [9].

Sen, Larry ve Mullins'in yaptıkları çalışmada, çelik-betonarme kompozit köprü kirişleri, CFRP şeritlerle güçlendirilmiştir. Deneyler 6 adet 6 metre uzunluğunda gerçek boyutta kompozit köprü kirişleri üzerinde yapılmıştır. Kompozit kirişteki betonarme tabliyenin içine ızgara şeklinde donatı yerleştirilmiştir. Ayrıca betonarme tabliye ile çelik profil arasındaki bağlantı, daha önce çelik profile yerleştirilen vidalar ile sağlanmıştır. Kirişlere önce belli bir yükleme yapılarak plastik deformasyon verilmiş ve güçlendirme gerektirecek hale getirilmiştir. Ancak, çelik dayanımının yüksek olması ve güçlendirme sonunda istenilen performansın da yüksek olmasından dolayı çok fazla miktarda CFRP kullanımına gereksinim duymuşlardır. Güçlendirmede istenilen sonucu almak için, CFRP'nin kalınlığının önemi üzerinde durulmuştur. 2mm ve 5mm kalınlığında uygulanan CFRP şeritler, kompozit kirişin

dayanımında kalınlık ile orantılı olarak artış sağlamıştır. Artış, en çok taşıma kapasitesinde ve elastik rijitlikte olmuştur. Bilgisayar programı olarak PCFRAME kullanılmıştır. Deneyler bilgisayar modeli ile desteklenmiştir [10].

Dawood, Schnerch, Sumner ve Rizkalla'nın yaptıkları çalışmada, Mitsubishi şirketi tarafından geliştirilen HM-CFRP ile ilgili çalışılmıştır. Yaklaşık olarak HM-CFRP'nin çeliğin 2-3 katı daha büyük elastisiteye sahip olması bir avantaj sağlamıştır. Yapıştırıcıyı uygularken çelik yüzey kimyasal çözücüler ile temizlenip zımparalanmıştır. Ayrıca yapıştırıcının çelik ile HM-CFRP arasında iyi şekilde çalışması için kelepçe kullanılmıştır. Aşırı yükleme deneyleri HM-CFRP, CFRP ve ön germeli CFRP ile güçlendirilmiş çelik kirişler ile yapılmıştır. Farklı oranlarda güçlendirme malzemesi kullanılarak elde edilmiş kirişler ile güçlendirilmemiş kiriş kesiti karşılaştırılmıştır. Sonraki deneylerde ise, aynı oranda CFRP kullanılarak farklı birleşim detayları uygulanmıştır. HM-CFRP kullanılarak yapılan güçlendirmelerde, HM-CFRP oranı yüksek olan kesit, çelik malzemesi akana kadar daha fazla yük taşıırken, FRP malzemesi koptuktan sonra HM-CFRP etkisini kaybedip betonarmenin kırılma davranışı, numune üzerinde etkili olmaya başlamıştır. Numuneler, FRP malzemesi koptuktan sonra benzer davranış göstermektedir. Yapılan güçlendirilmelerde taşıma kapasitesinde ve elastik rijitlikte büyük bir artış olduğu gözlenmiştir. Aşırı yükleme deneyinde, yine FRP oranı yüksek olan kirişin rijitliğinde, akma yükünde ve kopma yükünde artış görülmüştür. Ayrıca güçlendirilmemiş kirişte, güçlendirilmiş kirişe oranla kalıcı şekil değiştirmeler fark edilir derecede büyük olmuştur. Yorulma deneyinde ise yerdeğiştirme güçlendirme ile orantılı şekilde azalmıştır [11].

Al-Saidy, Klaiber ve Wipf'in yaptıkları çalışmada, korozyonun çelik yapılar üzerinde meydana getirdiği hasarların onarılması üzerinde durulmuştur. Gerçek köprü kirişleri boyutlarında 4 adet numune üzerinde deney yapılmıştır. Korozyonu simule etmek için deney kirişlerinin çekme başlığına zarar verilmiş (çekme başlığının %50-%75'i kesilerek alınmış) ve daha sonra numuneler karbon fiber malzemesi ile güçlendirilmiştir. Numunelerin davranışları doğrusal ve doğrusal ötesi olarak incelenmiştir. Zarar verilmiş numuneye yapılan güçlendirme ile orijinal kirişe

yapılan güçlendirmenin hemen hemen aynı sonuçları verdiği gözlenmiştir. Numerik model oluşturulmuş ve sonuçları deney sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Deney sonuçları ile numerik model sonuçları birbiri ile örtüşmüştür. Ancak kesitin sünekliğinde bir miktar azalma olduğu gözlenmiştir [12].

Dawood, Sumner ve Rizkalla'nın yaptıkları çalışmada, Mitsubishi Kimya'nın ürettiği HM-CFRP ile SP Systems'in ürettiği Spabond 345 epoksi kullanılarak deneyler yapılmıştır. Toplam 7 adet gerçek boyutta çelik betonarme kompozit kiriş üzerinde deney yapılmıştır. Kirişlerin dayanımlarını, durabilitelerini ve çelik ile HM-CFRP arasındaki kesme etkisini incelemek için yorulma ve aşırı yükleme deneyleri yapılmıştır. Birinci aşamadaki deneylerde, aşırı yükleme şartlarında 3 adet deney yapılmış ve güçlendirme oranları farklı olan iki kiriş ile güçlendirilme yapılmamış kontrol kirişi karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak, HM-CFRP oranı yüksek olan kirişin rijitliğinde ve akma yükünde diğer iki kirişe göre daha fazla artış sağlanmıştır. İkinci aşamadaki yorulma deneylerinde, 3 adet deney yapılmış, süneklik ve durabilite incelenmiştir. Aynı güçlendirme oranları ile farklı yapıştırma teknikleri karşılaştırılmıştır. Güçlendirilmiş kirişlerin yorulma davranışlarının, kontrol kirişinin yorulma davranışına göre çok iyi olduğu anlaşılmış ve yapıştırıcı kalınlığının etkisi görülmemiştir. FRP ile çelik yüzey arasındaki kesme kuvveti etkisi 7 adet deneyle araştırılmış, yapıştırıcı kalınlığı da değişken olarak alınmıştır. Yapıştırıcının kesme kuvvetine etkisinin de minimum düzeyde kaldığı gözlenmiştir. Yapıştırıcı kullanırken yüzey temizliği üzerinde durulmuş, ayrıca uygulama yapıldıktan sonra en az 12 saat ahşap mangelere numunenin sıkıştırılması gerektiği vurgulanmıştır. HM-CFRP ile yapılan güçlendirmelerde kesitin elastik rijitliği, akma kapasitesi ve taşıma kapasitesi artmıştır. Ayrıca uygulanan güçlendirme tekniği ile kesitin kalıcı şekil değiştirmelerin azalmasına yardımcı olunmuştur [13].

Schnerch, Dawood, Emmet ve Rizkalla'nın yaptıkları çalışmada, HM-CFRP ve CFRP ile güçlendirilmiş kirişler üzerinde araştırmalar yapılmıştır. İlk aşamada yapılan deneylerde, HM-CFRP, CFRP ve öngörme verilmiş HM-CFRP ile güçlendirilmiş kirişlerden oluşan 3 adet numune üzerinde çalışılmıştır. HM-CFRP ile güçlendirilen kirişlerin (öngermeli-öngermesiz) eğilme rijitliklerinde %31-36

arasında artış olmasına rağmen, CFRP ile güçlendirilen kirişte ise rijitlik artışı %10 oranında kalmıştır. Orta nokta deplasmanındaki azalma ise öngermeli HM-CFRP'li kiriş hariç aynı oranlarda kalmıştır. FRP'nin koştugu andaki en büyük yük öngermesiz HM-CFRP'li kirişte ortaya çıkmıştır. FRP koştuktan sonra ise 3 kiriş de aynı davranışı göstermiştir. İkinci deney aşamasında ise; kesme kuvveti, yorulma ve aşırı yükleme altındaki davranışlar incelenmiştir. Değişik güçlendirme oranları kriter olmuştur. Sonuçta, güçlendirilmiş kirişlerde aşırı yükleme zararlarının oldukça az olduğu gözlemlenmiştir. Yapıştırıcının çelik ile FRP arasındaki kayma kuvvetine etkisi de incelenmiştir. Yapıştırıcının uygulanma koşullarının ve çeşidinin çok önemli olduğu vurgulanmıştır [14].

Dawood, Rizkalla ve Sumner'ın yaptıkları çalışmada, HM-CFRP ile güçlendirilmiş çelik-betonarme kompozit kirişlerin aşırı yükleme, yorulma ve monoton yükleme deneyi altındaki davranışları incelenmiştir. Ayrıca kesme etkisini incelemek için FRP malzemesinin değişik şekillerde kesilmesi ile elde edilmiş sonuçlar karşılaştırılmıştır. Epoksinin iyi bir şekilde yapışması için, HM-CFRP şeritler yerleştirildikten sonra ahşap mengeneler ile 12 saat süre ile sıkıştırılmıştır. Kullanılan HM-CFRP şeridin genişliği küçük olduğu için, çelik kesitin çekme başlığına iki sıra halinde yerleştirilmiştir. Aşırı yükleme ve yorulma deneylerinde 3 adet deney kirişi test edilmiştir. Yorulma deneyinde yapıştırıcı kalınlığının etkisi araştırılmıştır. Monoton yüklemede, çelik ile HM-CFRP arasındaki kayma kuvveti ve HM-CFRP'nin sıyrılma davranışı incelenmiştir. Deney sonuçları sonlu elemanlar programı ile desteklenmiştir. Numerik modellemede, beton ve çeliğin lineer ötesi davranış yaptığı, ancak HM-CFRP'nin lineer davranış gösterdiği kabulü yapılmıştır. Sonuçta, çelik kesitlerin HM-CFRP ile güçlendirilmesi ile elastik rijitlikte, akma yükünde ve moment kapasitesinde çok fazla artış olduğu gözlenmiştir. Aşırı yükleme deneyinde ise kalıcı şekil değiştirmenin çok az olması dikkati çekmiştir. Ayrıca, aşırı yükleme deneyinde yapıştırıcı kalınlığının etkisi görülmemiştir [15].

Al-Saidy, Klaiber ve Wipf'in yaptıkları çalışmada, güçlendirme sadece kompozit kirişin alt başlığına değil, aynı zamanda gövdesine de uygulanmıştır. Kompozit yapıyı oluşturan betonarme kısım ile çelik kısım arasındaki bağlantıyı yine çelik

profile kaynaklanan vidalar sağlamıştır. 6 adet deney yapılmış ve 2 tanesi kontrol kirişi olarak seçilmiştir. Güçlendirilen kirişlerin hem gövde kısmına hem de çekme başlığına 200 GPa çekme dayanımı olan CFRP uygulanmıştır. Yapıştırıcı uygulanırken yüzey temizlenip aseton ile silinmiş ve oda sıcaklığında bakım yapılmıştır. Özellikle güçlendirmenin başarılı bir şekilde olması için, CFRP ile çelik yüzey arasındaki bağlantının iyi bir şekilde olması gerektiği üzerinde durulmuştur. Kontrol kirişler, çelik akana kadar doğrusal davranış göstermiş, plastik davranışın ardından betonarme döşemenin çatlamasıyla da göçme gerçekleşmiştir. Alt başlık ve gövde kısmına güçlendirme uygulanmış kirişler ile kontrol kirişleri karşılaştırıldığında dayanımda %45 artış sağlandığı gözlenmiştir. Ancak yük-deplasman eğrisine bakıldığında, alt başlık ve gövde kısmına güçlendirilme yapılmış kirişler ile sadece alt başlığa güçlendirme yapılmış kirişler karşılaştırıldığında, rijitliklerde çok az bir fark olduğu gözlenmiştir. Güçlendirilmiş kirişlerde süneklik az miktarda azalmıştır [16].

Schnerch, Dawood, Sumner ve Rizkalla'nın yaptıkları çalışmada, gerçek boyutta deney numuneleri ile öngermeli ve öngermesiz HM-CFRP ve CFRP ile güçlendirilmiş kirişlerin davranışları incelenmiştir. %4.5 oranında CFRP ile güçlendirme yapıldığında rijitlikte %10, taşıma dayanımında ise %16 oranında artış sağlanmıştır. %7.6 oranında HM-CFRP ile güçlendirilme yapıldığında rijitlikte %36, taşıma dayanımında ise %45 artış görülmüştür. HM-CFRP'ye öngörme verilmiş, güçlendirme oranı %3.8 oranında yapılmış ve kirişin rijitliğinde %31 artış sağlanmıştır. Aşırı yükleme şartları altında ise, HM-CFRP'nin aşırı yüklemeye meydana gelen zararları azalttığı gözlenmiştir [17].

Miller, Chajes ve Hasting'in yaptıkları çalışmada, zarar görmüş köprü kirişlerinin CFRP ile güçlendirilmesi üzerinde durulmuştur. 4 adet gerçek boyutta köprü kirişine üç nokta deneyi yapılmıştır. Korozyonu veya bir hasarı temsil etmek üzere kirişlerin çekme başlıkları kesilerek, kesitlerin rijitlikleri %13 ve % 32 oranında azaltılmıştır. Daha sonra bir sıra CFRP ile güçlendirilmiştir. Elastik rijitlikteki artış sırasıyla %10 ve %37 arasında olmuştur. Taşıma kapasiteleri ise %17 ve %25 oranlarında artmıştır [18].

Bir eğilme deneyindeki elemanların tasarımının yapılması için, kompozit malzemelerin özelliklerinin ve kesitin geometrik özelliklerinin bilinmesi gerekir. Schnerch, Dawood ve Rizkalla'nın yaptıkları çalışmada, elemanların mekanik özellikleri biliniyorsa, deney yapmadan önce geometrik tasarım yapılabileceği vurgulanmış ve geometrik tasarım için gerekli formüller verilmiştir. Ayrıca HM-CFRP'nin çelik ile birleştiği yerin detayları hakkında da makalede ayrıntılı bilgi bulunmaktadır. Yine yapıştırıcı için de formüller çıkarılmış ve yüzey hazırlığının üzerinde durulmuştur. Deney numunelerinin performansının doğru şekilde tahmin edilebilmesi için malzeme özelliklerinin bilinmesi gerektiği vurgulanmıştır [19].

Dawood, Rizkalla ve Sumner'ın yaptıkları çalışmada, HM-CFRP ve yapıştırıcı seçimi üzerinde durulmuştur. Ayrıca kompozit kirişlerin, HM-CFRP ile güçlendirilmesinde değişik bağlantı detayları ile yorulma, aşırı yükleme ve monoton yükler altında nasıl davrandığı incelenmiştir. Bağlantı detayları ile ilgili deney sonuçları sonlu eleman modeli ile desteklenmiştir. İki farklı güçlendirme oranına sahip deney kirişi ile güçlendirilmemiş bir adet kontrol kirişi aşırı yükleme deneyine maruz bırakılmıştır. Deney kirişleri karşılaştırıldığında, güçlendirilmiş kirişlerin taşıma kapasitelerinin, elastik rijitliklerinin ve akma yüklerinin arttığı, kalıcı şekil değiştirmelerin ise oldukça az değiştiği gözlemlenmiştir. Yorulma deneyi için ise, aynı oranlarda HM-CFRP ile güçlendirilmiş iki adet kiriş ile güçlendirilmemiş bir adet kontrol kirişi seçilmiştir. Yorulma deneyinde, yüklemelerdeki en küçük yük, ölü yükü temsil etmek üzere güçlendirilmemiş kirişin akma yükünün %30'u, en büyük yük ise, ölü ve hareketli yüklerin kombinasyonunu temsil etmek üzere kirişlerin akma yükünün %60'ı olarak seçilmiştir. Güçlendirilmiş kirişler ile güçlendirilmemiş kiriş arasında maksimum yükler arasındaki fark %20 olmuştur. HM-CFRP ile çelik arasındaki bağlantı şekillerinin etkisini incelemek için kupon testi yapılmış ve daha önce de söylendiği gibi uç kısmı ters V şeklinde kesilmiş FRP malzemeleri en iyi sonucu verdiği gözlenmiştir. Bağlantı şekli küçük boyuttaki köprü kirişi üzerinde de incelenmiş ve en büyük gerilmelerin FRP malzemesinin yapışmaya başladığı yada bittiği noktalarda olduğu gözlemlenmiştir. İki boyutlu sonlu eleman yöntemi ile de bağlantı şekli simule edilmeye çalışılmıştır [20].

1.1.3. FRP malzemesinin farklı yerlerde kullanımı

Glen, Tarek ve Rizkalla'nın yaptıkları çalışmada, gelişen teknoloji sayesinde değişik özelliklerde yapıştırıcıların ve FRP malzemelerinin ortaya çıkmasıyla, deniz araçlarında da bu malzemelerin başarılı bir şekilde kullanılabilmesi düşünülmüştür. Yapıştırıcıların zor çevre şartlarına dayanıklı olması istenmiş ve bu istek doğrultusunda çalışma yapılmıştır. Farklı yapıştırıcı türleri ile bağlantı davranışları ve yük transferleri incelenmiştir. Farklı çevre şartlarında 105 adet kayma deneyi yapılmıştır. İlk deney setinde gerilme-şekil değiştirme ve yüzey hazırlığı etkileri, ikinci deney setinde pH ve çeşitli çevre şartlarının etkisi incelenmiştir. Üçüncü deney setinde ise, yapıştırıcının (creep property) şekil değiştirme hassasiyeti üzerinde çalışılmıştır. Sonuç olarak, yapıştırıcının deniz araçlarındaki performansında en önemli etkenlerin, suyun pH değerinin ve ortam sıcaklığının olduğu ortaya çıkmıştır. Ayrıca çelik yüzeyin daha önceden hazırlanmasının önemi üzerinde de durmuşlardır [21].

Pric ve Moulds'un yaptıkları çalışmada, güçlendirilme gereksinimi olan elemanların; kaynak veya bulon kullanılarak kesitin yenisinin yerleştirilmesi yerine, yeni yapıştırıcı ve malzemelerle kesitlerin güçlendirilmesinin daha doğru olacağı konusu vurgulanmıştır. Ayrıca deniz araçlarının da bu şekilde güçlendirilebileceği üzerinde durulmuştur [22].

Schnerch ve Rizkalla'nın yaptıkları çalışmada, FRP malzemesinin iletişim kulelerinin güçlendirilmesinde de kullanılabilmesi düşünülmüştür. Çelik yapılara uygulanan güçlendirme tekniklerinin iletişim kuleleri için de uygulanabileceği vurgulanmıştır. Kuleler için gerekli olan, çeliğin akma değerinde ve rijitliğinde artış sağlamaktır. Deneyler önce üzerine çelik plaka kaynatılmış çelik kirişler üzerinde yapılmıştır. Deneylerin ilk aşamasında uygun yapıştırıcı bulunmaya çalışılmıştır. İkinci aşamada, yükün verildiği nokta ile FRP'nin bittiği yer arasındaki uygun mesafenin (faydalı mesafe) bulunması için çalışmalar yapılmıştır. Üçüncü aşamada ise, elde edilen veriler doğrultusunda telefon kulelerinin güçlendirme teknikleri üzerinde durulmuştur. Farklı epoksi markaları ile farklı uzunluklarda CFRP ve HM-

CFRP kullanılmıştır. Aynı değişkenler kullanılarak silindirik çelik borular üzerinde de deneyler yapılmıştır. Borularda rijitlikte %39'a kadar artış sağlanmıştır. Faydalı mesafe olarak adlandırdığımız uzunluk, epoksi çeşidine göre değişkenlik göstermektedir. Test edilen ilk kırışte rijitlikte %12, taşıma dayanımında %18 artış sağlanmıştır. Uygulanan güçlendirme tekniğiyle dayanımda, CFRP kopmadan önce %42'ye kadar artış sağlanabilmiştir [1].

Aiello ve Sciolti'nin yaptıkları çalışmada, FRP şeritler ve kumaşlar yığma duvarları güçlendirmede kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan numuneler, İtalya'da bulunan evlerden esinlenerek yapılmıştır. Deneylerde değişik bağlantılar ve farklı uzunluklarda CFRP'ler kullanılmıştır. Genel amaç, CFRP ile duvar arasındaki bağlantı performansını belirlemek olmuştur. Sadece duvar ve CFRP'nin mekanik özelliklerinin değil, aynı zamanda yüzeylerin fiziksel özelliklerinin de bağlantıda etkili olduğu ortaya konmuştur. Bu durum işçilik kalitesi ile orantılıdır. Bütün parametrelerin doğru bir şekilde algılanıp ona göre yapılan güçlendirmeler, duvar ve CFRP arasındaki bağlantının performansını oldukça etkilemiştir [23].

Seica ve Packer'in yaptıkları çalışmada, FRP malzemesinin betonarme güçlendirilmesinde kullanıldığı kadar, çelik malzemelerin de güçlendirilmesinde (havada ya da su içinde) kullanılabilceği vurgulanmıştır. Silindirik borulardan oluşan 6 adet deney numunesi dört nokta deneyi ile test edilmiştir. Burada asıl incelenen, güçlendirme yapılan boruların su altında kaldıktan sonraki davranışları olmuştur. Suyu maruz kalmayan boruların dayanımlarında %16 - %27 arasında, elastik rijitliklerinde %7 - %18 arasında artış sağlanmıştır. Su altında kalan numunelerin dayanımlarında ise %8 - %21 arasında artış olurken, elastik rijitliklerinde çok az artış sağlanmıştır. Özellikle bağlantı konusunda sorun yaşanmış ve su altında olduğu için gerekli bakım sağlanamamıştır. Yapıştırıcının su altında yeterli performansı gösteremediği vurgulanmıştır. CFRP ile güçlendirilmiş çelik borular ister havada ister su içinde olsun, plastik moment dayanımlarına ulaşmışlardır. Ayrıca moment kapasitelerinde artış olmuştur [24].

Rizkalla, Sumner, Stanford ve Schnerch'in yaptıkları çalışmada, ilk deney aşamasında farklı yapıştırıcı markaları ile farklı sıcaklıklarda 22 adet kupon testi deneyi yapılmıştır. İkinci deney aşamasında ise, CFRP'nin uygun faydalı mesafesini bulmak için deneyler yapılmıştır. En kısa faydalı mesafe SP Spabond 345 ve Weld-On SS620 yapıştırıcılarında elde edilmiştir. Üçüncü aşamada ise, silindirik şeklindeki iletişim kulelerinin güçlendirilmesi ile ilgili çalışılmış ve elastik rijitlikte %25 artış sağlanmıştır [25].

Tavakkolizadeh ve Saadatmanesh'in yaptıkları çalışmada, çelik ile CFRP arasında meydana gelen galvanik korozyon incelenmiştir. CFRP malzemesinin metalik karaktere sahip olması sonucu, çelik ile CFRP arasında galvanik hücre oluşumu eğilimi mevcuttur. Eğer iki malzeme (karbon ve çelik) arasında doğrudan bağlantı var ise (mesela elektron ile), ıslak korozyon hücreleri buraya yerleşmeye başlarlar. Bu deneysel çalışmada, CFRP malzemesi farklı kalınlıklarda epoksi ile kaplanmış, tuzlu su içinde bekletilip hangi oranda korozyona uğradıkları ölçülmüştür. CFRP şerit ile çelik levha doğrudan birbirine bağlı ise galvanik korozyon oluşmuştur. Ancak, CFRP ve çelik epoksi ile kaplanıp tuzlu su içine bırakılırsa, oluşan galvanik korozyon miktarı %24 ile %57 oranında azalmıştır. Korozyon oranının, kaplanan epoksi kalınlığı ile doğrudan ilgili olduğu vurgulanıp, korozyon oluşumunda tuzlu sunun deniz suyundan daha etkili olduğu söylenmiştir. Bu fark %15 ile %24 arasında değişmiştir [26].

1.2. FRP'ye Genel Bakış

Polimerler ilk olarak 20. yüzyılda Hermann Staudinger tarafından kullanılmıştır. Daha sonra kompozit malzemelerin kullanımı İkinci Dünya savaşı sırasında ortaya çıkmıştır. Kompozit malzemeler, orduda ve hava araçlarında kullanılan malzemelerin özelliklerini artırmak için kullanılmıştır. Bu, 1950'lerin sonlarına kadar devam etmiştir. Daha sonra kompozit malzemelerin İnşaat Mühendisliğinde de kullanılmasının yolu yavaş yavaş açılmaya başlamıştır. GFRP malzemesinin inşaat mühendisliğindeki ilk uygulamaları, Libyadaki Bingazi şehrinde (1968) ve Dubai Hava Alanı çatısında (1972) yapılmıştır. 1964 yılında Durban Güney Afrika'da giriş

güçlendirilmesinde FRP malzemesi kullanılmıştır. Daha sonra kompozit malzemeler Avrupa ve Amerika'da kullanılmaya başlanmıştır. İlk olarak karayolu köprüsünde, Bulgaristan'da Ginzi'de (1981) kullanılmıştır. 1991 yılında İsviçre'de Ibach adı verilen betonarme köprü ayaklarında CFRP plaka kullanılarak güçlendirmeye gidilmiştir. Ülkemizde ise, Gaziantep ilindeki Göksu ve Karababa köprülerinde, artan trafik yüklerini karşılaması için, Epo Yapı Kimyasalları tarafından CFRP plaka ile köprü kolon ve kirişlerine güçlendirme uygulanmıştır.

Polimerler, monomer adı verilen küçük moleküllerin ard arda sıralanarak üstün özellikleri olan makromoleküllerin (yüksek molekül ağırlıklı bileşik) oluşması ile meydana gelmektedir. Bir polimer zincirinde binlerce yada milyonlarca monomer bulunur. Bu zincirlerin özellikleri polimerin çeşitliliğini sağlamaktadır. Polimer malzemesi karbon, cam ya da aramid lifleri ile güçlendirilerek bunların isimleri ile birlikte anılmaktadırlar. Mesela, karbon lif takviyeli polimer (CFRP), cam lif takviyeli polimer (GFRP) ve aramid lif takviyeli polimer (AFRP) son yıllarda en çok kullanılan FRP malzemeleridir.

Karbon elyaf ile takviye edilmiş polimer malzemelere (CFRP) denilmektedir. CFRP polyester reçine içine gömülmüş 5-10 mikrometre çapında çok ince karbon elyaflardan oluşmaktadır.

Karbon fiber katkılı polimerlerin (CFRP) inşaat mühendisliğinde kullanımı, uzay mühendisliği için üretilen çözümlerin inşaat mühendisliğine aktarılması ile başlamıştır. İleri teknoloji ile üretilen bu malzemeler son yıllarda ülkemizde de betonarme yapıların onarım ve güçlendirilmesinde yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. CFRP'nin betonarme yapıların onarım ve güçlendirilmesinde başarılı bir şekilde kullanılması ve iyi sonuç vermesi, bu malzemenin çelik yapılarda da kullanılması konusunda ışık tutmuştur.

Yapı malzemesi olarak polimerlerin önemi daha da artmaktadır. Dünyada üretilen polimerlerin yaklaşık %30'u her sene inşaat mühendisliği ve yapı endüstrisinde kullanılmaktadır. Cam ve karbon esaslı olanlar güçlendirmede kullanılırken, aramid

esaslı olan malzemeler ise darbelere ve patlamalara karşı taşıyıcı elemanları koruma amacıyla kullanılır. Bu malzemelerden karbon fiberler genelde, uzay araçlarında, otomotivde, deniz araçlarında, bisiklet ve motorsiklette, müzik aletlerinde, dizüstü bilgisayarlarda, fotoğraf makinelerinde, spor aletlerinde, silah endüstrisi gibi oldukça geniş bir alanda kullanılmaktadır. Malzemenin tercih sebeplerinin başında, dayanımının ağırlığına oranının çok büyük olması gelmektedir. Gelişen teknoloji ile üretim safhasının daha ucuz ve daha az zaman harcanarak sağlanması, kullanım alanlarını genişletmektedir.

FRP sistemini oluşturan kompozit malzemeler, üretim şekline göre kumaş (fiber), şerit (laminat), çubuk (bar) olmak üzere üç farklı tiptedirler. Kumaşlar, kolon sargılanmasında, döşeme sehimlerinin engellenmesinde, etriye eksikliği olan kirişlerde ve yığma duvarlarda; şeritler, döşeme ve kiriş altında dayanımı artırmak için; çubuklar ise, tarihi yapılarda yığma duvarların derz aralarında güçlendirme amacı ile kullanılırlar. Çelik yapılarda ise FRP malzemesi daha çok çelik köprü kirişlerin dayanımının arttırılmasında kullanılmaktadır. Çekme dayanımının çok büyük olmasından dolayı çelik kirişin rijitliğini ve eğilme dayanımını arttırmaktadır.

BÖLÜM 2. KOMPOZİT KİRİŞLER

Betonarme döşeme plaklarıyla çelik döşeme kirişlerinin, ya da betonarme köprü tabliyesiyle çelik köprü kirişlerinin ortak çalıştırılmasıyla kompozit kirişler ortaya çıkmıştır. Kompozit kirişler, üzerlerine serbestçe oturan bir betonarme plağı yalnız başlarına taşımaya çalışan çelik kirişlere göre çok ekonomiktirler. Bir kompozit kirişte, eğilmeden meydana gelen kuvvet çiftinin çekme bileşeni çelik profilce, basınç bileşeni ise ya yalnız betonarme plakça, ya da betonarme plak ve çelik kirişin bir bölümünce ortak olarak taşınmaktadır. Betonarme tablanın bir ölü yük olmaktan çıkıp basınç bileşenini taşıyan bir elemana dönüşmesinin yanı sıra, ortak çalışmada kuvvet çiftinin manivela kolunun da büyümesi ikinci bir ekonomik etken oluşturmaktadır.

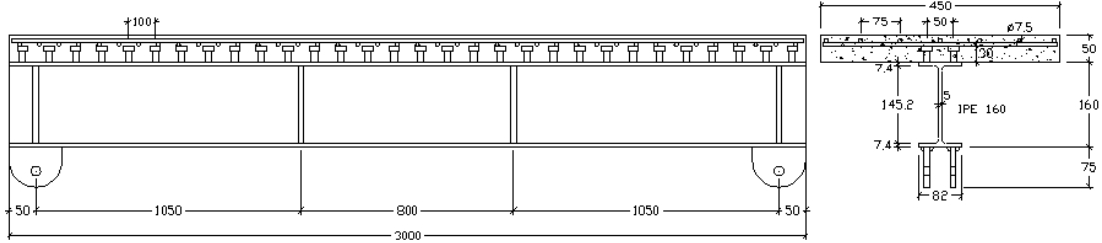
Kompozit kirişlerin basınç başlığını oluşturan betonarme plak, çelik kirişin üzerine betonu doğrudan dökülerek bağlanacağı gibi, önceden dökülmüş hazır bir plak olarak çelik enkesite sonradan da bağlanabilir. Yerinde döküm betonarme plak durumunda, çelik profil, plak betonu dökülmeden önce açıklıkta ara noktalardan mesnetlenmediği takdirde, beton plağın (sıva, tesviye betonu ve yer kaplaması hariç) ve kendisinin öz ağırlıklarını taşır. Bu durumda ortak çalışma yalnız işletme yüklerinde meydana gelir. Betonarme plak ile çelik profilin işletme ve sabit yüklerin tamamında ortak çalışmasının sağlanması için, çelik profil plak betonu dökülmeden önce, en az açıklığın üçte bir ara noktalarında mesnetlenir. Bu ara mesnetler, beton hesaplarda öngörülen mukamevetini kazandıktan sonra sökülür [27].

Bir kompozit kirişte, çelik enkesitle betonarme plağın bir bütün olarak çalışabilmelerini sağlamak ve birbirlerine bağlamak için kayma bağlantıları kullanılır. Beton ve çelik bölümler arasında oluşmak isteyen kaymayı önlemek, dolayısıyla kayma kuvvetini aktarmak, şekil değiştirmeler sonucu beton plağın çelik

parçadan ayrılıp kalkmasını önlemek kayma bağlantıları tarafından sağlanır. Günümüzde en çok kullanılan kayma bağlantısı türü, otomatikleşmiş imalatı dolayısıyla, kaynaklanmış başlıklı saplamalardır (kama).

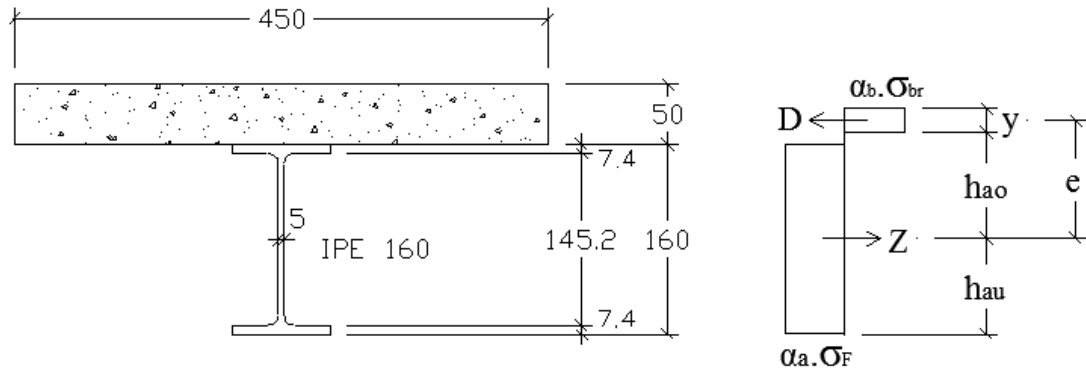
2.1. Çalışmada Kullanılan Kompozit Kiriş ve Tasarımı

Deneyisel çalışmada kullanılan kompozit kiriş, IPE 160 çelik profil ve üzerinde 50x450mm boyutlarında betonarme plaktan oluşmaktadır (Şekil 2.1). IPE 160 profili çelik kalitesi S275 (St 44) olup, akma dayanımı 275 MPa, kesit alanı 2009 mm²'dir. Betonarme plak beton kalitesi ise C30 ve eşdeğer küp basınç dayanımı 37 MPa'dır.



Şekil 2.1. Kompozit kiriş

Plastik hesapta, hem çelik hem de beton için dikdörtgen gerilme diyagramları kabul edilmektedir (Şekil 2.2). Kompozit kiriş moment taşıma kapasitesinin hesabı aşağıda detaylı bir şekilde verilmiştir.



Şekil 2.2. Kompozit kiriş gerilme diyagramları ve iç kuvvetler

$$Z = \alpha_a \cdot \sigma_F \cdot F_a = 1 \times 275 \times 2009 = 552475 \text{ N} = 552.475 \text{ kN}$$

$$D_b = \alpha_b \cdot \sigma_{br} \cdot b_{eff} \cdot y$$

$$y = \frac{\alpha_a \cdot \sigma_F \cdot F_a}{\alpha_b \cdot \sigma_{br} \cdot b_{eff}} = \frac{1 \times 275 \times 2009}{0.74 \times 37 \times 450} = 44.84 \text{ mm}$$

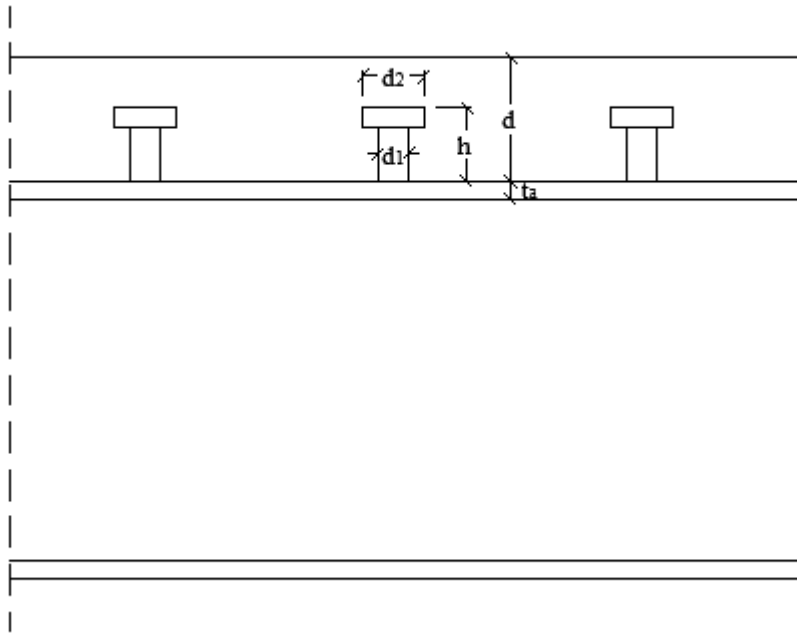
$$D_b = \alpha_b \cdot \sigma_{br} \cdot b_{eff} \cdot y = 0.74 \times 37 \times 450 \times 44.84 = 552474 \text{ N} = 552.474 \text{ kN}$$

$$M_u = Z \cdot e = Z \cdot \left(h_{ao} + d - \frac{y}{2} \right) = 552.475 \times \left(80 + 50 - \frac{44.84}{2} \right) = 59435 \text{ kNmm}$$

$$M_u = 59.44 \text{ kNm}$$

α_a ve α_b katsayıları, Amerikan yönetmeliği ACI değerleri alınmıştır [27].

Kayma bölgesinde bulunan kayma bağlantı elemanlarının plastik hesabı aşağıdaki şartlar göz önüne alınarak yapılmıştır. Kompozit kirişte, kayma bağlantı elemanı olarak Ø12x30mm boyutlarında saplamalar kullanılmıştır (Şekil 2.3).



Şekil 2.3. Başlıklı saplama geometrik büyüklükler

$$d_1 \leq \left\{ \begin{array}{l} 23 \text{ mm} \\ 2t_a \end{array} \right\} \longrightarrow 12 \text{ mm} \leq \left\{ \begin{array}{l} 23 \text{ mm} \\ 14.8 \text{ mm} \end{array} \right\}$$

$$d_2 \geq \{1.5 d_1\} \longrightarrow 25 \text{ mm} \geq \{18 \text{ mm}\}$$

Başlıklı saplamanın kayma kuvveti taşıma kapasitesi H_{lu} ;

$$H_{lu} = 0.32 \cdot \alpha \cdot d_1^2 \cdot \sqrt{\sigma_{br} \cdot E_b} \leq 0.55 \cdot d_1^2 \cdot \sigma_{FH}$$

$$\alpha = \left\{ \begin{array}{l} h/d_1 = 3.0 \text{ için } 0.85 \\ h/d_1 \geq 4.2 \text{ için } 1.00 \end{array} \right\} \text{ değerinde alınan bir katsayıdır [27].}$$

$$\max \sigma_{FH} = 350 \text{ MPa}$$

$$\alpha = \{30/12 = 2.5 \text{ için lineer enterpolasyon ile } 0.78\}$$

$$H_{lu} = 0.32 \times 0.78 \times 12^2 \times \sqrt{37 \times 32000} \leq 0.55 \times 12^2 \times 350$$

$$39110 \text{ N} > 27720 \text{ N}$$

$$H_{lu} = 27720 \text{ N} = 27.72 \text{ kN}$$

Dinamik yüklere maruz köprü ve benzeri yapılarda hesaplanan H_{lu} taşıma gücü 2/3 oranında azaltılır [27].

$$H_{lu} = 2/3 \times 27.72 = 18.48 \text{ kN}$$

Kayma bölgesindeki H kayma kuvveti; çelik profilin taşıyabileceği Z çekme kuvveti ile beton tabliyenin taşıyabileceği D_b basınç kuvvetinden küçük olana eşittir.

$$Z = \alpha_a \cdot \sigma_F \cdot F_a = 1 \times 275 \times 2009 = 552475 \text{ N} = 552.475 \text{ kN}$$

$$D_b = \alpha_b \cdot \sigma_{br} \cdot b_{eff} \cdot d = 0.74 \times 37 \times 450 \times 50 = 616050 \text{ N} = 616.050 \text{ kN}$$

$$H = 552.475 \text{ kN}$$

Plastik hesaba göre, kayma bölgesine koyulması gereken kayma bağlantı elemanlarının sayısı aşağıdaki formüle göre hesaplanır.

$$n_H = \frac{H}{\alpha_H \cdot H_{lu}} = \frac{552.475}{0.85 \times 18.48} = 35 \text{ adet}$$

Kayma bağlantı elemanlarının aralıkları eşit tutulur. α_H genellikle 0.85 değerinde alınan bir güvenlik katsayısıdır [27].

Başlıklı saplamaların birbirinden uzaklıkları;

$$\text{enine doğrultuda} \quad e_1 \geq 4 \cdot d_1 \longrightarrow e \geq 48 \text{ mm}$$

$$\text{boyuna doğrultuda} \quad e_2 \left\{ \begin{array}{l} \geq 5 \cdot d_1 \\ \leq (3 \sim 4) \cdot d \leq 600 \text{ mm} \end{array} \right\} \longrightarrow \left\{ \begin{array}{l} \geq 60 \text{ mm} \\ \leq 175 \leq 600 \text{ mm} \end{array} \right\} [27]$$

Yukarıdaki şekil şartlarını göz önüne alarak; başlıklı saplamaların enine doğrultudaki aralıkları 50mm, boyuna doğrultudaki aralıkları 100mm olarak belirlenmiştir.

2.2. Kompozit Kiriş – Çelik Levhalı Kiriş Benzeşimi

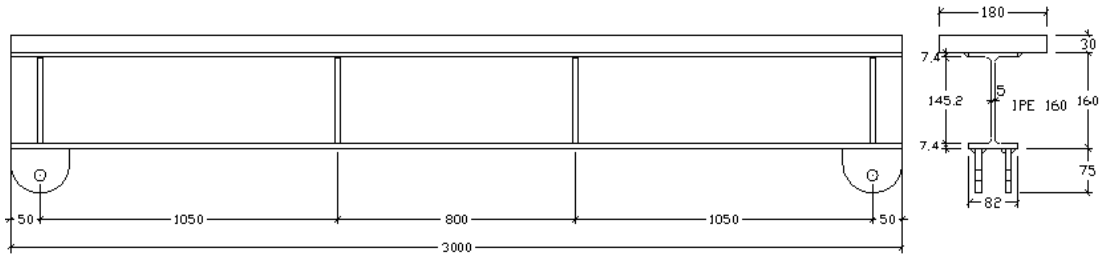
Betonarme plaklı kompozit kirişler için, lineer olmayan davranış, bilgisayar modellemesine pek uygun değildir. Kompozit kirişte bulunan betonarme plak yerine basınç başlığında çelik levha kullanılarak bilgisayar modellemesine uygun hale getirilebilir. Böylece betonarme tabliyeli kompozit kiriş, çelik levhalı kirişle benzeştirilebilir.

Kompozit kirişlerin betonarme kısmını çelik plaka ile temsil etmek deneyler için zaman açısından çok önemlidir. Bu benzeşim çeşitli boyutlarda çelik levhalarla sağlanabilir. Böylece daha sonraki deneyler için test kirişi olabilir [28].

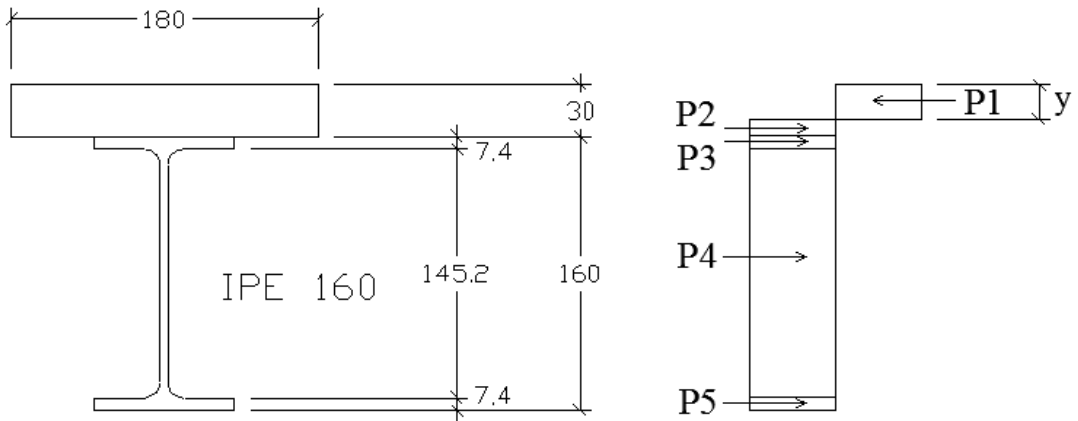
Kompozit kiriş kesitlerindeki eğilme momentinin oluşturduğu basınç gerilmeleri betonarme plak ile taşınırken çekme gerilmeleri ise çelik kiriş tarafından taşınır. Köprü kirişlerinin kompozit olması, kesitin üst başlığının betonarme olması, kesitin taşıyacağı moment kapasitesinin belirlenmesinde etkili olmaktadır. Moment kapasiteleri, taşıyacağı yüklerin sınırlarının belirlenmesinde etkili olmaktadır. Betonarme kısmını çelik ile simule etmek aynı moment taşıma kapasitesine sahip olması ile mümkün olabilmektedir.

Bölüm 2.1’de tasarımı yapılan ve moment taşıma kapasitesi hesaplanan kompozit kiriş, eşit moment taşıma kapasitesini sağlayacak şekilde çelik levhalı kiriş ile benzeştirilmiştir. Çelik levhalı kiriş, IPE 160 çelik profil ve üzerinde 30x180mm boyutlarında çelik levhadan oluşmaktadır (Şekil 2.4).

IPE 160 profili çelik kalitesi S275 (St 44) olup, akma dayanımı 275 MPa, kesit alanı 2009 mm²’dir. Çelik levha kalitesi ise S235 (St 37) ve akma dayanımı 235 MPa’dır.



Şekil 2.4. Çelik levhalı kiriş



Şekil 2.5. Çelik levhalı kiriş gerilme diyagramları ve iç kuvvetler

Çelik levhalı kiriş moment taşıma kapasitesi hesap edilirse;

$$P1 = 235 \times 180y = 42300y$$

$$P2 = 235 \times 180 \times (30 - y) = 1269000 - 42300y$$

$$P3 = 275 \times 82 \times 7.4 = 166870 \text{ N} = 166.870 \text{ kN}$$

$$P4 = 275 \times 5 \times 145.2 = 199650 \text{ N} = 199.650 \text{ kN}$$

$$P5 = 275 \times 82 \times 7.4 = 166870 \text{ N} = 166.870 \text{ kN}$$

$$P1 = P2 + P3 + P4 + P5$$

$$42300y = 1269000 - 42300y + 166870 + 199650 + 166870$$

$$84600y = 1802390$$

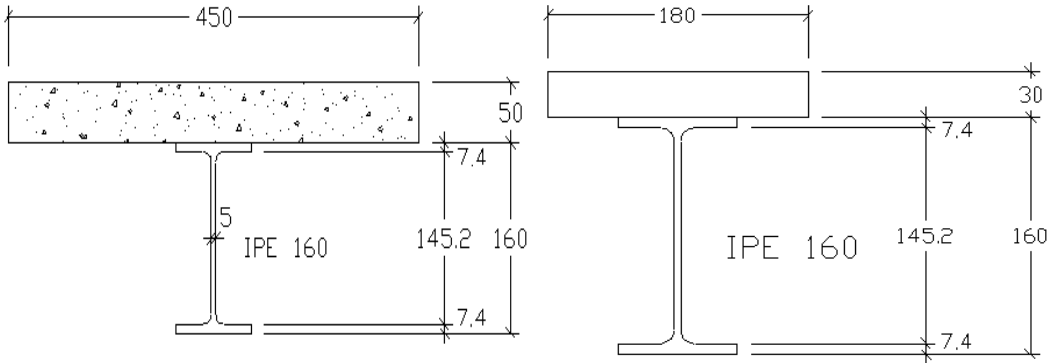
$$y = 21.3 \text{ mm}$$

$$P1 = 235 \times 180 \times y = 235 \times 180 \times 21.3 = 900990 \text{ N} = 900.990 \text{ kN}$$

$$P2 = 235 \times 180 \times (30 - y) = 235 \times 180 \times (30 - 21.3) = 368010 \text{ N} = 368.010 \text{ kN}$$

$$M_u = 900.990 \times 10.65 + 368.010 \times 4.35 + 166.870 \times 12.4 + 199.650 \times 88.7 + 166.870 \times 165$$

$$M_u = 585088 \text{ kNmm} = 58.51 \text{ kNm}$$



Şekil 2.6. Betonarme ve çelik levhalı kirişler

Bölüm 2.1'de tasarımı yapılan ve moment taşıma kapasitesi hesaplanan kompozit kiriş, eşit moment taşıma kapasitesini sağlayacak şekilde çelik levhalı kiriş ile benzeştirilmiş ve yaklaşık moment değerini vermiştir. Moment kapasiteleri, taşıyacağı yüklerin sınırlarının belirlenmesinde etkili olmaktadır.

Şekil 2.6'da geometrik özellikleri verilen çelik ve betonarme levhalı kirişlerin moment taşıma kapasitesi sırası ile 58.51 kNm, ve 59.44 kNm'dir. Yeter yakınlıkta olduğu düşünülmektedir.

Bundan sonraki bölümde imalatı ve hesabı zor olan betonarme başlıklı I kiriş yerine çelik başlıklı I kiriş kullanılmıştır. Çelik levhalı I kirişe HM-CFRP ile güçlendirme yapılmıştır.

BÖLÜM 3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

3.1. Giriş

Deneysel çalışmalar Sakarya Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Mustafa Kazak Yapı Laboratuvarı'nda yapılmıştır. Kompozit kiriş (betonarme tabliyeli), referans kiriş (basınç başlığı çelik levhalı), çekme başlığı HM-CFRP ile güçlendirilmiş kiriş olmak üzere 5 adet kiriş üzerinde 4 nokta yükleme deneyleri yapılmıştır.

Bölüm 2'de tasarımı yapılan ve moment taşıma kapasitesi hesaplanan kompozit kiriş, eşit moment taşıma kapasitesini sağlayacak şekilde çelik levhalı kiriş ile temsil edilmiştir. İlk deneyde kompozit kiriş, ikinci deneyde kompozit kirişi temsil eden eşit moment taşıma kapasiteli çelik levhalı kiriş kullanılmıştır. HM-CFRP ile güçlendirme çelik levhalı kiriş üzerinde yapılmıştır. Üçüncü, dördüncü ve beşinci deneyde bu güçlendirilmiş kiriş kullanılmıştır.

HM-CFRP ile güçlendirilmiş kirişte ideal göçme şekli, HM-CFRP'nin çekme dayanımına ulaşması ile HM-CFRP kopması sonucu dayanımın tükenmesidir. HM-CFRP'nin çelik profil başlığına tutunmasını sağlayan yapıştırıcının kayma dayanımının yeterli olmaması veya yapışma yüzeyinin yeterince büyük olmaması sonucu, HM-CFRP kopma dayanımına ulaşmadan yapıştırıcı sıyırılması meydana gelebilmektedir.

Bu bölümde, 5 adet kiriş üzerinde yapılan eğilme deneyleri yanında, kirişlerde kullanılan malzemelerin özellikleri, deney ekipmanları ve deney düzeneği hakkında bilgiler verilmiştir.

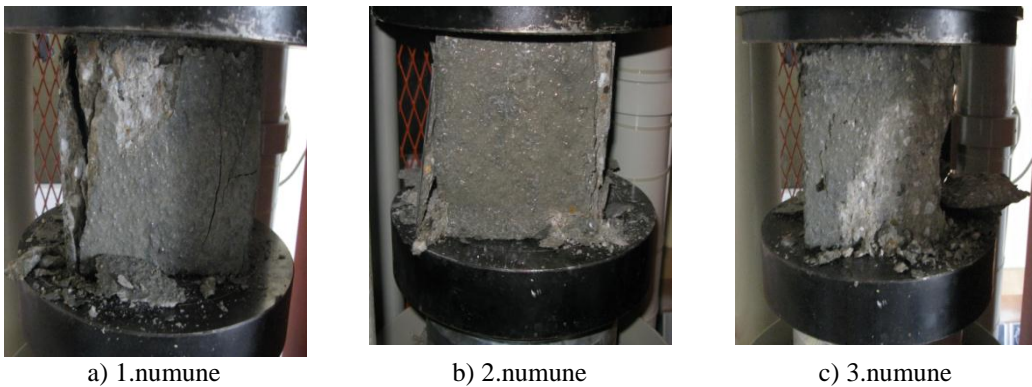
3.2. Malzeme Özellikleri

Kirişlerde, çelik, beton, yapıştırıcı ve HM-CFRP olmak üzere dört ana malzeme kullanılmıştır. Çelik profil ve çelik levha iki farklı kalitede çelikten oluşmaktadır. Kompozit kirişin betonarme tabliyesinde betonun yanında donatı çeliği ve başlıklı çelik sapslamalar kullanılmıştır. HM-CFRP'nin çelik profilin alt başlığına tutunmasını sağlamada kullanılan yapıştırıcıya karar vermek için 3 farklı marka yapıştırıcı test edilmiştir.

3.2.1. Betonun malzeme özellikleri

Çelik profil üst başlığına kama makinesi ile $\text{Ø}12 \times 30 \text{mm}$ boyutlarındaki başlıklı sapslamalar sabitlenmiş, $75 \times 75 \text{mm}$ aralıklı döşeme donatısı yerleştirilmiş ve C30 kalitesinde beton dökülerek kompozit kiriş betonarme tabliyesi oluşturulmuştur.

Beton dökümü sırasında, $15 \times 15 \text{cm}$ boyutlarında 3 adet küp beton numunesi alınmıştır. Numuneler 24 saat sonra kür havuzuna yerleştirilmiştir. 28 gün kür havuzunda bekletildikten sonra Sakarya Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Yapı Malzemesi Laboratuvarı'nda 2000 kN kapasiteli pres ile basınç deneyleri yapılmıştır (Şekil 3.1). Elde edilen değerler Tablo 3.1'de gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Beton numune deneyleri

Tablo 3.1. Beton numunelerin basınç deney sonuçları

Eleman	1.numune	2.numune	3.numune	Ortalama
Beton Kırılma Yüğü* (kN)	1023.06	978.99	949.42	983.82
Eşdeğer Küp Basınç Dayanımı (MPa)	45.5	43.5	42.2	43.7
Silindir Basınç Dayanımı (MPa)	36.4	34.8	33.8	35.0

*Sakarya Üniversitesi Yapı Malzemesi Laboratuvarı beton basınç deneyi sonuçları

TS 500'de beton kalitesi C30 için verilen eşdeğer küp basınç dayanımı 37 MPa, karakteristik basınç dayanımı 30 MPa, elastisite modülü 32000 MPa'dır. Basınç deneyleri sonucunda elde edilen ortalama silindir basınç dayanımı 35 MPa bulunmuştur. Ancak beton sınıfını belirleyen karakteristik basınç dayanımı, numune silindir basınç dayanımlarının bu değerden küçük olma olasılığı %10 olan değerdir. Ortalama silindir basınç dayanımı C35 beton kalitesi basınç dayanımında olmasına rağmen, 2 numunenin değerleri ortalama değerden küçük olduğu için karakteristik basınç dayanımı 30 MPa (C30 beton kalitesi karakteristik basınç dayanımı) alınmıştır.

3.2.2. Çeliğin malzeme özelliği

IPE 160 profili çelik kalitesi S275 (St 44) olup, Eurocode 3'de verilen akma dayanımı 275 MPa'dır. Çelik levha kalitesi ise S235 (St 37) ve akma dayanımı 235 MPa'dır. Çelik elastisite modülü 210000 MPa'dır.

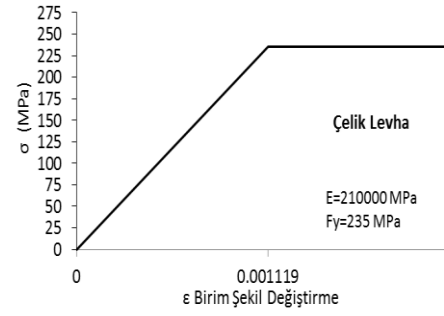
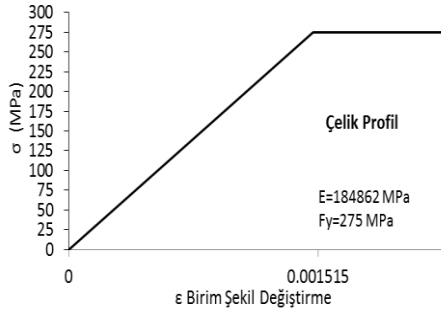
Standartlara uygun olarak, IPE160 profilinin alt başlığından, üst başlığından ve gövdesinden numuneler alınmıştır. Deney kirişlerinin çelik profilinden kesilen parçalara çekme deneyleri yapılmış ve Tablo 3.2'de gösterilen mekanik değerler elde edilmiştir. Verilen bu mekanik değerlerden gerilme-şekil değiştirme grafikleri elde edilmiştir (Şekil 3.2). Ancak çelik kirişlerin basınç başlığına kaynatılan çelik

levhalardan numune alınamamış, TS 648 yönetmeliğinde S235 (St 37) çeliği için verilen mekanik değerler dikkate alınmıştır.

Tablo 3.2. Çelik malzemenin deney sonunda elde edilen mekanik özellikler

Eleman	Kiriş üst başlığı	Kiriş gövdesi	Kiriş alt başlığı	I Kiriş (ort) Plastik Gerilme
Elastisite Modülü* (MPa)	179962	161657	212967	184862
Akma Dayanımı* (MPa)	275	265	300	280

*Siemens A.Ş. şirketinden alınan çelik çekme deney sonuçları



a) I Çelik profilin gerilme-şekil değiştirme diyagramı*

*Siemens A.Ş. 'nin verdiği değerlerden elde edilen gerilme-şekil değiştirme diyagramı

b) I Çelik kirişin üzerindeki levhanın gerilme-şekil değiştirme diyagramı**

** TS 648'e göre S 235'in mekanik özelliklerinden elde edilen gerilme-şekil değiştirme diyagramı

Şekil 3.2. Çelik I kiriş ve levhanın gerilme-şekil değiştirme grafikleri

3.2.3. Yapıştırıcı malzemesinin tayini ve özelliği

Çelik profilin, HM-CFRP ile beraber çalışabilmesi için çok kuvvetli bir yapıştırıcıya ihtiyaç duyulmaktadır. HM-CFRP'ye uygun olarak tasarlanan, MBT-Mbrace Laminate Adesivo olarak isimlendirilen yapıştırıcı kullanılmıştır. Ayrıca, yapılan araştırmalarda Sikadur-30 ve Spabond 345 yapıştırıcılarının da iyi sonuç verdiği görülmüştür. En iyi davranışı gösteren yapıştırıcının bulunması için üç yapıştırıcı da temin edilmiş ve kupon testleri yapılarak ana deneylerde kullanılacak yapıştırıcıya karar verilmiştir.

3.2.3.1. MBT-Mbrace Laminate Adesivo marka yapıştırıcı deneyleri

MBT-Mbrace Laminate Adesivo yapıştırıcı, iki bileşen olarak temin edilmiştir. Yapıştırıcı bileşenleri bir kabın içerisine 1/1 oranında konularak bir karıştırıcı yardımı ile 3 dakika karıştırılmıştır.

200x50mm boyutlarında, 3 farklı uç kesim şekline sahip 12 adet HM-CFRP ve 150x50mm boyutlarında 12 adet çelik levha hazırlanmıştır (Şekil 3.3). Levhalar hazırlandıktan sonra tel zımpara temizlenip tinerle silinmiş ve temiz bir bez ile kurutulmuştur. İki çelik levha uç uca getirilip, her ikisinin uç kısmından da 10cm mesafesine kadar ön ve arka yüzlerine spatula yardımı ile 1mm kalınlığında yapıştırıcı sürülmüştür. Daha sonra 200x50mm boyutlarında iki HM-CFRP'nin ön yüzlerine çok ince olacak şekilde yapıştırıcı uygulanmıştır. Uç uca getirilen çelik levhaların ön ve arka yüzlerine, iki levhayı da eşit şekilde kapatacak HM-CFRP'ler yerleştirilmiştir (Şekil 3.4). Kapatılırken karbon lifler hafif şekilde gerilmiş ve aralarında hava boşluğu kalması engellenmiştir. Deney numuneleri mengene ile sıkıştırılıp, fazla olan yapıştırıcının numunelerden dışarı çıkması sağlanmıştır. Numuneler 24°C ile 26°C oda sıcaklığında 7 gün bekletilmiştir.

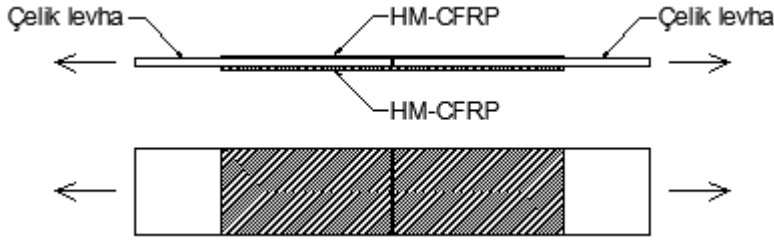


a) Çelik numuneler



b) Numune hazırlanması

Şekil 3.3. MBT-Mbrace Laminate Adesivo yapıştırıcı için numune hazırlanması



Şekil 3.4. Kupon test numunesi şekli

3.2.3.2. Sikadur-30 marka yapıştırıcı deneyleri

Sikadur-30 yapıştırıcı, iki bileşen olarak Sika Yapı Kimyasalları A.Ş.'den temin edilmiştir. Yapıştırıcı bileşenleri bir kabın içerisine 1/3 oranında konularak, bir karıştırıcı yardımı ile 3 dakika karıştırılmıştır.

Yapıştırıcının kayma dayanımını bulmak için; 150x50mm boyutlarında 6 adet çelik plaka ile 200x50mm boyutlarında 6 adet HM-CFRP hazırlanmıştır. Bölüm 3.2.3.1'de anlatılan şekilde 3 deney numunesi hazırlanmıştır. Ancak bir önceki deneyden farklı olarak numunelerin birbirini üzerinde kaymasını engellemek için kalıplar hazırlanmıştır (Şekil 3.5). Numuneler 24°C ile 26°C oda sıcaklığında 7 gün bekletilmiştir.



a) Numunenin mengene ile sıkıştırılması



b) Kalıptan çıkan numuneler

Şekil 3.5. Sikadur-30 yapıştırıcı için numune hazırlanması

3.2.3.3. Spabond 345 marka yapıştırıcı deneyleri

Spabond 345 yapıştırıcı, iki bileşen olarak İngiltere'den temin edilmiştir. Yapıştırıcı bileşenleri bir kabın içerisine 1/2 oranında konularak, bir karıştırıcı yardımı ile 3 dakika karıştırılmıştır.

250x50mm boyutlarında 6 adet çelik levha tel zımpara ile temizlenip, tinerle silinmiştir. Daha sonra temiz bir bez ile kurulanmış levhaların belirli kısımlarına yaklaşık 1mm kalınlığında yapıştırıcı sürülmüştür. Önceki deneylerden farklı olarak çelik levhalar birbirine yapıştırılmıştır. Mengene ile sıkıştırılan numuneler, 7 gün boyunca 24°C ile 26°C oda sıcaklığında bekletilmiştir.

Sakarya Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Laboratuvarlarında 400 kN'luk çekme kapasitesine sahip makinede numuneler çekilmiştir. Sıyırılma kuvveti değerlerinden kayma gerilmeleri Tablo 3.3'de hesap edilmiştir.

Tablo 3.3. Kupon testi numuneleri çekme deneyi sonuçları

Yapıştırıcı Markası	Numune No	Sıyırılma Kuvveti (N)	Yapıştırıcı Alanı (mm ²)	Kayma Gerilmesi $\sigma=P/A$ (MPa)	Ortalama Gerilme (MPa)
MBT-Mbrace Laminate Adesivo	1	40690	20000	2,03	2,04
	2	39510	20000	1,98	
	3	42000	20000	2,10	
	4	40620	20000	2,03	
	5	42620	20000	2,13	
	6	39420	20000	1,97	
Sikadur-30	1	35850	20000	1,79	1,64
	2	26420	20000	1,32	
	3	36210	20000	1,81	
Spabond 345	1	50780	7500	6,77	6,81
	2	51780	7500	6,90	
	3	50710	7500	6,76	

Yapılan kupon testleri sonucunda elde edilen kayma gerilmelerinden de görüleceği üzere, kayma dayanımı en yüksek yapıştırıcı Spabond 345'dir. Çelik kirişlerin çekme başlıklarına HM-CFRP yapıştırılarak güçlendirilmesinde Spabond 345 marka yapıştırıcı tercih edilmiştir.

3.2.4. HM-CFRP'nin malzeme özellikleri

HM-CFRP'nin deney numunelerinde kullanılması için bazı ön koşulların sağlanması gerekmektedir. Uygun boylarda kesilmiş HM-CFRP'nin yapışacağı yüzeyin temiz ve kuru olması gerekmektedir. Gerilmelerin yığıldığı lamina uçlarının kesilme şekli önem kazanmaktadır. Ancak HM-CFRP'nin çeliğe tutunmasını sağlayan en önemli etken yapıştırıcı kalitesidir.

HM-CFRP'nin özellikleri ürün kalatogunda Tablo 3.4'deki gibi verilmiştir.

Tablo 3.4. HM-CFRP'nin mekanik özellikleri

Özellik	HM5/1.4*
Elastisite Modülü (MPa)	440.000 - 460.000
Kalınlık (mm)	1.4
Genişlik (mm)	50
En kesit alanı (mm ²)	70
Kopma Gerilmesi (MPa)	1200 - 1500
Kopma şekil değişimi	$\epsilon = \%0.27 - \%0.34$

*HM 5/1.4: 50mm genişliğinde, 1.4mm kalınlığında

Tablo 3.4'de HM-CFRP için verilen mekanik değerler çeliğin mekanik değerleriyle karşılaştırıldığında, HM-CFRP'nin elastisite modülü çeliğin elastisite modülünün 2 katından, kopma gerilmesinin ise çeliğin kopma gerilmesinin 2.5 katından büyük olduğu görülür (S275 çeliğinin Eurocode 3'de verilen çekme dayanımı 430 MPa'dır).

3.3. Deney Ekipmanlarının Özellikleri

Laboratuvarda bulunan yükleme çerçevesi HI-TECH MAGNUS marka olup, orijinali 150 kN yüke göre tasarlanmıştır. Mevcut çerçevenin deneylerde fazla zorlanacağı ve deforme olabileceği endişesiyle güçlendirilmesi gerektiği düşünülmüştür. İlave dikme ve çapraz elemanları ile güçlendirme yapılmıştır.

Deney sırasındaki verileri okumak için Di4b 4 kanallı ve Ai8b 8 kanallı veri toplama sistemi (data logger) kullanılmıştır (Şekil 3.6). Düşey yer değiştirmeleri ölçmek için Opkon Linfar Resistive Position Transducer marka, LPS 100-B-5K model potansiyometrik cetvellerden faydalanılmıştır. Yatay yer değiştirmeleri ölçmek için Mitutoyo Absolute Digimatik Indicator marka, ID-C 1050B model dijital cetveller kullanılmıştır. Gerilmeler ise, Kyowa marka, KFG-10-120-C1-11 model gerilim pulları ile ölçülmüştür (Şekil 3.7). Yük verici olarak Enerpac marka piston kullanılmıştır (Şekil 3.8).



Şekil 3.6. Veri toplama sistemi cihazları

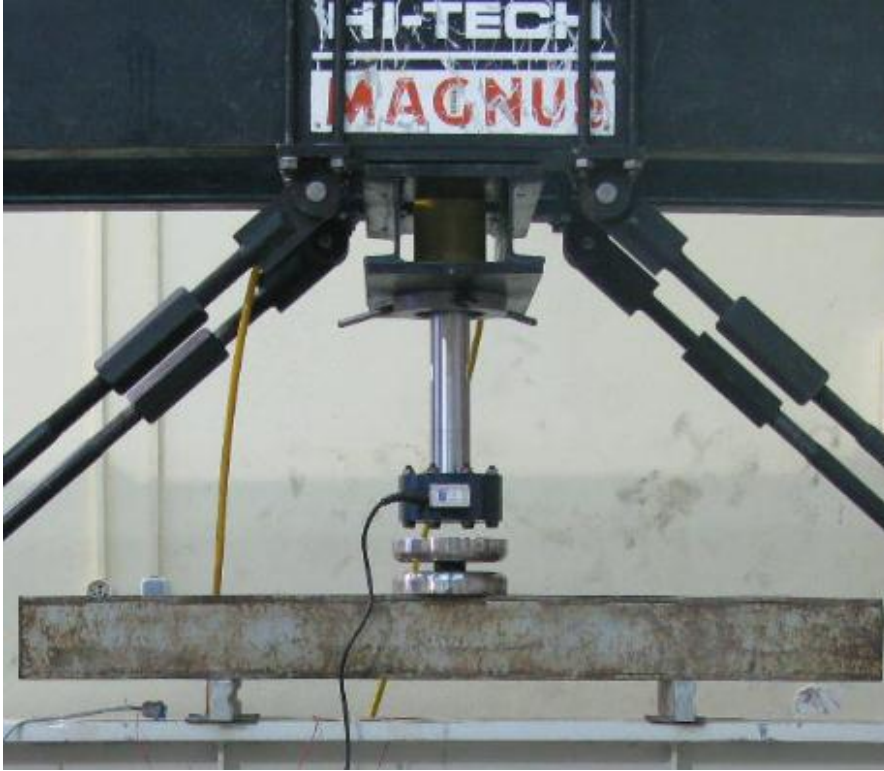


a) Dijital cetvel



b) Gerilim pulu

Şekil 3.7. Deney aletleri



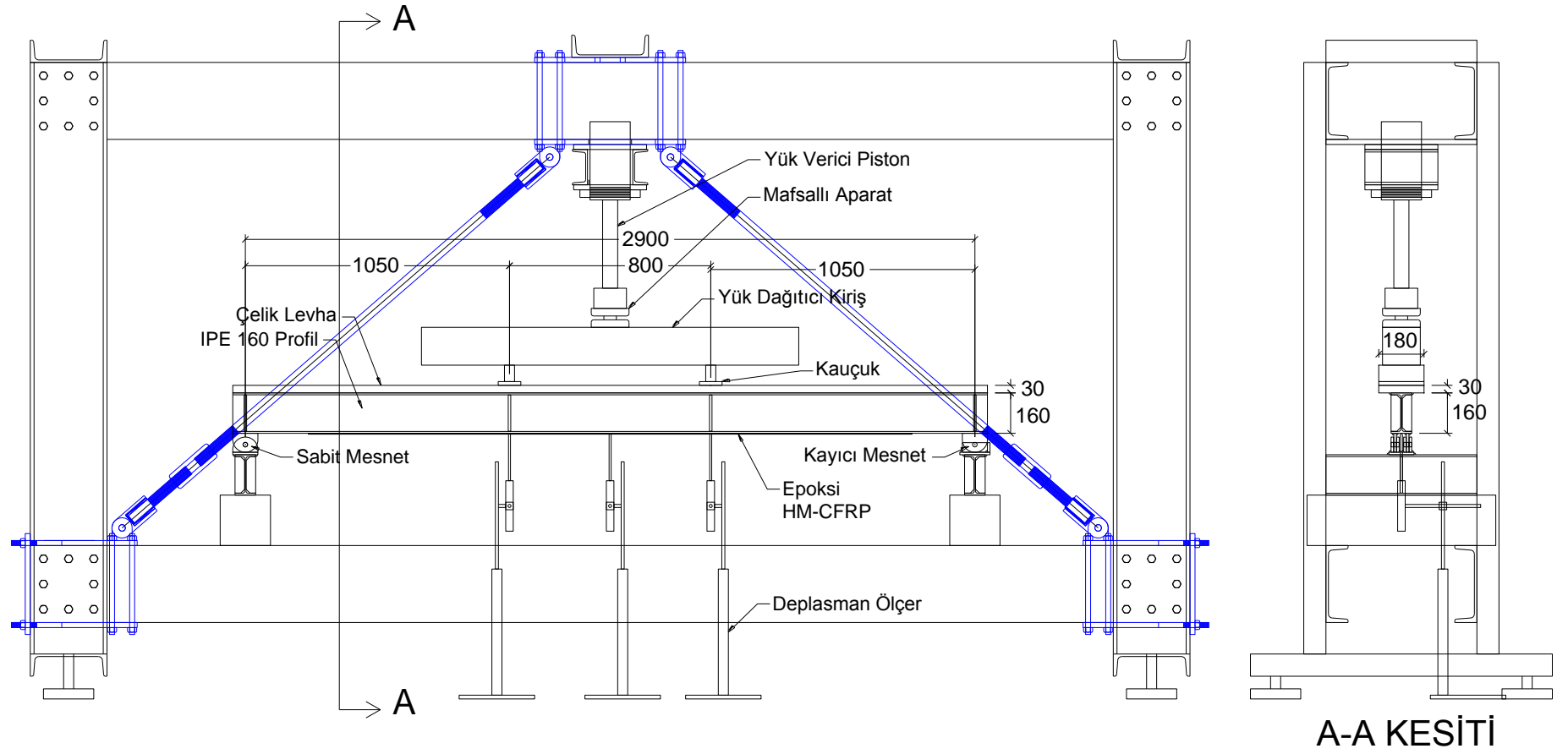
Şekil 3.8. Yük verici piston, yük geçişini sağlayan mafsallı aparat ve yük dağıtıcı

3.4. Deney Düzenekinin Hazırlanması

Deney kirişleriyle birlikte, bir adet sabit mesnet ve bir adet kayıcı mesnet yaptırılmıştır. Mesnetler çerçeveye doğrudan bağlanmayıp, çerçevenin alt başlığına sabitlenen rijit kutu kirişlere kaynaklanır. Deney kirişleri sabit mesnete tek cıvata ile bağlanmış, kayıcı menet üzerine ise eksenini doğrultusunda hareket edebilecek şekilde yerleştirilmiştir.

Yük verici piston ile dolu gövdeli yük dağıtıcı arasında sürtünmeden meydana gelebilecek ilave tesirleri engellemek için mafsallı aparat hazırlanarak yük verici ile piston arasına yerleştirilir. (Şekil 3.8).

Çerçevenin bir tarafındaki güçlendirme çaprazları, deney kirişleri çerçeveye yerleştirilmeden önce, diğer tarafındaki çaprazlar ise kirişler yerleştirildikten sonra bağlanmıştır. Çaprazların yeterli olacağı düşünülerek dikme elemanları bağlanmamıştır (Şekil 3.9).



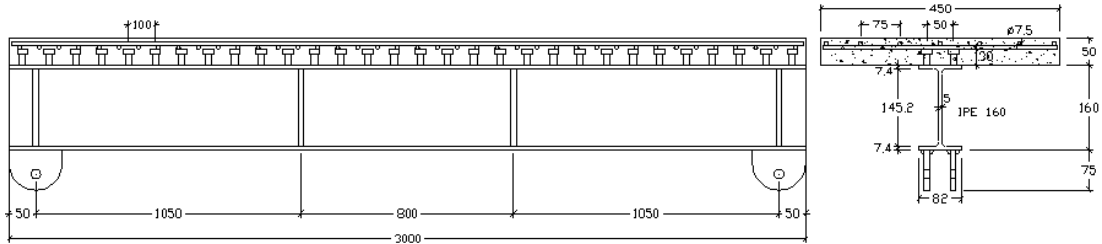
Şekil 3.9. Deney düzeneği

3.5. Deney Kirişlerinin Hazırlanması

Bölüm 2’de tasarımı yapılmış olan deney kirişleri sabit ve kayıcı mesnetlerle beraber yaptırılmıştır. Kirişler 4 adet olup, bunlardan 3 tanesi IPE160 çelik profilin üzerine 30x180mm’lik çelik levha kaynatılmış olarak, kompozit kirişin hazırlanmasında kullanılacak profil ise üzerine başlıklı saplamalar sabitlenmiş olarak teslim alınmıştır.

3.5.1. Kompozit kirişin hazırlanması

Kompozit kiriş, 3000 mm uzunluğunda IPE 160 çelik profil ve üzerindeki 50x450mm betonarme plaktan oluşmaktadır. Bölüm 2.1’de tasarımı yapılan kompozit kirişin (Şekil 3.10), betonarme kısmı Sakarya Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Mustafa Kazak Yapı Laboratuvarı’nda yapılmıştır.



Şekil 3.10. Betonarme döşemeli kompozit kiriş

3.5.1.1. Kayma kamalarının hazırlanması

Bir kompozit kirişte, çelik enkesitle betonarme plağın bir bütün olarak çalışmasını sağlamak ve birbirlerine bağlamak için kayma bağlantıları kullanılır. Beton ve çelik bölümler arasında oluşan kaymayı önlemek, dolayısıyla kayma kuvvetini aktarmak, şekil değiştirmeler sonucu beton plağın çelik parçadan ayrılıp kalkmasını önlemek kayma bağlantıları ile sağlanır. Günümüzde en çok kullanılan kayma bağlantısı türü, otomatikleşmiş imalatı dolayısıyla, kaynaklanmış başlıklı saplamalardır (kama). Deneyi yapılacak kompozit kirişte de kayma bağlantı elemanı olarak başlıklı saplamalar kullanılır.

Kayma kamaları, Almanya'dan getirilmiştir. Ø12x30mm boyutlarındaki başlıklı saplamalar, IPE 160 profili üst başlığına, enine doğrultudaki aralıkları 50mm, boyuna doğrultudaki aralıkları 100mm olacak şekilde özel tabancası ile kaynaklanır..

Kayma kamaları uygulanırken önce özel tabancaya kama yerleştirilir, daha sonra seramik somun konularak yüksek sıcaklık ile kirişe sabitlenir (Şekil 3.11).



a) Kayma kaması tabancası*



b) Kayma kaması tabancası güç kaynağı*

*Nelson Split Second Fastening A Doncasters Group Limited Company



c) Kayma kaması ve seramik somun

Şekil 3.11. Kayma kamaları uygulanma tekniği

3.5.1.2. Sac kalıp hazırlanması

Çelik profilin üzerine atılacak olan tabliye betonunun düzgün bir şekilde durması için, IPE 160 profili üst başlığının iki yanına sac kalıplar yerleştirilmiştir. Kalıplar,

Sakarya Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Laboratuvar'ında hazırlanmıştır. Kalıpların çelik profile kaynaklanması ise, Sakarya Üniversitesi Makine Mühendisliği Laboratuvar'ında yapılmıştır. Kalıpların daha sonra çıkartılacağı düşünülerek dış kısımdan 50-100 mm aralıklı punta kaynaklarla çelik profile sabitlenmiştir (Şekil 3.12).



a) Sac kalıbın hazırlanması



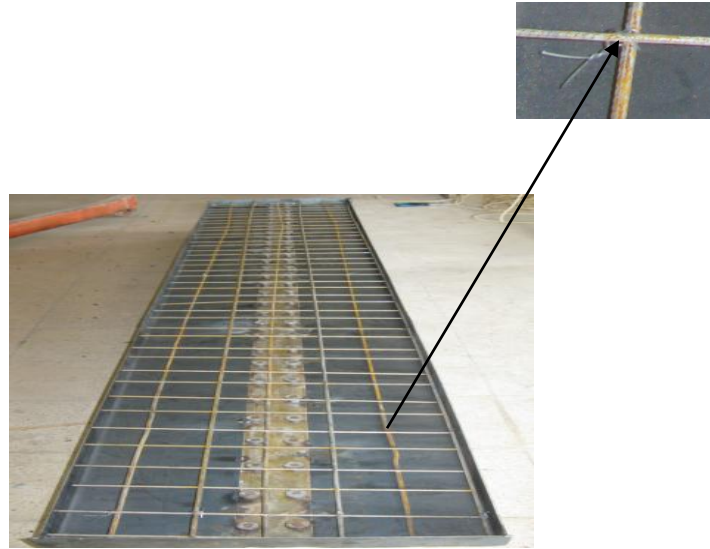
b) Sac kalıbın tamamlanmış hali

Şekil 3.12. Sac kalıbın hazırlanması

3.5.1.3. Hasır donatının hazırlanması

Hasır donatı, Çesan Yüksek Kaliteli Çelik Sanayii A.Ş.'den alınmıştır. Ürün tablosunda, çelik hasır çubuğunun malzemesi BÇ IV ve minimum akma sınırı 500 MPa olarak gösterilmektedir.

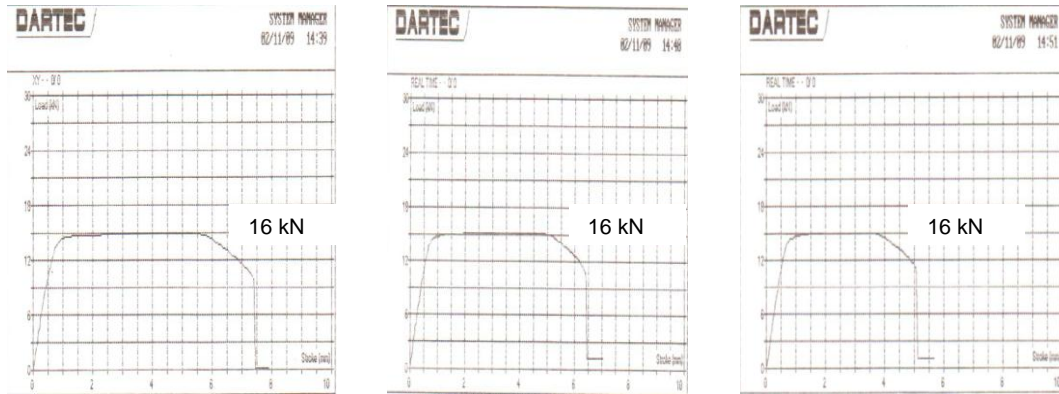
Hasır donatı Ø5mm çapında olup, 150x150mm aralıklı olarak temin edilmiştir. Ancak, 150x150mm aralıkların geniş geleceği düşüncesi ile kenarlarından 45mm kesilerek şaşırtmalı olarak yerleştirilmiş ve 75x75mm ızgara aralığı elde edilmiştir. Beton dökülürken donatıların birbirini üzerinden kaymasını önlemek için belirli yerlerden tel ile sabitlenmiştir (Şekil 3.13).



a) Hasır donatının yerleştirilmesi

Şekil 3.13. Hasır donatının yerleştirilmesi

Hasır donatılardan 15cm uzunluğunda 3 adet numune alınmış ve Sakarya Üniversitesi Makine Mühendisliği Laboratuvarı'nda çekme testi yapılmıştır. Dartec marka DY9 8SH model makineden çıkan çekme deneyi grafikleri Şekil 3.14'de gösterilmiştir.



a) 1. Numune

b) 2. Numune

c) 3. Numune

Şekil 3.14. Hasır donatı çekme deneyi sonuçları

Şekil 3.14'deki çekme deneyi grafiklerinde, numunelerin akma gerilmelerinin hesaplanacağı eğrinin yatay olduğu kuvvet değeri 16 kN'dur.

Hasır donatı akma gerilmesi:

$$\sigma_a = \frac{16 \times 1000}{\pi \times 12^2 / 4} = 814 \text{ MPa} > \sigma_a = 500 \text{ MPa}$$

3.5.1.4. Beton dökümü

Oyak Çimento Grup'dan C30 kalitesinde beton alınmıştır. Beton santralinden mikser ile getirilip kiriş üzerinde oluşturulan saç kalıba dökülmüştür. Betonun sac kalıbın içine düzgün bir şekilde yerleşmesi ve boşlukların doldurulması için, beton döküldükten sonra çelik çubuklar ile şişleme yapılmış ve kalıbın altından çekiç ile vurularak yerleşmesi sağlanmıştır (Şekil 3.15).

Betonun hidrasyonunu tam olarak yapması için kirişin üstü bez ile sarılmış, günde iki defa su ile ıslatılarak nemini koruması sağlanmıştır. Betonun mukavemetini kazanması için 28 gün beklenmiştir.



a) Betonun saç kalıba yerleştirilmesi

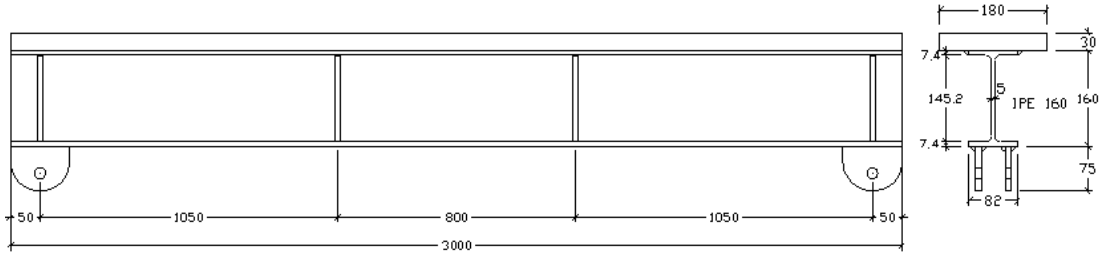


b) Tabliye betonu tesviye edilmiş hali

Şekil 3.15. Kompozit kiriş tabliye betonu dökümü

3.5.2. Çelik kirişin hazırlanması

Çelik levhalı kiriş, 3000 mm uzunluğunda IPE 160 çelik profil ve 30x180mm boyutlarında çelik levhadan oluşmaktadır (Şekil 3.16). Çelik levha, IPE 160 profiline üst başlık kenarlarından köşe kaynak yapılarak birleştirilmiştir.



Şekil 3.16. Çelik levhalı kiriş

3.5.3. HM-CFRP ile güçlendirilmiş kirişin hazırlanması

Betonarme tabliyeli kompozit kirişle aynı eğilme kapasitesine sahip çelik kiriş HM-CFRP ile güçlendirme yapılmıştır. Çelik kirişlerdeki, HM-CFRP ile güçlendirme işlemi ise Sakarya Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Mustafa Kazak Yapı Laboratuvarı'nda yapılmıştır.

3000mm uzunluğundaki çelik kirişin, IPE 160 profili alt başlığına Spabond 345 marka yapıştırıcı sürülmüş ve üzerine 2400mm uzunluğunda HM-CFRP şerit yapıştırılmıştır (Şekil 3.17). HM-CFRP şeritinin kalınlığı 1.4mm, genişliği ise 50mm'dir. HM-CFRP şerit yapıştırıldıktan sonra üzerine ahşap konulmuş ve mingenelerle sıkıştırılarak yapıştırıcının fazlasının dışarı çıkması sağlanmıştır (Şekil 3.18). Mingeneler bir hafta bekletildikten sonra sökülmüştür. Yapıştırıcının kurumması için deneyden önce bir ay beklenmiştir.



Şekil 3.17. Çelik kirişe HM-CFRP yapıştırılması



Şekil 3.18. HM-CFRP'nin mengenerlerle sabitlenmesi

3.6. Kiriş Eğilme Deneyleri

3.6.1. Kompozit kiriş deneyi

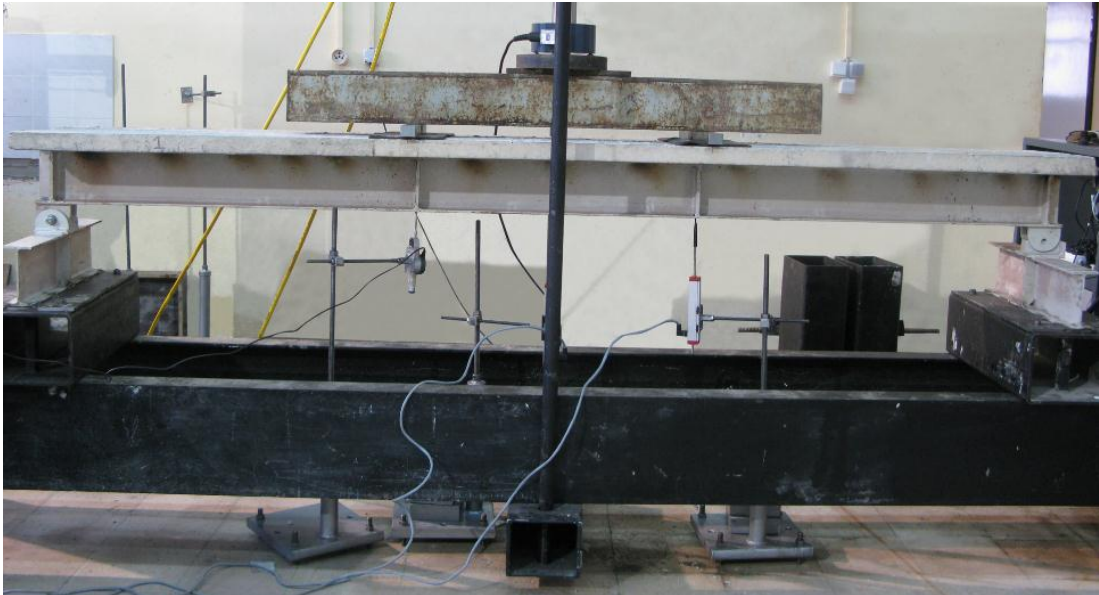
3000 mm uzunluğundaki betonarme tabliyeli kompozit kirişe dört nokta yükleme deneyi yapılmıştır. Kirişin mesnet açıklığı 2900 mm, yükler arası mesafe 800 mm'dir. Profil gövdesine, her iki mesnet üstünde ve yüklerin uygulanma

noktalarında, kesme kuvvetinin başlıklar arasında geçişini sağlayan berkitme levhaları mevcuttur.

400 kN kapasiteli Enerpac marka piston yardımı ile yükleme yapılmıştır. Kirişin iki noktasına eşit miktarda yük uygulanabilmesi için dolu gövdeli yük dağıtıcı kiriş kullanılmıştır. Yük verici piston ile dolu gövdeli yük dağıtıcı arasında sürtünmeden meydana gelebilecek ilave tesirleri engellemek için aralarına mafsalı aparat yerleştirilmiştir. İki noktadan çizgisel olarak yükleri kompozit kirişe aktaran çelik çubukların, betonarme tabliyeye zarar vermesini engellemek için altlarına lastik pedler yerleştirilmiştir (Şekil 3.19).

Sabit ve kayıcı mesnetler çerçeveye doğrudan bağlanmamış, çerçevenin alt başlığına sabitlenen rijit kutu kirişlere kaynatılmıştır. Kompozit kiriş sabit mesnete tek civata ile bağlanmış, kayıcı menet üzerine ise eksenini doğrultusunda hareket edebilecek şekilde yerleştirilmiştir (Şekil 3.19).

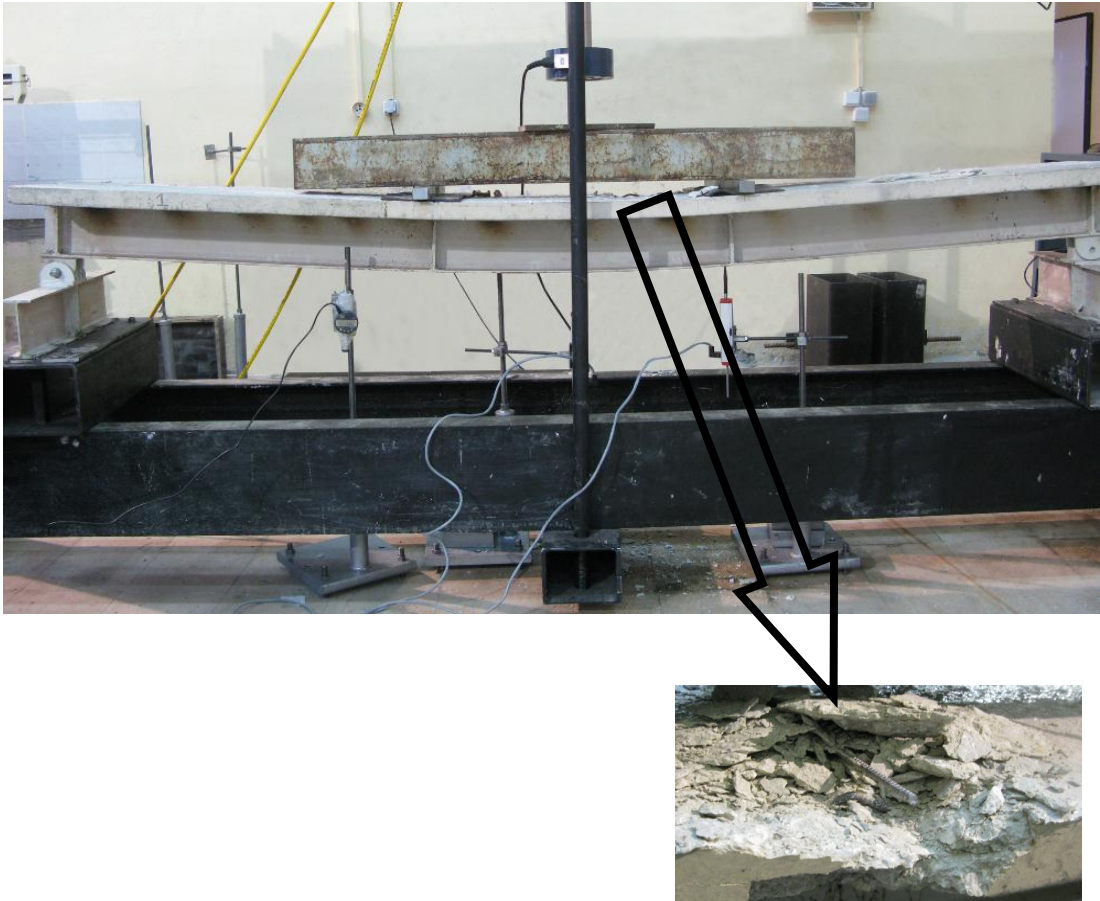
Düşey yer değiştirmeleri ölçmek için, kompozit kirişin orta noktasına ve berkitmelerin bulunduğu yerlerin altına deplasman ölçerler yerleştirilmiştir.



Şekil 3.19. Kompozit kiriş yükleme öncesi

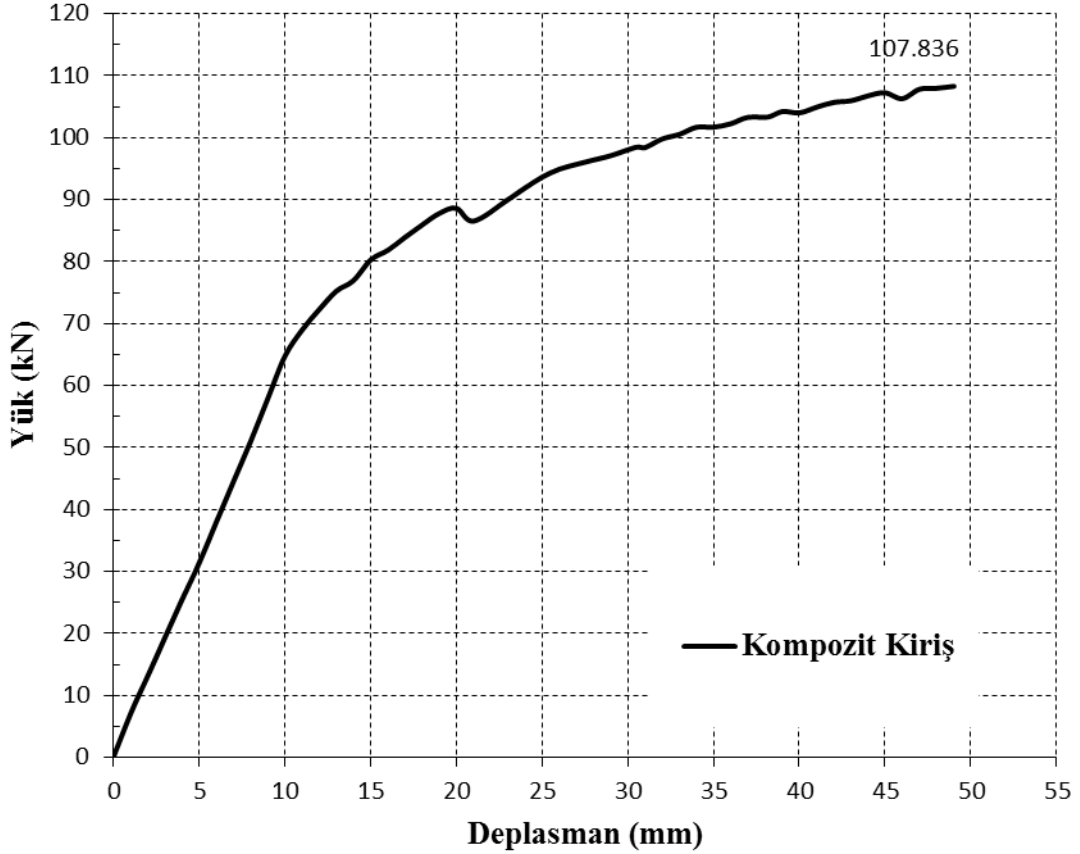
Deney sırasında deplasman ölçerlerden ve yük vericiden gelen değerler, veri toplama sistemi (data logger) yardımı ile okunup dönüştürü program ile bilgisayara aktarılmıştır. İki adet veri toplama sistemi kullanılmıştır. Bunlardan birisi, 4 kanallı olan Ai4b, diğeri ise 8 kanallı olan Ai8b'dir. 4 kanallı olana deplasman ölçerlerden birisi bağlanmıştır. 8 kanallının 1. kanalına yük verici, 2. ve 3. kanallarına ise diğ deplasman ölçerler bağlanmıştır. Veri toplama sistemi saniyede 10 okuma alabilecek şekilde ayarlanmıştır.

Yük verici pistonu el ile manuel olarak bir kol yardımı ile kumanda edildiğinden, sabit bir hızla yükleme yapılmaya çalışılmıştır. Yükleme sonunda, tabliye betonunda basınç ezilmesinden kırılmalar meydana gelerek göçme gerçekleşmiştir (Şekil 3.20). Çekme başlığında akma meydana gelmiş ve plastik deformasyonlar oluşmuştur.



Şekil 3.20. Kompozit kirişin yüklenme sonrası hali

Elde edilen yük ve orta nokta düşey yer değıştirme verileri kullanılarak yük deplasman grafiği çizilmiştir (Şekil 3.21).

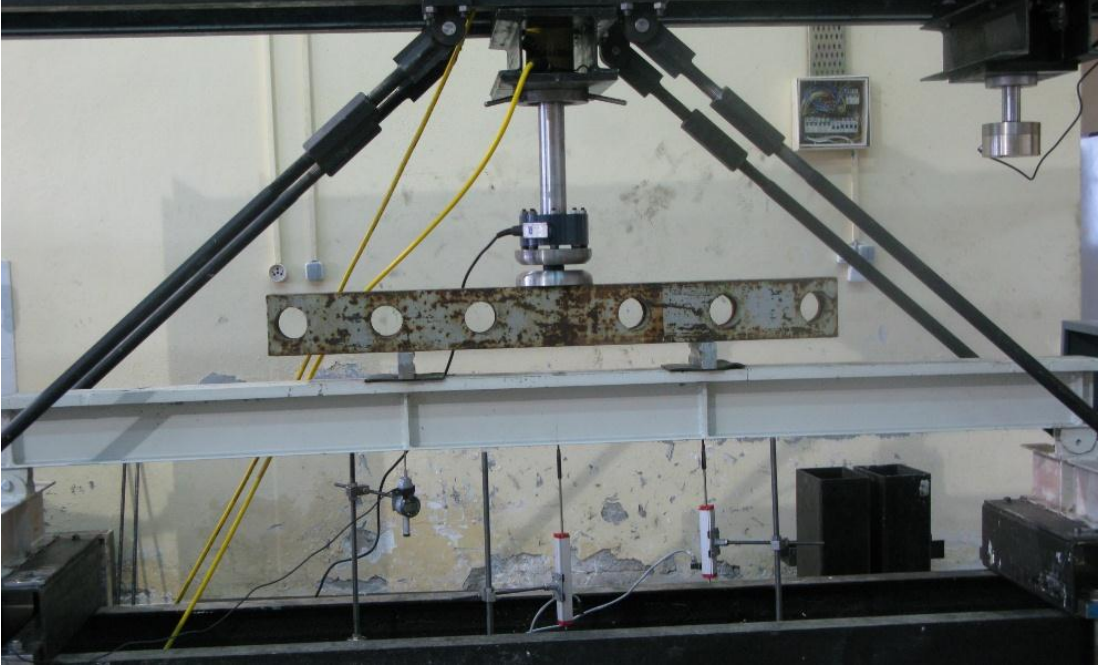


Şekil 3.21. Kompozit kirişin orta nokta yük-deplasman grafiği

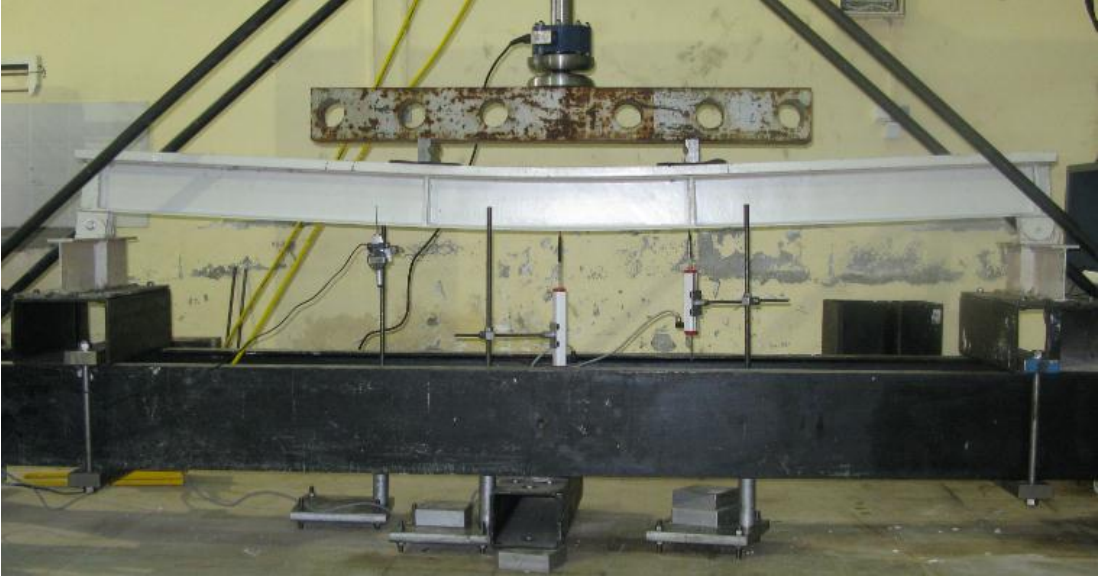
3.6.2. Referans kiriş deneyi

3000 mm uzunluğundaki çelik levhali kirişe dört nokta yükleme deneyi yapılmıştır (Şekil 3.22). Kompozit kiriş eğilme deneyinde uygulanan prosedürler çelik levhali (referans kiriş) kirişe de uygulanmıştır.

Yükleme sonunda, çekme ve basınç başlıklarında akma meydana gelerek plastik deformasyonlar oluşmuştur (Şekil 3.23).

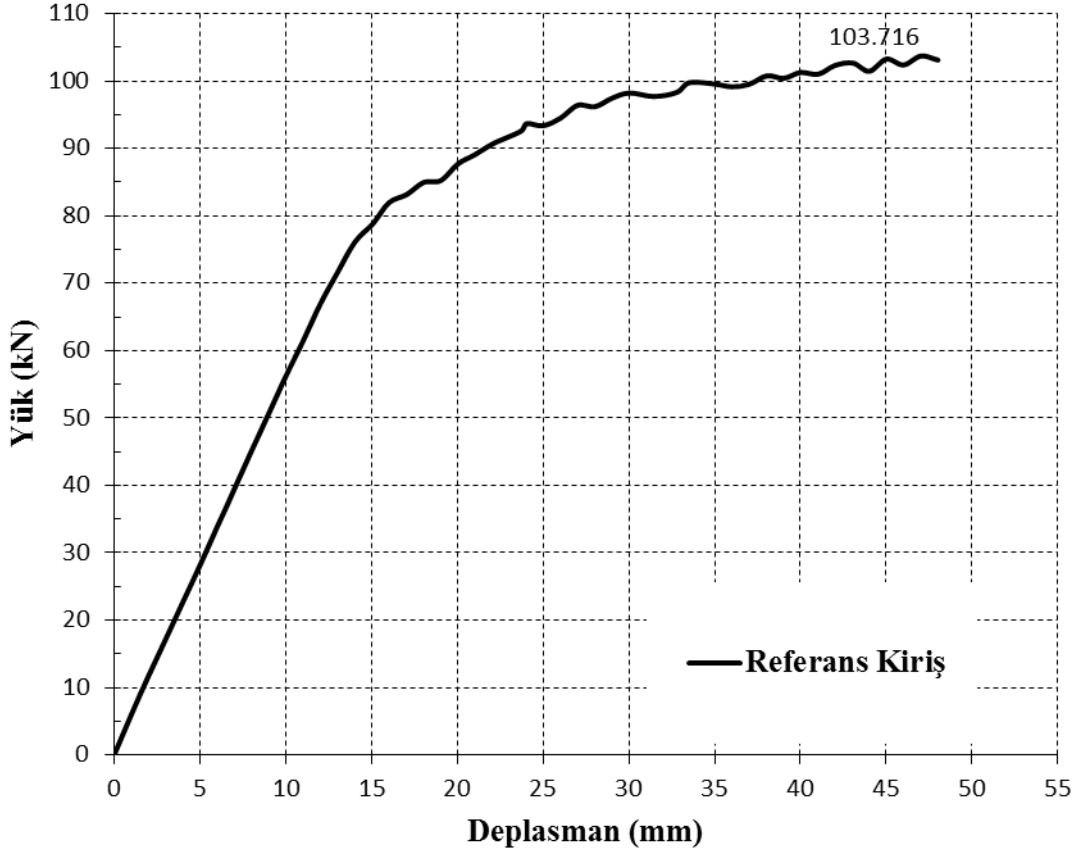


Şekil 3.22. Referans kiriş deney öncesi



Şekil 3.23. Referans kiriş deney sonrası

Elde edilen yük ve orta nokta düşey yer değiştirme verileri kullanılarak yük deplasman grafiği çizilmiştir (şekil 3.24).

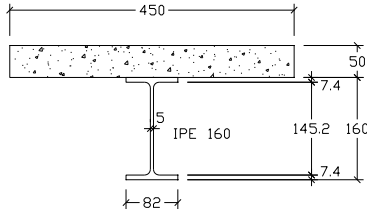
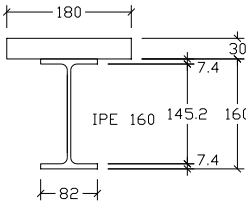


şekil 3.24. Referans kirişin orta nokta yük- deplasman grafiği

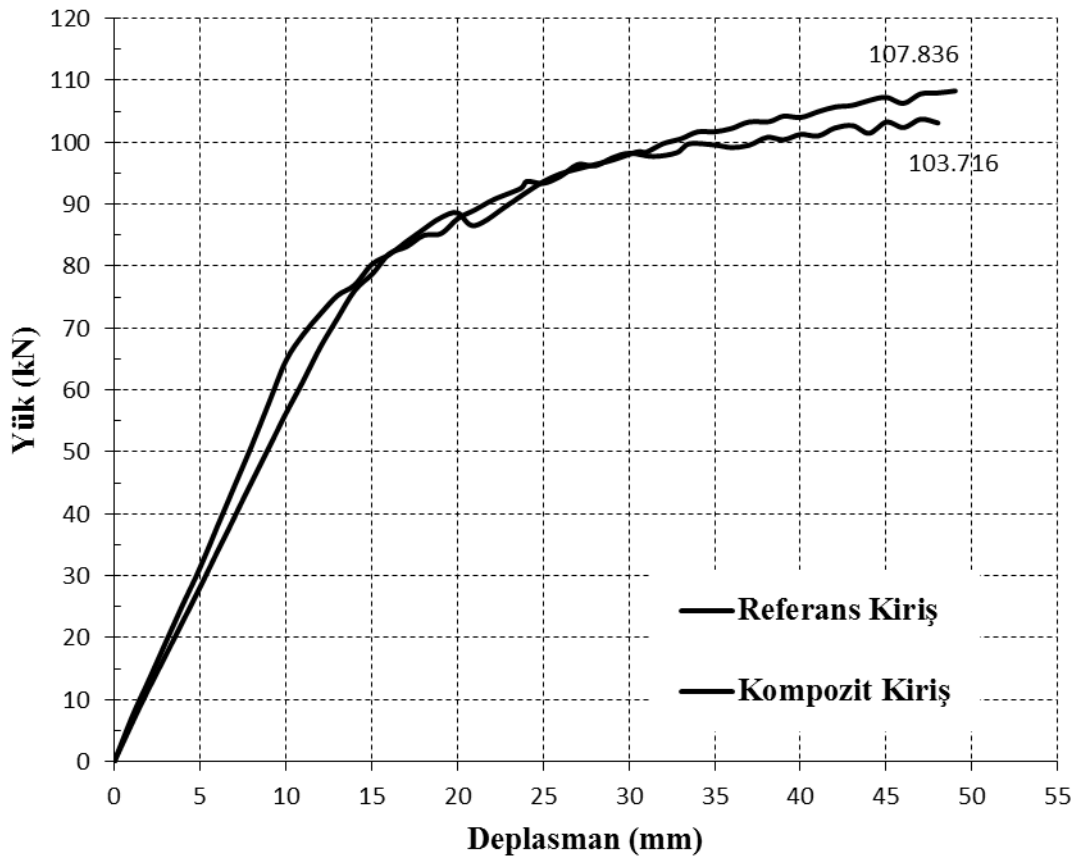
Bölüm 2’de çelik levhalı kiriş, eşit moment taşıma kapasitesini sağlayacak şekilde kompozit kiriş ile benzeştirilmiştir. Teorik olarak kirişlerin moment taşıma kapasiteleri hesap edilmiştir.

Tablo 3.5’de kompozit kiriş ile çelik levhalı kiriş (referans kiriş) yükleme deney sonuçları karşılaştırılmıştır.

Tablo 3.5. Kompozit kiriş - referans kiriş karşılaştırması

KİRİŞ	Kesit Geometrisi	Yükleme Deneyi Limit Yük (kN)	Deney-Moment Taşıma Kapasitesi (kNm)	Teorik Moment Taşıma Kapasitesi (kNm)
Kompozit Kiriş		107.84	56.62	59.44
Referans Kiriş		103.72	54.45	58.51

Şekil 3.25’de kompozit kiriş ile çelik levhalı kiriş (referans kiriş) orta nokta yük-deplasman grafikleri bir arada verilmiştir.

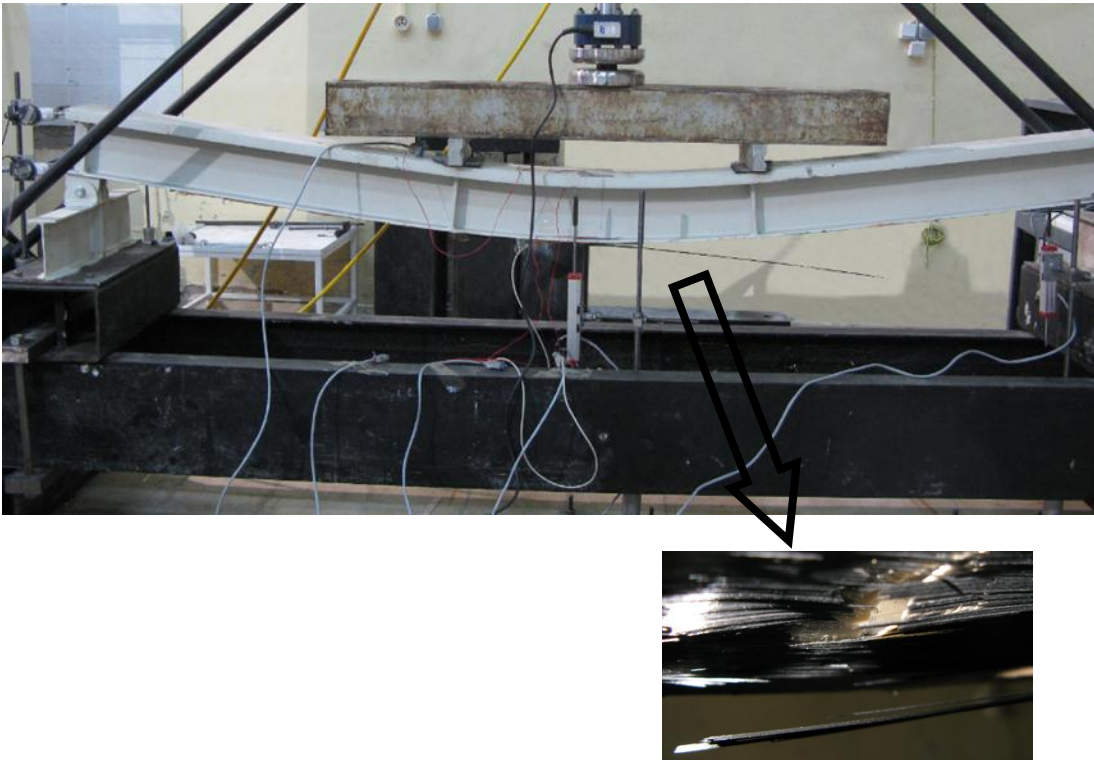


Şekil 3.25. Kompozit kiriş - Referans kiriş orta nokta yük- deplasman grafikleri

3.6.3. HM-CFRP ile güçlendirilmiş kiriş deneyi

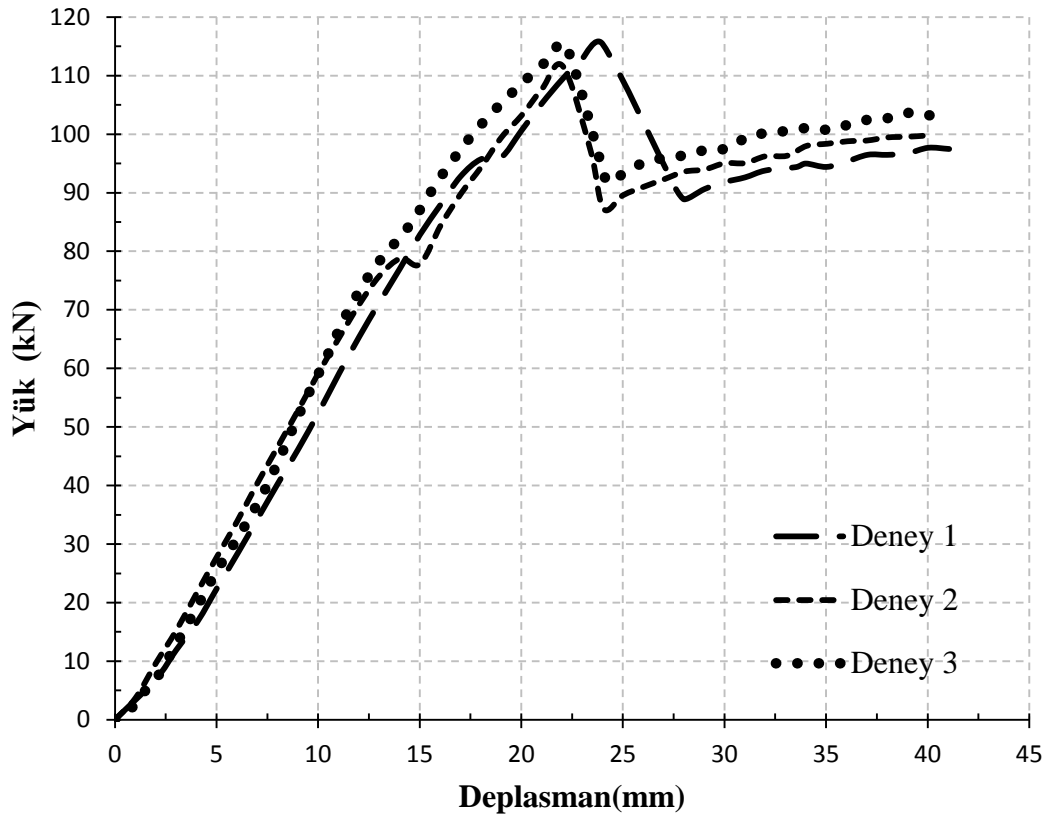
3000 mm uzunluğundaki 3 adet HM-CFRP ile güçlendirilmiş çelik levhalı kirişe dört nokta yükleme deneyi yapılmıştır. Önceki eğilme deneylerinde uygulanan prosedürler HM-CFRP ile güçlendirilmiş çelik levhalı kirişe de uygulanmıştır.

Yüklemeye sonunda, çekme başlığına yapıştırılan HM-CFRP'nin kopması sonucu göçme gerçekleşmiştir (Şekil 3.26). Çekme ve basınç başlıklarında akma meydana gelerek plastik deformasyonlar oluşmuştur.

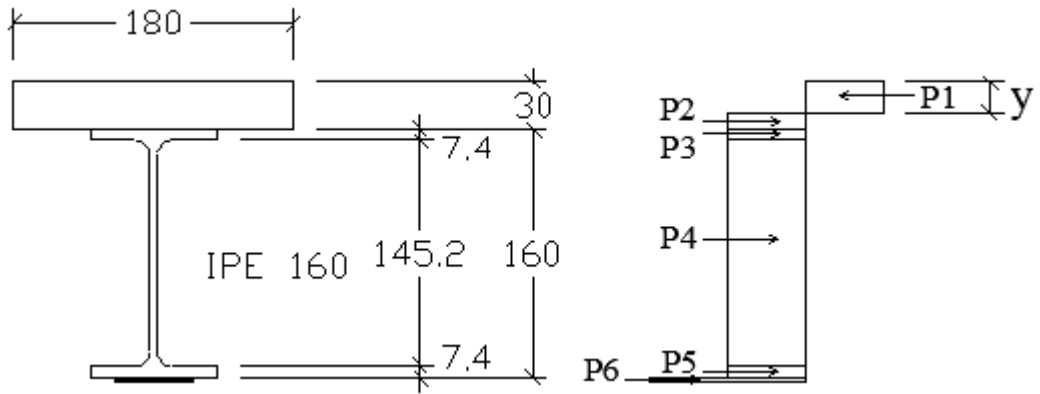


Şekil 3.26. HM-CFRP ile güçlendirilmiş çelik levhalı kiriş deney sonrası

Elde edilen yük ve orta nokta düşey yer değiştirme verileri kullanılarak yük deplasman grafiği çizilmiştir (Şekil 3.27).



Şekil 3.27. HM-CFRP ile güçlendirilmiş kirişlerin orta nokta yük-deplasman grafiği



Şekil 3.28. HM-CFRP'li kiriş gerilme diyagramları ve iç kuvvetler

Şekil 3.28'e göre HM-CFRP ile güçlendirilmiş kiriş moment taşıma kapasitesi teorik olarak hesap edilirse;

$$P1 = 235 \times 180y = 42300y$$

$$P2 = 235 \times 180 \times (30 - y) = 1269000 - 42300y$$

$$P3 = 275 \times 82 \times 7.4 = 166870 \text{ N} = 166.870 \text{ kN}$$

$$P4 = 275 \times 5 \times 145.2 = 199650 \text{ N} = 199.650 \text{ kN}$$

$$P5 = 275 \times 82 \times 7.4 = 166870 \text{ N} = 166.870 \text{ kN}$$

$$P6 = 1200 \times 50 \times 1.4 = 84000 \text{ N} = 84.000 \text{ kN}$$

$$P1 = P2 + P3 + P4 + P5 + P6$$

$$42300y = 1269000 - 42300y + 166870 + 199650 + 166870 + 84000$$

$$84600y = 1886390$$

$$y = 22.3 \text{ mm}$$

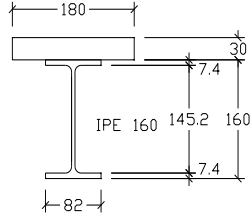
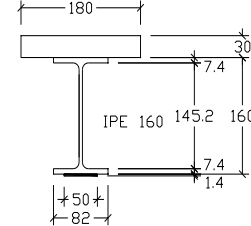
$$P1 = 235 \times 180y = 235 \times 180 \times 22.3 = 943290 \text{ N} = 943.290 \text{ kN}$$

$$P2 = 235 \times 180 \times (30 - y) = 235 \times 180 \times (30 - 22.3) = 325710 \text{ N} = 325.710 \text{ kN}$$

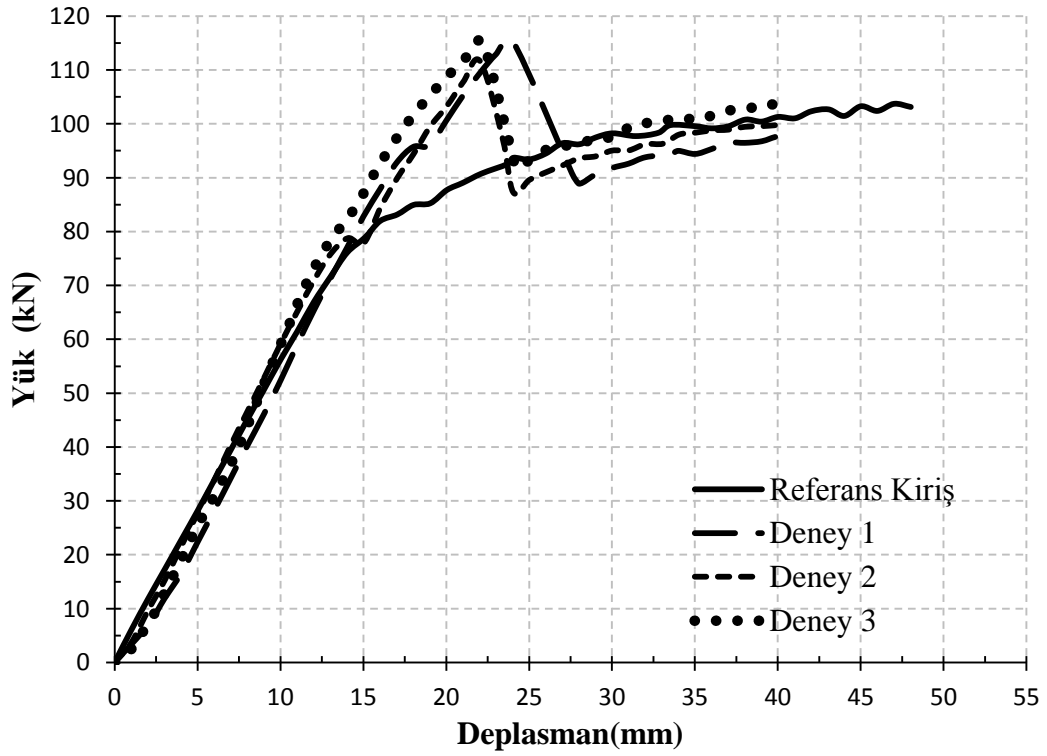
$$M_u = 943.290 \times 11.15 + 325.710 \times 3.85 + 166.870 \times 11.4 + 199.650 \times 87.7 + 166.870 \times 164 + 84.000 \times 168.4$$

$$M_u = 72695.57 \text{ kNmm} = 72.70 \text{ kNm}$$

Tablo 3.6. Referans kiriş - HM-CFRP'li kiriş karşılaştırması

KİRİŞ	Kesit Geometrisi	Yükleme Deneyi Limit Yük (kN)	Deney-Moment Taşıma Kapasitesi (kNm)	Teorik Moment Taşıma Kapasitesi (kNm)	% Fark
Referans Kiriş		103,72	54,45	58,51	4,06%
HM-CFRP'li Kiriş		115,40	60,59	72,70	12,11%

Şekil 3.29'de referans kiriş ve HM-CFRP ile güçlendirilmiş kiriş orta nokta yük-deplasman grafikleri bir arada verilmiştir.



Şekil 3.29. Referans kiriş - HM-CFRP ile güçlendirilmiş kiriş orta nokta yük-deplasman grafikleri

Tablo 3.6’da elik levhalı kiriş (referans kiriş) ile HM-CFRP ile gclendirilmiş kiriş yükleme deney sonuçları karşılaştırılmış ve yüzde farklar verilmiştir. Bölüm 3’de teorik hesapları ayrıntılı olarak yapılan iki kirişin taşıma kapasiteleri deney taşıma kapasiteleri ile karşılaştırılmış %4-12 arasında fark olduğu grlmştir.

şekil 3.29’da HM-CFRP ile gclendirilmiş kirişler gclendirilmemiş kiriş ile karşılaştırılmıştır. HM-CFRP ile gclendirilmiş kirişlerin taşıma yükünde yaklaşık %20 artış olduğu gözlemlenmiştir.

Bundan sonraki bölümde, HM-CFRP ile gclendirilmiş ve gclendirilmemiş iki kirişin nümerik modelleri yapılmaya çalışılmıştır. Bilgisayar zmleri şekil 3.29’daki deneylerle rtştrlmeye çalışılmıştır.

BÖLÜM 4. DOĞRUSAL OLMAYAN SONLU ELEMANLAR ANALİZİ VE NUMERİK MODELİN DOĞRULANMASI

4.1. Doğrusal Olmayan Sonlu Eleman Analizi

Sonlu elemanlar metodu (SEM), analitik olarak çözümü mümkün olmayan karmaşık mühendislik problemlerinin çözülmesinde etkin olarak kullanılan sayısal bir yöntemdir. Yöntem ilk olarak inşaat mühendisliğinde yapı analizinde kullanılmaya başlanmıştır. İlk çalışmalar Hrennikoff (1941) ve Mc Henry (1943) tarafından geliştirilen yarı analitik analiz metotlarıdır. Argyis ve Kelsey (1960) virtuel iş prensibini kullanarak bir direkt yaklaşım metodu geliştirmiştir. Sonlu elemanlar metodunun 1950'li yıllarda uçak gövdelerinin gerilme analizi için de kullanılabileceği anlaşılmıştır. Turner ve diğerleri (1956) bir üçgen eleman için rijitlik matrisini oluşturmuştur. “Sonlu Elemanlar” terimi ilk defa Clough (1960) tarafından çalışmasında telâffuz edilmiştir. Metodun üç-boyutlu problemlere uygulanması, iki-boyutlu teoriden sonra kolayca gerçekleşmiştir (örneğin, Argyis (1964)) [29, 30].

İlk gerçek kabuk elemanlar aksenal simetrik elemanlar olup (Grafton ve Strome (1963)), bunları silindirik ve diğer kabuk elemanları izlemiştir (Gallagher (1969)). Araştırmacılar 1960'lı yılların başlarında doğrusal olmayan problemlerle ilgilenmeye başlamışlardır. Turner ve diğerleri (1960) geometrik olarak doğrusal olmayan problemler için bir çözüm tekniği geliştirmiştir. Sonlu elemanlar metoduyla stabilite analizi ise ilk Martin (1965) tarafından tartışılmıştır. Statik problemlerin yanısıra dinamik problemler de sonlu elemanlar metoduyla incelenmeye başlanmıştır (Zienkiewicz ve diğerleri (1966), Koenig ve Davids (1969)). 1943 yılında Courant bölgesel sürekli lineer yaklaşım kullanarak bir burulma problemi için çözüm üretmiştir [29, 30].

Sonlu elemanlar yönteminin daha etkin ve yaygın kullanımı bilgisayar teknolojisindeki gelişmelere paralel olarak sağlanmıştır. Böylece bu sayısal yaklaşım yöntemi her ne kadar orijinal olarak yapı sistemleri için geliştirilmiş olsa da dayandığı esasların genelliği dolayısıyla yöntem akışkanlar mekaniği, zemin mekaniği, uçak mühendisliği, nükleer mühendislik, kaya mekaniği, elektromanyetik alanlar, termal analiz ve daha sayabileceğimiz pek çok mühendislik ve fizik problemlerinin çözümünde araç olarak kullanılmaktadır.

Genel amaçlı sonlu elemanlar paket programları 1970'li yıllardan itibaren ortaya çıkmaya başlamıştır. 1980'li yılların sonlarına doğru ise artık paket programlar mikro bilgisayarlarda kullanılmaya başlanmıştır.

Sonlu elemanlar metodunda gerçek cisimler birbirine bağlanmış sonlu eleman adı verilen alt bölümler ile tarif edilmektedir. Bu elemanlar birbirlerine düğüm noktası adı verilen özel noktalarla bağlanmışlardır. Düğüm noktaları genellikle elemanların birbirine bağlandıkları yerler olan eleman sınırlarında bulunmaktadır [7]. Böylece elemanlara, malzeme özellikleri ve sınır şartları atanabilmektedir.

Sonlu elemanlar metodunda bir eleman içerisinde hesaplanması istenen büyüklüğün (örneğin deplasmanın) değeri, o elemanın düğüm noktalarındaki değerler kullanılarak interpolasyon ile bulunur. Bu nedenle sonlu elemanlar metodunda bilinmeyen ve hesaplanması istenen değerler düğüm noktalarındaki değerlerdir. Sonlu elemanlar yönteminde kesin sonuç yerine yaklaşık bir sonuç elde edilmektedir [30].

ABAQUS, doğrusal ve doğrusal olmayan problemlerin çözümünde kullanılan sonlu elemanlar programlarından biridir. Programında implicit ve explicit olarak 2 farklı çözüm yöntemi vardır. Sonlu elemanlar modeli kurulurken; hangi yöntemin seçileceği, eleman tipinin ne olacağı, malzeme özellikleri ve sistemin nasıl tanımlanacağı gibi konular alt bölümlerde anlatılmaya çalışılmıştır.

4.1.1. Implicit (standart) çözüm - explicit (kesin) çözüm

Implicit metotta çözüm adımı, analizin yakınsama derecesine göre belirlenmektedir, bu nedenle çözüm adımı için bir sınır yoktur. Implicit dinamik analizde, integrasyon operatör matrisi devrik hale getirilmeli ve doğrusal olmayan denge denklemleri her bir çözüm adımında çözülmelidir. Explicit dinamik analizde, işlem adımının başlangıcında bilinen değerlere bağlı olarak deplasman ve hız değerleri hesaplanmalıdır. Bu nedenle global kütle ve rijitlik matrislerinin oluşturulmasına ve devrik hale getirilmesine ihtiyaç vardır [31].

Explicit metot, yüklemenin şeklinden ve süresinden bağımsızdır. Oluşturulan modelin en yüksek doğal frekansına bağlı küçük zaman aralıklarıyla çözüm yapmaktadır. Simülasyonlar genellikle 10 000 ile 1milyon çözüm adımında olur. Çözüm adımları için bilgisayar işlem zamanı oldukça kısadır [31].

Implicit çözümler explicit çözümlere göre genellikle çok daha az işlem adımıyla çözüm yaparlar. Bununla birlikte her bir işlem adımında, denklem takımları tekrar tekrar çözülmek zorunda olduğundan, bilgisayar işlem zamanı explicit metoda göre çok daha fazladır.

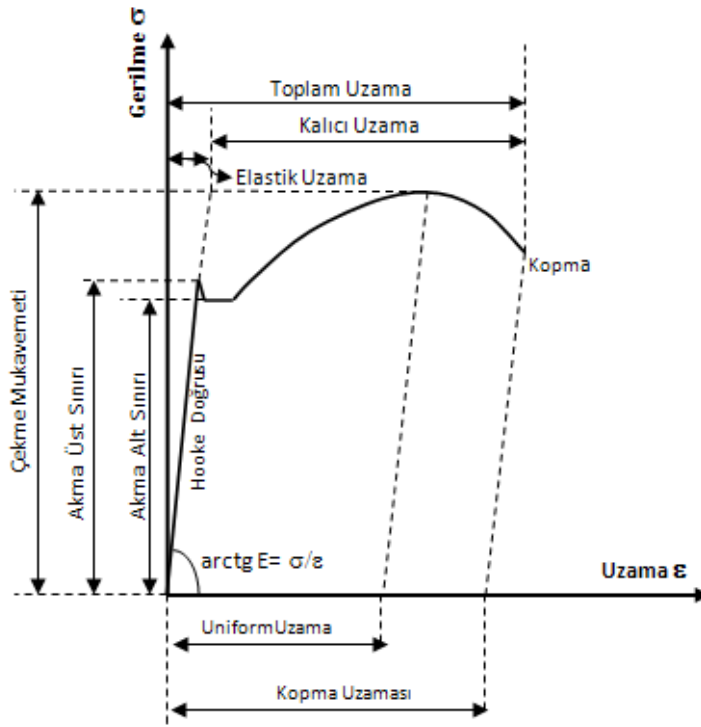
4.1.2. Malzeme modelleri

Malzeme tanımı ABAQUS/Explicit'de yapılmıştır. Bu çözümün diğer bir tercih sebebi ise, büyük sistemlerde küçük zaman artışlarında bile zaman tasarrufu sağlamasıdır [31].

4.1.2.1. Çelik malzeme modeli

Yapı çeliğinin statik yükler altındaki davranışının belirlenmesi, çeliğin mekanik özelliklerinin tanımlanması ile sağlanır. Mekanik özellikleri, elastisite modülü, poisson oranı, akma dayanımı gibi değerlerdir.

Yapı çeliğinin gerilme-şekil değiştirme eğrisi (Şekil 4.1) gösterilmiştir.



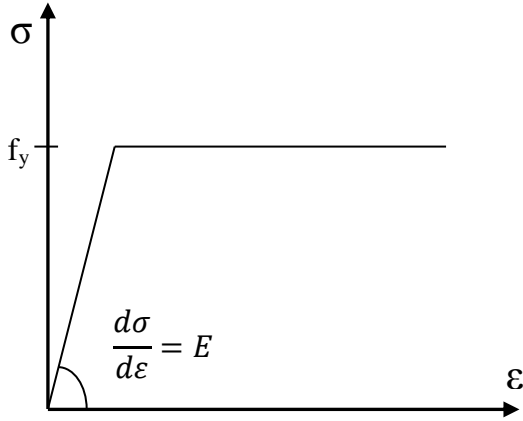
Şekil 4.1. Çeliğin gerilme-şekil değiştirme eğrisi [32]

Doğrulanması yapılan kiriş numerik modelinde çelik malzeme, ideal elasto-plastik malzeme davranışına göre tanımlanmıştır. İdeal elasto-plastik malzeme gerilme-şekil değiştirme diyagramı;

$$0 < \epsilon < \epsilon_e \quad \text{için} \quad \sigma = E \cdot \epsilon$$

$$\epsilon_e < \epsilon < \infty \quad \text{için} \quad \sigma = f_y$$

olarak iki doğru parçasından oluşmuştur (Şekil 4.2). Basınç ve çekme yüklemeleri altında malzemenin aynı davranışı gösterdiği kabul edilmektedir. Burada ϵ_e elastik birim şekil değiştirmeyi, E elastisite modülünü, f_y ise akma değerini göstermektedir [33].



Şekil 4.2. İdeal elasto-plastik malzeme diyagramı

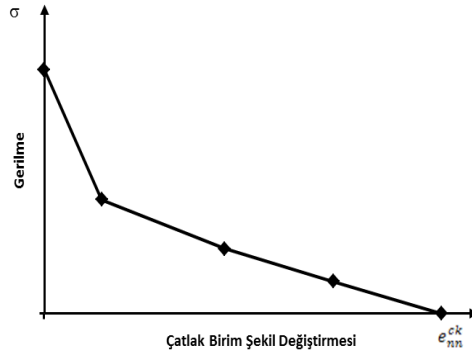
I çelik profil ve üzerindeki çelik levhanın gerilme şekil değiştirme diyagramları Bölüm 3.2.2, Şekil 3.2’de verilmiştir.

4.1.2.2. HM-CFRP malzeme modeli

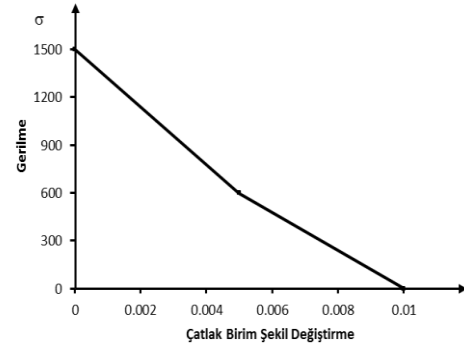
HM-CFRP malzemesi doğrusal olmayan gevrek malzeme olarak modellenmiştir. HM-CFRP malzemesi maksimum çekme gerilmesine kadar lineer elastik kabul edilmiştir. Daha sonra liflerde çatlak başlaması ve liflerin kopması olarak tanımlanmıştır.

Gevrek Kırılma:

Gevrek kırılma eleman modeli, çekme kırılmasının etkin olduğu cam, FRP, porselen gibi elemanların davranışlarının modellenmesinde kullanılmaktadır. HM-CFRP, çekme kırılmasının etkin olduğu bir malzeme olduğu için, ABAQUS sonlu elemanlar programında modellenirken gevrek kırılma malzeme davranışını temsil eden “brittle cracking” malzeme modeli kullanılmıştır.



a) Gevrek kırılma sonrası davranış [31]



b) HM-CFRP kırılma sonrası için kullanılan matematik model [34]

Şekil 4.3. HM-CFRP için kırılma sonrası matematik model

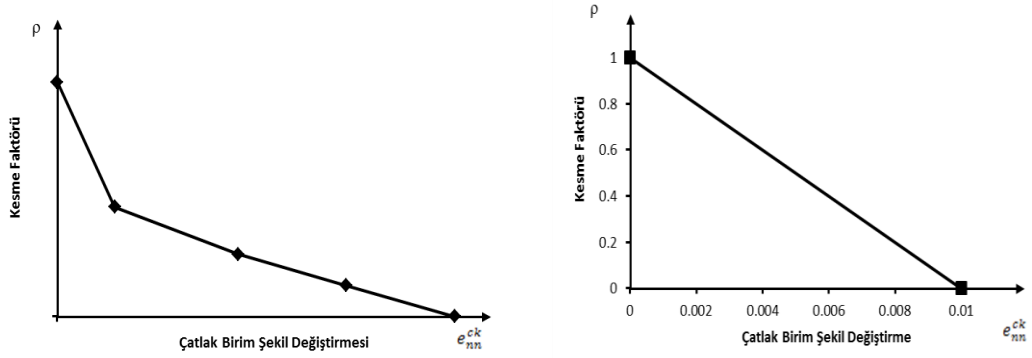
Şekil 4.3.a'daki σ çekme gerilmesini, e_{nn}^{ck} ise çatlaktaki birim şekil değişirmeyi göstermektedir. Kırılma sonrası davranış modellendiğinden, başlangıç anını e_{nn}^{ck} sıfır olarak kabul edilmektedir. HM-CFRP için kullanılan kırılma sonrası davranış ise Şekil 4.3.b' de verilmiştir. Kırılma sonrası davranışı deneysel olarak belirlemek çok zordur. Bu değerler, literatürden elde edilen bilgilere göre malzeme davranışına en yakın değerler elde edilecek şekilde belirlenmiştir.

HM-CFRP için malzeme mekanik özellikleri Bölüm 3.2.4, Tablo 3.4'de verilmiştir.

Kesme Koruması:

Çatlak sonrası davranış en az çatlak öncesi davranış kadar önemlidir. Çatlak başlangıcı sadece kırılmaya bağlıdır, çatlak sonrası malzeme davranışı ise çatlaktaki açılma miktarına bağlıdır. Kesitin çatlak kayma modülü çatlak açıldıkça azalır. Çatlama sonrası kayma modülü çatlak genişliğine bağlı olarak ifade edilebilir [31].

Çatlamamış kesitin kesme modülünün çatlamış kesitin kesme modülüne oranı “kesme faktörü” olarak tanımlanacak olursa, çatlak genişliği ile kesme faktörü arasındaki ilişki Şekil 4.4.a'da gösterilmiştir. Literatürden HM-CFRP malzemesi için elde edilen Şekil 4.4.b'deki diyagram sonlu elemanlar programına tanıtılmıştır.



a) Sonlu eleman programının kesme davranışı için önerdiği model [31]

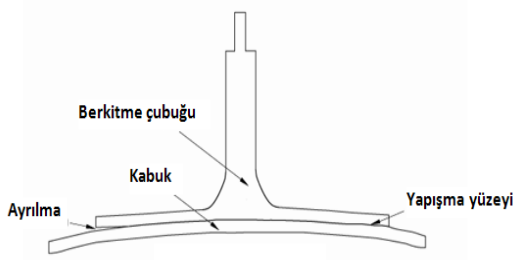
b) HM-CFRP için kullanılan matematik model [34]

Şekil 4.4. Kesme faktörü-çatlak birim şekil değiştirme diyagramı

4.1.2.3. Arayüz malzeme modeli

Sonlu elemanlar programında kompozit eleman oluşturulurken, elemanları birleştiren arayüzlere ihtiyaç vardır. Arayüz eleman modellemesi rijit bağlarla yapılabileceği gibi, yapıştırıcı malzemenin mekanik özelliklerinin ifade edildiği özel elemanlar olarak da yapılabilir.

Bu çalışmada, yapıştırıcı ara yüzey kalınlığı çok ince olduğundan çekme-ayrılma modellemesi yapılmıştır (Şekil 4.5)



Şekil 4.5. Yapıştırıcı için Çekme-ayrılma modelleme örneği [31]

Yapıştırıcı elemanlar, ABAQUS eleman kütüphanesinden COH3D8 ile tanımlanarak; elemanların serbestlik dereceleri bağlandıkları çelik ve HM-CFRP ile

bağlar vasıtasıyla paylaşılmıştır. Bağı özelliğinde tanımlanan birincil ve ikincil yüzeyler, birleşen malzemelerin rijitliklerine göre tercih edilmiştir.

4.1.2.4. Yapıştırıcı malzeme modeli

Doğrusal olmayan yapıştırıcı malzeme modeli, HM-CFRP ile çelik kirişin beraber çalışmasını sağlayacak ve gerilmeleri aktaracak şekilde seçilmiştir. Yapıştırıcı davranışı lineer elastik, hasarın başlaması, hasarın ilerlemesi olarak üç aşamada tanımlanmıştır. İlk aşamada, literatürde [35] bulunan çekme ve kayma deney sonuçlarından elde edilen grafiklerden, lineer elastik malzeme elastik modül değeri bulunmuştur. İkinci aşamada gerilme-şekil değiştirme ilişkisi, kayma gerilmelerine bağlı kayma şekil değiştirmeleri grafikleri ile gösterilmiştir. Üçüncü aşamada ise, göçmeden sonraki bölümün alanı enerji olarak ifade edilmiştir.

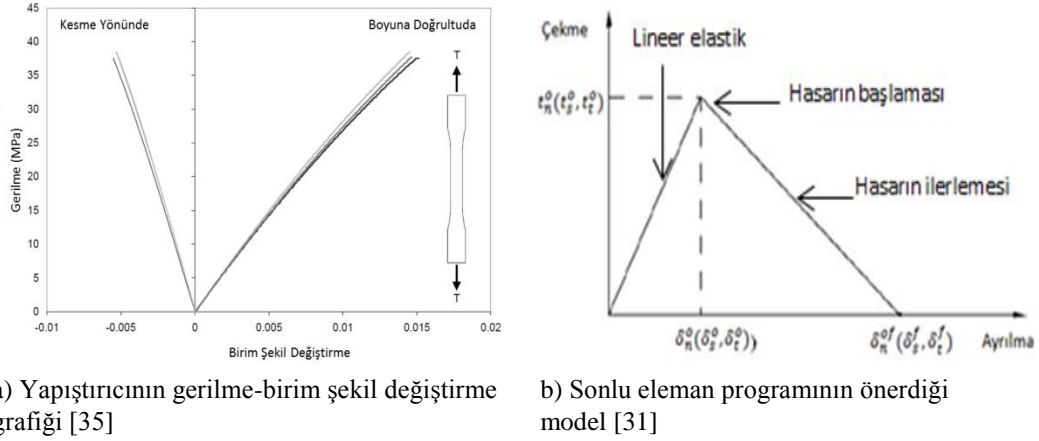
Lineer Elastik Davranış:

Çekme-ayrılma modellenmesinde, başlangıç kısmı lineer elastik davranıştır ve elastik rijitlik matrisi ile tanımlanır. Elastik rijitlik matrisi, arayüz boyunca nominal gerilme-şekil değiştirmeleri ilişkilendirmektedir [31]. Aşağıdaki matriste $t_n, (t_s, t_t)$ normal ve kayma yönlerinde oluşan gerilmeyi, $K_{nn}, (K_{ss}, K_{tt})$ elastik rijitlik matrisinin normal ve kayma yönlerindeki değerlerini, $\varepsilon_n, (\varepsilon_s, \varepsilon_t)$ normal ve kayma yönlerindeki şekil değiştirmeleri göstermektedir (4.1).

$$\begin{Bmatrix} t_n \\ t_s \\ t_t \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{nn} & & \\ & K_{ss} & \\ & & K_{tt} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_n \\ \varepsilon_s \\ \varepsilon_t \end{Bmatrix} \quad 4.1$$

Normal gerilmeler, kuvvet bileşenin her bir integrasyon noktasında orijinal alana bölünmesi ile elde edilir. Nominal şekil değiştirmeler ise, ayrılma uzunluğunun her bir integrasyon noktasında orijinal kalınlığa bölünmesi ile bulunur. Elemanın başlangıç kalınlığı $T_c=1$ olarak kabul edilir, ancak eleman kalınlığı farklı ise elastik modüller bu kalınlığa bölünmelidir. Eleman kalınlığı model oluşturulurken çizilecek ise başlangıç kalınlığı 1 kabul edilir [31].

Yapıştırıcı modellemesinde yapıştırıcı kalınlığı 0.1 olarak girilmiştir. Şekil 4.6.a'da elde edilen gerilme değerleri yukarıda anlatılan prensip gereği 0.1'e bölünmüştür



Şekil 4.6. Lineer elastik bölgede gerilme-birim şekil değiştirme diyagramı

Tablo 4.1'deki değerler, Spabond 345'in mekanik özelliklerinin belirlenmesi için yapılan kupon testlerinin sonucundan elde edilmiştir [35].

Tablo 4.1. Yapıştırıcı malzeme özellikleri

Eleman	E (MPa)	G1(MPa)	G2(MPa)	Yoğunluk(t/mm ³)
Yapıştırıcı	29770	10720	10720	1.15E-10

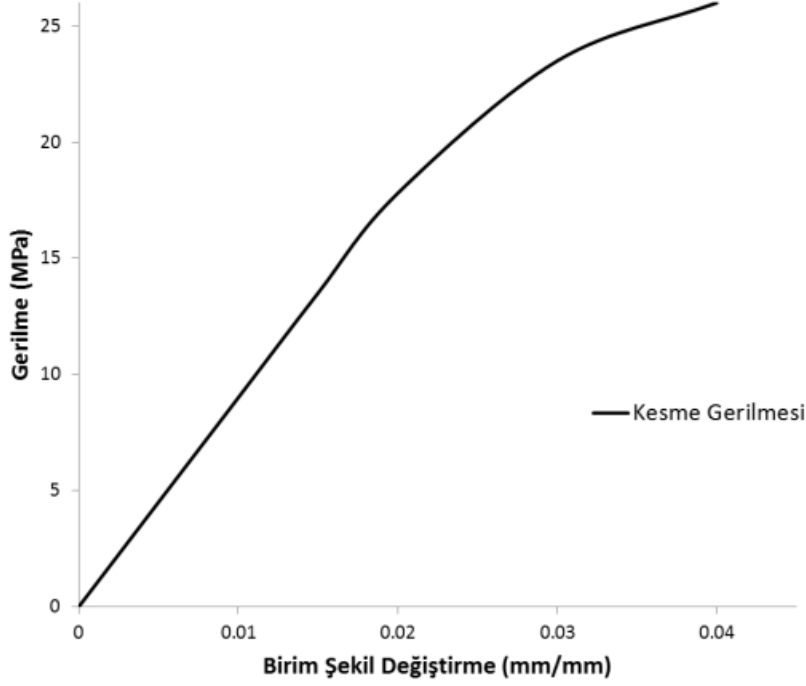
Şekil 4.6.b'de gösterilen $t_n^0(t_s^0, t_t^0)$ normal ve kayma yönlerinde oluşan maksimum gerilmeler, $\delta_n^0, (\delta_s^0, \delta_t^0)$ maksimum gerilmelere karşı gelen deplasmanlar, $\delta_n^f, (\delta_s^f, \delta_t^f)$ ise malzeme dayanımını yitirdiğinde ulaştığı deplasmanlardır.

Hasarın Başlaması:

Malzeme davranışının tanımlanmasında lineer elastik kısım tamamlandıktan sonra, malzeme yapısında olan liflerin arasındaki bağın kopmaya başladığı noktanın tanımlanması gerekir. Malzeme modellemesinde bu kısım (Criterion=QUADS) olarak tanımlanır. Kuadratik etkileşim fonksiyonu 1 değerine ulaştığında hasarın başladığı kabul edilir.

$$\left\{ \frac{t_n}{t_n^0} \right\}^2 + \left\{ \frac{t_s}{t_s^0} \right\}^2 + \left\{ \frac{t_t}{t_t^0} \right\}^2 = 1 \quad 4.2$$

Burada t_n , elemanın normali yönündeki gerilmeyi, t_s ve t_t ise kayma yönlerinde oluşacak gerilmeleri, t_n^0 , t_s^0 , t_t^0 ise normal veya kesme yönlerinde hasarın başladığında oluşan gerilmeleri göstermektedir (4.2).



Şekil 4.7. Yapıştırıcının kesme etkisindeki gerilme-birim şekil değiştirme grafiği [19]

Şekil 4.7'deki kayma gerilmesinin maksimum olduğu değer, yapıştırıcı malzemesinin yapısındaki bağların kopmaya başladığı değer olarak, yani hasar başlama noktası olarak alınmıştır.

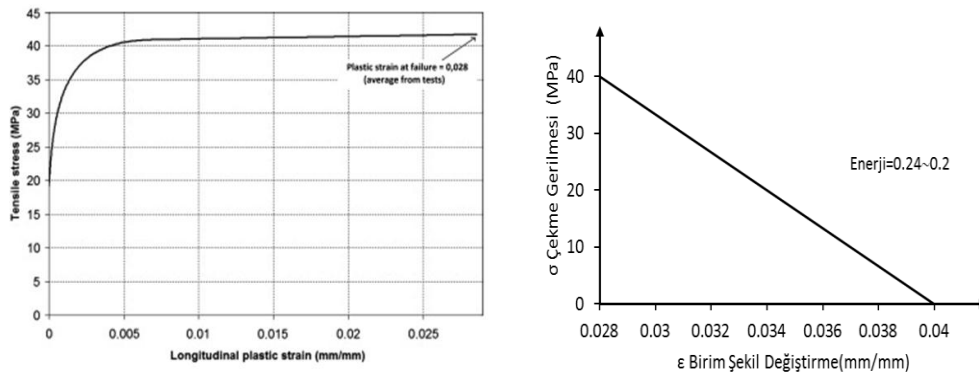
Hasarın İlerlemesi:

Malzeme rijitliğindeki değişim için hasarın nasıl ilerlediği ifade edilmelidir. Skaler hasar değişkeni, D , malzemedeki genel hasarı göstermektedir. Başlangıçta bu değer sıfırdır, yükleme artıkça bu değer 1'e doğru ilerler.

Hasar Oluş Şeklinin Tanımlanması: Hasar oluşumu şekil değiştirme veya enerji ile tanımlanabilir. Modelde gerilme-şekil değiştirme grafiğinde ortaya çıkan enerji, hasar oluş şeklinin enerji bölümünde kullanılmıştır.

Hasar İlerleme Durumunun Tanımlanması: Hasar değişkeninin (D) değişimi “yumuşatma (softening)” kısmında tanımlanmaktadır. Bu çalışmadaki modelde D değişiminin lineer olduğu kabul edilmiştir.

Mixed Mod Tanımlaması: Yapıştırılan bölgedeki şekil değiştirmeler için enerji ve çekme olmak üzere iki mod tanımlanmaktadır. Modelde enerji modu kullanılmıştır. Kırılma enerji değeri girilmiştir (Şekil 4.8).



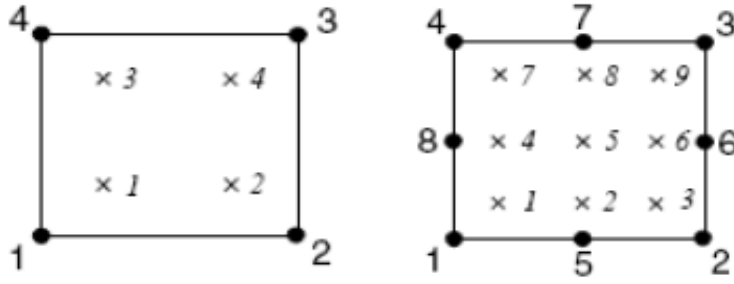
a) Sonlu eleman programının kesme davranışı için önerdiği model [19]

b) Yapıştırıcı için kullanılan matematik model [31]

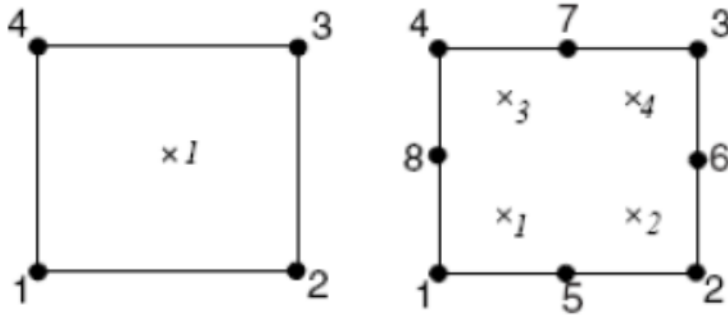
Şekil 4.8. Yapıştırıcı için hasar ilerlemesi bölgesinde kullanılan matematik model

4.1.3. Sonlu elemanlar modeli eleman tipleri

Solu eleman programında düğüm noktalarındaki deplasmanı hesaplamak için lineer yada kuadratik entepolasyon özellikli sürekli elemanlar kullanılmaktadır. ABAQUS rijitlik matrislerinin polinom terimlerinin integrasyonunda tam ve azaltılmış integrasyon özelliği mevcuttur (Şekil 4.9).



Şekil 4.9. Linear ve kuadratik eleman integrasyon noktaları



Şekil 4.10. Azaltılmış integrasyonlu linear ve kuadratik eleman

Azaltılmış integrasyon elemanları tam integrasyonlu elemanlara göre herbir yönde daha az integrasyon noktası kullanarak çözüm yapmaktadır [31]. Analizlerde eğilme şekil değiştirmelerini gösterebilmesi ve plastisite yöntemindeki başarısı nedeniyle 1. derece azaltılmış integrasyon elemanları kullanılmıştır (Şekil 4.10).

Sonlu elemanların modellenmesinde çok farklı eleman türleri kullanılabilir. Bu çalışmada gerilme analizi yapılacağından, seçeceğimiz eleman tipi sürekli eleman tipidir. I profil başlıkları ve gövdesi, HM-CFRP ve berkitmeler için 2 boyutlu sürekli kabuk (shell) eleman S4R, I profilin üzerindeki çelik levha için 3 boyutlu sürekli katı (solid) eleman C3D8R, yapıştırıcı için 3 boyutlu cohesive COH3D8 eleman tipi kullanılmıştır (Şekil 4.11).

4.1.3.1. S4R eleman tipi

Kabuklar, düzlemi içinde ve düzlemine dik yükler altında levha ve eğilme davranışı yapan elemanlardır. I profil (başlıkları ve gövdesi) ve HM-CFRP, levha ve eğilme

davranışı gösteren 2 boyutlu sürekli kabuk eleman olarak düşünülebilir. Bu elemanlar S4R eleman tipi kullanılarak modellenmiştir.

S4R, ABAQUS eleman kütüphanesinde bir kabuk elemandır. Bu eleman kullanılarak çelik elemanlar için yapılan çalışmalarda başarılı sonuçlar elde edilmiştir [36].

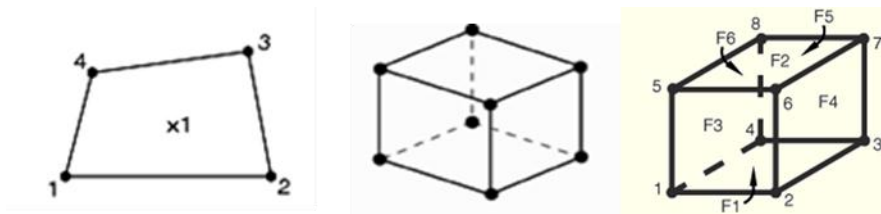
S4R eleman tipi, 4 düğüm noktalıdır ve her düğüm noktasında 6 serbeslik derecesi (üç doğrultuda yerdeğiştirme ve dönme) vardır. Ancak azaltılmış integrasyon kullanılarak integrasyon nokta sayısı 1'e indirilmiştir (Şekil 4.11).

4.1.3.2. C3D8R eleman tipi

I profilin üzerindeki çelik levha, 3 boyutlu sürekli katı (solid) C3D8R eleman tipi kullanılarak modellenmiştir. C3D8R eleman tipi daha çok gerilme-şekil değiştirme analizlerinde kullanılır. C3D8R eleman tipi 8 düğüm noktasına sahiptir. Azaltılmış integrasyon kullanılarak integrasyon noktası 1'e indirilmiştir ve bu integrasyon noktası elemanın ortasındadır (Şekil 4.11).

4.1.3.3. COH3D8 eleman tipi

Yapıştırıcı için COH3D8 eleman tipi kullanılmıştır. 8 düğüm noktası ve 4 integrasyon noktası vardır (Şekil 4.11). Yapıştırıcı elemanı için aktif serbestlik dereceleri; normal yönde öteleme serbestliği bileşeni ve iki yönde kayma serbestliği bileşenleridir.



Şekil 4.11. S4R, C3D8 ve COH3D8 eleman tipleri [31]

4.1.4. Geometrik modelleme ve sınır şartları

Geometrik model yükleme ve sınır şartlarına uygun olarak oluşturulmuştur. Simetri kullanılmamış, kirişin tamamı modellenmiştir.

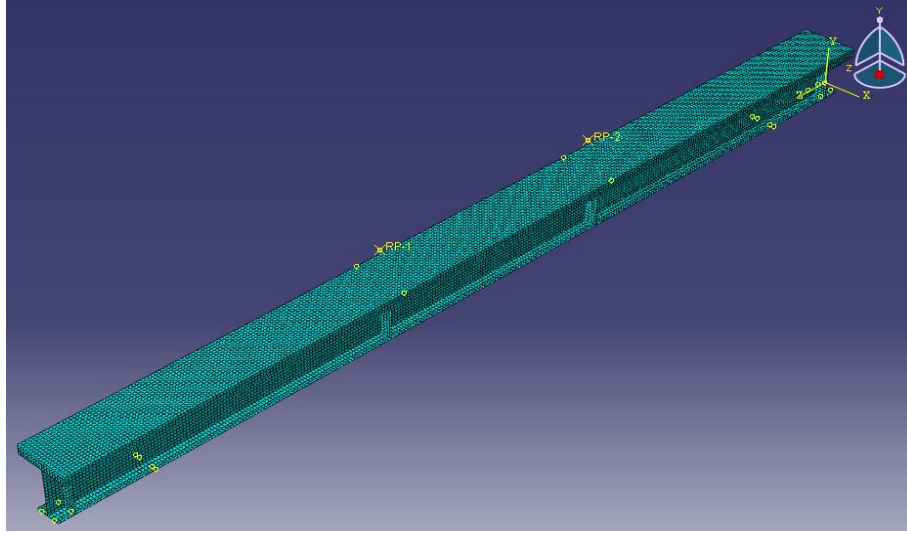
Sabit mesnet kesitindeki I profil alt başlık düğüm noktalarında 3 öteleme ve 2 dönme serbestliği tutuludur. Sabit mesnedin dönme eksenindeki dönme serbestliği mevcuttur. Kayıcı mesnet kesitindeki alt başlık düğüm noktalarında ise, 2 öteleme ve 2 dönme serbestliği tutuludur. Kiriş uzunluğu doğrultusundaki öteleme serbestliği ve kayıcı mesnedin dönme eksenindeki dönme serbestliği mevcuttur.

Modellemede uygun sonlu eleman ağı sıklığı (mesh yoğunluğu) araştırılmıştır.

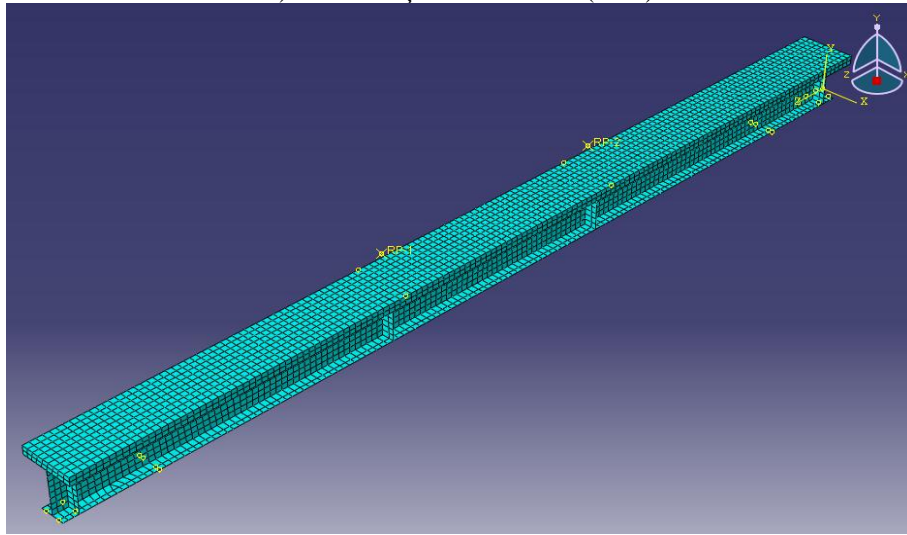
4.1.4.1. Sonlu eleman ağı sıklığı

Çelik kirişin düşey yükler altındaki eğilme davranışının incelenmesinde sonlu eleman ağı sıklığının davranışa etkisini görmek için farklı ölçülerde sonlu eleman ağı kullanılmıştır. Sonlu eleman ölçüleri 10x10mm, 20x20mm, 30x30mm olmak üzere 3 farklı ağı sıklığı ile çözümlenmiştir (Şekil 4.12). Aralıklar belirlenirken daha önce yapılan çalışmalardan yararlanılmıştır.

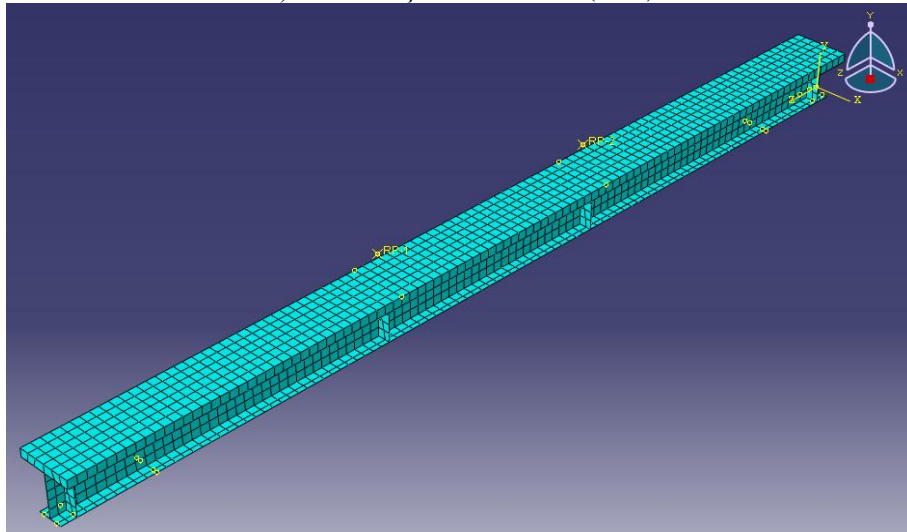
Ağı sıklığı bilgisayar kapasitesi ile sınırlı olduğundan, ağı sıklığı seçilirken kullanılan bilgisayar kapasitesi de göz önüne alınmıştır. Farklı sonlu eleman ağı sıklıkları ile yapılan bilgisayar çözümleri kiriş yük-deplasman eğrileri ile deney yük deplasman eğrisi karşılaştırılmıştır.



a) Eleman ölçüleri 10x10mm (M10)

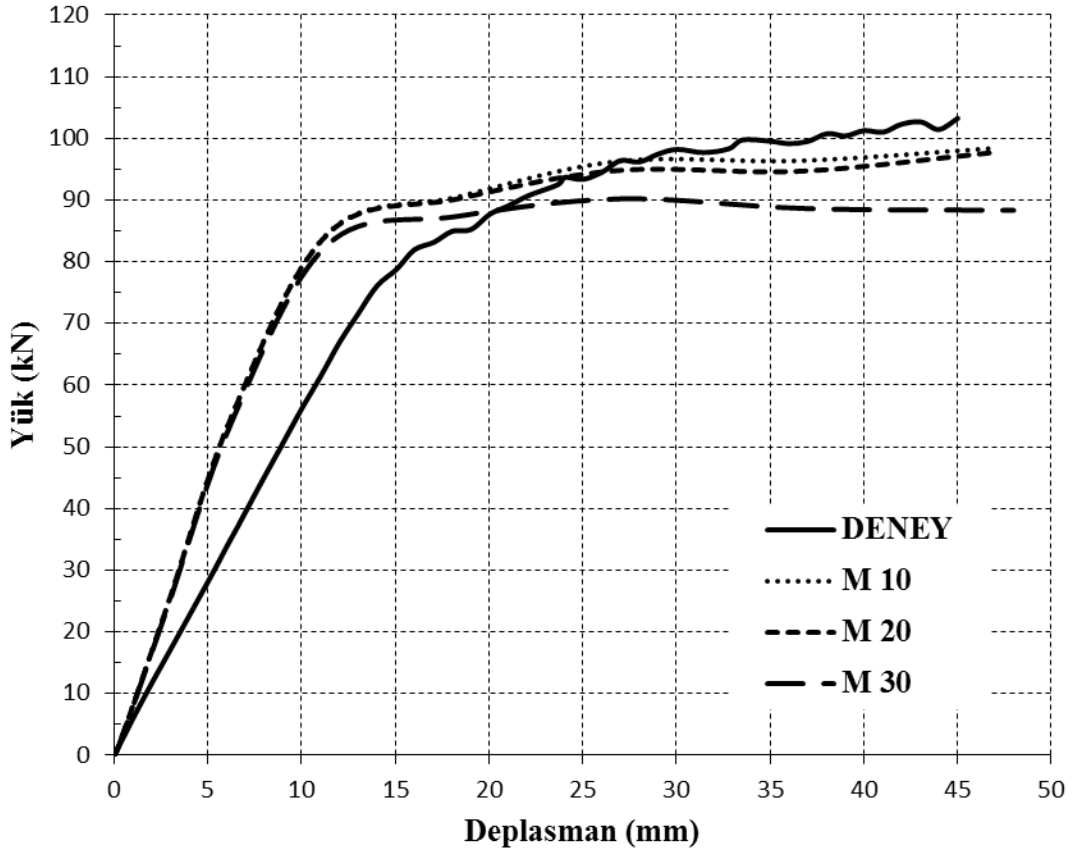


b) Eleman ölçüleri 20x20mm (M20)



c) Eleman ölçüleri 30x30mm (M30)

Şekil 4.12. Farklı sonlu eleman ağı sıklığı ile modeller



Şekil 4.13. Referans kirişte sonlu eleman ağı sıklığının davranışa etkisi

Şekil 4.13’de görüldüğü gibi sonlu eleman ağı sıklaştıkça gerçek çözüme daha yakın sonuçlar elde edilmektedir. Parametrik çalışmada kullanılacak modellerde sonlu eleman ölçüleri 10x10mm seçilmiştir. Bilgisayar kapasitesinin zorlandığı büyük modellerde (IPE 500 profili L=12000mm) 20x20mm ölçülerinde sonlu elemanlar da kullanılmıştır.

4.2. Numerik Modelin Doğrulanması

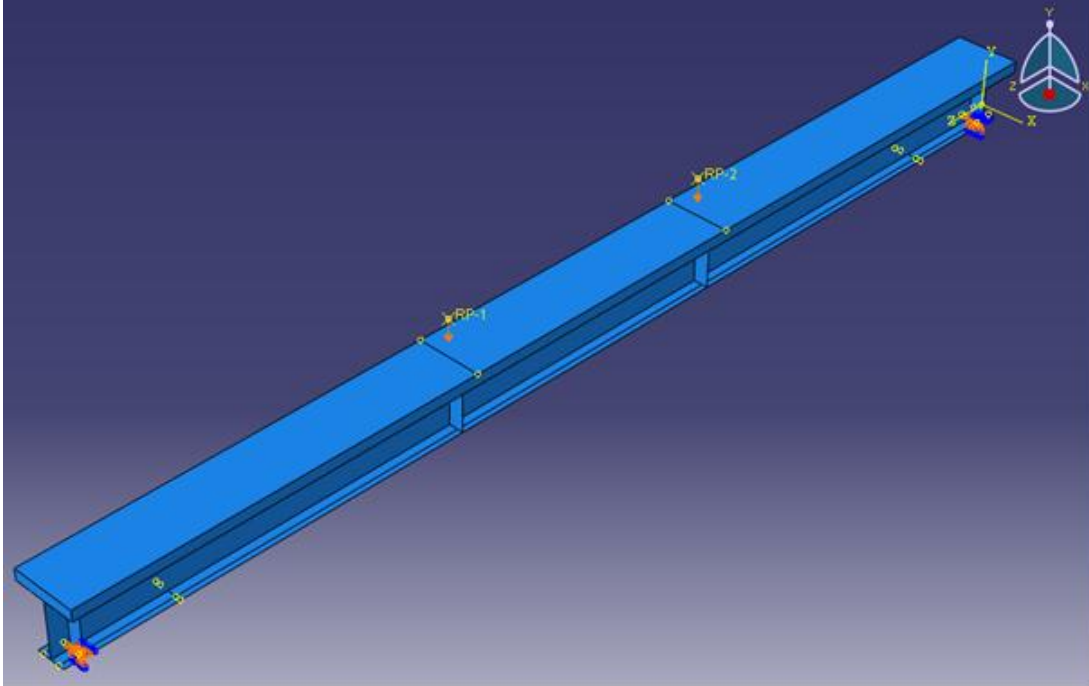
Bu bölümde, referans (basınç başlığı çelik levhalı) kiriş ve çekme başlığı HM-CFRP ile güçlendirilmiş kiriş eğilme deneyleri ile bu kirişlerin ABAQUS sonlu eleman modellerinin ABAQUS/Explicit çözümleri karşılaştırılmıştır. Kirişlerin deney yük-deplasman grafikleri ile numerik model yük deplasman grafikleri üst üste çizilerek daha sonra yapılacak olan parametrik çalışmada kullanılacak, yeter yakınlıkta sonuçlar veren numerik model bulunmaya çalışılmıştır.

4.2.1. Deneylele Numerik Modellerin Karşılaştırılması

Referans kiriş ve çekme başlığı HM-CFRP ile güçlendirilmiş kiriş ABAQUS çözümlerinin, deney yük-deplasman grafiklerine en yakın sonucu veren sonlu eleman modellerinin grafikleri verilmiştir.

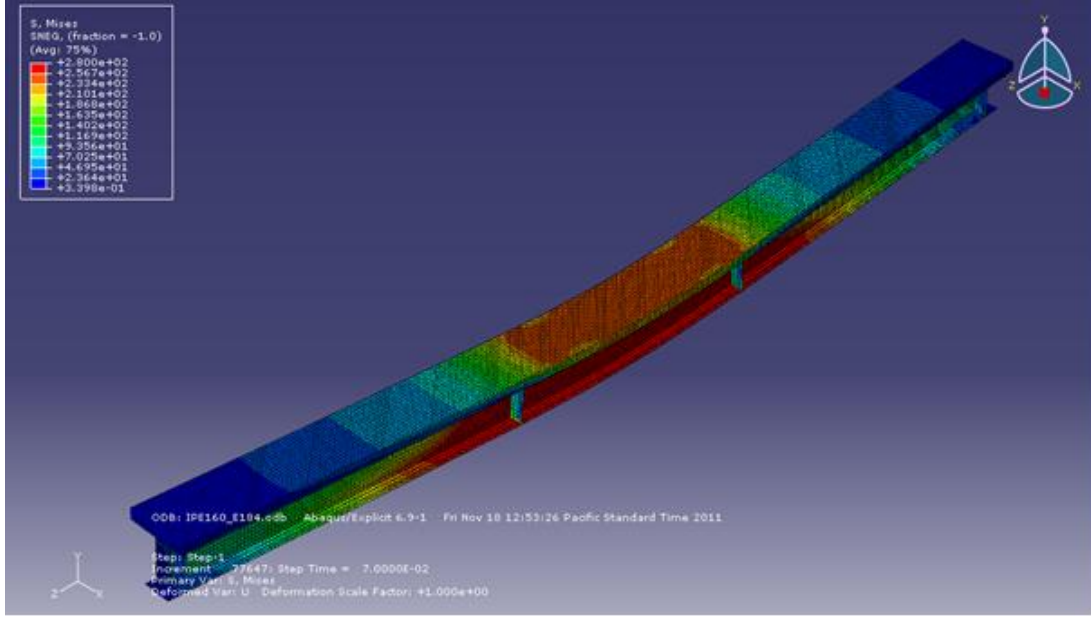
4.2.1.1. Referans kiriş deney-numerik model karşılaştırması

Bölüm 2 ve 3’de geometrik ve malzeme özellikleri verilen referans (basınç başlığı çelik levhalı) kirişin, bölüm 4.1’de anlatılan malzeme modelleri ve sonlu eleman tipleri ile yapılan numerik modeli Şekil 4.14’de görülmektedir.

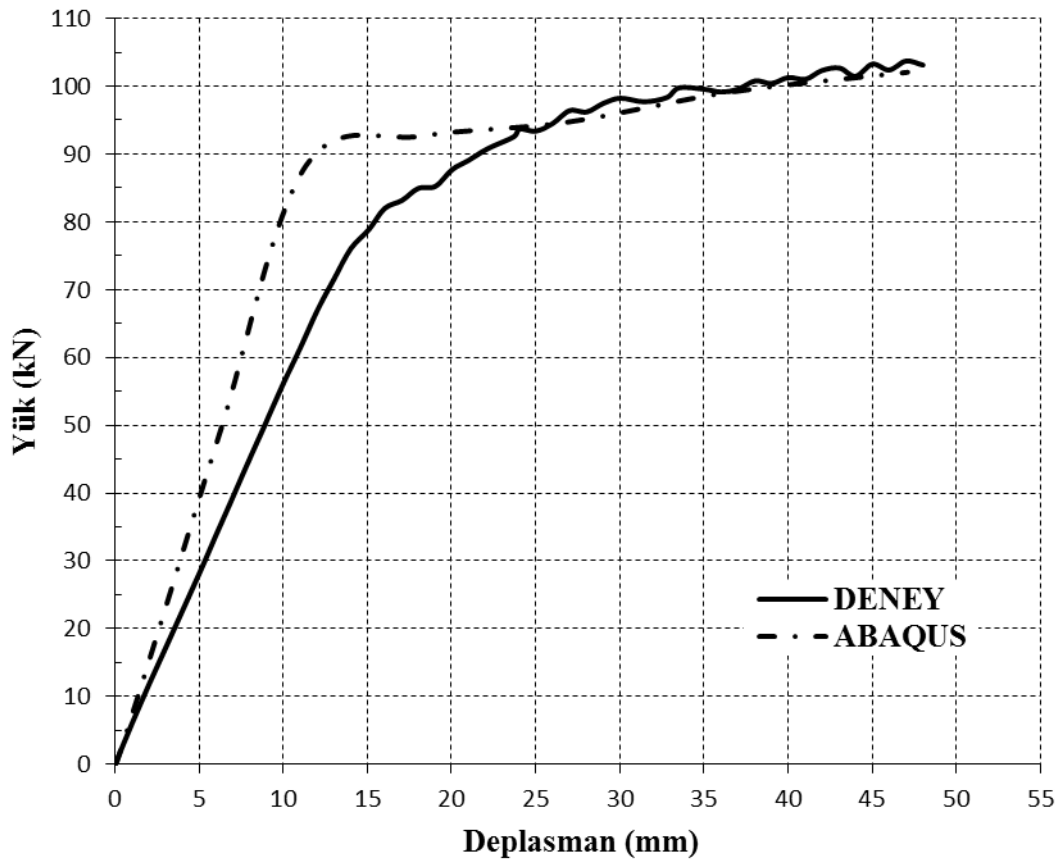


Şekil 4.14. ABAQUS solu elemanlar modelinde referans kirişin yükleme öncesi durumu

ABAQUS/Explicit çözümleri sonucunda numerik modelin yüklemeden sonraki şekil değiştirmiş durumu Şekil 4.15’de gösterilmiştir.



Şekil 4.15. ABAQUS solu elemanlar modelinde referans kirişin yükleme sonrası durumu



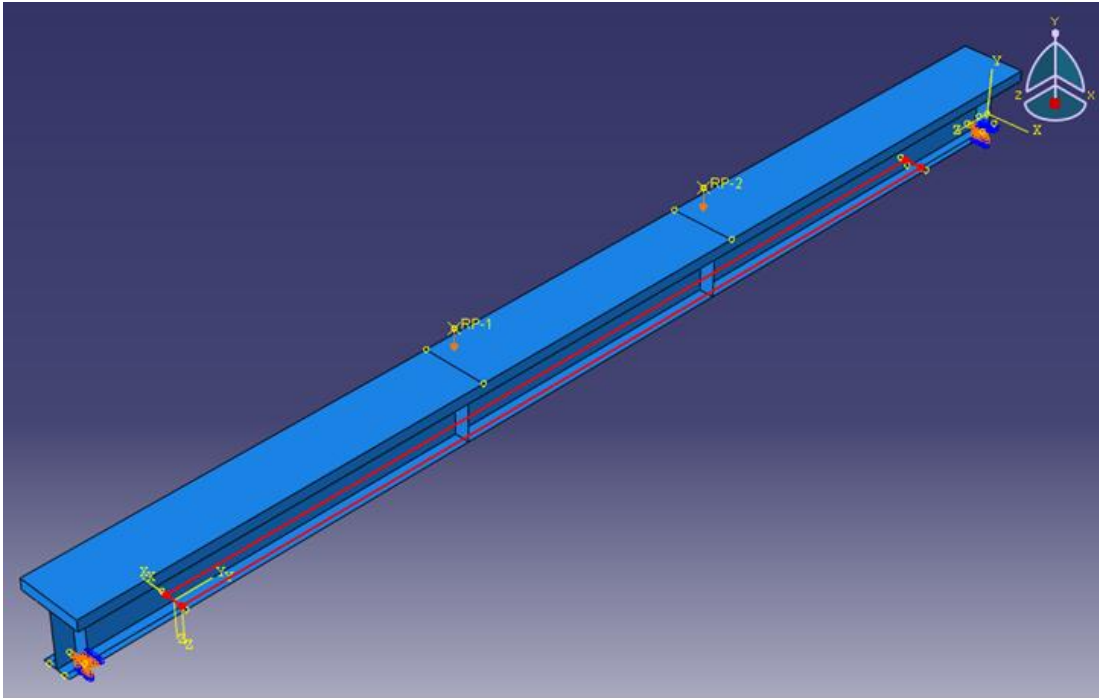
Şekil 4.16. Referans kirişin deney ve ABAQUS çözümü yük-deplasman grafikleri

ABAQUS/Explicit çözümleri sonucunda elde edilen yük-deplasman grafiği, deney yük-deplasman grafiği ile birlikte çizilmiştir (Şekil 4.16).

Şekil 4.16’de görüldüğü gibi lineer elastik bölgede sonlu elemanlar çözümü daha rijit davranış sergilemektedir. Literatürde, lineer elastik bölgedeki rijit davranışın sonlu elemanlar yönteminin bir özelliği olduğu vurgulanmıştır. Plastik şekil değiştirme bölgesinde sonlu elemanlar çözümü ile deney sonuçları daha yakın bir davranış göstermektedir.

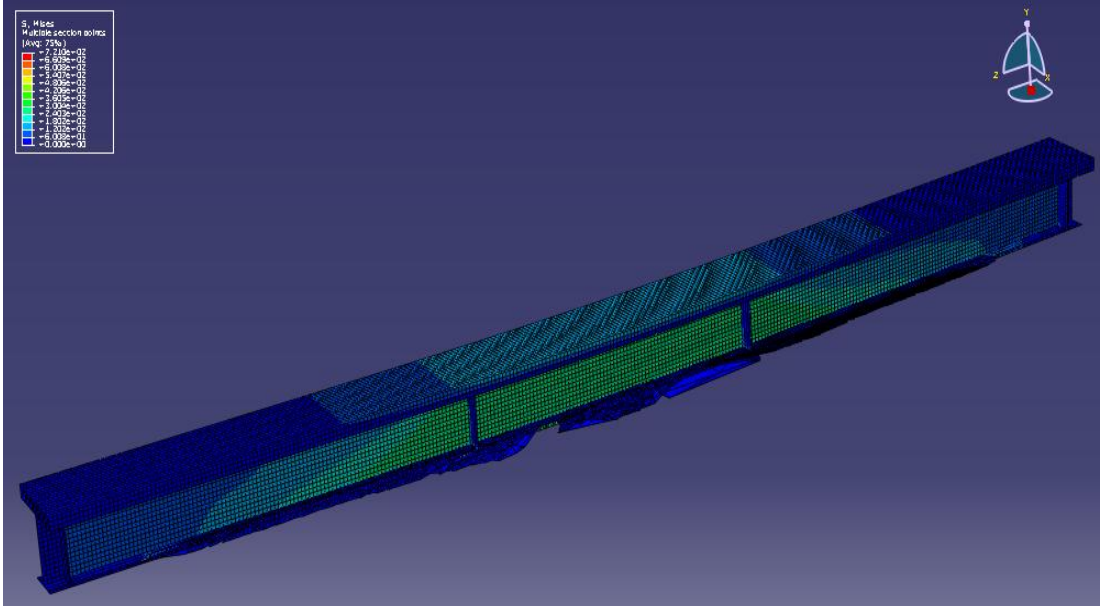
4.2.1.2. HM-CFRP ile güçlendirilmiş kiriş deney-numerik model karşılaştırması

Bölüm 3’de geometrik ve malzeme özellikleri verilen HM-CFRP ile güçlendirilmiş kirişin, bölüm 4.1’de anlatılan malzeme modelleri ve sonlu eleman tipleri ile yapılan numerik modeli Şekil 4.17’de görülmektedir.

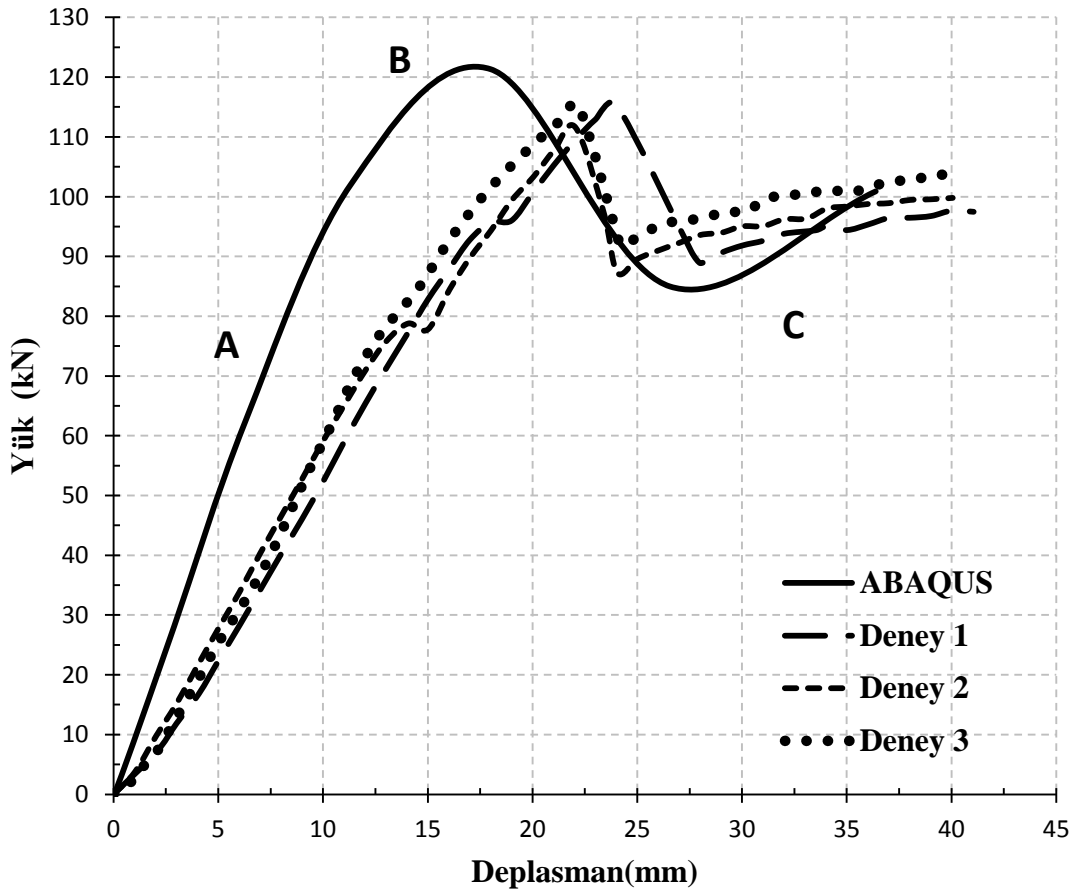


Şekil 4.17. ABAQUS solu elemanlar modelinde HM-CFRP’li kirişin yükleme öncesi durumu

ABAQUS/Explicit çözümleri sonucunda numerik modelin yüklemeden sonraki şekil değiştirmiş durumu Şekil 4.18’da gösterilmiştir.



Şekil 4.18. ABAQUS solu elemanlar modelinde HM-CFRP'li kirişin yükleme sonrası durumu


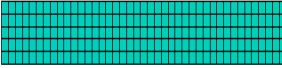















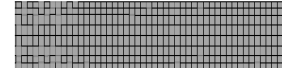


Şekil 4.19. HM-CFRP'li kirişin deney ve ABAQUS çözümü yük-deplasman grafikleri

ABAQUS/Explicit çözümleri sonucunda elde edilen yük-deplasman grafiği, deneylerin yük-deplasman grafiği ile birlikte çizilmiştir (Şekil 4.19). Numerik sonuçlara bakıldığında yük deplasman davranışı karakteristik olarak deney yük-deplasman davranışına benzemektedir. Nümerik modelde deneyde olduğu gibi HM-CFRP kopana kadar lineer bir davranış gözlenmekte ve HM-CFRP'nin kopmasıyla birlikte alınan çeliğin pekleşerek yük almaya devam ettiği gözlenmektedir. Güçlendirilmenin etkisi %39'dir. Üç deneyden elde edilen sonuçta ortalama olarak %31'dir. Böylece sonlu eleman modeli ile bu oran çok yakın bir derecede yakalanmıştır. Ancak deplasmanlara bakıldığında sonlu eleman modelinin daha rijit bir davranış gösterdiği gözlenmektedir. HM-CFRP'in koptuğu anda kirişte oluşan deplasman arasında %24 fark vardır. Bunun nedeni gerçekte var olan geometrik kusurların sonlu eleman modeline tam olarak yansıtılmaması olarak düşünülmektedir. Deney ile sonlu eleman modeli arasında, taşıma yükü kapasitelerinde %5'lik fark ile yakınsama yapılmıştır.

Deney sırasında maksimum yüke ulaşma ve sonrasındaki FRP patlama sesi ile yükte meydana gelen ani düşüş davranışı sonlu eleman modelinde de birebir görülmektedir. Ayrıca yapılan sonlu eleman modellemesinde, deneyde fark edilmeyen bazı malzeme davranışları daha net olarak görülmüştür. Bu davranışlar daha sonraki bölümde yapılacak parametrik çalışmaya yön vermiştir.

Şekil 4.19'da verilen A, B, C noktlarda, HM-CFRP, epoksi ve çelik alt başlığında oluşan gerilmeler Şekil 4.20'de özetlenmiştir. Her bir gerilme durumunun gerilme skalası üzerinde verilmiştir.

Yük Noktası	HM-CFRP	Epoksi	Çelik
A	 	 	 
B	 	 	 
C	 	 	 

Şekil 4.20. HM-CFRP, epoksi ve çelik malzemesinin yükleme altındaki gerilme dağılımı

Skalada en uç değerler +,- yenilme değerlerini göstermektedir. Elastik bölgede bulunan A noktasında, bütün elemanlar gerilme altındadır. En fazla gerilme çelikte olup akma bölgesine yaklaşmıştır. Maksimum yük taşıma noktası olan B noktasına bakıldığında HM-CFRP'nin en dış liflerden kopmaya başladığı dolayısıyla, bu bölgelere karşılık gelen epoxy'de de maksimum gerilmeler ulaşıldığı anlaşılmaktadır. Çelik alt başlığının ise aktığı anlaşılmaktadır. C noktasında HM-CFRP'de gerilmemin olmadığını, HM-CFRP'nin elemanlarının aşırı derecede deforme olduğu görülmektedir. Matematiksel olarak var olduğunu ama fiziksel olarak bir katkısının olmadığını anlaşılmaktadır. Aynı yük noktasında epoksinde yük aktarmadığı patlamış epoksi elemanından anlaşılmaktadır. Sadece çelik elemanın gerilme aldığına

şahit oluyoruz. Alt başlığın aktığını ve gerilmelerin elik gövde ve st başlığına doğru aktarıldığını anlıyoruz.

Bölüm 4’de yapılan doğrulama ile, daha sonraki bölümde yapılan parametrik çalışmada kirişin bazı değerler değiştirilerek çok fazla sayıda örnekleme yapılmış ve davranış ile ilgili veriler toplanmıştır.

BÖLÜM 5. PARAMETRİK ÇALIŞMA

Bu bölümde; güçlendirilecek kirişte istenilen dayanım artışı için gerekli HM-CFRP miktarını bulmak ve çelik kesit ile HM-CFRP'nin birlikte çalışmasını sağlamak için gerekli faydalı bağlanma boyunu belirlemek için belirli boyut ve uzunluklardaki çelik kirişlerin numerik modelleri yapılmıştır. Üzeri çelik levhalı kirişlerin çekme başlıkları belirli kalınlık ve uzunlukta HM-CFRP ile güçlendirilerek kirişlerin dayanımlarında meydana gelen değişimler incelenmiştir. Çalışmada kullanılan kirişler IPE profil grubundan seçilmiştir. IPE 120, 160, 220, 270, 330, 400, 500 profillerinin 3, 6 ve 12 metre uzunluklarında modelleri oluşturulmuştur. Böylece gerçek numune üzerinde sınırlı sayıda yapılmış olan laboratuvar deneyleri, doğrulanmış numerik model ile çok geniş bir deney seti üzerinde belirlenen parametrelerin etkilerini gözlemlemek için test edilecektir.

Parametrik çalışmanın birinci bölümünde, faydalı mesafenin dayanıma katkısı incelenmiştir. 3 metre uzunluğundaki IPE 160 ve IPE 270 profillerinden oluşan modellerde her bir HM-CFRP oranı için faydalı mesafe 200 mm ile 1000 mm arasında kademeli olarak değiştirilmiştir. Yük-deplasman grafikleri elde edilmiş (EK-1) ve kiriş dayanımının tükenmesinin epoksi sıyrılmasından mı, yoksa HM-CFRP kopmasından mı meydana geldiği araştırılmıştır. Böylece HM-CFRP kopmadan önce epoksi sıyrılmasını önlemek için gerekli minimum faydalı mesafe belirlenmiştir.

Parametrik çalışmanın ikinci bölümünde ise HM-CFRP oranının kiriş dayanımına katkısı incelenmiştir. 3, 6 ve 12 metre uzunluklarındaki IPE profilleri %2-3.5 ile %7-22 arasında kademeli olarak değişen oranlarda HM-CFRP ile güçlendirilmiştir. Yük-deplasman grafikleri elde edilmiş (EK-1) ve kiriş dayanımları hesaplanmıştır. HM-CFRP ile dayanım artışı arasındaki ilişki incelenmiştir.

Çelik kirişin boyutları değiştirilirken gerçek köprü kirişlerinin boyutları dikkate alınmıştır. HM-CFRP'nin değerleri değiştirilirken HM-CFRP üretici firmasının ürettiği FRP'nin geometrik özellikleri kullanılmıştır.

Kiriş uzunluğu: Kiriş uzunluğunu belirlemede L/d oranı dikkate alınmıştır. Euler-Bernoulli Kiriş Teorisi kabullerine uyacak şekilde ($L/d > 5$), $L/d > 10$ (Boresi ve diğerleri, 1993) değerleri dikkate alınarak kiriş uzunlukları belirlenmiştir.

Kiriş kesit geometrisi: Kesit geometrisi belirlenirken tarafsız eksenin betonarme tabliyeyi temsil eden çelik levhanın içinde olması istenmiştir. Bunun nedeni, çelik levhanın basınç başlığı, profil ve HM-CFRP'nin çekme başlığı olarak davranmasını sağlamaktır.

Faydalı mesafe: HM-CFRP'nin uç noktasının, sabit moment bölgesinin başlangıç noktasına (tekil yükün uygulanma noktası) mesafesidir (Şekil 5.1).

HM-CFRP uzunluğu: HM-CFRP uzunluğunun belirlenmesi, faydalı mesafenin belirlenmesine bağlıdır. HM-CFRP kopmadan önce epoksi sıyırılmasını önlemek için gerekli faydalı mesafeyi belirlemek gerekmektedir.

HM-CFRP oranı: HM-CFRP kesit alanının profil kesit alanına oranıdır (çelik levha kesit alanı dahil edilmemiştir).

HM-CFRP oranına bağlı olarak kiriş moment dayanımındaki artışlar incelenecektir. Ancak daha önce, çelik kesit ile HM-CFRP'nin birlikte çalışmasını sağlamak için gerekli faydalı bağlanma boyunu belirlemek gerekmektedir.

Bölüm 5.1'de, IPE 160 ve IPE 270 profillerinden oluşan modellerde farklı HM-CFRP oranları için faydalı mesafe kademeli olarak değiştirilerek 187 çözüm yapılmış ve faydalı mesafe için optimum bir değer bulunmaya çalışılmıştır. Bölüm 5.2'de, seçilen faydalı mesafe ile IPE 120, 160, 220, 270, 330, 400, 500 profillerinden oluşan modellerde 149 çözüm yapılarak HM-CFRP oranına bağlı olarak kiriş dayanımındaki artışlar incelenmiştir.

Tablo 5.2. IPE 160 L=3000mm kirişi faydalı mesafenin kiriş dayanımına katkısı

IPE 160 KİRİŞİ L=3000													
Kiriş Uz. (mm)	Profil Alanı (mm ²)	Faydalı Mesafe (mm)	FRP Uzunluğu (mm)	FRP Kalınlığı (mm)	FRP Genişliği (mm)	FRP Alanı (mm ²)	Oran (FRP A. / Profil A.)	SONUÇLAR					
								Toplam Yük (kN)	FRP'li Kiriş M _u (kNm)	FRP'siz Kiriş T.Yük - M _u (kN)-(kNm)	M _u Artışı %		
3000	2010	200	1200 (%40)	1.40	50	70.0	3.5%	Epoksi Sıyrılıyor	54338	103.5 - 54338	0%		
		325	1450 (%48)					Epoksi Sıyrılıyor	54338		0%		
		400	1600 (%54)					Epoksi Sıyrılıyor	54338		0%		
		600	2000 (%67)					Epoksi Sıyrılıyor	54338		0%		
		688	2176 (%73)					121.26	63662		17%		
		800	2400 (%80)					121.33	63698		17%		
		850	2500 (%83)					121.29	63677		17%		
		870	2540 (%84)					121.33	63698		17%		
		880	2560 (%85)					121.34	63704		17%		
		890	2580 (%86)					121.30	63683		17%		
		900	2600 (%87)					121.35	63709		17%		
		950	2700 (%90)					121.38	63725		17%		
		1000	2800 (%93)					121.40	63735		17%		
3000	2010	200	1200 (%40)	1.54	50	77.0	3.8%	Epoksi Sıyrılıyor	54338	103.5 - 54338	0%		
		325	1450 (%48)					Epoksi Sıyrılıyor	54338		0%		
		400	1600 (%54)					Epoksi Sıyrılıyor	54338		0%		
		600	2000 (%67)					Epoksi Sıyrılıyor	54338		0%		
		688	2176 (%73)					123.94	65069		20%		
		870	2540 (%84)					124.01	65105		20%		
		900	2600 (%87)					121.35	63709		17%		
		950	2700 (%90)					121.38	63725		17%		
		1000	2800 (%93)					124.07	65137		20%		
		3000	2010					200	1200 (%40)		1.68	50	84.0
325	1450 (%48)			Epoksi Sıyrılıyor	54338	0%							
400	1600 (%54)			Epoksi Sıyrılıyor	54338	0%							
600	2000 (%67)			Epoksi Sıyrılıyor	54338	0%							
688	2176 (%73)			120.75	63394	17%							
870	2540 (%84)			127.02	66686	23%							
900	2600 (%87)			126.98	66665	23%							
950	2700 (%90)			127.05	66701	23%							
1000	2800 (%93)			127.05	66701	23%							
3000	2010			200	1200 (%40)	1.84	50	92.0	4.6%	Epoksi Sıyrılıyor			
		325	1450 (%48)	Epoksi Sıyrılıyor	54338					0%			
		400	1600 (%54)	Epoksi Sıyrılıyor	54338					0%			
		600	2000 (%67)	Epoksi Sıyrılıyor	54338					0%			
		688	2176 (%73)	106.93	56138					3%			
		870	2540 (%84)	129.74	68114					25%			
		900	2600 (%87)	129.75	68119					25%			
		950	2700 (%90)	129.78	68135					25%			
		3000	2010	200	1200 (%40)					2.04	50	102.0	5.1%
325	1450 (%48)			Epoksi Sıyrılıyor	54338	0%							
400	1600 (%54)			Epoksi Sıyrılıyor	54338	0%							
600	2000 (%67)			Epoksi Sıyrılıyor	54338	0%							
688	2176 (%73)			109.03	57241	5%							
870	2540 (%84)			133.31	69988	29%							
900	2600 (%87)			133.32	69993	29%							
950	2700 (%90)			133.38	70025	29%							
1000	2800 (%93)			133.45	70061	29%							

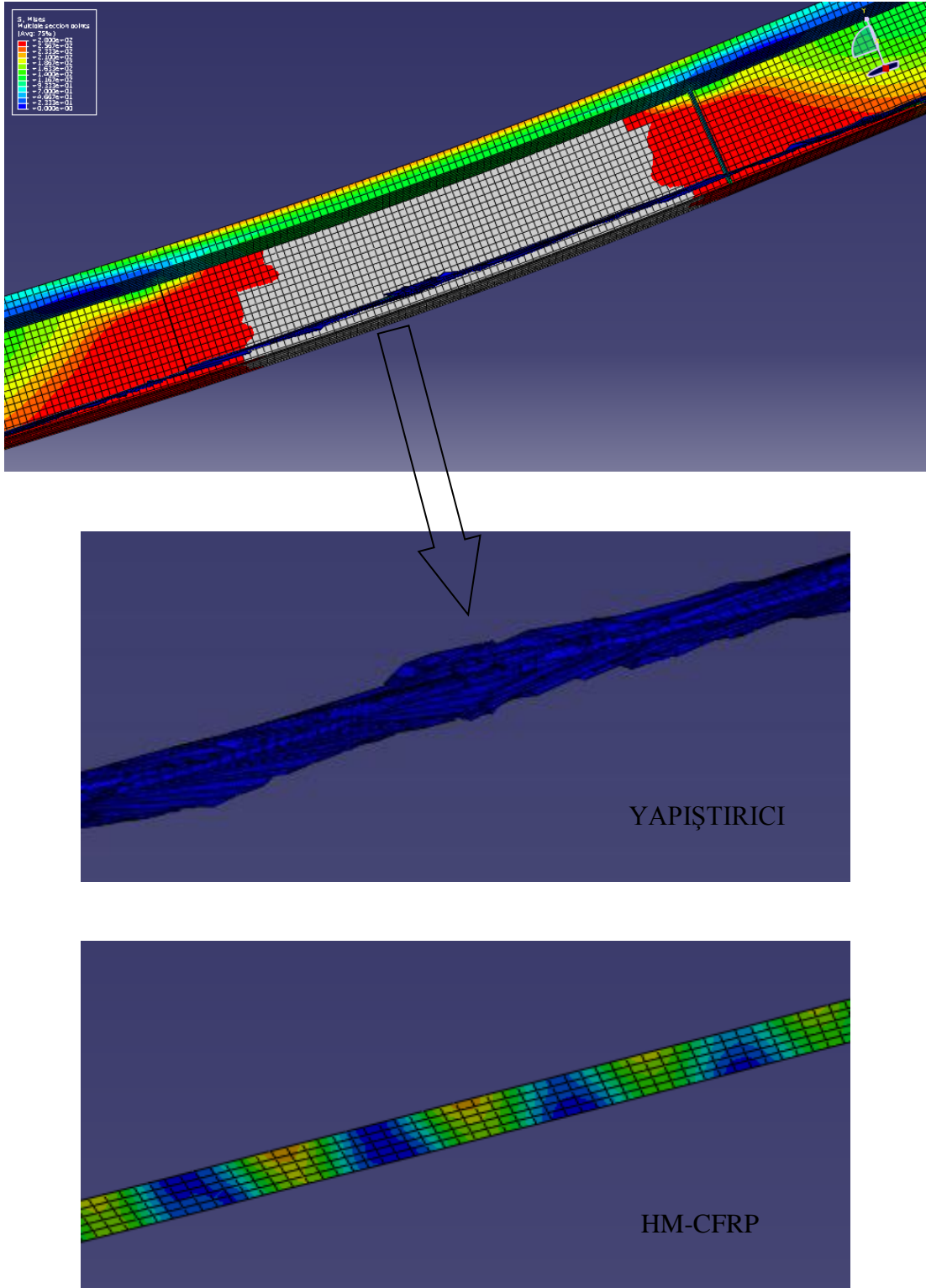
Tablo 5.2. IPE 160 L=3000mm kirişi faydalı mesafenin kiriş dayanımına katkısı (devam)

IPE 160 KIRIŞI L=3000												
Kiriş Uz. (mm)	Profil Alanı (mm ²)	Faydalı Mesafe (mm)	FRP Uzunluğu (mm)	FRP Kalınlığı (mm)	FRP Genişliği (mm)	FRP Alanı (mm ²)	Oran (FRP A. / Profil A.)	SONUÇLAR				
								Toplam Yük (kN)	FRP'li Kiriş M _u (kNm)	FRP'siz Kiriş T.Yük - M _u (kN)-(kNm)	M _u Artışı %	
3000	2010	200	1200 (%40)	2.25	50	112.5	5.6%	Epoksi Sıyrılıyor	54338	103.5 - 54338	0%	
		325	1450 (%48)					Epoksi Sıyrılıyor	54338		0%	
		400	1600 (%54)					Epoksi Sıyrılıyor	54338		0%	
		600	2000 (%67)					Epoksi Sıyrılıyor	54338		0%	
		688	2176 (%73)					111.2	58380		7%	
		870	2540 (%84)					121.33	63698		17%	
		900	2600 (%87)					136.92	71883		32%	
		950	2700 (%90)					137.01	71930		32%	
3000	2010	200	1200 (%40)	2.47	50	123.5	6.1%	Epoksi Sıyrılıyor	54338	103.5 - 54338	0%	
		325	1450 (%48)					Epoksi Sıyrılıyor	54338		0%	
		400	1600 (%54)					Epoksi Sıyrılıyor	54338		0%	
		600	2000 (%67)					Epoksi Sıyrılıyor	54338		0%	
		688	2176 (%73)					105.11	55183		2%	
		870	2540 (%84)					151.17	79364		46%	
		900	2600 (%87)					152.41	80015		47%	
		950	2700 (%90)					152.86	80252		48%	
3000	2010	1000	2800 (%93)	2.69	50	134.5	6.7%	151.46	79517	103.5 - 54338	46%	
		200	1200 (%40)					Epoksi Sıyrılıyor	54338		0%	
		325	1450 (%48)					Epoksi Sıyrılıyor	54338		0%	
		400	1600 (%54)					Epoksi Sıyrılıyor	54338		0%	
		600	2000 (%67)					110.96	58254		7%	
		688	2176 (%73)					114	59850		10%	
		870	2540 (%84)					145.14	76199		40%	
		900	2600 (%87)					145.16	76209		40%	
3000	2010	950	2700 (%90)	3.01	50	150.5	7.5%	145.24	76251	103.5 - 54338	40%	
		200	1200 (%40)					Epoksi Sıyrılıyor	54338		0%	
		325	1450 (%48)					Epoksi Sıyrılıyor	54338		0%	
		400	1600 (%54)					Epoksi Sıyrılıyor	54338		0%	
		600	2000 (%67)					109.16	57309		5%	
		688	2176 (%73)					110.06	57782		6%	
		870	2540 (%84)					150.27	78892		45%	
		900	2600 (%87)					150.30	78908		45%	
3000	2010	950	2700 (%90)	3.29	50	164.5	8.2%	150.35	78934	103.5 - 54338	45%	
		1000	2800 (%93)					150.45	78986		45%	
		325	1450 (%48)					Epoksi Sıyrılıyor	54338		0%	
		688	2176 (%73)					Epoksi Sıyrılıyor	54338		0%	
		870	2540 (%84)					155.31	81538		50%	
		900	2600 (%87)					155.34	81554		50%	
3000	2010	950	2700 (%90)	3.60	50	180.0	9.0%	155.46	81617	103.5 - 54338	50%	
		1000	2800 (%93)					155.31	81538		50%	
		325	1450 (%48)					Epoksi Sıyrılıyor	54338		0%	
		688	2176 (%73)					Epoksi Sıyrılıyor	54338		0%	
		870	2540 (%84)					160.77	84404		55%	
		900	2600 (%87)					160.83	84436		55%	
3000	2010	950	2700 (%90)	3.60	50	180.0	9.0%	160.93	84488	103.5 - 54338	55%	
		1000	2800 (%93)					161.00	84525		56%	

Tablo 5.2. IPE 160 L=3000mm kirişi faydalı mesafenin kiriş dayanımına katkısı (devam)

IPE 160 KİRİŞİ L=3000												
Kiriş Uz. (mm)	Profil Alanı (mm ²)	Faydalı Mesafe (mm)	FRP Uzunluğu (mm)	FRP Kalınlığı (mm)	FRP Genişliği (mm)	FRP Alanı (mm ²)	Oran (FRP A. / Profil A.)	SONUÇLAR				
								Toplam Yük (kN)	FRP'li Kiriş M _u (kNm)	FRP'siz Kiriş T.Yük - M _u (kN)-(kNm)	M _u Artışı %	
3000	2010	325	1450 (%48)	3.90	50	195.0	9.7%	Epoksi Sıyrılıyor	54338	103.5 - 54338	0%	
		688	2176 (%73)					Epoksi Sıyrılıyor	54338		0%	
		870	2540 (%84)					159.4	83685		54%	
		900	2600 (%87)					166.67	87502		61%	
		950	2700 (%90)					166.76	87549		61%	
		1000	2800 (%93)					166.85	87596		61%	
3000	2010	325	1450 (%48)	4.39	50	219.5	10.9%	Epoksi Sıyrılıyor	54338	103.5 - 54338	0%	
		688	2176 (%73)					Epoksi Sıyrılıyor	54338		0%	
		870	2540 (%84)					133.76	70224		29%	
		900	2600 (%87)					172.88	90762		67%	
		950	2700 (%90)					173.01	90830		67%	
		1000	2800 (%93)					173.11	90883		67%	
3000	2010	325	1450 (%48)	4.80	50	240.0	11.9%	Epoksi Sıyrılıyor	54338	103.5 - 54338	0%	
		688	2176 (%73)					Epoksi Sıyrılıyor	54338		0%	
		870	2540 (%84)					137.59	72235		33%	
		900	2600 (%87)					160.24	84126		55%	
		950	2700 (%90)					179.40	94185		73%	
		1000	2800 (%93)					179.43	94201		73%	
3000	2010	325	1450 (%48)	5.28	50	264.0	13.1%	Epoksi Sıyrılıyor	54338	103.5 - 54338	0%	
		688	2176 (%73)					Epoksi Sıyrılıyor	54338		0%	
		870	2540 (%84)					152.4	80010		47%	
		900	2600 (%87)					142.04	74571		37%	
		950	2700 (%90)					186.65	97991		80%	
3000	2010	325	1450 (%48)	5.81	50	290.5	14.5%	Epoksi Sıyrılıyor	54338	103.5 - 54338	0%	
		688	2176 (%73)					Epoksi Sıyrılıyor	54338		0%	
		870	2540 (%84)					143.8	75495		39%	
		900	2600 (%87)					146.49	76907		42%	
3000	2010	325	1450 (%48)	6.96	50	348.0	17.3%	Epoksi Sıyrılıyor	54338	103.5 - 54338	0%	
		688	2176 (%73)					Epoksi Sıyrılıyor	54338		0%	
		870	2540 (%84)					Epoksi Sıyrılıyor	54338		0%	
		900	2600 (%87)					127.11	66733		23%	

Tablo 5.2'deki "Epoksi Sıyrılıyor" ifadesi, yüklemenin FRP'siz (güçlendirilmemiş) kiriş dayanımına ulaşmadan epoksinin sıyrılması anlamında kullanılmıştır. Faydalı mesafenin tam anlamıyla yeterli olmaması durumunda HM-CFRP'nin çalışabildiği oranda dayanım artışı olmaktadır. Yüksek güçlendirme oranlarında da, faydalı mesafe yeterli uzunlukta olsa bile HM-CFRP kopma dayanımına ulaşmadan epoksi sıyrılması meydana gelmektedir (Şekil 5.2).



Şekil 5.2. HM-CFRP kopma dayanımına ulaşmadan epoksi sıyrılması

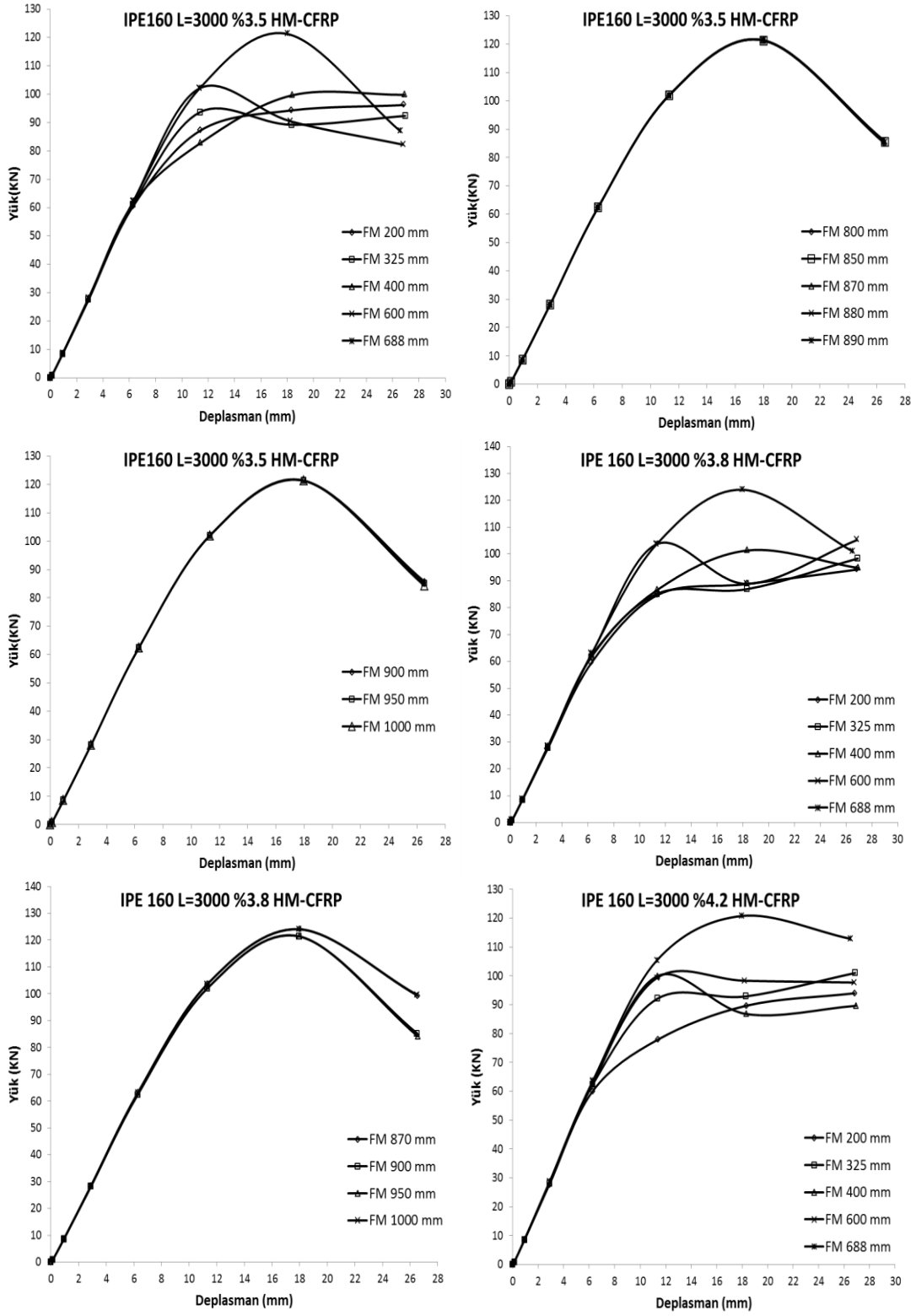
Tablo 5.2'deki %3.5 oranında güçlendirilmiş IPE 160 L=3000mm kirişi, laboratuvar deneyleri gerçek numunelerinin numerik modelidir. Gerçek numunelerin faydalı mesafesi 800mm'dir. Tablodan görüleceği üzere, epoksi sıyrılması %3.5 HM-CFRP oranı için faydalı mesafe 600mm'ye kadar meydana gelmektedir. Dolayısıyla gerçek numunelerde faydalı mesafe güvenli tarafta seçilmiştir.

HM-CFRP kopma dayanımına ulaşmadan epoksi sıyrılması olmaması için;

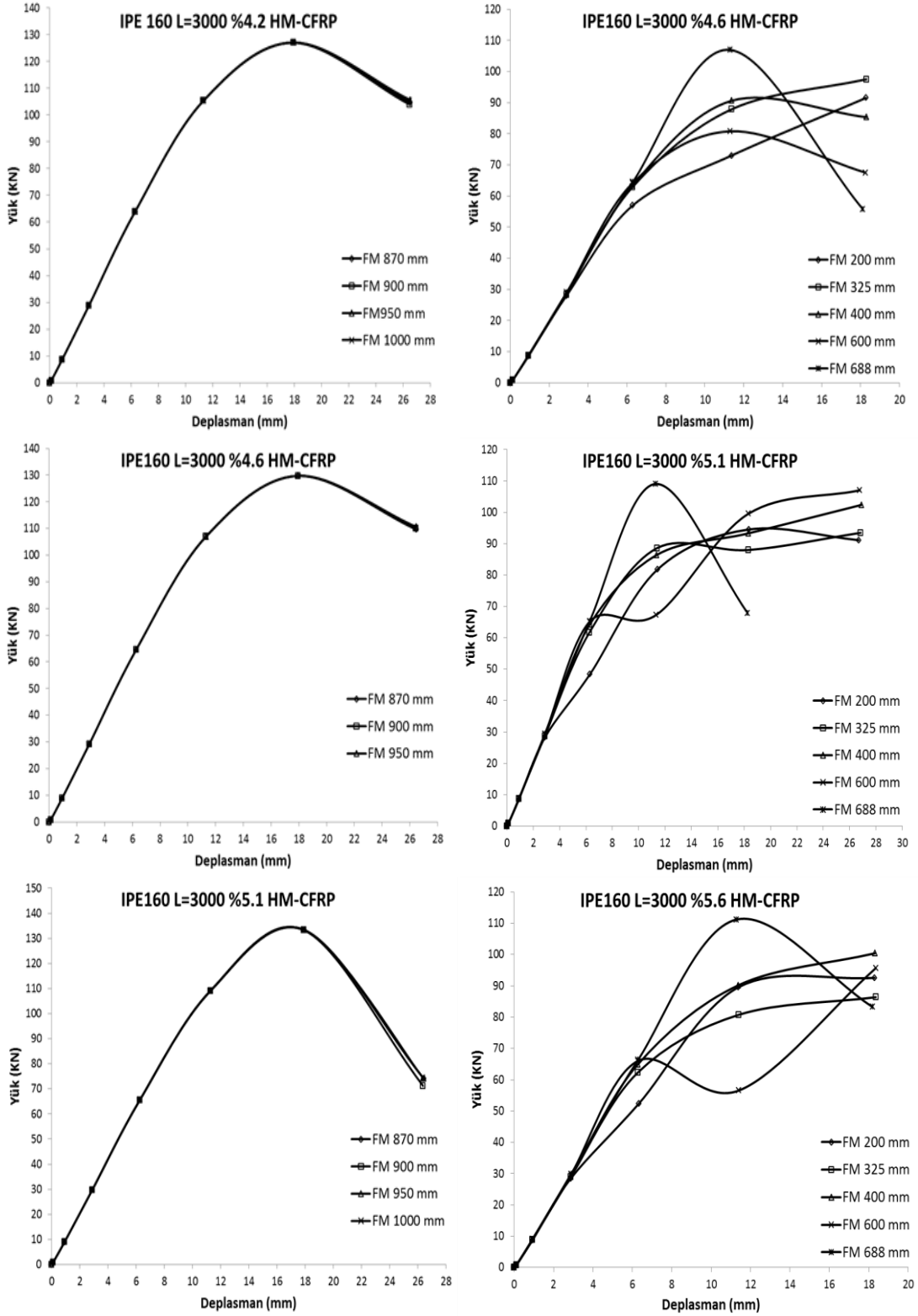
- HM-CFRP oranı, %3.5 ile %3.8 için faydalı mesafe 688mm'den, FRP uzunluğu kiriş uzunluğunun %73'ünden küçük olmamalıdır.
- HM-CFRP oranı, %4.2 ile %9 arasında faydalı mesafe 870mm'den, FRP uzunluğu kiriş uzunluğunun %84'ünden küçük olmamalıdır.
- HM-CFRP oranı, %9.7 ile %10.9 için faydalı mesafe 900mm'den, FRP uzunluğu kiriş uzunluğunun %87'sinden küçük olmamalıdır.
- HM-CFRP oranı, %11.9 ile %13.1 için faydalı mesafe 950mm'den, FRP uzunluğu kiriş uzunluğunun %90'ından küçük olmamalıdır.

HM-CFRP oranı, %14.5'den sonra faydalı mesafe yeterli uzunlukta olsa bile HM-CFRP kopma dayanımına ulaşmadan epoksi sıyrılması meydana gelmektedir.

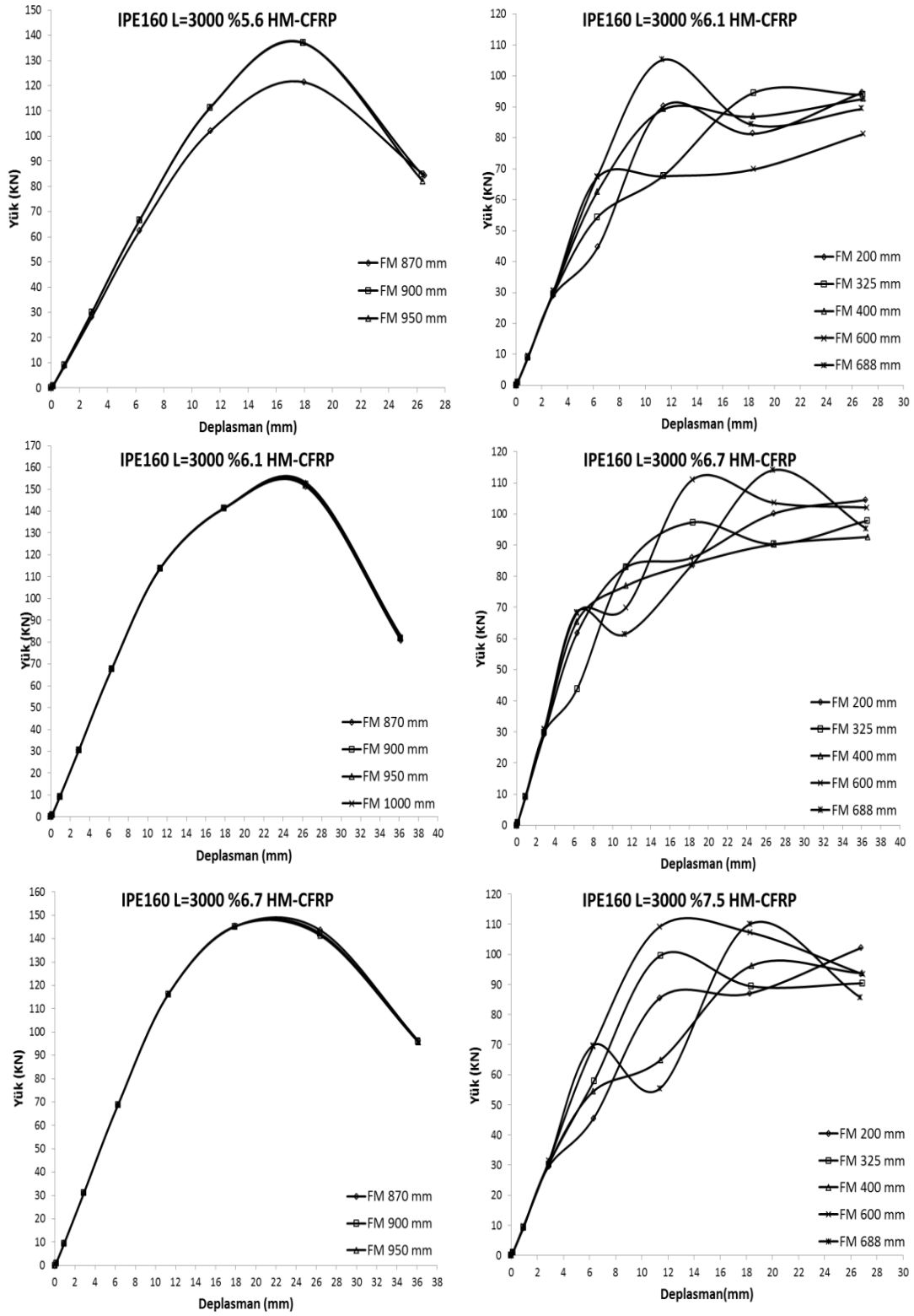
Aşağıdaki şekilde analizi yapılmış olan kirişlerin sonlu eleman çözümlerine ait yük-deplasman grafikleri verilmiştir (Şekil 5.3).



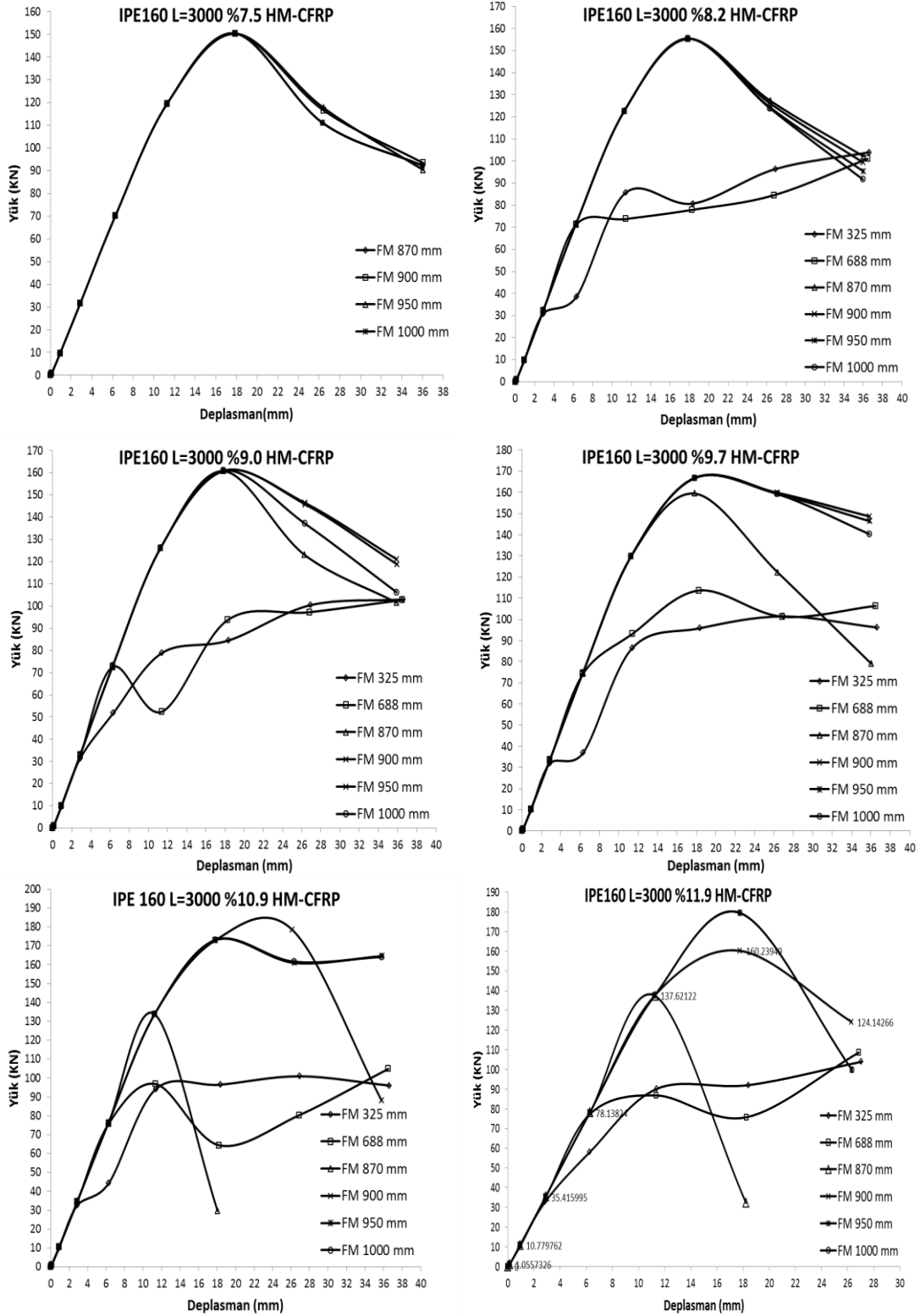
Şekil 5.3. IPE 160 L=3000mm kirişi faydalı mesafenin kiriş dayanımına katkı grafiği



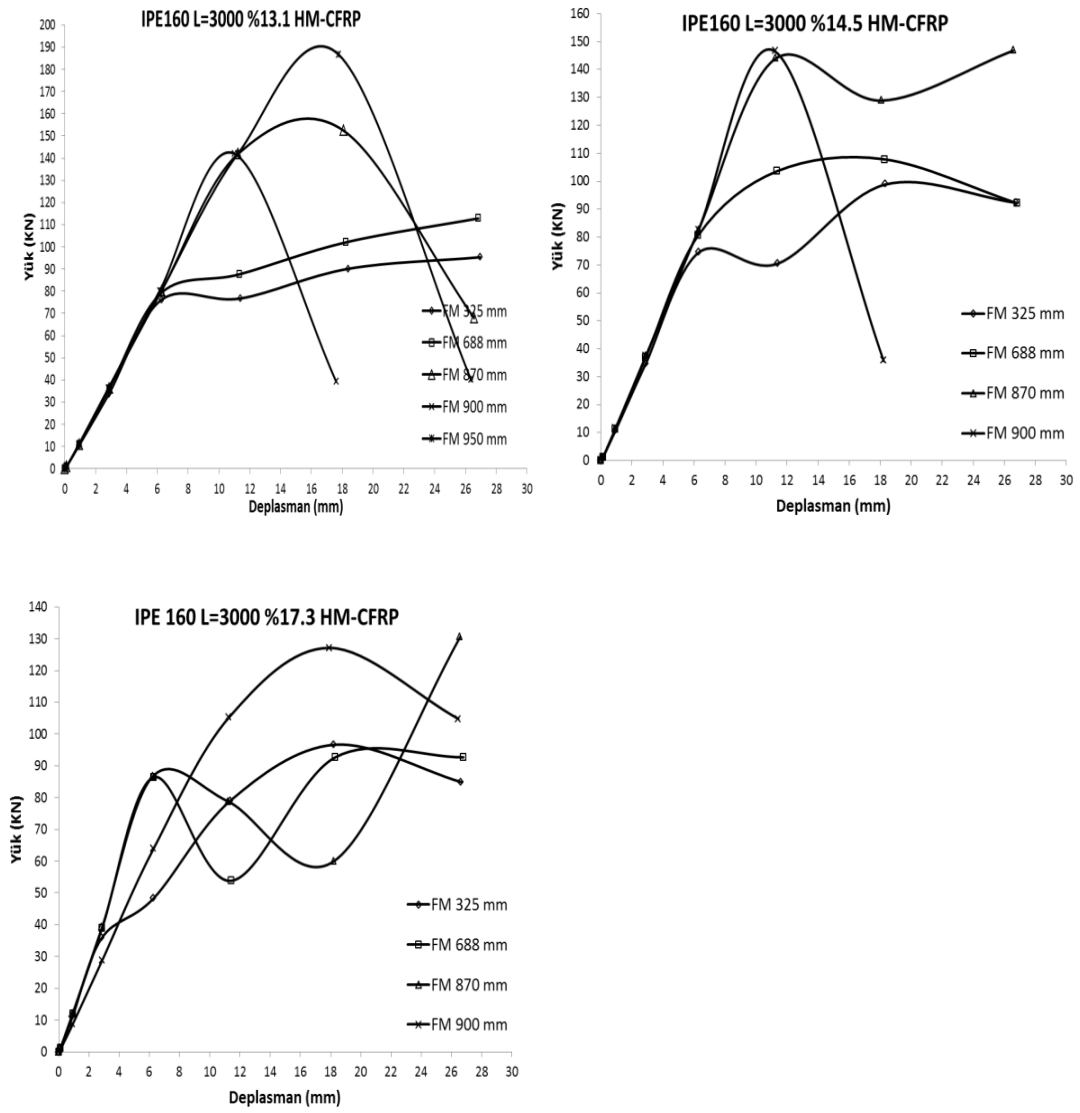
Şekil 5.3. IPE 160 L=3000mm kirişi faydalı mesafenin kiriş dayanımına katkı grafiği (devam)



Şekil 5.3. IPE 160 L=3000mm kirişi faydalı mesafenin kiriş dayanımına katkı grafiği (devam)



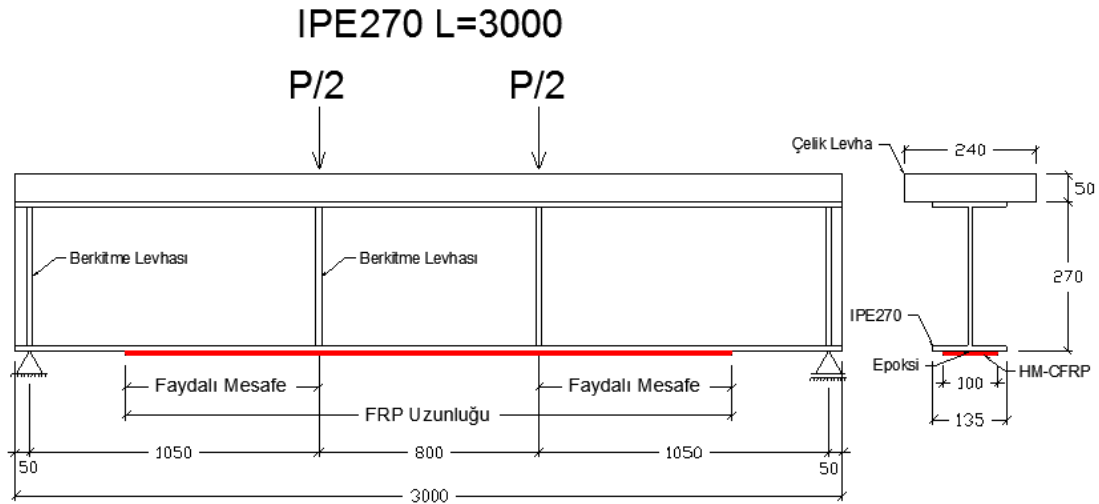
Şekil 5.3. IPE 160 L=3000mm kirişi faydalı mesafenin kiriş dayanımına katkı grafiği (devam)



Şekil 5.3. IPE 160 L=3000mm kirişi faydalı mesafenin kiriş dayanımına katkı grafiği (devam)

5.1.2. IPE 270 kirişi

Faydalı mesafenin kiriş dayanımına katkısını araştırmak için seçilen IPE 270 profilinden oluşan kirişin geometrik özellikleri Şekil 5.4’de verilmiştir.



Şekil 5.4. IPE 270 L=3000mm kirişi

IPE 270 profilinden oluşan modellerde farklı HM-CFRP oranları için faydalı mesafe kademeli olarak değiştirilerek çözümler yapılmış ve kiriş dayanımındaki artışlar Tablo 5.3'de gösterilmiştir.

Tablo 5.3. IPE 270 L=3000mm kirişi faydalı mesafenin kiriş dayanımına katkısı

IPE 270 KİRİŞİ L=3000												
Kiriş Uz. (mm)	Profil Alanı (mm ²)	Faydalı Mesafe (mm)	FRP Uzunluğu (mm)	FRP Kalınlığı (mm)	FRP Genişliği (mm)	FRP Alanı (mm ²)	Oran (FRP A. / Profil A.)	SONUÇLAR				
								Toplam Yük (kN)	FRP'li Kiriş M _u (kNm)	FRP'siz Kiriş T.Yük - M _u (kN)-(kNm)	M _u Artışı %	
3000	4590	400	1600 (%54)	1.60	100	160.0	3.5%	Epoksi Sıyrılıyor	205800	392 - 205800		0%
		600	2000 (%66)					Epoksi Sıyrılıyor	205800			0%
		700	2175 (%73)					464.49	243857			18%
		900	2000 (%87)					464.93	244088			19%
3000	4590	200	1200 (%40)	1.75	100	175.0	3.8%	Epoksi Sıyrılıyor	205800	392 - 205800		0%
		400	1600 (%54)					Epoksi Sıyrılıyor	205800			0%
		600	2000 (%66)					Epoksi Sıyrılıyor	205800			0%
		700	2175 (%73)					473.76	248724			21%
		900	2000 (%87)					474.12	248913			21%
3000	4590	400	1600 (%54)	1.92	100	192.0	4.2%	Epoksi Sıyrılıyor	205800	392 - 205800		0%
		600	2000 (%66)					Epoksi Sıyrılıyor	205800			0%
		700	2175 (%73)					438.65	230291			12%
		900	2000 (%87)					484.49	254357			24%
3000	4590	200	1200 (%40)	2.11	100	211.0	4.6%	Epoksi Sıyrılıyor	205800	392 - 205800		0%
		400	1600 (%54)					Epoksi Sıyrılıyor	205800			0%
		600	2000 (%66)					Epoksi Sıyrılıyor	205800			0%
		700	2175 (%73)					Epoksi Sıyrılıyor	205800			0%
		900	2000 (%87)					495.73	260258			26%

Tablo 5.3. IPE 270 L=3000mm kirişi faydalı mesafenin kiriş dayanımına katkısı (devam)

IPE 270 KİRİŞİ L=3000												
Kiriş Uz. (mm)	Profil Alanı (mm ²)	Faydalı Mesafe (mm)	FRP Uzunluğu (mm)	FRP Kalınlığı (mm)	FRP Genişliği (mm)	FRP Alanı (mm ²)	Oran (FRP A. / Profil A.)	SONUÇLAR				
								Toplam Yük (kN)	FRP'li Kiriş M _u (kNm)	FRP'siz Kiriş T.Yük - M _u (kN)-(kNm)	M _u Artışı %	
3000	4590	200	1200(%40)	2.33	100	233.0	5.1%	Epoksi Sıyrılıyor	205800	392 - 205800	0%	
		400	1600 (%54)					Epoksi Sıyrılıyor	205800		0%	
		600	2000 (%66)					Epoksi Sıyrılıyor	205800		0%	
		700	2175(%73)					Epoksi Sıyrılıyor	205800		0%	
		900	2000 (%87)					508.52	266973		30%	
3000	4590	200	1200(%40)	2.82	100	282.0	6.1%	Epoksi Sıyrılıyor	205800	392 - 205800	0%	
		600	2000 (%66)					Epoksi Sıyrılıyor	205800		0%	
		700	2175(%73)					Epoksi Sıyrılıyor	205800		0%	
		900	2000 (%87)					536.51	281668		37%	
3000	4590	200	1200(%40)	3.07	100	307.0	6.7%	Epoksi Sıyrılıyor	205800	392 - 205800	0%	
		400	1600 (%54)					Epoksi Sıyrılıyor	205800		0%	
		600	2000 (%66)					Epoksi Sıyrılıyor	205800		0%	
		700	2175(%73)					Epoksi Sıyrılıyor	205800		0%	
		900	2000 (%87)					548.80	288120		40%	
3000	4590	200	1200(%40)	3.37	100	337.0	7.3%	Epoksi Sıyrılıyor	205800	392 - 205800	0%	
		400	1600 (%54)					Epoksi Sıyrılıyor	205800		0%	
		600	2000 (%66)					Epoksi Sıyrılıyor	205800		0%	
		700	2175(%73)					Epoksi Sıyrılıyor	205800		0%	
		900	2000 (%87)					564.02	296111		44%	
3000	4590	200	1200(%40)	3.70	100	370.0	8.1%	Epoksi Sıyrılıyor	205800	392 - 205800	0%	
		400	1600 (%54)					Epoksi Sıyrılıyor	205800		0%	
		600	2000 (%66)					Epoksi Sıyrılıyor	205800		0%	
		700	2175(%73)					Epoksi Sıyrılıyor	205800		0%	
		900	2000 (%87)					578.20	303555		48%	
3000	4590	200	1200(%40)	4.07	100	407.0	8.9%	Epoksi Sıyrılıyor	205800	392 - 205800	0%	
		400	1600 (%54)					Epoksi Sıyrılıyor	205800		0%	
		600	2000 (%66)					Epoksi Sıyrılıyor	205800		0%	
		700	2175(%73)					Epoksi Sıyrılıyor	205800		0%	
		900	2000 (%87)					590.47	309997		51%	
3000	4590	200	1200(%40)	4.47	100	447.0	9.7%	Epoksi Sıyrılıyor	205800	392 - 205800	0%	
		400	1600 (%54)					Epoksi Sıyrılıyor	205800		0%	
		600	2000 (%66)					Epoksi Sıyrılıyor	205800		0%	
		700	2175(%73)					Epoksi Sıyrılıyor	205800		0%	
		900	2000 (%87)					558.97	293459		43%	
3000	4590	200	1200(%40)	4.91	100	491.0	10.7%	Epoksi Sıyrılıyor	205800	392 - 205800	0%	
		400	1600 (%54)					Epoksi Sıyrılıyor	205800		0%	
		600	2000 (%66)					Epoksi Sıyrılıyor	205800		0%	
		700	2175(%73)					Epoksi Sıyrılıyor	205800		0%	
		900	2000 (%87)					494.31	259513		26%	
3000	4590	200	1200(%40)	5.40	100	540.0	11.8%	Epoksi Sıyrılıyor	205800	392 - 205800	0%	
		400	1600 (%54)					Epoksi Sıyrılıyor	205800		0%	
		600	2000 (%66)					Epoksi Sıyrılıyor	205800		0%	
		700	2175(%73)					Epoksi Sıyrılıyor	205800		0%	
		900	2000 (%87)					425.33	223298		9%	

HM-CFRP kopma dayanımına ulaşmadan epoksi sıyrılması olmaması için;

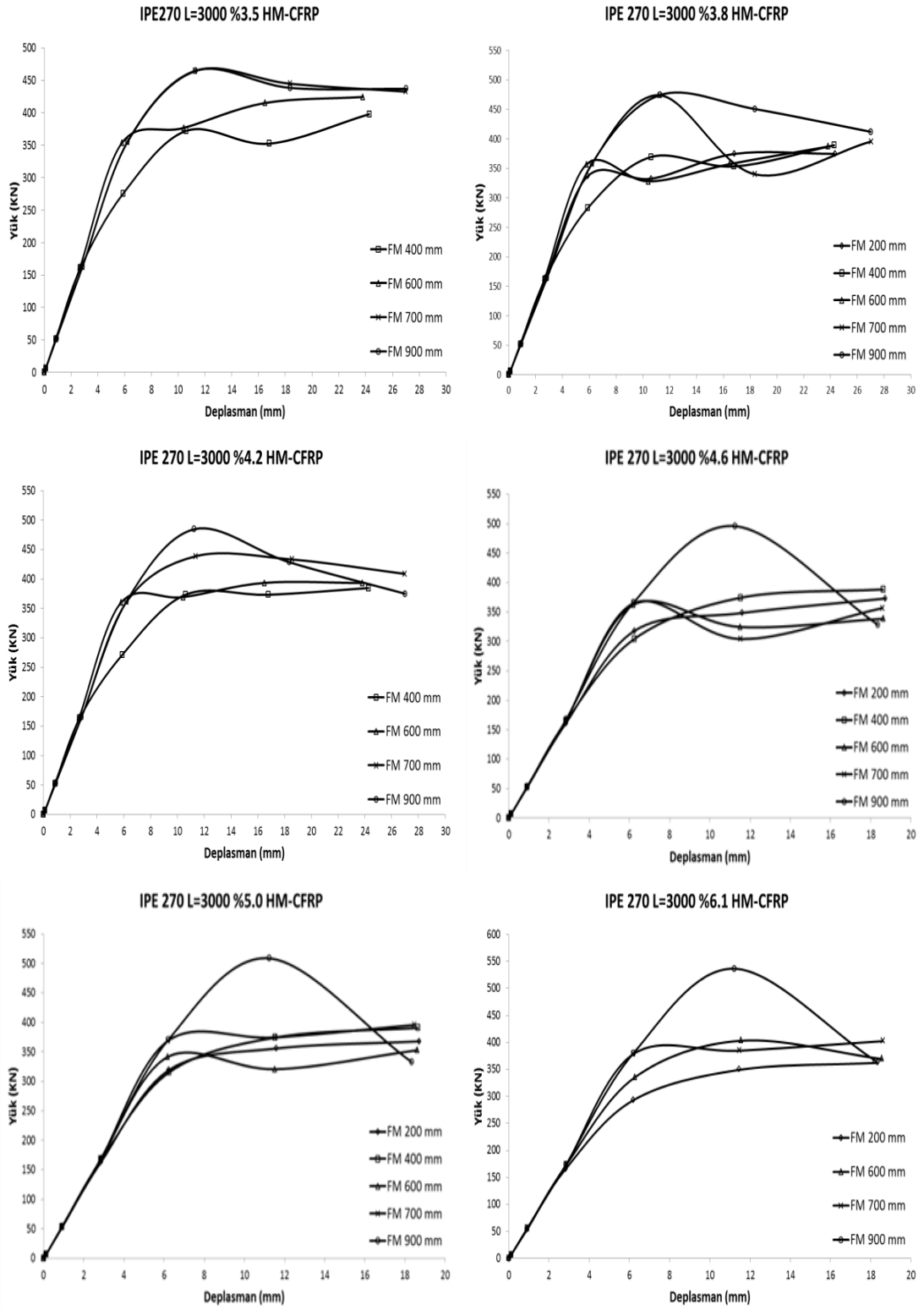
- HM-CFRP oranı, %3.5 ile %3.8 için faydalı mesafe 700mm'den, FRP uzunluğu kiriş uzunluğunun %73'ünden küçük olmamalıdır.
- HM-CFRP oranı, %4.2 ile %8.9 arasında faydalı mesafe 900mm'den, FRP uzunluğu kiriş uzunluğunun %87'sinden küçük olmamalıdır.

HM-CFRP oranı, %9.7'den sonra faydalı mesafe yeterli uzunlukta olsa bile HM-CFRP kopma dayanımına ulaşmadan epoksi sıyrılması meydana gelmektedir.

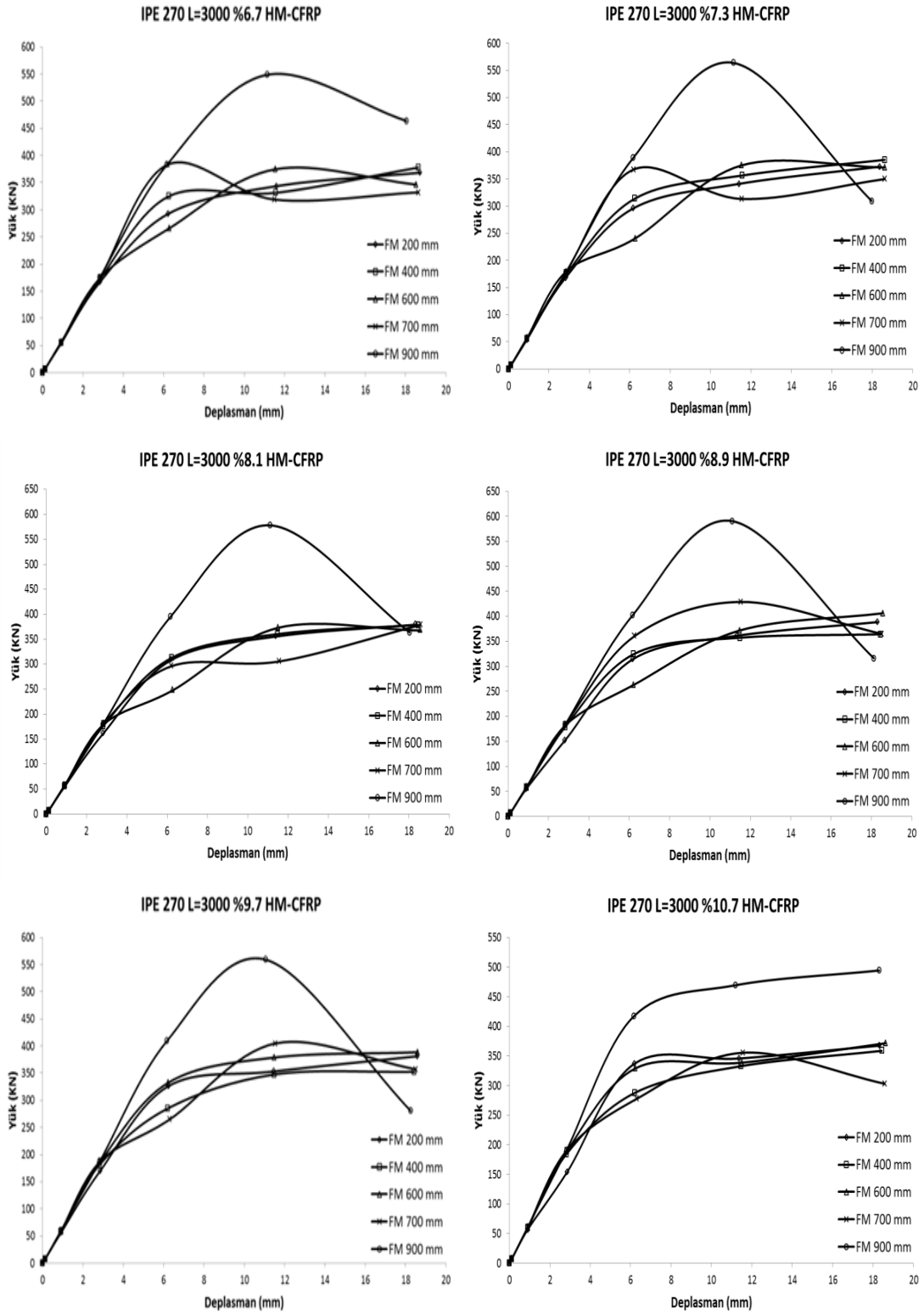
IPE 160 ve IPE 270 profillerinden oluşan modellerin çözüm sonuçlarından görüldüğü üzere, HM-CFRP kopmadan önce epoksi sıyrılmasını önlemek için gerekli minimum faydalı mesafe, HM-CFRP oranları için farklı değerler almaktadır. Ancak, dayanım artışı için kullanılacak HM-CFRP miktarı ve boyu hem ekonomik olarak, hem de verimlilik açısından değerlendirilerek optimum bir sınır değer kabul etmek gerekmektedir.

Tablo 5.2'deki IPE 160 profilinden oluşan modellerin çözüm sonuçlarına bakılacak olursa, faydalı mesafenin 900mm değeri (FRP uzunluğu kiriş uzunluğunun %87'si) HM-CFRP oranının %11 değerine kadar yeterli olmaktadır. Tablo 5.3'deki IPE 270 profilinden oluşan modellerin çözüm sonuçlarına bakılacak olursa, faydalı mesafenin 900mm değeri (FRP uzunluğu kiriş uzunluğunun %87'si) HM-CFRP oranının %9 değerine kadar yeterli olmaktadır. Daha fazla oranda güçlendirme yapmak teorik olarak mümkün olsa bile pratik olarak mümkün değildir. Çünkü belirli kalınlığa kadar HM-CFRP üretilmektedir, daha fazla oranda güçlendirme yapmak için çok miktarda HM-CFRP'nin üst üste birbirine yapıştırılması gerekmektedir. Üst üste birbirine yapıştırılmış HM-CFRP'lerin verimli olup olamayacağı da bilinmemektedir.

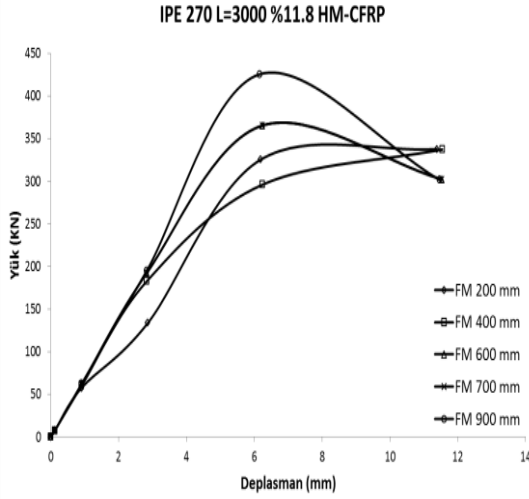
Aşağıdaki şekilde analizi yapılmış olan kirişlerin sonlu eleman çözümlerine ait yük-deplasman grafikleri verilmiştir (Şekil 5.5).



Şekil 5.5. IPE 270 L=3000mm kiriş faydalı mesafenin kiriş dayanımına katkı grafiği (devam)



Şekil 5.5. IPE 270 L=3000mm kirişi faydalı mesafenin kiriş dayanımına katkı grafiği (devam)



Şekil 5.5. IPE 270 L=3000mm kirişi faydalı mesafenin kiriş dayanımına katkı grafiği (devam)

5.2. HM-CFRP Oranının Kiriş Dayanımına Katkısı

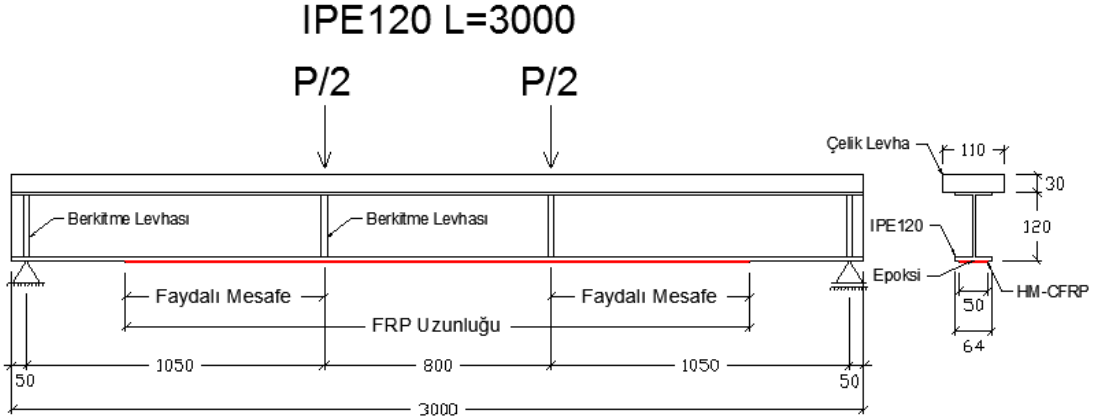
Bu bölümde HM-CFRP oranının kiriş dayanımına katkısını incelemek için kullanılacak modellerde, faydalı mesafe için 900mm değeri (FRP uzunluğu kiriş uzunluğunun %87'si) seçilmiştir. Tablo 5.4'de yapılan numerik modellerde kullanılan profil tipleri gösterilmiştir.

Tablo 5.4. HM-CFRP oranının kiriş dayanımına katkısını incelemek için yapılan numerik modellerde kullanılan profil tipleri

Profil Tipi	Kiriş Boyu L (mm)	Farklı HM-CFRP oranları için model sayısı
IPE 120	3000	16
IPE 160	3000	17
IPE 220	3000	15
	6000	12
IPE 270	3000	13
	6000	15
IPE 330	6000	16
IPE 400	6000	13
	12000	9
IPE 500	6000	12
	12000	11
7 Profil Tipi için Toplam		149 çözüm yapılmıştır

5.2.1. IPE 120 kirişi

HM-CFRP oranının kiriş dayanımına katkısını incelemek için seçilen IPE 120 profilinden oluşan kirişin geometrik özellikleri Şekil 5.6’da verilmiştir.



Şekil 5.6. IPE 120 L=3000mm kirişi

IPE 120 profilinden oluşan modellerde farklı HM-CFRP oranları için çözümler yapılmış ve kiriş dayanımındaki artışlar Tablo 5.5’de gösterilmiştir.

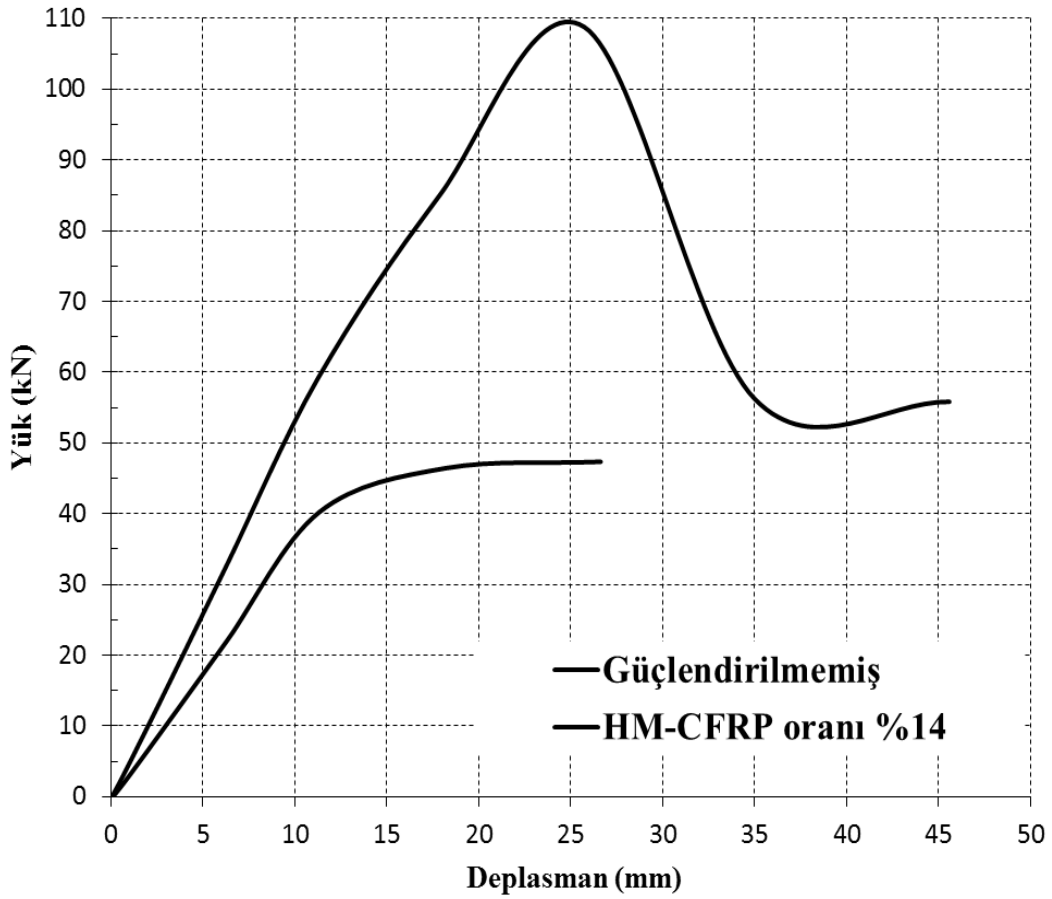
Tablo 5.5. IPE 120 L=3000mm kirişi HM-CFRP oranının kiriş dayanımına katkısı

IPE 120 KIRIŞI L=3000													
Kiriş Uz. (mm)	Profil Alanı (mm ²)	Faydalı Mesafe (mm)	FRP Uzunluğu (mm)	FRP Kalınlığı (mm)	FRP Genişliği (mm)	FRP Alanı (mm ²)	Oran (FRP A. / Profil A.)	SONUÇLAR					
								Toplam Yük (kN)	FRP'li Kiriş M _u (kNm)	FRP'siz Kiriş T.Yük - M _u (kN)-(kNm)	M _u Artışı %		
3000	1320	900	2600 (%86.6)	0.93	50	46.25	3.5%	57.83	30361	55.2 - 28980	5%		
				1.01	50	50.50	3.8%	58.7	30818		6%		
				1.12	50	56.00	4.2%	59.88	31437		8%		
				1.21	50	60.50	4.6%	60.83	31936		10%		
				1.34	50	67.00	5.1%	69.01	36230		25%		
				1.76	50	88.00	6.7%	66.74	35039		21%		
				1.86	50	93.00	7.0%	64.66	33947		17%		
				2.12	50	105.75	8.0%	86.31	45313		56%		
				2.32	50	116.00	8.8%	89.43	46951		62%		
				2.56	50	128.00	9.7%	93.11	48883		69%		
				2.82	50	141.00	10.7%	96.92	50883		76%		
				3.08	50	154.00	11.7%	100.65	52841		82%		
				3.34	50	167.00	12.7%	104.16	54684		89%		
				3.50	50	175.00	13.3%	106.18	55745		92%		
				3.70	50	185.00	14.0%	108.82	57131		97%		
4.30	50	215.00	16.3%	89.8	47145	63%							

HM-CFRP oranının %7 değerine kadar değişken bir dayanım artışı vardır. HM-CFRP oranının %8 değerinden itibaren dayanımda oransal olarak verimli bir artış gözlenmektedir.

HM-CFRP oranı'nın %14 değerine kadar kiriş dayanımında artış olurken, daha yüksek oranlarda HM-CFRP kopma dayanımına ulaşmadan epoksi sıyrılması meydana gelmekte ve dayanımda yeterli artış olmamaktadır.

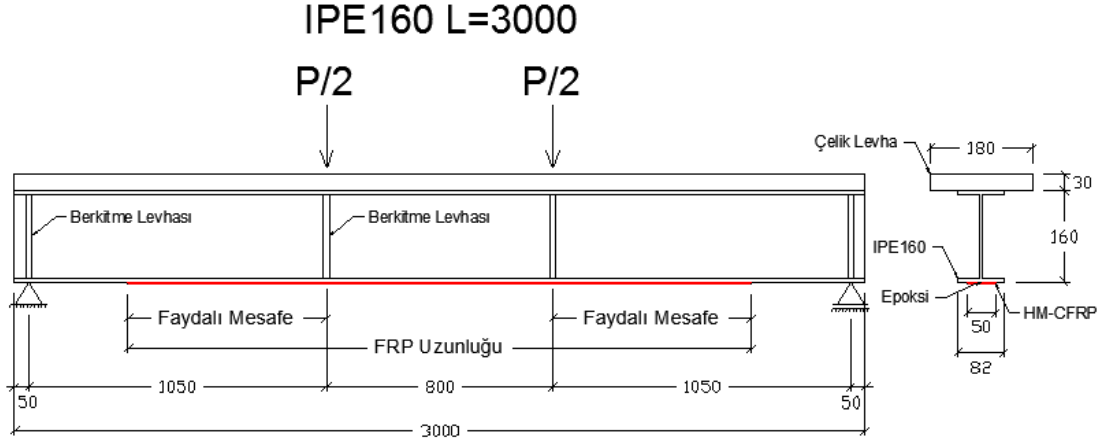
HM-CFRP oranı %14 için, IPE 120 kiriş yük-deplasman grafiği Şekil 5.7'de verilmiştir.



Şekil 5.7. IPE 120 L=3000mm kiriş HM-CFRP oranı %14 için yük-deplasman grafiği

5.2.2. IPE 160 kirişi

HM-CFRP oranının kiriş dayanımına katkısını incelemek için seçilen IPE 160 profilinden oluşan kirişin geometrik özellikleri Şekil 5.8’de verilmiştir.



Şekil 5.8. IPE 160 L=3000mm kirişi

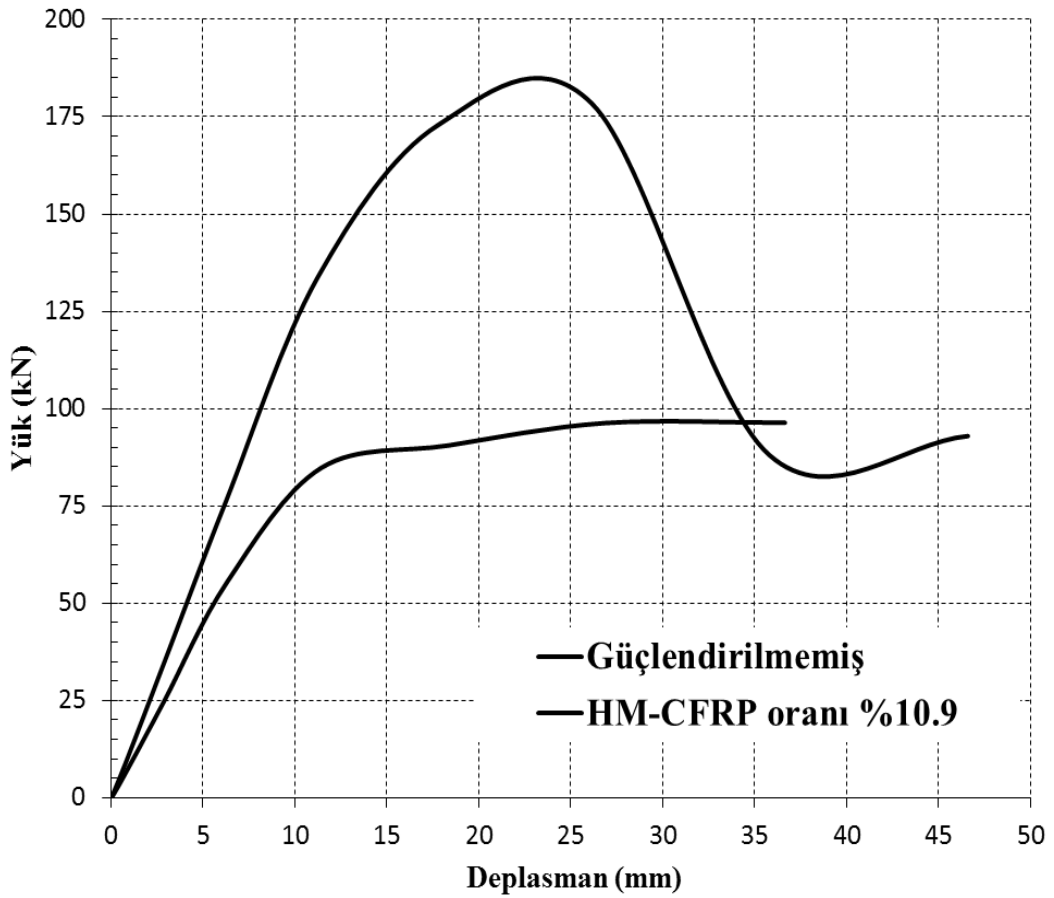
IPE 160 profilinden oluşan modellerde farklı HM-CFRP oranları için çözümler yapılmış ve kiriş dayanımındaki artışlar Tablo 5.6’da gösterilmiştir.

Tablo 5.6. IPE 160 L=3000mm kirişi HM-CFRP oranının kiriş dayanımına katkısı

IPE 160 KIRIŞI L=3000											
Kiriş Uz. (mm)	Profil Alanı (mm ²)	Faydalı Mesafe (mm)	FRP Uzunluğu (mm)	FRP Kalınlığı (mm)	FRP Genişliği (mm)	FRP Alanı (mm ²)	Oran (FRP A. / Profil A.)	SONUÇLAR			
								Toplam Yük (kN)	FRP'li Kiriş M _u (kNm)	FRP'siz Kiriş T.Yük - M _u (kN)-(kNm)	M _u Artışı %
3000	2010	900	2600 (%86.6)	1.40	50	70.0	3.5%	121.35	63709	103.5 - 54338	17%
				1.54	50	77.0	3.8%	121.35	63709		17%
				1.68	50	84.0	4.2%	126.98	66665		23%
				1.84	50	92.0	4.6%	129.75	68119		25%
				2.04	50	102.0	5.1%	133.32	69993		29%
				2.25	50	112.5	5.6%	136.92	71883		32%
				2.47	50	123.5	6.1%	152.41	80015		47%
				2.69	50	134.5	6.7%	145.16	76209		40%
				3.01	50	150.5	7.5%	150.3	78908		45%
				3.29	50	164.5	8.2%	155.34	81554		50%
				3.60	50	180.0	9.0%	160.83	84436		55%
				3.90	50	195.0	9.7%	166.67	87502		61%
				4.39	50	219.5	10.9%	172.88	90762		67%
				4.80	50	240.0	11.9%	160.24	84126		55%
				5.28	50	264.0	13.1%	142.04	74571		37%
				5.81	50	290.5	14.5%	146.49	76907		42%
6.96	50	348.0	17.3%	127.11	66733	23%					

HM-CFRP oranının %10.9 değerine kadar dayanımda düzgün bir artış gözlenmektedir. HM-CFRP oranı'nın %11.9 değerinden itibaren, HM-CFRP kopma dayanımına ulaşmadan epoksi sıyrılması meydana gelmekte ve dayanımda yeterli artış olmamaktadır.

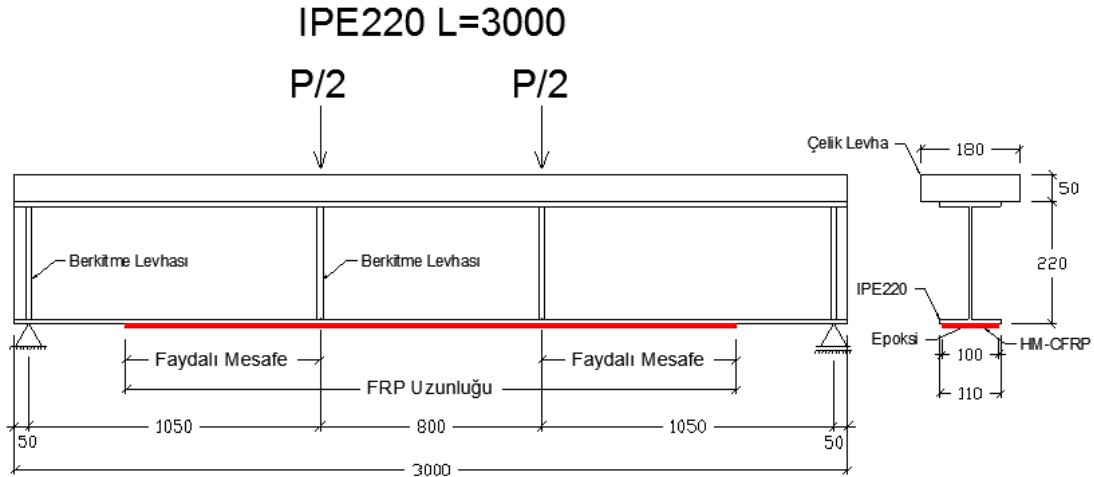
HM-CFRP oranı %10.9 için, IPE 160 kirişi yük-deplasman grafiği Şekil 5.9'da verilmiştir.



Şekil 5.9. IPE 160 L=3000mm kirişi HM-CFRP oranı %10.9 için yük-deplasman grafiği

5.2.3. IPE 220 kirişi

HM-CFRP oranının kiriş dayanımına katkısını incelemek için seçilen IPE 220 profilinden oluşan kirişin geometrik özellikleri Şekil 5.10'da verilmiştir.



Şekil 5.10. IPE 220 L=3000mm kirişi

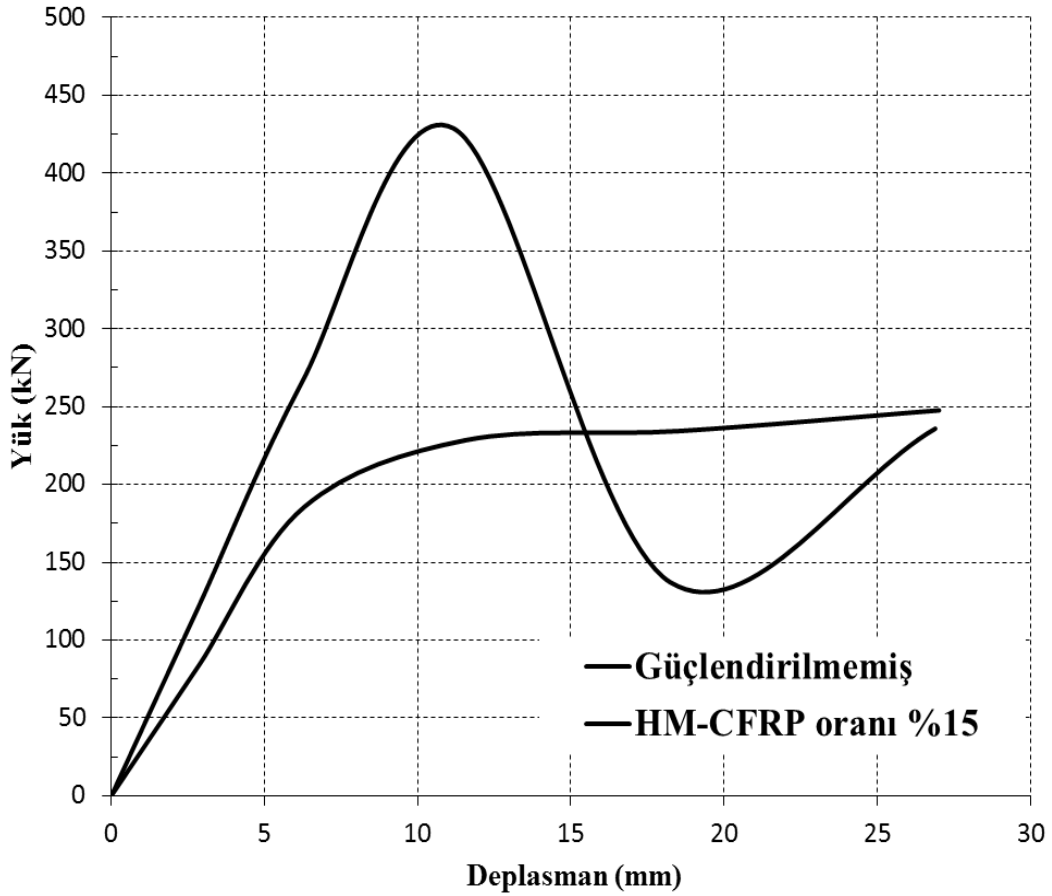
IPE 220 profilinden oluşan modellerde farklı HM-CFRP oranları için çözümler yapılmış ve kiriş dayanımındaki artışlar Tablo 5.7'de gösterilmiştir.

Tablo 5.7. IPE 220 L=3000mm kirişi HM-CFRP oranının kiriş dayanımına katkısı

IPE 220 Kirişi L=3000											
Kiriş Uz. (mm)	Profil Alanı (mm ²)	Faydalı Mesafe (mm)	FRP Uzunluğu (mm)	FRP Kalınlığı (mm)	FRP Genişliği (mm)	FRP Alanı (mm ²)	Oran (FRP A. / Profil A.)	SONUÇLAR			
								Toplam Yük (kN)	FRP'li Kiriş M _u (kNm)	FRP'siz Kiriş T.Yük - M _u (kN)-(kNm)	M _u Artışı %
3000	3337	900	2600 (%86.6)	1.17	100	116.5	3.5%	290	152250	254 - 133350	14%
				1.27	100	126.8	3.8%	294.75	154744		16%
				1.40	100	140.0	4.2%	300.75	157894		18%
				1.54	100	153.5	4.6%	307.2	161280		21%
				1.70	100	169.8	5.1%	314.2	164955		24%
				2.24	100	223.5	6.7%	336.48	176652		32%
				2.35	100	235.2	7.0%	340.96	179004		34%
				2.67	100	267.0	8.0%	353.18	185420		39%
				2.94	100	293.9	8.8%	363.14	190649		43%
				3.24	100	323.6	9.7%	373.69	196187		47%
				3.57	100	356.8	10.7%	384.76	201999		51%
				3.91	100	390.5	11.7%	395.37	207569		56%
				4.50	100	450.0	13.5%	414.05	217376		63%
				5.00	100	500.0	15.0%	428.72	225078		69%
6.00	100	600.0	18.0%	347.82	182606	37%					

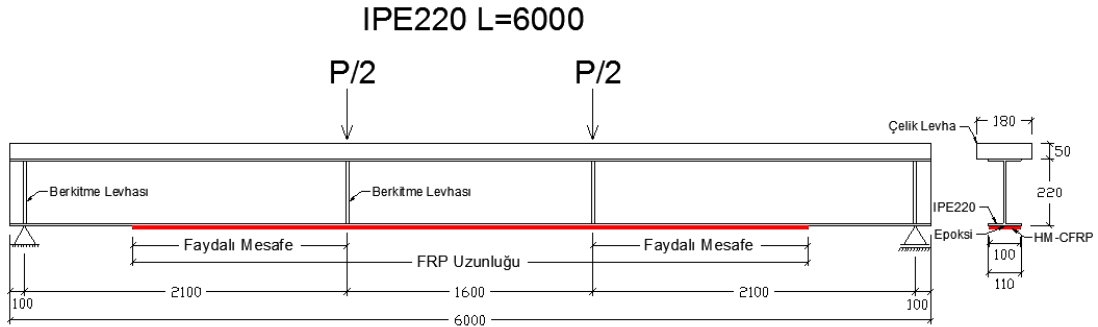
HM-CFRP oranının %15 değerine kadar dayanımda düzgün bir artış gözlenmektedir. HM-CFRP oranı'nın %18 değerinden itibaren, HM-CFRP kopma dayanımına ulaşmadan epoksi sıyrılması meydana gelmekte ve dayanımda yeterli artış olmamaktadır.

HM-CFRP oranı %15 için, IPE 220 L=3000mm kirişi yük-deplasman grafiği Şekil 5.11'de verilmiştir.



Şekil 5.11. IPE 220 L=3000mm kirişi HM-CFRP oranı %15 için yük-deplasman grafiği

IPE 220 profilinden oluşan kirişin 6000mm uzunluğundaki modelinin geometrik özellikleri Şekil 5.12’de verilmiştir.



Şekil 5.12. IPE 220 L=6000mm kirişi

IPE 220 profili 6000mm uzunluğundaki modellerde farklı HM-CFRP oranları için çözümler yapılmış ve kiriş dayanımındaki artışlar Tablo 5.8’de gösterilmiştir.

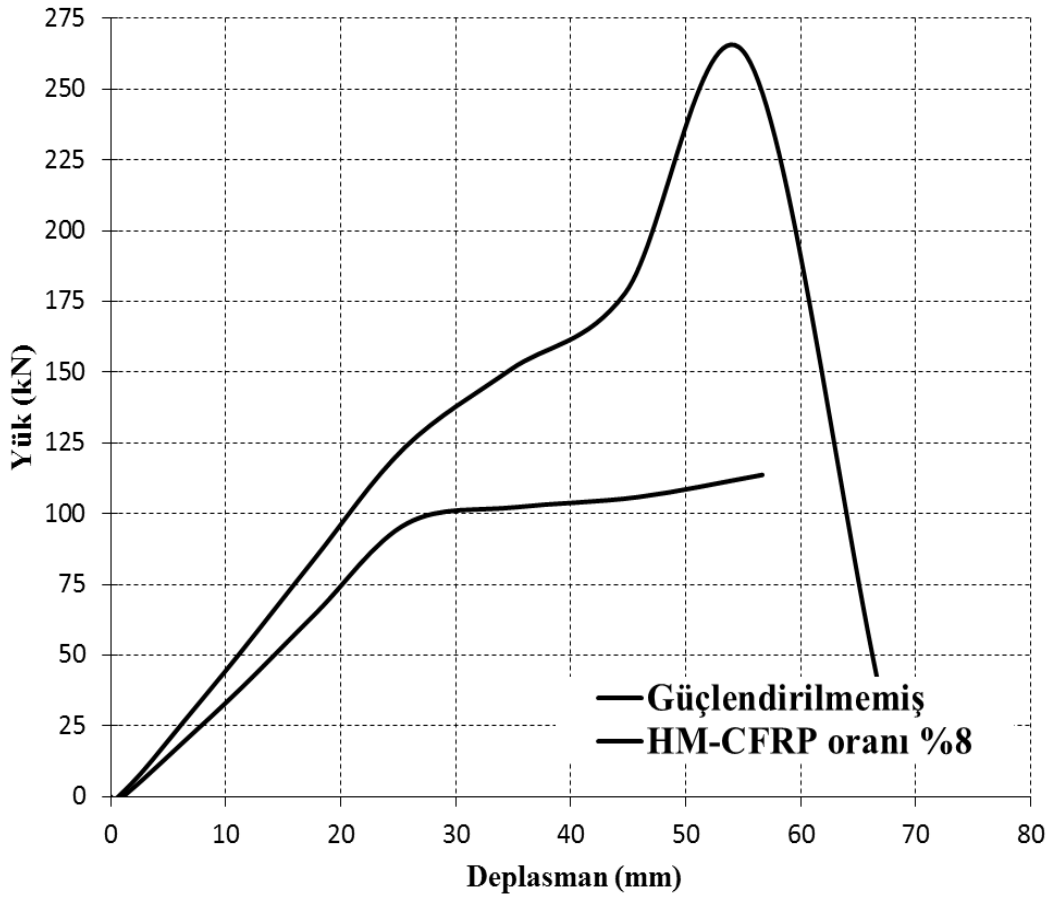
Tablo 5.8. IPE 220 L=6000mm kirişi HM-CFRP oranının kiriş dayanımına katkısı

IPE 220 KİRİŞİ L=6000													
Kiriş Uz. (mm)	Profil Alanı (mm ²)	Faydalı Mesafe (mm)	FRP Uzunluğu (mm)	FRP Kalınlığı (mm)	FRP Genişliği (mm)	FRP Alanı (mm ²)	Oran (FRP A. / Profil A.)	SONUÇLAR					
								Toplam Yük (kN)	FRP'li Kiriş M _u (kNm)	FRP'siz Kiriş T.Yük - M _u (kN)-(kNm)	M _u Artışı %		
6000	3337	1800	5200 (%86.6)	1.17	100	116.5	3.5%	141.22	148281	125 - 131250	13%		
				1.27	100	126.8	3.8%	144.1	151305		15%		
				1.40	100	140.0	4.2%	147.42	154791		18%		
				1.54	100	153.5	4.6%	150.88	158424		21%		
				1.70	100	169.8	5.1%	154.98	162729		24%		
				2.24	100	223.5	6.7%	229.47	240944		84%		
				2.35	100	235.2	7.0%	245.32	257586		96%		
				2.67	100	267.0	8.0%	261.81	274901		109%		
				2.94	100	293.9	8.8%	183.95	193148		47%		
				3.24	100	323.6	9.7%	190.09	199595		52%		
				3.57	100	356.8	10.7%	197.18	207039		58%		
				3.91	100	390.5	11.7%	203.98	214179		63%		

HM-CFRP oranının %5.1 değerine kadar düzgün bir dayanım artışı vardır. HM-CFRP oranının %6.7 değerinden itibaren dayanımda oransal olarak verimli bir artış gözlenmektedir.

HM-CFRP oranı'nın %8 değerine kadar kiriş dayanımında artış olurken, daha yüksek oranlarda HM-CFRP kopma dayanımına ulaşmadan epoksi sıyrılması meydana gelmekte ve dayanımında yeterli artış olmamaktadır.

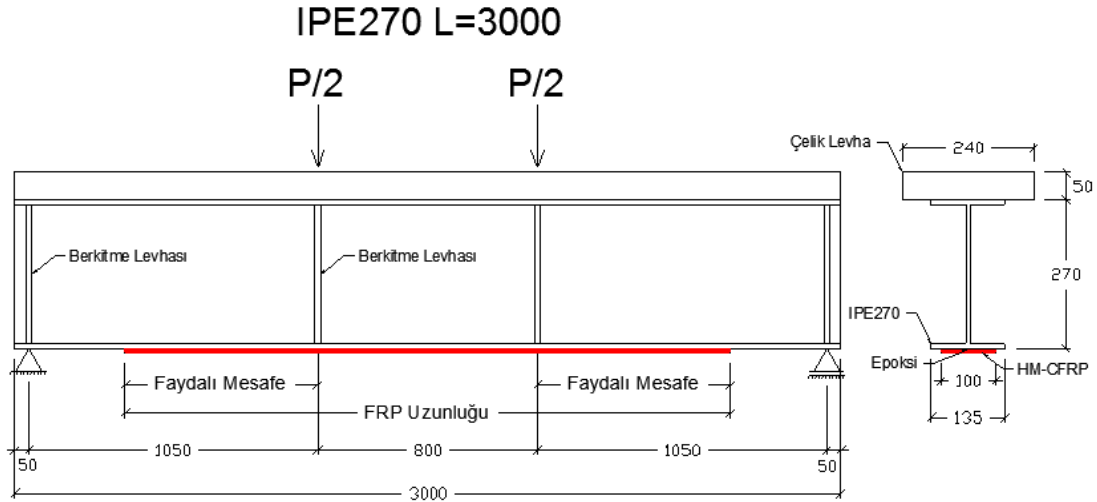
HM-CFRP oranı %8 için, IPE 220 L=6000mm kirişi yük-deplasman grafiği Şekil 5.13'de verilmiştir.



Şekil 5.13. IPE 220 L=6000mm kirişi HM-CFRP oranı %8 için yük-deplasman grafiği

5.2.4. IPE 270 kirişi

HM-CFRP oranının kiriş dayanımına katkısını incelemek için seçilen IPE 270 profilinden oluşan kirişin geometrik özellikleri Şekil 5.14’de verilmiştir.



Şekil 5.14. IPE 270 L=3000mm kirişi

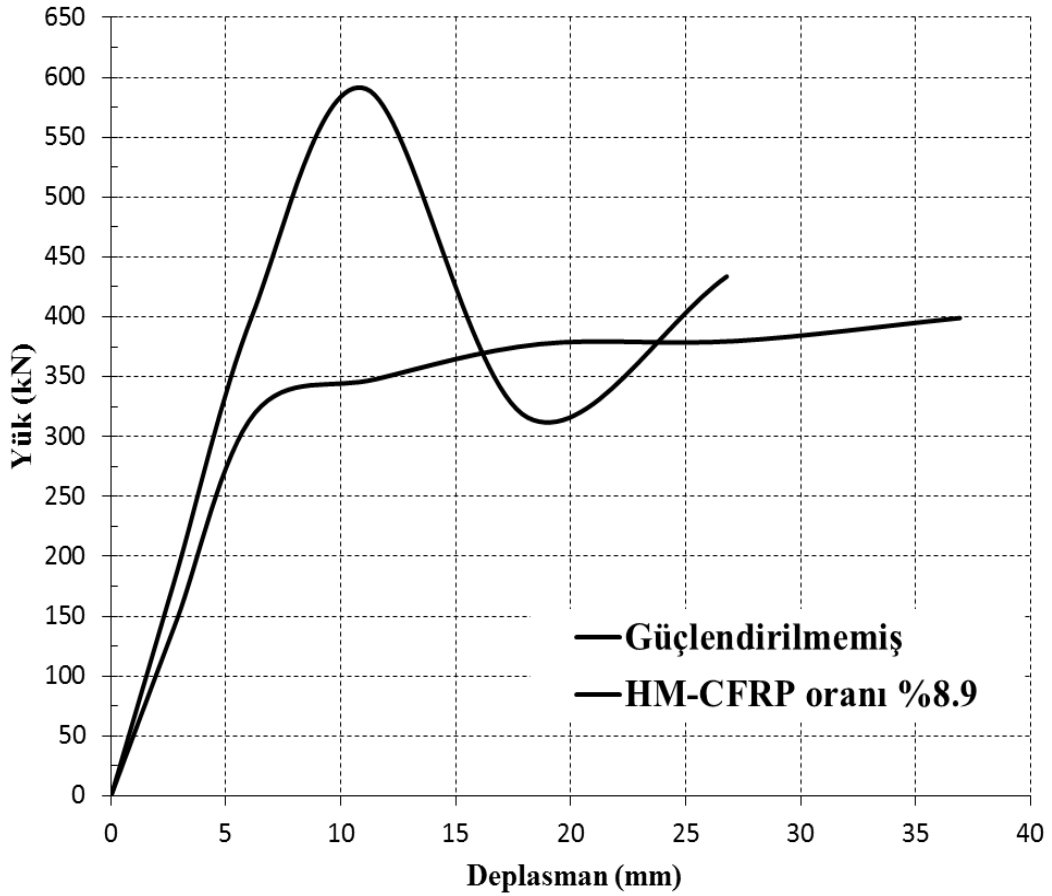
IPE 270 profilinden oluşan modellerde farklı HM-CFRP oranları için çözümler yapılmış ve kiriş dayanımındaki artışlar Tablo 5.9’da gösterilmiştir.

Tablo 5.9. IPE 270 L=3000mm kirişi HM-CFRP oranının kiriş dayanımına katkısı

IPE 270 KIRIŞI L=3000											
Kiriş Uz. (mm)	Profil Alanı (mm ²)	Faydalı Mesafe (mm)	FRP Uzunluğu (mm)	FRP Kalınlığı (mm)	FRP Genişliği (mm)	FRP Alanı (mm ²)	Oran (FRP A. / Profil A.)	SONUÇLAR			
								Toplam Yük (kN)	FRP'li Kiriş M _u (kNm)	FRP'siz Kiriş T.Yük - M _u (kN)-(kNm)	M _u Artışı %
3000	4590	900	2600 (%86.6)	1.60	100	160.0	3.5%	464.33	243773	392 - 205800	18%
				1.75	100	175.0	3.8%	474.12	248913		21%
				1.92	100	192.0	4.2%	484.49	254357		24%
				2.11	100	211.0	4.6%	493.18	258920		26%
				2.33	100	233.0	5.1%	505.86	265577		29%
				2.82	100	282.0	6.1%	534.81	280775		36%
				3.07	100	307.0	6.7%	548.8	288120		40%
				3.37	100	337.0	7.3%	564.02	296111		44%
				3.70	100	370.0	8.1%	578.2	303555		48%
				4.07	100	407.0	8.9%	590.47	309997		51%
				4.47	100	447.0	9.7%	558.97	293459		43%
				4.91	100	491.0	10.7%	494.31	259513		26%
5.40	100	540.0	11.8%	425.33	223298	9%					

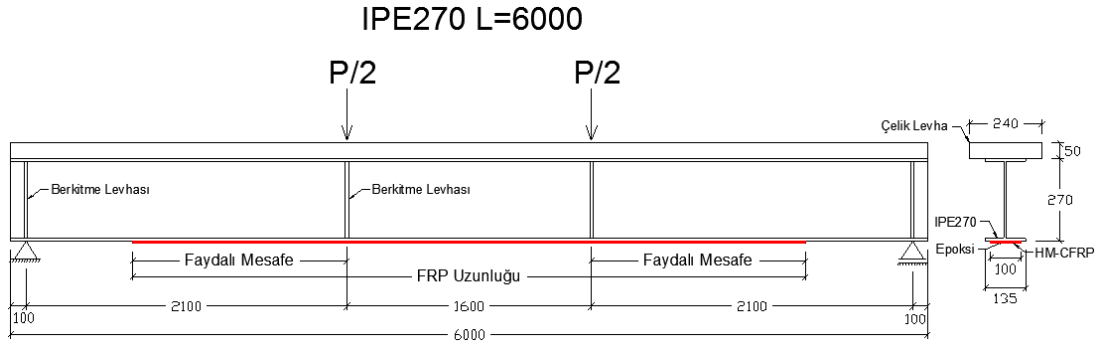
HM-CFRP oranının %8.9 değerine kadar dayanımda düzgün bir artış gözlenmektedir. HM-CFRP oranı'nın %9.7 değerinden itibaren, HM-CFRP kopma dayanımına ulaşmadan epoksi sıyrılması meydana gelmekte ve dayanımda yeterli artış olmamaktadır.

HM-CFRP oranı %8.9 için, IPE 270 L=3000mm kirişi yük-deplasman grafiği Şekil 5.15'de verilmiştir.



Şekil 5.15. IPE 270 L=3000mm kirişi HM-CFRP oranı %8.9 için yük-deplasman grafiği

IPE 270 profilinden oluşan kirişin 6000mm uzunluğundaki modelinin geometrik özellikleri Şekil 5.16'da verilmiştir.



Şekil 5.16. IPE 270 L=6000mm kirişi

IPE 270 profili 6000mm uzunluğundaki modellerde farklı HM-CFRP oranları için çözümler yapılmış ve kiriş dayanımındaki artışlar Tablo 5.10'da gösterilmiştir.

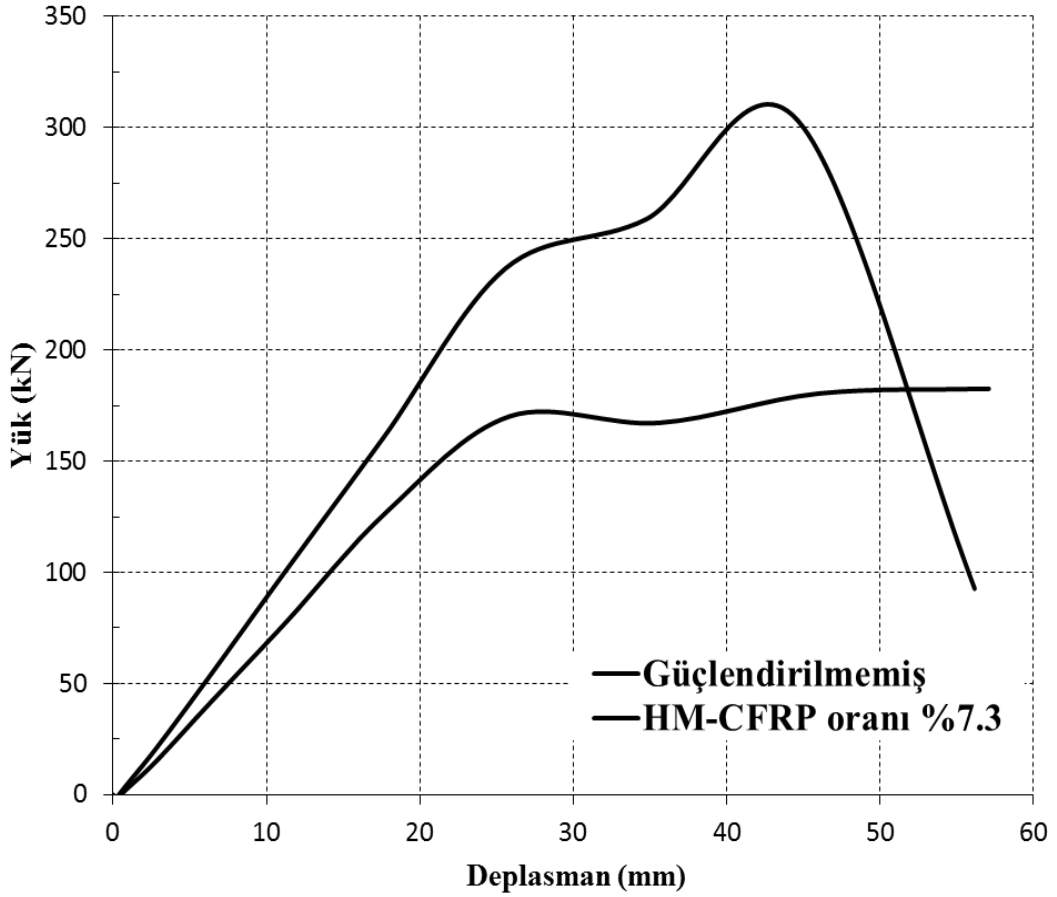
Tablo 5.10. IPE 270 L=6000mm kirişi HM-CFRP oranının kiriş dayanımına katkısı

IPE 270 KİRİŞİ L=6000											
Kiriş Uz. (mm)	Profil Alanı (mm ²)	Faydalı Mesafe (mm)	FRP Uzunluğu (mm)	FRP Kalınlığı (mm)	FRP Genişliği (mm)	FRP Alanı (mm ²)	Oran (FRP A. / Profil A.)	SONUÇLAR			
								Toplam Yük (kN)	FRP'li Kiriş M _u (kNm)	FRP'siz Kiriş T.Yük - M _u (kN)-(kNm)	M _u Artışı %
6000	4590	1800	5200 (%86.6)	1.60	100	160.0	3.5%	213.3	223965	196.6 - 206430	8%
				1.75	100	175.0	3.8%	217.57	228449		11%
				1.92	100	192.0	4.2%	222.35	233468		13%
				2.11	100	211.0	4.6%	227.4	238770		16%
				2.33	100	233.0	5.1%	233.23	244892		19%
				3.07	100	307.0	6.7%	293.99	308690		50%
				3.37	100	337.0	7.3%	303.41	318581		54%
				3.70	100	370.0	8.1%	269.45	282923		37%
				4.07	100	407.0	8.9%	269.45	282923		37%
				4.47	100	447.0	9.7%	284.78	299019		45%
				4.91	100	491.0	10.7%	294.42	309141		50%
				6.48	100	648.0	14.1%	279.88	293874		42%
				7.13	100	712.8	15.5%	287.98	302379		46%
8.55	100	855.0	18.6%	208.12	218526	6%					
10.26	100	1026.0	22.4%	222.14	233247	13%					

HM-CFRP oranının %5.1 değerine kadar düzgün bir dayanım artışı vardır. HM-CFRP oranının %6.7 değerinden itibaren dayanımda oransal olarak verimli bir artış gözlenmektedir.

HM-CFRP oranı'nın %7.3 değerine kadar kiriş dayanımında artış olurken, daha yüksek oranlarda HM-CFRP kopma dayanımına ulaşmadan epoksi sıyrılması meydana gelmekte ve dayanımda yeterli artış olmamaktadır.

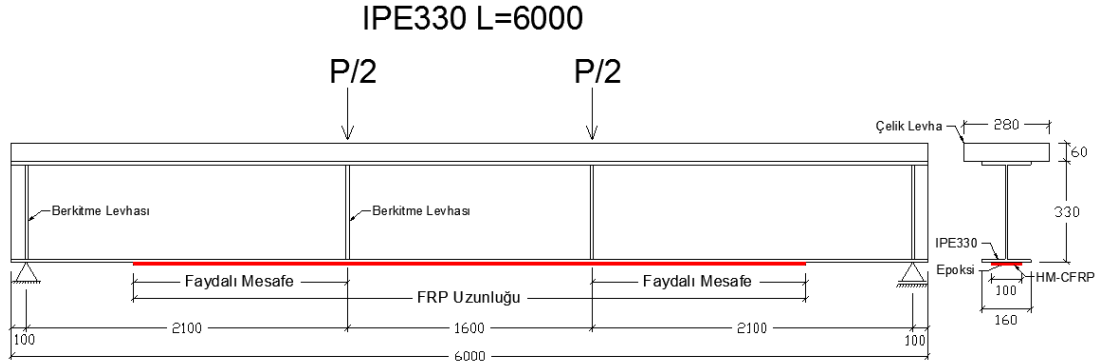
HM-CFRP oranı %7.3 için, IPE 270 L=6000mm kirişi yük-deplasman grafiği Şekil 5.17'de verilmiştir.



Şekil 5.17. IPE 270 L=6000mm kirişi HM-CFRP oranı %7.3 için yük-deplasman grafiği

5.2.5. IPE 330 kirişi

HM-CFRP oranının kiriş dayanımına katkısını incelemek için seçilen IPE 330 profilinden oluşan kirişin geometrik özellikleri Şekil 5.18’de verilmiştir.



Şekil 5.18. IPE 330 L=6000mm kirişi

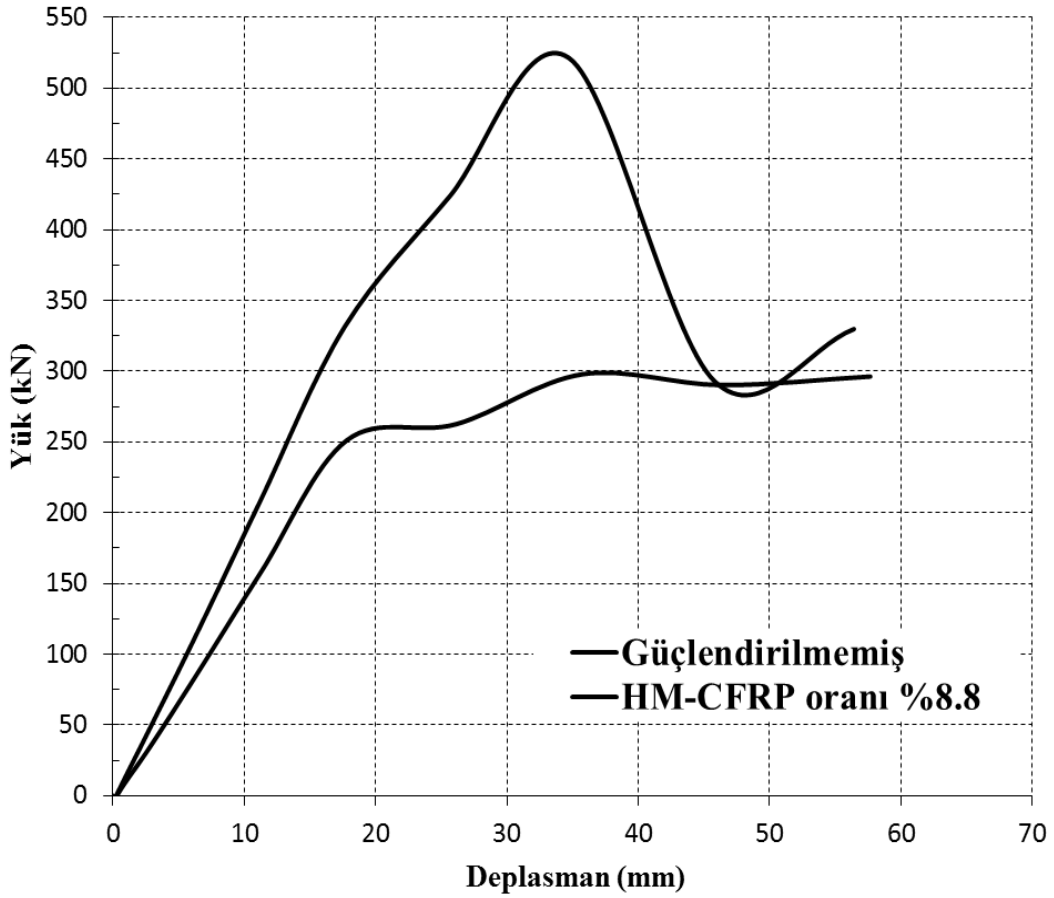
IPE 330 profilinden oluşan modellerde farklı HM-CFRP oranları için çözümler yapılmış ve kiriş dayanımındaki artışlar Tablo 5.11’de gösterilmiştir.

Tablo 5.11. IPE 330 L=6000mm kirişi HM-CFRP oranının kiriş dayanımına katkısı

IPE 330 KIRIŞI L=6000											
Kiriş Uz. (mm)	Profil Alanı (mm ²)	Faydalı Mesafe (mm)	FRP Uzunluğu (mm)	FRP Kalınlığı (mm)	FRP Genişliği (mm)	FRP Alanı (mm ²)	Oran (FRP A. / Profil A.)	SONUÇLAR			
								Toplam Yük (kN)	FRP'li Kiriş M _u (kNm)	FRP'siz Kiriş T.Yük - M _u (kN)-(kNm)	M _u Artışı %
6000	6260	1800	5200 (%86.6)	2.19	100	219.1	3.5%	402.66	422793	324.7 - 340935	24%
				2.38	100	238.0	3.8%	410.16	430668		26%
				2.63	100	263.0	4.2%	419.94	440937		29%
				2.90	100	290.0	4.6%	430.08	451584		32%
				3.19	100	318.6	5.1%	441.28	463344		36%
				4.19	100	419.4	6.7%	477.89	501785		47%
				4.41	100	441.3	7.0%	486.02	510321		50%
				5.00	100	500.0	8.0%	507.14	532497		56%
				5.50	100	550.0	8.8%	521.46	547533		61%
				6.07	100	607.0	9.7%	339.45	356423		5%
				6.69	100	669.0	10.7%	414.64	435372		28%
				7.32	100	732.0	11.7%	355.99	373790		10%
				8.82	100	882.0	14.1%	374.97	393719		15%
				9.70	100	970.0	15.5%	385.73	405017		19%
11.64	100	1164.0	18.6%	385.88	405174	19%					
14.00	100	1400.0	22.4%	Epoksi Sıyrılıyor	340935	0%					

HM-CFRP oranının %8.8 değerine kadar dayanımda düzgün bir artış gözlenmektedir. HM-CFRP oranı'nın %9.7 değerinden itibaren, HM-CFRP kopma dayanımına ulaşmadan epoksi sıyrılması meydana gelmekte ve dayanımda yeterli artış olmamaktadır.

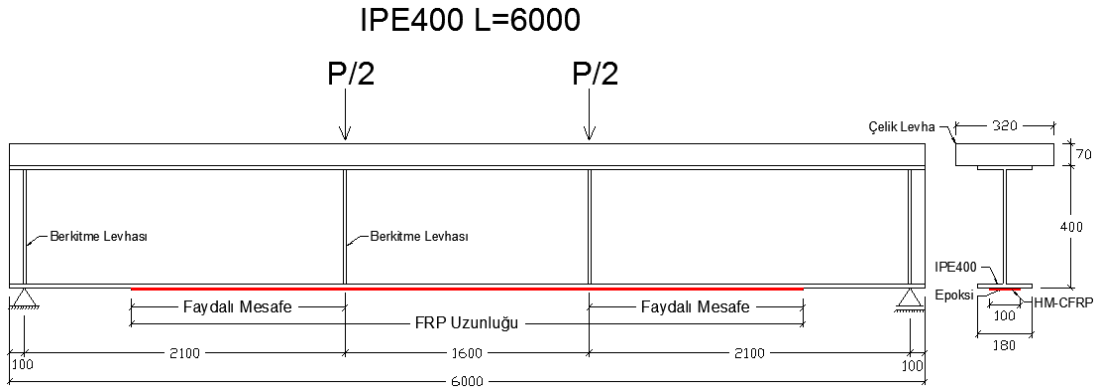
HM-CFRP oranı %8.8 için, IPE 330 L=6000mm kirişi yük-deplasman grafiği Şekil 5.19'da verilmiştir.



Şekil 5.19. IPE 330 L=6000mm kirişi HM-CFRP oranı %8.8 için yük-deplasman grafiği

5.2.6. IPE 400 kirişi

HM-CFRP oranının kiriş dayanımına katkısını incelemek için seçilen IPE 400 profilinden oluşan kirişin geometrik özellikleri Şekil 5.20’de verilmiştir.



Şekil 5.20. IPE 400 L=6000mm kirişi

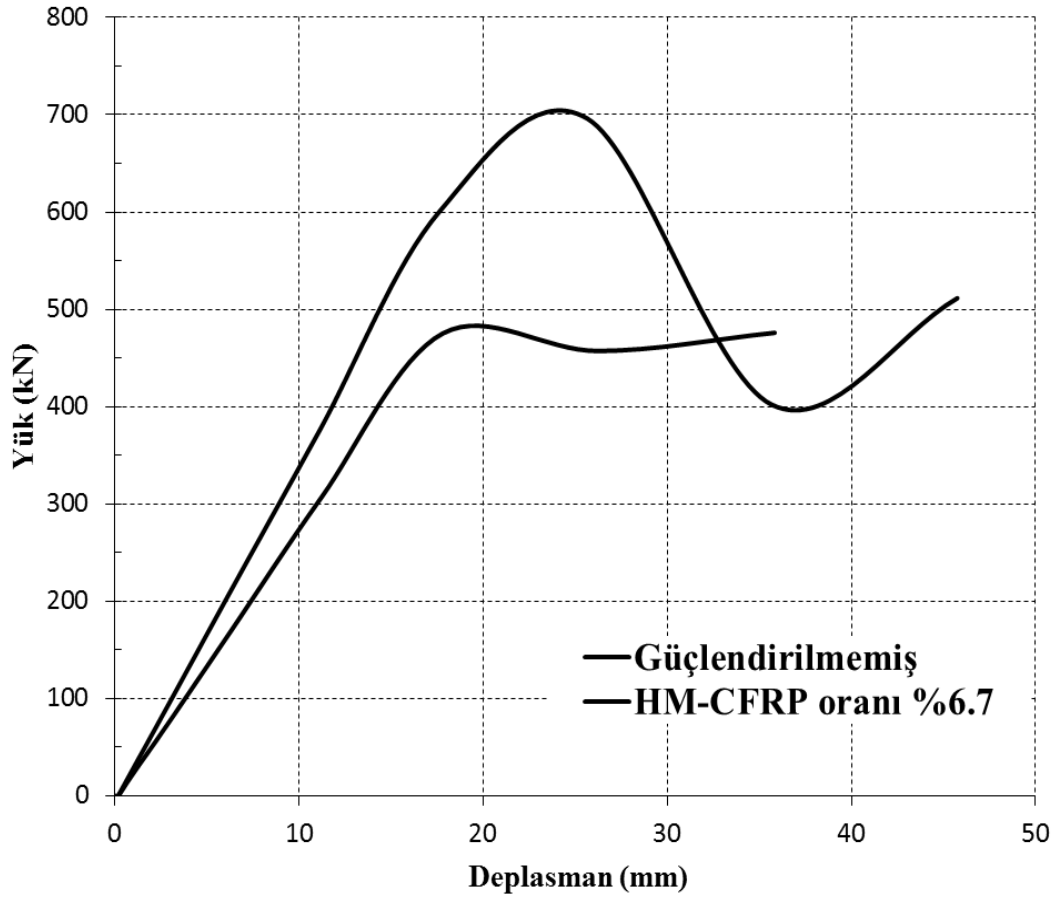
IPE 400 profilinden oluşan modellerde farklı HM-CFRP oranları için çözümler yapılmış ve kiriş dayanımındaki artışlar Tablo 5.12’de gösterilmiştir.

Tablo 5.12. IPE 400 L=6000mm kirişi HM-CFRP oranının kiriş dayanımına katkısı

IPE 400 KİRİŞİ L=6000											
Kiriş Uz. (mm)	Profil Alanı (mm ²)	Faydalı Mesafe (mm)	FRP Uzunluğu (mm)	FRP Kalınlığı (mm)	FRP Genişliği (mm)	FRP Alanı (mm ²)	Oran (FRP A. / Profil A.)	SONUÇLAR			
								Toplam Yük (kN)	FRP'li Kiriş M _u (kNmm)	FRP'siz Kiriş T.Yük - M _u (kN)-(kNmm)	M _u Artışı %
6000	8450	1800	5200 (%86.6)	2.96	100	295.7	3.5%	590.83	620372	530.8 - 557340	11%
				3.21	100	321.0	3.8%	601.43	631502		13%
				3.55	100	355.0	4.2%	615.62	646401		16%
				3.89	100	389.0	4.6%	590.83	620372		11%
				4.30	100	430.0	5.1%	645.22	677481		22%
				5.66	100	566.0	6.7%	696.33	731147		31%
				5.96	100	596.0	7.1%	606.13	636437		14%
				6.76	100	676.0	8.0%	620.54	651567		17%
				7.50	100	750.0	8.9%	633.57	665249		19%
				8.20	100	820.0	9.7%	645.55	677828		22%
				9.03	100	903.0	10.7%	652.64	685272		23%
				9.89	100	989.0	11.7%	Epoksi Sıyrılıyor	557340		0%
11.92	100	1192.0	14.1%	535.77	562559	1%					

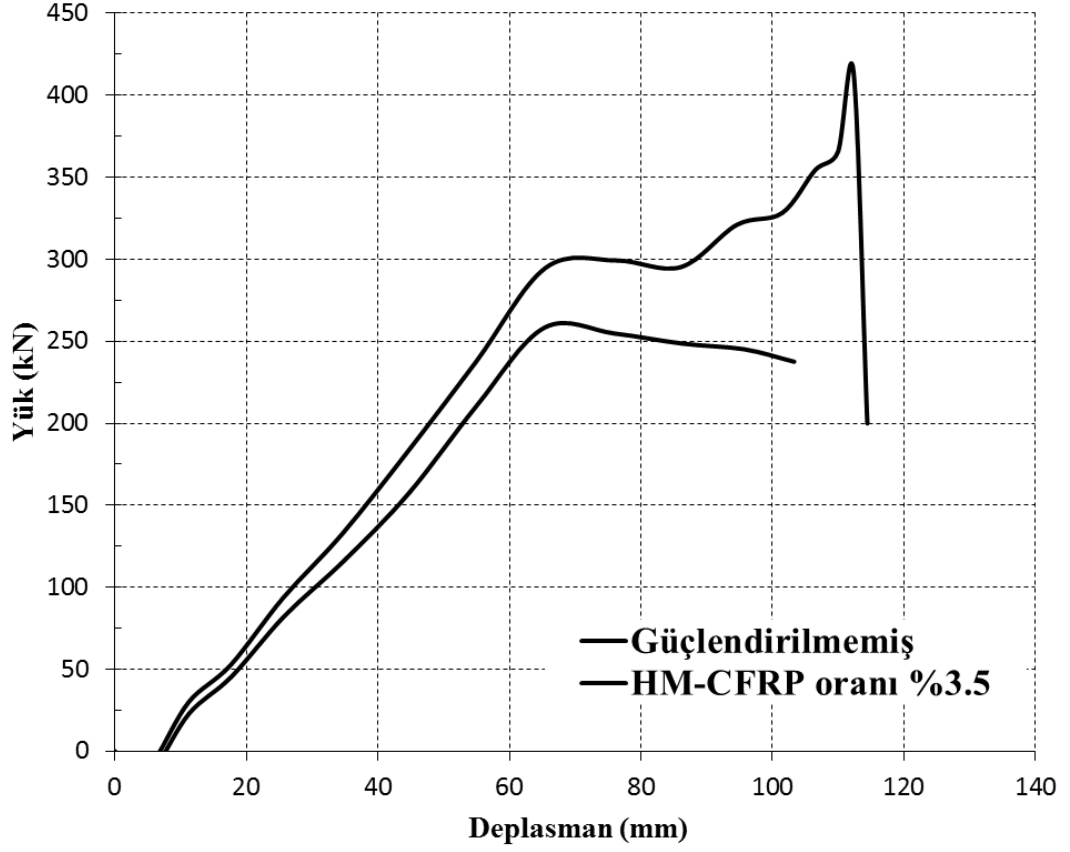
HM-CFRP oranının %6.7 değerine kadar dayanımda değişken bir artış gözlenmektedir. HM-CFRP oranı'nın %7.1 değerinden itibaren, HM-CFRP kopma dayanımına ulaşmadan epoksi sıyrılması meydana gelmekte ve dayanımda yeterli artış olmamaktadır.

HM-CFRP oranı %6.7 için, IPE 400 L=6000mm kiriş i yük-deplasman grafiği Şekil 5.21'de verilmiştir.



Şekil 5.21. IPE 400 L=6000mm kiriş i HM-CFRP oranı %6.7 için yük-deplasman grafiği

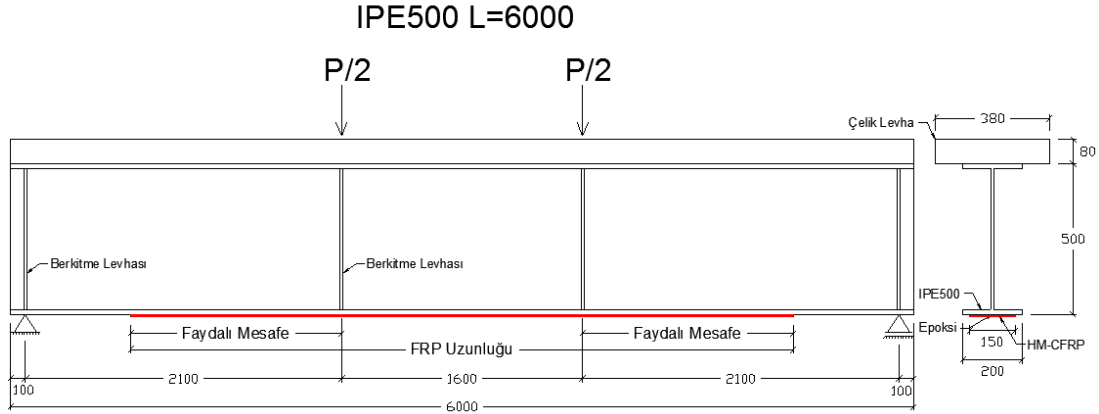
HM-CFRP oranı %3.5 için, IPE 400 L=12000mm kirişi yük-deplasman grafiği Şekil 5.23’de verilmiştir.



Şekil 5.23. IPE 400 L=12000mm kirişi HM-CFRP oranı %3.5 için yük-deplasman grafiği

5.2.7. IPE 500 kirişi

HM-CFRP oranının kiriş dayanımına katkısını incelemek için seçilen IPE 500 profilinden oluşan kirişin geometrik özellikleri Şekil 5.24’de verilmiştir.



Şekil 5.24. IPE 500 L=6000mm kirişi

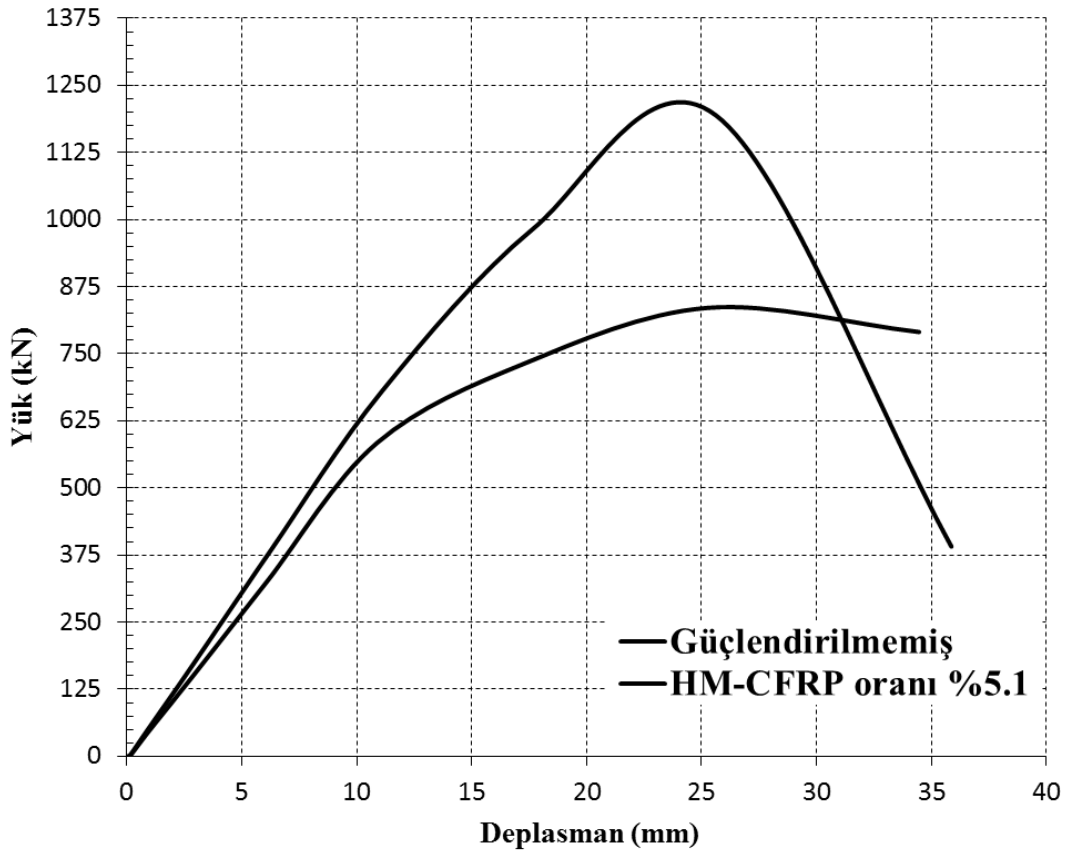
IPE 500 profilinden oluşan modellerde farklı HM-CFRP oranları için çözümler yapılmış ve kiriş dayanımındaki artışlar Tablo 5.14’de gösterilmiştir.

Tablo 5.14. IPE 500 L=6000mm kirişi HM-CFRP oranının kiriş dayanımına katkısı

IPE 500 KIRIŞI L=6000												
Kiriş Uz. (mm)	Profil Alanı (mm ²)	Faydalı Mesafe (mm)	FRP Uzunluğu (mm)	FRP Kalınlığı (mm)	FRP Genişliği (mm)	FRP Alanı (mm ²)	Oran (FRP A. / Profil A.)	SONUÇLAR				
								Toplam Yük (kN)	FRP'li Kiriş M _u (kNm)	FRP'siz Kiriş T.Yük - M _u (kN)-(kNm)	M _u Artışı %	
6000	11600	1800	5200 (%86.6)	2.71	150	406.5	3.5%	1101.49	1156565	860.5 - 903525	28%	
				2.94	150	441.0	3.8%	1199.85	1259843		39%	
				3.25	150	487.5	4.2%	1144.25	1201463		33%	
				3.56	150	534.0	4.6%	1167.15	1225508		36%	
				3.94	150	591.0	5.1%	1194.28	1253994		39%	
				5.18	150	777.0	6.7%	1051.11	1103666		22%	
				5.45	150	817.5	7.0%	1064.9	1118145		24%	
				6.19	150	928.5	8.0%	1101.9	1156995		28%	
				6.81	150	1020.8	8.8%	1130.64	1187172		31%	
				7.50	150	1125.0	9.7%	1027.38	1078749		19%	
				8.27	150	1240.5	10.7%	875.03	918782		2%	
				9.05	150	1357.2	11.7%	1004.55	1054778		17%	

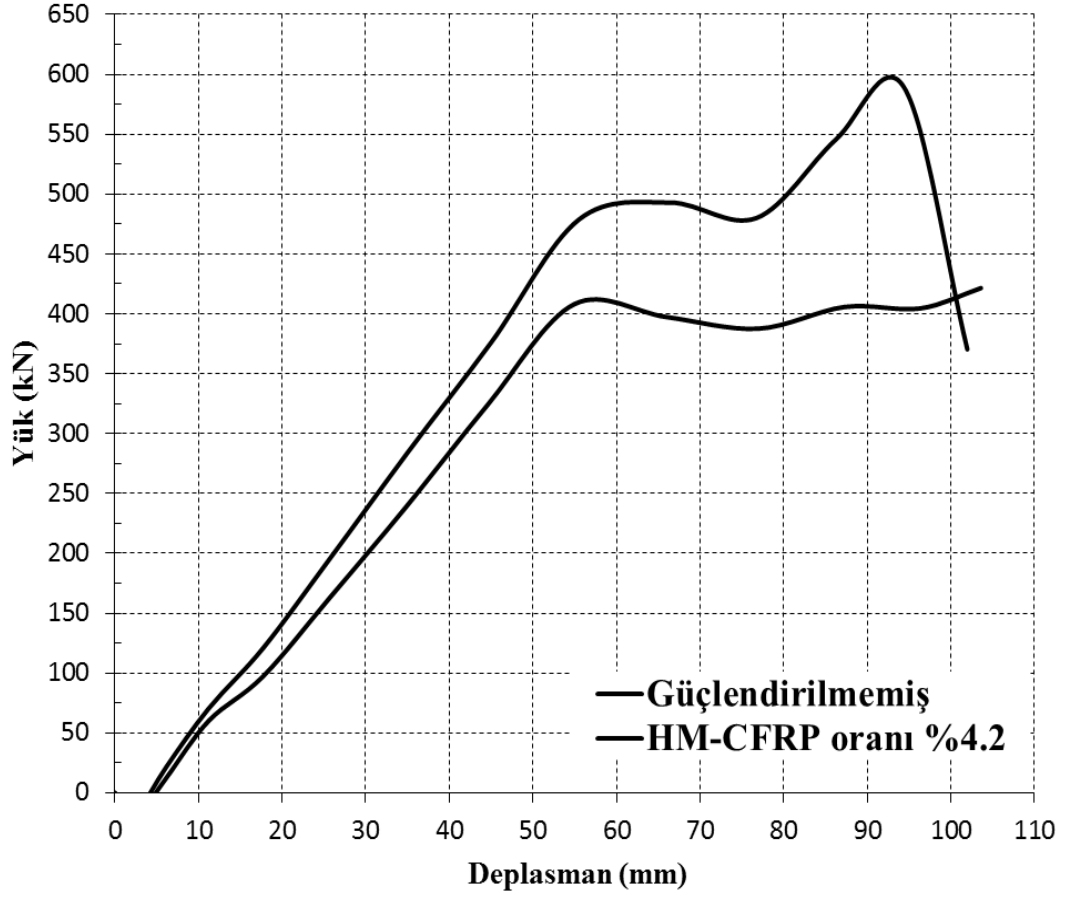
HM-CFRP oranının %5.1 değerine kadar dayanımda değişken bir artış gözlenmektedir. HM-CFRP oranı'nın %6.7 değerinden itibaren, HM-CFRP kopma dayanımına ulaşmadan epoksi sıyrılması meydana gelmekte ve dayanımda yeterli artış olmamaktadır.

HM-CFRP oranı %5.1 için, IPE 500 L=6000mm kirişi yük-deplasman grafiği Şekil 5.25'de verilmiştir.



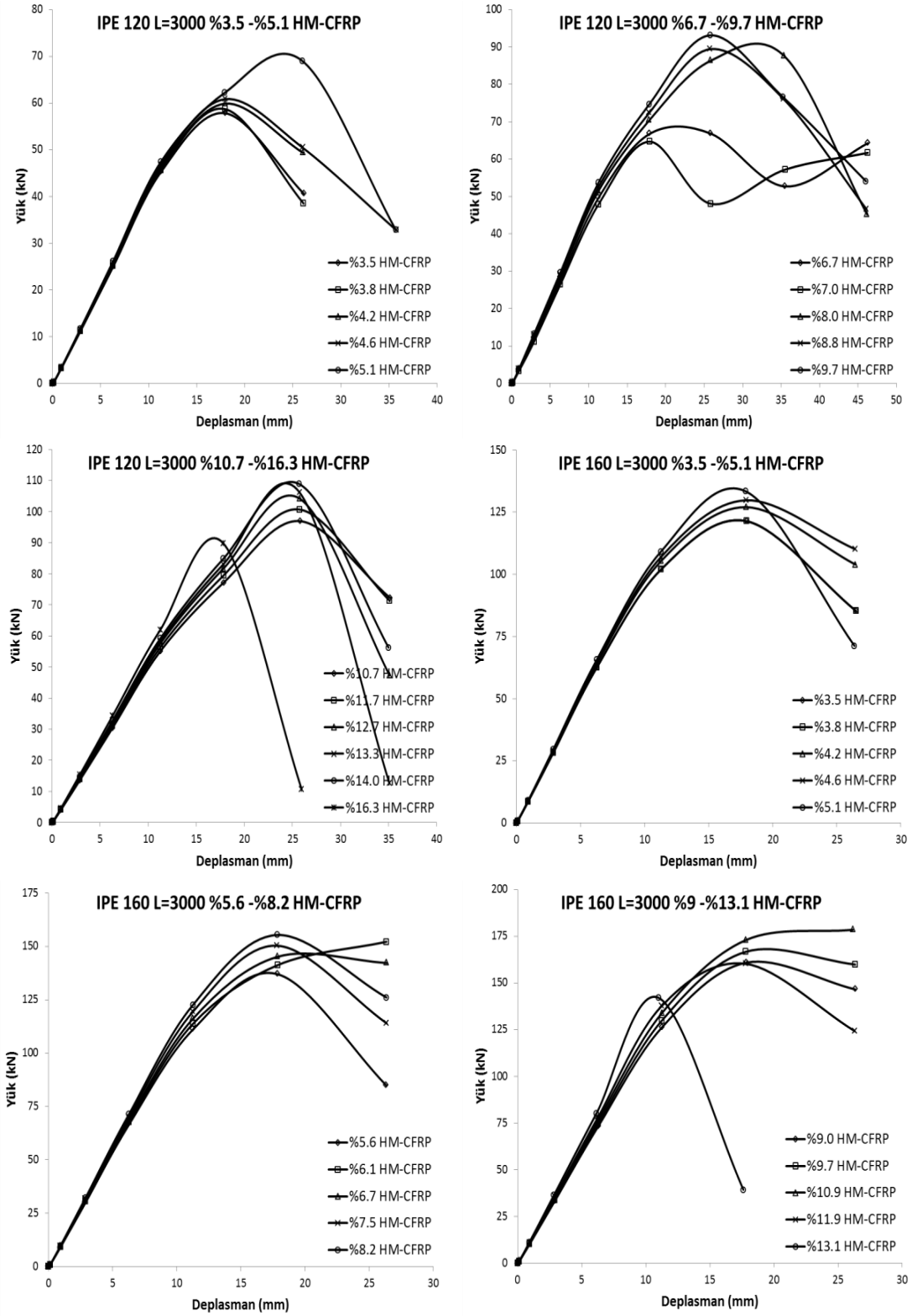
Şekil 5.25. IPE 500 L=6000mm kirişi HM-CFRP oranı %5.1 için yük-deplasman grafiği

HM-CFRP oranı %4.2 için, IPE 500 L=12000mm kirişi yük-deplasman grafiği Şekil 5.27'de verilmiştir.

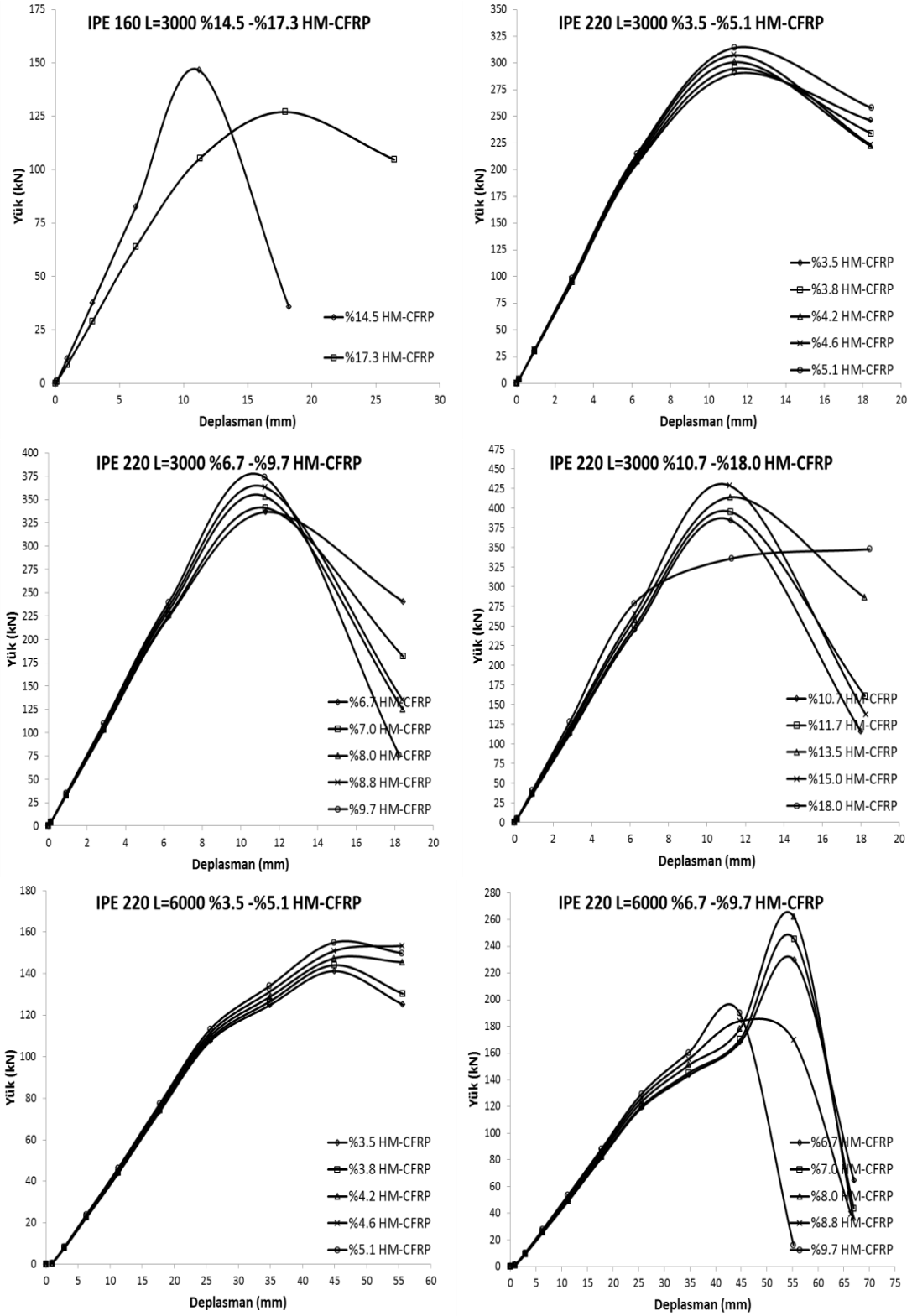


Şekil 5.27. IPE 500 L=12000mm kirişi HM-CFRP oranı %4.2 için yük-deplasman grafiği

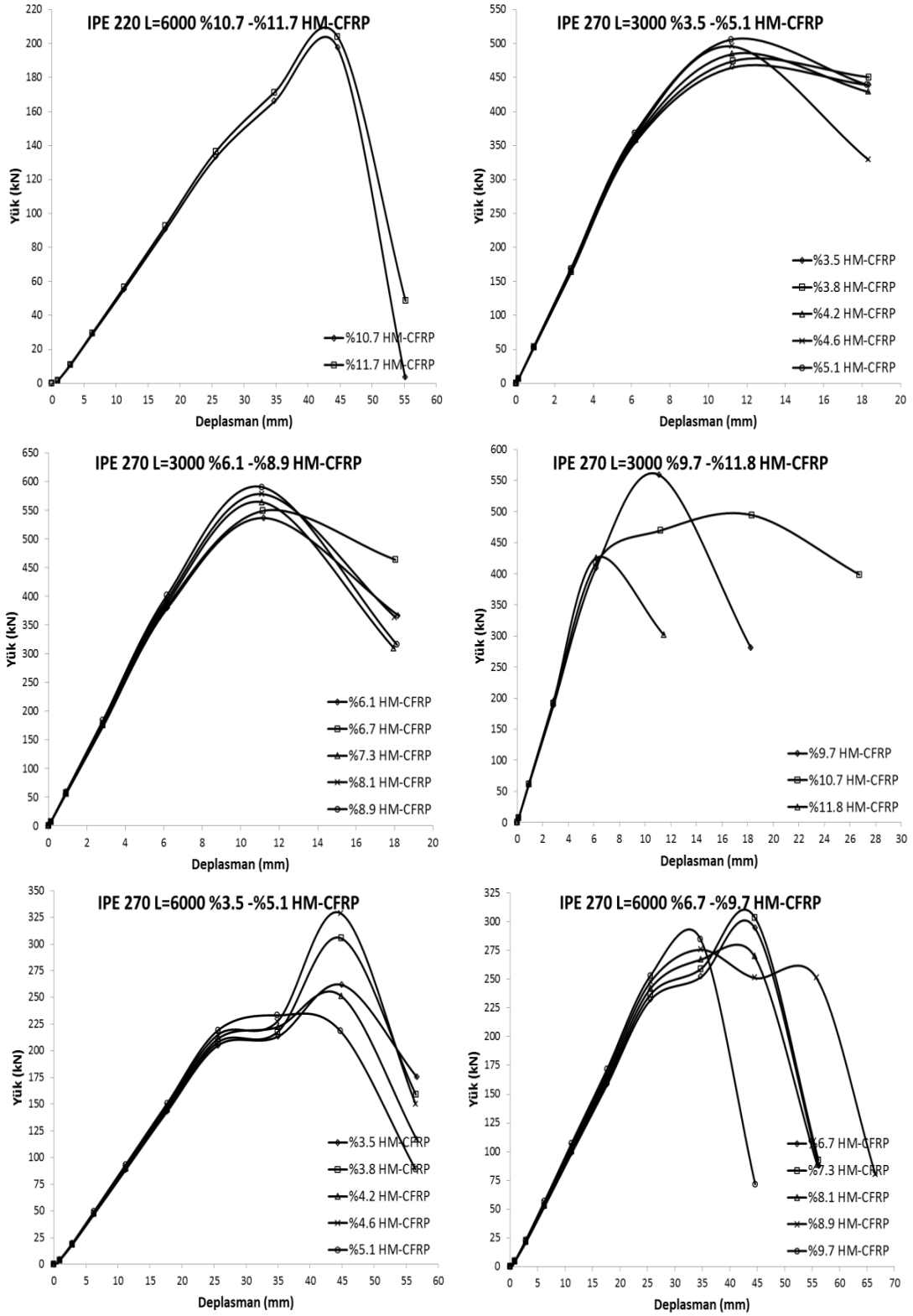
Aşağıdaki şekilde analizi yapılmış olan kirişlerin sonlu eleman çözümlerine ait yük-deplasman grafikleri verilmiştir (Şekil 5.28).



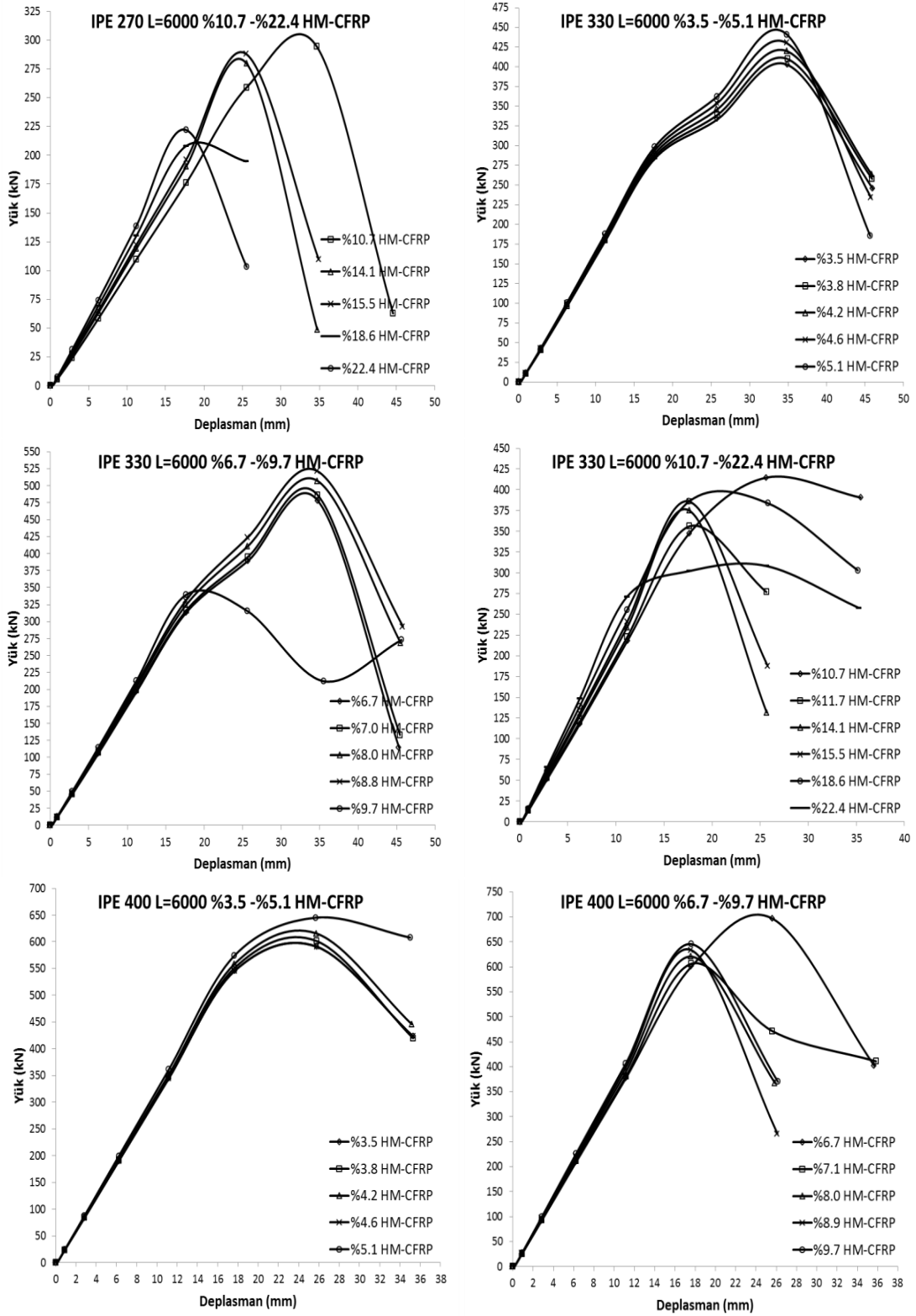
Şekil 5.28. IPE 120- IPE500 kirişlerinde faydalı mesafenin kiriş dayanımına katkı grafiği



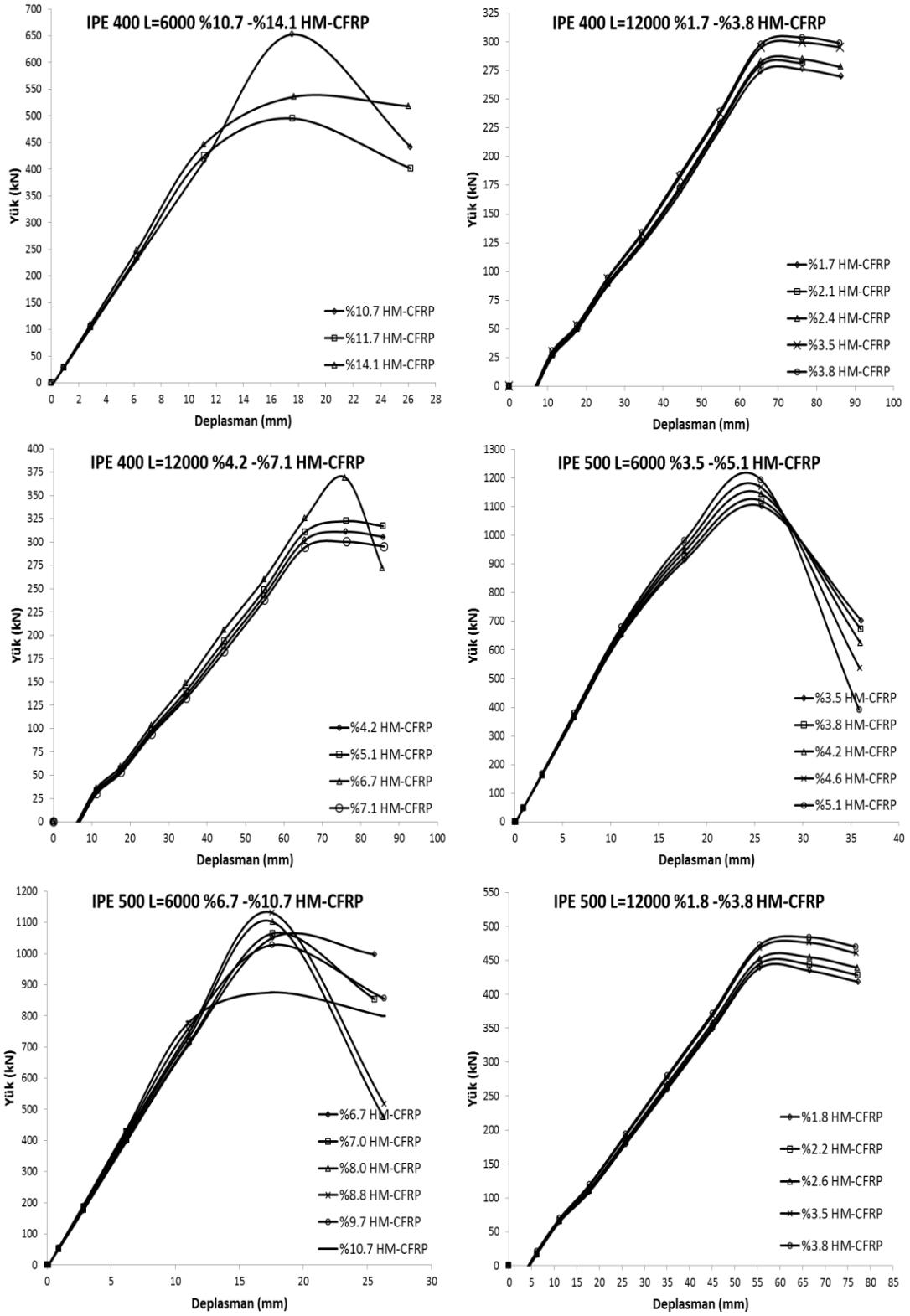
Şekil 5.28. IPE 120- IPE500 kirişlerinde faydalı mesafenin kiriş dayanımına katkı grafiği (devam)



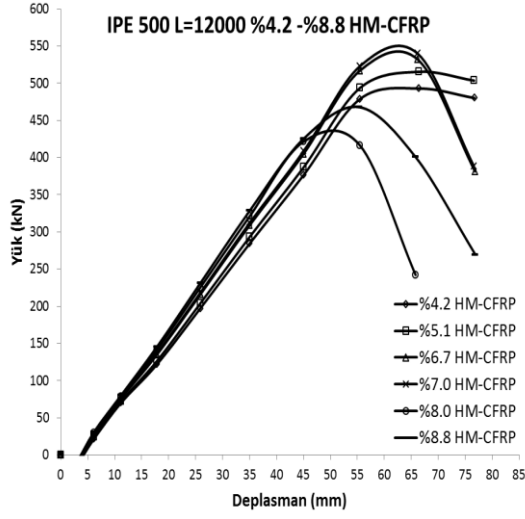
Şekil 5.28. IPE 120- IPE500 kirişlerinde faydalı mesafenin kiriş dayanımına katkı grafiği (devam)



Şekil 5.28. IPE 120- IPE500 kirişlerinde faydalı mesafenin kiriş dayanımına katkı grafiği (devam)



Şekil 5.28. IPE 120- IPE500 kirişlerinde faydalı mesafenin kiriş dayanımına katkı grafiği (devam)



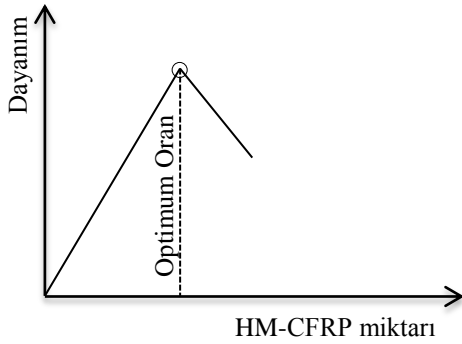
Şekil 5.28. IPE 120- IPE500 kirişlerinde faydalı mesafenin kiriş dayanımına katkı grafiği (devam)

BÖLÜM 6. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRMELER

HM-CFRP kopmadan önce epoksi sıyrılmasını önlemek için gerekli minimum faydalı mesafe, HM-CFRP oranları için farklı değerler almaktadır.

- HM-CFRP oranı'nın küçük değerlerinde (%3.5-%3.8) faydalı mesafe de küçük olmaktadır (FRP uzunluğu kiriş uzunluğunun %73'ü).
- IPE 160 L=3000mm kirişinde, HM-CFRP oranı'nın %4.2 ile %9 arasındaki değerlerinde, FRP uzunluğu kiriş uzunluğunun %84'ünden küçük olmamalıdır.
- IPE 270 L=3000mm kirişinde, HM-CFRP oranı'nın %4.2 ile %9 arasındaki değerlerinde, FRP uzunluğu kiriş uzunluğunun %87'sinden küçük olmamalıdır.
- IPE 160 L=3000mm kirişinde, HM-CFRP oranı 9.7% ile 10.9% için, FRP uzunluğu kiriş uzunluğunun %87'sinden küçük olmaması; HM-CFRP oranı 11.9% ile 13.1% için, FRP uzunluğu kiriş uzunluğunun %90'ından küçük olmaması koşuluyla dayanım artışı sağlanabilmektedir.
- IPE 160 L=3000mm kirişi için HM-CFRP oranı %14.5'den sonra faydalı mesafe yeterli uzunlukta olsa bile HM-CFRP kopma dayanımına ulaşmadan epoksi sıyrılması meydana gelmektedir.
- IPE 270 L=3000mm kirişi için HM-CFRP oranı %9.7'den sonra faydalı mesafe yeterli uzunlukta olsa bile HM-CFRP kopma dayanımına ulaşmadan epoksi sıyrılması meydana gelmektedir.

IPE 160 ve IPE 270’de faydalı mesafe 700 mm’ye kadar epoksi sıyrılması olmaktadır. HM-CFRP dayanıma ulaşmadan epoksi kopmaktadır. Kiriş davranışında epoksi etkili olmaktadır. Bunun sebebi ise yeterli bağlanma boyu olmamasıdır. Faydalı mesafe 700 mm’den sonra ise HM-CFRP kopması olmaktadır. Yeterli bağlanma boyu sağlandığında epoksi ve HM-CFRP beraber çalışarak kiriş dayanımını artırmaktadır. Ancak, dayanım artışı için kullanılacak HM-CFRP miktarı ve boyu hem ekonomik olarak, hem de verimlilik açısından değerlendirilerek optimum bir sınır değer kabul etmek gerekmektedir (Şekil 6.1).



Şekil 6.1 Optimum HM-CFRP miktar

IPE 160 profilinden oluşan modellerde, faydalı mesafenin 900mm değeri (FRP uzunluğu kiriş uzunluğunun %87’si) HM-CFRP oranının %11 değerine kadar yeterli olmaktadır. IPE 270 profilinden oluşan modellerde, faydalı mesafenin 900mm değeri (FRP uzunluğu kiriş uzunluğunun %87’si) HM-CFRP oranının %9 değerine kadar yeterli olmaktadır. Daha fazla oranda güçlendirme yapmak teorik olarak mümkün olsa bile pratik olarak mümkün değildir. Çünkü belirli kalınlığa kadar HM-CFRP üretilmektedir, daha fazla oranda güçlendirme yapmak için çok miktarda HM-CFRP’nin üst üste birbirine yapıştırılması gerekmektedir. Üst üste birbirine yapıştırılmış HM-CFRP’lerin verimli olup olamayacağı da bilinmemektedir.

Sonuç olarak, HM-CFRP oranının kiriş dayanımına etkisi incelenirken, kiriş boyu 3000mm için faydalı mesafe 900mm (FRP uzunluğu kiriş uzunluğunun %87’si) seçilmiştir. Epoksi sıyrılması olmaması için HMCFRP oranı kiriş uzunluğunun %73 den az olmamalıdır.

Belirli boylarda (3m, 6m,12m) IPE 120, 160, 220, 270, 330, 400, 500 profilleri ve basınç başlığı olarak çelik levhalardan oluşan kirişler, artan HM-CFRP oranlarında çekme başlığında güçlendirilerek dayanım artışları elde edilmiştir. Genel olarak belirli güçlendirme oranlarına kadar dayanımda düzgün veya değişken artışlar olmakta, bu değerlerden itibaren dayanım artışları azalmaktadır. Bunun nedeni, HM-CFRP kopma dayanımına ulaşmadan epoksi sıyrılmasının meydana gelmesidir. Bu durumda HM-CFRP'nin çalışabildiği oranda dayanım artışı olmaktadır. Kirişler için maksimum dayanım artışını sağlayan güçlendirme oranları Tablo 6.1'de özetlenmiştir.

Tablo 6.1. Maksimum dayanım artışlarını sağlayan güçlendirme oranları

Profil Tipi	Kiriş Boyu L (mm)	Kiriş Yüksekliği H (mm)	L/H Oranı	HM-CFRP Oranı	M_u Artışı
IPE 120	3000	150	20.00	14.0%	97%
IPE 160	3000	190	15.79	10.9%	67%
IPE 220	3000	270	11.11	15.0%	69%
	6000		22.22	8.0%	109%
IPE 270	3000	320	9.38	8.9%	51%
	6000		18.75	7.3%	54%
IPE 330	6000	390	15.38	8.8%	61%
IPE 400	6000	470	12.77	6.7%	31%
	12000		25.53	3.5%	62%
IPE 500	6000	580	10.34	5.1%	39%
	12000		20.69	4.2%	40%

Tablo 6.1'de görüldüğü gibi, L/H oranı büyük olan kirişlerde dayanım artışı kısa kirişlere nazaran daha yüksek olmaktadır. L/H oranı büyük olan kirişlerde daha küçük güçlendirme oranları için daha büyük dayanım artışları sağlanmaktadır.

HM-CFRP oranı'nın daha büyük değerlerinde, kiriş L/H oranı (kiriş uzunluğu / kiriş yüksekliği) önem kazanmaktadır. L/H oranı büyük olan kirişlerde, daha büyük faydalı mesafelerle daha yüksek oranda güçlendirme yapılabilirken, kısa kirişlerde belirli HM-CFRP oranı'nın üstünde faydalı mesafe ne olursa olsun yeterli dayanım

artışı sağlanamamaktadır. Aynı profil için, L/H oranı arttıkça yani kayma şekil değiştirmelerinin ihmal edildiği klasik kiriş davranışı kabullerine yaklaştıkça, kritik HMCFRP oranı azalmakta eğilme kapasitesinde artış olmaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] SCHNERCH, D., RIZKALLA S., Strengthening of scaled steel-concrete composite girders and steel monopole towers with CFRP, FRP Composites in Civil Engineering, ISBN 90 5809 638 6, United Kingdom, 2004.
- [2] RIZKALLA, S., DAWOOD, M., SCHNERCH, D., Development of carbon fiber reinforced polymer system for strengthening steel structures, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 388-397, United States, 2008.
- [3] SCHNERCH, D., STANFORD K., SUMNER, E.A., RIZKALLA, S., Bond behavior of CFRP strengthened steel bridges and structures, Proceeding of International Symposium on Bond Behavior of FRP in structures Hong Kong, China, 2005.
- [4] DAWOOD, M., RIZKALLA S., Bond and splice behavior of high modulus CFRP materials bonded to steel structures, Third International Conference on FRP composites in Civil Engineering Miami, Florida, USA, 2006.
- [5] SCHNERCH D., DAWOOD M., RIZKALLA, S., SUMNER, E.A., Proposed design guidelines for strengthening of steel bridges with FRP materials, Construct Build Mater, 21(5), 1001-1010, United States, 2007.
- [6] TAVAKKOLIZADEH, M., SAADATMANESHS, H., Repair of damaged steel-concrete composite girders using carbon fiber-reinforced polymer sheets, Journal of Composites for Constructions, 7(4), 311-322, 2003c.
- [7] ARIKAN M. Sahir A., Sonlu elemanlar metodunun mühendislikte uygulamaları, Orta Doğu Teknik Üniversitesi ders notları, 2010.
- [8] GARGIA, J.A., CHIMINELLI, A., LIZARANZU, M., JIMENEZ, M.A., Characterization and material model definition of toughened adhesives for finite element analysis, International Journal of Adhesion, 31(4), 182-192, 2010.
- [9] TAVAKKOLIZADEH, M., SAADATMANESHS, H., Strengthening of steel-concrete composite girders using carbon fiber reinforced polymer sheets, Journal of Structural Engineering, 129(2), 30-40, 2003a.
- [10] SEN, R., LARRY, L., and MULLINS, G., Strengthening steel bridge sections using CFRP laminates, Composites, Part B 32,309-322, USA,

2001.

- [11] DAWOOD, M., SCHNERCH, D., SUMNER, E.A., and RIZKALLA S., Strengthening steel bridges with new high modulus CFRP materials, International Conference on Bridge Maintenance Safety and Management, (IABMAS '06), Portugal, 2006.
- [12] AL-SAYDY, A.H., KLAIBER, A.H., WIPF, T.J., Repair of steel composite beams with carbon fiber reinforced polymer plates, Journal of Composites for Construction, 8, 163-172, Oman, 2004.
- [13] DAWOOD, M., SUMNER, E.A., RIZKALLA, S., Fundamental characteristics of new high modulus CFRP materials for strengthening steel bridges and structures, USA, 2006.
- [14] SCHNERCH, D., DAWOOD, M., EMMET A., RIZKALLA S., Strengthening steel-concrete composite bridges with high modulus carbon fiber reinforced polymer (CFRP) laminates, Composite in Construction Third International Conference, USA, 2005.
- [15] DAWOOD, M, RIZKALLA S, SUMNER, E.A., Fatigue and overloading behavior of steel-concrete composite flexural member strengthened with high modulus materials, J Compos Construct, 11(6), 659-69, 2007.
- [16] AL-SAYDY, A.H., KLAIBER, F.W., WIPF, T.J., Strengthening of steel-concrete composite girders using carbon fiber reinforced polymer plates, Construction and Building Materials, 21 (2), 295-302, 2007.
- [17] SCHNERCH, D., DAWOOD, M., SUMNER, E.A., RIZKALLA, S., Behavior of steel-concrete composite beams strengthened with unstressed and prestressed high-modulus CFRP strips.
- [18] MILLER, T. C., CHAJES, M. J., HASTING, J.N., Strengthening of a steel bridge girder using CFRP Plates, Bridge Engineering, 6(6), 514-522, 2001.
- [19] SCHNERCH, D., DAWOOD, M., RIZKALLA, S., Design guidelines for the use of HM strips; strengthening of steel-concrete composite bridges with high modulus carbon fiber reinforced polymer (CFRP) strips, Technical Report No, IS-06-02, North Carolina State University, 2005.
- [20] DAWOOD, M., RIZKALLA, S., SUMNER, E.A., Fundamental characteristics of high modulus CFRP materials for strengthening of steel-concrete composite beams, Proceedings for Structural Faults & Repair, Edinburgh, Scotland, 2006.
- [21] GLEN, S., TAREK, H., RIZKALLA, S., Bond characteristics and quantifications of adhesive form marine applications and steel pipe repair, Third International Conference on Construction Materials, Performance, Innovations and Structural Implications (ConMAT'05), Vancouver,

Canada, North Carolina State University, USA, 2005.

- [22] PRIC, A., MOULDS, R.J., Repair and strengthening of structures using plate bonding, *Construction and Building Materials*, 5(4),189-192, 1991.
- [23] AIELLO, M.A., SCIOLTI, S.M., Bond analysis of masonry structures strengthened with CFRP sheets, *Construction and Building Materials*, 20(1,2), 90-100, 2006.
- [24] SEICA, M.V., PACKER J.A., FRP materials for the rehabilitation of tubular steel structures for underwater applications, *Composite Structures*, 80(3), 440-450, 2007.
- [25] RIZKALLA, S., SUMNER, E.A., STANFORD, K., SCHNERCH, D., Strengthening steel structure and bridge with high modulus carbon fiber reinforced polymers, *Resin Selection and Monopole Behavior*, 2004.
- [26] TAVAKKOLIZADEH, M., SAADATMANESH, H., Galvanic corrosion of carbon and steel in aggressive environments, *Journal of Composites for Construction*, 5(3), 200-210, 2001.
- [27] ARDA, T., S., YARDIMCI, N, Çelik yapılarda karma elemanların plastik hesabı.
- [28] SCHNERCH, D., Strengthening of steel structure with high modulus carbon fiber reinforced polymer (CFRP) *Materials*, North Carolina State University, Ph.D., 2005.
- [29] TIRUPATHI, R.C., ASHOK, D.B., Introduction to finite elements in engineering, Prentice-Hall, Inc, 1991.
- [30] REDDY, J.N., An introduction to the finite element method, McGraw-Hill, Inc, 1993.
- [31] ABAQUS/Standard User's Manual, Version 6.9. Hibbitt, Karlson & Sorensen, Inc, Pawtucket, RI, 2008.
- [32] İNAN, M., Cisimlerin mukavemeti,1970, Ofset Matbaacılık Ltd. Şti.
- [33] YAMAN, Z., Zayıf Eksende eğilen çelik U kesitli profillerin plastic tasarım koşullarının irdelenmesi, Sakarya Üniversitesi, Doktora Tez, 2010.
- [34] Basf The Chemical Company Ürün Broşürü, Lifli Polimer (FRP) Güçlendirme Sistemleri.
- [35] DAWOOD, M., Fundamental behavior of steel-concrete composite beams strengthened with high modulus carbon fiber reinforced polymer (CFRP) materials, University of North Carolina State, Master Thesis, 2005.

- [36] THOMAS, S., EARLS, C.J., Cross-sectional compactness and bracing requirements for HPS483W girders, *Journal of Structural Engineering* American Society of Civil Engineers, 129(12), 1569-1583, 2003a.

ÖZGEÇMİŞ

Elif AĞCAKOCA, 29 Nisan 1978’de Sakarya Pamukova’da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Pamukova’da tamamladıktan sonra 1995 yılında Sakarya Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü’ne girdi ve 1999 yılında mezun oldu. 1999-2001 yılları arasında çeşitli şirketlerde İnşaat Mühendisi olarak çalıştı. 2001 yılında Sakarya Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Ana Bilim Dalı’nda Yüksek Lisans eğitimine başladı. 2004 yılında Yüksek Lisansını tamamlayarak Sakarya Üniversitesi’nde doktora eğitimine başladı. Evli ve bir erkek çocuk sahibi olan Elif AĞCAKOCA, halen Sakarya Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü’nde Araştırma Görevlisi olarak çalışmaktadır.