

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

**KARBON FİBER TAKVİYELİ POLİMER  
PLAKALARLA GÜÇLENDİRİLMİŞ BETONARME  
KİRİŞLERİN DOĞRUSAL OLMAYAN ANALİZİ**

**DOKTORA TEZİ**

**İnş. Yük. Müh. Necati MERT**

**Enstitü Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ**

**Enstitü Bilim Dalı : YAPI**

**Tez Danışmanı : Prof. Dr. Muzaffer ELMAS**

**Mayıs 2007**

T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KARBON FİBER TAKVİYELİ POLİMER PLAKALARLA  
GÜÇLENDİRİLMİŞ BETONARME KİRİŞLERİN  
DOĞRUSAL OLMAYAN ANALİZİ**

**DOKTORA TEZİ**

**İnş. Yük. Müh. Necati MERT**

**Enstitü Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ**

**Enstitü Bilim Dalı : YAPI**

**Bu tez 04/ 05 / 2007 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.**

**Prof. Adil ALTUNDAL**  
Jüri Başkanı

**Prof. Dr. Muzaffer ELMAS**  
Jüri Üyesi

**Prof. Dr. Mehmet Ali YALÇIN**  
Jüri Üyesi

**Yrd.Doç. Dr. Turan KARABÖRK**  
Jüri Üyesi

**Yrd.Doç. Dr. Mehmet Aydın KÖMÜR**  
Jüri Üyesi

## TEŞEKKÜR

Betonarme kirişlerin CFRP plakalar kullanılarak güçlendirilmesinin doğrusal olmayan analizi uygulamasını konu alan bu çalışmayı bana önererek, uzunca süren doktora tezi maratonumda sürekli destekleyen Sayın Prof. Dr. Muzaffer ELMAS' a şükran ve saygılarımı sunarım.

Bana mesleğimi sevdiren ve yetişmemde emeği geçen tüm öğretim elemanlarını saygıyla anar kendilerine minnettar olduğumu belirtmek isterim.

Betonarme kiriş modellerinin LUSAS Sonlu Elemanlar paket programında modellenmesinde ve çözümlenmesinde bilgi ve yardımlarını esirgemeyen Sayın. Yrd. Doç. Dr. Naci ÇAĞLAR' a , Yüksek Lisans öğrencisi Sn. Mahir MUTLU'ya ve çalışmalarım boyunca beni destekleyen tüm arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Necati MERT

Mayıs 2007

# İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR .....	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
SİMGELER VE KISALTMALAR .....	vii
ŞEKİLLER LİSTESİ .....	ix
TABLolar LİSTESİ.....	xxiii
ÖZET .....	xxv
SUMMARY .....	xxvi

## BÖLÜM 1.

GİRİŞ.....	1
1.1. Literatür Çalışması.....	1
1.2. Tezin Amaç ve Kapsamı .....	7

## BÖLÜM 2.

### KOMPOZİT MALZEMELER VE FİBER TAKVİYELİ

POLİMERLER(FRP).....	10
2.1. Kompozit Malzemeler.....	10
2.1.1. Kompozit malzemelerin sınıflandırılması.....	11
2.1.2. Kompozit malzemelerin genel avantajları ve dezavantajları...	12
2.2. Fiber Takviyeli Polimerler.....	14
2.2.1. Polimer matriksli kompozitler(PMK).....	14
2.3. Fiber Takviyeli Polimerlerin Üretim Yöntemleri.....	25
2.3.1. Elle yatırma (hand lay-up) yöntemi.....	25
2.3.2. Püskürtme (spray-up) yöntemi.....	26

2.3.3. Elyaf sarma (filament winding) yöntemi.....	26
2.3.4. Reçine transfer kalıplama RTM / reçine enjeksiyonu.....	27
2.3.5. Profil çekme / pultrüzyon (pultrusion) yöntemi.....	28
2.3.6. Hazır kalıplama (compression molding) yöntemi.....	28
2.3.7. Hazır kalıplama pestili -SMC (sheet moulding composites) ....	29
2.3.8. Hazır kalıplama hamuru - BMC (bulk moulding composites)...	30
2.3.9. Vakum bonding / vakum bagging yöntemi.....	30
2.3.10. Otoklav / autoclave bonding yöntemi.....	31
2.3.11. Preslenebilir takviyeli termoplastik/glass - (GMT) yöntemi....	31
2.4. İnşaat Mühendisliğinde FRP Uygulamaları.....	32
2.4.1. Kolon güçlendirilmesinde FRP kullanımı.....	32
2.4.2. Kiriş Güçlendirilmesinde FRP Kullanımı.....	34
2.4.3 Döşeme güçlendirilmesinde FRP kullanımı.....	35
2.4.4.Duvarlarda ve yığma yapılarda FRP kullanımı.....	36

### BÖLÜM 3.

CFRP PLAKALARLA BETONARME KİRİŞ GÜÇLENDİRMESİNDE KULLANILAN HESAP ADIMLARI VE KİRİŞLERİN YENİLME BİÇİMLERİ.....	39
3.1. Betonarme Kirişlerin Güçlendirilmesinde CFRP Plakalar Kullanarak Kirişlerin Eğilme Dayanımının Arttırılması.....	40
3.2. Betonarme Kirişlerin Güçlendirilmesinde CFRP Plakalar Kullanarak Kiriş Kesme Dayanımının Arttırılması.....	43
3.3. CFRP ile Güçlendirilen Betonarme Kirişlerin Yenilme(Göçme) Biçimlerinin Belirlenmesi.....	51
3.4. Yenilme(Göçme) Biçimlerinin Hesaplanması.....	53
3.5. FRP ile Güçlendirilmiş Betonarme Kirişin Maksimum Eğilme Gerilmesinin Bulunması.....	56

## BÖLÜM 4.

BETONARME YAPILARIN DOĞRUSAL OLMAYAN ANALİZİ.....	58
4.1. Yapı Sistemlerinin Dış Yükler Altında Doğrusal Olmayan Davranışı.....	58
4.2. Lineer Olmayan Sistemlerin Sayısal Çözüm Yöntemleri.....	59
4.2.1. Ardışık yaklaşım yöntemi.....	60
4.2.1.1. Başlangıç kiriş yöntemi.....	60
4.2.1.2. Başlangıç teğet yöntemi.....	60
4.2.1.3. Teğet yöntemi.....	61
4.2.1.4. Kiriş yöntemi.....	62
4.3. Lineer Olmayan Denklemlerin Çözümü için Newton-Raphson Yöntemi.....	62

## BÖLÜM 5.

SAYISAL UYGULAMA.....	65
5.1. Sayısal Analiz modelleri.....	65
5.1.1. A tipi kiriş modeli.....	70
5.1.1.1. A0 tipi sayısal kiriş modeli analiz sonuçları.....	73
5.1.1.2. A1 tipi sayısal kiriş modeli analiz sonuçları.....	78
5.1.1.3. A2 tipi sayısal kiriş modeli analiz sonuçları.....	82
5.1.1.4. A3 tipi sayısal kiriş modeli analiz sonuçları.....	86
5.1.2. B tipi sayısal kiriş modeli.....	90
5.1.2.1. B0 tipi sayısal kiriş modeli analiz sonuçları.....	91
5.1.2.2. B1 tipi sayısal kiriş modeli analiz sonuçları.....	96
5.1.2.3. B2 tipi sayısal kiriş modeli analiz sonuçları.....	100
5.1.2.4. B3 tipi sayısal kiriş modeli analiz sonuçları.....	104
5.1.3. C tipi sayısal kiriş modeli.....	108
5.1.3.1. C0 tipi sayısal kiriş modeli analiz sonuçları.....	109
5.1.3.2. C1 tipi sayısal kiriş modeli analiz sonuçları.....	113
5.1.3.3. C2 tipi sayısal kiriş modeli analiz sonuçları.....	117
5.1.3.4. C3 tipi sayısal kiriş modeli analiz sonuçları.....	121

5.1.4. D tipi sayısal giriş modeli.....	125
5.1.4.1. D0 tipi sayısal giriş modeli analiz sonuçları.....	126
5.1.4.2. D1 tipi sayısal giriş modeli analiz sonuçları.....	130
5.1.4.3. D2 Tipi sayısal giriş modeli analiz sonuçları.....	134
5.1.4.4. D3 Tipi sayısal giriş modeli analiz sonuçları.....	138
5.2. Sayısal Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması.....	142
5.2.1. A tipi sayısal giriş modelleri analiz sonuçlarının karşılaştırılması.....	142
5.2.2. B tipi sayısal giriş modelleri analiz sonuçlarının karşılaştırılması.....	149
5.2.3. C tipi sayısal giriş modelleri analiz sonuçlarının karşılaştırılması.....	154
5.2.4. D tipi sayısal giriş modelleri analiz sonuçlarının karşılaştırılması.....	155
BÖLÜM 6.	
SONUÇ VE DEĞERLENDİRMELER.....	157
6.1 Sayısal Analiz Modeli Sonuçları İle Deneysel Sonuçların Karşılaştırılması.....	157
6.2. Sonuçlar ve Yorumlar.....	161
6.3. Genel Değerlendirmeler.....	163
6.4 Gelecekte Yapılabilecek Çalışmalar.....	164
KAYNAKLAR.....	165
EK.....	169
ÖZGEÇMİŞ.....	186

## SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

CFRP	: Karbon fiber takviyeli polimer
$M_r$	: Betonarme kiriş taşıma momenti
$M_u$	: Betonarme kiriş akma momenti
$\rho_s$	: Betonarme kiriş çekme donatısı oranı
$\rho'_s$	: Betonarme kiriş basınç donatısı oranı
$h$	: Kiriş yüksekliği
$d$	: Faydalı kiriş yüksekliği
$b, b_w$	: Kiriş gövde genişliği
$h$	: Kiriş Yüksekliği
$d_c$	: Kritik basınç derinliği
$\alpha_1$	: Maksimum basınç gerilmesi altındaki dikdörtgen basınç bloğundaki üniform gerilme oranı
$\beta_1$	: tarafsız eksen yüksekliğine göre dikdörtgen basınç bloğundaki derinlik oranı
$f_{fd}$	: CFRP' nin dizayn akma eğilme gerilmesi
$\epsilon_{fu}$	: CFRP' nin dizayn kopma uzaması
$\epsilon_{bi}$	: Kiriş alt tabakasındaki mevcut uzama miktarı
$\epsilon_{fe}$	: CFRP deki etkili zorlanma
$\epsilon_{c0}$	: Betonda maksimum gerilmeye uygun zorlanma değeri
$\alpha$	: Temel Gerilme faktörü
$\rho_{fb}$	: Dengeli Plaka Oranı
$k_m$	: Ayrışma faktör değeri
$c/d$	: nötral aks derinlik oranı
$\rho_{fmax}$	: İzin verilen maksimum CFRP oranı
$\rho_f$	: Plaka Oranı
$\rho_{bb}$	: Dengeli plaka oranı



$k_2$	: Nötral aks derinlik katsayısı
$\rho_{f,cf}$	: Kritik plaka oranı
$V_n$	: FRP ile güçlendirilmiş kirişlerin kesme gerilmesi değeri
$V_c$	: Beton tarafından karşılanan kesme gerilmesi değeri
$V_s$	: Donatı tarafından karşılanan kesme gerilmesi değeri
$V_{frp}$	: FRP tarafından karşılanan kesme gerilmesi değeri
$h_{frp,e}$	: FRP'nin etkili yüksekliği
$z_b$	: Etkili FRP'nin giriş alt noktasına göre koordinatları
$z_t$	: Etkili FRP'nin giriş üst noktasına göre koordinatları
$d_{frp,t}$	: FRP'nin en üst kenarından beton basınç yüzeyi arasındaki mesafesi
$d_{frp}$	: FRP en alt kenarından beton basınç yüzeyi arasındaki mesafesi
$f_{frp,e}$	: Son limit durum için etkili yada ortalama gerilme değeri
$D_{frp}$	: Gerilme dağıtım faktörü
$\sigma_{frp,max}$	: FRP'deki maksimum gerilme değeri
$L_{max}$	: Maksimum yapışma uzunluğu
$\lambda$	: Normalize edilmiş maksimum yapışma uzunluğu
$L_e$	: Etkili yapışma uzunluğu
$\gamma_b$	: Kısmi güvenlik faktörü
$f_{frp,ed}$	: FRP'deki dizayn etkili gerilmesi
$\sigma_{frp,max,d}$	: FRP'deki maksimum dizayn gerilmesi
$E_{frp}$	: FRP malzemesinin Elastisite Modülü
$E_C$	: Beton Elastisite modülü
$t_{frp}$	: FRP malzemesinin kalınlığı
$\beta_L$	: Yapışma uzunluğu etkisi
$\beta_w$	: Kesme gerilmesi etkisi
$b_{frp}/b_c$	: FRP ile beton genişliği oranı
$A_f$	: FRP kesit alanı
$A_{f min}$	: FRP minimum kesit alanı
$A_{f max}$	: FRP maksimum kesit alanı

## ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1	Farklı türden fiber takviyeli polimerlerin gerilme_uzama oranı grafiği.....	22
Şekil 2.2.	FRP üretim yöntemlerinden elle yatırma yöntemi uygulaması.....	26
Şekil 2.3.	Püskürtme yöntemi ve püskürtme tabancası.....	26
Şekil 2.4.	Elyaf sarma makinası.....	27
Şekil 2.5.	RTM yöntemi.....	28
Şekil 2.6.	Profil çekme yöntemi ile FRP üretilmesi.....	29
Şekil 2.7.	Vakum bagging yöntemi.....	31
Şekil 2.8.	Hasarlı kolonların FRP ile güçlendirilmesi.....	32
Şekil 2.9.	FRP sargılama örnekleri.....	34
Şekil 2.10.	Kirişlerde kesmeye karşı U şeklinde dilimler halinde FRP uygulaması.....	35
Şekil 2.11.	Döşemelerde FRP laminat uygulaması.....	36
Şekil 2.12.	FRP Kumaşların duvarlarda kullanımı.....	37
Şekil 2.13.	Eski tarihi binaların restorasyon yada güçlendirilmesinde FRP kullanımı.....	38
Şekil 2.14.	Taş yapılarda FRP uygulaması.....	38
Şekil 3.1.	Kiriş kesitinde meydana gelen gerilme, zorlanma ve kuvvet diyagramları.....	40
Şekil 3.2.	Kesme dayanımı güçlendirilmesine ait genel notasyon şeması.....	43
Şekil 3.3.	B tipi betonarme kiriş modeli ve kesiti.....	47
Şekil 3.4.	1.Yenilme(Göçme) biçiminin ait çatlama mekanizması örneği.....	51
Şekil 3. 5.	2.Yenilme biçimi için oluşum mekanizması örneği.....	52
Şekil 3 6.	3.Yenilme biçimi için oluşum mekanizması örneği.....	52

Şekil 3.7.	4. Yenilme biçimi için oluşum mekanizması örneği.....	52
Şekil 3.8.	5. Yenilme biçimi için oluşum mekanizması örneği.....	53
Şekil 3.9.	CFRP' li Betonarme kiriş kesiti ve etkiyen kuvvetler.....	53
Şekil 4.1.	Çeşitli teorilere göre elde edilen Yük Parametreleri-Yer değiştirme(P-Δ) grafiği.....	58
Şekil 4.2	Başlangıç kiriş yöntemi.....	60
Şekil 4.3.	Başlangıç teğet yöntemi.....	61
Şekil 4.4.	Teğet yöntemi.....	62
Şekil 4.5.	Kiriş Yöntemi.....	62
Şekil.4.6.	Newton- Raphson ardışık yaklaşım yöntemi.....	64
Şekil5.1.	Doğrusal olmayan analiz için hazırlanan sayısal kiriş modelleri.....	65
Şekil 5.2.1	Bar3 Element için Gerilme ve zorlanma bileşenleri.....	66
Şekil 5.2.2	Bar3 element için lokal kartezyen sistemi.....	66
Şekil.5.3.	QPM8 element yapısı.....	67
Şekil5.4.	Çok Çatlaklı Beton Modeli (Multi-Crack Concrete Model-Model 82) için gerilme_zorlanma değişimi.....	67
Şekil5.5	Düzlem çatlama için bölgesel koordinat sistemi.....	68
Şekil.5.6.	Lusas Paket programında lineer olmayan analiz için girilen veriler.	69
Şekil 5.7.	A tipi betonarme kiriş modelinin en ve boy kesiti.....	70
Şekil.5.8.	A1 tipi kiriş için sayısal analiz modeli kesiti.....	70
Şekil 5.9.	Kiriş betonun gerilme-zorlanma diyagramı.....	71
Şekil 5.10.	Donatı çeliğinin gerilme-zorlanma diyagramı.....	71
Şekil 5.11.	A0 tipi sayısal kiriş modeline ait Sonlu Elamanlar Ağı.....	73
Şekil5.12.	A0 tipi sayısal kiriş modelinde doğrusal olmayan analiz sonucunda oluşan normal gerilme ( $\sigma_x$ ) gerilmesi dağılımı.....	73
Şekil5.13.	A0 tipi sayısal kiriş modelinde meydana gelen birim zorlanma( $\epsilon_x$ ) değerleri değişimi.....	74
Şekil5.14.	A0 tipi sayısal kiriş modelinde doğrusal olmayan analiz sonucunda oluşan çatlak mekanizması.....	74

Şekil 5.15.	A0 tipi sayısal kiriş modeline P=100 KN'luk tekil yükleme sonucunda oluşan Yük Artımı-deplasman grafiği.....	75
Şekil 5.16.	A0 tipi sayısal kiriş modeli için tekil yük altında kiriş yüksekliği boyunca oluşan Normal Gerilme ( $\sigma_x$ ) diyagramı.....	75
Şekil 5.17.	A0 tipi sayısal kiriş modeli için tekil yük altında kiriş yüksekliği boyunca oluşan Normal Gerilme ( $\sigma_y$ ) değişimi.....	76
Şekil 5.18.	A0 tipi sayısal kiriş modeli için tekil yük altında kiriş yüksekliği boyunca oluşan Kayma Gerilmesi $\tau_{xy}$ değişimi.....	76
Şekil 5.19.1	A0 tipi sayısal kiriş modeli için mesnetten itibaren kiriş yüzeyi boyunca oluşan kayma gerilmesi ( $\sigma_x$ ) diyagramı.....	77
Şekil 5.19.2	A0 tipi sayısal kiriş modeli için mesnetten itibaren kiriş yüzeyi boyunca oluşan kayma gerilmesi ( $\tau_{xy}$ ) diyagramı.....	77
Şekil 5.20.	A1 tipi sayısal kiriş modelinde doğrusal olmayan analiz sonucunda oluşan normal gerilme ( $\sigma_x$ ) gerilmesi dağılımı ve güçlendirme bölgesi detayı.....	78
Şekil 5.21.	A1 tipi sayısal kiriş modelinde meydana gelen birim zorlanma( $\epsilon_x$ ) değerleri değişimi.....	78
Şekil 5.22.	A1 tipi sayısal kiriş modelinde doğrusal olmayan analiz sonucunda oluşan çatlak mekanizması.....	79
Şekil 5.23.	A1 tipi sayısal kiriş modeline P=100 KN'luk tekil yükleme sonucunda oluşan Yük Artımı-deplasman grafiği.....	79
Şekil 5.24.	A1 tipi sayısal kiriş modeli için tekil yük altında kiriş yüksekliği boyunca oluşan Normal Gerilme ( $\sigma_x$ ) değişimi.....	80
Şekil 5.25.	A1 tipi sayısal kiriş modeli için tekil yük altında kiriş yüksekliği boyunca oluşan Normal Gerilme ( $\sigma_y$ ) değişimi.....	80
Şekil.5.26.	A1 tipi sayısal kiriş modeli için mesnetten itibaren kiriş yüzeyi boyunca oluşan kayma gerilmesi ( $\tau_{xy}$ ) diyagramı.....	81
Şekil 5.27.1	A1 sayısal kiriş modelinde mesnet noktası ile CFRP yüzeyi boyunca oluşan kayma gerilmesi ( $\sigma_x$ ) değişimi.....	81

Şekil 5.27.2	A1 sayısal kiriş modelinde mesnet noktası ile CFRP yüzeyi boyunca oluşan kayma gerilmesi ( $\tau_{xy}$ ) değişimi.....	82
Şekil 5.28.	A2 tipi sayısal kiriş modelinde doğrusal olmayan analiz sonucunda oluşan normal gerilme ( $\sigma_x$ ) gerilmesi dağılımı ve güçlendirme bölgesi detayı.....	82
Şekil 5.29.	A2 tipi sayısal kiriş modelinde meydana gelen birim zorlanma( $\epsilon_x$ ) değerleri değişimi.....	83
Şekil 5.30.	A2 tipi sayısal kiriş modelinde doğrusal olmayan analiz sonucunda oluşan çatlak mekanizması.....	83
Şekil 5.31.	A2 tipi sayısal kiriş modeline P=100 KN'luk tekil yükleme sonucunda oluşan Yük Artımı-deplasman grafiği.....	84
Şekil 5.32.	A2 tipi sayısal kiriş modeli için tekil yük altında kiriş yüksekliği boyunca oluşan Normal Gerilme ( $\sigma_x$ ) değişimi.....	85
Şekil 5.33.	A2 tipi sayısal kiriş modeli için tekil yük altında kiriş yüksekliği boyunca oluşan Normal Gerilme ( $\sigma_y$ ) değişimi.....	85
Şekil.5.34.	A2 tipi sayısal kiriş modeli için mesnetten itibaren kiriş yüzeyi boyunca oluşan kayma gerilmesi ( $\tau_{xy}$ ) diyagramı.....	85
Şekil 5.35.1	A2 sayısal kiriş modelinde mesnet noktası ile CFRP yüzeyi boyunca oluşan kayma gerilmesi ( $\sigma_x$ ) değişimi.....	86
Şekil 5.35.2	A2 sayısal kiriş modelinde mesnet noktası ile CFRP yüzeyi boyunca oluşan kayma gerilmesi ( $\tau_{xy}$ ) değişimi.....	86
Şekil 5.36.	A3 tipi sayısal kiriş modelinde doğrusal olmayan analiz sonucunda oluşan normal gerilme ( $\sigma_x$ ) gerilmesi dağılımı ve güçlendirme bölgesi detayı.....	86
Şekil 5.37.	A3 tipi sayısal kiriş modelinde meydana gelen birim zorlanma( $\epsilon_x$ ) değerleri değişimi.....	87
Şekil 5.38.	A3 tipi sayısal kiriş modelinde doğrusal olmayan analiz sonucunda oluşan çatlak mekanizması.....	87
Şekil 5.39.	A3 tipi sayısal kiriş modeline P=100 KN'luk tekil yükleme sonucunda oluşan yük artımı-deplasman grafiği.....	87

Şekil 5.40.	A3 tipi sayısal kiriş modeli için tekil yük altında kiriş yüksekliği boyunca oluşan Normal Gerilme ( $\sigma_x$ ) değişimi.....	88
Şekil 5.41.	A3 tipi sayısal kiriş modeli için tekil yük altında kiriş yüksekliği boyunca oluşan Normal Gerilme ( $\sigma_y$ ) değişimi.....	88
Şekil.5.42.	A3 tipi sayısal kiriş modeli için mesnetten itibaren kiriş yüzeyi boyunca oluşan kayma gerilmesi ( $\tau_{xy}$ ) diyagramı.....	88
Şekil 5.43.1	A3 sayısal kiriş modelinde mesnet noktası ile CFRP yüzeyi boyunca oluşan kayma gerilmesi ( $\sigma_x$ ) değişimi.....	89
Şekil 5.43.2	A3 sayısal kiriş modelinde mesnet noktası ile CFRP yüzeyi boyunca oluşan kayma gerilmesi ( $\tau_{xy}$ ) değişimi.....	89
Şekil 5.44.	B tipi betonarme sayısal kiriş modelinin en ve boy kesiti.....	90
Şekil.5.45.	B1 tipi kiriş için sayısal analiz modeli kesiti.....	90
Şekil 5.46.	B0 tipi sayısal kiriş modeline ait sonlu elamanlar ağı, yükleme ve mesnet durumu.....	91
Şekil 5.47	B0 tipi sayısal kiriş modelinde doğrusal olmayan analiz sonucunda kiriş boyunca oluşan Normal Gerilme ( $\sigma_x$ ) değişimi.....	92
Şekil.5.48.	B0 tipi sayısal kiriş modelinde doğrusal analiz sonucu kiriş yüzeyinde oluşan birim zorlanma ( $\epsilon_x$ ) değişimi.....	92
Şekil.5.49.	B0 tipi sayısal kiriş modelinde P=200 KN luk yükleme sonucunda oluşan Eğilme ve Kesme çatlakları dağılımı .....	93
Şekil.5.50.	B0 tipi sayısal kiriş modelinde P=200 KN luk yük altında Yük-Deplasman grafiği.....	93
Şekil 5.51.	B0 tipi sayısal kiriş modelinde kiriş yüksekliği boyunca oluşan Normal Gerilme ( $\sigma_x$ ) dağılımı.....	94
Şekil 5.52 .	B0 tipi sayısal kiriş modelinde kiriş yüksekliği boyunca oluşan Normal Gerilme ( $\sigma_y$ ) dağılımı.....	94
Şekil 5.53.	B0 tipi sayısal kiriş modelinde kiriş yüksekliği boyunca oluşan Kayma Gerilmesi ( $\tau_{xy}$ ) dağılımı.....	95
Şekil 5.54.	B0 tipi sayısal kiriş modelinde mesnet noktasından CFRP yüzeyi boyunca oluşan Normal Gerilmesi ( $\sigma_x$ ) dağılımı.....	95

Şekil 5.55.	B0 tipi sayısal kiriş modelinde mesnet noktasından CFRP yüzeyi boyunca oluşan Kayma Gerilmesi ( $\tau_{xy}$ ) dağılımı.....	95
Şekil 5.56	B1 tipi sayısal kiriş modelinde doğrusal olmayan analiz sonucunda kiriş boyunca oluşan Normal Gerilme ( $\sigma_x$ ) değişimi ve güçlendirme bölgesi detayı.....	96
Şekil5.57.	B1 tipi sayısal kiriş modelinde meydana gelen birim zorlanma( $\epsilon_x$ ) değerleri değişimi.....	96
Şekil.5.58.	B1 tipi sayısal kiriş modelinde P=200 KN luk yükleme sonucunda oluşan Eğilme ve Kesme çatlakları dağılımı .....	97
Şekil 5.59.	B1 tipi sayısal kiriş modelinin P= 200KN 'luk yükleme altında yük-deplasman grafiği.....	97
Şekil 5.60.	B1 tipi sayısal kiriş modelinde kiriş yüksekliği boyunca oluşan Normal Gerilme ( $\sigma_x$ ) dağılımı.....	98
Şekil 5.61.	B1 tipi sayısal kiriş modelinde kiriş yüksekliği boyunca oluşan Normal Gerilme ( $\sigma_y$ ) dağılımı.....	98
Şekil5.62.	B1 tipi sayısal kiriş modelinde kiriş yüksekliği boyunca oluşan Kayma Gerilme ( $\tau_{xy}$ ) dağılımı.....	99
Şekil5.63 .	B1 tipi sayısal kiriş modelinde mesnet noktasından CFRP yüzeyi boyunca oluşan Normal Gerilme ( $\sigma_x$ ) dağılımı.....	99
Şekil5.64.	B1 tipi sayısal kiriş modelinde mesnet noktasından CFRP yüzeyi boyunca oluşan Kayma Gerilmesi ( $\tau_{xy}$ ) dağılımı.....	99
Şekil.5.65.	B2 kirişinde doğrusal olmayan analiz sonucunda kiriş boyunca oluşan Normal Gerilme ( $\sigma_x$ ) değişimi.....	100
Şekil5.66.	B2 tipi sayısal kiriş modelinde meydana gelen birim zorlanma( $\epsilon_x$ ) değerleri değişimi.....	100
Şekil.5.67.	B2 tipi sayısal kiriş modelinde P=200 KN luk yükleme sonucunda oluşan eğilme ve kesme çatlakları dağılımı .....	101
Şekil 5 68.	B2 tipi sayısal kiriş modelinin P= 200KN 'luk yükleme altında yük-deplasman grafiği.....	101
Şekil 5.69.	B2 tipi sayısal kiriş modelinde kiriş yüksekliği boyunca oluşan Normal Gerilme ( $\sigma_x$ ) dağılımı.....	102

Şekil 5.70.	B2 tipi sayısal kiriş modelinde kiriş yüksekliği boyunca oluşan Normal Gerilme ( $\sigma_y$ ) dağılımı.....	102
Şekil 5.71.	B2 tipi sayısal kiriş modelinde kiriş yüksekliği boyunca oluşan Kayma Gerilmesi ( $\tau_{xy}$ ) dağılımı.....	103
Şekil 5.72.	B2 tipi sayısal kiriş modelinde mesnet noktasından CFRP yüzeyi boyunca oluşan Kayma Gerilmesi ( $\tau_{xy}$ ) dağılımı.....	103
Şekil 5.73.	B3 tipi sayısal kiriş modelinde doğrusal olmayan analiz sonucunda kiriş boyunca oluşan Normal Gerilme ( $\sigma_x$ ) değişimi ve güçlendirme bölgesi detayı.....	104
Şekil 5.74.	B3 tipi sayısal kiriş modelinde meydana gelen birim zorlanma( $\epsilon_x$ ) değerleri değişimi.....	104
Şekil 5.75.	B3 tipi sayısal kiriş modelinde P=200 KN luk yükleme sonucunda oluşan Eğilme ve Kesme çatlakları dağılımı .....	105
Şekil 5.76.	B3 tipi sayısal kiriş modelinin P=200 KN'luk yükleme altında yük-deplasman grafiği.....	105
Şekil 5.77.	B3 tipi sayısal kiriş modelinde kiriş yüksekliği boyunca oluşan Normal Gerilme ( $\sigma_x$ ) dağılımı.....	106
Şekil 5.78.	B3 tipi sayısal kiriş modelinde kiriş yüksekliği boyunca oluşan Normal Gerilme ( $\sigma_y$ ) dağılımı.....	106
Şekil 5.79.	B2 tipi sayısal kiriş modelinde kiriş yüksekliği boyunca oluşan kayma gerilmesi ( $\tau_{xy}$ ) dağılımı.....	107
Şekil 5.80.	B3 tipi sayısal kiriş modelinde mesnet noktasından CFRP yüzeyi boyunca oluşan kayma gerilmesi ( $\tau_{xy}$ ) dağılımı.....	107
Şekil 5.81.	C tipi betonarme sayısal kiriş modelinin en ve boy kesiti.....	108
Şekil 5.82.	C0 kirişinde doğrusal olmayan analiz sonucunda kiriş boyunca oluşan Normal Gerilme ( $\sigma_x$ ) değişimi.....	109
Şekil 5.83.	C0 tipi sayısal kiriş modelinde meydana gelen birim zorlanma( $\epsilon_x$ ) değerleri değişimi.....	110
Şekil.5.84.	C0 tipi sayısal kiriş modelinde P=300 KN luk yükleme sonucunda oluşan Eğilme ve Kesme çatlakları dağılımı .....	110



Şekil 5.85.	C0 tipi sayısal kiriş modelinin P=300 KN'luk yükleme altında yük-deplasman grafiği.....	111
Şekil 5.86.	C0 tipi sayısal kiriş modelinde kiriş yüksekliği boyunca oluşan Normal Gerilme ( $\sigma_x$ ) dağılımı.....	111
Şekil 5.87.	C0 tipi sayısal kiriş modelinde kiriş yüksekliği boyunca oluşan Normal Gerilme ( $\sigma_y$ ) dağılımı.....	112
Şekil 5.88.	C0 tipi sayısal kiriş modelinde kiriş yüksekliği boyunca oluşan Kayma Gerilmesi ( $\tau_{xy}$ ) dağılımı.....	112
Şekil 5.89.	C0 tipi sayısal kiriş modelinde mesnet noktasından CFRP doğrultusu boyunca oluşan Kayma Gerilmesi ( $\tau_{xy}$ ) dağılımı.....	112
Şekil 5.90	C1 tipi sayısal kiriş modelinde doğrusal olmayan analiz sonucunda kiriş boyunca oluşan Normal Gerilme ( $\sigma_x$ ) değişimi ve güçlendirme bölgesi detayı.....	113
Şekil 5.91.	C1 tipi sayısal kiriş modelinde meydana gelen birim zorlanma( $\epsilon_x$ ) değerleri değişimi.....	113
Şekil.5.92.	C1 tipi sayısal kiriş modelinde P=300 KN luk yükleme sonucunda oluşan eğilme ve kesme çatlakları dağılımı .....	114
Şekil5.93.	C1 tip sayısal kiriş modeli için P=300 KN luk yükleme altında yük-deplasman grafiği.....	114
Şekil5.94 .	C1 tipi sayısal kiriş modelinde kiriş yüksekliği boyunca oluşan normal gerilme ( $\sigma_x$ ) dağılımı.....	115
Şekil 5.95.	C1 tipi sayısal kiriş modelinde kiriş yüksekliği boyunca oluşan normal gerilme ( $\sigma_y$ ) dağılımı.....	115
Şekil 5.97.	C1 tipi sayısal kiriş modelinde kiriş yüksekliği boyunca oluşan kayma gerilmesi ( $\tau_{xy}$ ) dağılımı.....	116
Şekil5.98.	C1 tipi sayısal kiriş modelinde mesnet noktasından CFRP doğrultusu boyunca oluşan kayma gerilmesi ( $\tau_{xy}$ ) dağılımı.....	116
Şekil 5.99.	C2 tipi sayısal kiriş modelinde doğrusal olmayan analiz sonucunda kiriş boyunca oluşan normal gerilme ( $\sigma_x$ ) değişimi ve güçlendirme bölgesi detayı.....	117

Şekil 5.100.	C2 tipi sayısal kiriş modelinde meydana gelen birim zorlanma( $\epsilon_x$ ) değerleri değişimi.....	117
Şekil 5.101.	C2 tipi sayısal kiriş modelinde P=300 KN luk yükleme sonucunda oluşan eğilme ve kesme çatlakları dağılımı .....	118
Şekil 5.102.	C2 tipi sayısal kiriş modeli için P=300 KN luk yükleme altında yük-deplasman grafiği.....	118
Şekil 5.103.	C2 tipi sayısal kiriş modelinde kiriş yüksekliği boyunca oluşan Normal Gerilme ( $\sigma_x$ ) dağılımı.....	119
Şekil 5.104.	C2 tipi sayısal kiriş modelinde kiriş yüksekliği boyunca oluşan Normal Gerilme ( $\sigma_y$ ) dağılımı.....	119
Şekil 5.105.	C2 tipi sayısal kiriş modelinde kiriş yüksekliği boyunca oluşan Kayma Gerilmesi ( $\tau_{xy}$ ) dağılımı.....	120
Şekil 5.106.	C2 tipi sayısal kiriş modelinde mesnet noktasından CFRP doğrultusu boyunca oluşan Kayma Gerilmesi ( $\tau_{xy}$ ) dağılımı.....	120
Şekil 5.107.	C3 tipi sayısal kiriş modelinde doğrusal olmayan analiz sonucunda kiriş boyunca oluşan Normal Gerilme ( $\sigma_x$ ) değişimi ve güçlendirme bölgesi detayı.....	121
Şekil 5.108.	C3 tipi sayısal kiriş modelinde meydana gelen birim zorlanma( $\epsilon_x$ ) değerleri değişimi.....	121
Şekil 5.109.	C3 tipi sayısal kiriş modelinde P=400 KN luk yükleme sonucunda oluşan Eğilme ve Kesme çatlakları dağılımı .....	122
Şekil 5.110.	C3 tipi sayısal kiriş modeli için P=400 KN luk tekil yükleme altında oluşan yük-deplasman değişimi.....	122
Şekil 5.111.	C3 tipi sayısal kiriş modelinde kiriş yüksekliği boyunca oluşan Normal Gerilme ( $\sigma_x$ ) dağılımı.....	123
Şekil 5.112.	C3 tipi sayısal kiriş modelinde kiriş yüksekliği boyunca oluşan Normal Gerilme ( $\sigma_y$ ) dağılımı.....	123
Şekil 5.113.	C3 tipi sayısal kiriş modelinde kiriş yüksekliği boyunca oluşan Kayma Gerilmesi ( $\tau_{xy}$ ) dağılımı.....	124
Şekil 5.114.	C3 tipi sayısal kiriş modelinde mesnet noktasından CFRP doğrultusu boyunca oluşan Kayma Gerilmesi ( $\tau_{xy}$ ) dağılımı.....	124

Şekil 5.115	D tipi sayısal kiriş modeli boy ve en kesiti.....	125
Şekil 5.116.	D0 tipi sayısal kiriş modelinde doğrusal olmayan analiz sonucunda kiriş boyunca oluşan Normal Gerilme ( $\sigma_x$ ) değişimi .....	126
Şekil 5.117.	D0 tipi sayısal kiriş modelinde meydana gelen birim zorlanma( $\epsilon_x$ ) değerleri değişimi.....	127
Şekil 5.118.	D0 tipi sayısal kiriş modelinde P=400 KN luk yükleme sonucunda oluşan eğilme ve kesme çatlakları dağılımı .....	127
Şekil 5.119.	D0 tipi sayısal kiriş modeli için P=400 KN luk tekil yükleme altında oluşan yük-deplasman değişimi.....	128
Şekil 5.120.	D0 tipi sayısal kiriş modelinde kiriş yüksekliği boyunca oluşan Normal Gerilme ( $\sigma_x$ ) dağılımı.....	128
Şekil 5.121.	D0 tipi sayısal kiriş modelinde kiriş yüksekliği boyunca oluşan Normal Gerilme ( $\sigma_y$ ) dağılımı.....	129
Şekil 5.122.	D0 tipi sayısal kiriş modelinde kiriş yüksekliği boyunca oluşan Kayma Gerilmesi( $\tau_{xy}$ ) dağılımı.....	129
Şekil 5.123.	D0 tipi sayısal kiriş modelinde mesnet noktasından CFRP yüzeyi boyunca oluşan Kayma gerilmesi( $\tau_{xy}$ ) değişimi grafiği.....	130
Şekil 5.124.	D1 tipi sayısal kiriş modelinde doğrusal olmayan analiz sonucunda kiriş boyunca oluşan Normal Gerilme ( $\sigma_x$ ) değişimi ve güçlendirme bölgesi detayı.....	130
Şekil 5.125.	D1 tipi sayısal kiriş modelinde tüm yüzeylerde meydana gelen birim zorlanma( $\epsilon_x$ ) değerleri.....	131
Şekil 5.126.	D1 tipi sayısal kiriş modelinde P=400 KN luk yükleme sonucunda oluşan Eğilme ve Kesme çatlakları dağılımı .....	131
Şekil 5.127.	D1 tipi sayısal kiriş modeli için P=400 KN luk tekil yükleme altında oluşan yük-deplasman değişimi.....	132
Şekil 5.128.	D1 tipi sayısal kiriş modelinde kiriş yüksekliği boyunca oluşan Normal Gerilme ( $\sigma_x$ ) dağılımı.....	132
Şekil 5.129.	D1 tipi sayısal kiriş modelinde kiriş yüksekliği boyunca oluşan Normal Gerilme ( $\sigma_y$ ) dağılımı.....	133

Şekil 5.130.	D1 tipi sayısal kiriş modelinde kiriş yüksekliği boyunca oluşan Kayma Gerilmesi ( $\tau_{xy}$ ) dağılımı.....	133
Şekil.5.131.	D1 tipi kirişinde mesnet noktasından kiriş boyunca oluşan ( $\tau_{xy}$ ) Kayma gerilmesi değişimi grafiği.....	133
Şekil 5.132.	D2 tipi sayısal kiriş modelinde doğrusal olmayan analiz sonucunda kiriş boyunca oluşan Normal Gerilme ( $\sigma_x$ ) değişimi ve güçlendirme bölgesi detayı.....	134
Şekil 5.133.	D2 tipi sayısal kiriş modelinde meydana gelen birim zorlanma( $\epsilon_x$ ) değerleri değişimi.....	134
Şekil.5.134.	D2 tipi sayısal kiriş modelinde P=400 KN luk yükleme sonucunda oluşan eğilme ve kesme çatlakları dağılımı.....	135
Şekil5.135.	D2 tipi sayısal kiriş modeli için P=400 KN luk tekil yükleme altında oluşan yük-deplasman değişimi.....	135
Şekil 5.136.	D2 tipi sayısal kiriş modelinde kiriş yüksekliği boyunca oluşan normal gerilme ( $\sigma_x$ ) dağılımı.....	136
Şekil 5.137.	D2 tipi sayısal kiriş modelinde kiriş yüksekliği boyunca oluşan normal gerilme ( $\sigma_y$ ) dağılımı.....	136
Şekil 5.138.	D2 tipi sayısal kiriş modelinde kiriş yüksekliği boyunca oluşan kayma gerilmesi ( $\tau_{xy}$ ) dağılımı.....	137
Şekil 5.139.	D2 tipi sayısal kiriş modelinde mesnet noktasından CFRP yüzeyi boyunca oluşan $\tau_{xy}$ Kayma gerilmesi değişimi grafiği.....	137
Şekil 5.140.	D3 tipi sayısal kiriş modelinde doğrusal olmayan analiz sonucunda kiriş boyunca oluşan Normal Gerilme ( $\sigma_x$ ) değişimi ve güçlendirme bölgesi detayı.....	138
Şekil5.141.	D3 tipi sayısal kiriş modelinde meydana gelen birim zorlanma( $\epsilon_x$ ) değerleri değişimi.....	138
Şekil.5.142.	D3 tipi sayısal kiriş modelinde P=400 KN luk yükleme sonucunda oluşan eğilme ve kesme çatlakları dağılımı .....	139
Şekil5.143.	D3 tipi sayısal kiriş modeli için P=400 KN luk tekil yükleme altında oluşan yük-deplasman değişimi.....	139

Şekil 5.144.	D3 tipi sayısal kiriş modelinde kiriş yüksekliği boyunca oluşan Normal Gerilme ( $\sigma_x$ ) dağılımı.....	140
Şekil 5.145.	D3 tipi sayısal kiriş modelinde kiriş yüksekliği boyunca oluşan Normal Gerilme ( $\sigma_y$ ) dağılımı.....	140
Şekil 5.146.	D3 tipi sayısal kiriş modelinde kiriş yüksekliği boyunca oluşan Kayma Gerilmesi ( $\tau_{xy}$ ) dağılımı.....	141
Şekil 5.147.	D3 tipi sayısal kiriş modelinde mesnet noktasından CFRP yüzeyi boyunca oluşan ( $\tau_{xy}$ ) kayma gerilmesi değişimi grafiği.....	141
Şekil 5.148	A tipi sayısal kontrol ve CFRP Plakalı kiriş modellerinde oluşan Yük Artımı-deplasman değişimi.....	142
Şekil 5.149.	A tipi kiriş modellerinde oluşan normal gerilme ( $\sigma_x$ ) değerleri değişimi.....	144
Şekil 5.150	A tipi kiriş modellerinde CFRP plakalı modellerde oluşan Normal Gerilme ( $\sigma_x$ ) değerleri değişimi.....	144
Şekil 5.151.	A tipi kiriş modellerinde oluşan Normal Gerilme ( $\sigma_y$ ) değerleri değişimi.....	145
Şekil 5.152.	A tipi sayısal kiriş modelinde sadece CFRP plakalı modellerde kiriş yüksekliği boyunca oluşan Normal Gerilme ( $\sigma_y$ ) değerleri değişimi.....	145
Şekil 5.153.	A tipi kiriş modellerinde oluşan Kayma Gerilme ( $\tau_{xy}$ ) değerleri değişimi.....	146
Şekil 5.154.	A tipi modellerinde CFRP'li kiriş modellerin Kayma Gerilme ( $\tau_{xy}$ ) değerleri değişimi.....	146
Şekil 5.155.	A tipi kiriş modellerinde mesnet noktasından CFRP doğrultusu boyunca oluşan Normal Gerilme ( $\sigma_x$ ) değerleri değişimi.....	147
Şekil 5.156	A tipi kiriş modellerinde CFRP tabaka sayısının değişiminin CFRP doğrultusu boyunca Normal Gerilme ( $\sigma_x$ ) değerlerine etkisi.	147
Şekil 5.157.	A tipi kiriş modellerinde oluşan mesnet noktasından FRP doğrultusu boyunca kayma gerilme ( $\tau_{xy}$ ) değerleri değişimi.....	148
Şekil 5.158	A tipi kiriş modellerinde oluşan mesnet noktasından FRP doğrultusu boyunca kayma gerilme ( $\tau_{xy}$ ) değerleri değişimi.....	148

Şekil 5.159.	B tipi sayısal kontrol ve CFRP Plakalı kiriş modellerinde oluşan Yük Artımı-deplasman değişimi.....	149
Şekil 5.160.	B tipi kiriş modellerinde oluşan Normal Gerilme ( $\sigma_x$ ) değerleri değişimi.....	151
Şekil 5.161.	B tipi kiriş CFRP li modellerde kiriş yüksekliği boyunca oluşan Normal Gerilme ( $\sigma_x$ ) değerleri değişimi.....	151
Şekil 5.162.	B tipi kiriş modellerinde oluşan Normal Gerilme ( $\sigma_y$ ) değerleri değişimi.....	152
Şekil 5.163.	B tipi kiriş CFRP li modellerde kiriş yüksekliği boyunca oluşan Normal Gerilme ( $\sigma_y$ ) değerleri değişimi.....	152
Şekil 5.164	B tipi kiriş modellerinde kiriş yüksekliği boyunca oluşan kayma gerilmesi ( $\tau_{xy}$ ) değerleri değişimi.....	153
Şekil 5.165.	CFRP'li" B tipi kiriş modellerinde kiriş yüksekliği boyunca oluşan kayma gerilmesi ( $\tau_{xy}$ ) değerleri değişim.....	153
Şekil 5.166.	B tipi kiriş modellerinde oluşan mesnet noktasından FRP doğrultusu boyunca Kayma Gerilme ( $\tau_{xy}$ ) değerleri değişimi.....	153
Şekil 5.167.	C tipi sayısal kontrol ve CFRP Plakalı kiriş modellerinde oluşan Yük-deplasman değişimi.....	154
Şekil 5.168.	C tipi kiriş modellerinde kiriş yüksekliği boyunca oluşan Normal Gerilme ( $\sigma_x$ ) değerleri değişimi.....	154
Şekil 5.169.	C tipi kiriş modellerinde kiriş yüksekliği boyunca oluşan Normal Gerilme ( $\sigma_y$ ) değerleri değişimi.....	154
Şekil 5.170.	C tipi kiriş modellerinde kiriş yüksekliği boyunca oluşan Kayma Gerilmesi ( $\tau_{xy}$ ) değerleri değişimi.....	155
Şekil 5.171.	D tipi sayısal kontrol ve CFRP Plakalı kiriş modellerinde P=400KN'luk tekil yük altında oluşan Yük-deplasman değişimi....	155
Şekil 5.172	D tipi kiriş modellerinde kiriş yüksekliği boyunca oluşan Normal Gerilme ( $\sigma_x$ ) değerleri değişimi.....	156

Şekil 5.173.	D tipi kiriş modellerinde kiriş yüksekliği boyunca oluşan Normal Gerilme ( $\sigma_y$ ) değerleri değişimi.....	156
Şekil 5.174.	D tipi kiriş modellerinde kiriş yüksekliği boyunca oluşan Kayma Gerilmesi ( $\tau_{xy}$ ) değerleri değişimi.....	156
Şekil 6.1	Deneysel çalışma modeli en ve boy kesiti.....	157
Şekil 6.2.	Sonlu elemanlar ağı ve mesnetleme durumu.....	157
Şekil 6.3.	Deneysel çalışmada B1 ve B3 modellerine ait Yük Artımı_deplasman değişimi karşılaştırılması.....	158
Şekil 6.4.	Deneysel analiz modeli yükleme durumu ve en kesiti.....	159
Şekil 6.5	Sonlu elemanlar ağı ve mesnetleme durumu.....	159
Şekil 6.6	Deneysel çalışmada F0 ve FC1 modellerinin karşılaştırmalı Yük Artımı-deplasman değişimi.....	160

## TABLolar LİSTESİ

Tablo 2.1.	Matris, takviye elemanı ve kompozit malzeme yapı tipleri.....	11
Tablo 2.2.	PMK’lerde matriks malzemesi olarak kullanılan polimerlerin mekanik özellikleri.....	18
Tablo 2.3.	Aramid fiberlerin mekanik özellikleri.....	24
Tablo 2.4	Belli başlı fiberlerin karşılaştırılması.....	25
Tablo 3.1	Beton, donatı ve CFRP’nin malzeme özellikleri.....	46
Tablo 5.1.	Kiriş betonunun mekanik özellikleri.....	71
Tablo 5.2.	Kiriş donatısı mekanik özellikleri .....	71
Tablo 5.3.	Karbon fiber takviyeli plakaların mekanik özellikleri.....	72
Tablo 5.4	Sikadur 30 epoksi reçinesinin mekanik özellikleri.....	72
Tablo 5.5.	A tipi sayısal kiriş modelleri.....	72
Tablo 5.6	B tipi sayısal kiriş modeli betonunun mekanik özellikleri.....	91
Tablo 5.7.	B tipi sayısal kiriş modeli donatıları mekanik özellikleri.....	91
Tablo 5.8.	B tipi sayısal kiriş modelleri.....	91
Tablo 5.9.	C tipi sayısal kiriş modeli betonunun mekanik özellikleri.....	108
Tablo 5.10.	C tipi sayısal kiriş modeli donatıları mekanik özellikleri.....	108
Tablo 5.11.	C tipi sayısal kiriş modelleri.....	109
Tablo 5.12.	D tipi sayısal kiriş modeli betonunun mekanik özellikleri.....	125
Tablo 5.13.	D tipi sayısal kiriş modeli donatıları mekanik özellikleri.....	125
Tablo.5.14.	D tipi sayısal kiriş modelleri.....	126
Tablo 5.15.	A tipi sayısal kiriş modelleri için kritik yük ve deplasman değerleri.....	143
Tablo 5.16.	A tipi sayısal kiriş modellerinde Normal Gerilme ( $\sigma_x$ ) değişimi	143



Tablo 5.17.	A tipi sayısal kiriş modellerinde Normal Gerilme ( $\sigma_y$ ) değişimi.....	144
Tablo 5.18.	A tipi sayısal kiriş modellerinde Kayma Gerilmesi ( $\tau_{xy}$ ) değişimi.....	145
Tablo 5.19.	A tipi sayısal kiriş modelinde mesnet ve CFRP bitim noktasındaki normal gerilmesi ( $\sigma_x$ ) değişimi.....	147
Tablo 5.20.	A tipi sayısal kiriş modelinde mesnet ve CFRP bitim noktasındaki kayma gerilmesi ( $\tau_{xy}$ ) değişimi.....	148
Tablo 5.21.	B tipi sayısal kiriş modelleri için kritik yük ve deplasman değerleri.....	150
Tablo 5.22.	B tipi sayısal kiriş modellerinde Normal Gerilme ( $\sigma_x$ ) değerleri değişimi.....	150
Tablo 5.23.	B tipi sayısal kiriş modellerinde Normal Gerilme ( $\sigma_y$ ) değerleri değişimi.....	152
Tablo 6.1	Deneysel alışmalar ile sayısal analiz modeli sonuçlarının karşılaştırılması.....	162

## ÖZET

Anahtar kelimeler: Karbon Fiber Takviyeli Polimer(CFRP), Doğrusal Olmayan Analiz, Sonlu Elemanlar Metodu, Güçlendirme, Betonarme Kiriş, Epoksi

Son yıllarda, inşaat malzemeleri teknolojilerindeki gelişmelere bağlı olarak betonarme elemanların karbon takviyeli polimer plakalarla güçlendirilmesi büyük önem kazanmıştır. Bu malzemenin hafif, yüksek mukavemetli, korozyon özellikleri ve iyi bir yoğunluğa sahip olması nedeniyle alternatif bir güçlendirme malzemesi olmuştur. Gerçekleştirilen birçok deneysel ve nümerik çalışma ile hazırlanan modeller üzerinde güçlendirme yöntemlerinin betonarme elemanların eğilme ve kesme dayanımının arttığı belirlenmiştir. Bu çalışmalarda geliştirilen farklı analizler sonucunda CFRP kullanılarak güçlendirilen betonarme elemanların gerilme dağılımları, yük-deplasman değişimi ve oluşabilecek yenilme biçimleri ile ilgili ayrıntılı sonuçlar elde edilmiştir.

Bu çalışmada, farklı kesit, açıklık uzunluğu ve donatı miktarlarına sahip olarak hazırlanan dört farklı tipteki betonarme kiriş sayısal analiz modelleri LUSAS paket programında Sonlu Elemanlar Yöntemi kullanılarak çözümlenmiştir. Doğrusal olmayan analiz ile güçlendirme sonucu oluşan yük-deplasman değişimi, kesitlerin her bölgesinde oluşan normal ve kesme gerilmeleri , çatlak mekanizmaları ve yenilme biçimleri ile ilgili sonuçlar grafik ve şekil olarak sunulmuştur.

# **NONLINEAR ANALYSIS OF RC BEAMS STRENGTHENED WITH CFRP PLATES**

## **SUMMARY**

Key Words: Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP), Nonlinear Analysis, Finite Element Method, Strengthened, RC Beams, Epoxy

In the recent years, strengthening of RC beams using CFRP plates are coming more popular depends on development of civil engineer material technology. Due to lightweight, high strength, corrosion properties and good fatigue, CFRP become an alternative strength material. The models prepared by using experimental and numerical studies proved that bending and shearing strength of RC elements increased in case of using strengthened method. The various developed analyses models with CFRP for strengthened RC elements produced stress distribution, load-displacement curves and failure modes in details

In this study, LUSAS package program using finite element method techniques was used for four type models having different cross-sections, spans and amount of reinforcement. Nonlinear analysis graphically produced some results which are load-displacements curves, normal and shear stress on the section, crack mechanism and failure mode

## **BÖLÜM1. GİRİŞ**

Son yüzyılda, malzeme teknolojisindeki gelişmelere paralel olarak ileri teknoloji ürünü malzemelerin inşaat sektöründe kullanımı yaygınlaşmıştır. Özellikle yapı kimyasalları ve fiber teknolojisindeki yenilikler yapı onarım ve güçlendirmeleri üzerine yeni metotlar geliştirilmesini kolaylaştırmıştır. Karbon fiber takviyeli polimer (FRP) plakalar kullanarak betonarme elemanların güçlendirilmesi teknikleri üzerine gerçekleştirilen çalışmalar akademik ve uygulamalı araştırmalara konu olmuştur. Karbon fiber kompozitlerin kullanımda sağladığı avantajlar, çok kolay ve güvenilir uygulama alanları oluşması, hızlı ve gerçekçi sonuçlar vermesi tercih sebebi olmuştur.

### **1.1. Literatür Taraması**

S.T. Smith ve J.G.Teng (2002) tarafından gerçekleştirilen makalede FRP kullanılarak betonarme kiriş güçlendirilmesine ait gerçekleştirilen çalışmalarda izlenen yollar ve deneysel araştırma grupları tarafından yapılan kabuller gösterilmiştir. Yapılan deneysel çalışmalarda elde edilen sonuçlar ve hesaplamalarda ele alınan çözüm metotları ve kabuller üzerinde durulmuştur. FRP ile güçlendirilen kirişe ait yenilme(göçme) biçimlerine dair yaklaşımlar verilmiştir. Kirişlerde oluşacak kesme gerilmeleri,maksimum eğilme momenti artış modelleri ie beton-yapıştırıcı-FRP ara yüzeylerinde oluşan gerilmelerin belirlenmesine ait yaklaşımlar ve formülasyonlar üzerinde durulmuştur[1].

S.T. Smith ve J.G.Teng (2002) tarafından gerçekleştirilen çalışmada bir önceki çalışmanın devamı durumundaki bu çalışmada, farklı araştırma grupları tarafından gerçekleştirilen 12 adet FRP'li güçlendirme kiriş modelleri incelenmiştir. Bu çalışmalara air deneysel veriler ve analitik analiz yöntemleri karşılaştırılarak beton kabuğunun çekme donatısı doğrultusu boyunca ayrışması şeklinde oluşan

yenilme(göçme) biçimi (Concrete Cover Separation) hakkında derlendirmelerde bulunulmuştur. Bunların gerçekleşme yüzdeleri ile buna etki eden nedenler üzerinde yaklaşımlarda bulunulmuştur. Kesme kapasitesine bağlı modeller, betonda paspayı kısmından itibaren dış bırakacak şekilde oluşan ayrışma biçimine ait modeller ile ara yüzey gerilmelerine (Beton-yapıştırıcı-FRP) bağlı olarak hazırlanan modellerin farklı yenilme biçimleri oluşum esasları irdelenmiştir. Değerlendirmeler grafikler halinde sunulmuş ve genel sonuçlar çıkarılması hedeflenmiştir. Sonuçta toplam 59 farklı test sonuçları irdelenerek eğilme etkisindeki FRP'li kirişlerin yenilme(göçme) biçimleri arasında bir bağıntı yakalanması amaçlanmıştır[2].

X. Jianzhuang, L. Jie, Z. Quanfan(2004) tarafından gerçekleştirilen makalede FRP ile beton ara yüzeyleri arasındaki eğilme davranışını araştırmak üzere iki tip test dizaynı hazırlanmıştır. Yeni geliştirilen çift-kesme testi ile, FRP'li sistemlerdeki gerilme dağılımı ve artımı araştırılmıştır. FRP li plakalı kirişlerin negatif moment bölgesindeki gerilme ve zorlanma dağılımları tek açıklı basit kiriş modeli üzerinde gösterilmiştir. Aynı zamanda direkt kesme gerilmesi dağılımı için etkili yapışma mesafesi hakkında yaklaşımlarda bulunulmuştur. Test sonuçlarına bağlı olarak maksimum etkili yapışma uzunluğu, esas yapışma gerilmesi ve negatif moment bölgesindeki eğilme yapışma uzunluğunun belirlenmesine ait yaklaşımlar sunulmuştur. Etkili yapışma uzunluğu yaklaşık 100 mm. ve esas yapışma gerilmesi 1287 MPa olarak hesaplanmıştır. Negatif moment bölgesindeki eğilme yapışması uzunluğu yaklaşık olarak 300mm. olarak belirlenmiştir[3].

L. Anania, A.Badalá, G. Failla (2005) tarafından gerçekleştirilen çalışmada güçlendirmede yeni bir metodoloji üzerinde durulmuş, kirişlerin daha yüksek dahili enine kesit çiftinin ürettiği yük taşıma kapasitesinin artırılması amaçlanmıştır. Bu yeni orijinal kiriş kubbesiyle birleştirilmiş kompozit bir kiriş modeli kullanılmasıyla gerçekleştirilmiştir.Kiriş modelleri 1:2 boyutlarında hazırlanmıştır. Çalışmada kullanılan kirişler 250x250 mm kesitinde 2200 mm. boyunda iki seri olarak dizayn edilmiştir. Yeni geliştirilen CFRP güçlendirme sistemi uygulanıp test edilmiştir[4].

L.Ascione, V.P. Berardi, L. Feo, G. Mansuci(2005) , tarafından hazırlanan makalede, betonarme kirişlerin kompozit plakalarla güçlendirilmesi sonucu betonarme ile FRP

ara yüzeyleri arasında oluşan gerilme dağılımları araştırılmıştır. Hazırlanan mekanik modelde sayısal uygulama, sonlu elemanlar metodu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kinematik bilinmeyenlerin bulunmasında HERMİTİA kübik polinomları kullanılmıştır. Çalışmada ara yüzey gerilmeleri belirlenmesinde basitleştirilmiş bir yöntem sunulmuştur[5].

Hsuan-The Hu v.d . (2004) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, ABAQUS sonlu elemanlar programı kullanılarak alt yüzeyine ve diğer tüm yüzeylere FRP uygulanarak güçlendirilen betonarme kiriş modellerinin maksimum yükleme kapasitesindeki doğrusal olmayan davranışı irdelenmiştir. Sayısal analizler için gerçek davranış modelleri bilgisayar ortamına adapte edilmiştir. Bu çalışma için kısa ve uzun kiriş modelleri hazırlanmış ve içerisindeki donatı oranı yüksek ve düşük olarak farklı modeller dizayn edilmiştir. Gerçekleştirilen çalışma sonucunda FRP kullanılarak güçlendirilen betonarme kirişlerin maksimum eğilme dayanımlarının oldukça arttığı belirlenmiştir. Bu çalışmanın temel amacı, güçlendirilmiş kirişin uniform yayılı yükler altındaki doğrusal olmayan davranışına kiriş uzunluğu, kiriş içindeki donatı oranı ve fiber dokusu özelliklerinin etkisinin irdelenmesidir[6].

Z. J. Yang v.d.(2003) tarafından gerçekleştirilen yayında Sonlu elemanlar analizine dayalı olarak eğilme çatlaklarının oluşumuna ait kırılma mekaniği irdelenmiştir. Burada sunulan ikinci önemli sonuç ise FRP ile güçlendirilmiş betonarme kirişin kabuk betonun ayrışmasına ait çatlama modunun bilgisayar ortamında analiz edilebilmesidir. Bu çalışmada lineer elastik kırılma mekaniği ile birlikte “ayrık çatlak modeli”ne dayalı sonlu elemanlar yöntemi kullanılmıştır[7].

Pesic, N., Pilakoutas,K.(2003), tarafından gerçekleştirilen çalışmada, FRP plaka kullanılarak güçlendirilmiş betonarme kirişlerin yenilme biçimlerinden olan beton kabuğunun çekme donatısı boyunca ayrışması ile plaka bitim noktasından ayrışma durumları incelenmiştir. Çalışmada gerçekleştirilen birçok deneysel çalışmadan elde edilen deneysel veriler sonlu elemanlar analiz yöntemi kullanılarak çözümlenmiştir. Burada iki dizayn yöntemi kullanılmıştır. Birincisi maksimum beton çekme dayanımı, ikincisi kirişin kesme dayanımıdır. Analiz sonucunda plaka bitim noktasında meydana gelen yenilme biçiminin belirlenmesinde lineer elastik analiz

yönteminin yetersiz olacağı belirlenmiştir. Ayrıca bu tip yenilme biçiminde etkin olan faktörün kirişin kesme gerilmesi kapasitesinin olduğu görülmüştür. Sonlu elemanlar analizi , kritik bölgedeki çekme gerilmesi büyüklüğü esaslarına dayanılarak donatının çekme kapasitesinin belirlenmesinde kullanıldı. FRP kullanılarak güçlendirilen betonarme kirişin lineer olmayan davranışı, kirişin elastik olmayan deformasyonunun en ideal şekilde gösteren “smeared” beton modeli kullanılarak sonlu elemanlar yöntemi ile hesaplanmıştır[8].

L.Ascione, L. Feo (2000) tarafından gerçekleştirilen makalede, plakalı betonarme kirişin yapışma tabakasındaki normal ve kesme gerilmesinin hesaplanmasında kullanılan sonlu elemanlar modeli sunulmuştur. Sayısal sonuçların , daha önce gerçekleştirilen çalışmalarla uygunluğu sağlanmıştır. Kompozit kirişe eğilme gerilmeleri uygulandığında, kesme gerilmelerinin ve yüksek konsantrasyonlu ayrışma kuvvetinin plaka bitim noktasında olduğu görülmüştür. Bu konsantrasyonlar, donatı boyunca uzanan kabuk betondan veya plakalı kirişin yapışma bölgesinde erken yenilmelere neden olur. Çalışmada kompozit plaka-yapıştırıcı-FRP ara yüzeyleri arasında oluşan gerilmelerin hesaplanmasında gerekli sayısal analiz yöntemleri sunulmuştur[9].

X:Z. Lu v.d (2005) tarafından gerçekleştirilen makalede, betonarme kiriş ile FRP arasındaki gerilme dağılımlarını irdeleyen ikincil derecede sonlu elemanlar modeli sunulmuştur. Hazırlanan model MSC:MARC adlı paket programda analiz edilerek ara yüzeyde olan gerilme dağılımları ve oluşacak yenilme biçimi hakkında yaklaşımlarda bulunulmuştur. Bu modelde, çok küçük kare elemanlarda(yaklaşık 0.25-0.5 mm boyutlarında) karışık açılı çatlak modeli(FACM) kullanılmış ve yapıştırıcı yüzeyi boyunca kabuk beton tabakasında oluşan çatlak gelişiminin mekanizması incelenmiştir. Deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar ile kurulan model analizi sonucu elde edilen veriler karşılaştırılarak FRP-beton ara yüzeylerinde oluşan gerilmeler bölgesel yapışma-çökme eğrileri ile grafik olarak sunulmuştur[10].

Guido Gamata,v.d (2007) tarafından gerçekleştirilen çalışmada FRP kullanılarak güçlendirilen betonarme elemanların gevrek kırılma moduna göre düğüm noktasının davranışının deneysel ve analitik araştırması yapılmıştır. Betonarme kiriş

modellerinin hem orta bölgesinin hem de plaka son noktasında oluşan gerilme dağılımları irdelenmiştir. Araştırmada sonlu elemanlar analizi lineer olmayan kırılma mekanik kuramları esas alınmıştır. Modellemede, deneysel çalışmalardan elde edilen gerçek kırılma modeli ve ara yüzey çatlak modelleri hesaba katılmıştır. Çalışmada, beton çatlamaının yapıştırıcı davranışı, plaka uzunluğu, genişliği ve dayanımının yenilme(göçme) mekanizması üzerindeki etkileri gösterilmiştir. Sayısal ve deneysel çalışmalar göstermiştir ki beton kabuk bölgesinin ayrışmasına bağlı olan yenilme biçimi beton içindeki çatlakların artımı ile mutlak ilgilidir[11].

M. Basler, B. Mungall ve S. Fan (2001) tarafından hazırlanan adlı makalede İsviçre'nin Dübendorf kentinde bulunan Federal Malzeme test ve araştırma merkezinde(EMPA) SİKA Carbodur Plaka malzemesiyle gerek yığma bina gerekse betonarme yapı elemanları için gerçekleştirilen deneysel çalışmalar gösterilmiştir. Kullanım alanları ve uygulama yöntemleri hakkında genel sonuçlar verilmiştir[12].

Ferretti D., Savio M.,(2003) tarafından sunulan" makalede, FRP plakalar kullanılarak güçlendirilen betonarme kirişlerin aksel yük altındaki çatlak oluşum mekanizması analiz edilmiştir. Beton ve donatılar arasındaki lineer olmayan eğilme-kayma gerilmeleri kanunu ile betonda çatlak oluşan bölgelerdeki kohezyon gerilmelerini irdeleyen lineer olmayan bir model geliştirilmiştir. Lineer olmayan denklem takımlarının çözümlenmesinde sonlu farklar yöntemi kullanılmıştır. Yapılan çözümler deneysel çalışmalarla karşılaştırılarak modelin geçerliliği görülmüştür. Plakalı ve plakasız kiriş modellerinin yer değiştirme, kuvvet ve çatlak açılım kontrollerine dair simülasyon testlerine ait sayısal örnekler sunulmuştur. Sayısal ve deneysel örnekler göstermiştir ki ,betonarme elemanların FRP kullanılarak güçlendirilmesinin çatlak genişliğinin azaltılmasında çok etkili olduğu ve çekme elemanlarında aksel rijitliğin artmasını sağladığı belirlenmiştir[13].

N. Grace v.d. (2004) tarafından hazırlanan çalışmada yeni geliştirilen üç aksel düktül FRP dokuma kumaşlar kullanılarak betonarme kirişlerin güçlendirilmesi hakkında detaylı sunumlar yapılmıştır. Bu kumaşların ideal malzeme karakteristik özellikleri incelenmiştir. Bu değerlendirmeler ışığında, yüklemeler altında çapraz etkilerin dalgalanma etkileri üzerine analitik modeller geliştirilmiştir. Dokuma



kumaşların mekanik özellikleri, tasarım için gerekli hesap analizlerini ortaya koyabilmek amacıyla deneysel çalışmalar yapılmıştır. Kesme ve eğilme gerilmeleri kapasitesini belirlemek üzere hazırlanan kiriş modelleri dokuma kumaşlar ile sarılarak test edilmiştir.  $0^0, +45^0$  ,  $-45^0$  açılı yerleştirilen frp liflerinden örülmüş dokuma kumaşlardan elde edilen yük-deplasman ve yük-zorlanma değerleri grafikler olarak sunulmuştur[14].

H.K. Lee , L.R.Hausman (2004) tarafından hazırlanan çalışmada, püskürtme FRP(SFRP) malzemesi kullanılarak güçlendirilen betonarme kirişlerin yük kapasitesi, duktilitesi ve enerji yutma yeteneği üzerine araştırmalar gerçekleştirilmiştir. SFRP malzemesinin hafif hasarlanmış kirişlerin onarım ve güçlendirmede kullanılabilirlik kapasitesi araştırılmıştır. Az çatlaklı betonarme kiriş modelleri üzerine püskürtme FRP kullanılmasının güçlendirme üzerindeki etkisi ve güçlendirme performansına katkısı hakkında deneysel ve analitik çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Deneysel programda ele alınan esaslar , örtü kalınlığı, fiber uzunluğu, farklı fiber malzemeleri ve fiber yükleri olarak belirlenmiştir. Test sonuçları, artan yüklemeler altında yük-deplasman eğrileri ve enerji yutma kapasitesi grafikleri ile sunulmuştur. Çalışma sonucunda püskürtme FRP(SFRP) kullanılarak betonarme kirişlerin güçlendirilmesine dair bir tasarım yöntemi sunulmuştur[15].

F.A Travez v.d (2003) tarafından hazırlanan makalede, dört noktadan eğilmeye tabi tutulan betonarme kirişlerin FRP ızgara yardımıyla güçlendirilmesine ait sonlu elemanlar analiz yöntemi sunulmuştur. Yapıların lineer olmayan süreksiz analiz yöntemi ile hesaplanmasını sağlayan LS-DYNA paket programı kullanılarak modeller çözümlenmiştir. Kompozit ızgara modellenirken farklı davranış sergileyen kiriş ve kabuk elemanlar kullanılmış ve beton katı mesh ile birbirine bağlanmıştır. Yük-deplasman karakteristikleri deneysel çalışmalardan elde edilen veriler uyarlanarak belirlenmiştir. Sonlu elemanlar alt yapıları detaylanırken çekme donatısının akma dayanım değerleri esas alınmıştır. Çalışma sonucunda elde edilen analitik sonuçlar ile deneysel sonuçlar karşılaştırıldığında yük taşıma kapasitesinde çok küçük sapmalar oluştuğu belirlenmiştir[16].

Huy PHAM v.d. tarafından gerçekleştirilen bu makalede, FRP kompozitler kullanılarak güçlendirilmiş betonarme kirişlerin eğilme kapasitesinin artırılması hedeflenmiştir. Bu gerçekleştirilirken birçok yenilme modunun özellikle plaka bitim noktasından ayrışma ile orta bölgeden kopma biçimleri göz önüne alınmıştır. Bu tür yenilme biçimlerine ait mekanizma oluşumu ve olası model tercihleri sıralanmıştır. Bu çalışma ile eğilme yenilme biçimleri ile ilgili kiriş teorilerinin birçoğunun doğruluğu ispatlanmıştır [17].

Haydar A. Rasheed V.d. tarafından hazırlanan çalışmada , dış yüzeye FRP uygulanarak gerçekleştirilen güçlendirme tekniği hakkında ayrıntılı açıklamalarda bulunulmuştur. Çeşitli ülkelerde uygulanan farklı hesaplama sistemleri inceleyerek FRP li sistemlerin tasarımlarına esas olacak nümerik analizi için gerekli hesaplama modeli sunulmuştur[19].

B. Täljsten (2004) tarafından gerçekleştirilen makalede FRP kullanılarak gerçekleştirilen güçlendirme tekniklerinin tarihçesinden bahsettikten sonra gelişen teknoloji ile birlikte oluşan yeni teknikleri sunmuştur. Avrupa, Japonya ve ABD de gerçekleştirilen son çalışmalar özetlendikten sonra FRP nin farklı kullanım yöntemleri sunulmuştur. Özellikle FRP lerin yakın yüzeye monte edilerek(Near-Surface-Mounted Reinforcement) betonarme kirişlerin güçlendirilmesi tekniği hakkında teorik ve deneysel veriler sunulmuştur[23].

## **1.2. Tezin Amacı ve Kapsamı**

Betonarme yapı elemanlarında, meydana gelen şiddetli depremler sonucu yapısal hasar oluşması yada kullanım amaçlarının değişimi gibi nedenlerle güçlendirilmeye ihtiyaç duyarlar. Bu elemanlar geliştirilen yeni tekniklerle güçlendirilerek eski durumuna göre daha güvenli hale getirilirler.

Bu doktora tezinde, karbon fiber polimerlerle (CFRP) güçlendirilmiş betonarme kirişlerin doğrusal olmayan davranışının irdelenmesi amaçlanmıştır. Literatür taraması incelendiğinde gerçekleştirilen çalışmalarda, laboratuvar ortamında çeşitli boyutlarda farklı donatı miktar ve düzeneklerine sahip betonarme kirişler

hazırlanmıştır. Bu modeller farklı malzeme özelliklerine sahip FRP'lerle eğilme ve/veya kesme gerilmelerini arttırmak üzere uygulanmış, oluşan gerilme değişimleri, deplasmanlar ve çatlak durumları grafik ve resim olarak sunulmuştur. Ancak bu tür çalışmalar hazırlanan modeller ile kısıtlı kalmış ve genellemeye gidilememiştir.

Bu çalışmada ise yapılan uygulamalar, bilgisayar ortamında sayısal analiz modelleri hazırlandıktan sonra mevcut ve güçlendirilmiş kirişin doğrusal olmayan davranışı araştırılacaktır. Öncelikle deneysel çalışma sonuçları ile bilgisayar analiz sonuçları karşılaştırılarak bilgisayar ortamında da gerçek davranışa yakın sonuçlar elde edilebileceği ispatlanacaktır. Hazırlanan sayısal analiz modellerinin değişen yüklemeler altında oluşan çatlak biçimi (crack pattern), CFRP plakası bitim noktasında oluşan gerilme değişimi ve yenilme (göçme) biçimleri, orta bölgesinde yük değişimine bağlı olarak oluşan gerilme ve deformasyon durumları araştırılacaktır. FRP ile güçlendirmenin mevcut kirişe göre kazandırdığı gerilme artımları ve zorlanma değişimleri hesaplanacaktır.

Bu amaçla farklı kesit, açıklık uzunluğu ve donatı oranlarına sahip olarak hazırlanan sayısal analiz modelleri LUSAS paket programında Sonlu Elemanlar Yöntemi kullanılarak çözümlenmiştir. Belirlenen dört farklı tipteki betonarme kirişlerin bir ve çok katlı CFRP kullanılarak güçlendirilmesi çalışması ile;

- a) Betonarme kirişlerde açıklık mesafesi değişiminin CFRP ile güçlendirmeye etkisi,
- b) Betonarme kirişlerin kesit değişiminin CFRP ile güçlendirmeye etkisi,
- c) Farklı kattaki CFRP kullanımının betonarme kiriş güçlendirmesine etkisi,
- d) Betonarme kiriş kesit, açıklık mesafesi ve CFRP kat sayısı değişiminin lineer olmayan davranış sonucu oluşacak çatlak mekanizmasına etkisi,
- e) CFRP kullanılarak güçlendirilen betonarme kiriş üzerindeki gerilme dağılımları, zorlanmalar ve deplasmanların irdelenmesi amaçlanmıştır.

A, B,C ve D tipleri olmak üzere dört farklı kiriş modeli belirlenmiştir. Bunlarının her birinin donatı oranları, kesitleri, açıklık mesafeleri farklıdır. Aşağıdaki bölümlerde

her bir model ayrı ayrı irdelenerek sonuçlardaki değişimler tablo ve grafikler halinde sunulmuştur.

Bu tür uygulamalara ait çeşitli ülkelerde geliştirilen prosedürler ışığında hesap adımları verilecektir. Bir modelimize ait tüm hesap adımları eğilme ve kesme gerilmeleri için ayrı ayrı hesaplanacaktır.

## **BÖLÜM 2. FİBER TAKVİYELİ KOMPOZİTLER**

### **2.1. Kompozit Malzemeler**

Kompozit malzemeler, temel olarak iki veya daha fazla malzemenin bir arada kullanılmasıyla oluşturulan ve meydana geldiği malzemelerden farklı özelliklere sahip yeni tür malzemeleri belirtmek için kullanılmaktadır. Bir başka deyişle, birbirleriyle uyum sağlayacak ara yüzeylere sahip iki veya daha fazla malzemenin fiziksel olarak karıştırılması suretiyle elde edilen ve başlangıçtaki malzemelerden daha iyi özelliklere sahip kombinasyonlardan herhangi birine kompozit denir.

Kompoziti oluşturan her bir ara yüze “faz” denir. Örneğin beton, harç ve agrega fazından, harç ta çimento ve kum fazından oluşur. Betonarme ise beton ve çelik fazından oluşur. Kompozitler daima bir ana faz(matris) ve onun içine dağılmış fazlardan oluşur. Bir malzemenin kompozit malzeme sayılabilmesi için aşağıdaki özellikler taşıması gerekmektedir.

- a) Farklı bileşenlerle beraber kimyasal olarak birbirinden farklı en az iki malzemenin kombinasyonundan oluşmalıdır,
- b) Kompozit malzemeyi oluşturan ayrı malzemeler üç boyutlu olarak birleşmelidirler(Kaplama metalleri ve bal peteği gibi laminar malzemeler aynı malzeme kullanıldığı için temel olarak kompozit malzeme sayılmazlar)
- c) Kompozit, kendisini meydana getiren bileşenlerin tek başlarına sahip olmayacakları özellikler göstermelidir,
- d) İnsanlar tarafından üretilmelidir.

### 2.1.1. Kompozit malzemelerin sınıflandırılması

Kompozit malzemelerin doğaları ve yapılarının açıklanmasıyla bu malzemeler üzerinde işbirliğini koruyan sınıflandırmalar yapılmaktadır. Malzeme kombinasyonları(metal-organik veya metal-inorganik), bileşen fazların karakteristikleri(matriks sistemleri veya tabaka yapılar), bileşenlerin dağılımları(sürekli, süreksiz) fonksiyonları( elektriksel veya yapısal) ve özellikleri göz önüne alınarak çok değişik sınıflandırma yapılmıştır. Yapısal bileşenlerin şekline göre yapılan genel bir sınıflandırma sistemi aşağıdaki gibi yapılabilir:

- 1) Fiberli kompozitler, fiber + matriks veya fiber ile matriksiz yapı,
- 2) Levhasal kompozitler, düz plakalar + matriks veya levha ile matriksiz yapı,
- 3) Partikül kompozitler, partiküller + partikül ile matriksiz yapı,
- 4) Doldurulmuş(veya iskelet) kompozitler, Sürekli bir matriksin ikincil bir malzemeyle doldurulması,
- 5) Tabakalı kompozitler, farklı bileşen tabakalarından oluşmuş kompozit.

Kompozit malzemelerde kullanılan matrisler, polimerlerden (termosetler ve termoplastikler) metal ve seramiklere kadar değişmektedir. Polimerler düşük yoğunluklu göreceli olarak düşük dayanıklılıktadır. Başlıca polimer matris malzemeleri polyeater, epoksi, fenol ve vinil esterdir.

Kompozit malzemeler kullanılan matriks malzemesine göre kompozitler üç ana sınıfa ayrılır:

Polimer,seramik ve metal matriksli kompozitlerdir.

Tablo 2.1. Matris, takviye elemanı ve kompozit malzeme yapı tipleri

Matris Malzemeleri	Takviye elemanları	Kompozit yapının şekli
Polimerler	Lifler	Tabakalar
Metaller	Granül	Kaplamalar
Seramikler	Whiskers	Film-Folya
	Pudra	Honey_combs (Bal Peteği)
	Yonga	Filaman sarılmış yapılar

### 2.1.2. Kompozit malzemelerin genel avantajları ve dezavantajları

Kompozit malzemelerin kullanılmasının sağladığı genel avantajlar aşağıda sıralanmıştır.

1. Farklı mekanik özellikler elde etmek için farklı katmanlardan ve farklı kombinasyonlarla kompozit malzeme inşa edilebilir.
2. Kompozit malzemeler kimyasallara, korozyona ve hava şartlarına dayanıklılık gösterir.
3. Karmaşık parçaların tek olarak üretilebilmesinden dolayı parça sayısının azalmasını sağlarlar. Böylece ara birleştirme detay ve parçalarının azalmasıyla üretim süresi kısalmaktadır.
4. Yüksek dayanıklılık/ yoğunluk oranı
5. Yüksek modül/ağırlık oranı
6. Hafif olması geniş bir kullanım alanı sağlar,
7. Hafif olmalarından dolayı 'elle ya da basit aletlerle' kolay uygulama olanakları vardır,
8. Hafif olmasından dolayı nakliye giderleri düşüktür,
9. Üretim düşük iş gücü ile yapılabilir,
10. Kolay kesilebilir ve işlenebilir,
11. Karmaşık geometriye sahip şekiller bile kolaylıkla bir kalıba enjekte etmek suretiyle üretilebilirler,
12. Üretim kolaylığının getirdiği, gün geçtikçe düşen maliyetleriyle, metallerle sıkı bir yarış halindedir,
13. Birleştirme işlemleri metallerde olduğu gibi cıvata, vida, kama v.b. pek çok bağlama elemanı yerine yapıştırma işlemi ile parça sayılarında önemli azalmalar sağlanır,
14. Metal ve seramiklere göre düşük yoğunluk ve dayanım/yoğunluk oranı da yüksektir,
15. Yorulma ve darbe dayanımı yüksektir,
16. Yüksek korozyon direncine sahip olması,
17. Düşük ısı iletkenliğine sahip olması,
18. Kimyasallara karşı yüksek direnç göstermesi,

19. İyi elektrik yalıtkanlığına sahip olması,
20. Hacimsel bazda polimer üretimi için metallere daha az enerjiye ihtiyaç duyması,
21. Harklı mekanik özellikler elde etmek için farklı katmanlardan ve farklı kombinasyonlarla CTP ler üretilebilir,
22. Yüksek aşınma mukavemetine sahiptirler,
23. Uzun yıllar bakım ve boya gibi ek bir hizmete ihtiyaç duymazlar,
24. Elektromanyetik alan oluşturmaması nedeni ile radyo ve mikro dalga frekanslarını etkilemezler,
25. Isıya bağlı uzamaları minimumdur,
26. Üretim hızı genel olarak 0,6m – 1,2m/dak. olup çekilen parça eğer uygun bir yapıya sahip ise 3m/dak. gibi yüksek bir hızla üretilmesi mümkündür,
27. Bazı plastiğin ışığı geçirmesi yani saydamlık özelliklerinin de olması cam ile rekabet etmesini de sağlamaktadır,

Kompozit malzemelerin dezavantajlarını aşağıdaki gibi sıralayabiliriz;

- a) Hammaddenin pahalı olması;
- b) Lamine edilmiş kompozitlerin özellikleri her zaman ideal değildir, kalınlık yönünde düşük dayanıklılık ve katlar arası düşük kesime dayanıklılık özelliği bulunmaktadır
- c) Malzemenin kalitesi üretim yöntemlerinin kalitesine bağlıdır, standartlaşmış bir kalite yoktur.
- d) Kompozitler kırılğan (gevrek) malzeme olmalarından dolayı kolaylıkla zarar görürler, onarımları yeni problemler yaratabilir.
- e) Malzemelerin sınırlı raf ömürleri vardır. Bazı tür kompozitlerin soğutularak saklanmaları gerekmektedir.
- f) Sıcak kurutma gerekmektedir.
- g) Kompozitler onarılmadan önce çok iyi olarak temizlenmeli ve kurutulmalıdır. Bazı durumlarda bu zor olabilir.
- h) Bazı kurutma teknikleri uzun zaman alabilmektedir.



## 2.2. Fiber Takviyeli Polimerler

Fiber takviyeli polimerler, "FRP" veya "Yapı Kompozitleri" olarak adlandırılan bu kompozitler polimer matriks malzemenin fiberle takviye edilmesinden elde edilirler. FRP ürünleri, yapısal uygulamalarda iyi bir konuma gelmiştir. Karbon fiber ve termoset polimerler gibi yüksek mukavemet ve rijitliğe sahip polimerik matriksten yapılan ileri kompozit sistemler yıllardır etkin bir şekilde kullanılmaktadır. Bunun yanı sıra, termoplastikler, Torlon, PEEK ve Ryton gibi malzemelerdeki yenilik ve gelişmeler, yapısal kompozitlerde, takviyeli plastik malzemelerin ileri uygulamalarına yeni bir boyut kazandırmıştır. Bu yeni nesil mühendislik malzemeleri, fiber takviyeli polimer matriks termoplastik kompozitler, klasik takviyeli termosetlere göre yüksek bir üstünlük ve gelişmişliğe sahiptirler.

### 2.2.1. Polimer matriksli kompozitler(PMK)

Polimerler, metal ve seramiklere göre çok daha fazla komplekstir. Matriks olarak kullanılan polimerler ucuz ve kolaylıkla çalışılabilir malzemelerdir. Aynı zamanda düşük modüle ve düşük kullanım sıcaklığına sahiptir. Termoset ve Termoplastikler olarak iki gruba ayrılan polimer matriksler genelde sürekli fiberlerde kullanılır.

Termoset matrisler: Termoset esaslı kompozit malzeme matrisleri olarak en çok kullanılanlardır. Termoset plastikler sıvı halde bulunurlar, ısıtılarak ve kimyasal tepkimelerle sertleşir ve sağlamlaşırlar. Termoset polimerlerin polimerizasyon süreci termoplastiklerden farklı olarak geri dönüşü olmayan bir süreçtir. Yüksek sıcaklıklarda dahi yumuşamazlar. Çoğu termoset matris sertleşmemeleri için dondurulmuş olarak depolanmak zorundadır. Dondurucudan çıkarılıp oda sıcaklığında bir müddet (1-4 hafta arası) bekletildiğinde sertleşmeye başlar ve özelliklerini kaybederek biçim verilmesi zor bir hâl alır ve kullanılamaz duruma gelir. Dondurucu içinde olmak şartıyla raf ömürleri ise 6 ila 18 ay arasında değişmektedir. Termoset reçineler kimyasal etkiler altında çözülmez ve olağandışı hava şartlarında dahi uzun ömürlü olmaktadır. Aşağıda en yoğun kullanılan matrisler ve genel özellikleri yer almaktadır;

1. Polyester; doymamış reçinelerdir. Özellikle denizcilik ve inşaat alanında en çok kullanılan termoset reçinedir. Kür işlemi ile sıvı halden katı hale geçebilir. Genel olarak doymamış polyester reçineye, polyester reçine veya polyester denir. Polyesterlerin farklı asitlerden kompozit malzemelerde kullanılan 2 tür polyester reçine vardır. İsoftalik polyester, daha ekonomik olan ortoftalik ve suya dayanım gibi daha iyi özelliklere sahiptir. Polyester reçinelerini polimerizasyon süreçlerinin tamamlaması için katalizör ve hızlandırıcı olarak adlandırılan ek maddelere ihtiyaç duyarlar. Türkiye’de Cam Elyaf A.Ş. nin yanı sıra Boytek Reçine, Boya ve Kimya Sanayi Ticaret A.Ş. gibi firmalar da genel amaçlı kullanımlar için polyester üretmektedir(40).

Reçinelerin avantaj ve dezavantajları;

- Kolay kullanım
- Çok düşük maliyet, 0.5 – 1 \$/kg
- Sertleşme sırasında yüksek oranda çekme
- Zehirli Sitiren gazı yayma
- Orta mekanik özellikler
- Kısa raf ömrü

2. Epoksiler; prepregs olarak havacılık, spor, ulaşım, askeri ve deniz araçları elemanları gibi geniş kullanım alanına sahiptirler. Başlıca özellikleri aşağıda verilmiştir.

- İyi mekanik özellikler,
- Suya dayanım,
- Islakken 140°C, kuruyken 220°C ‘ye kadar ısı dayanımı,
- Sertleşme sırasında düşük oranda çekme,
- Yüksek maliyet, 5 – 25 \$/kg,
- Cilde aşırı zararlı,
- Doğru karışım son derece önemlidir.

3. Vinilester; Son derece yüksek kimyasal ve çevresel dayanıma sahiptir. Son derece yüksek kimyasal ve çevresel dayanımı vardır. Polyesterden daha yüksek mekanik özellikler bulunur. Aşırı sitiren maddesi içer. İyi özellikler için ikincil kür işlemi gerekir. Sertleşme sırasında yüksek oranda çekme mukavemeti kazanır.

4.Bismaleimid (BMI); Uçak motorlarında ve yüksek ısıya maruz kalan parçalarda kullanılır. Son derece yüksek ısı dayanımına sahiptir. Yaşken 230°C, kuru halde 250°C ye kadar dayanabilir.

5.Fenolikler; Ateşe dayanım ihtiyacı olan yerlerde kullanılır. Kür işleminin buharlaşma özelliği hava boşlukların oluşmasına ve yüzey kalitesinin düşmesine neden olur. Uçakların iç bölümlerinde, deniz araçlarının motorlarında ve demiryollarında kullanılır.

- Yüksek ateş dayanımı,
- Düşük maliyet, 4 – 8 \$/kg,
- Yaş halde son derece zararlı,
- Oldukça kırılğan,
- Düşük yüzey kalitesi.

6. Silikon; Yüksek ateş dayanımına sahiptir. Yüksek ısılarda ürün özelliklerini koruyabilme özelliği vardır. Kür işlemi için yüksek ısı gereklidir.Maliyeti 30 \$/kg'dan azdır.

7. Cynate Esters; Esas olarak uçak endüstrisinde kullanılır. Mükemmel yalıtkanlık özelliğine sahiptir. Yaş durumunda 200°C'ye kadar dayanımı vardır.

Termoplastik matrisler; Termoplastik polimerlerinin çeşitlerinin çok fazla olmasına rağmen matris olarak kullanılan polimerler sınırlıdır. Termoplastikler düşük sıcaklıklarda sert halde bulunurlar ısıtıldıklarında yumuşarlar. Termosetlere göre matris olarak kullanımları daha az olmakla birlikte üstün kırılma tokluğu, hammaddenin raf ömrünün uzun olması, geri dönüşüm kapasitesi ve sertleşme prosesi için organik çözücülere ihtiyaç duyulmamasından dolayı güvenli çalışma ortamı sağlaması gibi avantajları bulunmaktadır. Bunun yanı sıra şekil verilen termoplastik parça işlem sonrası ısıtılarak yeniden şekillendirilebilir. Oda sıcaklığında katı halde bulunan termoplastik soğutucu içinde bekletilmeden depolanabilir. Termoplastikler yüksek sertlik ve çarpma dayanımı özelliğine de

sahiptirler. Yeni gelişmelerle termoplastiğin sağladığı bu artı değerleri son dönem termoset matrislerinden 977-3 Epoksi ve 52450-4 BMI reçineleri de sağlamaktadırlar.

Termoplastiklerin kompozit malzemelerde matris olarak tercih edilmemelerinin başlıca nedeni üretimindeki zorlukların yanı sıra yüksek maliyetidir. Oda sıcaklığında düşük işleme kalitesi sağlarlar, bu onların üretimde zaman kaybına yol açmasına neden olur. Bazı termoplastikleri istenilen şekillere sokabilmek için çözücülere ihtiyaç duyulabilir. Termoplastikler termosetlere kıyasla hammaddesi daha pahalıdır.

Başlangıçta amorf yapılı reçinelerden polietersulfon (PES) ve polieterimid (PEI) matris olarak kullanılmaktaydı. Sonraki dönemde ise havacılık sektörü uygulamaları için çözücülere karşı dayanım önemli bir kriter olarak ortaya çıkmıştır. Bu ihtiyaç sonrasında Polietereterketon (PEEK) and Polifenilen sulfid (PPS) gibi yarı-kristal yapılı plastik malzemeler geliştirilmiştir. Ayrıca sınırlı oranlarda Poliamidimid (PAI) ve Poliimid gibi plastiklerde kullanılmaktadır. Bu polimerler diğer termoplastiklerden farklı olarak polimerizasyonlarını kür aşamasında tamamlarlar. En yoğun çalışmalar ise PA, PBT/PET ve PP gibi düşük sıcaklıklarda kullanılan polimerlerin üzerine yapılmıştır. Tüm bu polimerlerin haricinde ABS, SAN, SMA (StirenMaleikAnhidrit), PSU (Polisülfon), PPE (Polifenilen Eter) matris olarak kullanılır.(41)

Termoplastik reçineler malzemenin çekme ve eğilme dayanımlarının artırılması için kullanılırlar. Otomotiv sektöründe yaygın olarak kullanılan termoplastikler uçak sanayisinde de yüksek performanslı malzeme çözümlerinde kullanılmaktadırlar. Çoğunlukla enjeksiyon ve ekstrüzyon kalıplama yöntemleri ile üretilen termoplastiklerin üretiminde GMT (Glass Mat Reinforced Thermoplastics / Preslenebilir Takviyeli Termoplastik) olarak ta üretilmektedir (Bkz. kompozit malzeme üretim yöntemleri). Bu yöntemle hazırlanan takviyeli termoplastikler soğuk plakaların preslenebilmesi ve geri dönüşüm sürecine uygunluğundan dolayı özellikle otomotiv sektöründe tercih edilmektedir(42).

Tablo2.2 PMK'lerd matriks malzemesi olarak kullanılan polimerlerin mekanik özellikleri

MALZEME	$\rho(\text{kg/m}^3)$	E(GPa)	$\sigma^*$ (MPa)	$\varepsilon^*$ (%)
<b>TERMOSETLER</b>				
Polyester	1100-1230	3,1-4,6	50-75	1,0-6,5
Vinylester	1120-1130	3,1-3,3	70-81	3,0-8,0
Epoxy	1100-1200	2,6-3,8	60-85	1,5-8,0
Phenolic	1000-1250	3,0-4,0	60-80	1,8
PUR	1200	0,7	30-40	400-450
BMI	1200-1320	3,2-5,0	48-110	1,5-3,3
PI	1430-1890	3,1-4,9	100-110	1,5-3,0
<b>TERMOPLASTİKLER</b>				
PP	900	1,1-1,6	31-42	100-600
PA	1100	2,0	70-84	150-300
PPS	1360	3,3	84	4,0
PEEK	1260-1320	3,2	93	50
PEI	1270	3,0	105	60
PES	1370	3,2	84	40-80
PAI	1400	3,7-4,8	93-147	12-17

Takviye malzemeleri (Fiberler): Kompozit malzemelerde kullanılan fiberlerin fiziksel biçimleri, oluşturulan yeni malzemenin özellikleri üzerinde çok önemli bir faktördür. Takviyeler temel olarak 3 farklı biçimde bulunmaktadır. Bunlar parçacıklar, süreksiz ve sürekli fiberlerdir. Parçacık genelde küresel bir biçimde olmamasına rağmen her yönde yaklaşık olarak eşit boyutlardadır. Çakıl, mikro-balonlar ve reçine tozu parçacık takviyelerine örnekler arasında sayılabilir. Takviye malzemelerinin bir boyutu diğer boyutlarına göre daha fazla olduğunda elyaflardan bahsetmeye başlarız. Süreksiz elyaflar (doğranmış elyaflar, öğütülmüş elyaflar veya whiskers-püskül) birkaç milimetreden birkaç santimetreye kadar değişen ölçülerde olabilmektedir. Çoğu lifin çapı birkaç mikrometreyi geçmemektedir. Bu nedenle elyafların parçacık halden lif haline geçişi için çok fazla bir uzunluğa gerek yoktur.

Sürekli elyaflar ise tel sarma yöntemi gibi yöntemlerde kesilmeden ip şeklinde kullanılmaktadır. Elyaflar en yüksek mekanik özelliklerini enlerinden daha çok

boylarına gösteririler. Bu özellikler kompozit malzemelerin metallere rastlanmayan aşırı anisotropik malzeme özelliği göstermelerine neden olur. Bu nedenle tasarım aşamasında elyafların reçine içindeki yerleşimleri ve geometrilerini göz önünde bulundurmak çok önemlidir. Malzemenin anisotropik özelliği tasarım aşamasında ürünün uygun yerinde kullanılarak avantaja dönüşebilir.

Bazı durumlarda malzemenin dayanımı artırmak, tüm yönlerde eşit mukavemet elde etmek için elyaflar kumaş olarak dokunurlar. Sürekli liflerle hazırlanan dokuma elyaf kumaşlarının farklı amaçlar için geliştirilmiş türleri vardır.

Cam elyafının günümüzde en çok kullanılan ve geçerli takviye malzemesi olmasına rağmen gelişmiş kompozit malzemelerde genellikle saf karbonun elyafı kullanılmaktadır. Karbon elyafı cam elyafına oranla daha güçlü ve hafif olmasına rağmen üretim maliyeti daha fazladır. Hava araçlarının iskeletlerinde ve spor araçlarında metallerin yerine kullanılmaktadır. Karbon elyafından daha güçlü ve aynı zamanda daha pahalı olan ise bor elyafıdır.

Polimerler matris olarak kullanılmalarının yanısıra kompozitler için elyaf üretilmesinde de kullanılmaktadır. Kompozit malzemeye çok yüksek düzeyde sağlamlık katan ve sertlik kazandıran Kevlar (Aramid) bir polimer elyafıdır. Hafiflik ve güvenilir konstrüksiyon amaçlanan ürünlerdeki kompozit malzemelerde aramid kullanılır. Malzemelerin anisotropik ve izotropik özellikleri uzun lifli elyaflar kullanıldığında liflerin yönlerini değiştirilerek farklı yönlerde farklı mekanik özellikler elde etmek mümkündür. Bu duruma anisotropik özellikler denir. Metal gibi bazı malzemeler her yönde aynı mekanik özellikleri gösterirler, bu duruma ise izotropik özellik denir.

Kompozit malzemelerde kullanılan başlıca elyaf türleri;

1. Cam elyafı,
2. Karbon (Graphite) elyafı, (PAN -polyacrylonitrile- ve zift kökenli)
3. Aramid (Aromatic Polyamid) elyafı, (Ticari ismi; Kevlar-DuPont)
4. Bor elyafı,
5. Oksit elyafı,
6. Yüksek yoğunluklu polyetilen elyafı,
7. Poliamid elyafı,

8. Polyester elyafı,
9. Doğal organik elyaflar

Bu elyaflar arasından en çok Cam, Karbon ve Aramid elyafları kullanılmaktadır. Bu üç elyaf türü de güçlü, sert ve sürekli biçimde üretilebilmektedirler. cam elyafı

Glass Fibri( Cam Elyafı): Cam elyafı silika, kolemanit, alüminyum oksit, soda gibi cam üretim maddelerinden üretilmektedir. Cam elyafı, elyaf takviyeli kompozitler arasında en bilinen ve kullanılanıdır. Cam elyafı özel olarak tasarlanmış ve dibinde küçük deliklerin bulunduğu özel bir ocaktan eritilmiş camın itilmesiyle üretilir. Bu ince lifler soğutulduktan sonra makaralara sarılarak kompozit hammaddesi olarak nakliye edilir. Özellikle cam elyafı ile matris arası yapışma gücünü arttıran "silan" bazlı ve elyaf üzerinde ince film oluşturan kimyasalların sonra kullanım sahaları artmıştır.

Elyaf lar işlem sırasında dayanıklılıklarının %50'sini kaybetmelerine rağmen son derece sağlamdırlar. Cam elyafı halen aramid ve karbon elyaflarından daha yüksek dayanıklılık özelliğine sahiptir. Elyaf kumaşları genellikle sürekli cam elyafının lifleri ile üretilmektedir. İşlemler sırasında değişik kimyasalların eklenmesi ve bazı özel üretim yöntemleri ile farklı türde cam elyafı üretilebilmektedir;

A Cam - Pencerelerde ve şişelerde en çok kullanılan cam çeşididir. Kompozitlerde çok fazla kullanılmaz.

C Cam - Yüksek kimyasal direnç gösterir. depolama tankları gibi yerlerde kullanılır.

E Cam -Takviye elyaflarının üretiminde en çok kullanılan cam türüdür. Düşük maliyet, iyi yalıtım ve düşük su emiş oranı özelliklerine sahiptir.

Türkiye'de Şişecam Grubuna bağlı olan Cam Elyaf Sanayii A.Ş. tarafından E camı elyafı üretilmektedir. Hem yurtiçine, hem yurt içine satış yapan firmadan doğrudan veya bayileri aracılığıyla ürün satın almak mümkündür. 1976'dan beri faaliyet gösteren firma Avrupa'nın önemli elyaf üreticilerinden biridir.

S + R Cam - Yüksek maliyetli ve yüksek performanslı bir malzemedir. Yalnız uçak sanayisinde kullanılır. Elyaf içindeki tellerin çapları E Cam'ın yarısı kadardır, böylelikle elyaf sayısı fazlaşır dolayısıyla birleşme özelliklerinin daha güçlü olması anlamına gelen daha sert yüzey elde edilebilmektedir

Cam elyafının kullanım amacına bağı olarak elyaf sarma biçimleri farklı olabilir. Elyaf çapı ve demetteki lif sayısı farklılaşabilir. Cam elyafı biçimlendirildikten sonra yıpranmaya dayanımının artması için kimyasallarla bir kaplama işlemi yapılır. Kaplama malzemesi olarak genellikle elyafın kompozit malzemeye uygulanmasından önce kolaylıkla kaldırılabilen ve suyla çözülebilen polimerler kullanılmaktadır. Elyaf ile reçinenin birbirine iyi yapışması çok önemlidir. İyi yapışmamaktan dolayı birbirinden kayan takviye malzemesi ve matris, kompozit malzemenin sertliğini ve sağlamlık performansını düşürür. Bu durumun engellenmesi için elyaf kimyasallarla kaplanır.

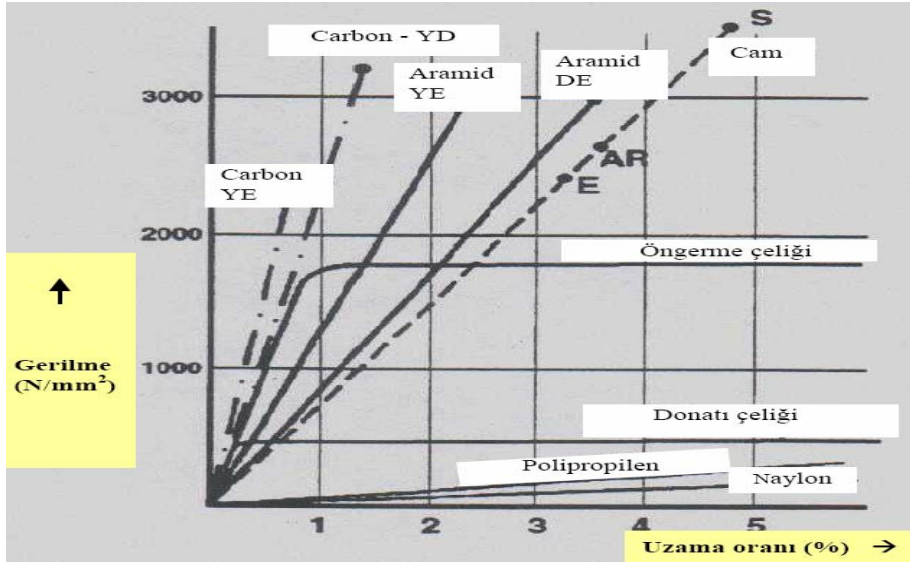
Karbon Fiberler; Karbon lifi ilk defa karbonun çok iyi bir elektrik iletkeni olduğu bilinmesinden dolayı üretilmiştir. Cam elyafının metale göre sertliğinin çok düşük olmasından dolayı sertliğin 3-5 kat artırılması çok belirgin bir amaçtı. Karbon elyafları çok yüksek ısı işlem uygulandığında elyaflar tam anlamıyla karbonlaşırlar ve bu elyaflara grafit elyafı denir. Günümüzde ise bu fark ortadan kalkmaktadır. Artık karbon fiberi de grafit fiberi de aynı malzemeyi tanımlamaktadır. Karbon elyafı epoksi matrisler ile birleştirildiğinde olağanüstü dayanıklılık ve sertlik özellikleri gösterir. Karbon fiber üreticileri devamlı bir gelişim içerisinde çalışmalarından dolayı karbon elyaflarının çeşitleri sürekli değişmektedir. Karbon elyafının üretimi çok pahalı olduğu için ancak uçak sanayinde, spor gereçlerinde veya tıbbi malzemelerin yüksek değerli uygulamalarında kullanılmaktadır.

Karbon elyafları piyasada iki biçimde bulunmaktadır:

Sürekli Elyaf - Dokuma, örgü, tel bobin uygulamalarında, tek yönlü bantlarda, ve prepreg'lerde kullanılmaktadır. Bütün reçinelerle kombine edilebilirler.

Kırılmış Elyaf - genellikle enjeksiyon kalıplamada ve basınçlı kalıplarda makine parçaları ve kimyasal valf yapımında kullanılırlar. Elde edilen ürünler mükemmel korozyon ve yorgunluk dayanımının yanı sıra yüksek sağlamlık ve sertlik özelliklerine de sahiptirler.





Şekil 2.1. Farklı türden fiber takviyeli polimerlerin gerilme\_uzama oranı grafiği

#### Karbon Elyafının Üretim Süreci;

Karbon elyafı çoğunlukla iki malzemedен elde edilir; Bunlar Zift ve PAN (Poliakrilonitril) dır.

Zift tabanlı karbon elyafları göreceli olarak daha düşük mekanik özelliklere sahiptir. Buna bağlı olarak yapısal uygulamalarda nadiren kullanılırlar. PAN tabanlı karbon elyafları kompozit malzemeleri daha sağlam ve daha hafif olmaları için sürekli geliştirilmektedir.

PAN'ın karbon elyafına birbirini takip eden dört aşamada dönüştürülmektedir;

1. Oksidasyon: Bu aşamada elyaflar hava ortamında 300 derecede ısıtılır. Bu işlem, elyaftan H'nin ayrılmasını daha ucucu olan O 'nin eklenmesini sağlar. Ardından karbonizasyon aşaması için elyaflar kesilerek graphite teknelerine konur. Polimer, merdiven yapısından kararlı bir halka yapısına dönüşür. Bu işlem sırasında elyafın rengi beyazdan kahverengiye, ardından siyah olur.
2. Karbonizasyon: Elyafların yanıcı olmayan atmosferde 3000° C'ye kadar ısıtılmasıyla liflerin 100% karbonlaşma sağlanması aşamasıdır. Karbonizasyon işleminde uygulanan sıcaklık üretilen elyafının sınıfını belirler;
3. Yüzey İyileştirme: karbonun yüzeyinin temizlenmesi ve elyafın kompozit malzemenin reçinesine daha iyi yapışabilmesi için elektrolitik banyoya yatırılır.

4. Kaplama; Elyafı sonraki işlemlerden (prepreg gibi) korumak için yapılan nötr bir sonlandırma işlemidir. Elyaf reçine ile kaplanır. Genellikle bu kaplama işlemi için epoksi kullanılır. Kompozit malzemede kullanılacak olan reçine ile elyaf arasında bir arayüz görevi görür.

Karbon elyafınının tüm diğer elyaflara göre en önemli avantajı yüksek modülüs özelliğidir. Karbon elyafı bilinen tüm malzemelerle eşit ağırlıklı olarak karşılaştırıldığında en sert malzemedir.

Aramid Fiberler; Aramid kelimesi bir çeşit naylon olan aromatik poliamid'den maddesinden gelmektedir. Aramid fiberi piyasada daha çok ticari isimleri Kevlar (DuPont) ve Twaron (Akzo Nobel) olarak bilinmektedir. Farklı uygulamaların ihtiyaçlarını karşılamak için birçok farklı özelliklerde aramid fiberi üretilmektedir.

Önemli özellikleri aşağıdaki gibi sıralanabilir;

- Genellikle rengi sarıdır,
- Düşük yoğunluktur,
- Yüksek dayanıklılık,
- Yüksek darbe dayanımı,
- Yüksek aşınma dayanımı,
- Yüksek yorulma dayanımı,
- Yüksek kimyasal dayanımı(Güçlü asit ve bazlara karşı direnci iyidir),
- Kevlar elyafı kompozitler Cam elyafı kompozitlere göre 35% daha hafiftir,
- E Cam türü elyaflara yakın basınç dayanıklılığı,
- Değişik ısılarda bile dayanımının % -80'inden fazlasını muhafaza eder,
- Rutubet, gerilme dayanımı özelliklerini ancak %5 oranında azaltabilir,
- Elektrik iletkenliği düşüktür,
- 200<sup>0</sup> C'den +200<sup>0</sup> C'ye kadar ısı altında kullanılabilir(150<sup>0</sup> C üzerinde uzun süre dayanamaz.)
- Ultraviyole ışınlardan etkilenir,
- Doğrusal olmaya davranış sergiler yani gerilmeler sonucu uzayabilir.

Tablo 2.3. Aramid Fiberlerin Mekanik Özellikleri

Fiber	Tipik Çap (Micron)	Özgül Ağırlık	Elastisite Modülü (GPA)	Çekme Mukavemeti (GPA)	Kopma Uzaması	Termal Genişleme Katsayısı $10^{-6}/C$	Poisson Oranı
Kevlar™ 49 <sup>d</sup>	11.9	1.45	131	3.62	2.8	-2.0(uzama) -59(Genişleme)	0.35
Twaron™ 1055 <sup>e</sup>	12.0	1.45	127	3.6	2.5	-2.0(uzama) -59(Genişleme)	0.35
Technora™	12.0	1.39	74	3.5	4.6	-3.0(uzama) yok(Genişleme)	0.35

Aramid elyafının dezavantajları;

1. Bazı tür aramid fiberleri ultraviyole ışınlar maruz kaldığında bozulma göstermektedir. Sürekli karanlıkta saklanmaları gerekmektedir.
2. Elyaflar çok iyi birleşmeyebilirler. Bu durumda reçinede mikroskopik çatlaklar oluşabilir. Bu çatlaklar malzeme yorulduğunda su emişine yol açmaktadır.

Aramid fiberlerinin bazı kullanım alanları;

- Balistik koruma uygulamaları; Askeri kasklar, kurşun geçirmez yelekler...
- Koruyucu giysiler; eldiven, motorsiklet koruma giysileri, avcılık giysi ve aksesuarları
- Yelkenliler ve yatlar için yelken direği
- Hava araçları gövde parçaları
- Tekne gövdesi
- Endüstri ve otomotiv uygulamaları için kemer ve hortum
- Fiberoptik ve elektromekanik kablolar
- Debriyajlarda bulunan sürtünme balatalarında ve fren kampanalarında
- Yüksek ısı ve basınçlarda kullanılan conta, salmastra vb.

En çok bilinen ve kullanılan aramid fiberi Dupont firmasının tescilli ismi olan Kevlar'dır. Kevlar 29, and Kevlar 49 olarak iki çeşidi bulunmaktadır. Kevlar 29 üstün darbe dayanımı özelliğine sahiptir ve bu nedenle çoğunlukla kurşun geçirmez yelek gibi uygulamalarda kullanılırlar.

Tablo 2.4. Belli başlı fiberlerin karşılaştırılması

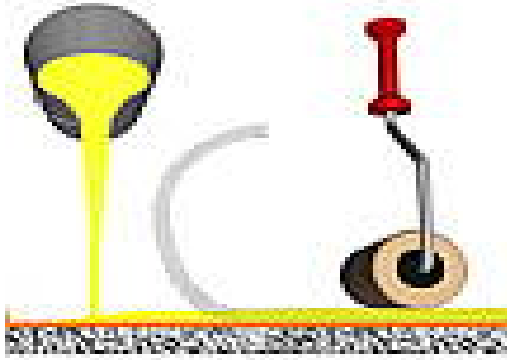
Malzeme	Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	Çekme Dayanımı (MPa)	Modülüs (GPa)
E-Cam	2.55	2000	80
S-Cam	2.49	4750	89
Alüminyum	3.28	1950	297
Karbon	2.00	2900	525
Kevlar 29	1.44	2860	64
Kevlar 49	1.44	3750	136

### 2.3. Fiber Takviyeli Polimerlerin Üretim Yöntemleri

İstenilen özelliklerde ve biçimde kompozit malzeme üretimi için bir çok yöntem bulunmaktadır. Bu yöntemlerden başlıcaları aşağıdadır;

#### 2.3.1. Elle yatırma (hand lay-up) yöntemi

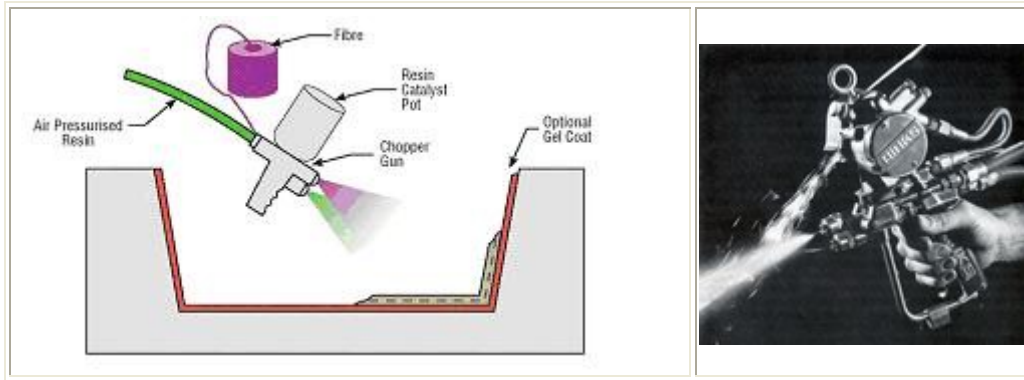
Dokuma veya kırılmış elyaflarla hazırlanmış takviye kumaşları hazırlanmış olan kalıp üzerine elle yatırılarak üzerine sıvı reçine elyaf katmanlarına emdirilir. Elyaf yatırılmadan önce kalıp temizlenerek jelkot sürülür. Jelkot sertleştikten sonra elyaf katları yatırılır. Reçine ise kompozit malzemenin hazır olması için en son sürülür Bu işlemde elyaf kumaşına reçinenin iyi nüfuz etmesi önemlidir. El yatırma tekniğinde en çok kullanılan polyester ve epoksi'nin yanı sıra vinil ester ve fenolik reçineler de tercih edilmektedir. Elle yatırma yoğun işçilik gerektirmesine rağmen düşük sayıdaki üretimler için çok uygundur.



Şekil2.2. FRP üretim yöntemlerinden elle yatırma yöntemi uygulaması

### 2.3.2. Püskürtme (spray-up) yöntemi

Püskürtme yöntemi elle yatırma yöntemini aletli şekli olarak kabul edilebilir. Kırpılmış elyaflar kalıp yüzeyine, içine sertleştirici katılmış reçine ile birlikte özel bir tabanca ile püskürtülür. Elyafın kırılma işlemi tabanca üzerinde bulunan ve bağımsız çalışan bir kırpıcı sayesinde yapılır. Püskürtülme işlemi sonrası yüzeyin bir rulo ile düzeltilmesiyle ürün hazırlanmış olur.

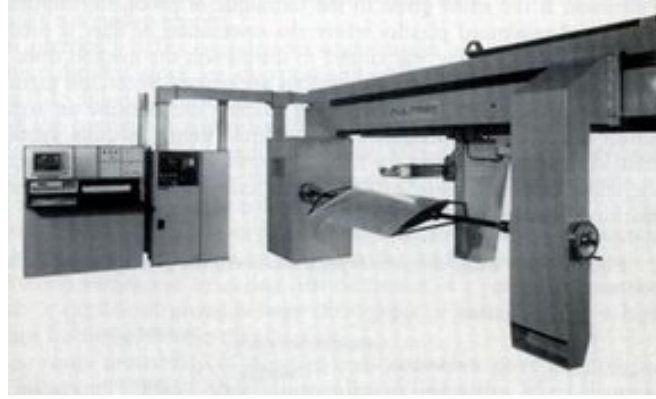


Şekil 2.3. Püskürtme Yöntemi ve Püskürtme Tabancası

### 2.3.3. Elyaf sarma (filament winding) yöntemi

Bu yöntem özel biçime sahip ürünlerin seri üretimine uygundur. Elyaf sarma yöntemi sürekli elyaf liflerinin reçine ile ıslatıldıktan sonra bir makaradan çekilerek dönen bir kalıp üzerine sarılmasıdır. Sürekli liflerin farklı açılarla kalıba sarılmasıyla farklı mekanik özelliklerde ürünler elde edilebilir. Yeterli sayıda elyaf katının

sarılmasından sonra ürün sertleşir. Ardından döner kalıp ayrılır. Bu yöntemle yapılan ürünler genellikle silindirik, borular, araba şaftları, uçak su tankları, yat direkleri, dairesel basınç tanklarıdır.

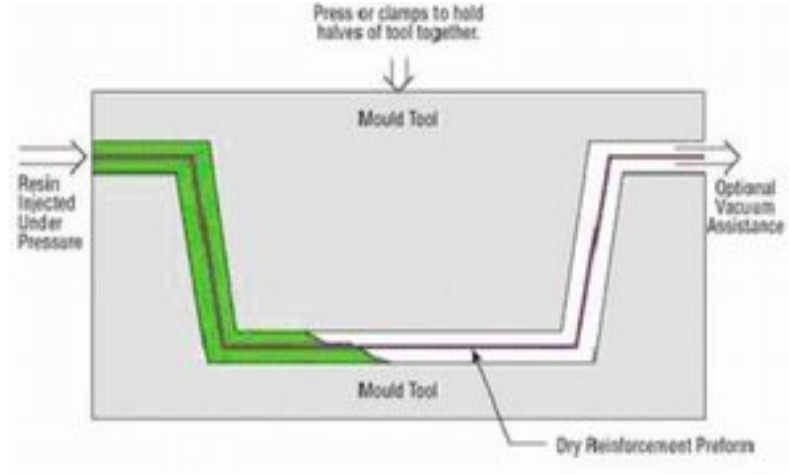


Şekil2.4. Elyaf sarma Makinesi

#### **2.3.4. Reçine transfer kalıplama RTM / reçine enjeksiyonu yöntemi**

Bu kompozit üretim yönteminde elle yatırma sistemlere daha hızlı ve uzun ömürlü olmakla birlikte iki parçalı kalıp kullanmak gereklidir. Kalıbın kompozit malzemeye yapılması çelik kalıp maliyetine göre daha düşük kalmasına neden olmaktadır.

RTM yöntemi çoğunluk jel kotlu veya jel kotsuz her iki yüzeyinde düzgün olması istenen parçalarda kullanılır. Takviye malzemesi kuru olarak keçe, kumaş veya ikisinin kombinasyonu kullanılır. Takviye malzemesi önceden kalıp boşluğu doldurulacak şekilde kalıba yerleştirilir ve kalıp kapatılır. Elyaf lar matris içinde geç çözünen reçinelerle kaplanarak kalıp içerisinde sürüklenmesi önlenir. Reçine basınç altında kalıba pompalanır. Bu süreç daha fazla zaman ister. Matris enjeksiyonu soğuk, ılık veya en çok 80°C'ye kadar ısıtılmış kaplarda uygulanabilir. Bu yöntemde içerideki havanın dışarı çıkarılması ve reçinenin elyaf içine iyi işlemesi için vakum kullanılabilir. Elyaf ın kalıba yerleştirilmesini gerektirmesinden dolayı uzun sayılabilecek bir işçilik gerektirir. Kalıp kapalı olduğu için ise zararlı gazlar azalır ve gözeneksiz bir ürün elde edilebilir. Bu yöntemle karmaşık parçalar üretilebilir. Concorde uçaklarında, F1 arabalarında bazı parçalar bu yöntemle hazırlanmaktadır.

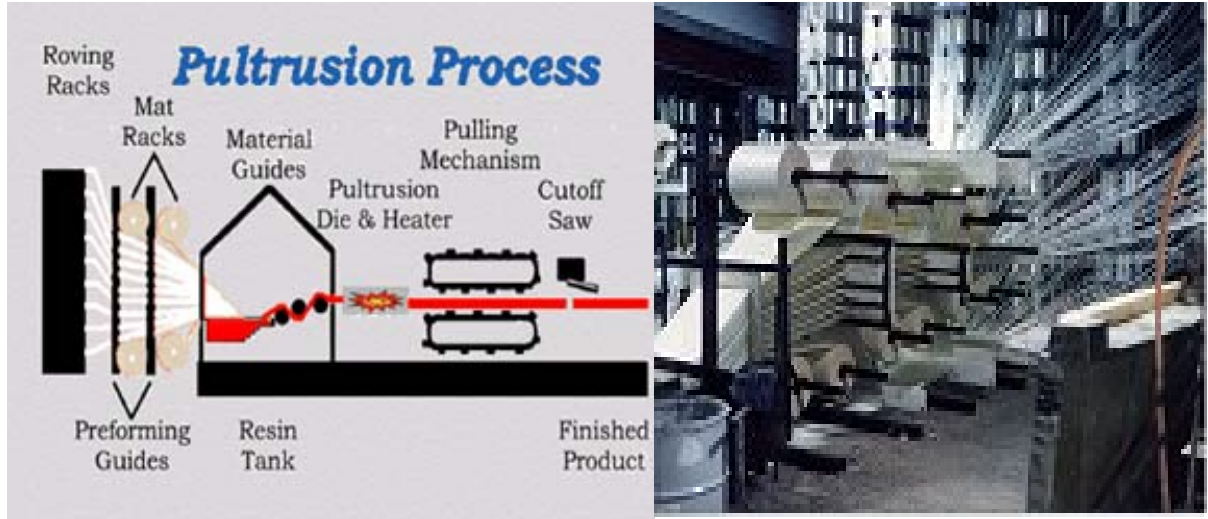


Şekil 2.5. RTM yöntemi

### 2.3.5. Profil çekme / pultruzyon (pultrusion) yöntemi

Pultruzyon işlemi sürekli sabit kesitli kompozit profil ürünlerin üretilebildiği düşük maliyetli seri üretim yöntemidir. Pull ve Extrusion kelimelerinden türetilmiştir. Sisteme beslenen sürekli takviye malzemesi reçine banyosundan geçirildikten sonra 120-150 °C'ye ısıtılmış şekillendirme kalıbından geçirerek sertleşmesi sağlanır. Kalıplar genellikle krom kaplanmış parlak çelikten yapılmaktadır. Sürekli elyaf kullanılmasından dolayı takviye yönünde çok yüksek mekanik mukavemet elde edilir. Enine yükleri karşılayabilmek için özel dokumalar kullanmak gerekmektedir.





Şekil.2.6. Profil çekme yöntemi ile FRP üretilmesi

### 2.3.6. Hazır kalıplama (compression molding) yöntemi

Hazır kalıplama bünyesinde cam elyafı, reçine, katkı ve dolgu malzemeleri içeren kalıplamaya hazır, hazır kalıplama bileşimleri olarak adlandırılan kompozit malzemelerin (SMC,BMC) sıcak pres kalıplarla ürüne dönüştürülmesidir. Karmaşık şekillerin üretilmesi, metal parçaların bünye içine gömülebilmesi, farklı cidar kalınlıkları gibi avantajları bulunmaktadır. Ayrıca ürünün iki yüzünde kalıp ile şekillenmektedir. Diğer kompozit malzeme üretim tekniklerinin olanak vermediği delik gibi komplike şekiller elde edilebilmektedir. Iskarta oranı düşüktür. Bu yöntemin dezavantajları kalıplama bileşimlerinin buzdolaplarında saklanmaları gerekliliği, kalıpların metal olmasından dolayı diğer kalıplardan daha maliyetli olması ve büyük parçaların üretimi için büyük ve pahalı preslere ihtiyaç olmasıdır. Hazır kalıplama yönteminde kullanılan bileşimler içeriklerine göre çeşitlilik göstermekle beraber en çok iki tür hazır kalıplama bileşimi kullanılmaktadır;

### 2.3.7. Hazır kalıplama pestili / SMC (sheet moulding composites)

SMC takviye malzemesi olarak kırılmış lif ile dolgu malzemesi içeren bir reçinenin önceden birleştirilmesi ile oluşan pestil biçiminde malzemedir. Sürekli lifler, 25-50 mm kırılmış olarak ve kompozitin toplam ağırlığının %25-30 oranında kullanılır. Genellikle 1m genişliğinde ve 3mm. kalınlığında üretilir.



### 2.3.8. Hazır kalıplama hamuru - BMC (bulk moulding composites)

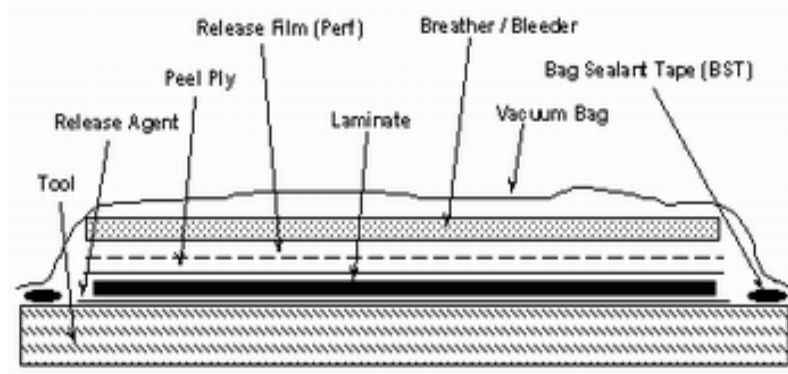
BMC takviye malzemesi olarak kırılmış lif ve dolgu malzemesi içeren bir reçinenin önceden birleştirilmesi ile oluşan hamur biçiminde malzemedir. Hazır kalıplama bileşimlerinin avantajları;

1. Çok geniş tasarım esnekliği
2. Düzgün yüzey
3. Kolayca laklanabilme, boyanabilme ve kalıp içinde yüzeyin kaplanabilmesi
4. Geri dönüştürülebilme ve hazırlığında geri dönüşümü malzeme kullanabilme
5. Metal gömme parçaların yerleştirilmesi ile montaj kolaylığı
6. Yüksek alev dayanımı
7. Isı dayanımı
8. Soğukta kırılma olmama enjeksiyon kalıplama (injection moulding)

Bu yöntem RTM'ye benzer bir yöntemdir. Farklılığı reçine/elyaf karışımının kalıp dışarısında karışmış ve eritilerek basınç altında boş kalıp içine enjekte ediliyor olmasıdır. Sadece düşük viskoziteye sahip termoset reçineler bu yöntemde kullanılabilir. Diğer yöntemlere göre daha hızlıdır. Çocuk oyuncaklarından uçak parçalarına kadar bir çok ürün bu yöntemle üretilmektedir.

### 2.3.9. Vakum bonding / vakum bagging yöntemi

Kompozit malzeme (genellikle geniş sandöviç yapılar) önce bir kalıba yerleştirilir, ardından bir vakum torbası en üst katman olarak yerleştirilir. İçerideki havanın emilmesiyle vakum torbası, yatırılan malzemenin üzerine 1 atmosferlik basınç uygulayarak aşağıya çekilir. Sonraki aşamada tüm bileşim bir fırına yerleştirilerek reçinenin kür işlemi için ısıtılır. Bu yöntem sıklıkla elyaf sarma ve yatırma teknikleri ile bağlantılı olarak uygulanır. Kompozit malzeme tamir işlemlerinde de vakum bagging yöntemi kullanılmaktadır.



Şekil2.7. Vakum bagging yöntemi

### 2.3.10. Otoklav / autoclave bonding yöntemi

Termoset kompozit malzemelerin performanslarını artırmak için elyaf/reçine oranını artırmak ve malzeme içinde oluşabilecek hava boşluklarını tamamen gidermek gerekmektedir. Bunun sağlanması için malzemeye yüksek ısı ve basınç uygulanır. Vakum bagging yöntemindeki gibi sızdırmaz bir torba ile elyaf/reçine yatırmasına basınç uygulanabilir. Fakat bir(1) atmosferden fazla düzenli ve kontrol edilebilir bir basıncın uygulanabilmesi için dışsal basınca ihtiyaç duyulur. Bu uygulama için, otoklav yönteminde de uygulanan ve kompleks şekillerde en çok kontrol edilebilen metod, dışarıdan sıkıştırılmış gazın kompozit malzemenin içinde bulunduğu kaba verilmesidir.

Otoklav kesin basıncın, ısının ve emişin kontrol edilebildiği basınçlı bir kaptır. Vacuum bagging yöntemi ile benzerdir. Fırın yerine bir otoklav kullanılır. Böylece özel amaçlar için yüksek kalitede kompozit üretebilmek için kür şartları tam olarak kontrol edilebilir. Bu yöntem diğerlerine oranla daha uzun sürede uygulanır ve daha pahalıdır.

### 2.3.11. Preslenebilir takviyeli termoplastik/glass - (GMT) yöntemi

Keçe türünde elyaf takviyesi içeren termoplastik reçine ile yapılmış plaka şeklinde preslenebilir kalıplamaya hazır özel amaçlı bir takviyeli termoplastik çeşidini tanımlamaktadır. GMT nin hazırlanması SMC ye benzemektedir. Ekstruderden çekilen bir termoplastik levha üzerine yumuşak haldeyken bir elyaf takviyesi yerleştirilir. Bu katmanların üzerine bir diğer termoplastik levhada yumuşakken

yerleştirilerek soğuk hadde silindirlerinin arasından geçirilir. Sertleşen plakalar kesilerek preslenmeye hazır duruma getirilir.

## 2.4. İnşaat Mühendisliğinde FRP Uygulamalar

### 2.4.1. Kolon güçlendirilmesinde FRP kullanımı

Kolonlar düşey taşıyıcı olmaları nedeniyle binaların ayakta durmasını sağlayan en önemli yapı elemanlardır. Düşey taşıyıcı olmadan yanında binaların maruz kaldığı dinamik yükleri temellerden alıp binanın tümüne rijitliği nispetinde dağıtan ilk sıradaki elemanlardır. Kolonlara zarar veren kuvvetler kesme, eğilme, burkulma ve basınç olarak sıralanabilir. Bu kuvvetlerin tamamı birbirleriyle tamamı birbirleriyle irtibatlıdır. Eğilme donatılarındaki yetersizlik binanın rijitliğini azaltarak daha fazla deplasman yapmasına sebep olacak ve burkulmaya yol açacaktır. Eğilme donatısındaki fazlalık ise kolonun rijitleşmesine sebep olacak çekme donatısı akmadan basınç kırılması meydana gelecek ve toptan göçmeye sebep olacaktır. Eğer sargı donatılan olan etriyeler eksik olursa kolon, kesme kuvvetlerine mukavemet gösteremeyecek ve ani bir kırılmaya maruz kalacaktır. Etriyeler, aynı zamanda, kolon betonu basınç dayanımını aşmış büzülse bile kolonun dağılıp parçalanmasını binanın engeller.



Şekil 2.8. Hasarlı Kolonların FRP ile Güçlendirilmesi

FRP'ler, kolonlarda güçlendirme amacıyla kullanılabilir etkili ve yeni nesil malzemelerdir. Eğilme mukavemetinin ve rijitliğin artırılması için boylamasına uygulanırlar. Kesme mukavemetinin, sünekliğin, basınç mukavemetinin ve sismik dayanımın artırılması için enlemesine uygulanırlar.

Sağlam kolonlar üzerinde yapılan deprem testlerinde görülmüştür ki kolon yüzeyinde en ufak bir çatlak belirmesi kolonun gücünün sınırına geldiğinin işaretidir. Yapılan deprem simülasyonlarında kolonda çatlak belirdikten sonra, çatlak ortaya çıkaran darbenin 1.2 ila 1.5 misli bir darbe, kolonun tamamıyla yıkılmasına neden olmuştur. Yapılan testlerde FRP sarılı kolonların, artan sismik ve tekrarlı yüklere karşı, daha fazla deplasman yaparak enerji sönmülediği görülmüştür.

Kolonlarda sargılama (confinement) etkisiyle mukavemet artırılması bizim yönetmeliğimizde ihmal edilerek tanınmasa dahi, yapılan testler sonucu, bunun bilhassa yuvarlak kolonlarda daha sonra da kare kolonlarda geçerli olduğu görülmüştür. FRP ile sargı kalınlığı ayarlanarak basınç mukavemeti % 100 oranında bile artırılabilir. Bu olay bir su fiçisini çevreleyen çelik kemerlerin basınç kuvvetlerini taşımasına benzetilebilir. Katı maddelerde de (örneğin beton) düşey yükler sonucu, düşey büzülme ve buna bağlı olarak yanıl genişleme meydana gelir. Bu bağıntıya Poisson oranı denir. Buradan hareketle, yanıl deplasmanlar kısıtlanırsa düşey yük taşıma kapasitesinin artırılabilir sonucuna varılır. Kolon-Kiriş birleşim bölgelerinde etriye sıklaştırmasına dikkat edilmemiş olan eski yapılarda FRP sarılmak suretiyle bu eksiklik giderilebilir.

Genelde bina bodrumlarında sık rastlanan bant pencerelerin sebep olduğu kısa kolon etkisiyle oluşan yıkıcı kesme kuvvetlerine karşı FRP sargılarına ideal bir çözümdür. Statik ve dinamik kuvvetler haricinde kolon donatılarında korozyon dolayısıyla kesit azalması meydana gelir. Bu olaya rutubetli ve asidik ortamlarda, deniz suyuna maruz yerlerde sıkça rastlanır. Korozyon sonucu donatıda meydana gelen mukavemet ve aderans kaybını telafi etmek için FRP'ler gereken yönlerde uygulanırlar. FRP içerisindeki reçine beton ve çeliğin hava ile irtibatını keser. Buhar difüzyonuna izin vermez, kolonu asit ve alkalilerden korur. CFRP ( Karbonfiber) malzemeler bunun için idealdir.



Şekil 2.9. FRP sargılama örnekleri

#### 2.4.2. Kiriş güçlendirilmesinde FRP kullanımı

Kirişler, yapılar için kolonlardan sonra en önemli taşıyıcı elemanlardır. Döşemelerden aldıkları düşey yükleri kolonlara aktarırlar. Deprem esnasında kolonların beraber hareket etmesini sağlar ve deprem yüklerini kolonların birinden diğerine aktarır. Süneklik düzeyi yüksek çerçeve sistemlerde kirişlerin kolonlara göre daha zayıf olması istenir. Gerekirse mafsallaşmasına bile izin verilir, önemli olan kolonların stabilizesini kaybetmemesidir.

Bu sebeple, genelde kirişlerin açıklık bölgesinde eğilme, mesnet bölgelerinde ise kesme kuvvetine karşı güçlendirme yapılır. Eğilme (orta açıklık) bölgesinde yapılacak gereğinden fazla güçlendirme, eğilme donatısı kopmadan basınç bölgesindeki betonun ezilmesine yol açar. Bu kırılma ani, gevrek ve istenmeyen bir kırılma şeklidir. Eğilme bölgesinde meydana gelebilecek bir hasarda önce kullanımları FRP malzemenin kopması, ondan sonra çelik donatıların akması, daha sonra betonun ezilmesi istenir.



Şekil 2.10. Kirişlerde Kesmeye Karşı U Şeklinde Dilimler Halinde FRP Uygulaması

FRP'ler kirişin eğilme bölgesinde boyuna, kesme bölgesinde ise  $45^\circ$  ve  $135^\circ$  açılarda uygulandığında maksimum performanslarını gösterirler. Hasarlı bir kiriş FRP ile güçlendirildiğinde orijinal kirişin tasarım kapasitesi ve daha üzeri kapasiteye ulaşılabilir.

FRP şeritler kirişlerde etriye eksikliklerini gidermek için kirişin üç yanını kuşatacak biçimde U şeklinde uygulanabilirler.

### 2.4.3 Döşeme güçlendirilmesinde FRP kullanımı

Döşemeler katların konumunu belirleyen, devamlı üzerinde dolaştığımız, sonsuz rijit kabul edilen, düşey taşıyıcı elemanlardır. Döşemelerde en sık görülen hasar aşın yüklemelerden meydana gelen sehimlerdir. Bu, döşeme altındaki donatıların akması sonucu meydana gelir. Döşemelerde genelde eğilmeye karşı güçlendirme yapılır. Depremlerde döşemelerde kesme kuvvetinden meydana gelen hasarlara fazlaca rastlanmaz. Döşemeler plak (shell) elemanlar olduğu için kesitin tamamının çekmeye çalıştığı kabul edilir. Döşemelerde yapılacak güçlendirmede FRP lamine şeritler veya kumaşlar açıklık bölgesinde, alttan (x ve y doğrultusunda), mesnet bölgesinde üstten yapıştırılarak yük taşıma kapasitesi ve eğilme mukavemeti artırılır.



Şekil 2.11. Döşemelerde FRP Laminat Uygulaması

Özellikle köprü tabliyelerin de artan servis yüklerine karşı, uygulama kolaylığı, bakım masraflarının azlığı, uygulama esnasında trafiğin durdurulmaması gibi sebeplerle FRP güçlendirme sistemleri tercih edilmektedir.

FRP'ler son yıllarda pultrüzyon metodu ile profil şeklinde imal edilerek başlı başına köprü tabliye sistemi olarak da kullanılmaktadırlar.

#### 2.4.4. Duvarlarda ve yığma yapılarda FRP kullanımı

Dolgu Duvarlar; Tuğla duvarlar, yapılarda çerçeve aralarında dolgu malzemesi olarak kullanılan, taşıyıcı özelliği olmayan fakat son depremde binanın rijitliğine katkıda bulunduğu ve çevrelediği kolonların deplasmanını kısıtlayarak burkulmasını önlediği anlaşılan elemanlardır. Dolgu duvarlar, depremde çerçeve sisteminin aşın deplasman yaparak enerji sönümlemesi yerine bu enerjiyi kendi bünyelerinde parçalanmak ve çatlamak suretiyle yok etmiş, binaların yıkılmasını zorlaştırmış, bir nevi betonarme perde görevi yapmışlardır. Dolgu duvarlarda yapılacak en iyi güçlendirme kolon ve kirişlerden ayrılarak kütle halinde düşmesini engellemektir. Bu yüzden 00/90° açıda dokunmuş FRP kumaşlar birleşim yerlerine yapıştırılır. Eğer binanın betonarme sisteminin güçlü olduğu tespit edilmiş ve muhtemel bir depremde duvarlarda da

çatlama ve kırılma olması istenmiyorsa, duvarlarda eğilmeye karşı boyuna, kesmeye karşı enine doğrultuda FRP uygulanabilir. Maliyet unsurları da göz önünde bulundurularak karbona göre daha ucuz olan cam elyaf (GFRP) sistemi tercih edilebilir.

Ayrıca ticari veya stratejik değeri olan binaların ( bankalar, emniyet müdürlükleri gibi) duvarlarının çarpma ve patlamalara dayanıklı olması için de FRP sistemler uygulanabilir.



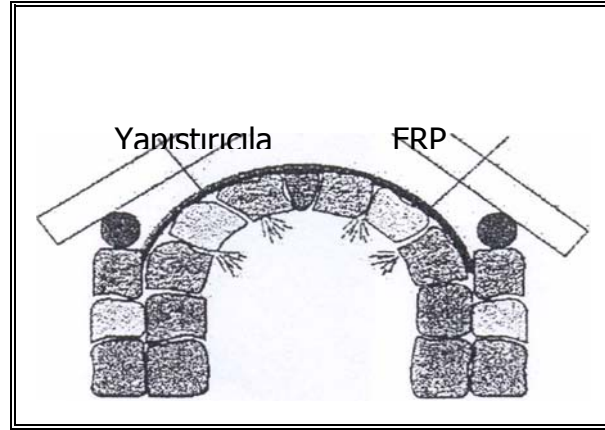
Şekil 2.12. FRP Kumaşların Duvarlarda Kullanımı

Yığma Yapılar; Yığma yapıların duvarları taşıyıcıdır.Bu duvarların kesmeye ve eğilmeye karşı mukavemeti FRP sistemlerle artırılabilir.Eğer bu duvarlar hasar gördüyse, çatlaklar Epoksi bazlı yüksek mukavemetli tamir harçlarıyla doldurulur ve tüm yüzeye FRP kumaş yapıştırılır. Tarihi yapıların kubbelerindeki hasarların gidermek için FRP sistemler dıştan uygulanırlar tekrar üzerleri kurşun kaplandığında yapılan güçlendirme belli olmaz ve tarihi doku bozulmamış olur(Şekil 2.13).





Şekil 2.13. Eski Tarihi binaların Restorasyon yada Güçlendirilmesinde FRP Kullanımı



Şekil 2.14. Taş Yapılarda FRP Uygulaması

Taş kemerin üzerinden veya altından FRP uygulaması yapılarak taşların sarsıntı anında birbirlerinden ayrılması engellenir.

### **BÖLÜM 3. CFRP PLAKALARLA BETONARME KİRİŞLERİN GÜÇLENDİRMESİNDE KULLANILAN HESAP ADIMLARI VE KİRİŞLERİN YENİLME BİÇİMLERİ**

Karbon fiber takviyeli polimerlerin(CFRP) betonarme yapı elemanlarında kullanılması düşüncesi beraberinde bu çalışmaya ait bir standart veya uygulama hesap esaslarını içeren dizayn rehberlerinin hazırlanması gerekliliğini doğurmuştur. Bu amaçla birçok ülkede birbirinden bağımsız ancak birbirleriyle ilintili birçok araştırma, teknik raporlar halinde düzenlenerek dizayn rehberi haline getirilmiştir.

Bu alandaki ilk çalışma, 1989 yılında Japon İnşaat Mühendisleri Topluluğu(JSCE) tarafından “ Sürekli Fiber Takviye Malzemeleri(CFRM)” üzerine olmuştur. Özellikle 1995 yılında meydana gelen Hyogoken-Nanbu (Kobe) depremi sonrasında Japonya’da birçok yapıda ciddi hasarlar oluşması yapıların güçlendirilmesi üzerine önemli çalışmaların gerçekleşmesine neden olmuştur(38). Güçlendirme çalışmalarında FRP’li malzemeler kullanılması program dahilinde ACI ile ortaklaşa yürütülmüştür. Bu çalışmalar geliştirilerek 2001 yılında JSCE tarafından hazırlanan bir çalışma ile “FRP EBR” başlığı altında “Japonya Yapıları Felaketlerden Koruma Kurumu(JBDPA)” tarafından uygulamaya sokulmuştur(43).

Kanada İnşaat Mühendisleri Topluluğu tarafından oluşturulan teknik komite tarafından “Köprü ve Binalarda ileri kompozit malzeme kullanımı” üzerine gerçekleştirilen çalışmalar 1996 yılında “ Kanada otoyol köprüleri dizayn kodu(CHBDC)” olarak standartlaştırılmıştır[37].

ABD’ de 1991 yılında Amerikan Beton Enstitüsü(ACI) tarafından oluşturulan komitenin Fiber Takviyeli Polimer Güçlendirici Elemanlar üzerine çalışmaları 2001 yılında son hali verilerek rapor halinde sunulmuştur(ACI 440.2R-02)[39].

Avrupa’da ise 1991 yılında Avrupa Topluluğu tarafından maddi destek sağlanan ve 1991 yılında 5 yıllık BRITE/EURAM projesi kapsamında “ Metal olmayan beton

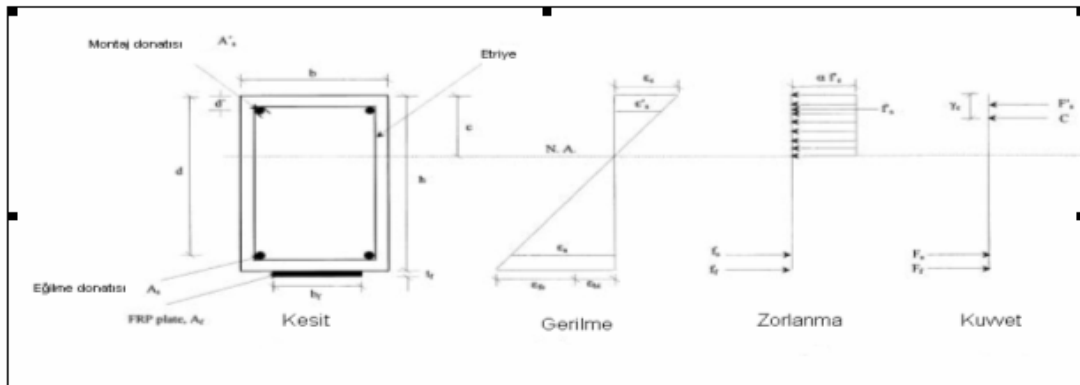
donatısı olarak fiber kompozit elemanlar ve teknikleri” başlıklı çalışma ile başlanmıştır[41]. 1993’te başlayıp 1997’de son bulan EUROCRETE projesi ile çalışma daha da genişletilmiştir. Sonuç olarak 1996 yılında fib Task Group 9.3 tarafından hazırlanan “FRP takviyeli Beton Yapılar” adlı çalışma ile dizayn prosedürü haline getirilmiştir[40].

### 3.1. Betonarme Kirişlerin Güçlendirilmesinde CFRP Plakalar Kullanarak Kiriş Eğilme Dayanımının Arttırılması

Bu bölümde, betonarme kirişlerin eğilme dayanımlarının karbon fiber takviyeli polimerlerle (CFRP) güçlendirilmesine ait hesap adımları verilmiştir[50].

Burada, LUSAS [33] programı kullanarak analizi gerçekleştirdiğimiz kiriş modeli esas alınarak hesap adımları irdelenmiştir. Hesap adımlarında ACI 440.2R-02[39], İngiliz dizayn prosedürü olan TR 55[42] ve Kanada İnşaat mühendisleri topluluğu tarafından geliştirilen CHBDC[37] değerleri kullanılmıştır.

CFRP kullanılarak betonarme kiriş güçlendirilmesi sırasında oluşan gerilme, zorlanma ve kuvvet değerleri aşağıdaki şekilde verilmiştir.



Şekil 3.1. Kiriş kesitinde meydana gelen Gerilme, Zorlanma ve Kuvvet Diyagramları

1. Adım. Bu adımda güçlendirilmemiş mevcut kirişin taşıyabileceği maksimum moment kapasitesi bulunur. Bu değer ile güçlendirmenin taşıma momenti kapasitesinde meydana getireceği değişim irdelenir.

2.Adım : FRP'nin dizayn malzeme özelliklerinin belirlenmesi

CFRP' nin dizayn akma eğilme gerilmesi  $f_{fd}$ , ise

$$f_{fd} = C_E \cdot x f_{fu} \quad (3.1.1)$$

CFRP' nin dizayn kopma uzaması  $\varepsilon_{fu}$ , ise

$$\varepsilon_{fd} = C_E \cdot x \varepsilon_{fu} \quad (3.1.2)$$

ile hesaplanır.

3. Adım:

Kiriş alt tabakasındaki mevcut uzama  $\varepsilon_{bi}$ ,

$$\varepsilon_{bi} = \frac{M_0 \cdot (h - c_0)}{E_C \cdot I_{r0}} \quad (3.1.3)$$

Değerinden bulunur.

4.Adım: Dengeli Plaka oranı(  $\rho_{fb}$ )nın bulunması,

Kritik basınç derinliği  $d_c$ ,

$$d_c = \left( \frac{\varepsilon_u - \varepsilon_y}{\varepsilon_u + \varepsilon_y} \right) \cdot d = \quad (3.1.4)$$

İle hesaplanır. Burada  $d_c > d'$  olduğunda dengeli durumda basınç donatısı akmıştır denir.

Ayrışma faktör değeri( $k_m$ ), (ACI komitesi tarafından hazırlanan 440 nolu raporda belirlenmiş değer) aşağıdaki denklem ile hesaplanır.

$$k_m = \frac{1.0 (f'_c \cdot f_{ctm})^{1/4}}{1.2 \cdot n \cdot t_f \cdot \gamma \cdot \varepsilon_{fd} (E_f)^{1/2}} \leq 0.5 \quad (3.1.5)$$

nötral aks derinlik oranı (c/d),

$$k_1 = \frac{\varepsilon_u}{\varepsilon_u + \varepsilon_y} \quad (3.1.6)$$

ifadesi ile bulunur. CFRP deki etkili zorlanma,  $\varepsilon_{fe}$ ,

$$\varepsilon_{fe} = \frac{(h - k_1 \cdot d)}{k_1 \cdot d} (\varepsilon_u - \varepsilon_{bi}) \quad (3.1.7)$$

Betonda maksimum gerilmeye uygun zorlanma değeri  $\varepsilon_{c0}$ ,

$$\varepsilon_{c0} = \frac{2 \cdot f_c'}{E_c} \ll \varepsilon_{cu} \quad (3.1.8)$$

$\alpha$ =Temel Gerilme faktörü ise;  $\varepsilon_c = \varepsilon_{cu}$  ise  $\alpha=0.92$  alınabilir.

Dengeli Plaka Oranı ( $\rho_{fb}$ ),

$$\rho_{fb} = \frac{\left[ \frac{(k_1 \cdot d - d')}{k_1 \cdot d} \varepsilon_{cu} \cdot E_s \cdot \rho' + \alpha \cdot f_c' \cdot k_1 - \rho \cdot f_y \right]}{\varepsilon_{fe} \cdot \varepsilon_f} = \quad (3.1.9)$$

Değerinden hesaplanır.

5. Adım: İzin verilen maksimum CFRP oranını bulmak için

$$\rho_{fmax} = 0.75 \times \rho_{fb} \quad (3.1.10)$$

6. Adım: CFRP plakasının boyutlarını seçmek dikkat edilecek nokta plaka oranının maksimum plaka oranından az olmasıdır. Plaka Oranı  $\rho_f$ ,

$$\rho_f = \frac{b_f \cdot t_f}{b_f \cdot d} < \rho_{max} \quad (3.1.11)$$

7. Adım: Yetersizlik modu için Dengeli plaka oranı ( $\rho_{f,bb}$ ) nın hesaplanması

Dengeli plaka oranı ( $\rho_{bb}$ ), betondaki basınç donatısının maksimum gerilmeye ulaştığı anda kompozit plakanın da maksimum etkili gerilmesine ulaştığı durumu ifade eder.

Nötral aks derinlik katsayısı  $k_2$  değeri;

$$k_2 = \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu} + k_m \varepsilon_{ftd} + \varepsilon_{bi}} \quad (3.1.12)$$

$$\rho_{f,bb} = \frac{\alpha \cdot f_c' \cdot k_2 \cdot \frac{h}{d} + \varepsilon_s' \cdot E_s \cdot \rho' - \varepsilon_y \cdot E_s \cdot \rho}{k_m \cdot \varepsilon_{ftd} \cdot E_f} \quad (3.1.13)$$

İfadeleri ile bulunur.

8. Adım: Kritik plaka oranının belirlenmesi ( $\rho_{f,ef}$ ),

$$c = \frac{\varepsilon_y \cdot h + k_m \varepsilon_{fd} \cdot d'}{k_m \cdot \varepsilon_{fd} + \varepsilon_y} \quad (3.1.14)$$



$$V_{frp} = 2f_{frp,e} t_{frp} w_{frp} \frac{h_{frp,e} (\cot \theta + \cot \beta) \sin \beta}{s_{frp}} \quad (3.2.2)$$

olarak verilmiştir. Burada  $h_{frp,e}$ , FRP'nin etkili yüksekliği olup,

$$h_{frp,e} = z_b - z_t \quad (3.2.3)$$

ile bulunur. Buradaki  $z_b$ ,  $z_t$  ifadeleri ise etkili FRP'nin giriş alt ve üst noktasına göre koordinatlarını ifade etmektedir. Bu değerler,

$$z_t = d_{frp,t} \quad (5.2.4a) \quad \text{ve} \quad z_b = [d_{frp} - (h - d)] - 0.1d = 0.9d - (h - d_{frp}) \quad (3.2.4b)$$

ifadelerinden bulunur. Buradaki  $d_{frp,t}$ , FRP'nin en üst kenarından beton basınç yüzeyi arasındaki mesafeyi,  $h$  giriş yüksekliğini,  $d_{frp}$ , FRP en alt kenarından beton basınç yüzeyi arasındaki mesafeyi,  $d$  ise faydalı yüksekliği tanımlar.

$V_{frp}$  'nin bulunması ile ilgili birçok farklı çalışma gerçekleştirilmiştir. Avrupa birliğinde sıklıkla kullanılan dizayn rehberi **fib14**'de bu değer[40],

$$V_{fd} = 0.9 \varepsilon_{fd,e} E_{fu} \rho_f b_w d (\cot \theta + \cot \beta) \sin \beta \quad (3.2.5)$$

olarak tanımlanmıştır. İngilizlerin kullandığı dizayn rehberinde (**Concrete Society-Technical Report 55**)[42] bu değer,

$$V_{Rf} = \frac{1}{\gamma_{mF}} \frac{A_{fs} (E_{fd} \varepsilon_{fe}) \sin \beta (1 + \cos \beta) d_f}{s_f} \dots \dots \dots (3.2.6)$$

olarak verilmiştir. Yine sıklıkla kullanılan ve Amerikan Beton Enstitüsü(ACI) tarafından hazırlanan (**ACI. 440.1 R-02**)(39) raporda bu değer bulunması ile ilgili olarak aşağıdaki değer verilmiştir.

$$V_f = \phi \psi_f \frac{A_f E_f \varepsilon_{fe} (\sin \beta + \cos \beta) d_f}{s_f} \quad (3.2.7)$$

Burada dizayn rehberlerinde verilen kesme gerilmesi değerleriyle ilgili farklı yaklaşımlar verilmiştir. Ancak buradaki çalışmada (5.2.2) formülündeki değer irdelenmesi yapılacaktır.

Söz konusu değerde geçen  $f_{frp,e}$  değeri en son limit durum için etkili yada ortalama gerilme değeri olup,

$$f_{frp,e} = D_{frp} \sigma_{frp,max} \quad (3.2.8)$$

olarak tanımlanır. Buradaki  $D_{frp}$  gerilme dağıtım faktörü olup,

$$D_{frp} = \frac{\int_{z_t}^{z_b} \sigma_{frp,z} dz}{h_{frp,e} \sigma_{frp,max}} \quad (3.2.9)$$

ile hesaplanır. Yine her iki ifadede geçen  $\sigma_{frp,max}$  değeri FRP'deki maksimum gerilme olup

$$\sigma_{frp,max} = \min \left\{ \begin{array}{l} f_{frp} \\ 0.427 \beta_w \beta_L \sqrt{\frac{E_{frp} \sqrt{f'_c}}{t_{frp}}} \end{array} \right. \quad (3.2.10)$$

ile hesaplanır. FRP kullanılarak güçlendirmenin en temel farklılıklarından birisi de, gerçekleştirilen önemli kesme gerilmesi ile ilgili testleri de göstermiştir ki etkili yapışma uzunluğunun dışında yapışma uzunluğunun genişlemesine karşılık yapışma dayanımı artmaz. Eğilme çatlaklarında FRP deki maksimum gerilme en uzun yapışma uzunluğunda meydana gelir. FRP deki maksimum gerilme, FRP nin kopma kontrolüne bakılmaksızın en büyük yapışma gerilmesi limitlerine bağlıdır. Denklemden geçen  $\beta_L$  yapışma uzunluğu etkisi ifadesini,  $\beta_w$  ise kesme gerilmesi test örneğinin FRP ile beton genişliği oranı ( $b_{frp}/b_c$ ) etkisini göstermektedir ve bu iki değer aşağıdaki gibi bulunmaktadır.

$$\beta_L = \begin{cases} 1 & \text{eger } \lambda \geq 1 \\ \sin \frac{\pi \lambda}{2} & \text{eger } \lambda < 1 \end{cases} \quad (3.2.11)$$

$$\beta_w = \sqrt{\frac{2 - w_{frp} / (s_{frp} \sin \beta)}{1 + w_{frp} / (s_{frp} \sin \beta)}} \quad (3.2.12)$$

Fiberdeki en büyük gerilme en uzun yapışma boyunca oluşur. Kritik kesme çatlakları da doğrusal çizgi şeklinde oluştuğu kabul edilir. Kirişlere FRP kullanarak U şeklinde giydirmeye olarak gerçekleştirilen güçlendirme işleminde maksimum yapışma uzunluğu kesme çatlaklarının en alt noktasında olurken, yan yüzlere plaka yapıştırma şeklinde gerçekleştirilen FRP'li güçlendirmede maksimum yapışma uzunluğu



FRP'nin orta yüksekliğinde oluşur. Bu şartlara bağlı olarak maksimum yapışma uzunluğu  $L_{\max}$  aşağıdaki gibi belirlenir.

$$L_{\max} = \begin{cases} \frac{h_{frp,e}}{\sin\beta} \rightarrow \text{Ugiydirme} \\ \frac{h_{frp,e}}{2\sin\beta} \rightarrow \text{yuzeyplaka} \end{cases} \quad (3.2.13)$$

Normalize edilmiş maksimum yapışma uzunluğu  $\lambda$  ile gösterilir ve aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$\lambda = \frac{L_{\max}}{L_e} \quad (3.2.14)$$

Burada  $L_e$  ifadesi etkili yapışma uzunluğu olup;

$$L_e = \sqrt{\frac{E_{frp} t_{frp}}{\sqrt{f'_c}}} \text{ ile hesaplanır.} \quad (3.2.15)$$

FRP ile güçlendirmede pratikte  $\theta$  açısı  $45^0$  alınmaktadır. Bu durumda kesme gerilmesinde FRP ye dağıtılan  $V_{frp}$  değeri aşağıdaki gibi olmaktadır.

$$V_{frp} = 2 \frac{f_{frp}}{\gamma_b} t_{frp} w_{frp} \frac{h_{frp,e} (\sin\beta + \cos\beta)}{s_{frp}} \quad (3.2.16)$$

Burada  $\gamma_b$ , dizayn yaklaşımında limit bir durum olan kısmi güvenlik faktörünü tanımlamak ve uygulamalarda  $\gamma_b=1.25$  alınmaktadır. FRP'deki dizayn etkili gerilmesi  $f_{frp,ed}$  ise,

$$f_{frp,ed} = D_{frp} \sigma_{frp,max,d} \text{ ile bulunur.} \quad (3.2.17)$$

FRP'deki maksimum dizayn gerilmesi  $\sigma_{frp,max,d}$  ise karakteristik yapışma gerilmesinin %95 'i alınarak bulunur. Bu durumda bu değer;

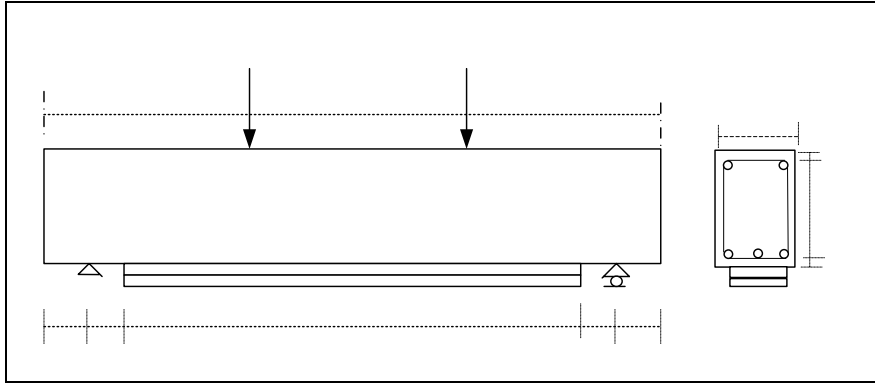
$$\sigma_{f_{fp,max,d}} = 0.315\beta_w\beta_L\sqrt{\frac{E_{f_{fp}}}{t_{f_{fp}}}\sqrt{f'_c}} \leq f_{f_{fp}} \quad (3.2.18)$$

ile bulunur.

Sayısal Örnek:

Bu bölümde, Karbon Fiber Takviyeli Polimerlerle Betonarme Kirişlerin güçlendirilmesine ait hesap adımları verilmiştir.

Burada, LUSAS programı kullanarak analizi gerçekleştirdiğimiz B tipi kiriş modeli esas alınarak hesap adımları irdelenmiştir. Hesap adımlarında ACI 440.2R-02[39], İngiliz dizayn prosedürü olan TR 55[20,42] ve Kanada İnşaat mühendisleri topluluğu tarafından geliştirilen CHBDC[37] değerleri kullanılmıştır.



Şekil 3.3. B tipi betonarme kiriş modeli ve kesiti

Örneğimizde kullanılan beton, Donatı ve CFRP malzemesinin mekanik özellikleri aşağıdaki tabloda verilmiştir.

Tablo 3.1. Beton, donatı ve CFRP'nin malzeme özellikleri

Beton(C20)	Donatı(S420)	CFRP
$f_c=20$ MPa( $f_{cd}$ )	$f_y=365$ MPa	$f_f=2200$ MPa
$E_c=31800$ MPa	$E_s=200$ GPa	$E_f=165$ GPa
$\epsilon_{cu}=0.003$	$\epsilon_s=0.002$	$\epsilon_f=0.0165$
$f_{ctd}=1.25$	$A_s=603$ mm <sup>2</sup> , $A_s'=226$ mm <sup>2</sup>	$\gamma_{mf}=1.4$ , $\gamma_{mm}=1.1$
$\beta_1=0.82(k_1)$		$t_f=1.5$

1.Adım.

a) Taşıma gücü hesabı:

Kesitteki mevcut basınç ve çekme donatısı Oranları:

$$\rho = \frac{A_s}{b_w \cdot d} = \frac{603}{200 \times 270} = 0.0117, \quad \rho' = \frac{A_s'}{b_w \cdot d} = \frac{157}{200 \times 270} = 0.00291 :$$

Basınç Donatısını için akma kontrolü;

$$\rho - \rho' > \left( 0.85 \cdot k_1 \cdot \frac{f_{cd}}{f_{yd}} \cdot \left( \frac{600}{600 - f_{yd}} \right) \frac{d'}{d} \right)$$

$$0.0117 - 0.0029 > \left( 0.85 \times 0.85 \times \frac{13}{365} \times \left( \frac{600}{600 - 365} \right) \times \frac{30}{270} \right)$$

0.0088 > 0.0073 ise basınç donatısı akmıştır.

$$\text{Basınç Bölgesi Derinliği } c_0(a) = \frac{(A_s - A_s') \cdot f_{yd}}{0.85 \cdot f_{cd} \cdot b} = \frac{(603 - 157) \times 365}{0.85 \times 13 \times 200} = 73,66 \text{ mm}$$

Kirişin taşıyabileceği maksimum moment kapasitesi  $M_r$ ,

$$M_r = (A_s \times f_{yd} - A_s' \times f_{yd}) \left( d - \frac{a}{2} \right) + (A_s' \cdot f_{yd}) (d - d')$$

$$M_r = (603 \times 365 - 157 \times 365) \times \left( 270 - \frac{73,66}{2} \right) + (157 \times 365) \times (270 - 30)$$

$$M_r = 51,71 \text{ kNm}$$

2.Adım

CFRP' nin dizayn akma eğilme gerilmesi  $f_{fd}$ ,

$$f_{fd} = C_E \cdot x f_{fu} = 0.95 \cdot 2200 = 2090 \text{ MPa}$$

CFRP' nin dizayn kopma uzaması  $\varepsilon_{fu}$ , ise

$$\varepsilon_{fd} = C_E \cdot x \varepsilon_{fu} = 0.95 \cdot 0.0165 = 0.01568$$

3. Adım:

Kiriş alt yüzeyindeki mevcut uzamanın bulunması  $\varepsilon_{bi}$ ,

Karakteristik beton basınç gerilmesi  $f_{ck}=20$  MPa, Dizayn Beton gerilmesi  $f'_c=20$  MPa

Beton Elastisite modülü  $E_c=31800$  MPa

Modüler Oran  $m$ ,

$$m = \frac{E_s}{E_c} = \frac{200000}{31800} = 6.289$$

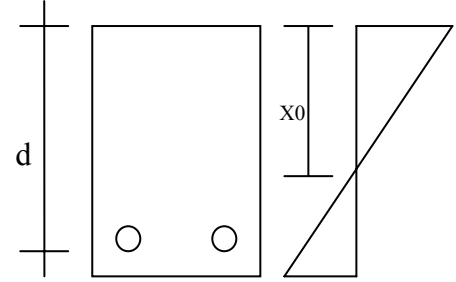
Beton basınç bloğu derinliği  $a(c_0)=26.98$  mm.

Mevcut kiriş kesiti atalet momenti  $I_{tr0}$ , (TR 55'ten alınarak çözülmüştür.)

$$\alpha_E = \frac{E_s}{0.5 \cdot E_c} = \frac{200000}{0.5 \cdot 31800} = 12.58$$

$$\Sigma A_{x_0} = 0 \text{ ise } \frac{b x_0^2}{2} = \alpha_E \cdot A_s \cdot x (d - x_0)$$

$$x_0 = 131.75$$



$$I_{tr0} = \frac{b \cdot x_0^3}{3} + \alpha_E \cdot A_s \cdot (d - x_0)^2 \text{ ise buradan } I_{tr0} = 916.33 \times 10^6 \text{ mm}^4 \text{ bulunur.}$$

Kiriş yüksekliği  $h=500$  mm

Kiriş kendi ağırlığından kaynaklanan eğilme momenti  $M_0$ ,

$$W_d = 0.3 \times 0.5 \times 24 = 3.6 \text{ kN/m ise } M_0 = \frac{W_d \cdot l^2}{8} = \frac{3.6 \times 2.65^2}{8} = 3.16 \text{ kN-m}$$

Kiriş alt tabakasındaki mevcut uzama  $\varepsilon_{bi}$ ,

$$\varepsilon_{bi} = \frac{M_0 \cdot (h - c_0)}{E_c \cdot I_{tr0}} = \frac{3.16 \cdot 10^6 \cdot x (500 - 26.98)}{31800 \cdot 916.33 \cdot 10^6} = 51.2 \times 10^6$$

4. Adım: Dengeli Plaka oranı ( $\rho_{fb}$ )nın bulunması,

Etkili kiriş derinliği  $d=475$  mm.,

Kritik basınç derinliği  $d_c$ ,

$$d_c = \left( \frac{\varepsilon_u - \varepsilon_y}{\varepsilon_u + \varepsilon_y} \right) \cdot d = \left( \frac{0.003 - 0.002}{0.003 + 0.002} \right) \cdot 475 = 95 \text{ mm}$$

\*Basınç donatısının merkezinin dış yüzeye uzaklığı  $d'$ ,  $d'=33$  mm.

$d_c > d'$  olduğundan dengeli durumda basınç donatısı akmıştır.

Delamination faktör değeri ( $k_m$ ), (ACI committee 440 tarafından belirlenmiş değer)

$$k_m = \frac{1.0(f'_c \cdot f_{cm})^{1/4}}{1.2 \cdot n \cdot t_f \cdot \gamma \cdot \varepsilon_{fd} (E_f)^{1/2}} \leq 0.5 \text{ olmalı. Gerekli değerler yerine yazıldığında,}$$

$k_m = 0.139 < 0.5$  bulunur.

$$k_m \cdot \varepsilon_{fd} = 0.139 \cdot 0.01568 = 2.18 \times 10^{-3}$$

nötral aks derinlik oranı ( $c/d$ ),

$$k_1 = \frac{\varepsilon_u}{\varepsilon_u + \varepsilon_y} = \frac{0.003}{0.003 + 0.002} = 0.6$$

CFRP deki etkili zorlanma,  $\varepsilon_{fe}$ ,

$$\varepsilon_{fe} = \frac{(h - k_1 \cdot d)}{k_1 \cdot d} (\varepsilon_u - \varepsilon_{bi}) = \left[ \frac{(500 - 0.6 \cdot 475)}{0.6 \cdot 475} (0.003 - 51.2 \times 10^{-6}) \right] = 1.878 \times 10^{-3} < k_m \cdot \varepsilon_{fd}$$

( $2.18 \times 10^{-3}$ )

Betonda maksimum gerilmeye uygun zorlanma değeri  $\varepsilon_{c0}$ ,

$$\varepsilon_{c0} = \frac{2 \cdot f'_c}{E_c} = \frac{2 \cdot 20}{31800} = 1.26 \cdot 10^{-3} < \varepsilon_{cu}$$

$\alpha$ =Temel Gerilme faktörü ise;

$\varepsilon_c = \varepsilon_{cu}$  ise  $\alpha = 0.92$

Dengeli Plaka Oranı ( $\rho_{fb}$ ),

$$\rho_{fb} = \frac{\left[ \frac{(k_1 \cdot d - d')}{k_1 \cdot d} \varepsilon_{cu} \cdot E_s \cdot \rho' + \alpha \cdot f'_c \cdot k_1 - \rho \cdot f_y \right]}{\varepsilon_{fe} \cdot E_f} = 0.035$$

5. Adım: İzin verilen maksimum CFRP oranını bulmak;

$$\rho_{fmax} = 0.75 \cdot 0.035 = 0.02625$$

6. Adım: CFRP plakasının boyutlarını seçmek,

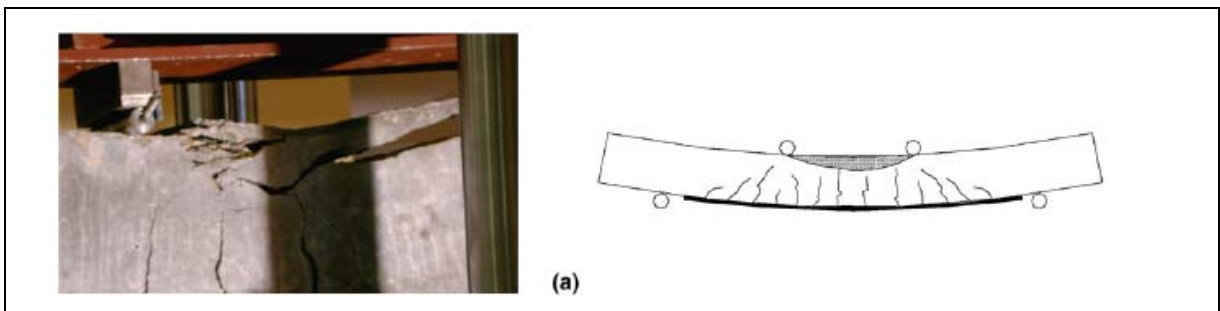
100 x 1.4 boyutlarında ve  $b_f=200$  mm seçildi. Toplam plaka kalınlığı  $n \times t_f=1 \times 1.4=1.4$  mm alındı.

$$\text{Plaka Oranı } \rho_f = \frac{200 \times 1,4}{200 \times 475} = 0.00295 = 2.95 \times 10^{-3} < \rho_{\max} (0.02625)$$

### 3.3. CFRP ile Güçlendirilen Betonarme Kirişlerin Yenilme(Göçme) Biçimlerinin Belirlenmesi

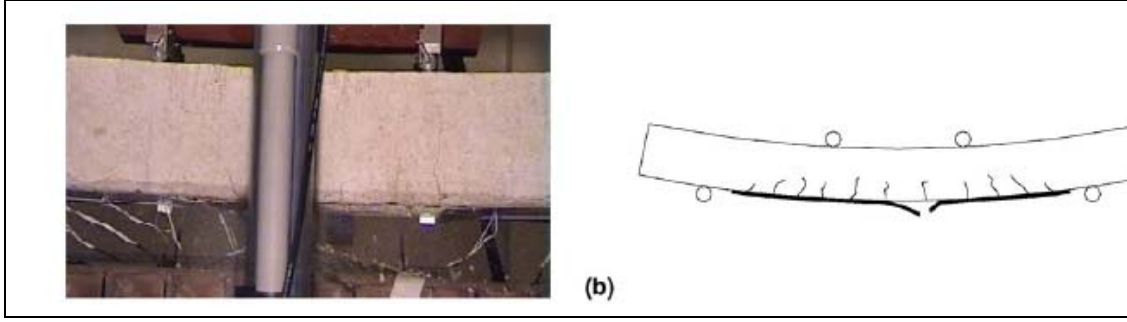
CFRP kullanılarak güçlendirilen kirişlerle ilgili gerçekleştirilen deneysel ve sayısal araştırmalarda farklı yenilme(göçme) biçimleri (failure modes) belirlenmiştir. Bunların en temel ve karakteristik olanları aşağıda sunulmuştur[18].

1.Yenilme(Göçme) Biçimi: Donatı akma mukavemetine ulaşmadan önce betonun çatlamasıyla oluşan yenilme biçimidir. Genelde beton dayanımı düşük betonarme kirişlerde görülen çatlama tipidir. Yükün uygulandığı bölgeden başlayan ve betonun kırılmasıyla birlikte CFRP nin ayrılmasıyla oluşan çatlama mekanizmasıdır.



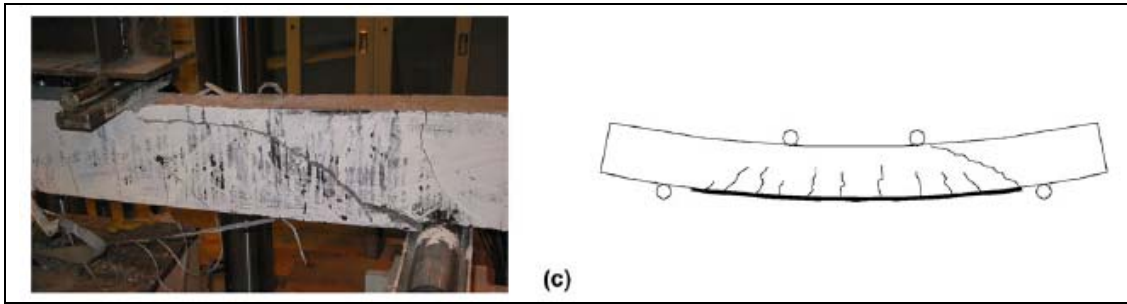
Şekil 3.4. Yenilme(Göçme) biçiminin ait çatlama mekanizması örneği (Concrete Crushing)

2. Yenilme(Göçme) Biçimi: Donatı akma dayanımına ulaştığı anda beton basınç bölgesinde çatlak oluşumu başlar. Gerilmenin artmasıyla birlikte CFRP maksimum eğilmenin olduğu bölgede kopma oluşur.



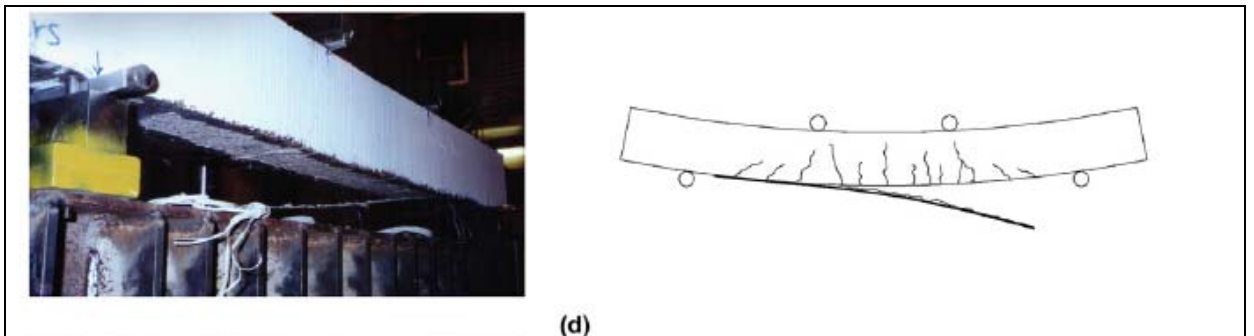
Şekil 3. 5. Yenilme biçimi için oluşum mekanizması örneği (FRP Rupture)

3. Yenilme(Göçme) Biçimi: Kirişe eğilme gerilmesi uygulanmasıyla birlikte plaka bitim noktasından başlayan ve yükleme noktasına doğru uzanan eğik kesme çatlaklarının oluşuyla sonuçlanan yenilme(Göçme) biçimidir.



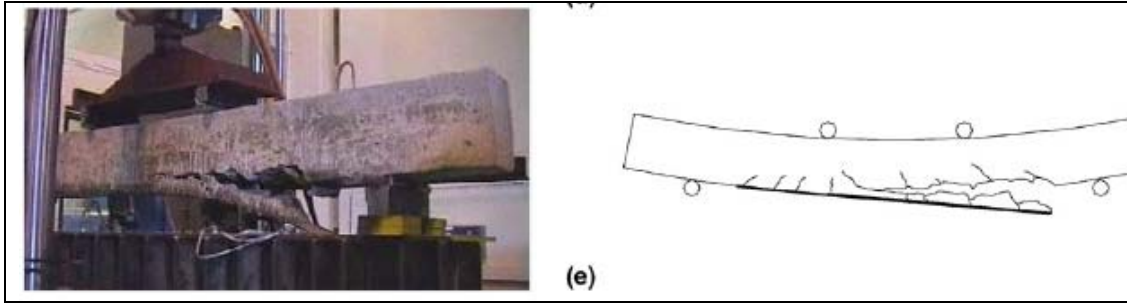
Şekil 3 6. Yenilme biçimi için oluşum mekanizması örneği (Shear Failure)

4. Yenilme(Göçme) Biçimi: Eğilme gerilmesi etkisindeki betonarme kirişin plaka bitim noktasında çatlak oluşumunun ardından kiriş tabanında ince kalınlıktaki beton örtüsünü de içine alarak FRP nin kiriş tabanından sıyrılmasıyla oluşan durumdur. Kiriş orta bölgesindeki eğilme gerilmesi ile birlikte kesme gerilmeleri de bu göçme biçimi etkili olur.



Şekil 3.7. 4. Yenilme biçimi için oluşum mekanizması örneği (FRP Delamination)

5. Yenilme (Göçme) Biçimi: Beton kabuğunun, FRP başlangıç-bitiş noktasından çatlak oluşmasıyla başlayıp betonarme kirişin çekme donatısı boyunca ayrışması sonucu oluşan yenilme biçimidir. Bu yenilme biçimi deneysel çalışmalarda en sık rastlanan türdür.

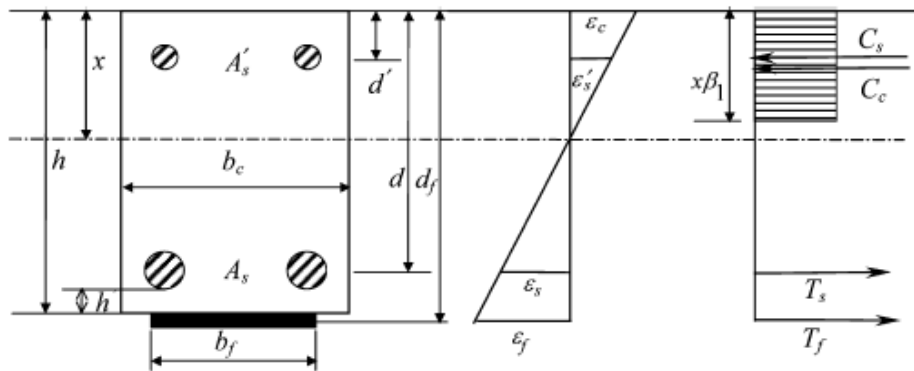


Şekil 3.8. 5. Yenilme biçimi için oluşum mekanizması örneği (Concrete cover separation)

### 3.4. Yenilme(Göçme) Biçimlerinin Hesaplanması

Bugüne kadar gerçekleştirilen çalışmalarda, kırılğan bir yapıya sahip olan CFRP kullanılarak betonarme kirişlerin eğilme dayanımlarının artırılması amacıyla güçlendirilmesi üzerine çok sayıda eğilme dizayn denklemleri geliştirilmiştir. Bunların birçoğunda eğilme gerilmeleri denklemlerinde yapılan ortak kabuller;

- Eğilmeden sonra düzlem gerilme halinin sürdürülmesi,
- Betonda çekme gerilmesinin sıfır olması,
- Yapıştırıcı etkisinin ihmal edilmesi,
- Eğilme sırasında betonarme eleman ile CFRP arasında mükemmel bir birliktelik davranışı sergilediğidir.



Şekil 3.9. CFRP' li Betonarme kiriş kesiti ve etkiyen kuvvetler



Şekil 3.9 da gösterilen dikdörtgensel bir kiriş kesitinde, kiriş derinliği boyunca basitleştirilen eşit dikdörtgensel bir gerilme bloğuna ait eğilme sonucu meydana gelen zorlanma ve kuvvet diyagramı görülmektedir. Burada;  $d$ ,  $d_f$  ve  $d_c$  sırasıyla basınç donatısı, çekme donatısı çeliği, ve CFRP plakasının kalınlıklarını tanımlamaktadır.  $A_s$  ve  $A_s'$  Çekme ve basınç donatısı alanını ifade etmektedir.

Şekilde gösterilen Betonarme elemanlar ve FRP kuvvetleri;

$$C_c(F_c) = \alpha_1 * f'_c * b_c * x * \beta_1 \quad (F_c = 0.85 * f_{cd} * b_w * a) \quad (3.4.1)$$

$$T_f = E_f * \varepsilon_f * A_f \quad (3.4.2)$$

Burada  $\alpha_1$  maksimum basınç gerilmesi altındaki dikdörtgen basınç bloğundaki üniform gerilme oranı,  $\beta_1$  ise tarafsız eksen yüksekliğine göre dikdörtgen basınç bloğundaki derinlik oranı olarak tanımlanır. Bu değerler için farklı çalışmalarda değişik değerler alınmıştır. Yaklaşık olarak;

$$\alpha_1 = 0.85 - 0.0015f'_c \geq 0,6, \quad \beta_1 = 0.97 - 0.0015f'_c \geq 0,6 \text{ alınabilir.}$$

Burada üç esas yenilme (göçme) biçimini belirlemek için CFRP kesit alanının dengeli durumdaki iki değeri esas alınacaktır. Bunlar  $A_{f \min}$  ve  $A_{f \max}$  değerleridir.

FRP kesit alanı  $A_f < A_{f \min}$  durumunda FRP yenilme biçimlerinden FRP nin parçalandığı (FRP Rupture) biçim oluştuğuna karar verilir.

$A_{f \min} < A_f < A_{f \max}$  durumunda ise çekme donatısının aktığı durumda oluşan betonda kırılmaların oluşup yenilme biçiminin oluştuğu durumdur.

$A_f > A_{f \max}$  ise çekme donatısının akma durumuna gelmeden önce betonda oluşan kırılmalar sonucu oluşan yenilme biçimini tanımlar.

$A_{f \min}$  hesaplanmasında en büyük beton basınç zorlanmasına ulaştığı anda ; ( $\varepsilon_c = \varepsilon_{cu} = 0.003$ ) FRP de en büyük kırılma zorlanmasına ( $\varepsilon_f = \varepsilon_{fu}$ ) ulaştığı durumdur.

FRP'nin kopması ile betonun parçalanmasına doğru ilerleyen yenilme gücü geçişleri için,  $A_{f \min}$  'in hesaplanmasında kirişin basınç donatısının farklı durumları için ( Basınç donatısının akıp akmamamsı durumu) farklı hesaplama formülleri vardır.

$$x = \frac{h \cdot \varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_{fu}} \quad (3.4.3)$$

$$A_{f,min} = \frac{\alpha_1 \cdot f'_c \cdot b_c \cdot x \cdot \beta_1 + E_s \cdot \varepsilon'_s \cdot A'_s - f_y \cdot A_s}{E_f \cdot \varepsilon_{fu}} \quad \varepsilon'_s = 0.003 \cdot \frac{x - d'}{x} < \varepsilon_{sy} \quad (3.4.4)$$

$$A_{f,min} = \frac{\alpha_1 \cdot f'_c \cdot b_c \cdot x \cdot \beta_1 + f'_y \cdot A'_s - f_y \cdot A_s}{E_f \cdot \varepsilon_{fu}} \quad \varepsilon'_s = 0.003 \cdot \frac{x - d'}{x} \geq \varepsilon_{sy} \quad (3.4.5)$$

$A_{f,max}$ 'ın hesaplanmasında betonun basınç dayanımına ulaştığı anda ( $\varepsilon_c = \varepsilon_u = 0.003$ ) çekme donatısının da akma dayanımına ( $\varepsilon_s = \varepsilon_{sy}$ ) ulaştığı durumun aynı anda gerçekleştiği kabul edilecektir.

FRP'nin çekme donatısının akmasından sonra oluşan yenilme biçimi ile çekme donatısı akmadan önce oluşan yenilme biçimine geçişini belirlemede  $A_{f,max}$ 'ın hesaplanmasında kirişin basınç donatısının farklı durumları için ( Basınç donatısının akıp akmamamsı durumu) farklı hesaplama formülleri vardır.

$$x = \frac{d \cdot \varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_{sy}}, \varepsilon_f = 0.003 \frac{d_f - x}{x} \quad (3.4.6)$$

$$A_{f,max} = \frac{\alpha_1 \cdot f'_c \cdot b_c \cdot x \cdot \beta_1 + E_s \cdot \varepsilon'_s \cdot A'_s - f_y \cdot A_s}{E_f \cdot \varepsilon_f} \quad \varepsilon'_s = 0.003 \cdot \frac{x - d'}{x} < \varepsilon_{sy} \quad (3.4.7)$$

$$A_{f,max} = \frac{\alpha_1 \cdot f'_c \cdot b_c \cdot x \cdot \beta_1 + f'_y \cdot A'_s - f_y \cdot A_s}{E_f \cdot \varepsilon_f} \quad \varepsilon'_s = 0.003 \cdot \frac{x - d'}{x} \geq \varepsilon_{sy} \quad (3.4.8)$$

Yenilme(göçme) diyagramlarının esas amacı yenilme biçimleri arasındaki ilişkileri ve birbirleri arasındaki farklılıkları göstermesiyle birlikte FRP ile güçlendirilmiş betonarme kirişin maksimum eğilme gerilmesinin tahmininde de belirleyici olmaktadır.

### 3.5. FRP ile Güçlendirilmiş Betonarme Kirişin Maksimum Eğilme Gerilmesinin Bulunması

FRP ile güçlendirilen betonarme kirişlerin maksimum eğilme gerilmesinin bulunmasında iki temel değer araştırılır. Bunlar;

a) Betonarme kirişin moment kapasitesini arttırmak için gerekli FRP miktarının bulunması,

b) FRP ile güçlendirilen betonarme kirişin moment kapasitesini hesaplamaktır.

Betonarme kirişlerin moment kapasitesinin belirlenmesinde kullanılan en genel denklem;

$$M_u = \alpha_1 \cdot f'_c \cdot b_c \cdot x \cdot \beta_1 (h - 0.5\beta_1 x) - f_y \cdot A_s (h - d) + f'_y \cdot A'_s (h - d') \quad (3.5.1)$$

Burada tek bilinmeyen olan  $x$ 'in bulunmasında ikinci derece denklemin çözümü gerekir.

$$x = \frac{-b - \sqrt{b^2 - 4 \cdot a_1 \cdot c_1}}{2a_1} \quad (3.5.2)$$

Ayrıca  $x$  değeri lineer gerilme dağılımlarından  $\varepsilon_c=0.003$  olduğu durumda  $\varepsilon_s$ ,  $\varepsilon'_s$  ve  $\varepsilon_f$  e bağlı olarak yazılabilir.

$$\varepsilon_s = 0.003 \cdot \frac{d - x}{x} \quad (3.5.2)$$

$$\varepsilon'_s = 0.003 \cdot \frac{x - d'}{x} \quad (3.5.3)$$

$$\varepsilon_f = 0.003 \cdot \frac{d_f - x}{x} \quad (3.5.4)$$

durumunda FRP alanı  $A_{f,min} < A_f < A_{f,max}$  değerleri arasında kalmaktadır. Bu durumda çekme donatısı dayanımına ulaştıktan sonra basınca bağlı yenilme(göçme) biçimi oluşur. Bu durumda ( $\varepsilon_s < \varepsilon_{sy}$  ve  $\varepsilon_f < \varepsilon_{fu}$  olması hali) çekme donatısını akma gerilmesine ulaşip ulaşmadığı bilinemez. Bu nedenle yeterli duktiliteyi sağlamak ve yenilmeden önce haberdar olmak için FRP alanı  $A_{f,max}$  ın daha düşük seçilmesi gereklidir. Buna bağlı olarak aranan  $M'_u$  değeri aşağıdaki gibi belirlenir.

$$M'_u = \alpha_1 \cdot f'_c \cdot b_c \cdot x \cdot \beta_1 (h - 0.5\beta_1 x) - f_y \cdot A_s (h - d) + E_s \cdot \varepsilon'_s A'_s (h - d'),$$

$$\varepsilon'_s = 0.003 \cdot \frac{x - d'}{x} < \varepsilon_{sy} \quad (3.5.5)$$

$$M'_u = \alpha_1 \cdot f'_c \cdot b_c \cdot x \cdot \beta_1 (h - 0.5\beta_1 x) - f_y \cdot A_s (h - d) + f'_y \cdot A'_s (h - d'),$$

$$\varepsilon'_s = 0.003 \cdot \frac{x - d'}{x} \geq \varepsilon_{sy} \quad (3.5.6)$$

$\varepsilon_f > \varepsilon_{fu}$  olması durumunda FRP basınç gerilmesine bağlı yenilme yerine FRP kopması biçiminde yenilme oluşur. Bu durumda FRP alanı değerinin  $A_{f,min}$  ile  $A_{f,max}$  arasında kalacak şekilde yükseltılarak çekme donatısının akmasından sonra basınca bağlı olarak yenilmenin oluşması sağlanmalıdır. Böyle bir durumda  $M'_u$  değeri  $M_u$ 'dan yüksek çıkacaktır.

Güçlendirilmiş kirişin moment kapasitesinin belirlenmesinde ilk olarak FRP nin kesit alanına ait iki dengeli durum  $A_{f,min}$  ile  $A_{f,max}$  hesaplanmalıdır. Her bir yenilme biçimine ait  $x$  değeri ise kesite ait kuvvet denklemlerinden ve zorlanma bileşenlerine ait bağıntılardan güçlendirilmiş kirişe ait maksimum moment dayanımı  $M'_u$ , farklı durumlar için aşağıdaki değerlerden elde edilir.

a)  $A_f < A_{f,min}$  olması durumunda,

$$M'_u = A_f \cdot E_f \cdot \varepsilon_{fu} (h - 0.5\beta_1 x) + f_y \cdot A_s (d - 0.5\beta_1 x) + E_s \cdot \varepsilon'_s A'_s (0.5\beta_1 x - d'),$$

$$\varepsilon'_s = \varepsilon_{fu} \frac{x - d'}{h - x} < \varepsilon_{sy} \quad (3.5.7)$$

$$M'_u = A_f \cdot E_f \cdot \varepsilon_{fu} (h - 0.5\beta_1 x) + f_y \cdot A_s (d - 0.5\beta_1 x) + f'_y \cdot A'_s (0.5\beta_1 x - d'),$$

$$\varepsilon'_s = \varepsilon_{fu} \frac{x - d'}{h - x} \geq \varepsilon_{sy} \quad (3.5.8)$$

b)  $A_{f,min} < A_f < A_{f,max}$  olması durumunda;

$$M'_u = \alpha_1 \cdot f'_c \cdot b_c \cdot x \cdot \beta_1 (h - 0.5\beta_1 x) - f_y \cdot A_s (h - d) + E_s \cdot \varepsilon'_s A'_s (h - d'),$$

$$\varepsilon'_s = 0.003 \cdot \frac{x - d'}{x} < \varepsilon_{sy} \quad (3.5.9)$$

$$M'_u = \alpha_1 \cdot f'_c \cdot b_c \cdot x \cdot \beta_1 (h - 0.5\beta_1 x) - f_y \cdot A_s (h - d) + f'_y \cdot A'_s (h - d'),$$

$$\varepsilon'_s = 0.003 \cdot \frac{x - d'}{x} \geq \varepsilon_{sy} \quad (3.5.10)$$

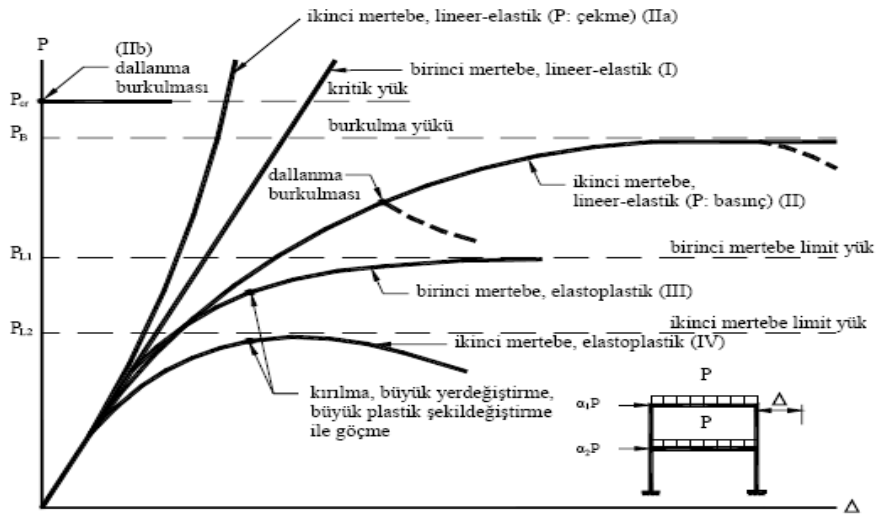
## BÖLÜM 4. BETONARME YAPILARIN DOĞRUSAL OLMAYAN ANALİZİ

Deprem yükleri etkisi altında yapıların davranışının doğrusal olmama nedenleri genel olarak iki kısımda incelenebilir. Bunlardan birincisi, geometri değişimleri nedeniyle denge denklemlerinin doğrusal olmaması, ikincisi ise malzemenin doğrusal-elastik olmaması nedeniyle, gerilme-şekil değiştirme bağıntılarının doğrusal olmamasıdır. Yapının dış yükler altında analizinin elde edilmesi için iç kuvvetler, şekil değiştirmeler ve yer değiştirmelerin çözüm olabilmeleri için aşağıdaki üç durumu sağlaması gerekmektedir. Bunlar:

- Bünye denklemleri:
- Denge koşulları:
- Geometrik uygunluk koşulları:

### 4.1. Yapı Sistemlerinin Dış Yükler Altında Doğrusal Olmayan Davranışı

Düşey ve yatay yükler etkisi altındaki bir yapı sisteminin lineer ve lineer olmayan teorilere göre hesabı sonucu elde edilen yük parametresi-yer değiştirme ( $P-\Delta$ ) bağıntıları aşağıdaki şekilde ayrıntılı olarak gösterilmiştir[32].



Şekil 4.1. Çeşitli teorilere göre elde edilen Yük Parametreleri-Yer değiştirme( $P-\Delta$ ) grafiği

Malzemenin sınırsız lineer-elastik kabul edilen yapı sisteminin, artan dış yükler altında , birinci mertebe teorisine göre elde edilen davranışı şekildeki (I) doğrusu ile gösterilir.

Eksenel kuvvetlerden meydana gelen ikinci mertebe etkileri hesaba katıldığı ikinci mertebe teorisinde ise eksenel kuvvetin basınç yada çekme olmasına göre farklı sistem davranışı gösterir. Örneğin eksenel kuvvetin basınç olması halinde ,(II) eğrisinde görüldüğü gibi artan dış yüklere daha hızlı artan yer değiştirmeler karşı gelmektedir. Dış yüklerin şiddetini tanımlayan yük parametresi artarak lineer-elastik burkulma yükü denilen  $P_B$  değerine eşit oluncaya kadar artarak sonsuza erişir ve sistem burkularak çöker.

Lineer olmayan malzemeden yapılmış sistemlerde, artan dış yüklerle birlikte iç kuvvetlerde artarak bazı kesitlerde lineer-elastik sınırı aşmakta ve bu kesitler dolayında lineer olmayan (plastik) şekil değiştirmeler meydana gelmektedir. Lineer olmayan şekil değiştirmeler genel olarak sistem üzerinde sürekli olarak yayılmaktadır. Buna karşılık, kopma sırasındaki toplam şekil değiştirmelerin lineer şekil değiştirmelere oranının büyük olduğu sünek malzemeden yapılmış sistemlerde, lineer olmayan şekil değiştirmelerin “plastik mafsalları” denilen belirli kesitlerde toplandığı, bunun dışındaki bölgelerde sistemin lineer-elastik davrandığı kabul edilir. Bu kabule “plastik mafsalları hipotezi” denir.

Plastik mafsalları hipotezinin esas alındığı bir yapı sisteminin birinci mertebe teorisine göre hesabında (III eğrisi), oluşan plastik mafsallar nedeniyle sistemin tümünün veya bir bölümünün mekanizma durumuna gelmesi taşıma gücünün sona erdiğini gösterir. Bu yüke “ birinci mertebe limit yük” denir.

#### **4.2. Lineer Olmayan Sistemlerin Sayısal Çözüm Yöntemleri**

Lineer olmayan sistem davranışını esas alan hesap yöntemlerinin geliştirilmesinde iki durum göz önüne alınır. Bunlar, yapı sistemlerinin lineer olmamasına neden olan etkenlerin belirlenerek sistem davranışının gerçeğe yakın biçimde tanımlayan hesap modelinin oluşturulması ve bu hesap modelinin analizi sonucunda elde edilen lineer olmayan denklem sisteminin etkin bir şekilde çözülmesidir.

Lineer olmayan yapı sistemlerinin hesaplanmasında kullanılan sayısal yöntemler iki bölüme ayrılır. Bunlar:

1. Ardışık Sayısal Yöntemleri
2. Yük artırımı Yöntemleri

#### 4.2.1. Ardışık yaklaşım yöntemi

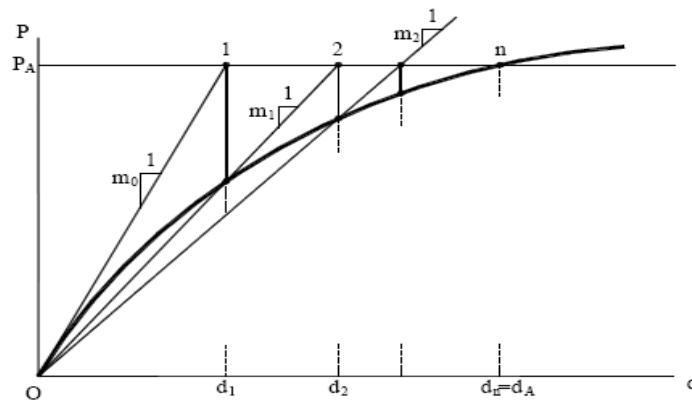
Ardışık Yaklaşım Yöntemleri, bir önceki adımda elde edilen çözüme ait yer değiştirme ve şekil değiştirme gibi büyüklükler esas alınarak sistem davranışının lineerleştirilmesi esasına dayanır. Bu yöntemler lineerleştirmede uygulanan tekniğe bağlı olarak farklılıklar gösterir. Başlıca lineerleştirme teknikleri aşağıda tanımlanmıştır.

##### 4.2.1.1. Başlangıç kiriş yöntemi

Ardışık yaklaşımın her adımında, lineerleştirilen sistemin yük parametresi-yer değiştirme ( $P-\Delta$ ) bağıntısı başlangıç noktasından geçen bir doğru olarak alınır.

Bu yöntemde;

- i) Geometri değişimleri bakımından iner olmayan sistemlerde, denge denklemlerinin bir önceki adımda bulunan şekil değiştirmiş eksen üzerinde yazılması,
- ii) Malzeme bakımından lineer olmayan sistemlerde, bir önceki adımda bulunan şekil değiştirme durumu için, bünye denkleminin başlangıç kirişinin kullanılması şeklinde uygulanır.



Şekil 4.2 Başlangıç kiriş yöntemi

#### 4.2.1.2. Başlangıç teğet yöntemi

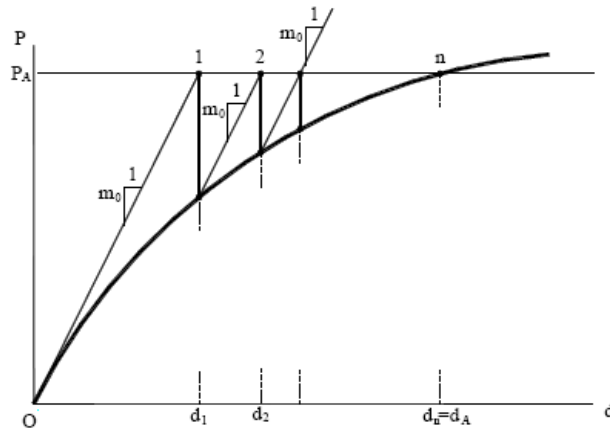
Ardışık yaklaşımın her adımında , lineerleştirilen sistemin yük parametresi-yer değiştirme

(P-d) bağıntısı bu eğrinin başlangıç teğetine paralel olarak alınır.

Bu yaklaşım,

- Geometri değişimleri bakımından lineer olmayan sistemlerde, denge denklemlerinin şekil değiştirmemiş eksen üzerine yazılmasına, buna karşılık bir önceki adımda bulunan çözüme ait yük parametresi ve şekil değiştirme durumu için bulunan ikinci mertebe etkilerinin hesaba katılmasına
- Malzeme bakımından lineer olmayan sistemlerde ise, bir önceki adımda bulunan şekil değiştirme dolaylarında,bünye denklemlerinin başlangıç teğetinin kullanılmasına karşı gelmektedir.

Başlangıç teğet yönteminde katsayılar matrisinin her adımında yeniden hesaplanması gerekmez. Buna karşılık her adımda sabitler matrisi yeniden hesaplanır. Yöntemin yakınsaklık hızı düşüktür.



Şekil 4.3. Başlangıç teğet yöntemi

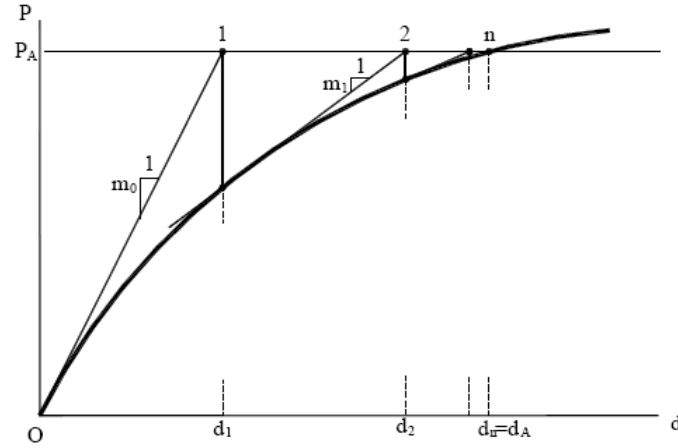
#### 4.2.1.3. Teğet yöntemi

Ardışık yaklaşımın her adımında, lineerleştirilmiş sistemin P-d bağıntısı için bir önceki adımda bulunan çözüme ait teğet denklemi esas alınır.

Bu yöntemde denklem takımının katsayılar ve sabitler matrisinin her adımında yeniden hesaplanması gerekir. Ayrıca, P-d bağıntısının teğetinin belirlenmesinde



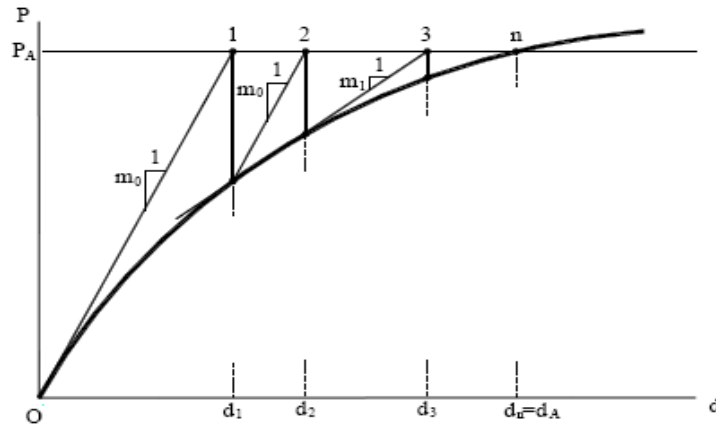
pratik bakımdan bazı güçlükler çıkabilir. Teğet yönteminin yakınsaklık hızı çok yüksektir.



Şekil 4.4. Teğet yöntemi

#### 4.2.1.4. Kiriş yöntemi

Ardışık yaklaşımın her adımında, önceki iki adımda bulunan çözümleri birleştiren kiriş denklemi, lineerleştirilmiş P-d bağıntısı olarak seçilir. Bu yöntem teğet yöntemi gibidir ancak teğet aranması gerekmez. Yakınsaklık hızı çok yüksektir.



Şekil 4.5. Kiriş Yöntemi

### 4.3. Lineer Olmayan Denklemlerin Çözümü için Newton-Raphson Yöntemi

LUSAS paket programında lineer olmayan sistemlerin çözülmesinde Newton-Raphson iterasyon yöntemi uygulanmaktadır. Burada hesap adımlarında izlenecek yol tanımlanacaktır.

Bir bilinmeyenli lineer olmayan sistemlerin çözümünde kullanılan Newton-Raphson ardışık yaklaşım yönteminin formülasyonu çıkarılacaktır.

Açık ifadesi

$$\begin{aligned} f_1 &= f_1(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ f_2 &= f_2(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ &\dots \\ f_n &= f_n(x_1, x_2, \dots, x_n) \dots\dots\dots(4.1) \end{aligned}$$

olmak üzere

$$[f] = 0 \quad (4.2)$$

(4.2) de verilen bir denklemin köklerini bulmak için (4.1) deki denklem sistemi matris formunda yazılırsa;

$$[f]^T = [f_1, f_2, \dots, f_n]^T \quad (4.3)$$

elde edilir. Denklemin köklerini de kolon matrisi normunda yazılabilir;

$$[x]^T = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T \quad (4.4)$$

Lineer olmayan (4.2) denklem sisteminin bir ardışık yaklaşım yöntemi ile çözülmesi istendiğinde, (i) sayılı adıma ait,

$$[x]^T_i = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T_i \quad (4.5)$$

değerleri belli iken (i+1) adımına ait

$$[x]^T_{i+1} = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T_{i+1} \quad (4.6)$$

değerlerinin belirlenmesi gerekir.

(4.2) deki denklem sistemi yerine [f] fonksiyonu (i) adımında McLaurin serisine açılıp yaklaşık olarak iki ve daha yüksek mertebeden terimler terk edilirse ;

$$[f]_i + [f']_i([x]_{i+1} - [x]_i) = 0 \quad (4.7)$$

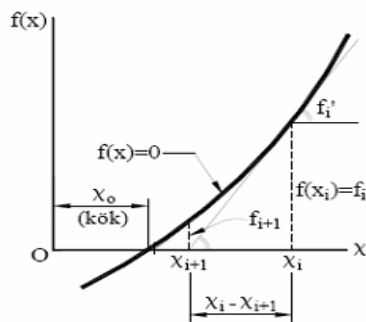
yazılabilir. Burada  $[f]_i$  ve  $[f']_i$ ,

$$[f]_i = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \dots \\ f_n \end{bmatrix}_i \quad [f']_i = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_k} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_2}{\partial x_k} & \dots & \frac{\partial f_2}{\partial x_n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial f_i}{\partial x_1} & \frac{\partial f_i}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_i}{\partial x_k} & \dots & \frac{\partial f_i}{\partial x_n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1} & \frac{\partial f_n}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial x_k} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \end{bmatrix}_i \quad (4.8)$$

(i+1) sayılı adımda hesaplanması istenilen  $[x]_{i+1}$  bilinmeyenleri,(4.7) denklemlerinin  $[x]_{i+1}$  e göre düzenlenmesiyle elde edilen,

$$[f']_i [x]_{i+1} = -[f]_i + [f']_i [x]_i \quad (4.9)$$

lineer denklem takımı çözümlenerek hesaplanır. Bu adımlar yeteri kadar tekrarlanırsa lineer olmayan (4.2) denklem sisteminin kökleri bulunmuş olur. Bu ardışık yaklaşım yöntemi Newton-Raphson yöntemi olarak tanımlanır. Yöntemin grafik olarak gösterimi aşağıda verilmiştir.



Şekil.4.6. Newton- Raphson ardışık yaklaşım yöntemi

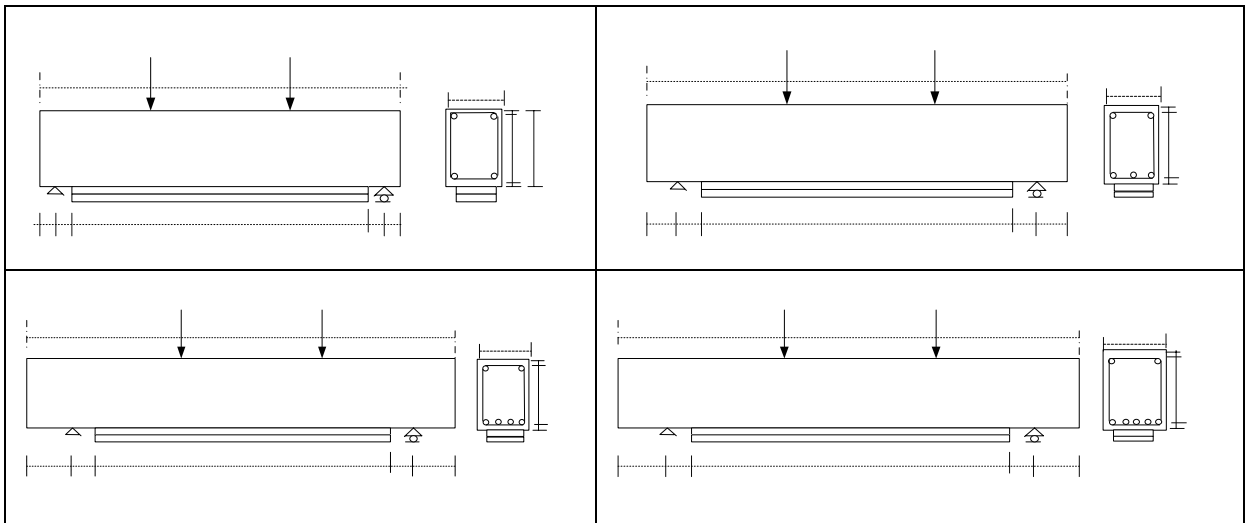
## BÖLÜM 5. SAYISAL UYGULAMA

### 5.1. Sayısal Analiz Modelleri

Bu tez çalışmasında, betonarme kirişlerin karbon takviyeli polimer plaka kullanılarak güçlendirilmesi sonucu oluşan davranışlarının doğrusal olmayan analizi gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla farklı kesit, açıklık uzunluğu ve donatı miktarına sahip olarak hazırlanan sayısal analiz modelleri LUSAS paket programında sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak çözümlenmiştir. Belirlenen dört farklı tipteki betonarme kirişlerin bir ve çok katlı CFRP kullanılarak güçlendirilmesi çalışması ile;

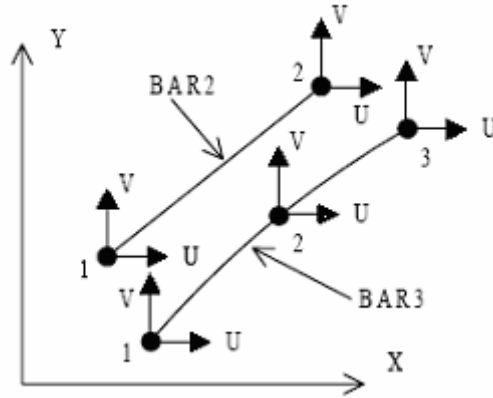
- Betonarme kirişlerin kesit değişiminin CFRP ile güçlendirmeye etkisi,
- Farklı kattaki CFRP kullanımının betonarme kiriş güçlendirmesine etkisi,
- Betonarme kiriş kesit, açıklık mesafesi ve CFRP kat sayısı değişiminin doğrusal olmayan davranış sonucu oluşacak çatlak mekanizmasına etkisi,
- CFRP kullanılarak güçlendirilen betonarme kiriş üzerindeki gerilme dağılımları ve deplasmanların irdelenmesi amaçlanmıştır.

A, B,C ve D tipleri olmak üzere dört farklı sayısal kiriş modeli belirlenmiştir. Bu modellere ait en ve boy kesiti ile yükleme durumu Şekil 5.1’de verilmiştir.



Şekil 5.1 Doğrusal olmayan analiz için hazırlanan sayısal kiriş modelleri

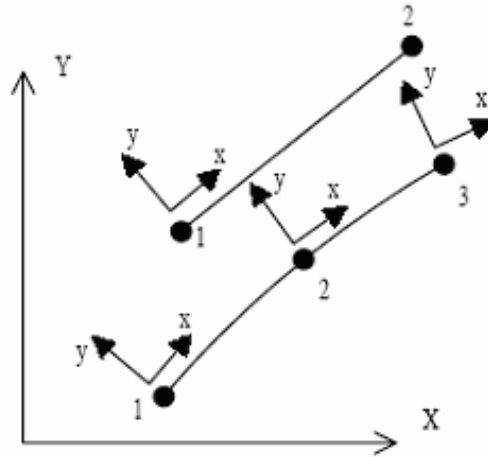
Lusas Paket programında sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen doğrusal olmayan analiz için belirlen mesh aşağıdaki Şekil 5.3 te verilmiştir. İdeal davranışı belirleyecek gerçek mesh için gerekli denemeler yapılmış ve aşağıdaki şekilde karar kılınmıştır. Modellemede donatı, lusas paket programı kütüphanesinde yer alan BAR3 Element ile Beton ise QPM8 Element ile hazırlanmıştır.



Şekil 5.2.1 Bar3 Element için Gerilme ve zorlanma bileşenleri

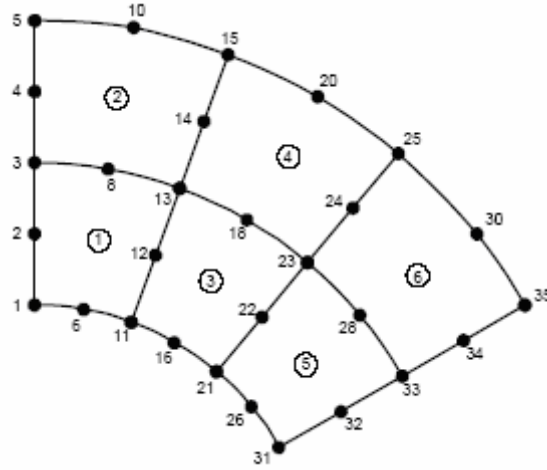
Bar3 elemanlar için doğrusal olmayan zorlanma-deplasman bağıntısı ;

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{2} \left[ \frac{\partial u}{\partial x} \right]^2 + \frac{1}{2} \left[ \frac{\partial v}{\partial x} \right]^2 \text{ olarak tanımlanmıştır.}$$



Şekil 5.2.2 Bar3 element için lokal kartezyen sistemi

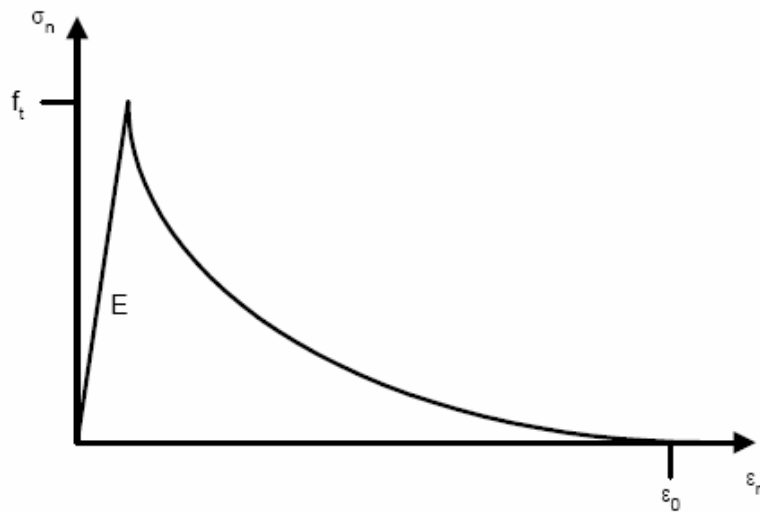
Lusas paket programında doğrusal olmayan analizde betonarme kiriş için 2D Plane Stress Continuum Elements (2 Boyutlu Sürekli eleman) olarak modelleme kullanılan QPM8 elements aşağıdaki şekilde gösterilmiştir.



Şekil.5.3 QPM8 element yapısı

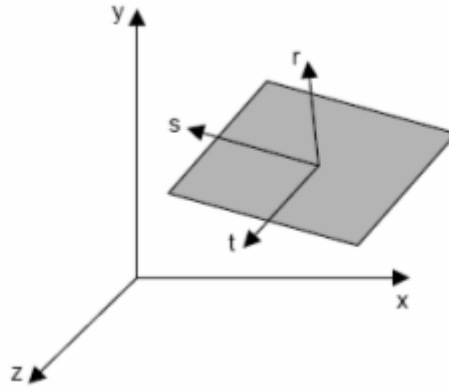
Betonarme kiriş için tablo 5.1 deki mekanik özellikler dikkate alınarak hazırlanmıştır. Doğrusal olmayan malzeme özellikleri olarak Cracking Concrete (Model 82) kullanılmıştır.

Lusas Paket program kütüphanesinde yer alan (Nonlinear Multi\_Crack Concrete Model) dataları girilerek analiz gerçekleştirilmiştir. Data olarak Elastisite modülü (E), Poisson oranı ( $\nu$ ), Kütle yoğunluğu( $\rho$ ), Betonun eğilme gerilmesi( $f_t$ ), Eğilme eğrisi sonundaki zorlanma( $\epsilon_0$ ) ve Birim ünite için kırılma enerjisi( $G_f$ ) değerleri girilmiştir.



Şekil5.4. Çok Çatlaklı Beton Modeli (Multi-Crack Concrete Model-Model 82) için gerilme\_zorlanma değişimi

Çok çatlaklı beton modeli, çok çatlaklı plastisite için geliştirilmiş modeldir. Burada, basınç bölgesindeki kırılmaya neden olan eğilme çatlakları ihmal edilmiştir. Bu modelde yapılan kabulde herhangi bir malzeme noktasında, izin verilen çatlama doğrultularının sayısı önceden tanımlanmaktadır. Seçilen bu noktalar ve aralarındaki yönlendirmede kırılma kriterleri kesinlikle aşılmamalıdır. Halen süregelen durumda, iki boyutlu durum için düzlemde 8(sekiz), düzlem dışında 1(bir) doğrultu kullanılmaktadır. Herhangi bir doğrultu tanımlanırken olası çatlama düzlemi ve her bir düzlem içinde bir ayrışma akma yüzeyi ile akma durumu parametreleri bulunmalıdır. Düzlem çatlama için bölgesel koordinat sistemi aşağıdaki şekil 5.5 te verilmiştir.



Şekil5.5. Düzlem çatlama için bölgesel koordinat sistemi

Akma yüzeyi, Coulomb sürtünme yüzeyinin bir asimtotu olan hiperbolik bir yüzeydir. Her bir çatlama düzlemindeki  $(S_r, S_s, S_T)^T$  değerleri lokal gerilmelerin zorlanma koşullarına bağlı olarak ortaya çıkan statik zorlanmalar global gerilme tensörü  $(\sigma_{ij})$  nün dönüşümünden elde edilir.

Lusas paket programında lineer olmayan analiz için girilen datalar şekilde gösterilmiştir. Bu datalarla belirlenen davranışı hesaplamak amacıyla yapılan artımların yaklaşımı verilmiştir.

**Nonlinear & Transient**

**Incrementation**

Nonlinear

Incrementation: Automatic

Starting load factor: 5E3

Max change in load factor: 5E3

Max total load factor: 120E3

Adjust load based on convergence history

Iterations per increment: 10

Options... Advanced...

**Solution strategy**

Same as previous loadcase

Max number of iterations: 10

Residual force norm: 0,1

Incremental displacement norm: 1

Advanced...

**Incremental LUSAS file output**

Same as previous loadcase

Output file: 1

Plot file: 1

Restart file: 0

Max number of saved restarts: 0

Log file: 1

History file: 1

OK Cancel Help

**Advanced solution strategy**

**Nonlinear convergence**

Maximum absolute residual: 3

Residual RMS: 0

Displacement norm: 1

Residual work norm: 5

**Nonlinear iterative acceleration**

Maximum number of line searches: 4

Line search tolerance factor: 0,75

Maximum line search amplification factor: 5

Maximum line search step length: 25

Minimum line search step length: 0

Separate iterative loop for contact procedure

OK Cancel Help

**Nonlinear Options**

**Geometric Nonlinearity**

Total Lagrangian  Updated Lagrangian

Eulerian  Co-rotational Formulation

**Solution control**

Continue solution after convergence failure

Continue solution if more than one negative pivot occurs

Suppress initial slideline penetration check

Non-symmetric solution

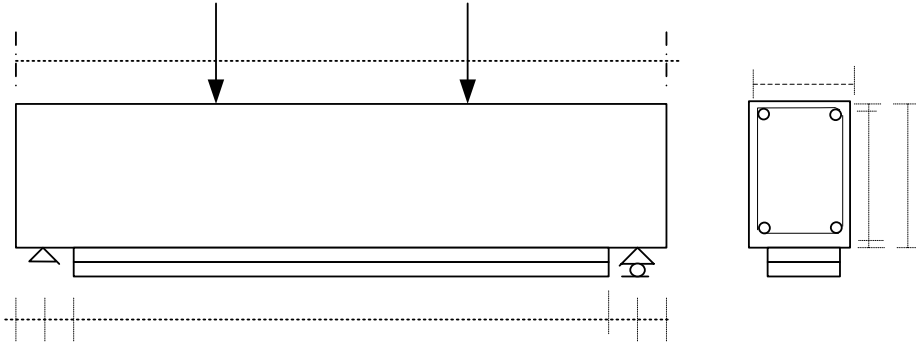
OK Cancel Help

Şekil.5.6. Lusas Paket programında doğrusal olmayan analiz için girilen veriler



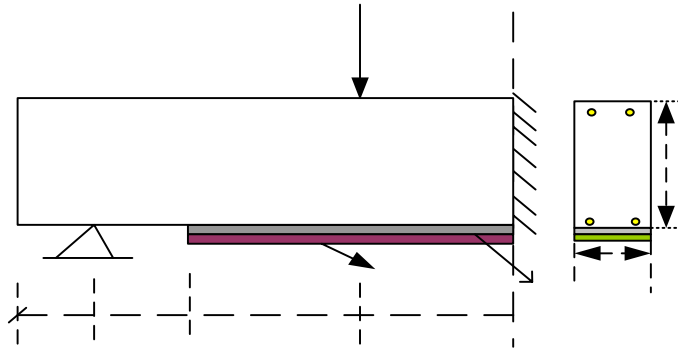
### 5.1.1. A tipi sayısal kiriş modeli

A tipi betonarme kiriş modeli 120x200 boyutlarında ve 1500 mm kiriş açıklığına sahip çekme bölgesinde 2 $\phi$ 12 ve basınç bölgesinde 2 $\phi$ 8 donatı bulunan kiriştir. İki noktadan yükleme yapılan kiriş modelleri orta bölgesinden simetridir. Bu modele ait en ve boy kesiti, mevcut donatısı ile yükleme durumu Şekil 5.7. de verilmiştir.



Şekil 5.7. A tipi betonarme kiriş modelinin en ve boy kesiti

Doğrusal olmayan analiz için hazırlanan sayısal kiriş modelleri orta bölgesinden simetrik olduğu için bilgisayar ortamında modellenirken Şekil 5.8'deki gibi modellenmiştir.

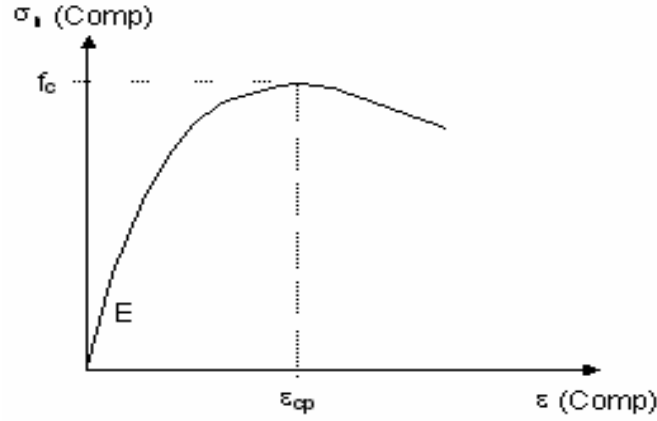


Şekil.5.8. A1 tipi kiriş için sayısal analiz modeli kesiti

Bütün sayısal kiriş modellerinde kullanılan beton sınıfı olarak C20(BS20) betonu seçilmiştir. Bu betona ait mekanik özellikleri Tablo 5.1de verilmiştir.

Tablo 5.1. Kiriş betonunun mekanik özellikleri

$b_w$ (mm)	$d$ (mm)	$f_{ck}$ (Mpa)	$f_{cd}$ (Mpa)	$f_{ctk}$	Ezilme Birim Kısalması( $\epsilon_{cu}$ )	Poison Oranı ( $\mu_c$ )	28 Günlük Elastisite $E_c$	28 Günlük Kayma modülü $G_c$
120	170	20	13	1.0	0.003	0.2	28 500 MPa	11200Mpa

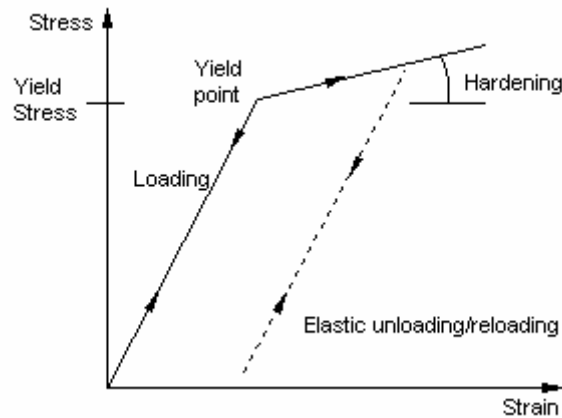


Şekil 5.9 Kiriş betonun gerilme-zorlanma diyagramı

Hazırlanan tüm sayısal kiriş modellerinde kiriş donatısı olarak çekme ve basınç bölgelerine yerleştirile donatılar için S 420 (BÇIII) çeliği seçilmiştir. Bu donatıya ait mekanik özellikler Tablo 5.2 de verilmiştir.

Tablo 5.2.Kiriş donatısı mekanik özellikleri

$b_w$	$d$	$f_{yk}$	$f_{yd}$	$f_{su}$	Donatı Oranı( $\rho$ )	$\epsilon_{su}$ Oranı %	$E_s$	Kopma birim Uzaması $\epsilon_{su}$	Poison Oranı
120	170	420	365	500	0.01108	12	$2.10^5$	0.1	0.3



Şekil 5.10. Donatı çeliğinin gerilme-zorlanma diyagramı

Betonarme kirişlerin güçlendirilmesinde kullanılan FRP malzemesi olarak uygulamada sıkça kullanılan Sika Carbodur XS 1014 seçilmiştir. 100 mm

genişliğinde ve 1.5 mm kalınlığındaki bu malzemenin kiriş tabanının tamamına uygulandığı kabul edilmiştir.

Tablo 5.3. Karbon fiber takviyeli plakaların mekanik özellikleri

CFRP türü	Genişlik (mm)	Kalınlık (mm)	Elastisite Modülü (N/mm <sup>2</sup> )	Yoğunluk (kg/l)	Kopma Oranı (%)	Çekme Dayanımı (N/mm <sup>2</sup> )	Yapışma Dayanımı (N/mm <sup>2</sup> )
Sika Carbodur XS 1014	100	1.5	165 000	1.65	1.35	2200	4

FRP plakaların betonarme kiriş yüzeyine yapıştırılmasında “Sikadur 30” epoksi malzemesi kullanılmıştır. A ve B bileşenli iki ayrı malzemenin uygun oranlarda karıştırılmasıyla elde edilen yapıştırıcı uygulamalarda sıkça tercih edilir.

Tablo 5.4.Sikadur 30 epoksi reçinesinin mekanik özellikleri

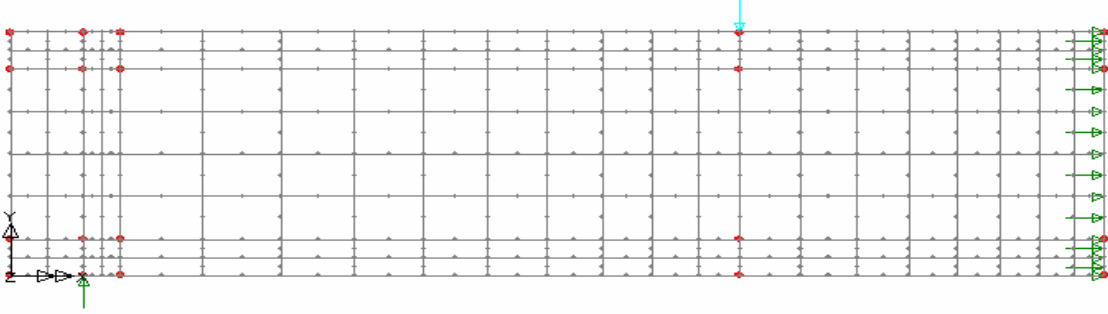
Epoksi reçinesi türü	Elastisite Modülü (MPa)	Yoğunluk (kg/l)	Basınç Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Eğilme Dayanımı (MPa)
Sikadur 30	4800	2.2	80	12	18

Sayısal analize esas olan A tipi modeller, CFRP plaka uygulama tekniklerini bağlı olarak aşağıdaki tablodaki gibi hazırlanmıştır.

Tablo 5.5. A tipi sayısal kiriş modelleri

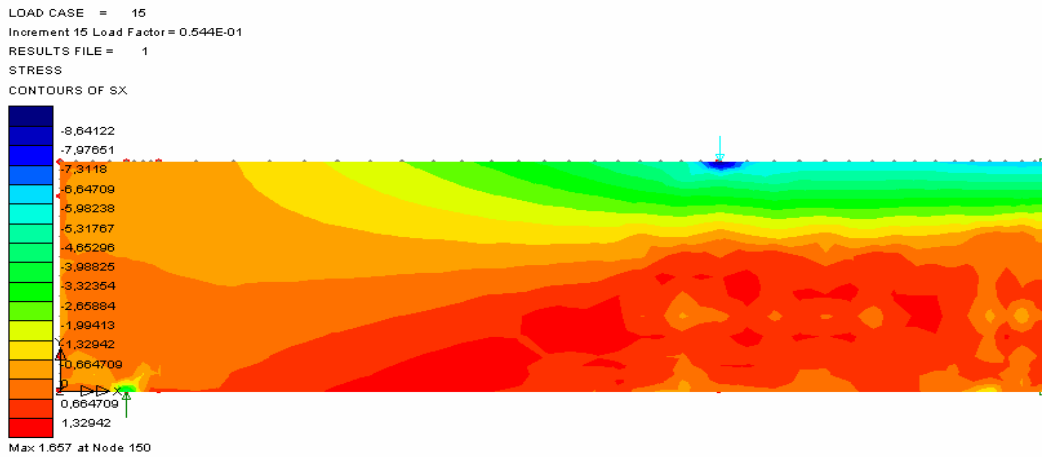
Modeller	CFRP Malzemesi türü	Epoksi türü	Uygulama Yöntemi
A0	Sika Carbodur XS 1014	Sikodur-30	FRP siz Kiriş
A1	Sika Carbodur XS 1014	Sikodur-30	Kiriş tabanına 1 Kat
A2			Kiriş tabanına 2 Kat
A3			Kiriş tabanına 3 Kat

### 5.1.1.1. A0 tipi sayısal kiriş modeli analiz sonuçları



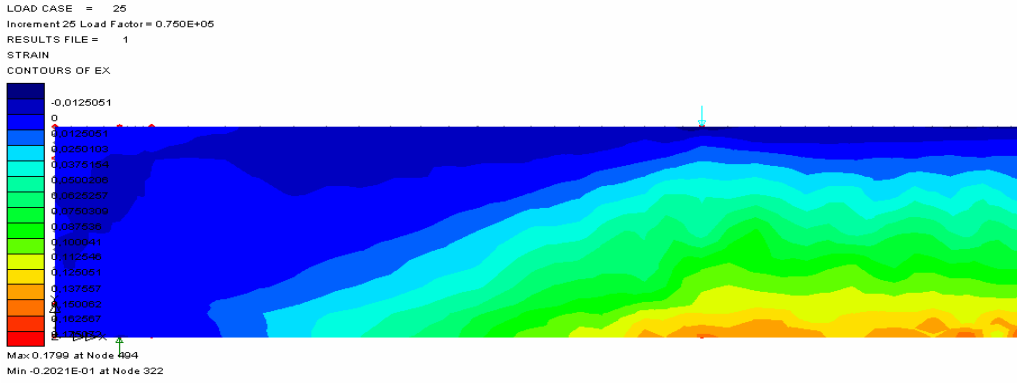
Şekil 5.11 A0 tipi sayısal kiriş modeline ait Sonlu Elamanlar Ağı, yükleme ve mesnet durumu

A0 tip sayısal kirişi modeli kontrol kirişi olup güçlendirilmemiş mevcut durumu göstermektedir. Burada betonarme kısım modellenirken düzgün yüzey ağ eleman, basınç ve çekme bölgesindeki donatılar düzgün bar eleman ağı kullanılmıştır. Mesnet noktasında ve tekil yükün bulunduğu noktada analizde gerçekçi çözümler elde edebilmek için yoğun olarak seçilmiştir.



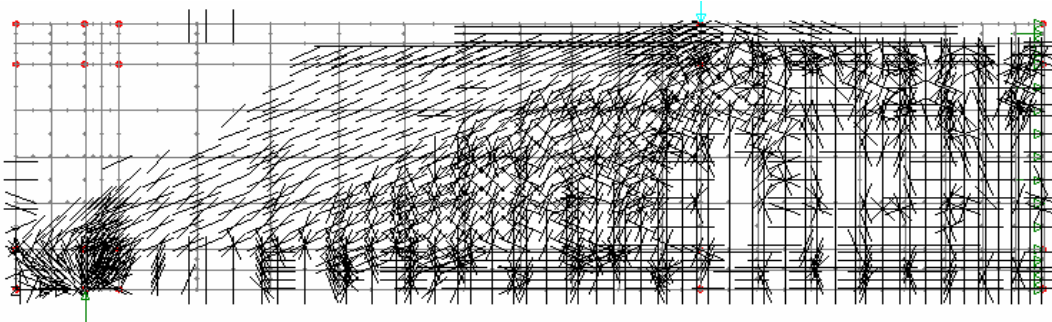
Şekil 5.12 A0 tipi sayısal kiriş modelinde doğrusal olmayan analiz sonucunda oluşan normal gerilme ( $\sigma_x$ ) gerilmesi dağılımı

Yapılan doğrusal olmayan analiz sonucunda mevcut A0 kiriş yüzeyinde oluşan Normal gerilme ( $\sigma_x$ ) dağılımı şekildeki gibi elde edilmiştir. Burada en büyük normal gerilme ( $\sigma_x$ ) tekil yükün uygulandığı noktada oluşmuştur. Bu noktadan itibaren kiriş yüksekliği boyunca oluşan gerilme değerleri grafik olarak sunulmuştur.



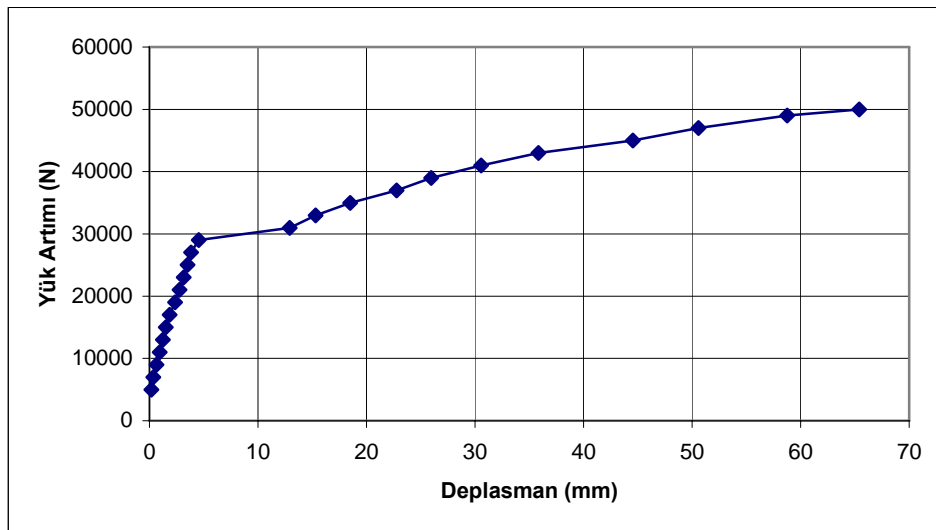
Şekil 5.13 A0 tipi sayısal kiriş modelinde meydana gelen birim zorlanma( $\epsilon_x$ ) değerleri değişimi

Bu şekilde, A0 tipi sayısal kiriş modelinde gerçekleştirilen doğrusal olmayan analiz sonucu kiriş yenilme durumuna geldiği andaki bütün kesit boyunca oluşan birim zorlanma ( $\epsilon_x$ ) değerleri ayrıntılı olarak verilmiştir. En büyük zorlanmaların tekil yükleme noktasından başlayıp mesnet noktasına doğru yayıldığı belirlenmiştir.



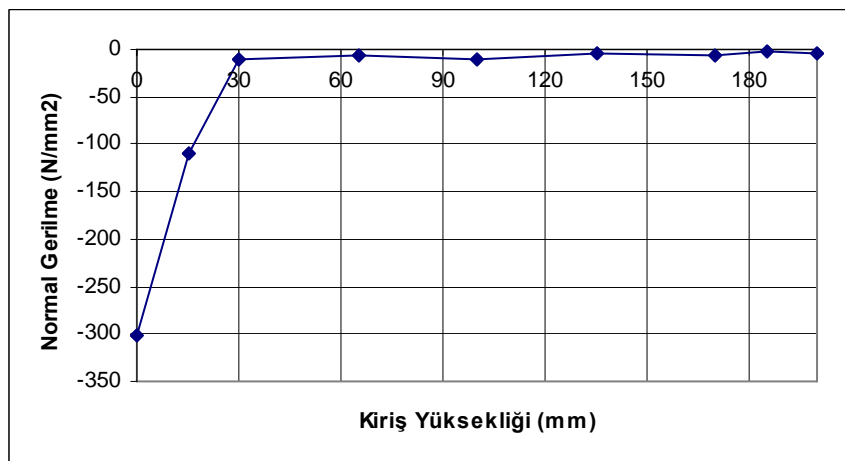
Şekil 5.14 A0 tipi sayısal kiriş modelinde doğrusal olmayan analiz sonucunda oluşan çatlak mekanizması

Burada, A0 tipi sayısal kiriş modelinin kirişinin  $P=100$  KN yükleme altında doğrusal olmayan analiz sonucu oluşan kirişin yenilme durumuna ulaştığı andaki eğilme ve eğik kesme çatlakları görülmektedir. Bu çatlaklar modelin yenilme biçimi hakkında ayrıntılı sonuçlar vermektedir. Tekil yük etkime noktasından başlayan ve mesnete doğru yoğunlaşan eğik kesme çatlakları ile yük altında kiriş tabanında yayılan eğilme çatlakları görülmektedir. Mesnet noktasında eğilme ve çekme çatlaklarının yoğunlaştığı ve burada aşırı zorlanmalar oluştuğu belirlenmiştir. Ayrıca tekil yük altında başlayan ve bir yay çizerek yayılan çatlak yoğunlaşması tespit edilmiştir.



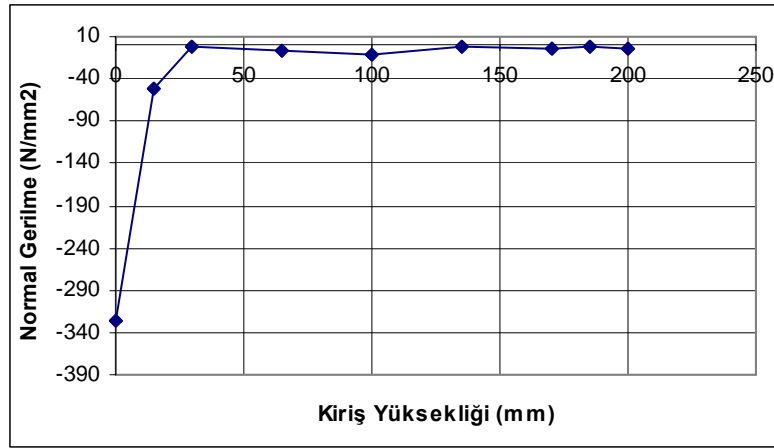
Şekil 5.15 A0 tipi sayısal kiriş modeline P=100 KN'luk tekil yükleme sonucunda oluşan yük artımı-deplasman grafiği

A0 tipi sayısal kiriş modeli üzerine P=100 KN luk tekil yük uygulaması durumunda meydana gelen Yük Artımı-Deplasman değişimi grafik olarak verilmiştir. Grafik incelendiğinde Yük miktarı 30 KN değerine kadar deplasmanının doğrusal arttığı ve bu değeri karşılık 4.958 mm. deplasman olduğu görülmüştür. Bu değerden sonra deplasmanın hızla arttığı ve yükün ise doğrusala yakın bir değişim göstermektedir.



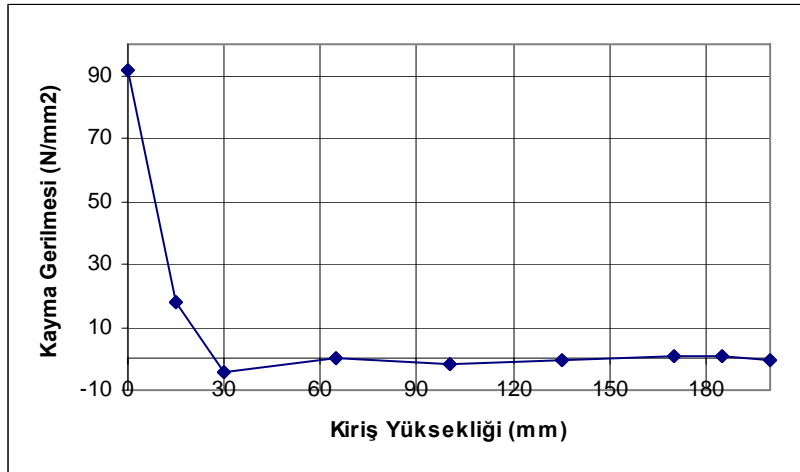
Şekil 5.16 A0 tipi sayısal kiriş modeli için tekil yük altında kiriş yüksekliği boyunca oluşan Normal Gerilme ( $\sigma_x$ ) diyagramı

A0 tipi sayısal kiriş modelinde uygulanan tekil yük altında kiriş yüksekliği boyunca oluşan en büyük normal gerilme ( $\sigma_x$ ) değerleri dağılımı Şekil 5.16'da verilmiştir. En büyük normal gerilme değeri tekil yükün uygulandığı noktada  $-302,19 \text{ N/mm}^2$  olarak bulunmuştur.



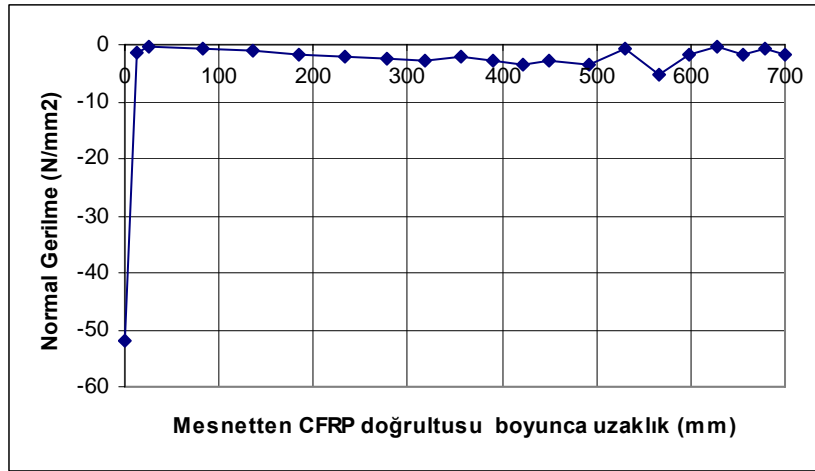
Şekil 5.17 A0 tipi sayısal kiriş modeli için tekil yük altında kiriş yüksekliği boyunca oluşan Normal Gerilme ( $\sigma_y$ ) değişimi

Bu grafikte, A0 tipi sayısal kiriş modelinde tekil yük altında meydana gelen normal gerilme ( $\sigma_y$ ) değişimi verilmiştir. En büyük normal gerilme tekil yükün uygulandığı noktada  $-326,32 \text{ N/mm}^2$  olarak bulunmuştur.

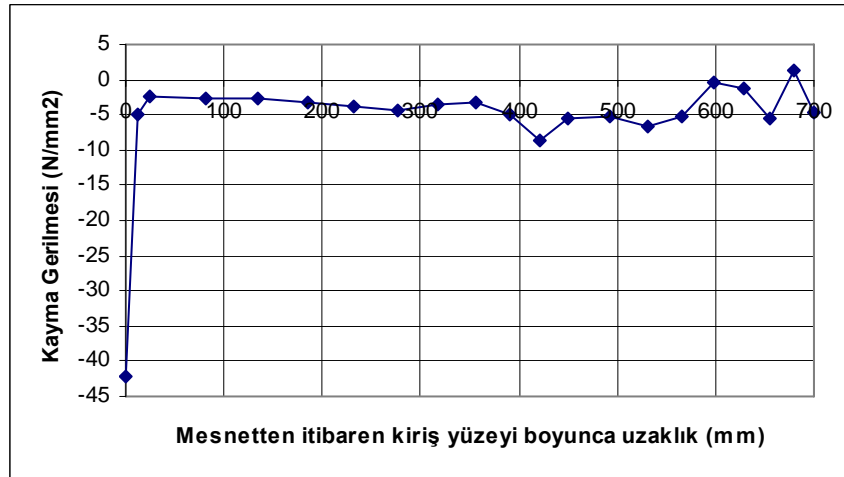


Şekil 5.18. A0 tipi sayısal kiriş modeli için tekil yük altında kiriş yüksekliği boyunca oluşan Kayma Gerilmesi  $\tau_{xy}$  değişimi

A0 tipi sayısal kiriş modeli için tekil yük altında kiriş yüksekliği boyunca oluşan kayma gerilmesi ( $\tau_{xy}$ ) değerinin en büyük değeri  $91,879 \text{ N/mm}^2$  olarak bulunmuştur. Betonarme kiriş ile CFRP yüzeyleri arasında meydana gelebilecek gerilme değişimleri güçlendirme tekniğinin uygunluğu konusunda yeterli veriler sağlayacaktır. Bu nedenle Şekil 5.19.1 ve Şekil 5.19.2 de mesnet noktasından itibaren CFRP doğrultusu boyunca oluşan Normal gerilme ( $\sigma_x$ ) ve kayma gerilmesi ( $\tau_{xy}$ ) değişimleri verilmiştir.



Şekil 5.19.1 A0 tipi sayısal kiriş modeli için mesnetten itibaren kiriş yüzeyi boyunca oluşan normal gerilmesi ( $\sigma_y$ ) diyagramı

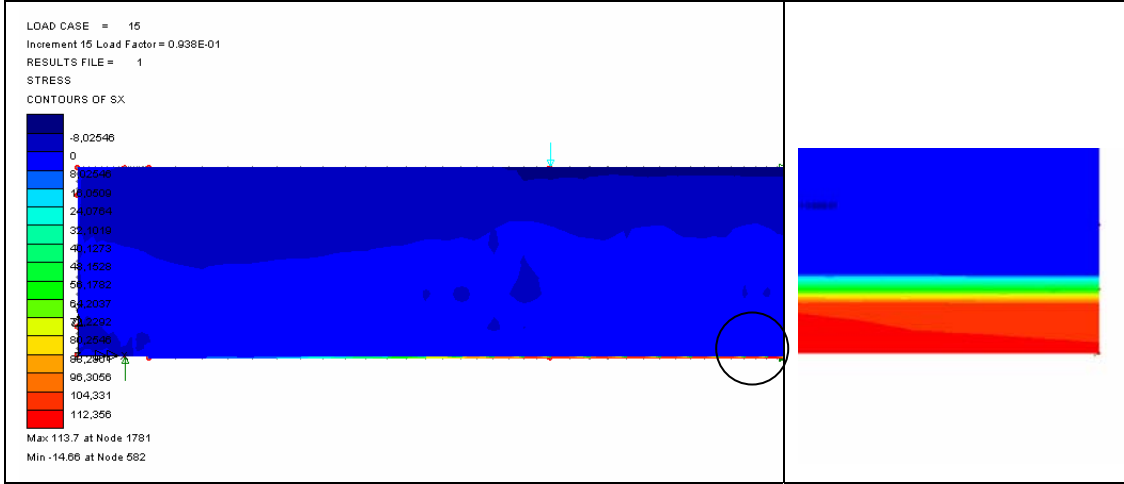


Şekil 5.19.2 A0 tipi sayısal kiriş modeli için mesnetten itibaren kiriş yüzeyi boyunca oluşan kayma gerilmesi ( $\tau_{xy}$ ) diyagramı

Betonarme kiriş ile CFRP yüzeyleri arasındaki en büyük normal gerilme  $-51,798 \text{ N/mm}^2$  ve kayma gerilmesi  $-42,277 \text{ N/mm}^2$  olarak hesaplanmıştır. İki değerde mesnet noktasında bulunmuştur.



### 5.1.1.2. A1 tipi sayısal kiriş modeli analiz sonuçları



Şekil 5.20 A1 tipi sayısal kiriş modelinde doğrusal olmayan analiz sonucunda oluşan normal gerilme ( $\sigma_x$ ) gerilmesi dağılımı ve güçlendirme bölgesi detayı

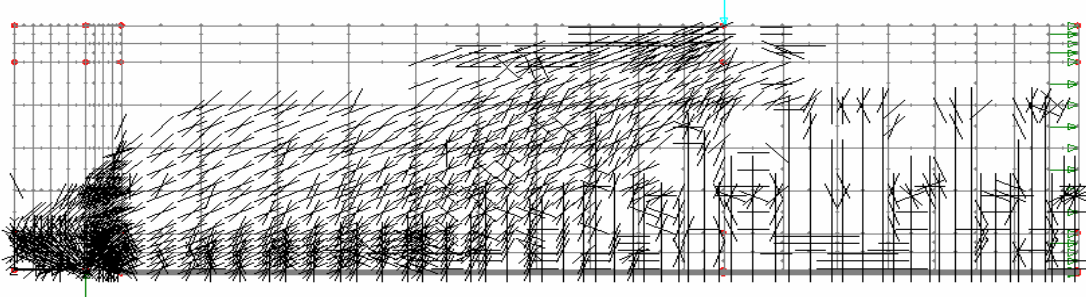
Gerçekleştirilen doğrusal olmayan analiz sonucunda A1 kiriş yüzeyinde oluşan Normal gerilme ( $\sigma_x$ ) dağılımı şekildeki gibi elde edilmiştir. Burada en büyük normal gerilme ( $\sigma_x$ ) tekil yükün uygulandığı noktada oluşmuştur. Güçlendirme bölgesi detayı incelendiğinde betonarme kiriş, epoksi ve CFRP tabakaları arasında tekil yüklemeye doğan normal gerilme değişimleri ve artımları açıkça görülmektedir.



Şekil 5.21 A1 tipi sayısal kiriş modelinde meydana gelen birim zorlanma ( $\epsilon_x$ ) değerleri değişimi

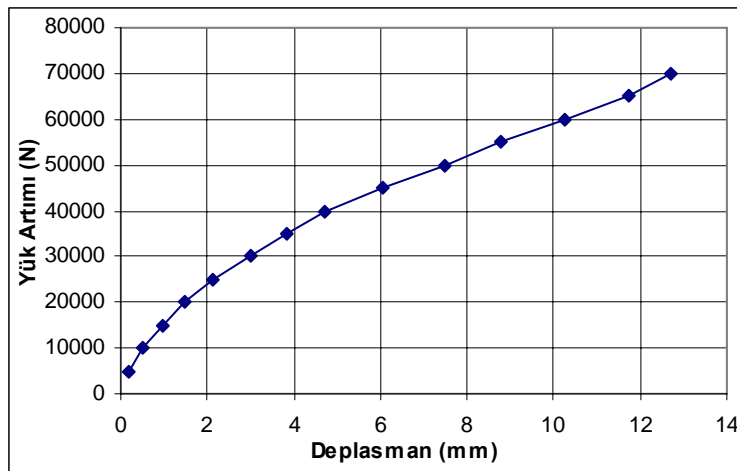
Bu şekilde, A1 tipi sayısal kiriş modelinde gerçekleştirilen doğrusal olmayan analiz sonucu kiriş yenilme durumuna geldiği andaki bütün kesit boyunca oluşan birim zorlanma ( $\epsilon_x$ ) değerleri ayrıntılı olarak verilmiştir. En büyük zorlanmaların tekil yükleme noktasından başlayıp mesnet noktasına doğru yayıldığı belirlenmiştir.

Ayrıca Her bir yük artımı için bulunan zorlanmalar belirlenerek yenilme biçimi hakkında genel yaklaşımlar bulunabilir



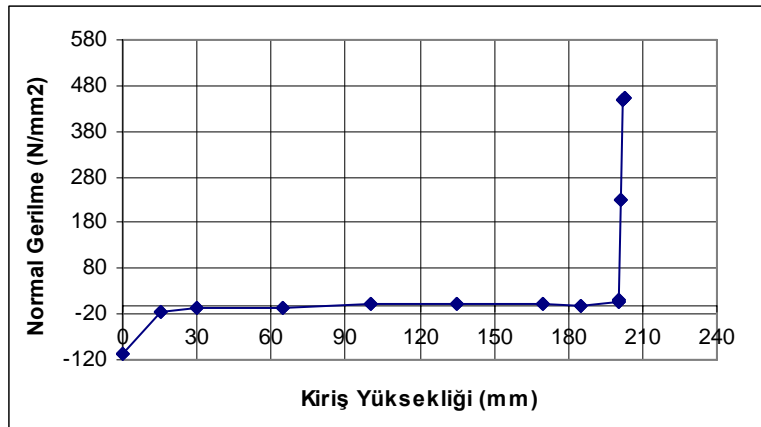
Şekil 5.22 A1 tipi sayısal kiriş modelinde doğrusal olmayan analiz sonucunda oluşan çatlak mekanizması

Şekil 5.22. 'de , A1 tipi sayısal kiriş modelinin kirişinin  $P=100$  KN yükleme altında doğrusal olmayan analiz sonucu oluşan kirişin yenilme durumuna ulaştığı andaki eğilme ve eğik kesme çatlakları görülmektedir. Bu çatlaklar modelin yenilme biçimi hakkında ayrıntılı sonuçlar vermektedir. Tekil yük etkime noktasından başlayan ve mesnete doğru yoğunlaşan eğik kesme çatlakları ile yük altında kiriş tabanında yayılan eğilme çatlakları görülmektedir. Mesnet noktasında eğilme ve çekme çatlaklarının yoğunlaştığı ve burada aşırı zorlanmalar oluştuğu belirlenmiştir. Ayrıca tekil yük altında başlayan ve bir yay çizerek yayılan çatlak yoğunlaşması tespit edilmiştir. CFRP bitiş noktasında meydana gelen eğilme kesme çatlakları malzemenin bu noktadan itibaren ayrışarak yenilme durumunu göstermektedir. A0 tipi sayısal kiriş modelinde oluşan çatlaklarla karşılaştırıldığında çatlak sayılarında belli oranda azalma olduğu belirlenecektir.



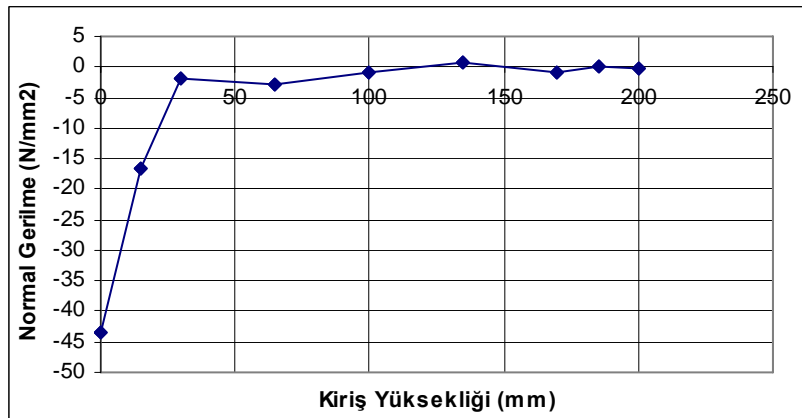
Şekil 5.23 A1 tipi sayısal kiriş modeline  $P=100$  KN'luk tekil yükleme sonucunda oluşan yük artımı-deplasman grafiği

Şekil 5.23'te A1 tipi sayısal kiriş modeli üzerine  $P=100$  KN luk tekil yük uygulaması durumunda meydana gelen yük artımı-deplasman değişimi grafik olarak verilmiştir. Grafik incelendiğinde yük miktarı 70 KN değerine kadar deplasmanın doğrusal arttığı ve bu değeri karşılık 12.98 mm. deplasman olduğu görülmüştür. Bu değerden sonra kiriş modelinin göçme durumuna ulaşıp taşıma kapasitesini kaybettiği belirlenmiştir. A0 tipi kirişine göre taşıma kapasitesinin arttığı görülmüştür.



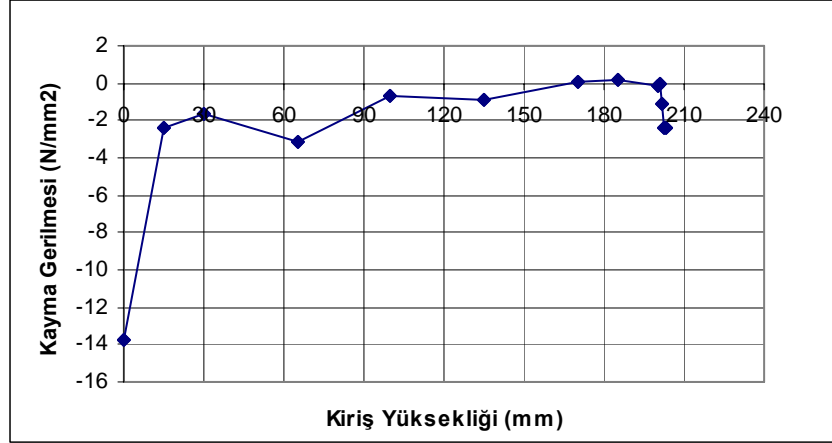
Şekil 5.24 A1 tipi sayısal kiriş modeli için tekil yük altında kiriş yüksekliği boyunca oluşan Normal Gerilme ( $\sigma_x$ ) değişimi

Şekil 5.24'te A1 tipi sayısal kiriş modelinde uygulanan tekil yük altında kiriş yüksekliği boyunca oluşan en büyük normal gerilme ( $\sigma_x$ ) değerleri dağılımı verilmiştir. En büyük normal gerilme değeri tekil yükün uygulandığı noktada  $-107,103$  N/mm<sup>2</sup> olarak bulunmuştur. A0 tipi kirişine göre önemli ölçüde normal gerilme azalımı sağlanmıştır.



Şekil 5.25 A1 tipi sayısal kiriş modeli için tekil yük altında kiriş yüksekliği boyunca oluşan Normal Gerilme ( $\sigma_y$ ) değişimi

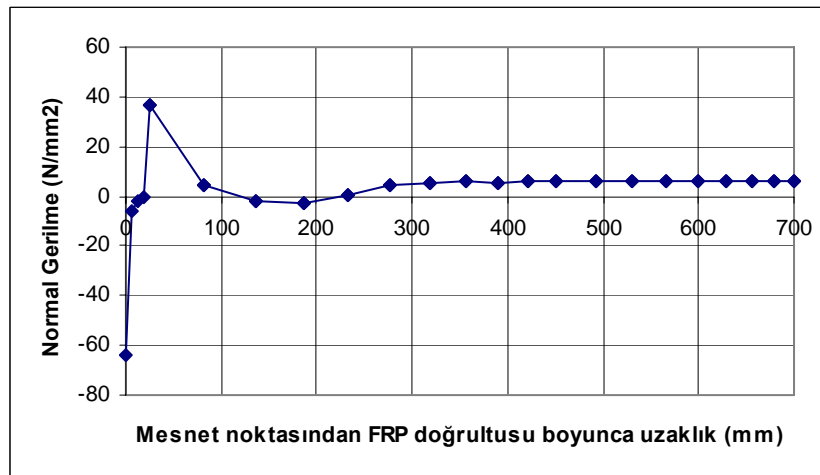
Şekil 5.25'te A1 tipi sayısal kiriş modeline tekil yük uygulanması sonucu oluşan Normal gerilme ( $\sigma_y$ ) değişimi grafik olarak sunulmuştur. En büyük gerilme değeri  $-43,367 \text{ N/mm}^2$  olarak bulunmuştur. A0 tipi sayısal kiriş modeli ile karşılaştırıldığında önemli gerilme azalımı belirlenmiştir.



Şekil5.26 A1 tipi sayısal kiriş modeli için kiriş yüksekliği boyunca oluşan kayma gerilmesi ( $\tau_{xy}$ ) diyagramı

A1 tipi sayısal kiriş modelinde kiriş yüksekliği boyunca oluşan en büyük kayma gerilmesi değeri  $-13,72 \text{ N/mm}^2$  olarak belirlenmiştir. A0 tipi kiriş ile karşılaştırıldığında oldukça önemli gerilme azalması oluşmuştur.

Şekil 5.27.1'de A1 sayısal kiriş modelinin mesnet noktasından CFRP doğrultusu boyunca oluşan en büyük normal gerilme değeri  $-64,086 \text{ N/mm}^2$  olarak hesaplanmıştır. CFRP bitiş noktasında bu değer  $+36,45 \text{ N/mm}^2$  olmaktadır.



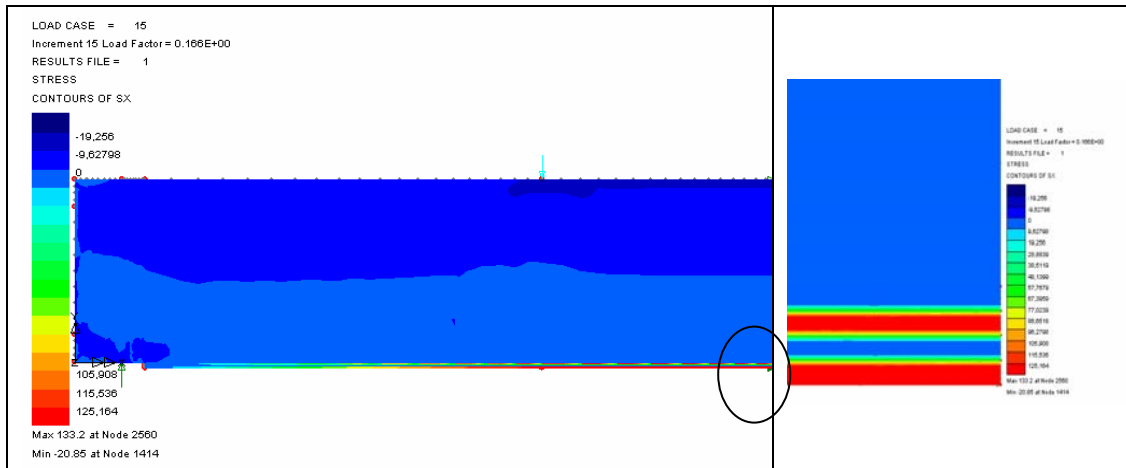
Şekil 5.27.1. A1 sayısal kiriş modelinde mesnet noktası ile CFRP yüzeyi boyunca oluşan normal gerilme ( $\sigma_x$ ) değişimi

Şekil 5.27.2’de ise A1 sayısal kiriş modelinin mesnet noktasından CFRP doğrultusu boyunca oluşan kayma gerilmeleri ( $\tau_{xy}$ ) değişimleri verilmiştir. Mesnette hesaplanan en büyük kayma gerilmesi  $-4,392 \text{ N/mm}^2$  iken bu değer CFRP bitiş noktasında  $+13,015 \text{ N/mm}^2$  değerine ulaşmaktadır.



Şekil 5.27.2. A1 sayısal kiriş modelinde mesnet noktası ile CFRP yüzeyi boyunca oluşan kayma gerilmesi ( $\tau_{xy}$ ) değişimi

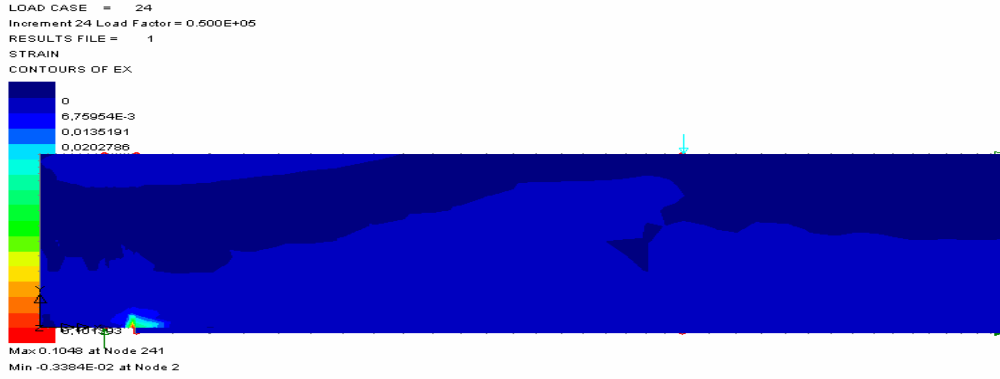
### 5.1.1.3. A2 Tipi Sayısal kiriş modeli analiz sonuçları



Şekil 5.28. A2 tipi sayısal kiriş modelinde doğrusal olmayan analiz sonucunda oluşan normal gerilme ( $\sigma_x$ ) gerilmesi dağılımı ve güçlendirme bölgesi detayı

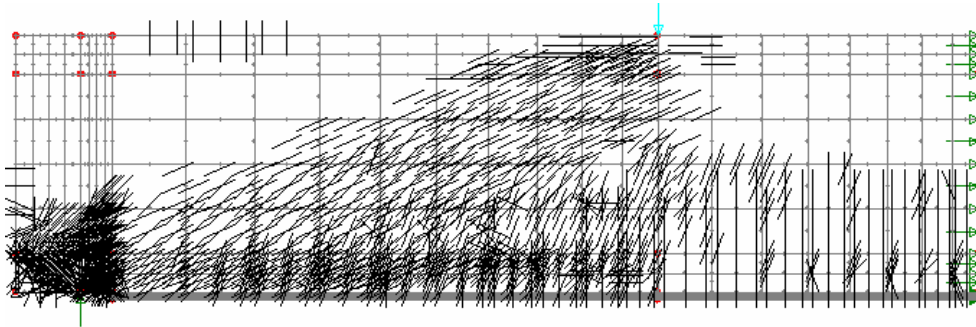
Şekil 5.28’de gerçekleştirilen doğrusal olmayan analiz sonucunda en son artırım sonucu A2 kiriş yüzeyinde oluşan Normal gerilme ( $\sigma_x$ ) değerleri dağılımları elde edilmiştir. Burada en büyük normal gerilme ( $\sigma_x$ ) değerleri CFRP yüzeylerinde

oluşturmuştur. Güçlendirme bölgesi detayı incelendiğinde betonarme kiriş, eposi ve CFRP tabakaları arasında tekil yüklemeye meydana gelen normal gerilme değışimleri ve artımları açıkça görölmektedir.



Şekil 5.29. A2 tipi sayısal kiriş modelinde meydana gelen birim zorlanma( $\epsilon_x$ ) değeri değışimi

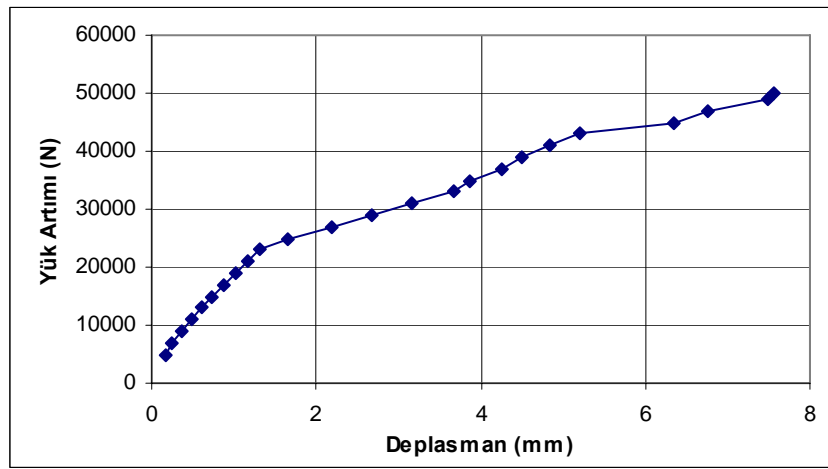
Bu şekilde, A2 tipi sayısal kiriş modelinde gerçekleştirilen doğrusal olmayan analiz sonucu kiriş yenilme durumuna geldiği andaki bütün kesit boyunca oluşan birim zorlanma ( $\epsilon_x$ ) değeri ayrıntılı olarak verilmiştir. En büyük zorlanmaların tekil yüklemeye noktasından başlayıp mesnet noktasına doğru yayıldığı belirlenmiştir. Ayrıca CFRP bitim noktasında önemli Her bir yük artımı için bulunan zorlanmalar belirlenerek yenilme biçimi hakkında genel yaklaşımlar bulunulabilir



Şekil 5.30. A2 tipi sayısal kiriş modelinde doğrusal olmayan analiz sonucunda oluşan çatlak mekanizması

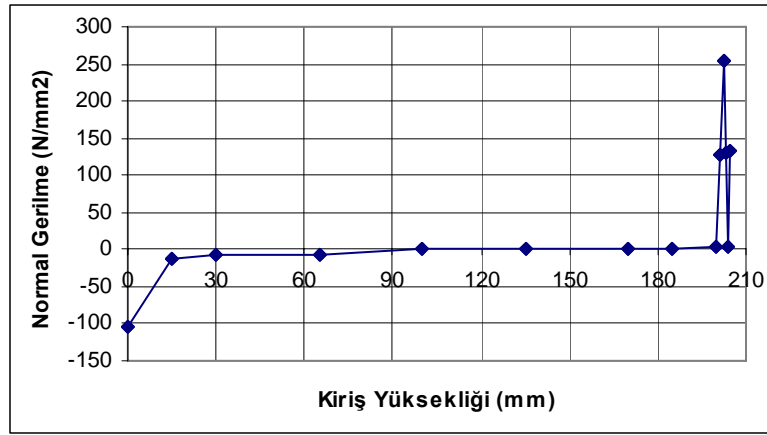
Şekil 5.30. 'da , A2 tipi sayısal kiriş modelinin kirişinin  $P=100$  KN yüklemeye altında doğrusal olmayan analiz sonucu oluşan kirişin yenilme durumuna ulaştığı andaki eğilme ve eğik kesme çatlakları görölmektedir. Bu çatlaklar modelin yenilme biçimi hakkında ayrıntılı sonuçlar vermektedir. Tekil yük etkime noktasından başlayan ve mesnete doğru yoğunlaşan eğik kesme çatlakları ile yük altında kiriş tabanında yayılan eğilme çatlakları görölmektedir. Mesnet noktasında eğilme ve çekme

çatlaklarının yoğunlaştığı ve burada aşırı zorlanmalar olduğu belirlenmiştir. CFRP bitiş noktasında meydana gelen eğilme kesme çatlakları malzemenin bu noktadan itibaren ayrılarak yenilme durumunu göstermektedir. Bunun dışında çekme donatısı doğrultusu boyunca kabuk betonda eğilme çatlaklarının sıklaştığı görülmektedir. Bu da kabuk betonun parçalanarak ayrışması sonucu oluşan yenilme biçimine işaret etmektedir. A0 ve A1 tipi sayısal kiriş modelinde oluşan çatlaklarla karşılaştırıldığında özellikle CFRP yakınlarında çatlak sayılarında belli oranda azalma olduğu görülecektir.

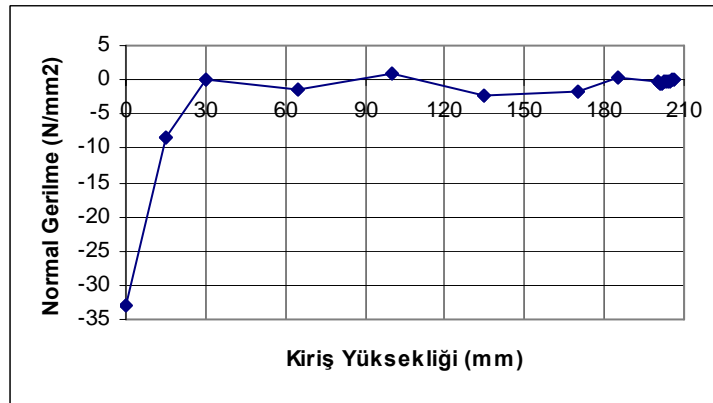


Şekil 5.31. A2 tipi sayısal kiriş modeline P=100 KN'luk tekil yükleme sonucunda oluşan Yük Artımı-deplasman grafiği

A2 tipi sayısal kiriş modeli üzerine P=100 KN luk tekil yük uygulaması durumunda meydana gelen Yük Artımı-Deplasman değişimi grafik olarak verilmiştir. Grafik incelendiğinde Yük miktarı 30 KN değerine kadar deplasmanının doğrusal arttığı ve bu değeri karşılık 3.153 mm. deplasman olduğu görülmüştür. Bu değerden sonra yükün artırılmasına rağmen deplasmanda önemli bir artış oluşmamaktadır ve yükün ise doğrusala yakın bir değişim göstermektedir. Yük değeri 95 KN'a ulaştığı anda yaklaşık olarak 23mm.'ye ulaşmıştır. Bu değer A0 ve A1 ile karşılaştırıldığında yük taşıma kapasitesinde çok önemli bir artış sağlandığı söylenebilir.

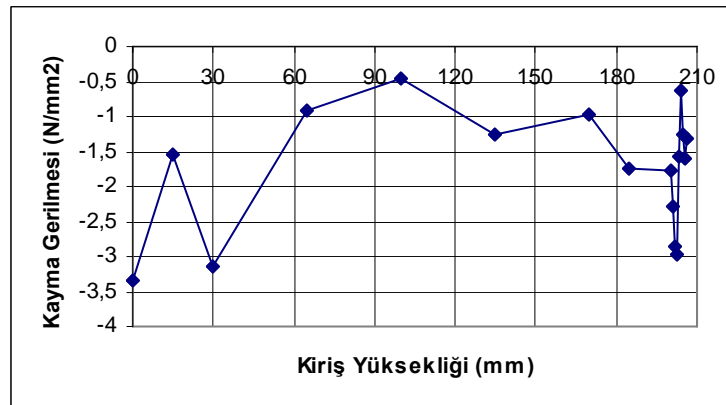


Şekil 5.32. A2 tipi sayısal kiriş modeli için tekil yük altında kiriş yüksekliği boyunca oluşan Normal Gerilme ( $\sigma_x$ ) değişimi



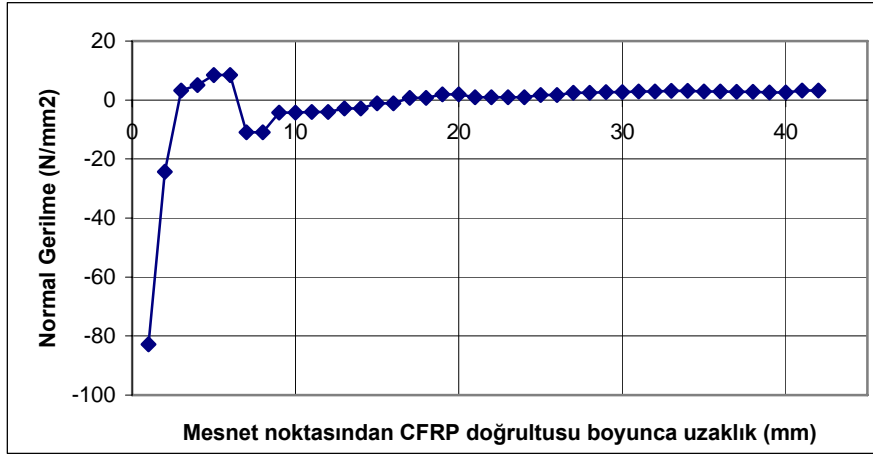
Şekil 5.33. A2 tipi sayısal kiriş modeli için tekil yük altında kiriş yüksekliği boyunca oluşan Normal Gerilme ( $\sigma_y$ ) değişimi

Şekil 5.33 'te A2 tipi sayısal kiriş modelinde uygulanan tekil yük altında kiriş yüksekliği boyunca oluşan normal gerilme( $\sigma_y$ ) değişimi verilmiştir. Analiz sonucunda en büyük  $\sigma_y$  değeri  $-32,87 \text{ N/mm}^2$  olarak hesaplanmıştır.

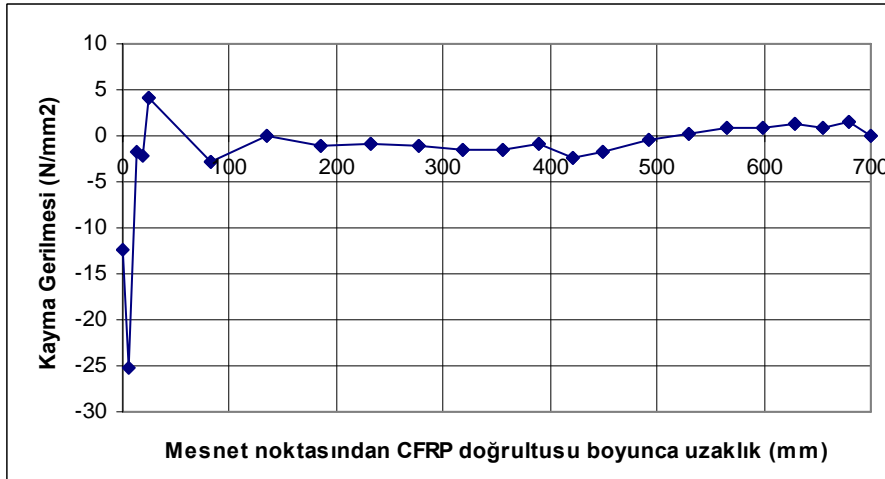


Şekil5.34 A2 tipi sayısal kiriş modeli için kiriş yüksekliği boyunca oluşan kayma gerilmesi ( $\tau_{xy}$ ) diyagramı



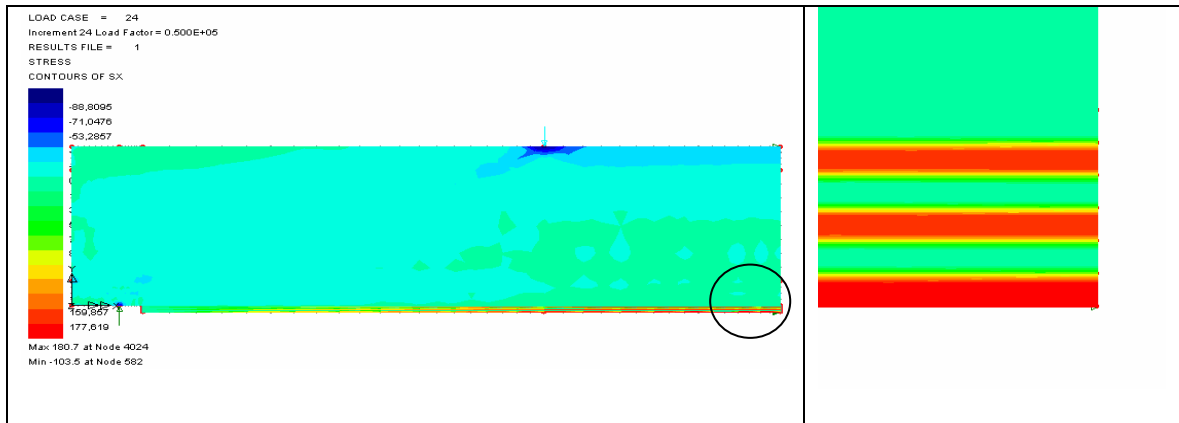


Şekil.5.35.1 A2 tipi sayısal kiriş modeli için mesnetten itibaren kiriş yüzeyi boyunca oluşan kayma gerilmesi ( $\sigma_x$ ) diyagramı



Şekil 5.35.2. A2 sayısal kiriş modelinde mesnet noktası ile CFRP yüzeyi boyunca oluşan kayma gerilmesi ( $\tau_{xy}$ ) değişimi

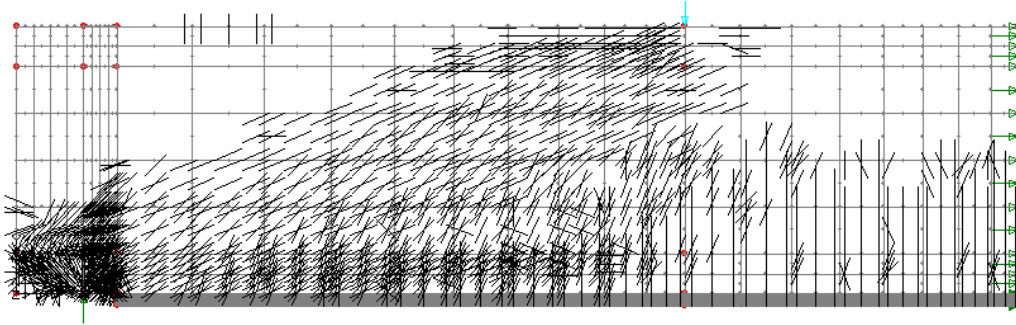
#### 5.1.1.4. A3 tipi sayısal kiriş modeli analiz sonuçları



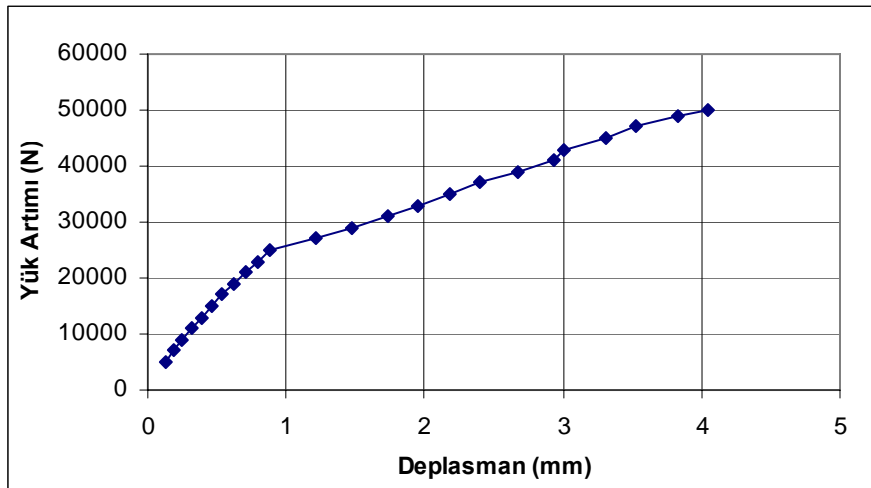
Şekil 5.36. A3 tipi sayısal kiriş modelinde doğrusal olmayan analiz sonucunda oluşan normal gerilme ( $\sigma_x$ ) gerilmesi dağılımı ve güçlendirme bölgesi detayı



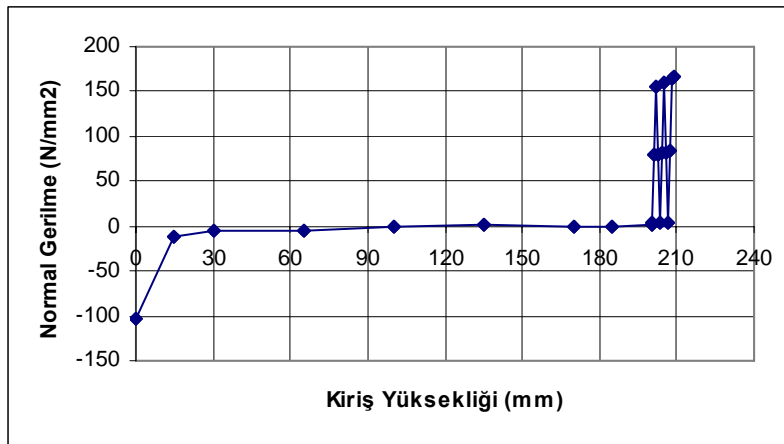
Şekil 5.37. A3 tipi sayısal kiriş modelinde meydana gelen birim zorlanma( $\epsilon_x$ ) değerleri değişimi



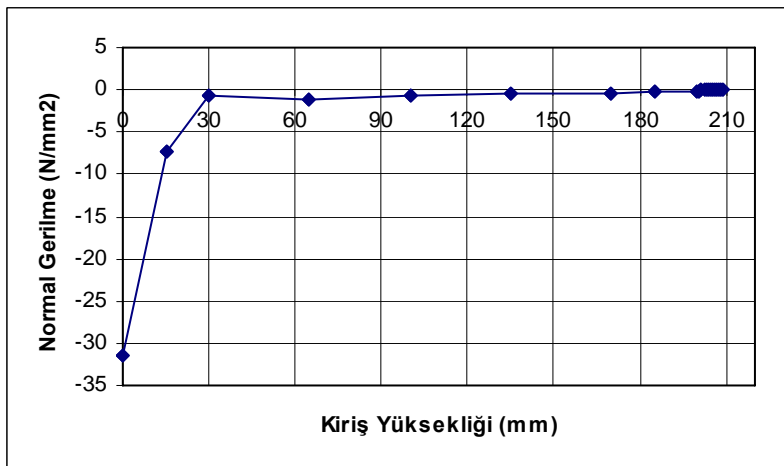
Şekil 5.38. A3 tipi sayısal kiriş modelinde doğrusal olmayan analiz sonucunda oluşan çatlak mekanizması



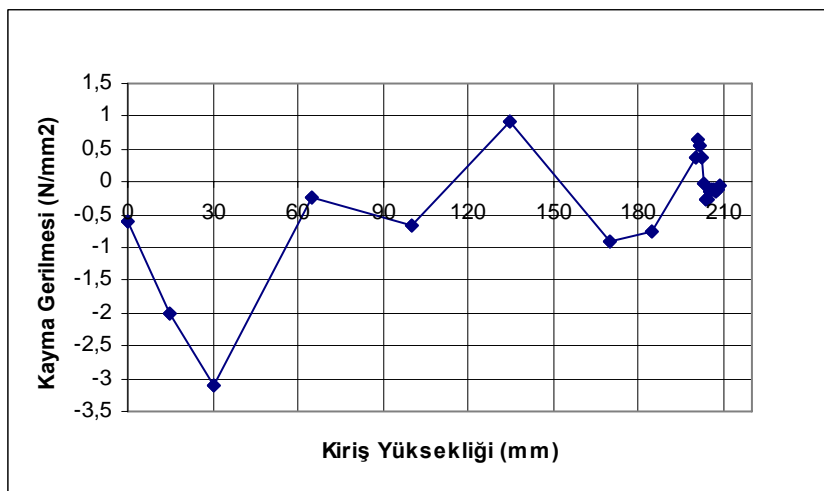
Şekil 5.39. A3 tipi sayısal kiriş modeline P=100 KN'luk tekil yükleme sonucunda oluşan Yük Artımı-deplasman grafiği



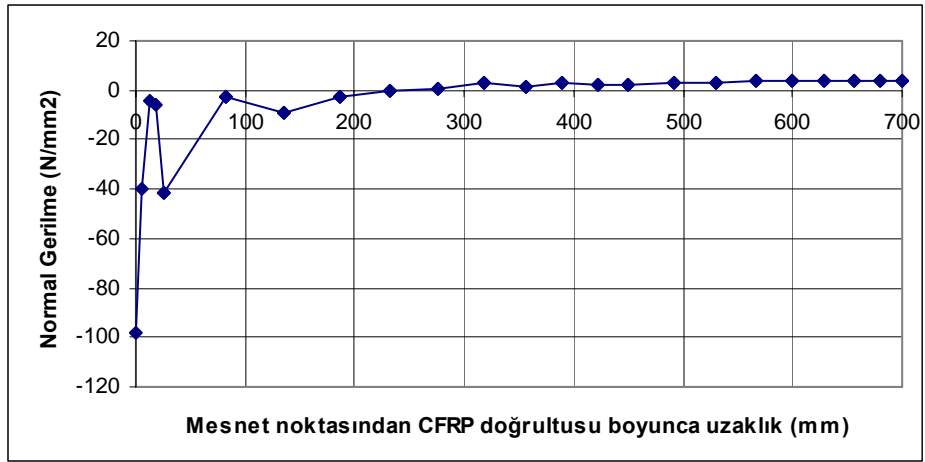
Şekil 5.40. A3 tipi sayısal kiriş modeli için tekil yük altında kiriş yüksekliği boyunca oluşan Normal Gerilme ( $\sigma_x$ ) değişimi



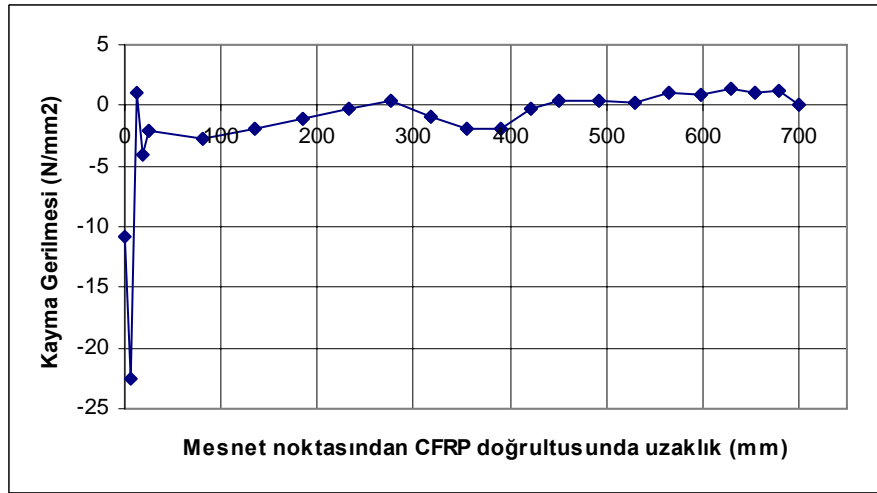
Şekil 5.41. A3 tipi sayısal kiriş modeli için tekil yük altında kiriş yüksekliği boyunca oluşan Normal Gerilme ( $\sigma_y$ ) değişimi



Şekil.5.42. A3 tipi sayısal kiriş modeli için mesnetten itibaren kiriş yüzeyi boyunca oluşan kayma gerilmesi ( $\tau_{xy}$ ) diyagramı



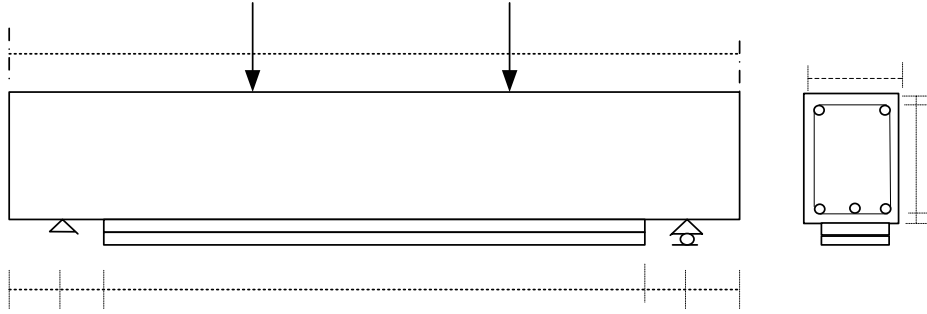
Şekil 5.43.1 A3 sayısal kiriş modelinde mesnet noktası ile CFRP yüzeyi boyunca oluşan normal gerilme ( $\sigma_x$ ) değişimi



Şekil 5.43.2 A3 sayısal kiriş modelinde mesnet noktası ile CFRP yüzeyi boyunca oluşan kayma gerilmesi ( $\tau_{xy}$ ) değişimi

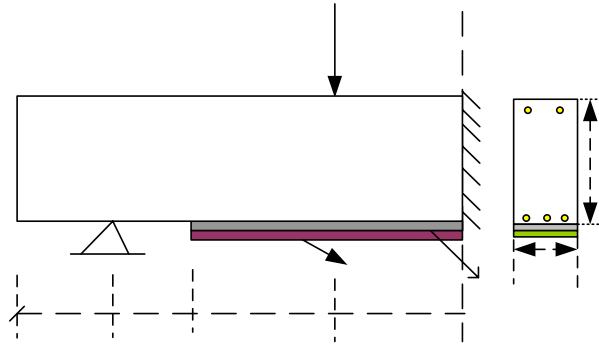
### 5.1.2. B tipi sayısal kiriş modeli

B tipi betonarme kiriş modeli 200x300 boyutlarında ve 3000 mm kiriş açıklığına sahip çekme bölgesinde 3 $\phi$ 16 ve basınç bölgesinde 2 $\phi$ 10 donatı bulunan kiriştir. Bu modele ait en ve boy kesiti, mevcut donatısı ile yükleme durumu Şekil 5.44 de verilmiştir.



Şekil 5.44. B tipi betonarme sayısal kiriş modelinin en ve boy kesiti

Doğrusal olmayan analiz için hazırlanan sayısal kiriş modelleri orta bölgesinden simetrik olduğu için bilgisayar ortamında modellenirken Şekil 5.45'deki gibi modellenmiştir.



Şekil 5.45. B1 tipi kiriş için sayısal analiz modeli kesiti

Bütün sayısal kiriş modellerinde kullanılan beton sınıfı olarak C20(BS20) betonu seçilmiştir. Bu betona ait mekanik özellikleri Tablo 5.6 da verilmiştir.

Tablo 5.6. B tipi sayısal kiriş modelinin mekanik özellikleri

$b_w$ (mm)	$d$ (mm)	$f_{ck}$ (Mpa)	$f_{cd}$ (Mpa)	$f_{ctk}$	Ezilme Birim Kısalması( $\epsilon_{cu}$ )	Poisson Oranı ( $\mu_c$ )	28 Günlük Elastisite $E_c$	28 Günlük Kayma modülü $G_c$
200	270	20	13	1.0	0.003	0.2	28 500 MPa	11200Mpa

Hazırlanan tüm sayısal kiriş modellerinde kiriş donatısı olarak çekme ve basınç bölgelerine yerleştirile donatılar için S 420 (BÇIII) çeliği seçilmiştir. Bu donatıya ait mekanik özellikler Tablo 5.7 de verilmiştir.

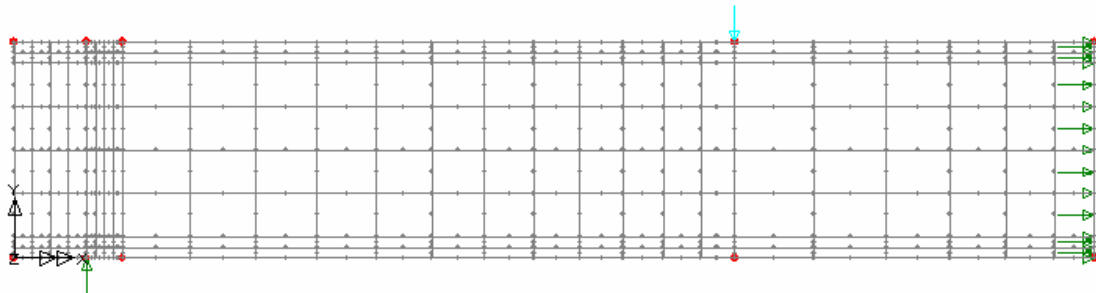
Tablo 5.7. B tipi sayısal kiriş modeli donatıları mekanik özellikleri

$b_w$	$d$	$f_{yk}$	$f_{yd}$	$f_{su}$	Donatı Oranı( $\rho$ )	$\epsilon_{su}$ Oranı %	$E_s$	Kopma birim Uzaması $\epsilon_{su}$	Poisson Oranı
200	270	420	365	500	0.01117	12	$2.10^5$	0.1	0.3

Tablo 5.8. B tipi sayısal kiriş modelleri

Modeller	CFRP Malzemesi türü	Epoksi türü	Uygulama Yöntemi
B0	Sika Carbodur XS 1014	Sikodur-30	CFRP'siz kiriş (Kontrol kirişi)
B1	Sika Carbodur XS 1014	Sikodur-30	Kiriş tabanına 1 Kat
B2			Kiriş tabanına 2 Kat
B3			Kiriş tabanına 3 Kat

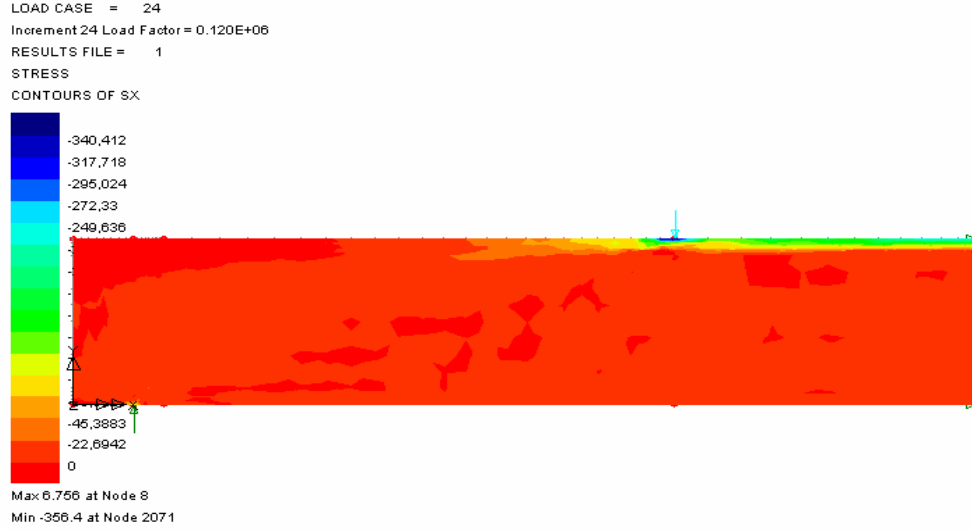
### 5.1.2.1. B0 tipi sayısal kiriş modeli analiz sonuçları



Şekil 5.46. B0 tipi sayısal kiriş modeline ait sonlu elemanlar ağı, yükleme ve mesnet durumu

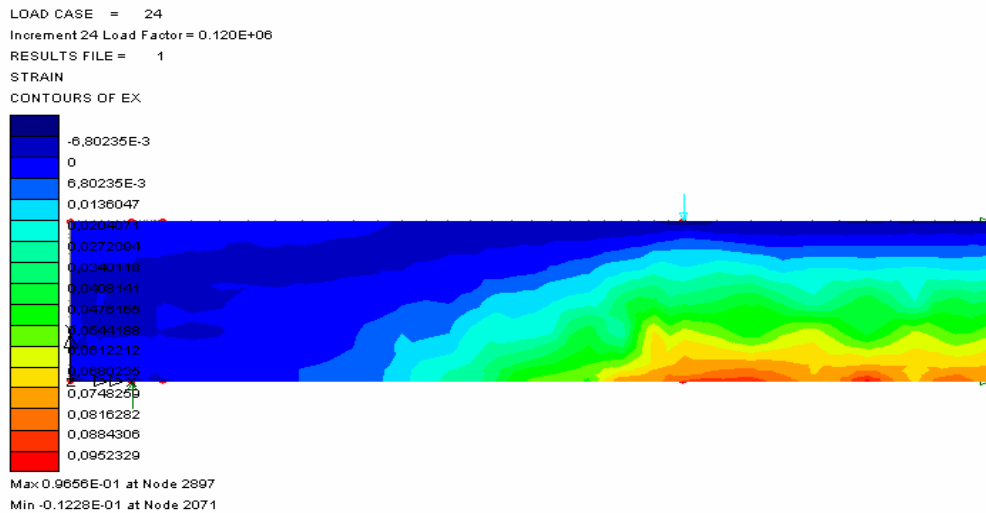
B0 tip sayısal kirişi modeli kontrol kirişi olup güçlendirilmemiş mevcut durumu göstermektedir. Burada betonarme kısım modellenirken düzgün yüzey ağ eleman, basınç ve çekme bölgesindeki donatılar düzgün bar eleman ağı kullanılmıştır. Mesnet

noktasında ve tekil yükün bulunduğu noktada analizde gerçekçi çözümler elde edebilmek için yoğun olarak seçilmiştir.

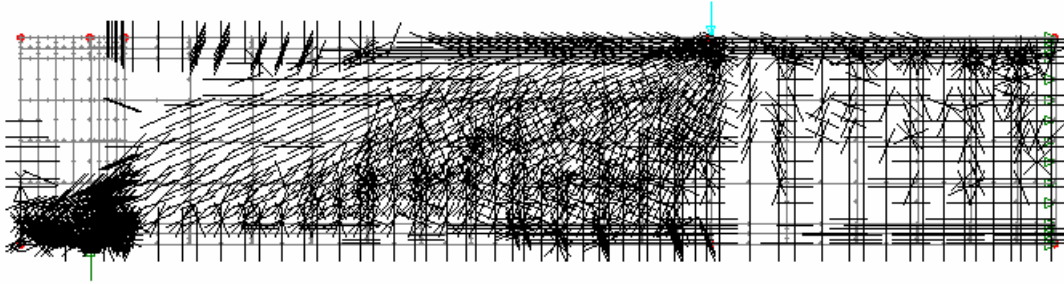


Şekil 5.47. B0 tipi sayısal kiriş modelinde doğrusal olmayan analiz sonucunda kiriş boyunca oluşan Normal Gerilme ( $\sigma_x$ ) değişimi

Gerçekleştirilen doğrusal olmayan analiz sonucunda mevcut B0 kiriş boy kesitinde oluşan normal gerilme ( $\sigma_x$ ) dağılımı şekildeki gibi elde edilmiştir. Tekil yükleme yapılan noktadan itibaren kiriş yüksekliği boyunca oluşan gerilme değerleri grafik olarak sunulmuştur.

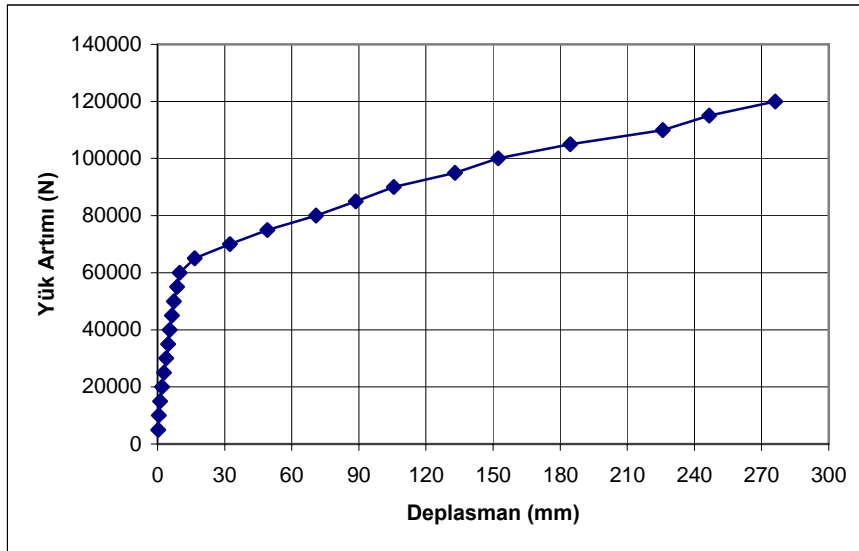


Şekil.5.48. B0 tipi sayısal kiriş modelinde doğrusal analiz sonucu kiriş yüzeyinde oluşan birim zorlanma ( $\epsilon_x$ ) değişimi



Şekil.5.49. B0 tipi sayısal kiriş modelinde P=200 KN luk yükleme sonucunda oluşan eğilme ve kesme çatlakları dağılımı

Şekil 5.49. 'da , kontrol kiriş olan B0 tipi sayısal kiriş modelinin kirişinin 200 KN yükleme altında doğrusal olmayan analiz sonucu oluşan kirişin yenilme durumuna ulaştığı andaki eğilme ve eğik kesme çatlakları görülmektedir. Tekil yük etkime noktasından başlayan ve mesnete doğru yoğunlaşan eğik kesme çatlakları ile yük altında kiriş tabanında yayılan eğilme çatlakları görülmektedir. Mesnet noktası ile CFRP bitiş noktasında eğilme ve çekme çatlaklarının yoğunlaştığı ve burada aşırı zorlanmalar olduğu belirlenmiştir. Bu durum malzemenin bu noktadan itibaren ayrışarak yenilme durumuna ulaşacağını göstermektedir. Ayrıca tekil yük altında başlayan ve bir yay çizerek yayılan çatlak yoğunlaşması tespit edilmiştir.

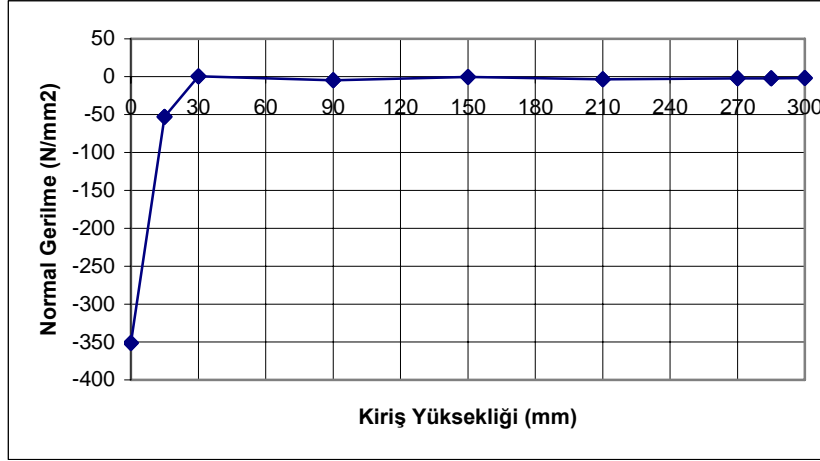


Şekil.5.50. B0 tipi sayısal kiriş modelinde P=200 KN luk yük altında Yük-Deplasman Grafiği

B0 tipi sayısal kiriş modeli üzerine 200 KN luk tekil yük uygulaması durumunda meydana gelen yük artımı-deplasman değişimi grafik olarak verilmiştir. Grafik

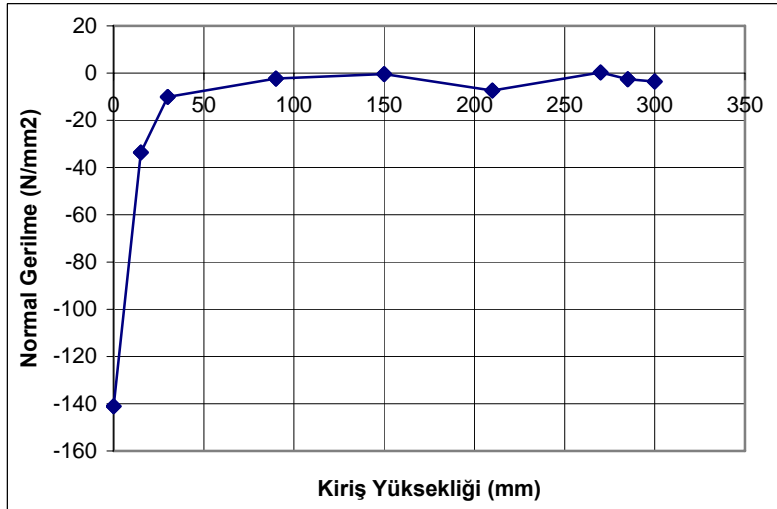


incelendiğinde yük miktarı 60 KN değerine kadar deplasmanının doğrusal arttığı ve bu değeri karşılık 9.945 mm. deplasman olduğu görülmüştür.



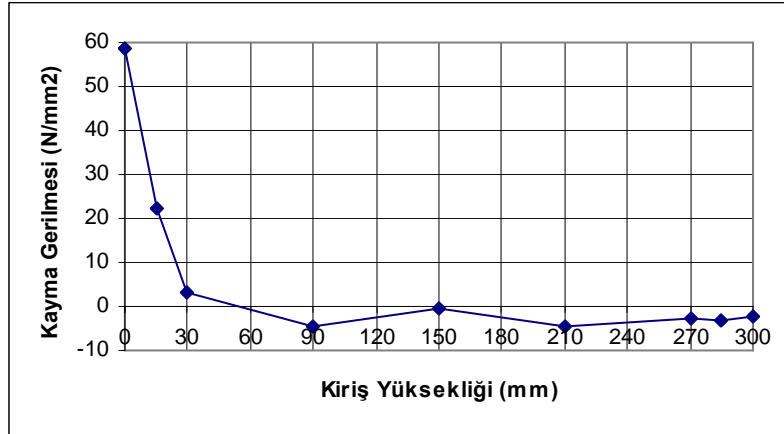
Şekil 5.51. B0 tipi sayısal kiriş modelinde kiriş yüksekliği boyunca oluşan Normal Gerilme ( $\sigma_x$ ) dağılımı

Şekil 5.51 'de B0 tipi sayısal kiriş modelinde uygulanan tekil yük altında kiriş yüksekliği boyunca oluşan normal gerilme( $\sigma_x$ ) değişimi verilmiştir. Analiz sonucunda en büyük  $\sigma_x$  değeri  $-351,48 \text{ N/mm}^2$  olarak hesaplanmıştır.

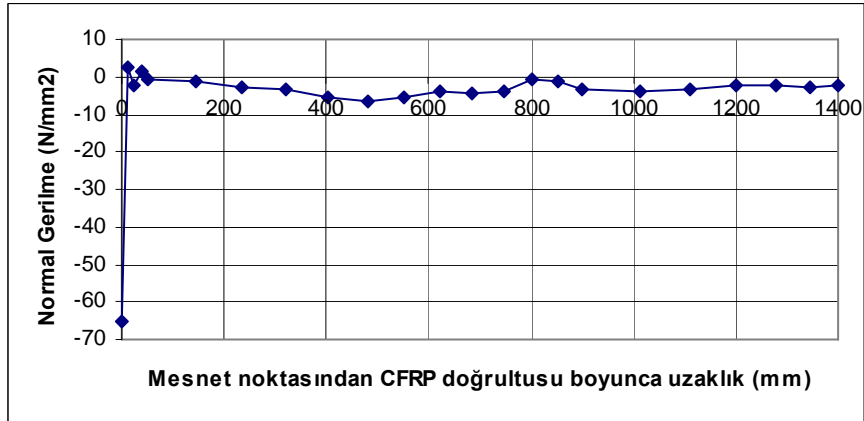


Şekil 5.52 . B0 tipi sayısal kiriş modelinde kiriş yüksekliği boyunca oluşan Normal Gerilme ( $\sigma_y$ ) dağılımı

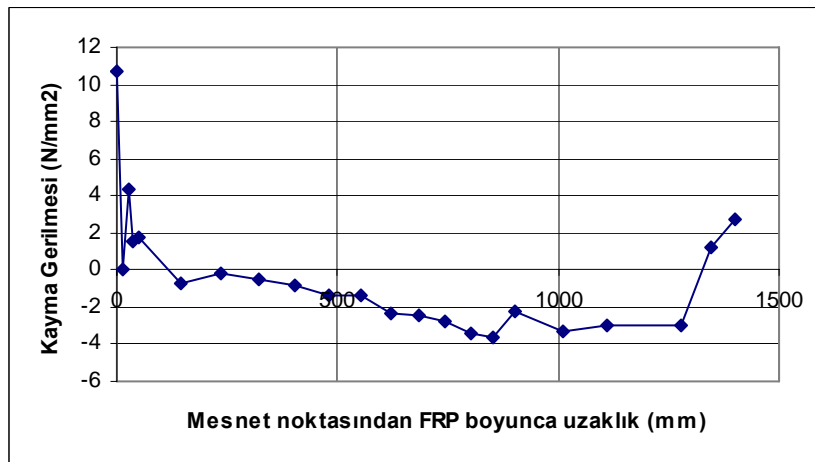
Şekil 5.52 'de B0 tipi sayısal kiriş modelinde uygulanan tekil yük altında kiriş yüksekliği boyunca oluşan normal gerilme( $\sigma_y$ ) değişimi verilmiştir. Analiz sonucunda en büyük  $\sigma_y$  değeri  $-141,09 \text{ N/mm}^2$  olarak hesaplanmıştır.



Şekil 5.53. B0 tipi sayısal kiriş modelinde kiriş yüksekliği boyunca oluşan Kayma Gerilmesi ( $\tau_{xy}$ ) dağılımı

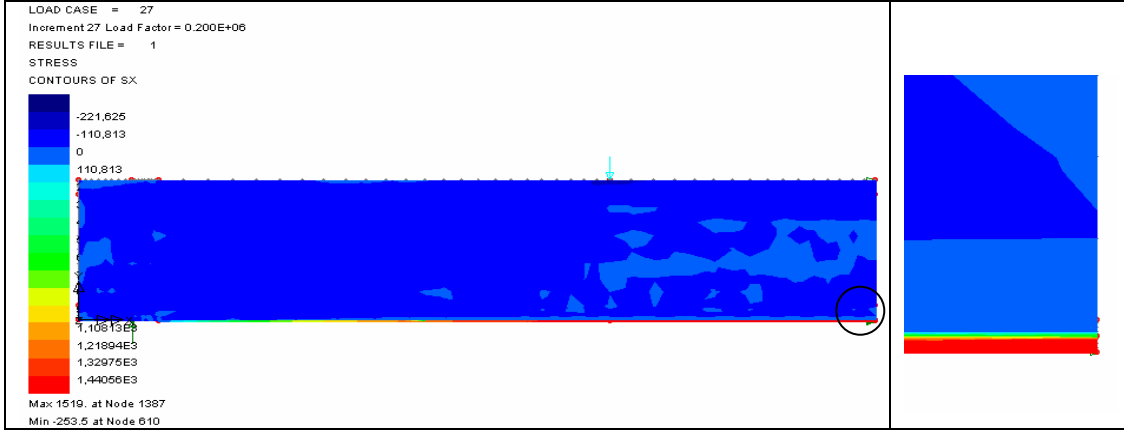


Şekil 5.54. B0 tipi sayısal kiriş modelinde mesnet noktasından CFRP yüzeyi boyunca oluşan Normal Gerilmesi ( $\sigma_x$ ) dağılımı



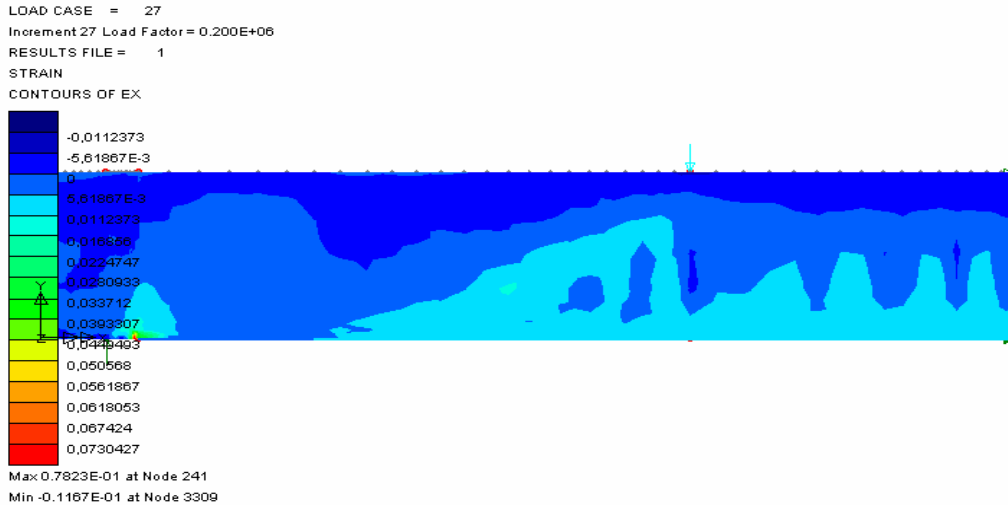
Şekil . 5.55. B0 tipi sayısal kiriş modelinde mesnet noktasından CFRP yüzeyi boyunca oluşan Kayma Gerilmesi ( $\tau_{xy}$ ) dağılımı

### 5.1.2.2. B1 tipi sayısal kiriş modeli analiz sonuçları



Şekil 5.56 B1 tipi sayısal kiriş modelinde doğrusal olmayan analiz sonucunda kiriş boyunca oluşan Normal Gerilme ( $\sigma_x$ ) değişimi ve güçlendirme bölgesi detayı

Gerçekleştirilen doğrusal olmayan analiz sonucunda B1 kiriş yüzeyinde oluşan Normal gerilme ( $\sigma_x$ ) dağılımı şekildeki gibi elde edilmiştir. Burada en büyük normal gerilme ( $\sigma_x$ ) tekil yükün uygulandığı noktada oluşmuştur. Güçlendirme bölgesi detayı incelendiğinde betonarme kiriş, epoksi ve CFRP tabakaları arasında tekil yüklemeye doğan normal gerilme değişimleri açıkça görülmektedir.



Şekil 5.57. B1 tipi sayısal kiriş modelinde meydana gelen birim zorlanma ( $\epsilon_x$ ) değerleri değişimi

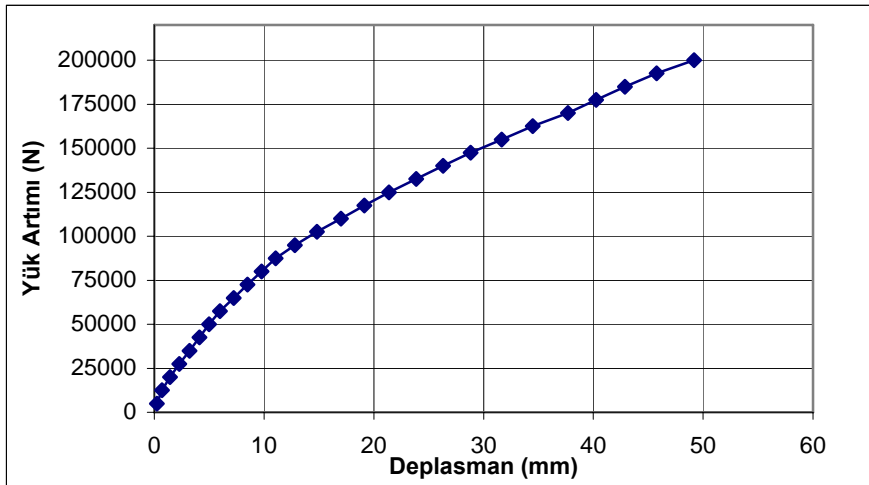
Şekil 5.57. de, B1 tipi sayısal kiriş modelinde gerçekleştirilen doğrusal olmayan analiz sonucu kiriş yenilme durumuna geldiği andaki bütün kesit boyunca oluşan birim zorlanma ( $\epsilon_x$ ) değerleri ayrıntılı olarak verilmiştir. En büyük zorlanmaların

tekil yükleme noktasından başlayıp mesnet noktasına doğru yayıldığı belirlenmiştir. Bunun yanında, CFRP bitim noktasında önemli gerilme artışları oluşmuştur.



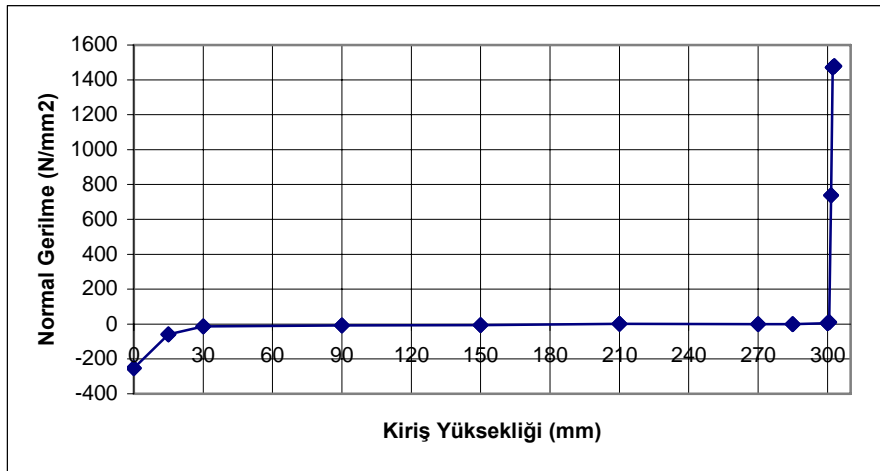
Şekil.5.58. B1 tipi sayısal kiriş modelinde P=200 KN luk yükleme sonucunda oluşan eğilme ve kesme çatlakları dağılımı

Şekil 5.58 'de , kiriş tabanına tek tabaka CFRP yapıştırılması sonucu elde edilen B1 tipi sayısal kiriş modelinin kirişinin 200 KN yükleme altında doğrusal olmayan analiz sonucu oluşan kirişin yenilme durumuna ulaştığı andaki eğilme ve eğik kesme çatlakları görülmektedir. Tekil yük etkime noktasından başlayan ve mesnete doğru yoğunlaşan eğik kesme çatlakları ile yük altında kiriş tabanında yayılan eğilme çatlakları görülmektedir.



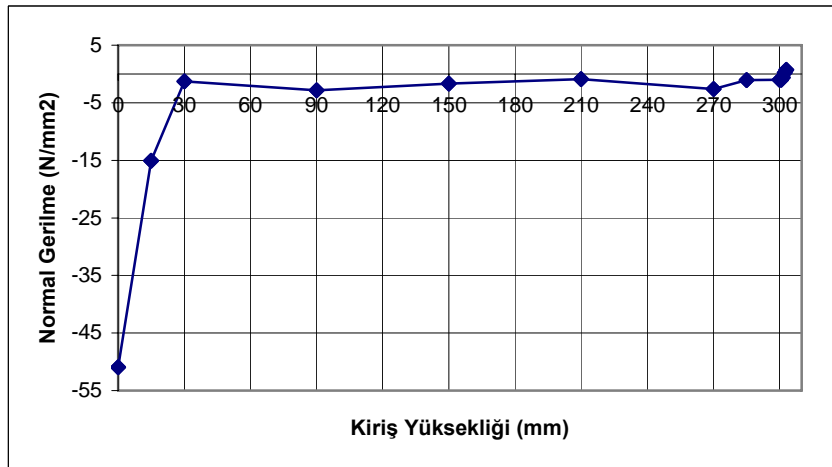
Şekil 5.59. B1 tipi sayısal kiriş modelinin P= 200KN 'luk yükleme altında yük-deplasman grafiği

B1 tipi sayısal kiriş modeli üzerine 200 KN luk tekil yük uygulaması durumunda meydana gelen yük artımı-deplasman değişimi grafik olarak verilmiştir. Grafik incelendiğinde yük miktarı 80 KN değerine kadar deplasmanının doğrusal arttığı ve bu değeri karşılık 9.765 mm. deplasman oluştuğu görülmüştür.



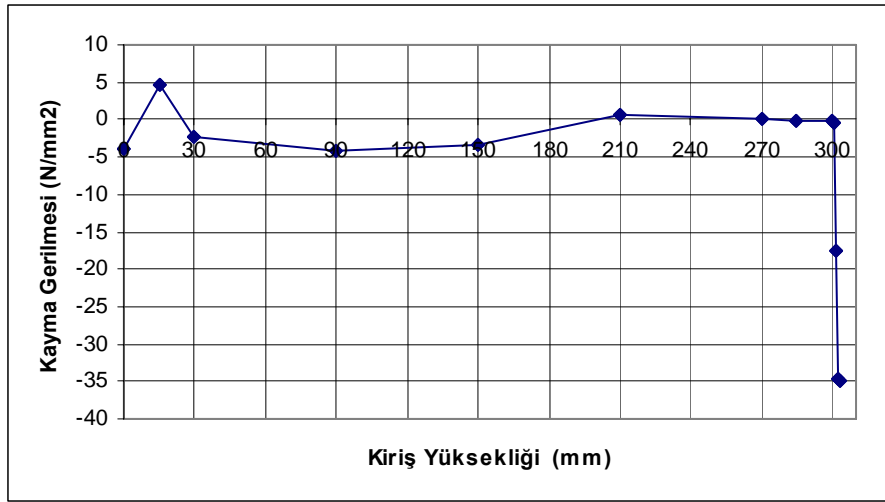
Şekil 5.60. B1 tipi sayısal kiriş modelinde kiriş yüksekliği boyunca oluşan Normal Gerilme ( $\sigma_x$ ) dağılımı

Şekil 5.60 'de B1 tipi sayısal kiriş modelinde uygulanan tekil yük altında kiriş yüksekliği boyunca oluşan normal gerilme( $\sigma_x$ ) değişimi verilmiştir. Analiz sonucunda en büyük  $\sigma_x$  değeri  $-253,52 \text{ N/mm}^2$  olarak hesaplanmıştır.

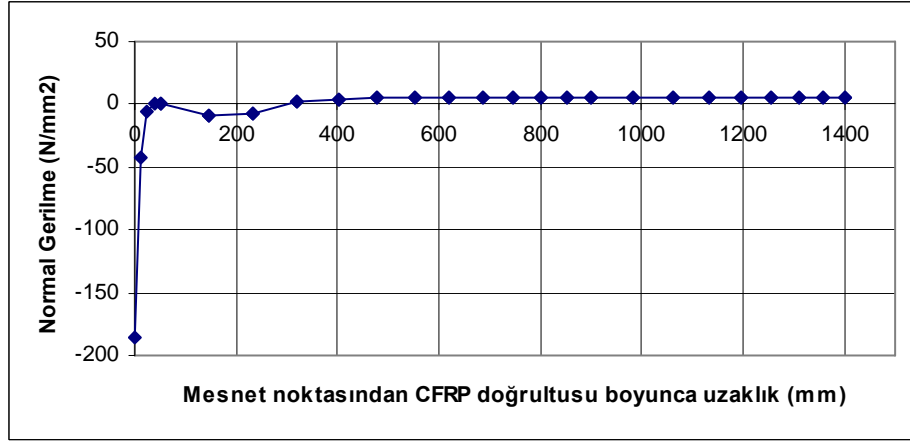


Şekil 5.61. B1 tipi sayısal kiriş modelinde kiriş yüksekliği boyunca oluşan Normal Gerilme ( $\sigma_y$ ) dağılımı

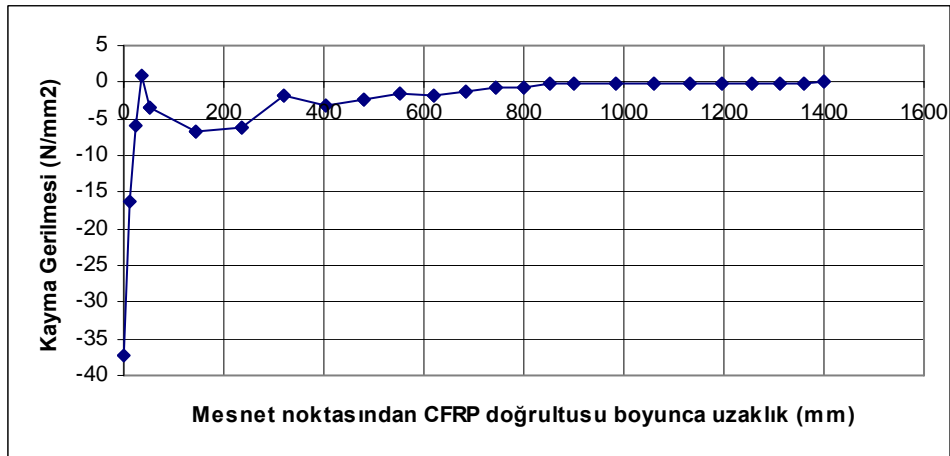
Şekil 5.61 'de B1 tipi sayısal kiriş modelinde uygulanan tekil yük altında kiriş yüksekliği boyunca oluşan normal gerilme( $\sigma_y$ ) değişimi verilmiştir. Analiz sonucunda en büyük  $\sigma_y$  değeri  $-50,968 \text{ N/mm}^2$  olarak hesaplanmıştır.



Şekil5.62. B1 tipi sayısal kiriş modelinde kiriş yüksekliği boyunca oluşan Kayma Gerilme ( $\tau_{xy}$ ) dağılımı

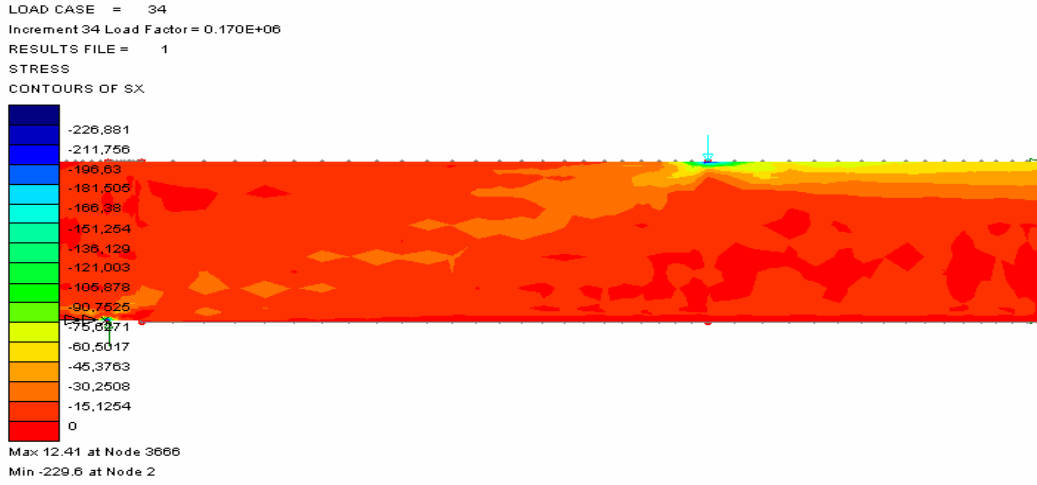


Şekil5.63 . B1 tipi sayısal kiriş modelinde mesnet noktasından CFRP yüzeyi boyunca oluşan Normal Gerilme ( $\sigma_x$ ) dağılımı



Şekil5.64 . B1 tipi sayısal kiriş modelinde mesnet noktasından CFRP yüzeyi boyunca oluşan Kayma Gerilmesi ( $\tau_{xy}$ ) dağılımı

### 5.1.2.3. B2 tipi sayısal kiriş modeli analiz sonuçları



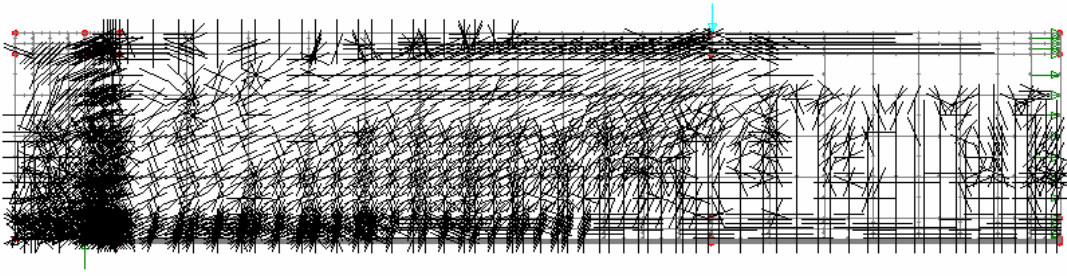
Şekil.5.65.B2 kirişinde doğrusal olmayan analiz sonucunda kiriş boyunca oluşan Normal Gerilme ( $\sigma_x$ ) değişimi

B2 tipi sayısal kiriş modeli yüzeyinde oluşan Normal gerilme ( $\sigma_x$ ) dağılımı şekildeki gibi elde edilmiştir. Burada en büyük normal gerilme ( $\sigma_x$ ) tekil yükün uygulandığı noktada oluşmuştur. Güçlendirme bölgesi detayı incelendiğinde betonarme kiriş, epoksi ve CFRP tabakaları arasında tekil yüklemekten doğan normal gerilme değişimleri açıkça görülmektedir.



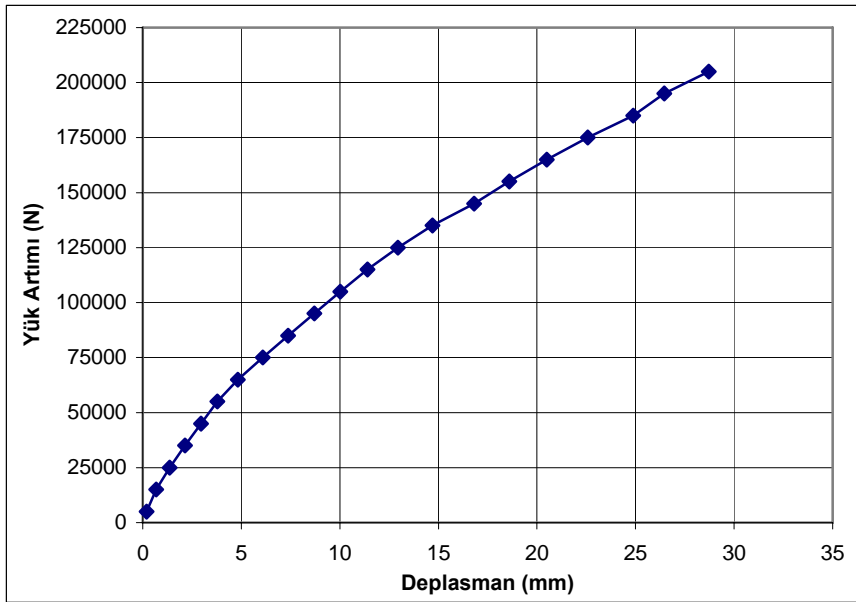
Şekil5.66. B2 tipi sayısal kiriş modelinde meydana gelen birim zorlanma( $\epsilon_x$ ) değerleri değişimi

Şekil 5.66. da, B2 tipi sayısal kiriş modelinde gerçekleştirilen doğrusal olmayan analiz sonucu kiriş yenilme durumuna geldiği andaki bütün kesit boyunca oluşan birim zorlanma ( $\epsilon_x$ ) değerleri ayrıntılı olarak verilmiştir. En büyük zorlanmaların tekil yükleme noktasından başlayıp mesnet noktasına doğru yayıldığı belirlenmiştir. Bunun yanında, CFRP bitim noktasında önemli gerilme artışları oluşmuştur.



Şekil.5.67. B2 tipi sayısal kiriş modelinde P=200 KN yüklemeye sonucunda oluşan eğilme ve kesme çatlakları dağılımı

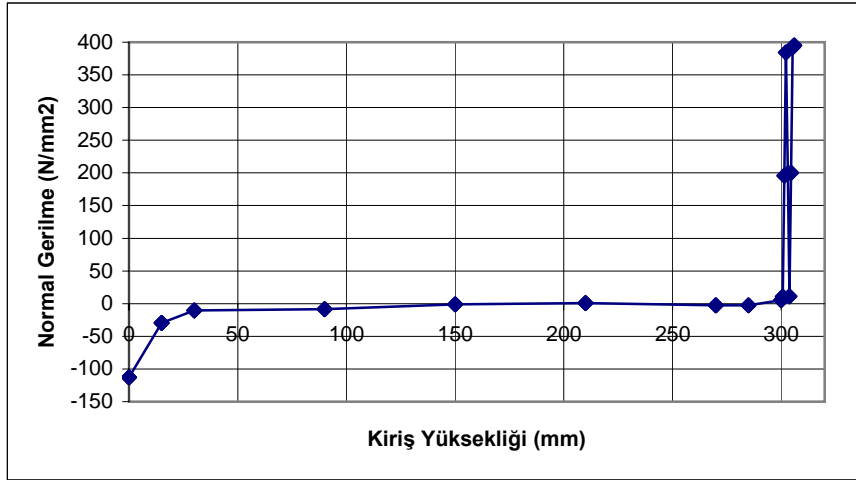
Şekil 5.67 'de , kiriş tabanına iki kat CFRP plaka yapıştırılması sonucu elde edilen B2 tipi sayısal kiriş modelinin kirişinin 200 KN yüklemeye altında doğrusal olmayan analiz sonucu oluşan kirişin yenilme durumuna ulaştığı andaki eğilme ve eğik kesme çatlakları görülmektedir. Tekil yük etkime noktasından başlayan ve mesnete doğru yoğunlaşan eğik kesme çatlakları ile yük altında kiriş tabanında yayılan eğilme çatlakları görülmektedir. Ayrıca mesnet noktası ile CFRP plaka bitim noktasında aşırı zorlanmaların oluştuğu görülmektedir.



Şekil 5 68. B2 tipi sayısal kiriş modelinin P= 200KN 'luk yüklemeye altında yük-deplasman grafiği

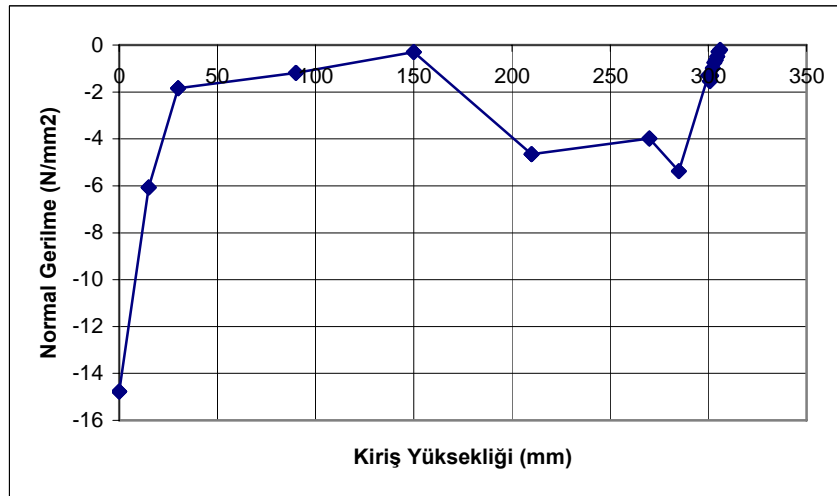
B2 tipi sayısal kiriş modeli üzerine 200 KN luk tekil yük uygulaması durumunda meydana gelen yük artımı-deplasman değişimi grafik olarak verilmiştir. Grafik incelendiğinde yük miktarı 80 KN değerine kadar deplasmanının doğrusal arttığı ve bu değeri karşılık 6.78 mm. deplasman oluştuğu görülmüştür.





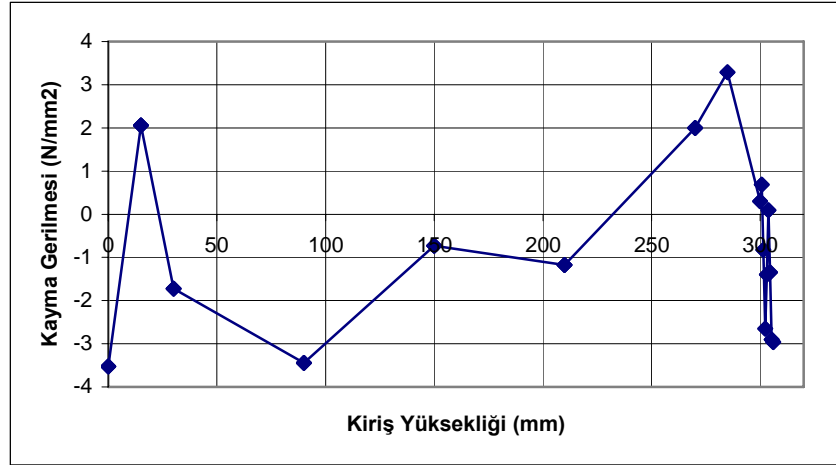
Şekil 5.69. B2 tipi sayısal kiriş modelinde kiriş yüksekliği boyunca oluşan Normal Gerilme ( $\sigma_x$ ) dağılımı

Şekil 5.69 'da B2 tipi sayısal kiriş modelinde uygulanan tekil yük altında kiriş yüksekliği boyunca oluşan normal gerilme( $\sigma_x$ ) değişimi verilmiştir. Analiz sonucunda en büyük  $\sigma_x$  değeri  $-112,64 \text{ N/mm}^2$  olarak hesaplanmıştır.



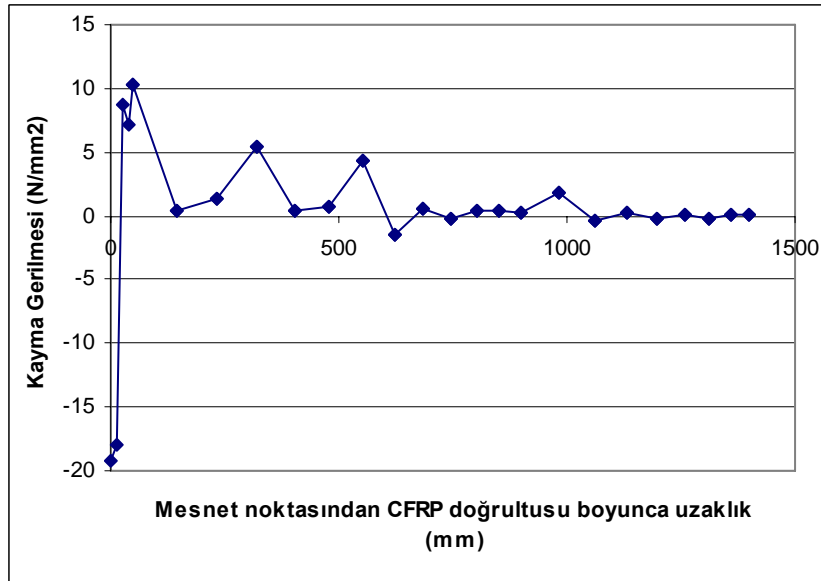
Şekil 5.70. B2 tipi sayısal kiriş modelinde kiriş yüksekliği boyunca oluşan Normal Gerilme ( $\sigma_y$ ) dağılımı

Şekil 5.70 'de B2 tipi sayısal kiriş modelinde uygulanan tekil yük altında kiriş yüksekliği boyunca oluşan normal gerilme( $\sigma_x$ ) değişimi verilmiştir. Analiz sonucunda en büyük  $\sigma_x$  değeri  $-14,79 \text{ N/mm}^2$  olarak hesaplanmıştır.



Şekil 5.71. B2 tipi sayısal kiriş modelinde kiriş yüksekliği boyunca oluşan Kayma Gerilmesi ( $\tau_{xy}$ ) dağılımı

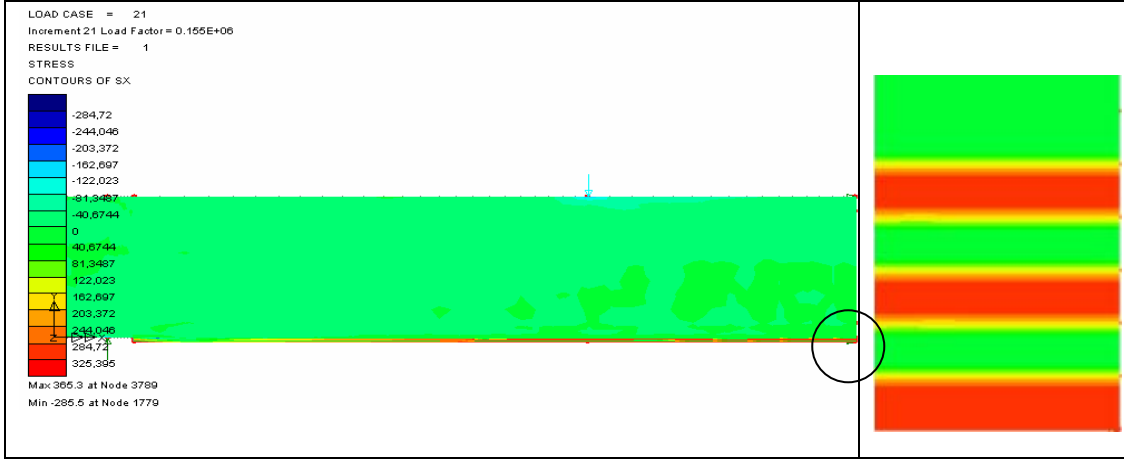
B2 tipi sayısal kiriş modelinde kiriş yüksekliği boyunca oluşan en büyük kayma gerilmesi değeri  $-3,522 \text{ N/mm}^2$  olarak belirlenmiştir. B0 ve B1 tipi kiriş ile karşılaştırıldığına oldukça önemli gerilme azalması oluşmuştur.



Şekil 5.72. B2 tipi sayısal kiriş modelinde mesnet noktasından CFRP yüzeyi boyunca oluşan Kayma Gerilmesi ( $\tau_{xy}$ ) dağılımı

Şekil 5.72'de B2 sayısal kiriş modelinin mesnet noktasından CFRP doğrultusu boyunca oluşan en büyük kayma gerilmesi değeri  $-19,15 \text{ N/mm}^2$  olarak hesaplanmıştır. CFRP bitiş noktasında bu değer  $+10,362 \text{ N/mm}^2$  olmaktadır.

### 5.1.2.4. B3 tipi sayısal kiriş modelleri analiz sonuçları



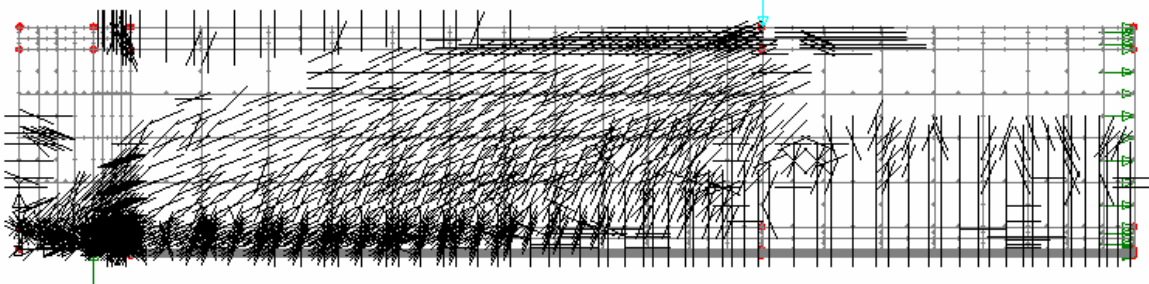
Şekil 5.73 B3 tipi sayısal kiriş modelinde doğrusal olmayan analiz sonucunda kiriş boyunca oluşan Normal Gerilme ( $\sigma_x$ ) değişimi ve güçlendirme bölgesi detayı

B3 tipi sayısal kiriş modeli yüzeyinde oluşan normal gerilme ( $\sigma_x$ ) dağılımı şekildeki gibi elde edilmiştir. Burada en büyük normal gerilme ( $\sigma_x$ ) tekil yükün uygulandığı noktada oluşmuştur. Güçlendirme bölgesi detayı incelendiğinde betonarme kiriş, epoksi ve CFRP tabakaları arasında tekil yüklemekten doğan normal gerilme değişimleri açıkça görülmektedir.



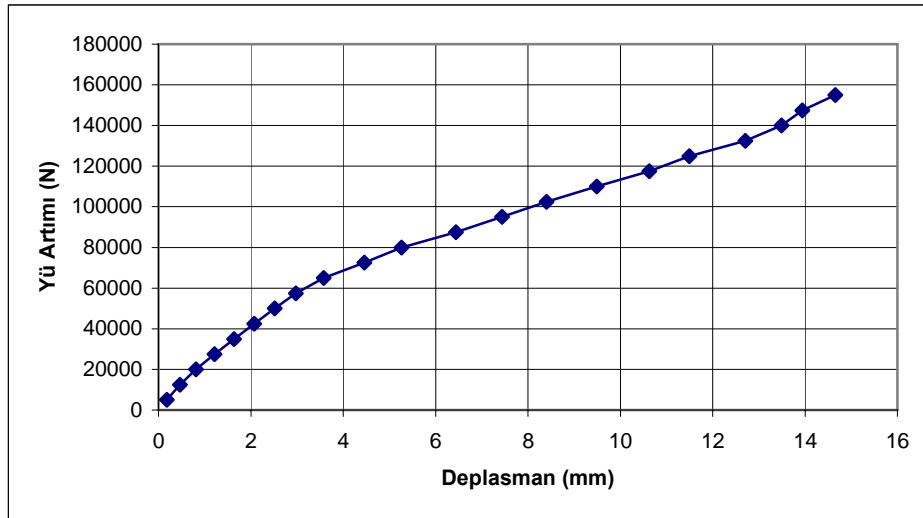
Şekil 5.74. B3 tipi sayısal kiriş modelinde meydana gelen birim zorlanma ( $\epsilon_x$ ) değerleri değişimi

Şekil 5.74. te, B3 tipi sayısal kiriş modelinde gerçekleştirilen doğrusal olmayan analiz sonucu, kiriş yenilme durumuna geldiği andaki bütün kesit boyunca oluşan birim zorlanma ( $\epsilon_x$ ) değerleri ayrıntılı olarak verilmiştir. En büyük zorlanmaların tekil yükleme noktasından başlayıp mesnet noktasına doğru yayıldığı belirlenmiştir. Bunun yanında, CFRP bitim noktasında önemli gerilme artışları oluşmuştur.



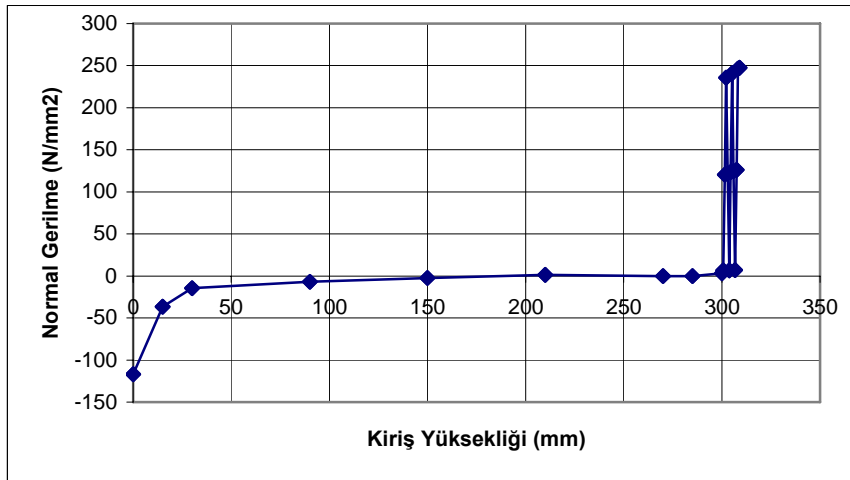
Şekil.5.75. B3 tipi sayısal kiriş modelinde P=200 KN luk yükleme sonucunda oluşan eğilme ve kesme çatlakları dağılımı

Şekil 5.75 'te , kiriş tabanına üç kat CFRP plaka yapıştırılması sonucu elde edilen B3 tipi sayısal kiriş modelinin kirişinin 200 KN yükleme altında, doğrusal olmayan analiz sonucu oluşan kirişin, yenilme durumuna ulaştığı andaki eğilme ve eğik kesme çatlakları görülmektedir. Tekil yük etkime noktasından başlayan ve mesnete doğru yoğunlaşan eğik kesme çatlakları ile yük altında kiriş tabanında yayılan eğilme çatlakları görülmektedir. Ayrıca mesnet noktası ile CFRP plaka bitim noktasında aşırı zorlanmaların oluştuğu görülmektedir.



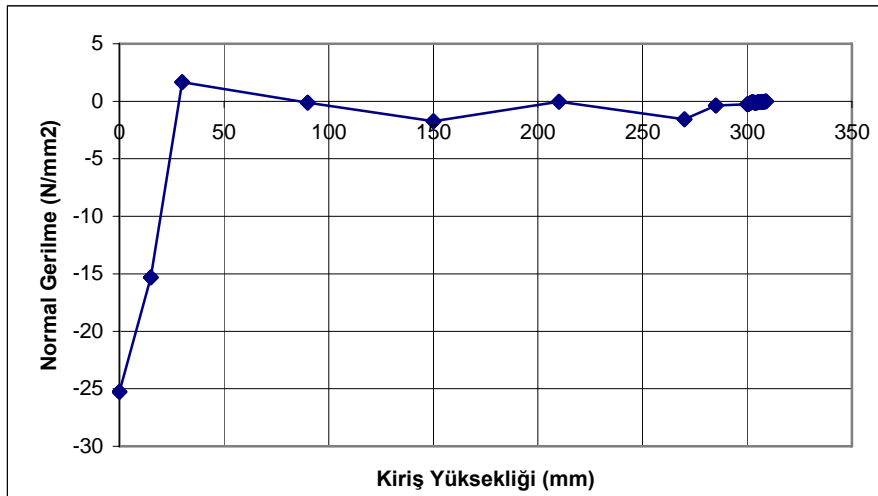
Şekil 5.76. B3 tipi sayısal kiriş modelinin P=200 KN'luk yükleme altında yük-deplasman grafiği

B3 tipi sayısal kiriş modeli üzerine 200 KN luk tekil yük uygulaması durumunda meydana gelen yük artımı-deplasman değişimi grafik olarak verilmiştir. Grafik incelendiğinde yük miktarı 80 KN değerine kadar deplasmanının doğrusal arttığı ve bu değeri karşılık 5.26 mm. deplasman oluştuğu görülmüştür.



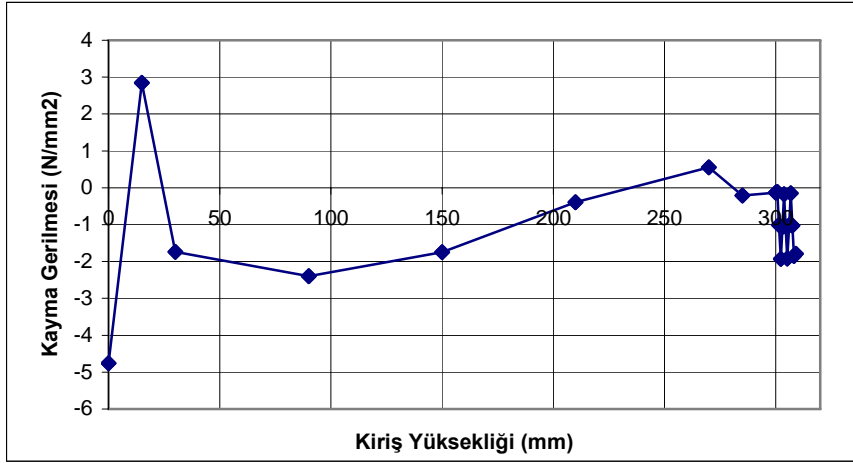
Şekil 5.77. B3 tipi sayısal kiriş modelinde kiriş yüksekliği boyunca oluşan Normal Gerilme ( $\sigma_x$ ) dağılımı

Şekil 5.77 'da B3 tipi sayısal kiriş modelinde uygulanan tekil yük altında kiriş yüksekliği boyunca oluşan normal gerilme( $\sigma_x$ ) değişimi verilmiştir. Analiz sonucunda en büyük  $\sigma_x$  değeri  $-117,34 \text{ N/mm}^2$  olarak hesaplanmıştır.



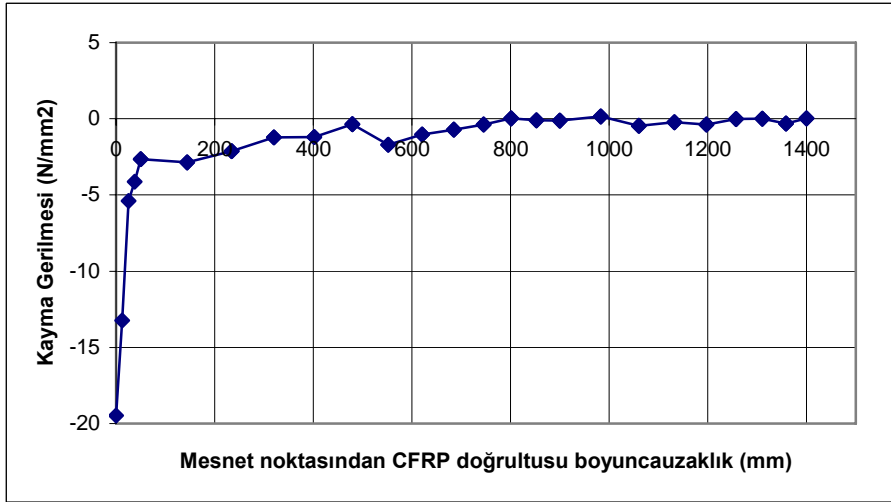
Şekil 5.78. B3 tipi sayısal kiriş modelinde kiriş yüksekliği boyunca oluşan Normal Gerilme ( $\sigma_y$ ) dağılımı

Şekil 5.78 'da B3 tipi sayısal kiriş modelinde uygulanan tekil yük altında kiriş yüksekliği boyunca oluşan normal gerilme( $\sigma_y$ ) değişimi verilmiştir. Analiz sonucunda en büyük  $\sigma_y$  değeri  $-25,26 \text{ N/mm}^2$  olarak hesaplanmıştır.



Şekil 5.79. B3 tipi sayısal kiriş modelinde kiriş yüksekliği boyunca oluşan Kayma Gerilmesi ( $\tau_{xy}$ ) dağılımı

B3 tipi sayısal kiriş modelinde kiriş yüksekliği boyunca oluşan en büyük kayma gerilmesi değeri  $-4,752 \text{ N/mm}^2$  olarak belirlenmiştir. B0 ve B1 ve B2 tipi kiriş ile karşılaştırıldığında oldukça önemli gerilme azalması oluşmuştur.

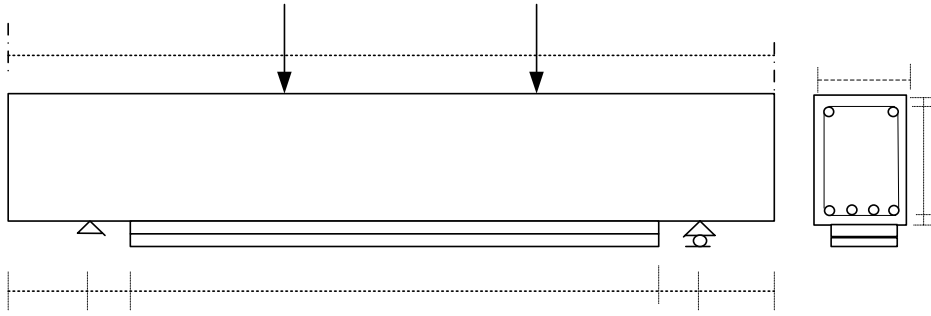


Şekil 5.80. B3 tipi sayısal kiriş modelinde mesnet noktasından CFRP yüzeyi boyunca oluşan Kayma Gerilmesi ( $\tau_{xy}$ ) dağılımı

Şekil 5.80'de B3 sayısal kiriş modelinin mesnet noktasından CFRP doğrultusu boyunca oluşan en büyük kayma gerilmesi değeri  $-19,47 \text{ N/mm}^2$  olarak hesaplanmıştır. CFRP bitiş noktasında bu değer  $+2,65 \text{ N/mm}^2$  olmaktadır.

### 5.1.3. C tipi sayısal kiriş modeli

C tipi betonarme kiriş modeli 250x400 boyutlarında ve 4500 mm kiriş açıklığına sahip çekme bölgesinde 4 $\phi$ 18 ve basınç bölgesinde 2 $\phi$ 10 donatı bulunan kiriştir. Bu modele ait en ve boy kesiti, mevcut donatısı ile yükleme durumu Şekil 5.81 de verilmiştir.



Şekil 5.81. C tipi betonarme sayısal kiriş modelinin en ve boy kesiti

Bütün sayısal kiriş modellerinde kullanılan beton sınıfı olarak C20(BS20) betonu seçilmiştir. Bu betona ait mekanik özellikleri Tablo 5.6 da verilmiştir.

Tablo 5.9. C tipi sayısal kiriş modeli betonunun mekanik özellikleri

$b_w$ (mm)	$d$ (mm)	$f_{ck}$ (Mpa)	$f_{cd}$ (Mpa)	$f_{ctk}$	Ezilme Birim Kısalması( $\epsilon_{cu}$ )	Poison Oranı ( $\mu_c$ )	28 Günlük Elastisite $E_c$	28 Günlük Kayma modülü $G_c$
250	370	20	13	1.0	0.003	0.2	28 500 MPa	11200Mpa

Hazırlanan tüm sayısal kiriş modellerinde kiriş donatısı olarak çekme ve basınç bölgelerine yerleştirile donatılar için S 420 (BÇIII) çeliği seçilmiştir. Bu donatıya ait mekanik özellikler Tablo 5.10 de verilmiştir.

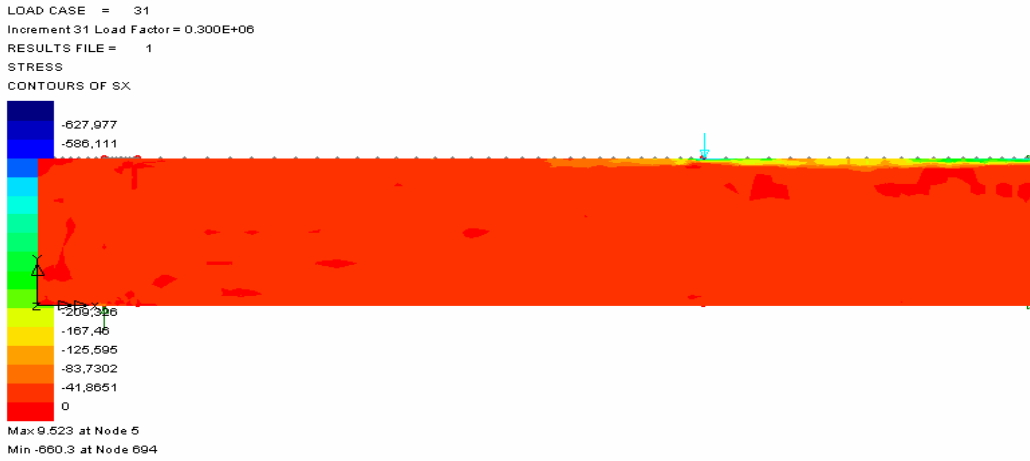
Tablo 5.10. C tipi sayısal kiriş modeli donatıları mekanik özellikleri

$b_w$	$d$	$f_{yk}$	$f_{yd}$	$f_{su}$	$\epsilon_{su}$ Oranı %	$E_s$	Kopma birim Uzaması $\epsilon_{su}$	Poison Oranı
250	370	420	365	500	12	$2.10^5$	0.1	0.3

Tablo 5.11. C tipi sayısal kiriş modelleri

Modeller	CFRP Malzemesi türü	Epoksi türü	Uygulama Yöntemi
C0	Sika_CarbodurXS 1014	Sikodur-30	CFRP siz kiriş
C1	Sika_CarbodurXS 1014	Sikodur-30	Kiriş tabanına 1 Kat
C2			Kiriş tabanına 2 Kat
C3			Kiriş tabanına 3 Kat

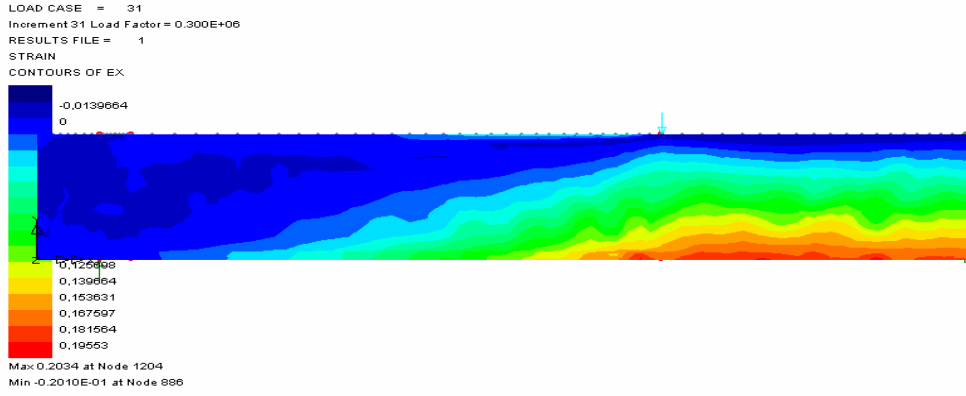
### 5.1.3.1. C0 tipi sayısal kiriş modeli analiz sonuçları



Şekil5.82. C0 kirişinde doğrusal olmayan analiz sonucunda kiriş boyunca oluşan Normal Gerilme ( $\sigma_x$ ) değişimi

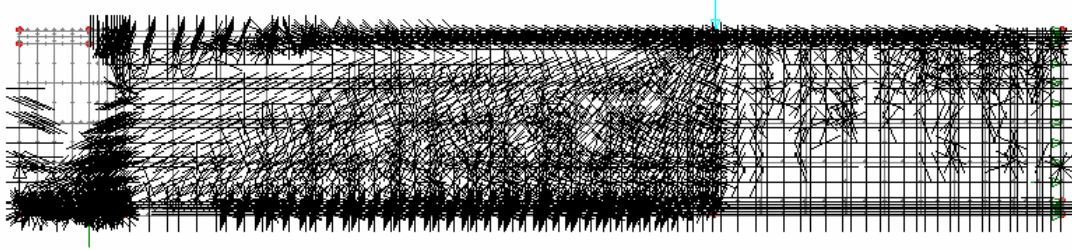
Gerçekleştirilen doğrusal olmayan analiz sonucunda mevcut C0 kiriş boy kesitinde oluşan normal gerilme ( $\sigma_x$ ) dağılımı şekildeki gibi elde edilmiştir. Tekil yükleme yapılan noktadan itibaren kiriş yüksekliği boyunca oluşan gerilme değerleri grafik olarak sunulmuştur.





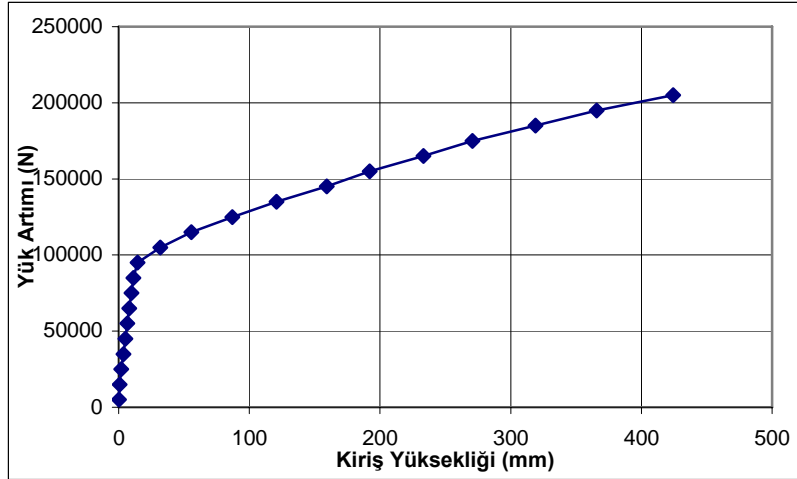
Şekil5.83. C0 tipi sayısal kiriş modelinde meydana gelen birim zorlanma( $\epsilon_x$ ) değerleri değişimi

Şekil 5.83. te, C0 tipi sayısal kiriş modelinde gerçekleştirilen doğrusal olmayan analiz sonucu, kiriş yenilme durumuna geldiği andaki bütün kesit boyunca oluşan birim zorlanma ( $\epsilon_x$ ) değerleri ayrıntılı olarak verilmiştir. En büyük zorlanmaların tekil yükleme noktasından başlayıp mesnet noktasına doğru yayıldığı belirlenmiştir.



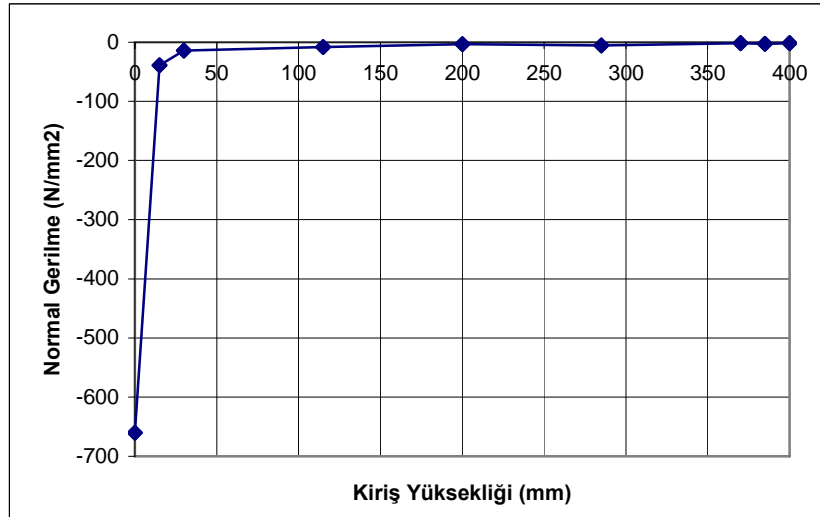
Şekil.5.84. C0 tipi sayısal kiriş modelinde P=300 KN luk yükleme sonucunda oluşan Eğilme ve Kesme çatlakları dağılımı

Şekil 5.84. 'te , kontrol kiriş olan C0 tipi sayısal kiriş modelinin kirişinin 300 KN yükleme altında, doğrusal olmayan analiz sonucu oluşan kirişin, yenilme durumuna ulaştığı andaki eğilme ve eğik kesme çatlakları görülmektedir. Tekil yük etkime noktasından başlayan ve mesnete doğru yoğunlaşan eğik kesme çatlakları ile yük altında kiriş tabanında yayılan eğilme çatlakları görülmektedir. Mesnet noktası ile CFRP bitiş noktasında eğilme ve çekme çatlaklarının yoğunlaştığı ve burada aşırı zorlanmalar olduğu belirlenmiştir. Bu durum malzemenin bu noktadan itibaren ayrışarak yenilme durumuna ulaşacağını göstermektedir. Ayrıca tekil yük altında başlayan ve bir yay çizerek yayılan çatlak yoğunlaşması tespit edilmiştir.



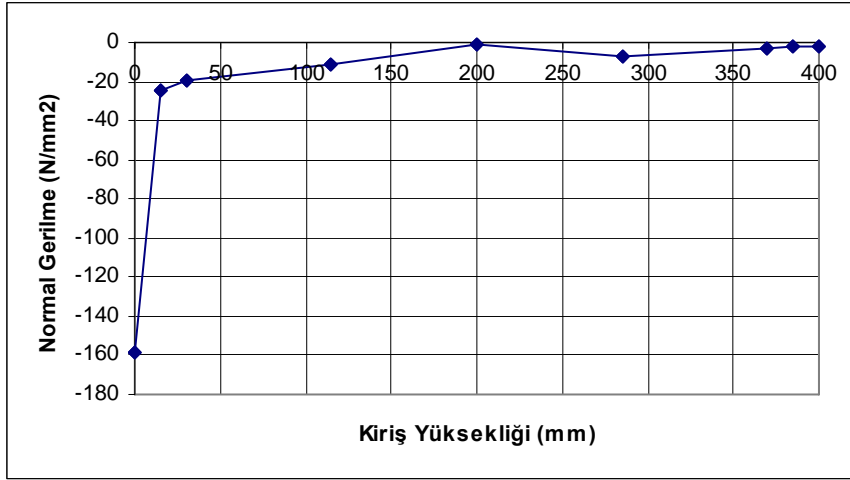
Şekil 5.85. C0 tipi sayısal kiriş modelinin P=300 KN'luk yükleme altında yük-deplasman grafiği

C0 tipi sayısal kiriş modeli üzerine 300 KN luk tekil yük uygulaması durumunda meydana gelen yük artımı-deplasman değişimi grafik olarak verilmiştir. Grafik incelendiğinde yük miktarı 95 KN değerine kadar deplasmanının doğrusal arttığı ve bu değeri karşılık 14.553 mm. deplasman olduğu görülmüştür. Bundan sonra kiriş donatısı akma dayanımına kadar yük taşımaya devam etmiş. Bu değer aşıldıktan sonra çok büyük deplasmanlara ulaşıldığı görülmüştür. Bu, kirişte yenilme biçiminin oluştuğunu gösterir.

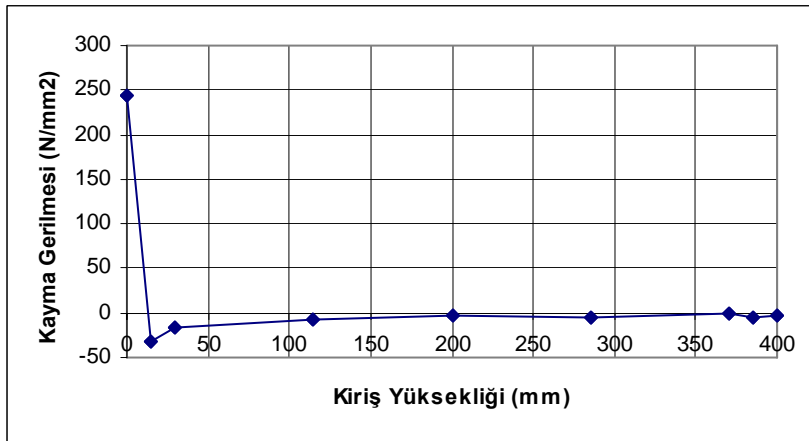


Şekil 5.86. C0 tipi sayısal kiriş modelinde kiriş yüksekliği boyunca oluşan Normal Gerilme ( $\sigma_x$ ) dağılımı

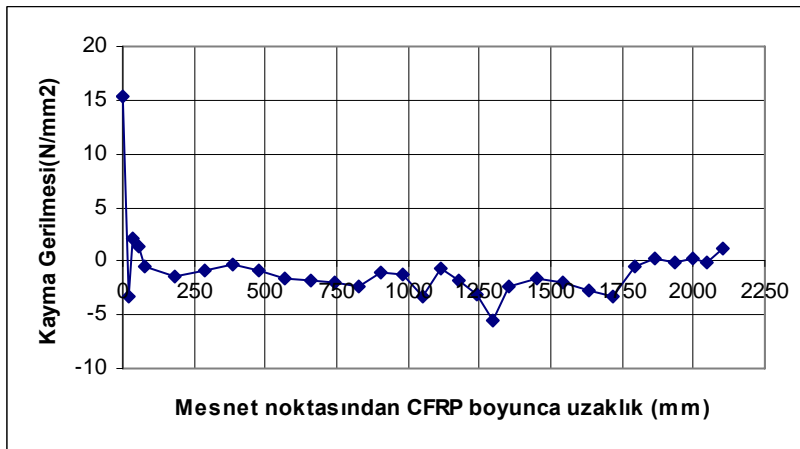
Şekil 5.86 'da C0 tipi sayısal kiriş modelinde uygulanan tekil yük altında kiriş yüksekliği boyunca oluşan normal gerilme( $\sigma_x$ ) değişimi verilmiştir. Analiz sonucunda en büyük  $\sigma_x$  değeri  $-660,318 \text{ N/mm}^2$  olarak hesaplanmıştır.



Şekil 5.87. C0 tipi sayısal kiriş modelinde kiriş yüksekliği boyunca oluşan Normal Gerilme ( $\sigma_y$ ) dağılımı

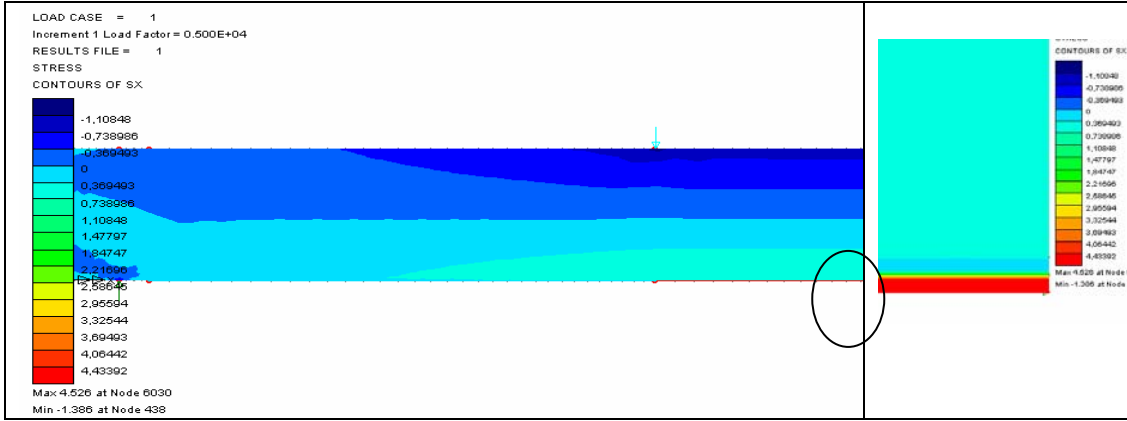


Şekil 5.88. C0 tipi sayısal kiriş modelinde kiriş yüksekliği boyunca oluşan Kayma Gerilmesi ( $\tau_{xy}$ ) dağılımı



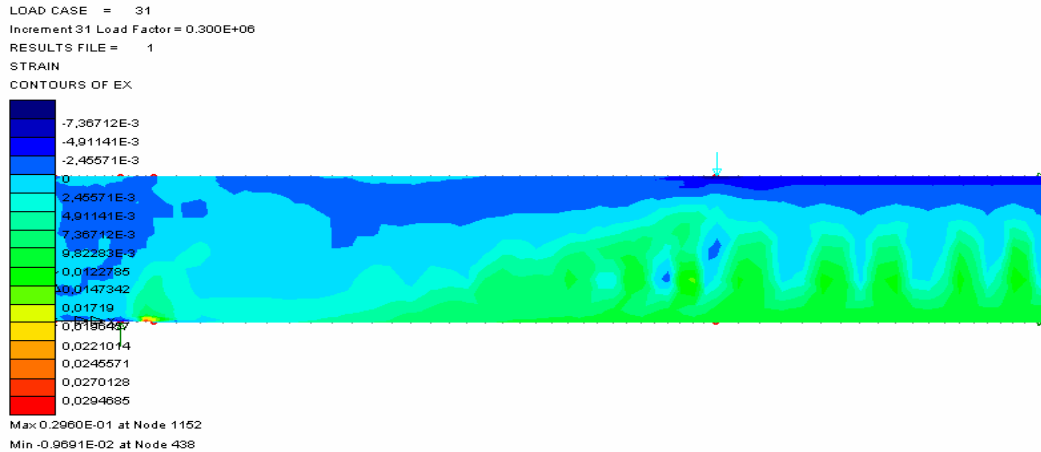
Şekil 5.89. C0 tipi sayısal kiriş modelinde mesnet noktasından CFRP doğrultusu boyunca oluşan Kayma Gerilmesi ( $\tau_{xy}$ ) dağılımı

### 5.1.3.2. C1 tipi sayısal kiriş modeli analiz sonuçları



Şekil 5.90 C1 tipi sayısal kiriş modelinde doğrusal olmayan analiz sonucunda kiriş boyunca oluşan Normal Gerilme ( $\sigma_x$ ) değişimi ve güçlendirme bölgesi detayı

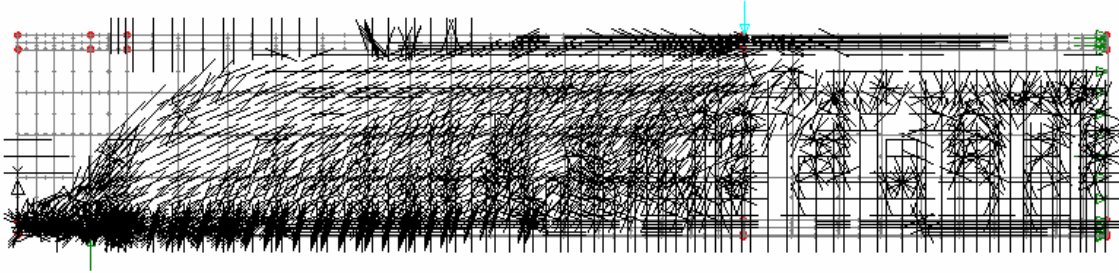
C1 tipi sayısal kiriş modeli yüzeyinde oluşan normal gerilme ( $\sigma_x$ ) dağılımı şekildeki gibi elde edilmiştir. Burada en büyük normal gerilme ( $\sigma_x$ ) tekil yükün uygulandığı noktada oluşmuştur. Güçlendirme bölgesi detayı incelendiğinde betonarme kiriş, epoksi ve CFRP tabakaları arasında tekil yüklemenden doğan normal gerilme değişimleri açıkça görülmektedir. Ayrıca CFRP plaka bitim noktasında önemli gerilme artımı söz konusudur.



Şekil 5.91. C1 tipi sayısal kiriş modelinde meydana gelen birim zorlanma ( $\epsilon_x$ ) değerleri değişimi

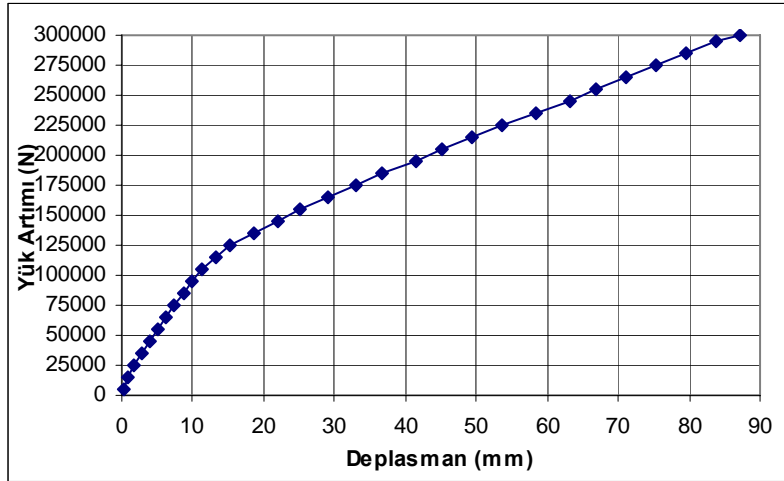
Şekil 5.91. de, C1 tipi sayısal kiriş modelinde gerçekleştirilen doğrusal olmayan analiz sonucu, kiriş yenilme durumuna geldiği anda, bütün kesit boyunca oluşan birim zorlanma ( $\epsilon_x$ ) değerleri ayrıntılı olarak verilmiştir. En büyük zorlanmaların

tekil yükleme noktasından başlayıp mesnet noktasına doğru yayıldığı belirlenmiştir. Bunun yanında, CFRP bitim noktasında önemli gerilme artışları oluşmuştur.



Şekil.5.92. C1 tipi sayısal kiriş modelinde P=300 KN luk yükleme sonucunda oluşan eğilme ve kesme çatlakları dağılımı

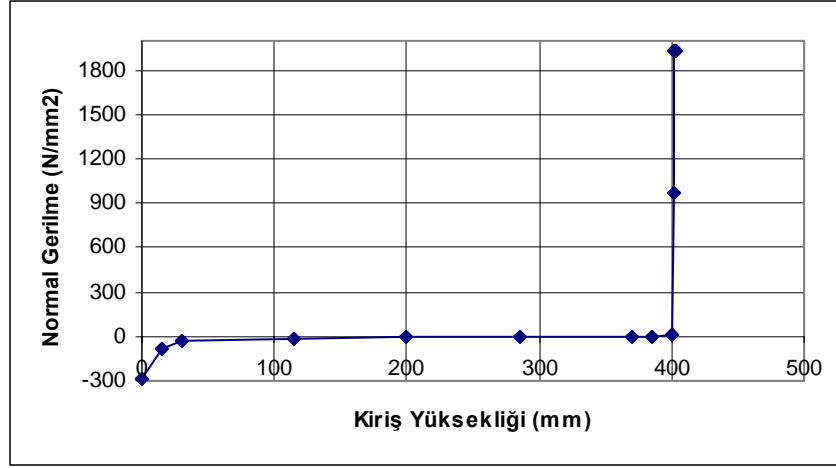
Şekil 5.92. 'de , kiriş tabanına tek kat CFRP plaka yapıştırılması ile elde edilen C1 tipi sayısal kiriş modelinin kirişinin 300 KN yükleme altında, doğrusal olmayan analiz sonucu oluşan kirişin, yenilme durumuna ulaştığı andaki eğilme ve eğik kesme çatlakları görülmektedir. Tekil yük etkime noktasından başlayan ve mesnete doğru yoğunlaşan eğik kesme çatlakları ile yük altında kiriş tabanında yayılan eğilme çatlakları görülmektedir. Mesnet noktası ile CFRP bitiş noktasında eğilme ve çekme çatlaklarının yoğunlaştığı ve burada aşırı zorlanmalar oluştuğu belirlenmiştir.



Şekil5.93. C1 tip sayısal kiriş modeli için P=300 KN luk yükleme altında yük-deplasman grafiği

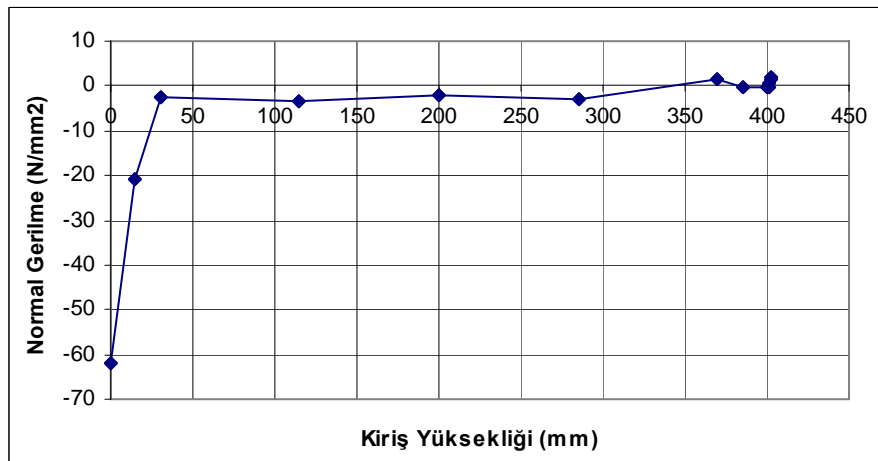
C1 tipi sayısal kiriş modeli üzerine 300 KN luk tekil yük uygulaması durumunda meydana gelen yük artımı-deplasman değişimi grafik olarak verilmiştir. Grafik incelendiğinde yük miktarı 95 KN değerine kadar deplasmanının doğrusal arttığı ve bu değeri karşılık 9,882 mm. deplasman oluştuğu görülmüştür. Bundan sonra kiriş donatısı akma dayanımına kadar yük taşımaya devam etmiştir. Bu değer aşıldıktan

sonra çok büyük deplasmanlara ulaşıldığı görülmüştür. Bu, kirişte yenilme biçiminin oluştuğunu gösterir.



Şekil 5.94 . C1 tipi sayısal kiriş modelinde kiriş yüksekliği boyunca oluşan Normal Gerilme ( $\sigma_x$ ) dağılımı

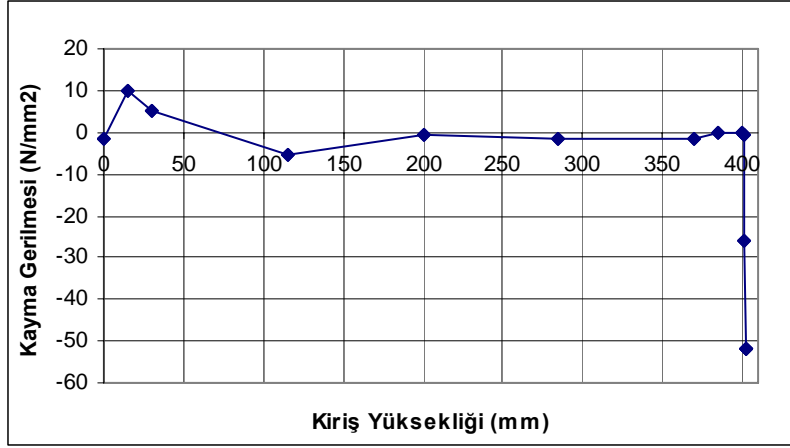
Şekil 5.94. 'te C1 tipi sayısal kiriş modelinde uygulanan tekil yük altında kiriş yüksekliği boyunca oluşan normal gerilme( $\sigma_x$ ) değişimi verilmiştir. Analiz sonucunda en büyük  $\sigma_x$  değeri  $-288,53 \text{ N/mm}^2$  olarak hesaplanmıştır. C0 tipi sayısal kiriş modeli ile karşılaştırıldığında x doğrultusunda %44 değerinde bir gerilme kazanımı sağlanmıştır.



Şekil 5.95. C1 tipi sayısal kiriş modelinde kiriş yüksekliği boyunca oluşan Normal Gerilme ( $\sigma_y$ ) dağılımı

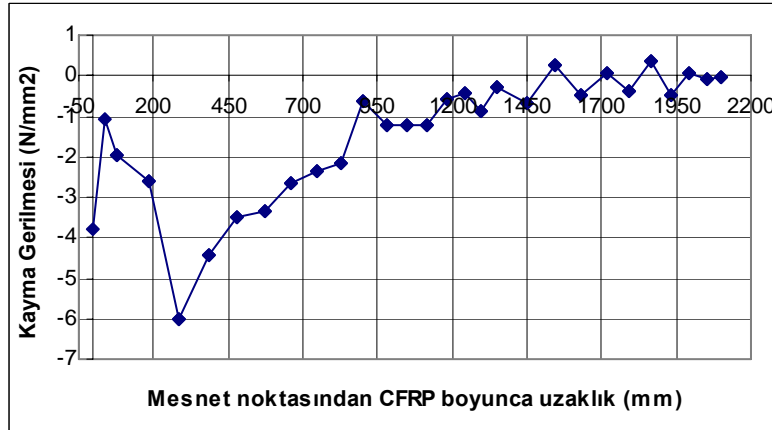
Şekil 5.95 'te C1 tipi sayısal kiriş modelinde uygulanan tekil yük altında kiriş yüksekliği boyunca oluşan normal gerilme( $\sigma_y$ ) değişimi verilmiştir. Analiz

sonucunda en büyük  $\sigma_y$  değeri  $-62,107 \text{ N/mm}^2$  olarak hesaplanmıştır. C0 tipi sayısal kiriş modeli ile karşılaştırıldığında y doğrultusunda %39 değerinde bir gerilme kazanımı sağlanmıştır



Şekil 5.97 C1 tipi sayısal kiriş modelinde kiriş yüksekliği boyunca oluşan Kayma Gerilmesi ( $\tau_{xy}$ ) dağılımı

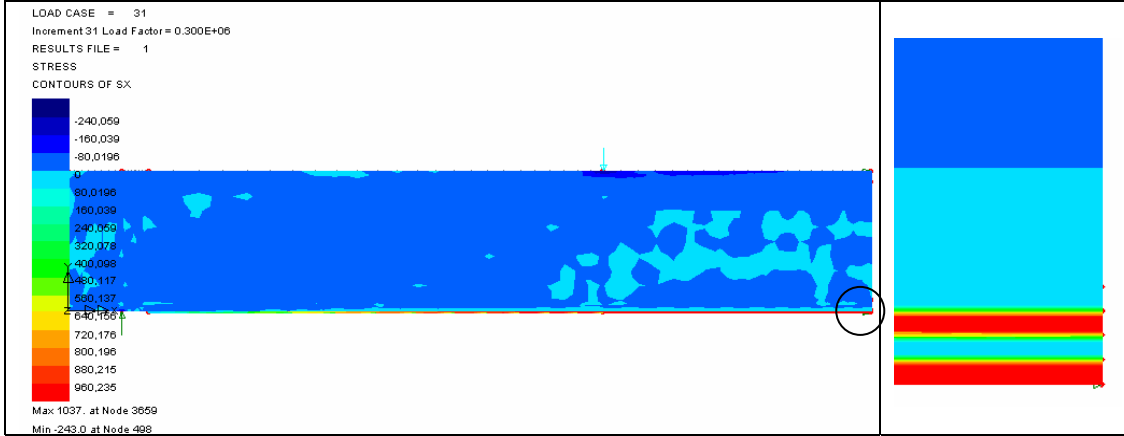
C1 tipi sayısal kiriş modelinde kiriş yüksekliği boyunca oluşan en büyük kayma gerilmesi değeri  $-1,632 \text{ N/mm}^2$  olarak belirlenmiştir. C0 tipi kiriş ile karşılaştırıldığında oldukça önemli gerilme azalması oluşmuştur.



Şekil 5.98 . C1 tipi sayısal kiriş modelinde mesnet noktasından CFRP doğrultusu boyunca oluşan Kayma Gerilmesi ( $\tau_{xy}$ ) dağılımı

Şekil 5.98'de C1 sayısal kiriş modelinin mesnet noktasından CFRP doğrultusu boyunca oluşan en büyük kayma gerilmesi değeri  $-6,13 \text{ N/mm}^2$  olarak hesaplanmıştır.

### 5.1.3.3. C2 tipi sayısal kiriş modeli analiz sonuçları



Şekil 5.99 C2 tipi sayısal kiriş modelinde doğrusal olmayan analiz sonucunda kiriş boyunca oluşan Normal Gerilme ( $\sigma_x$ ) değişimi ve güçlendirme bölgesi detayı

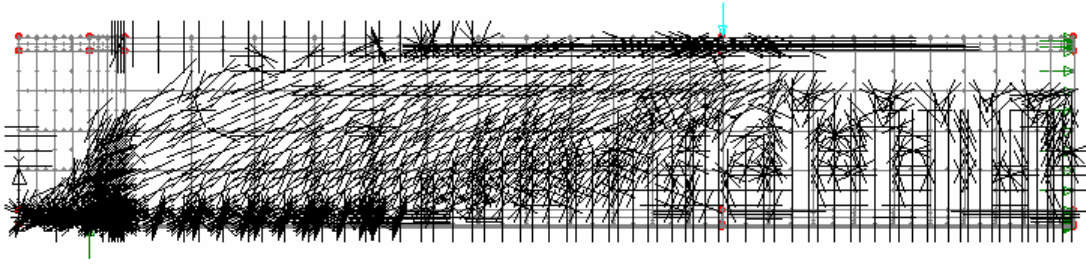
C2 tipi sayısal kiriş modeli yüzeyinde oluşan normal gerilme ( $\sigma_x$ ) dağılımı şekildeki gibi elde edilmiştir. Burada en büyük normal gerilme ( $\sigma_x$ ) tekil yükün uygulandığı noktada oluşmuştur. Güçlendirme bölgesi detayı incelendiğinde betonarme kiriş, epoksi ve CFRP tabakaları arasında tekil yüklemekten doğan normal gerilme değişimleri açıkça görülmektedir. Ayrıca CFRP plaka bitim noktasında önemli gerilme artımı söz konusudur.



Şekil5.100. C2 tipi sayısal kiriş modelinde meydana gelen birim zorlanma( $\epsilon_x$ ) değerleri değişimi

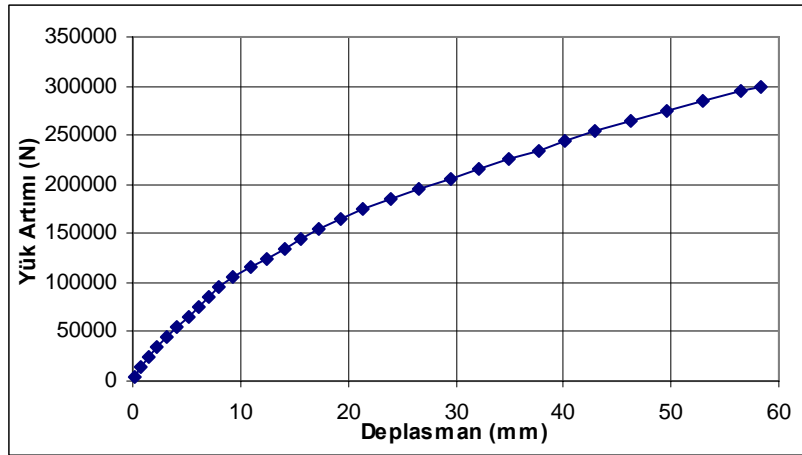
Şekil 5.100. de, C2 tipi sayısal kiriş modelinde gerçekleştirilen doğrusal olmayan analiz sonucu, kiriş yenilme durumuna geldiği anda, bütün kesit boyunca oluşan birim zorlanma ( $\epsilon_x$ ) değerleri ayrıntılı olarak verilmiştir. En büyük zorlanmaların tekil yükleme noktasından başlayıp mesnet noktasına doğru yayıldığı belirlenmiştir. Bunun yanında, CFRP bitim noktasında önemli gerilme artışları oluşmuştur.





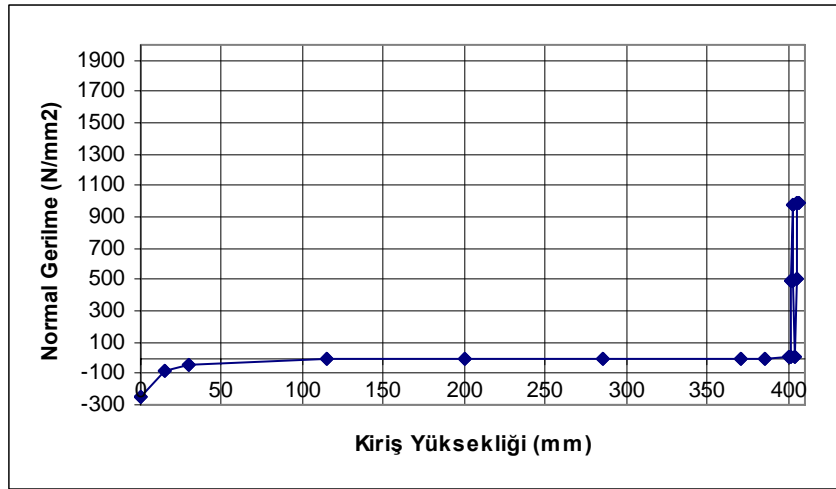
Şekil.5.101. C2 tipi sayısal kiriş modelinde  $P=300$  KN luk yükleme sonucunda oluşan eğilme ve kesme çatlakları dağılımı

Şekil 5.101. 'de , kiriş tabanına iki kat CFRP plaka yapıştırılması ile elde edilen C2 tipi sayısal kiriş modelinin kirişinin  $300$  KN yükleme altında, doğrusal olmayan analiz sonucu oluşan kirişin, yenilme durumuna ulaştığı andaki eğilme ve eğik kesme çatlakları görülmektedir. Tekil yük etkime noktasından başlayan ve mesnete doğru yoğunlaşan eğik kesme çatlakları ile yük altında kiriş tabanında yayılan eğilme çatlakları görülmektedir. Mesnet noktası ile CFRP bitiş noktasında eğilme ve çekme çatlaklarının yoğunlaştığı ve burada aşırı zorlanmalar oluştuğu belirlenmiştir.



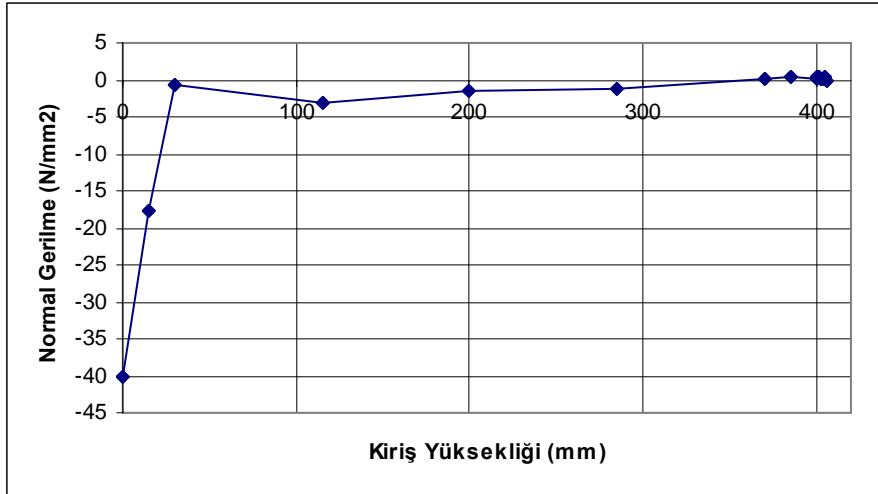
Şekil5.102. C2 tipi sayısal kiriş modeli için  $P=300$  KN luk yükleme altında yük-deplasman grafiği

C2 tipi sayısal kiriş modeli üzerine  $300$  KN luk tekil yük uygulaması durumunda meydana gelen yük artımı-deplasman değişimi grafik olarak verilmiştir. Grafik incelendiğinde yük miktarı  $95$  KN değerine kadar deplasmanının doğrusal arttığı ve bu değeri karşılık  $8,067$  mm. deplasman oluştuğu görülmüştür. Bundan sonra kiriş donatısı akma dayanımına kadar yük taşımaya devam etmiştir. Bu değer aşıldıktan sonra çok büyük deplasmanlara ulaşıldığı görülmüştür. Bu, kirişte yenilme biçiminin oluştuğunu gösterir.



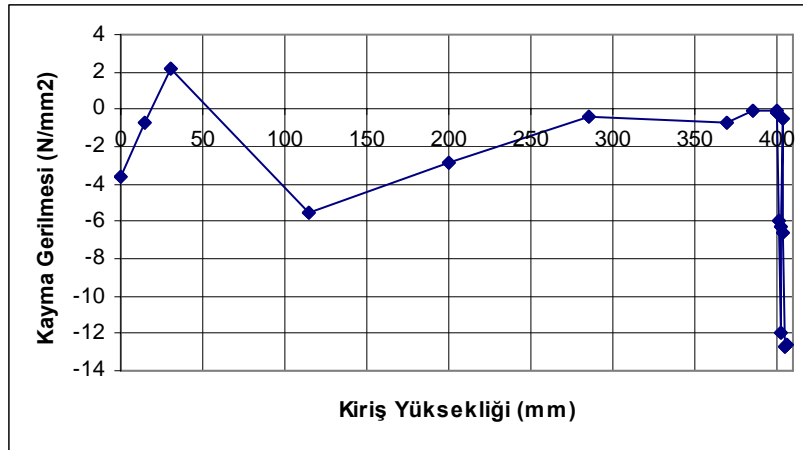
Şekil 5.103. C2 tipi sayısal kiriş modelinde kiriş yüksekliği boyunca oluşan Normal Gerilme ( $\sigma_x$ ) dağılımı

Şekil 5.103 'te C2 tipi sayısal kiriş modelinde uygulanan tekil yük altında kiriş yüksekliği boyunca oluşan normal gerilme( $\sigma_x$ ) değişimi verilmiştir. Analiz sonucunda en büyük  $\sigma_x$  değeri  $-243,07 \text{ N/mm}^2$  olarak hesaplanmıştır. C0 tipi sayısal kiriş modeline göre x doğrultusunda %44, C1 tipi sayısal kiriş modeline göre % 16 değerinde bir gerilme kazanımı sağlanmıştır.



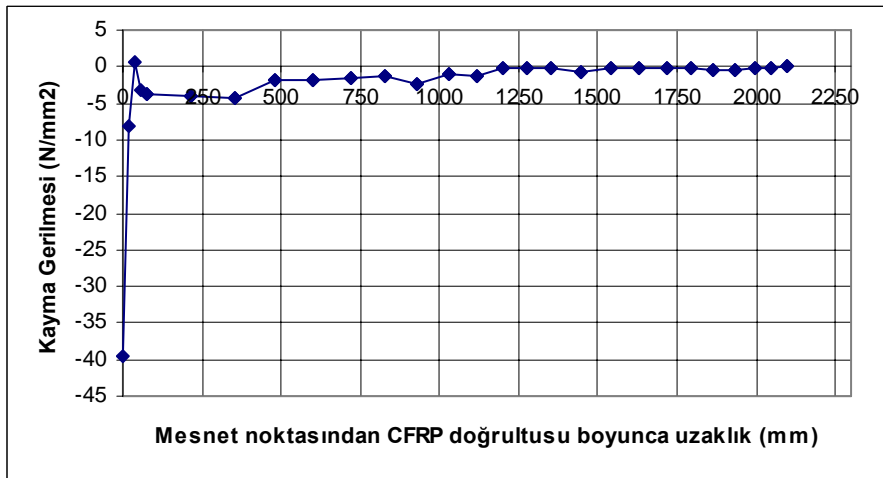
Şekil 5.104 . C2 tipi sayısal kiriş modelinde kiriş yüksekliği boyunca oluşan Normal Gerilme ( $\sigma_y$ ) dağılımı

Şekil 5.104 'te C2 tipi sayısal kiriş modelinde uygulanan tekil yük altında kiriş yüksekliği boyunca oluşan normal gerilme( $\sigma_y$ ) değişimi verilmiştir. Analiz sonucunda en büyük  $\sigma_y$  değeri  $-40,434 \text{ N/mm}^2$  olarak hesaplanmıştır. C0 ve C1 tipi sayısal kiriş modellerine göre y doğrultusunda önemli azalmalar meydana gelmiştir.



Şekil 5.105 . C2 tipi sayısal kiriş modelinde kiriş yüksekliği boyunca oluşan Kayma Gerilmesi ( $\tau_{xy}$ ) dağılımı

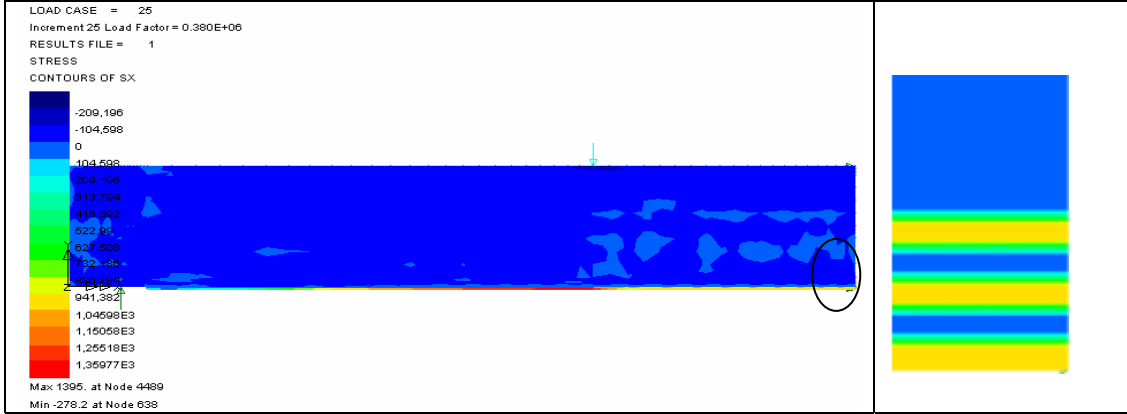
C2 tipi sayısal kiriş modelinde kiriş yüksekliği boyunca oluşan en büyük kayma gerilmesi değeri  $-3,64 \text{ N/mm}^2$  olarak belirlenmiştir. C0 ve C1 tipi kiriş ile karşılaştırıldığına oldukça önemli gerilme azalması oluşmuştur.



Şekil 5.106. C2 tipi sayısal kiriş modelinde mesnet noktasından CFRP doğrultusu boyunca oluşan Kayma Gerilmesi ( $\tau_{xy}$ ) dağılımı

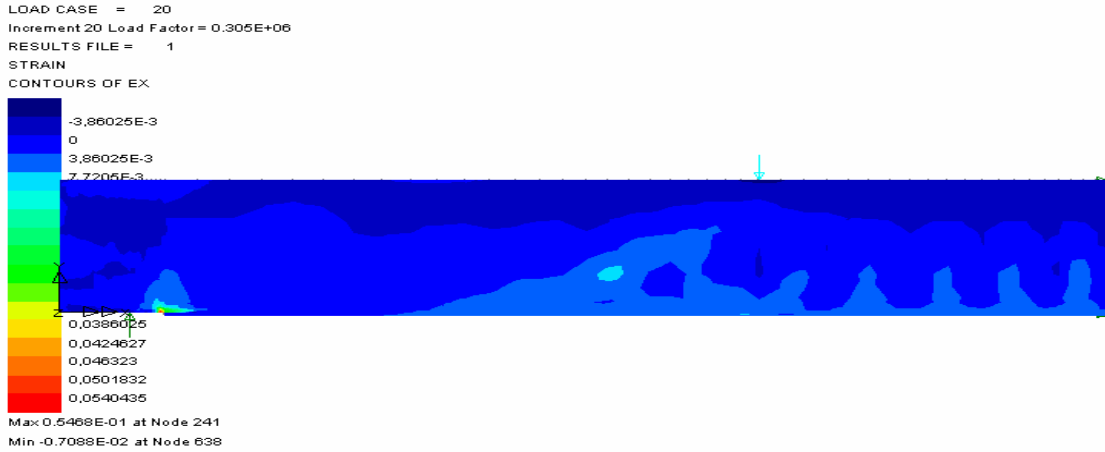
Şekil 5.106'da C2 sayısal kiriş modelinin mesnet noktasından CFRP doğrultusu boyunca oluşan en büyük kayma gerilmesi değeri mesnet noktasında  $-39,562 \text{ N/mm}^2$  ve CFRP plaka bitim noktasında  $-3,675 \text{ N/mm}^2$  olarak hesaplanmıştır.

### 5.1.3.4. C3 tipi sayısal kiriş modeli analiz sonuçları



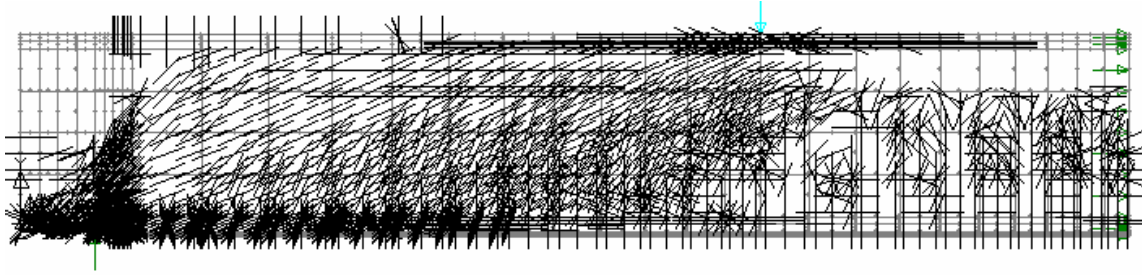
Şekil.5.107. C3 tipi sayısal kiriş modelinde doğrusal olmayan analiz sonucunda kiriş boyunca oluşan Normal Gerilme ( $\sigma_x$ ) değişimi ve güçlendirme bölgesi detayı.

C3 tipi sayısal kiriş modeli yüzeyinde oluşan normal gerilme ( $\sigma_x$ ) dağılımı şekildeki gibi elde edilmiştir. Burada en büyük normal gerilme ( $\sigma_x$ ) tekil yükün uygulandığı noktada oluşmuştur. Güçlendirme bölgesi detayı incelendiğinde betonarme kiriş, epoksi ve CFRP tabakaları arasında tekil yüklemekten doğan normal gerilme değişimleri açıkça görülmektedir. Ayrıca CFRP plaka bitim noktasında önemli gerilme artımı söz konusudur.



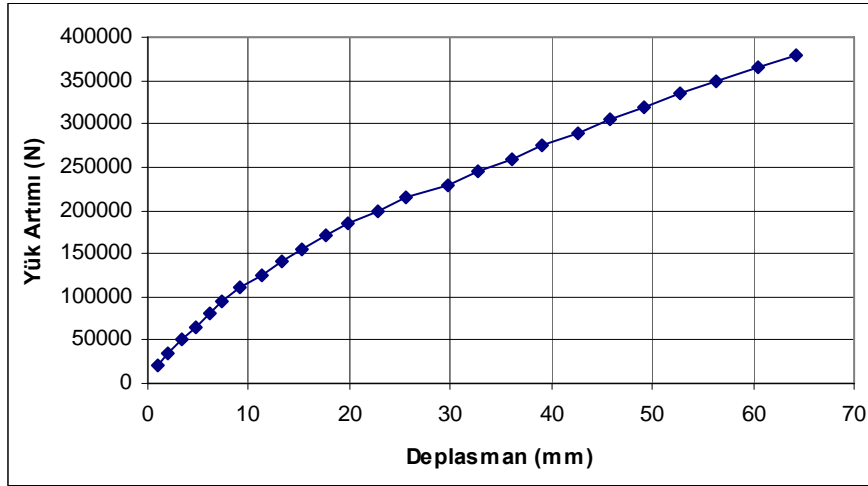
Şekil5.108. C3 tipi sayısal kiriş modelinde meydana gelen birim zorlanma( $\epsilon_x$ ) değerleri değişimi

Bu şekilde, C3 tipi sayısal kiriş modelinde gerçekleştirilen doğrusal olmayan analiz sonucu, kiriş yenilme durumuna geldiği anda, bütün kesit boyunca oluşan birim zorlanma ( $\epsilon_x$ ) değerleri ayrıntılı olarak verilmiştir. En büyük zorlanmaların tekil yükleme noktasından başlayıp mesnet noktasına doğru yayıldığı belirlenmiştir. Bunun yanında, CFRP bitim noktasında önemli gerilme artışları oluşmuştur.



Şekil.5.109. C3 tipi sayısal kiriş modelinde  $P=400$  KN luk yükleme sonucunda oluşan eğilme ve kesme çatlakları dağılımı

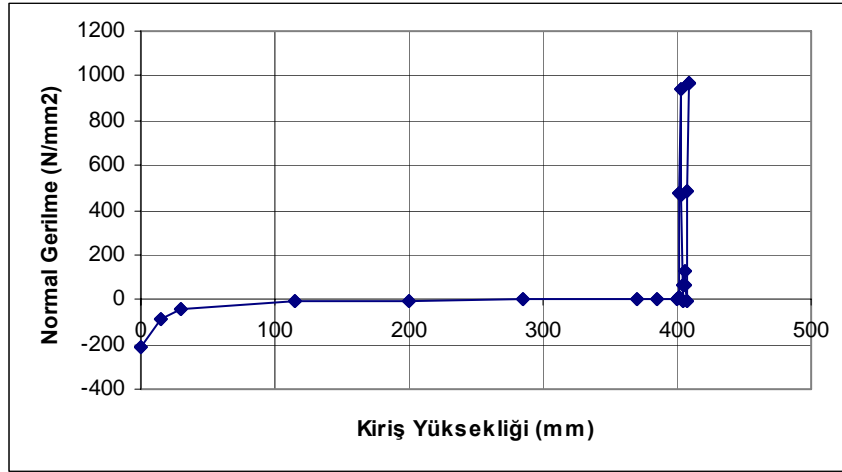
Yukarıdaki şekilde'de , kiriş tabanına üç kat CFRP plaka yapıştırılması ile elde edilen C3 tipi sayısal kiriş modelinin kirişinin  $400$  KN yükleme altında, doğrusal olmayan analiz sonucu oluşan kirişin, yenilme durumuna ulaştığı andaki eğilme ve eğik kesme çatlakları görülmektedir. Tekil yük etkime noktasından başlayan ve mesnete doğru yoğunlaşan eğik kesme çatlakları ile yük altında kiriş tabanında yayılan eğilme çatlakları görülmektedir. Mesnet noktası ile CFRP bitiş noktasında eğilme ve çekme çatlaklarının yoğunlaştığı ve burada aşırı zorlanmalar oluştuğu belirlenmiştir.



Şekil.5.110. C3 tipi sayısal kiriş modeli için  $P=400$  KN luk tekil yükleme altında oluşan yük-deplasman değişimi

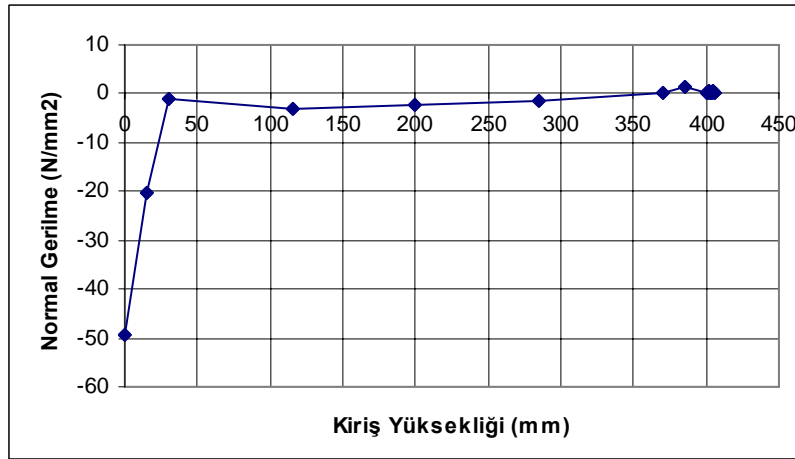
C3 tipi sayısal kiriş modeli üzerine  $400$  KN luk tekil yük uygulaması durumunda meydana gelen yük artımı-deplasman değişimi grafik olarak verilmiştir. Grafik incelendiğinde yük miktarı  $125$  KN değerine kadar deplasmanının doğrusal arttığı ve bu değeri karşılık  $11,282$  mm. deplasman oluştuğu görülmüştür. Bundan sonra kiriş donatısı akma dayanımına kadar yük taşımaya devam etmiştir. Bu değer aşıldıktan

sonra çok büyük deplasmanlara ulaşıldığı görülmüştür. Bu, kirişte yenilme biçiminin oluştuğunu gösterir.



Şekil 5.111. C3 tipi sayısal kiriş modelinde kiriş yüksekliği boyunca oluşan Normal Gerilme ( $\sigma_x$ ) dağılımı

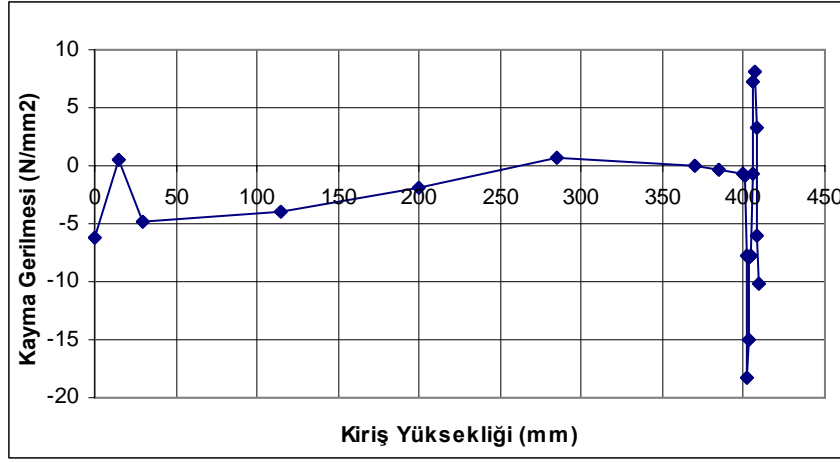
Şekil 5.111 'de C3 tipi sayısal kiriş modelinde uygulanan tekil yük altında kiriş yüksekliği boyunca oluşan normal gerilme( $\sigma_x$ ) değişimi verilmiştir. Analiz sonucunda en büyük  $\sigma_x$  değeri  $-209,93 \text{ N/mm}^2$  olarak hesaplanmıştır. C0 kontrol kirişine göre % 68 değerinde gerilme kazanımı sağlanmıştır.



Şekil 5.112. C3 tipi sayısal kiriş modelinde kiriş yüksekliği boyunca oluşan Normal Gerilme ( $\sigma_y$ ) dağılımı

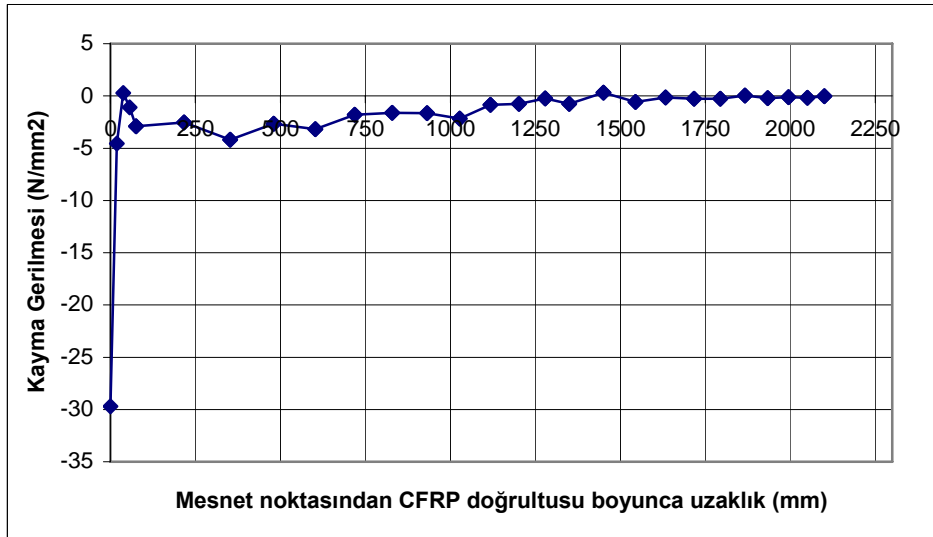
Şekil 5.112 'de C3 tipi sayısal kiriş modelinde uygulanan tekil yük altında kiriş yüksekliği boyunca oluşan normal gerilme( $\sigma_y$ ) değişimi verilmiştir. Analiz sonucunda en büyük  $\sigma_y$  değeri  $-49,19 \text{ N/mm}^2$  olarak hesaplanmıştır. C0 tipi sayısal

kiriş modeline göre y doğrultusunda %31 değerinde bir gerilme kazanımı sağlanmıştır.



Şekil 5.113. C3 tipi sayısal kiriş modelinde kiriş yüksekliği boyunca oluşan Kayma Gerilmesi ( $\tau_{xy}$ ) dağılımı

C3 tipi sayısal kiriş modelinde kiriş yüksekliği boyunca oluşan en büyük kayma gerilmesi değeri  $-6,287 \text{ N/mm}^2$  olarak belirlenmiştir. C0 ve C1 tipi kiriş ile karşılaştırıldığına oldukça önemli gerilme azalması oluşmuştur.

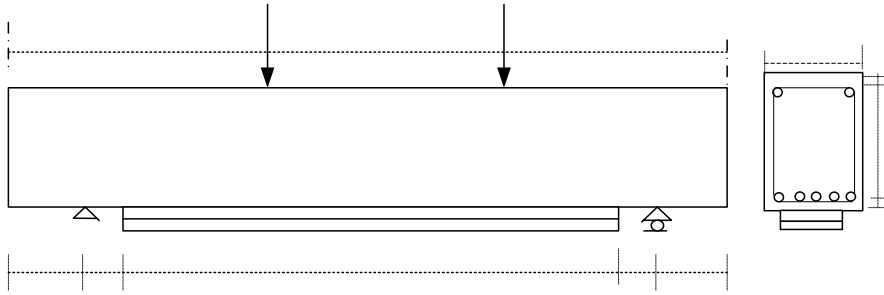


Şekil 5.114. C3 tipi sayısal kiriş modelinde mesnet noktasından CFRP doğrultusu boyunca oluşan Kayma Gerilmesi ( $\tau_{xy}$ ) dağılımı

Şekil 5.114’de C3 sayısal kiriş modelinin mesnet noktasından CFRP doğrultusu boyunca oluşan en büyük kayma gerilmesi değeri mesnet noktasında  $-29,698 \text{ N/mm}^2$  ve CFRP plaka bitim noktasında  $-2,917 \text{ N/mm}^2$  olarak hesaplanmıştır.

#### 5.1.4. D tipi sayısal kiriş modeli

D tipi betonarme kiriş modeli  $300 \times 500$  boyutlarında ve  $6000 \text{ mm}$  kiriş açıklığına sahip çekme bölgesinde  $5\phi 20$  ve basınç bölgesinde  $2\phi 12$  donatı bulunan kiriştir. İki noktadan yükleme yapılan kiriş modelleri orta bölgesinden simetridir. Bu modele ait en ve boy kesiti, mevcut donatısı ile yükleme durumu Şekil 5.115 de verilmiştir.



Şekil.5.115. D tipi sayısal kiriş modeli boy ve en kesiti

Bütün sayısal kiriş modellerinde kullanılan beton sınıfı olarak C20(BS20) betonu seçilmiştir. Bu betona ait mekanik özellikleri Tablo 5.12 da verilmiştir.

Tablo 5.12. D tipi sayısal kiriş modeli betonunun mekanik özellikleri

$b_w$ (mm)	$d$ (mm)	$f_{ck}$ (Mpa)	$f_{cd}$ (Mpa)	$f_{ctk}$	Ezilme Birim Kısalması( $\epsilon_{cu}$ )	Poison Oranı ( $\mu_c$ )	28 Günlük Elastisite $E_c$	28 Günlük Kayma modülü $G_c$
300	470	20	13	1.0	0.003	0.2	28 500 MPa	11200Mpa

Hazırlanan tüm sayısal kiriş modellerinde kiriş donatısı olarak çekme ve basınç bölgelerine yerleştirile donatılar için S 420 (BÇIII) çeliği seçilmiştir. Bu donatıya ait mekanik özellikler Tablo 5.13 de verilmiştir.

Tablo 5.13. D tipi sayısal kiriş modeli donatıları mekanik özellikleri

$b_w$	$d$	$f_{yk}$	$f_{yd}$	$f_{su}$	$\epsilon_{su}$ Oranı %	$E_s$	Kopma birim Uzaması $\epsilon_{su}$	Poison Oranı
300	470	420	365	500	12	$2.10^5$	0.1	0.3

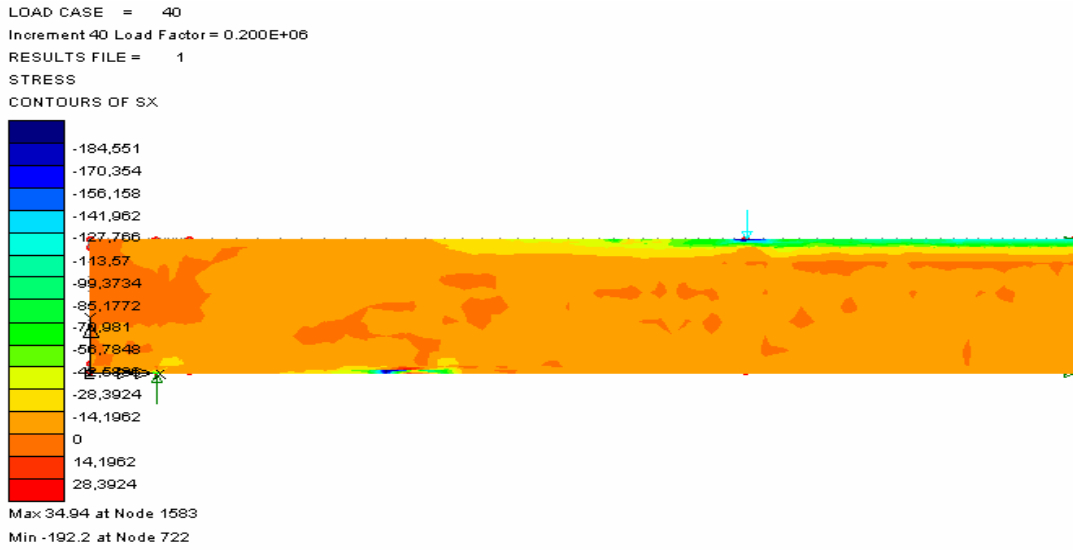


CFRP plaka kullanılarak hazırlanan modellerin malzeme ve uygulama yöntemi aşağıda verilmiştir.

Tablo.5.14. D tipi sayısal kiriş modelleri

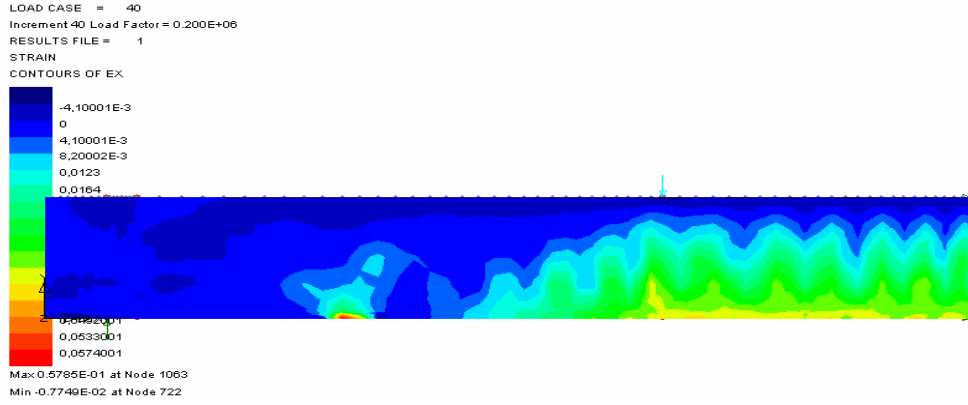
Modeller	CFRP Malzemesi türü	Epoksi türü	Uygulama Yöntemi
D0	Sika Carbodur XS 1014	Sikodur-30	CFRP siz kiriş (Kontrol kirişi)
D1			Kiriş tabanına 1 Kat
D2			Kiriş tabanına 2 Kat
D3			Kiriş tabanına 3 Kat

#### 5.1.4.1. D0 tipi sayısal kiriş modeli analiz sonuçları



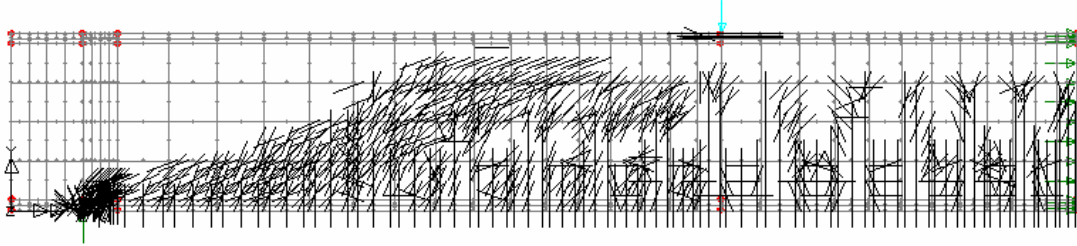
Şekil 5.116 D0 tipi sayısal kiriş modelinde doğrusal olmayan analiz sonucunda kiriş boyunca oluşan Normal Gerilme ( $\sigma_x$ ) değişimi

Gerçekleştirilen doğrusal olmayan analiz sonucunda mevcut D0 sayısal kiriş modeli boy kesitinde oluşan normal gerilme ( $\sigma_x$ ) dağılımı şekildeki gibi elde edilmiştir. Tekil yükleme yapılan noktadan itibaren kiriş yüksekliği boyunca oluşan gerilme değerleri grafik olarak sunulmuştur. Kiriş yüzeyinde oluşan maksimum normal gerilme  $34,94 \text{ N/mm}^2$ , minimum gerilme ise  $-192,2 \text{ N/mm}^2$  değerinde tekil yük altında oluşmuştur.



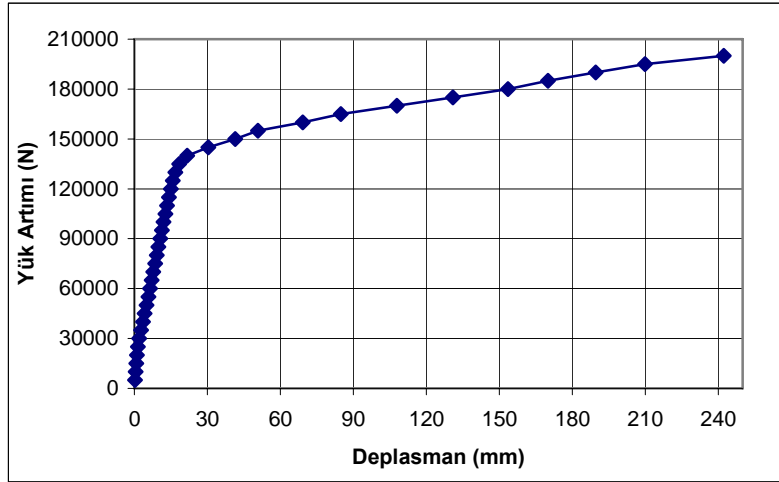
Şekil5.117. D0 tipi sayısal kiriş modelinde meydana gelen birim zorlanma( $\epsilon_x$ ) değerleri değişimi

Bu şekilde, D0 tipi sayısal kiriş modelinde gerçekleştirilen doğrusal olmayan analiz sonucu, kiriş yenilme durumuna geldiği anda, bütün kesit boyunca oluşan birim zorlanma ( $\epsilon_x$ ) değerleri ayrıntılı olarak verilmiştir. En büyük zorlanmaların tekil yükleme noktasından başlayıp mesnet noktasına doğru yayıldığı belirlenmiştir.



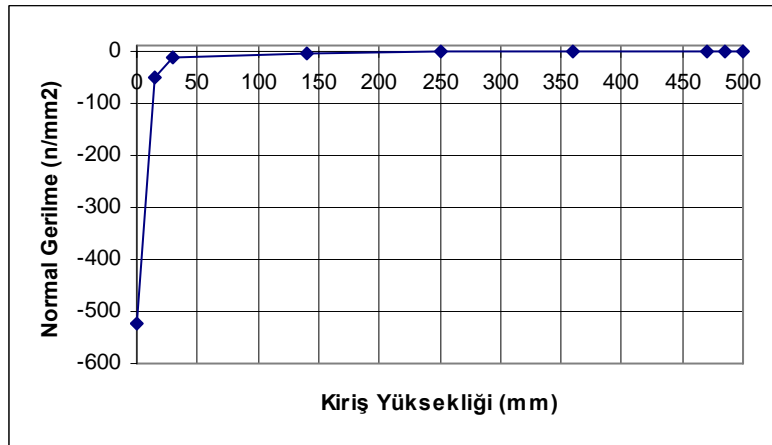
Şekil.5.118. D0 tipi sayısal kiriş modelinde P=400 KN luk yükleme sonucunda oluşan eğilme ve kesme çatlakları dağılımı

Şekil 5.118. 'de , kontrol kiriş olan D0 tipi sayısal kiriş modelinin kirişinin 400 KN yükleme altında doğrusal olmayan analiz sonucu oluşan kirişin yenilme durumuna ulaştığı andaki eğilme ve eğik kesme çatlakları görülmektedir. Tekil yük etkime noktasından başlayan ve mesnete doğru yoğunlaşan eğik kesme çatlakları ile yük altında kiriş tabanında yayılan eğilme çatlakları görülmektedir. Ayrıca tekil yük altında başlayan ve bir yay çizerek yayılan çatlak yoğunlaşması tespit edilmiştir.



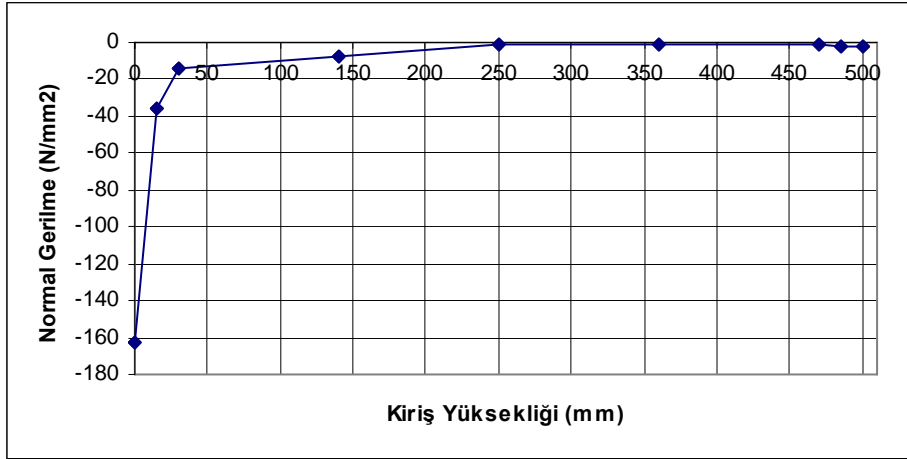
Şekil 5.119. D0 tipi sayısal kiriş modeli için P=400 KN luk tekil yüklemeye altında oluşan yük-deplasman değişimi

D0 tipi sayısal kiriş modeli üzerine 400 KN luk tekil yük uygulaması durumunda meydana gelen yük artımı-deplasman değişimi grafik olarak verilmiştir. Grafik incelendiğinde yük miktarı 140 KN değerine kadar deplasmanının doğrusal arttığı ve bu değeri karşılık 21,72 mm. deplasman olduğu görülmüştür. Bundan sonra kiriş donatısı akma dayanımına kadar yük taşımaya devam etmiştir. Bu değer aşıldıktan sonra çok büyük deplasmanlara ulaşıldığı görülmüştür. Bu, kirişte yenilme biçiminin oluştuğunu gösterir.



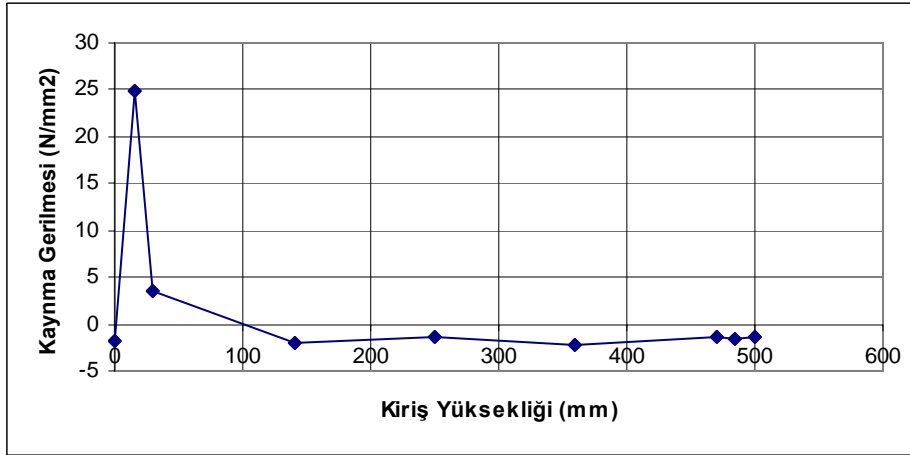
Şekil 5.120. D0 tipi sayısal kiriş modelinde kiriş yüksekliği boyunca oluşan Normal Gerilme ( $\sigma_x$ ) dağılımı

Gerçekleştirilen analiz sonucunda kontrol kirişi olan D0 tipi sayısal kiriş modelinde tekil yüklemeye altında kiriş yüksekliği boyunca oluşan maksimum  $\sigma_x$  değeri -521,753 N/mm<sup>2</sup> olarak hesaplanmıştır.



Şekil 5.121. D0 tipi sayısal kiriş modelinde kiriş yüksekliği boyunca oluşan Normal Gerilme ( $\sigma_y$ ) dağılımı

Gerçekleştirilen analiz sonucunda kontrol kirişi olan D0 tipi sayısal kiriş modelinde tekil yükleme altında kiriş yüksekliği boyunca oluşan maksimum  $\sigma_y$  değeri  $-162,995 \text{ N/mm}^2$  olarak hesaplanmıştır.



Şekil 5.122. D0 tipi sayısal kiriş modelinde kiriş yüksekliği boyunca oluşan Kayma Gerilmesi ( $\tau_{xy}$ ) dağılımı

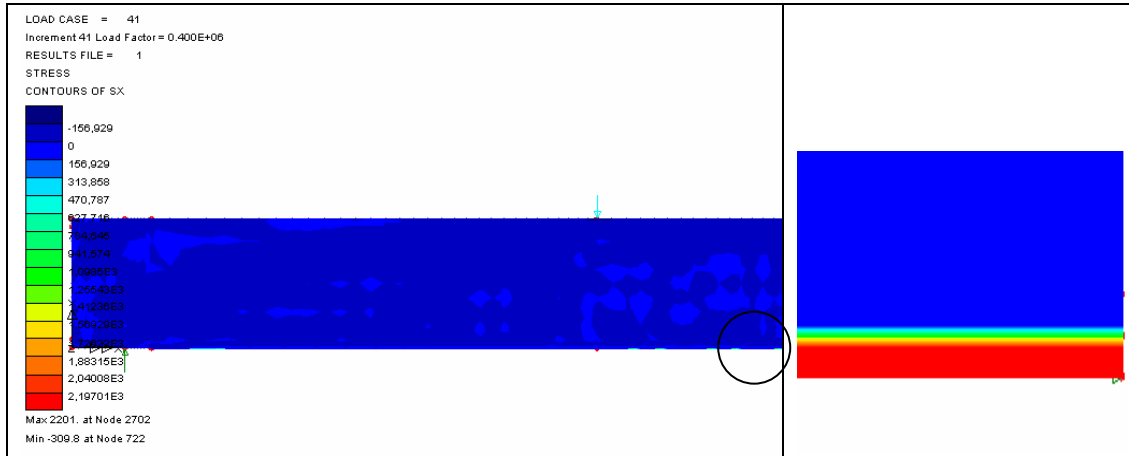
Yukarıdaki grafikte D0 tipi kirişinde yükleme noktasından itibaren kiriş yüksekliği boyunca oluşan kayma gerilmeleri değişimi sunulmuştur. Analiz sonucunda maksimum kayma gerilmesi  $24,90 \text{ N/mm}^2$  olarak belirlenmiştir.



Şekil.5.123. D0 tipi sayısal kiri modelinde mesnet noktasından CFRP yüzeyi boyunca oluşan Kayma gerilmesi( $\tau_{xy}$ ) değişimi grafiği

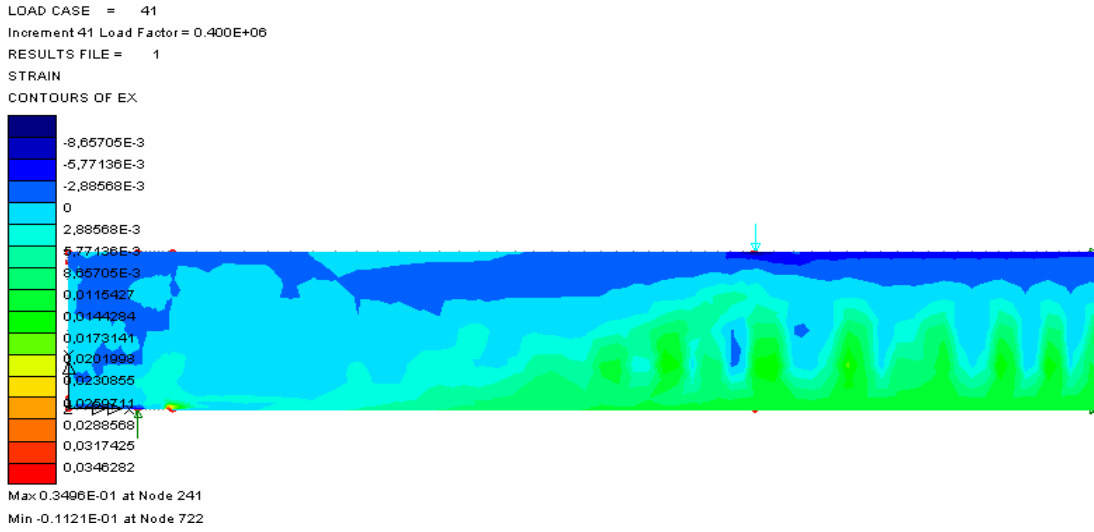
Yukarıdaki grafikte D0 tip kirişinde mesnet noktasından başlayarak kiriş uzunluğu boyunca meydana gelen kayma gerilmeleri verilmiştir. Gerçekleştirilen analiz sonucunda maksimum kayma gerilmesi  $33,36 \text{ N/mm}^2$  olarak hesaplanmıştır.

#### 5.1.4.2. D1 tipi sayısal kiriş modeli analiz sonuçları



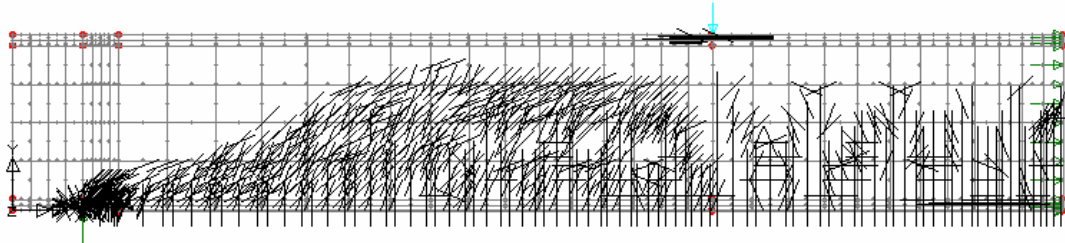
Şekil 5.124. D1 tipi sayısal kiriş modelinde doğrusal olmayan analiz sonucunda kiriş boyunca oluşan Normal Gerilme ( $\sigma_x$ ) değişimi ve güçlendirme bölgesi detayı

D1 tipi sayısal kiriş modeli yüzeyinde oluşan normal gerilme ( $\sigma_x$ ) dağılımı şekildeki gibi elde edilmiştir. Burada en büyük normal gerilme ( $\sigma_x$ ) tekil yükün uygulandığı noktada oluşmuştur. Güçlendirme bölgesi detayı incelendiğinde betonarme kiriş, epoksi ve CFRP tabakaları arasında tekil yüklemenden doğan normal gerilme değişimleri açıkça görülmektedir. Ayrıca CFRP plaka bitim noktasında önemli gerilme artımı söz konusudur.



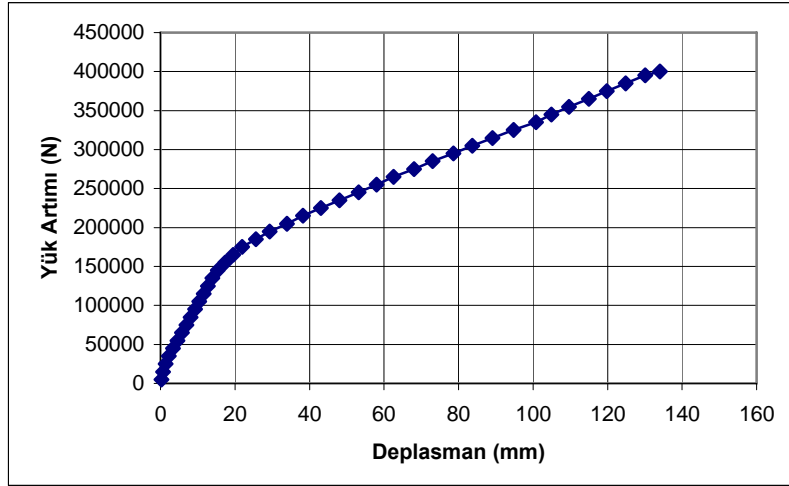
Şekil 5.125. D1 tipi sayısal kiriş modelinde tüm yüzeylerde meydana gelen birim zorlanma( $\epsilon_x$ ) değerleri

Şekil 5.125. te, D1 tipi sayısal kiriş modelinde gerçekleştirilen doğrusal olmayan analiz sonucu, kiriş yenilme durumuna geldiği anda, bütün kesit boyunca oluşan birim zorlanma ( $\epsilon_x$ ) değerleri ayrıntılı olarak verilmiştir. En büyük zorlanmaların tekil yükleme noktasından başlayıp mesnet noktasına doğru yayıldığı belirlenmiştir. Bunun yanında, CFRP bitim noktasında önemli gerilme artışları oluşmuştur.



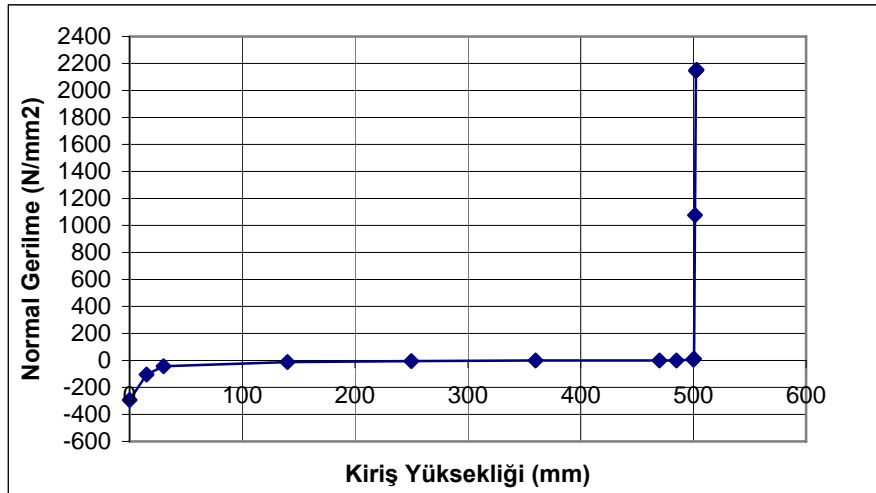
Şekil.5.126. D1 tipi sayısal kiriş modelinde  $P=400$  KN luk yükleme sonucunda oluşan Eğilme ve Kesme çatlakları dağılımı

Şekil 5.126. 'da , kiriş tabanına tek kat CFRP plaka yapıştırılması ile elde edilen D1 tipi sayısal kiriş modelinin kirişinin 400 KN yükleme altında, doğrusal olmayan analiz sonucu oluşan kirişin, yenilme durumuna ulaştığı andaki eğilme ve eğik kesme çatlakları görülmektedir. Tekil yük etkime noktasından başlayan ve mesnete doğru yoğunlaşan eğik kesme çatlakları ile yük altında kiriş tabanında yayılan eğilme çatlakları görülmektedir. Mesnet noktası ile CFRP bitiş noktasında eğilme ve çekme çatlaklarının yoğunlaştığı ve burada aşırı zorlanmalar olduğu belirlenmiştir.



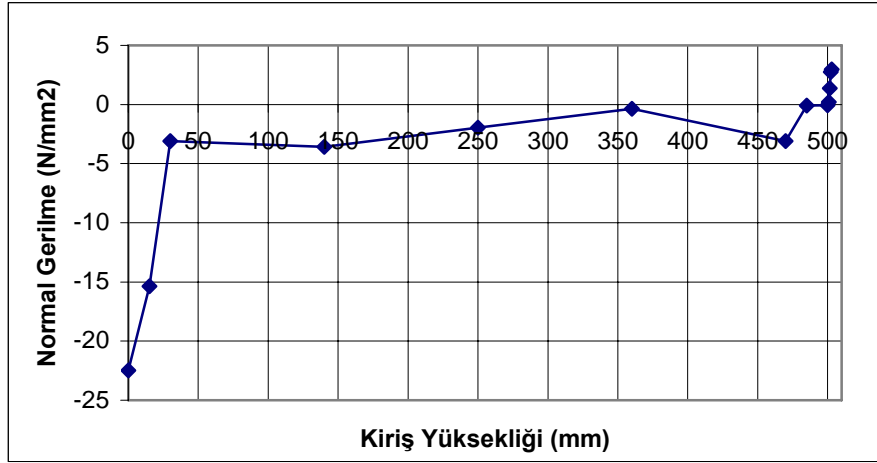
Şekil 5.127. D1 tipi sayısal kiriş modeli için P=400 KN luk tekil yüklemeye altında oluşan yük-deplasman değişimi

D1 tipi sayısal kiriş modeli üzerine 400 KN luk tekil yük uygulaması durumunda meydana gelen yük artımı-deplasman değişimi grafik olarak verilmiştir. Grafik incelendiğinde yük miktarı 155 KN değerine kadar deplasmanının doğrusal arttığı ve bu değeri karşılık 17,359 mm. deplasman olduğu görülmüştür. Bundan sonra kiriş donatısı akma dayanımına kadar yük taşımaya devam etmiştir. Bu değer aşıldıktan sonra çok büyük deplasmanlara ulaşıldığı görülmüştür. Bu, kirişte yenilme biçiminin oluştuğunu gösterir.

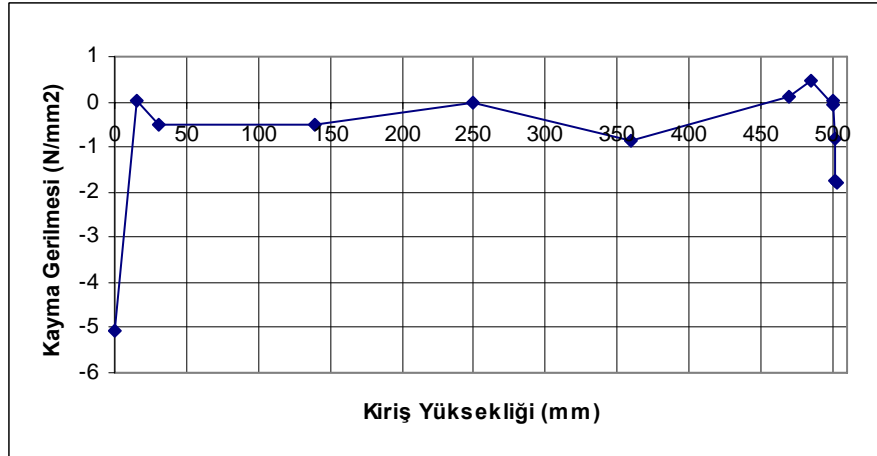


Şekil 5.128. D1 tipi sayısal kiriş modelinde kiriş yüksekliği boyunca oluşan Normal Gerilme ( $\sigma_x$ ) dağılımı

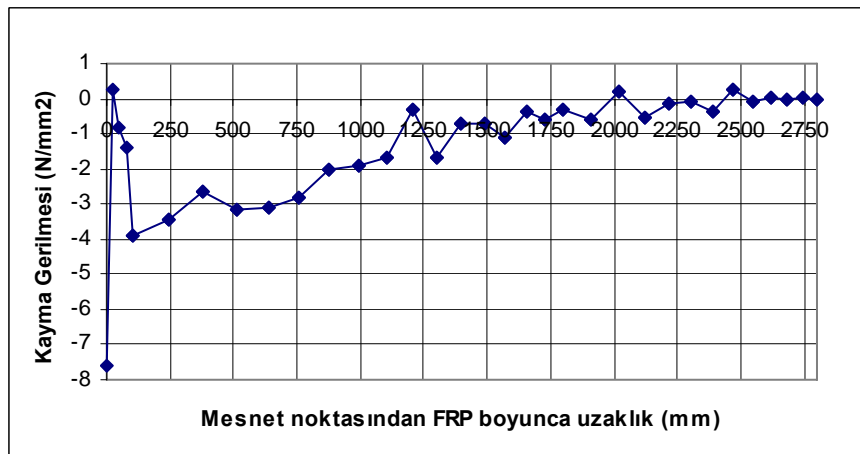
Gerçekleştirilen doğrusal olmayan analiz sonucunda tek kat CFRP kullanılarak hazırlanan D1 tipi sayısal kiriş modelinde tekil yüklemeye altında kiriş yüksekliği boyunca oluşan maksimum  $\sigma_x$  değeri  $-291,789 \text{ N/mm}^2$  olarak hesaplanmıştır.



Şekil 5.129. D1 tipi sayısal kiriş modelinde kiriş yüksekliği boyunca oluşan Normal Gerilme ( $\sigma_y$ ) dağılımı



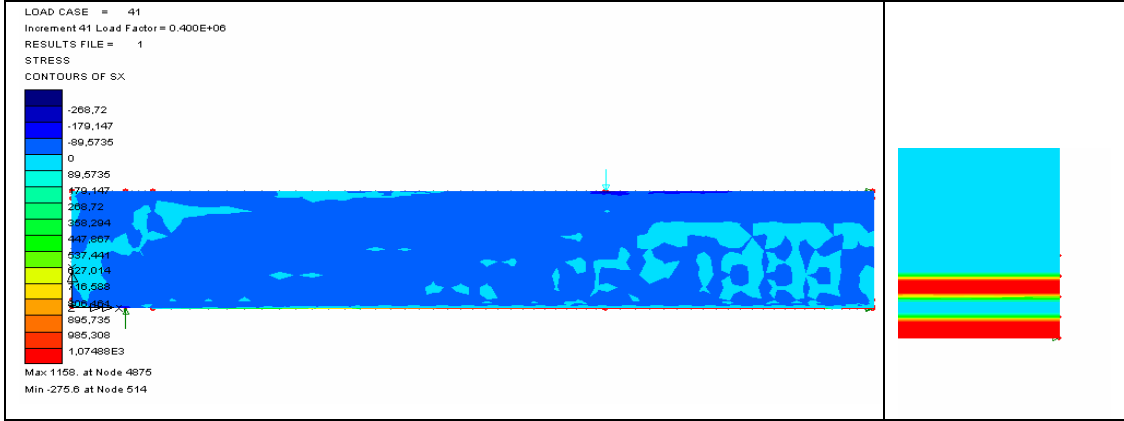
Şekil 5.130. D1 tipi sayısal kiriş modelinde kiriş yüksekliği boyunca oluşan Kayma Gerilmesi ( $\tau_{xy}$ ) dağılımı



Şekil 5.131. D1 tipi kirişinde mesnet noktasından kiriş boyunca oluşan ( $\tau_{xy}$ )Kayma gerilmesi değişimi grafiği

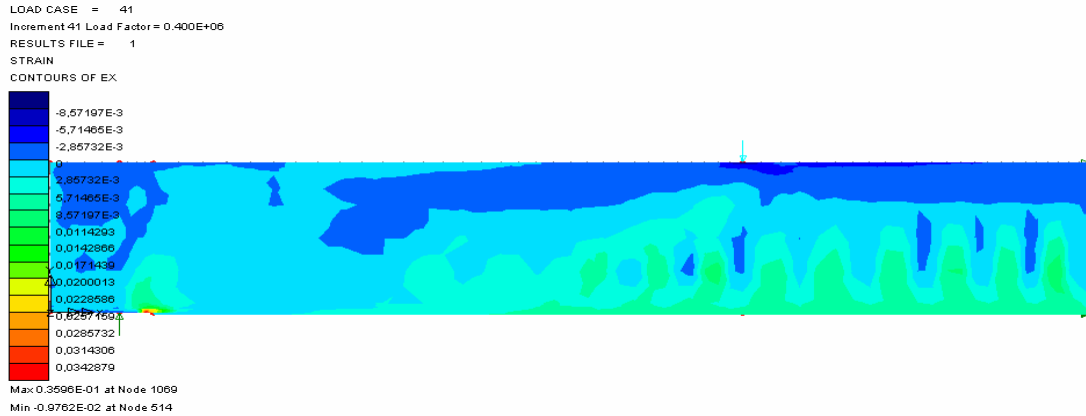


### 5.1.4.3. D2 Tipi sayısal kiriş modeli analiz sonuçları



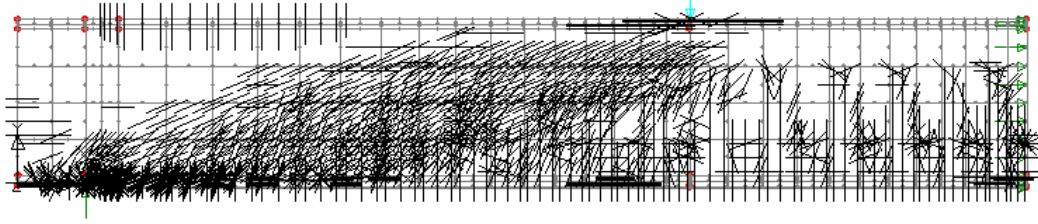
Şekil 5.132. D2 tipi sayısal kiriş modelinde doğrusal olmayan analiz sonucunda kiriş boyunca oluşan Normal Gerilme ( $\sigma_x$ ) değişimi ve güçlendirme bölgesi detayı

D2 tipi sayısal kiriş modeli yüzeyinde oluşan normal gerilme ( $\sigma_x$ ) dağılımı şekildeki gibi elde edilmiştir. Burada en büyük normal gerilme ( $\sigma_x$ ) tekil yükün uygulandığı noktada oluşmuştur. Güçlendirme bölgesi detayı incelendiğinde betonarme kiriş, epoksi ve CFRP tabakaları arasında tekil yüklemekten doğan normal gerilme değişimleri açıkça görülmektedir. Ayrıca CFRP plaka bitim noktasında önemli gerilme artımı söz konusudur.



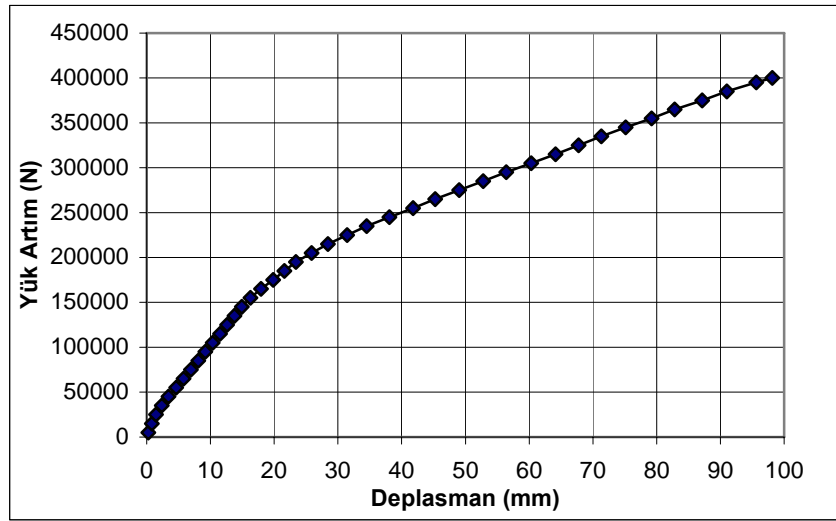
Şekil 5.133. D2 tipi sayısal kiriş modelinde meydana gelen birim zorlanma ( $\epsilon_x$ ) değerleri değişimi

Şekil 5.133. te, D2 tipi sayısal kiriş modelinde gerçekleştirilen doğrusal olmayan analiz sonucu, kiriş yenilme durumuna geldiği anda, bütün kesit boyunca oluşan birim zorlanma ( $\epsilon_x$ ) değerleri ayrıntılı olarak verilmiştir. En büyük zorlanmaların tekil yükleme noktasından başlayıp mesnet noktasına doğru yayıldığı belirlenmiştir. Bunun yanında, CFRP bitim noktasında önemli gerilme artışları oluşmuştur.



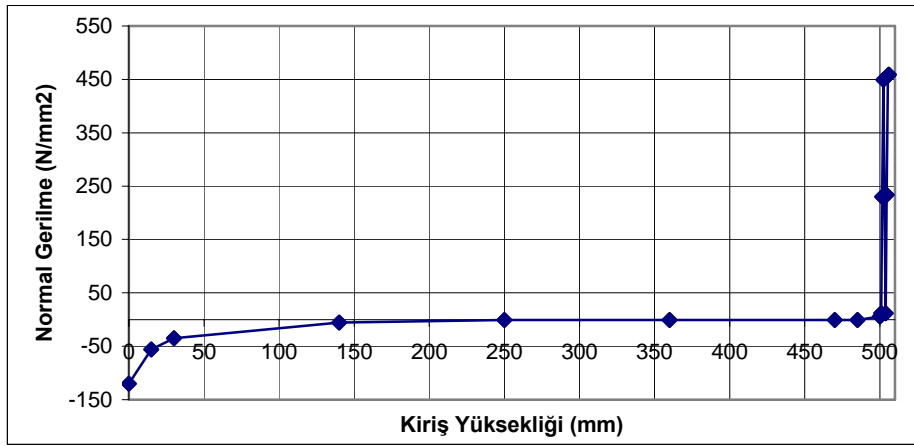
Şekil.5.134. D2 tipi sayısal kiriş modelinde P=400 KN luk yükleme sonucunda oluşan eğilme ve kesme çatlakları dağılımı

Şekil 5.134. 'te , kiriş tabanına ik kat CFRP plaka yapıştırılması ile elde edilen D2 tipi sayısal kiriş modelinin kirişinin 400 KN yükleme altında, doğrusal olmayan analiz sonucu oluşan kirişin, yenilme durumuna ulaştığı andaki eğilme ve eğik kesme çatlakları görülmektedir. Tekil yük etkime noktasından başlayan ve mesnete doğru yoğunlaşan eğik kesme çatlakları ile yük altında kiriş tabanında yayılan eğilme çatlakları görülmektedir. Mesnet noktası ile CFRP bitiş noktasında eğilme ve çekme çatlaklarının yoğunlaştığı ve burada aşırı zorlanmalar olduğu belirlenmiştir.



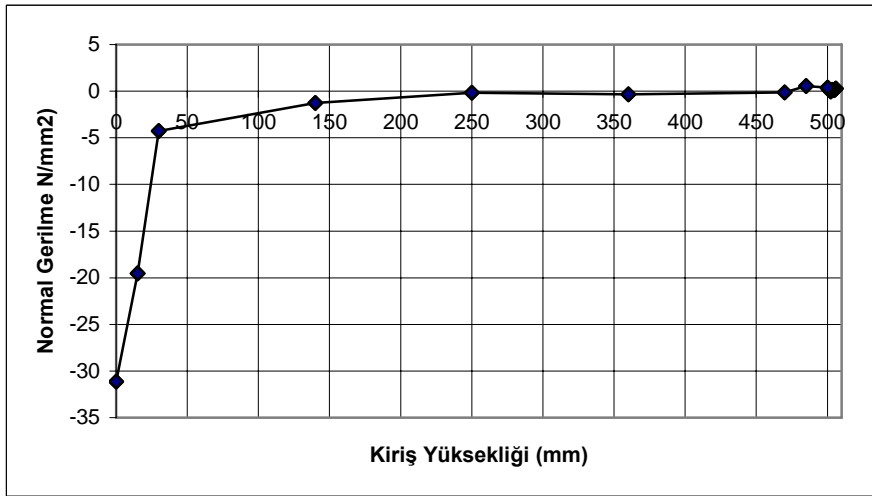
Şekil 5.135. D2 tipi sayısal kiriş modeli için P=400 KN luk tekil yükleme altında oluşan yük-deplasman değişimi

D2 tipi sayısal kiriş modeli üzerine 400 KN luk tekil yük uygulaması durumunda meydana gelen yük artımı-deplasman değişimi grafik olarak verilmiştir. Grafik incelendiğinde yük miktarı 155 KN değerine kadar deplasmanının doğrusal arttığı ve bu değeri karşılık 16,263 mm. deplasman oluştuğu görülmüştür. Bundan sonra kiriş donatısı akma dayanımına kadar yük taşımaya devam etmiştir. Bu değer aşıldıktan sonra çok büyük deplasmanlara ulaşıldığı görülmüştür. Bu, kirişte yenilme biçiminin oluştuğunu gösterir.



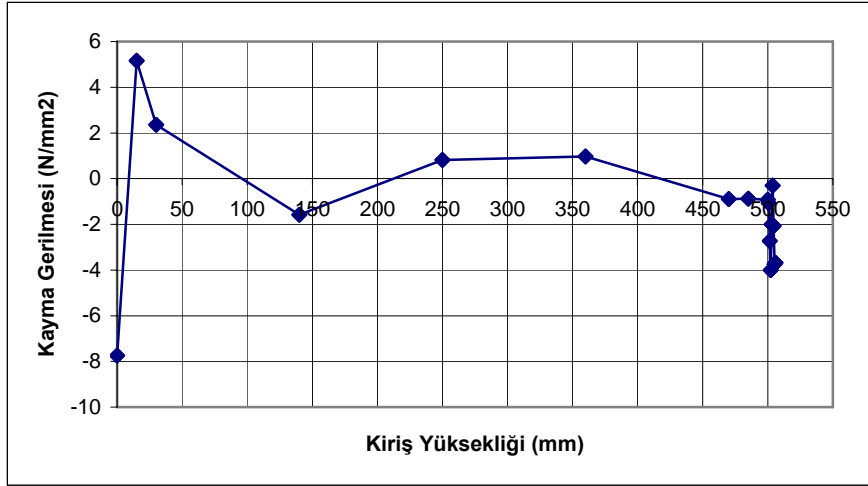
Şekil 5.136. D2 tipi sayısal kiriş modelinde kiriş yüksekliği boyunca oluşan Normal Gerilme ( $\sigma_x$ ) dağılımı

Gerçekleştirilen doğrusal olmayan analiz sonucunda iki kat CFRP kullanılarak hazırlanan D2 tipi sayısal kiriş modelinde tekil yükleme altında kiriş yüksekliği boyunca oluşan maksimum  $\sigma_x$  değeri  $-119,803 \text{ N/mm}^2$  olarak hesaplanmıştır. D0 kontrol kirişine göre % 77, D1 sayısal kiriş modeline göre %41 değerinde bir gerilme kazanımı sağlamıştır.



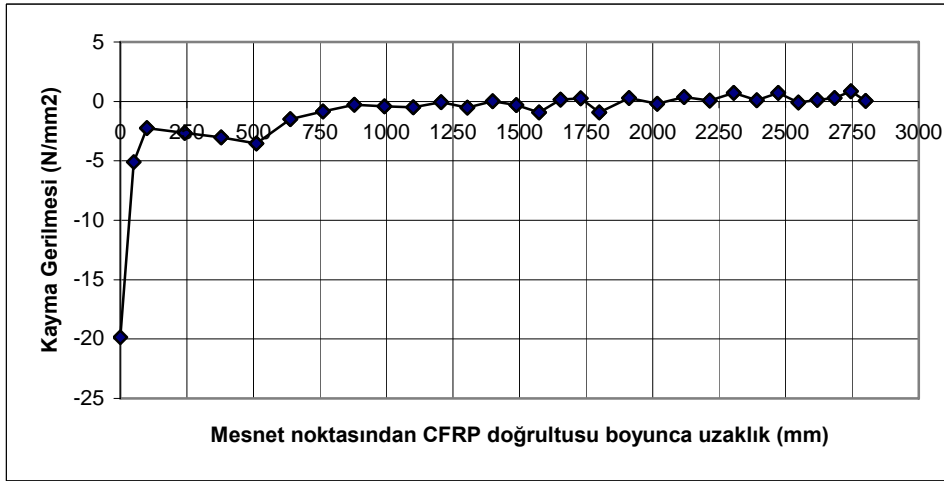
Şekil 5.137. D2 tipi sayısal kiriş modelinde kiriş yüksekliği boyunca oluşan Normal Gerilme ( $\sigma_y$ ) dağılımı

Şekil 5.137 'de D2 tipi sayısal kiriş modelinde uygulanan tekil yük altında kiriş yüksekliği boyunca oluşan normal gerilme( $\sigma_y$ ) değişimi verilmiştir. Analiz sonucunda en büyük  $\sigma_y$  değeri  $-31,14 \text{ N/mm}^2$  olarak hesaplanmıştır. D0 tipi sayısal kiriş modeline göre y doğrultusunda %81 değerinde bir gerilme kazanımı sağlanmıştır.



Şekil 5.138. D2 tipi sayısal kiriş modelinde kiriş yüksekliği boyunca oluşan Kayma Gerilmesi ( $\tau_{xy}$ ) dağılımı

D2 tipi sayısal kiriş modelinde kiriş yüksekliği boyunca oluşan en büyük kayma gerilmesi değeri  $-7,744 \text{ N/mm}^2$  olarak belirlenmiştir. D0 ve D1 tipi kiriş ile karşılaştırıldığına oldukça önemli gerilme azalması oluşmuştur.



Şekil 5.139. D2 tipi sayısal kiriş modelinde mesnet noktasından FRP yüzeyi boyunca oluşan  $\tau_{xy}$  Kayma gerilmesi değişimi grafiği

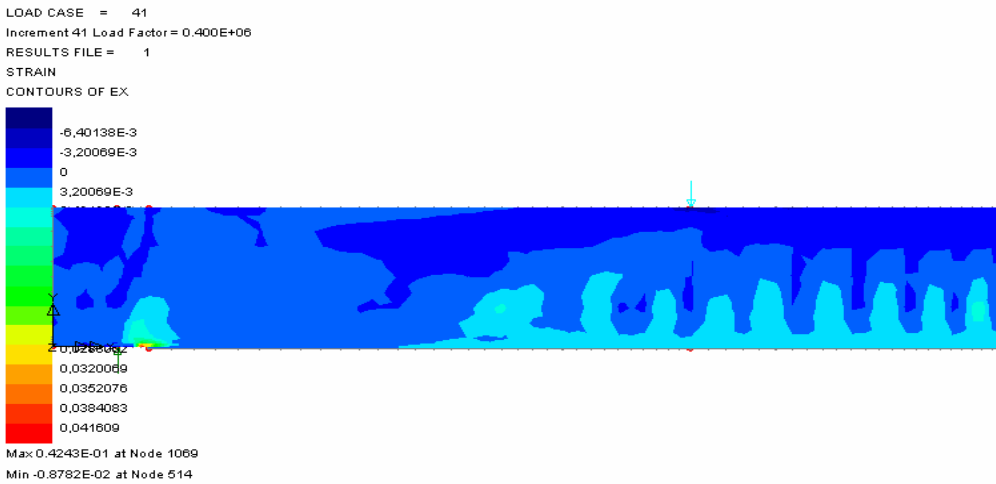
Şekil 5.139'da D2 sayısal kiriş modelinin mesnet noktasından CFRP doğrultusu boyunca oluşan en büyük kayma gerilmesi değeri mesnet noktasında  $-19,849 \text{ N/mm}^2$  ve CFRP plaka bitim noktasında  $-2,250 \text{ N/mm}^2$  olarak hesaplanmıştır.

#### 5.1.4.4. D3 Tipi sayısal kiriş modeli analiz sonuçları



Şekil 5.140. D3 tipi sayısal kiriş modelinde doğrusal olmayan analiz sonucunda kiriş boyunca oluşan Normal Gerilme ( $\sigma_x$ ) değişimi ve güçlendirme bölgesi detayı

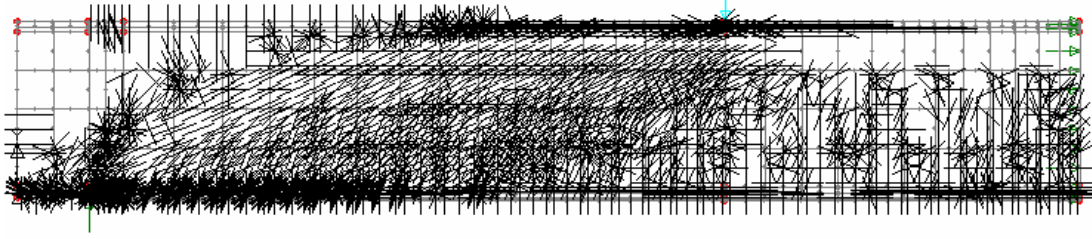
D3 tipi sayısal kiriş modeli yüzeyinde oluşan normal gerilme ( $\sigma_x$ ) dağılımı şekildeki gibi elde edilmiştir. Burada en büyük normal gerilme ( $\sigma_x$ ) tekil yükün uygulandığı noktada oluşmuştur. Güçlendirme bölgesi detayı incelendiğinde betonarme kiriş, epoksi ve CFRP tabakaları arasında tekil yüklemekten doğan normal gerilme değişimleri açıkça görülmektedir. Ayrıca CFRP plaka bitim noktasında önemli gerilme artımı söz konusudur.



Şekil 5.141. D3 tipi sayısal kiriş modelinde meydana gelen birim zorlanma ( $\epsilon_x$ ) değerleri değişimi

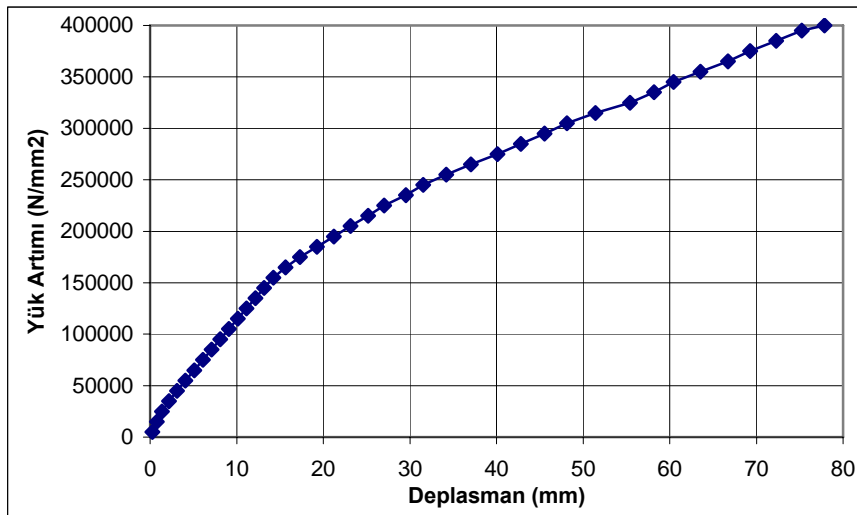
Şekil 5.141. de, D3 tipi sayısal kiriş modelinde gerçekleştirilen doğrusal olmayan analiz sonucu, kiriş yenilme durumuna geldiği anda, bütün kesit boyunca oluşan birim zorlanma ( $\epsilon_x$ ) değerleri ayrıntılı olarak verilmiştir. En büyük zorlanmaların

tekil yükleme noktasından başlayıp mesnet noktasına doğru yayıldığı belirlenmiştir. Bunun yanında, CFRP bitim noktasında önemli gerilme artışları oluşmuştur.



Şekil.5.142. D3 tipi sayısal kiriş modelinde P=400 KN luk yükleme sonucunda oluşan Eğilme ve Kesme çatlakları dağılımı

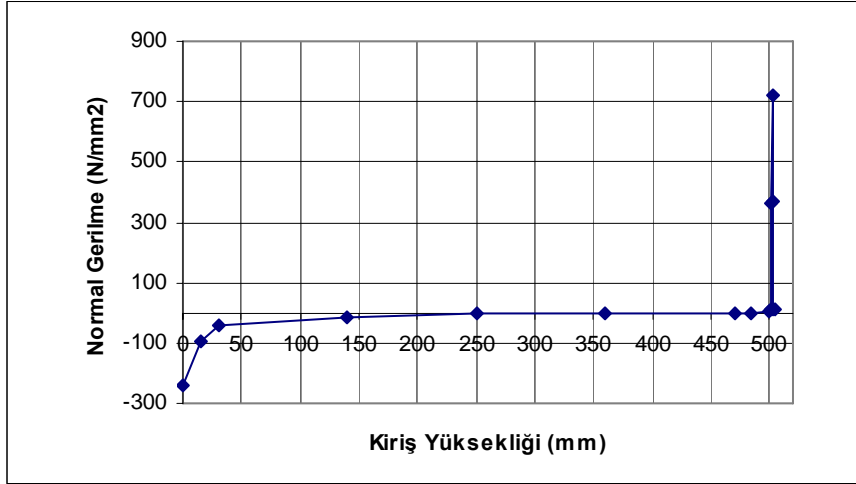
Şekil 5.142. 'de , kiriş tabanına üç kat CFRP plaka yapıştırılması ile elde edilen D3 tipi sayısal kiriş modelinin kirişinin 400 KN yükleme altında, doğrusal olmayan analiz sonucu oluşan kirişin, yenilme durumuna ulaştığı andaki eğilme ve eğik kesme çatlakları görülmektedir. Tekil yük etkime noktasından başlayan ve mesnete doğru yoğunlaşan eğik kesme çatlakları ile yük altında kiriş tabanında yayılan eğilme çatlakları görülmektedir. Mesnet noktası ile CFRP bitiş noktasında eğilme ve çekme çatlaklarının yoğunlaştığı ve burada aşırı zorlanmalar oluştuğu belirlenmiştir.



Şekil 5.143. D3 tipi sayısal kiriş modeli için P=400 KN luk tekil yükleme altında oluşan yük-deplasman değişimi

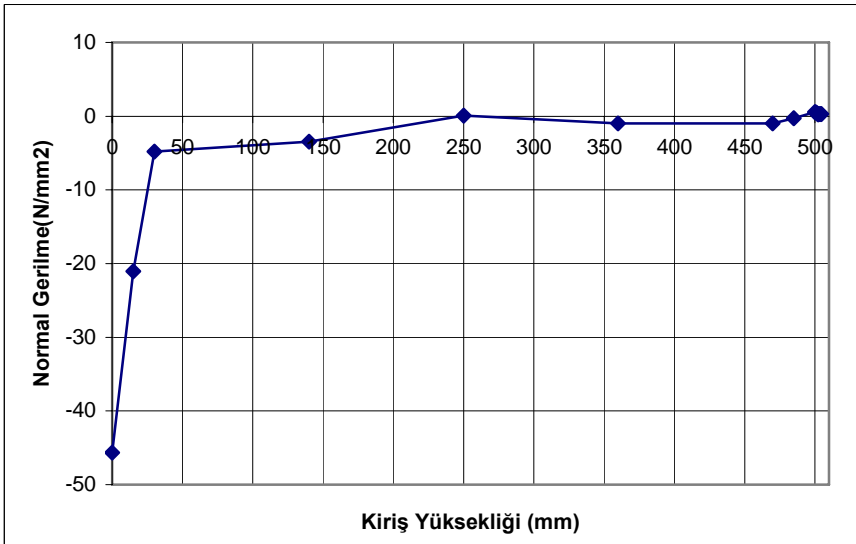
D3 tipi sayısal kiriş modeli üzerine 400 KN luk tekil yük uygulaması durumunda meydana gelen yük artımı-deplasman değişimi grafik olarak verilmiştir. Grafik incelendiğinde yük miktarı 155 KN değerine kadar deplasmanının doğrusal arttığı ve bu değeri karşılık 14,217 mm. deplasman oluştuğu görülmüştür. Bundan sonra kiriş

donatısı akma dayanımına kadar yük taşımaya devam etmiştir. Bu değer aşıldıktan sonra çok büyük deplasmanlara ulaşıldığı görülmüştür. Bu, kirişte yenilme biçiminin oluştuğunu gösterir.



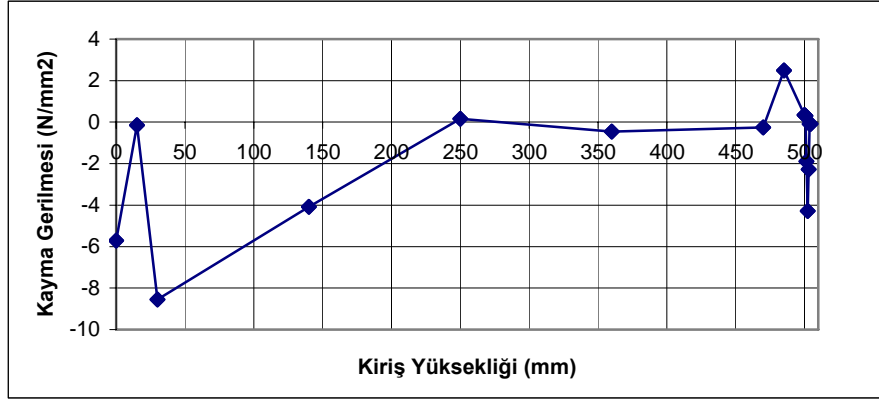
Şekil 5.144. D3 tipi sayısal kiriş modelinde kiriş yüksekliği boyunca oluşan Normal Gerilme ( $\sigma_x$ ) dağılımı

Gerçekleştirilen doğrusal olmayan analiz sonucunda üç kat CFRP kullanılarak hazırlanan D3 tipi sayısal kiriş modelinde tekil yükleme altında kiriş yüksekliği boyunca oluşan maksimum  $\sigma_x$  değeri  $-237,411 \text{ N/mm}^2$  olarak hesaplanmıştır. D0 kontrol kirişine, D1 ve D2 sayısal kiriş modeline göre önemli değerinde bir gerilme kazanımı sağlamıştır.



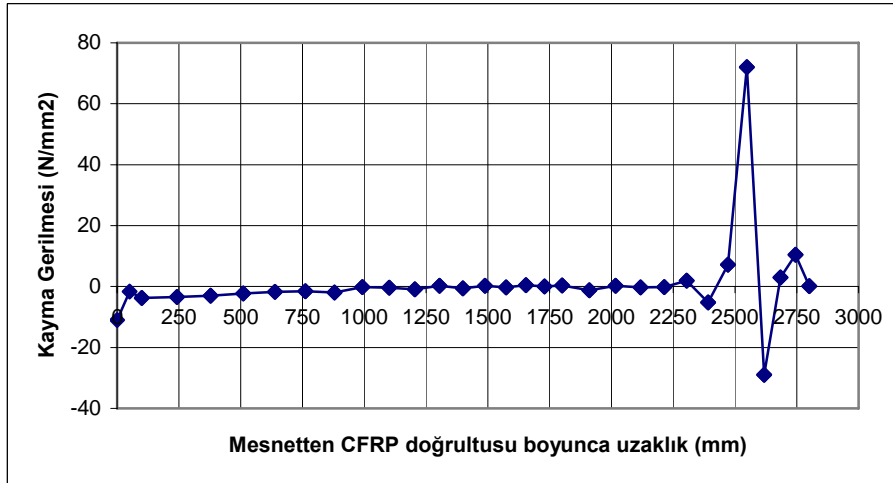
Şekil 5.145. D3 tipi sayısal kiriş modelinde kiriş yüksekliği boyunca oluşan Normal Gerilme ( $\sigma_y$ ) dağılımı

Şekil 5.145 'te D3 tipi sayısal kiriş modelinde uygulanan tekil yük altında kiriş yüksekliği boyunca oluşan normal gerilme( $\sigma_y$ ) değişimi verilmiştir. Analiz sonucunda en büyük  $\sigma_y$  değeri  $-45,626 \text{ N/mm}^2$  olarak hesaplanmıştır.



Şekil 5.146. D3 tipi sayısal kiriş modelinde kiriş yüksekliği boyunca oluşan Kayma Gerilmesi ( $\tau_{xy}$ ) dağılımı

D3 tipi sayısal kiriş modelinde kiriş yüksekliği boyunca oluşan en büyük kayma gerilmesi değeri  $-5,706 \text{ N/mm}^2$  olarak belirlenmiştir. D0 kontrol kirişi, D1 ve D2 tipi sayısal kiriş modelleri ile karşılaştırıldığına oldukça önemli gerilme azalması oluşmuştur.



Şekil 5.147. D3 tipi sayısal kiriş modelinde mesnet noktasından CFRP yüzeyi boyunca oluşan ( $\tau_{xy}$ ) Kayma gerilmesi değişimi grafiği

Şekil 5.147'd3 D3 sayısal kiriş modelinin mesnet noktasından CFRP doğrultusu boyunca oluşan en büyük kayma gerilmesi değeri mesnet noktasında  $-11,021 \text{ N/mm}^2$  ve CFRP plaka bitim noktasında  $-3,780 \text{ N/mm}^2$  olarak hesaplanmıştır.

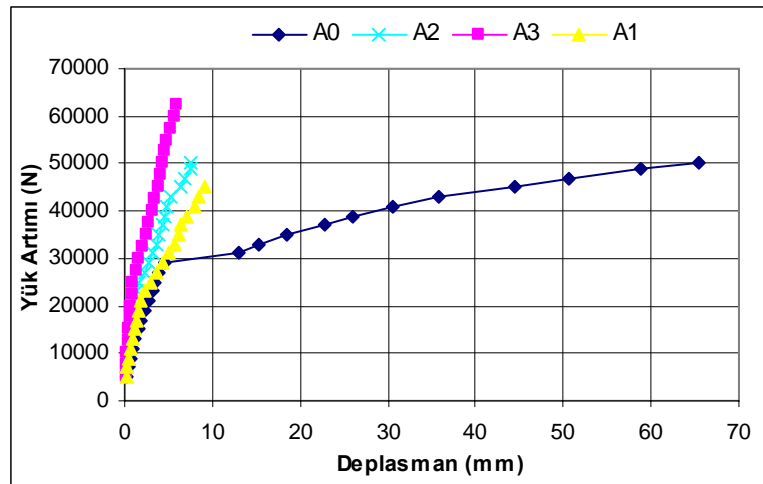


## 5.2 Sayısal Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması

Bu çalışmada, dikdörtgen kesitli betonarme kirişlerin CFRP plaka kullanılarak güçlendirilmesi sonucu oluşan performans değerlendirilmesi yapılmıştır. Çalışmalardan elde edilen sonuçlar aşağıda belirtilmiştir.

### 5.2.1. A tipi sayısal kiriş modelleri analiz sonuçlarının karşılaştırılması

Kiriş kesiti ve boyu en küçük olarak seçilen A tipi sayısal kiriş modeli için hazırlanan (120x200 boyutlarında ve 1500 mm kiriş açıklığına sahip çekme bölgesinde 2 $\phi$ 12 ve basınç bölgesinde 2 $\phi$ 8 donatı bulunan kiriştir) kontrol kirişi(CFRP'siz) ve CFRP'li kiriş modellerinin Yük Artımı-Deplasman grafiği Şekil 5.148 de verilmiştir.



Şekil 5.148 A tipi sayısal kontrol ve CFRP Plakalı kiriş modellerinde oluşan Yük Artımı-deplasman değişimi

Şekil 5.148 'de açıkça görüldüğü gibi, kontrol kiriş olan A0 tipi sayısal kiriş modeli tekil yükleme altında 29 KN'a kadar yük artımı-deplasman değişiminde doğrusal bir artım göstermektedir. CFRP kullanılarak güçlendirilen A1, A2 ve A3 kirişlerde de bu değere kadar aynı doğrusallık görülmektedir. Ancak bu değerden sonra A0 kirişinde deplasman değerleri hızlı bir artıma gitmiştir. Yük değeri 50 KN'a geldiği anda deplasmanın 65,41 mm. değerine ulaştığı belirlenmiştir. Bu da sonuç olarak 29 KN dan sonra deformasyonların başladığını ve çatlak ve kırılmaların hızla artarak yenilmenin oluştuğunu göstermektedir. Güçlendirilmiş kirişlerimiz olan A1,A2 ve A3 sayısal kiriş modellerinde ise yük artımı devam etmesine rağmen deplasmanda

ani sıçramalar görülmektedir. Bu da CFRP plaka kullanılarak gerçekleştirilen güçlendirme sonucunda A tipi sayısal kiriş modellerinde Yük taşıma kapasitesinde önemli artımlar sağladığını göstermektedir.

Aşağıdaki tabloda A tipi kiriş modellerinde yük değerlerine karşı gelen deplasman değerleri verilmiştir.

Tablo 5.15 A tipi sayısal kiriş modelleri için kritik yük ve deplasman değerleri

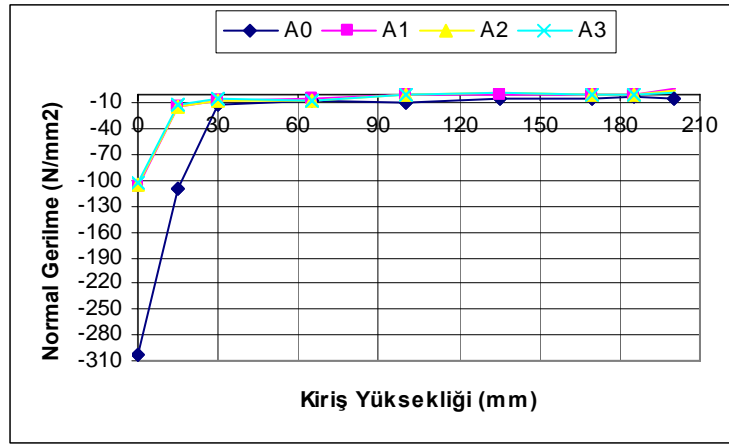
A Tipi Kiriş Modeli	Deplasman (mm)	
	P=30 KN	P=50 KN
A0	4.53	65.411
A1	4.332	10.254
A2	2.664	7.563
A3	1.869	4.315

A tipi sayısal kiriş modelimiz küçük kesitli (120x200mm) olduğundan CFRP plaka ile güçlendirilmesi sonrasında plaka kalınlıklarını da bağlı olarak yüksek yük taşıma kapasitesine ulaşmaktadır. Bu durumda kontrol kirişi olan A0 tipi kirişinin taşıma kapasitesinin de üzerinde bir performans artımı getirmektedir. Bu da bu kesitteki bir kiriş için ani (gevrek) kırılmaya neden olabilir.

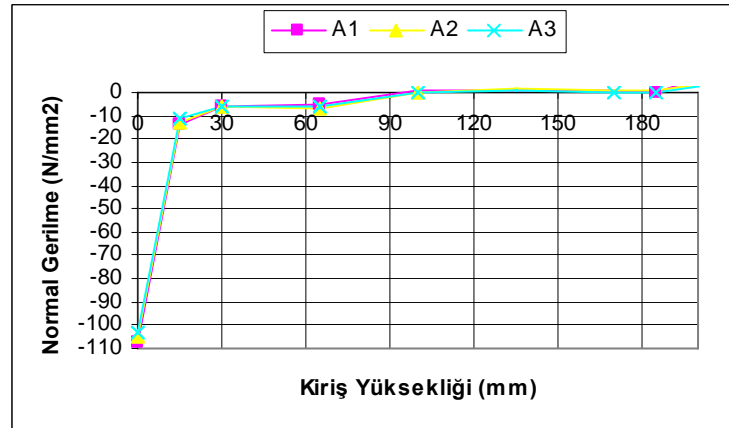
A tipi kirişlerin kiriş modellerinde kiriş yüksekliği boyunca oluşan normal gerilme ( $\sigma_x$ ) değişimi irdelendiğinde CFRP plakalı sistemlerin gerilmelerde önemli azalmalar kazandırdığı görülmektedir. Aşağıdaki tabloda A tipi kiriş modellerinde Normal Gerilme ( $\sigma_x$ ) değerleri verilmiştir. En büyük normal gerilme değeri tekil kuvvetin uygulandığı noktada meydana gelmektedir. Ancak CFRP li sistemlerde ise kalınlık değişimlerinin normal gerilme değerindeki azalmaları birbirine yaklaşık sonuçlar vermektedir.

Tablo 5.16. A Tipi Sayısal Kiriş Modellerinde Normal Gerilme ( $\sigma_x$ ) değişimi

A tipi Kiriş Modelleri	Normal Gerilme (N/mm <sup>2</sup> )
A0	-302,196
A1	-107,1
A2	-104,806
A3	-103,532



Şekil 5.149. A tipi kiriş modellerinde oluşan Normal Gerilme ( $\sigma_x$ ) değerleri değişimi



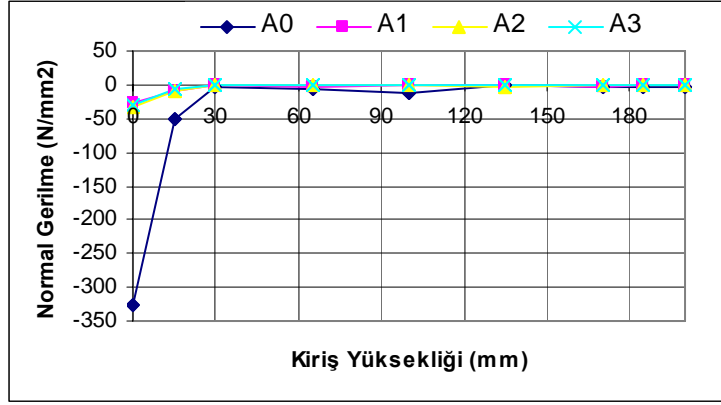
Şekil 5.150. A tipi kiriş modellerinde CFRP plakalı modellerde oluşan Normal Gerilme ( $\sigma_x$ ) değerleri değişimi

A tipi kirişlerin kiriş modellerinde kiriş yüksekliği boyunca oluşan normal gerilme ( $\sigma_y$ ) değişimi irdelendiğinde CFRP plakalı sistemlerin gerilmelerde önemli azalmalar kazandırdığı görülmektedir. Aşağıdaki tabloda A tipi kiriş modellerinde Normal Gerilme ( $\sigma_y$ ) değerleri verilmiştir. Ancak CFRP li sistemlerde ise kalınlık değişimlerinin normal gerilme değerindeki azalmaları birbirine yaklaşık sonuçlar vermektedir.

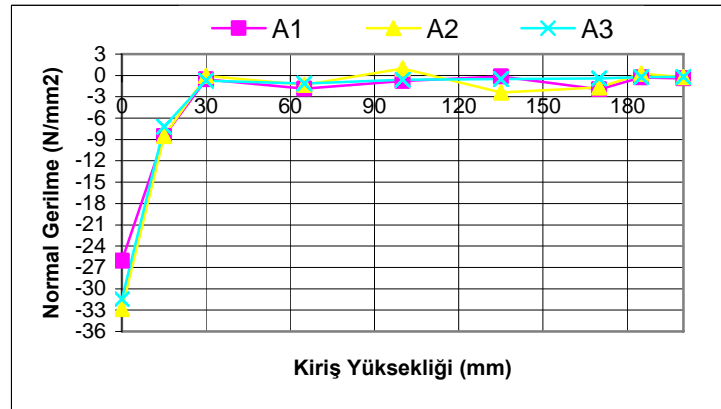
Tablo 5.17. A Tipi Sayısal Kiriş Modellerinde Normal Gerilme ( $\sigma_y$ ) değişimi

A tipi Kiriş Modelleri	Normal Gerilme (N/mm <sup>2</sup> )
A0	-302,196
A1	-43,367
A2	-32,87
A3	-31,478

Şekil 5.151 de 100 KN'luk tekil yükleme altında doğrusal olmayan analiz sonucunda A tipi sayısal kiriş modelleri için kiriş yüksekliği boyunca oluşan Normal gerilme ( $\sigma_y$ ) değerleri verilmiştir. En büyük normal gerilme değerleri tekil yükün uygulandığı noktada oluşmaktadır.



Şekil 5.151. A tipi kiriş modellerinde oluşan Normal Gerilme ( $\sigma_y$ ) değerleri değişimi

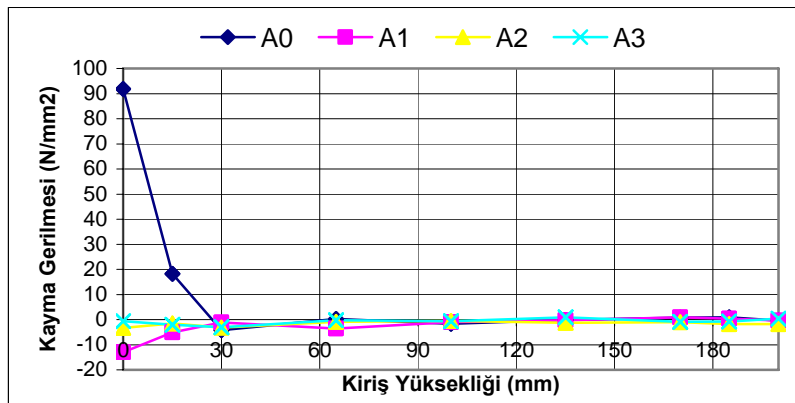


Şekil 5.152. A tipi sayısal kiriş modelinde sadece CFRP plakalı modellerde kiriş yüksekliği boyunca oluşan Normal Gerilme ( $\sigma_y$ ) değerleri değişimi

A tipi kiriş modelinde tekil yükün uygulandığı noktadan itibaren kiriş yüksekliği boyunca meydana gelen kayma gerilmesi ( $\tau_{xy}$ ) değişimi irdelendiğinde güçlendirme sisteminin önemli katkı yaptığı görülmektedir.

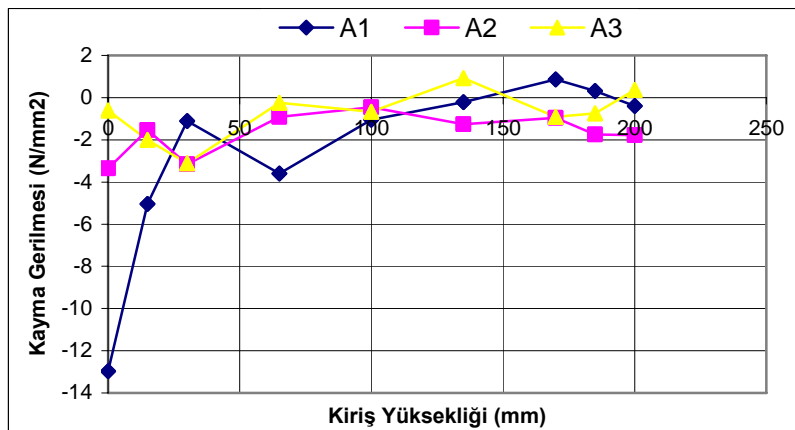
Tablo 5.18. A tipi sayısal kiriş modellerinde Kayma Gerilmesi ( $\tau_{xy}$ ) değişimi

A tipi Kiriş Modelleri	Kayma Gerilmesi (N/mm <sup>2</sup> )
A0	+91,826
A1	-13,723
A2	-3,349
A3	-0,613



Şekil 5.153. A tipi kiriş modellerinde oluşan Kayma Gerilme ( $\tau_{xy}$ ) değerleri değişimi

Sadece CFRP plakalı sistemlerin kiriş yüksekliği boyunca kayma gerilmesi değişimine etkisi incelendiğinde plaka katmanları sayısının değişiminin katkısı açıkça görülmektedir. Uygulamada tek kat CFRP kullanılmış olarak hazırlanan A1 tipi sayısal kiriş modelinde  $\tau_{xy}$  değeri  $-13,723 \text{ N/mm}^2$ , iki katlı CFRP modeli A2 tipi kiriş modelinde  $-3,35 \text{ N/mm}^2$ 'ye ve üç katlı CFRP kullanılmış A3 tipi kiriş modelinde  $-0,61 \text{ N/mm}^2$  değerine azalmaktadır.

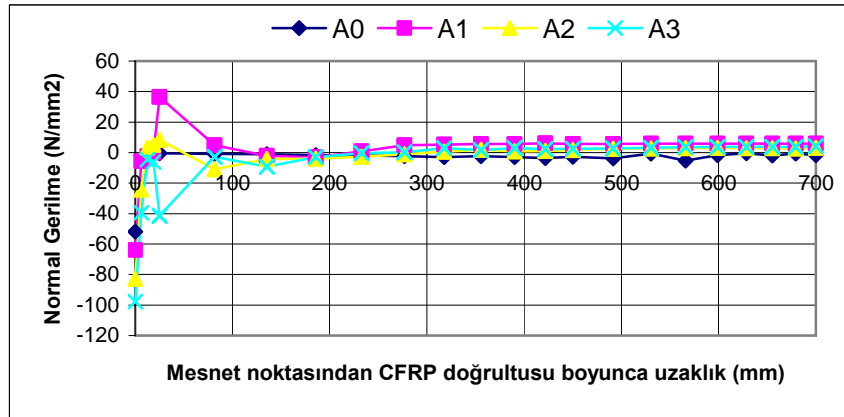


Şekil 5.154. A tipi modellerinde CFRP'li kiriş modellerinin Kayma Gerilme ( $\tau_{xy}$ ) değerleri değişimi

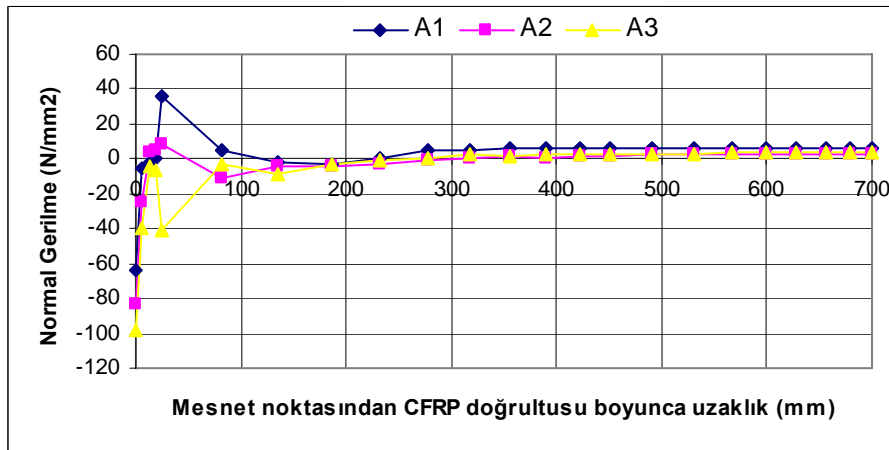
CFRP plaka uygulanan yüzeydeki normal gerilmelerin ( $\sigma_x$ ) belirlenmesi için mesnet noktasından itibaren CFRP doğrultusu boyunca normal gerilmesi değişimi irdelenmiştir.

Tablo 5.19. A tipi sayısal kiriş modelinde mesnet ve CFRP bitim noktasındaki normal gerilmesi ( $\sigma_x$ ) değişimi

A tipi Kiriş Modelleri	Normal Gerilme (N/mm <sup>2</sup> ) ( $\sigma_x$ -Mesnette)	Normal Gerilme (N/mm <sup>2</sup> ) ( $\sigma_x$ -CFRP bitim noktasında)
A0	-51,798	-0,344
A1	-64,885	+36,459
A2	-82,768	+8,41
A3	-97,854	-41,356



Şekil 5.155. A tipi kiriş modellerinde mesnet noktasından CFRP doğrultusu boyunca oluşan Normal Gerilme ( $\sigma_x$ ) değerleri değişimi

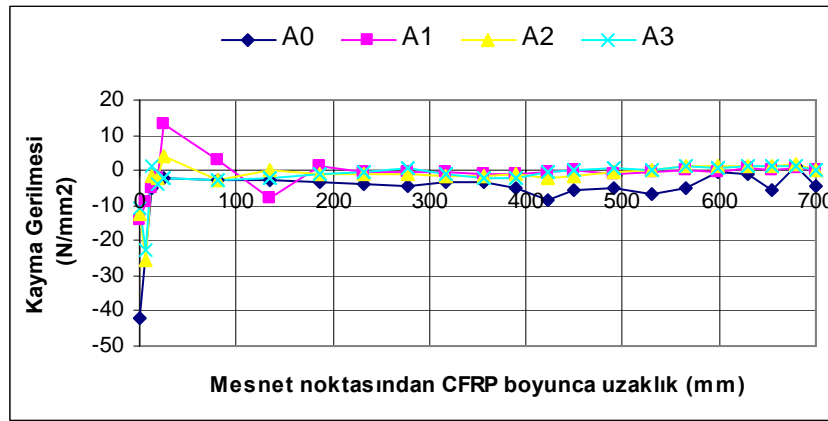


Şekil 5.156. A tipi kiriş modellerinde CFRP tabaka sayısının değişiminin CFRP doğrultusu boyunca Normal Gerilme ( $\sigma_x$ ) değerlerine etkisi

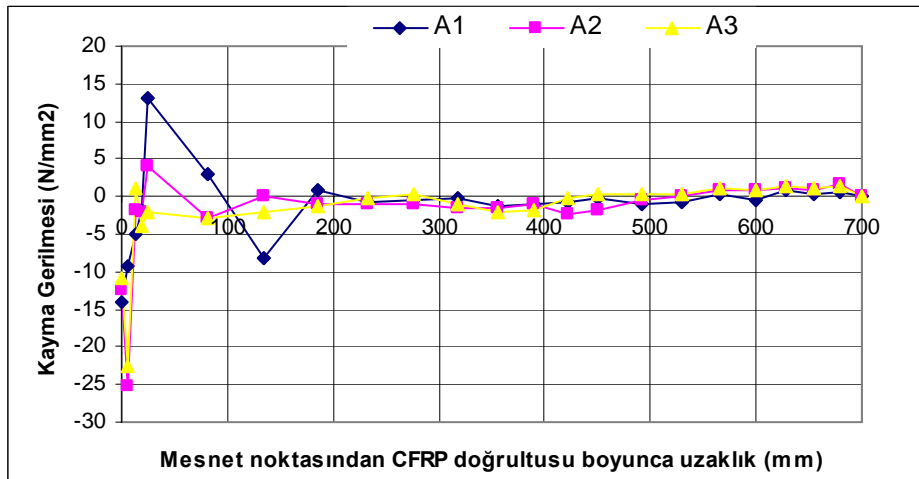
CFRP plaka uygulanan yüzeydeki kayma gerilmelerinin belirlenmesi için mesnet noktasından itibaren CFRP doğrultusu boyunca kayma gerilmesi değişimi irdelenmiştir.

Tablo 5.20. A tipi sayısal kiriş modelinde mesnet ve CFRP bitim noktasındaki kayma gerilmesi ( $\tau_{xy}$ ) değişimi

A tipi Kiriş Modelleri	Kayma Gerilmesi (N/mm <sup>2</sup> ) (Mesnette)	Kayma Gerilmesi (N/mm <sup>2</sup> ) (CFRP Bitim noktasında)
A0	-42,277	-2,557
A1	-13,92	+13,105
A2	-12,349	+4,101
A3	-10,883	-2,057



Şekil 5.157. A tipi kiriş modellerinde oluşan mesnet noktasından FRP doğrultusu boyunca Kayma Gerilme ( $\tau_{xy}$ ) değerleri değişimi



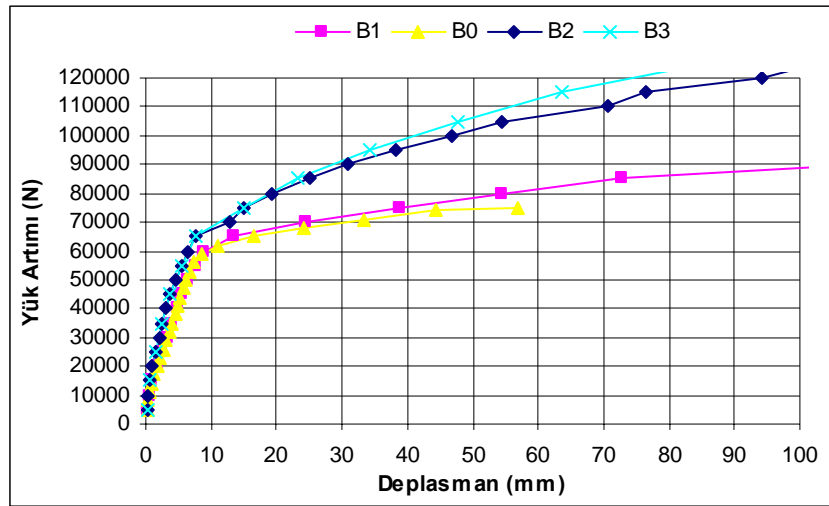
Şekil 5.158. A tipi kiriş modellerinde oluşan mesnet noktasından FRP doğrultusu boyunca Kayma Gerilme ( $\tau_{xy}$ ) değerleri değişimi

Kirişin alt yüzeyine CFRP plaka kullanılarak güçlendirilen betonarme kiriş için hazırlanan sayısal analiz modeli ile gerçekleştirilen doğrusal olmayan analiz

sonucunda kirişte oluşabilecek çatlak mekanizması ve yenilme biçimi EK1 de şekil olarak ortaya konulmuştur. Şekiller incelendiğinde yenilme biçimine çekme çatlakları ve mesnet bölgesinde yoğunlaşan eğilme kesme çatlaklarından dolayı CFRP bitiş noktasından itibaren ayrışması şeklinde oluşacak olan durum hakim olacaktır. Ayrıca yükleme uygulanan noktada beton bölgesinin parçalanarak yenilme oluşabilecektir.

### 5.2.2 B tipi Sayısal Kiriş Modelleri Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması

B tipi sayısal kiriş modeli 200x300 boyutlarında ve 3000 mm kiriş açıklığına sahip olup çekme bölgesinde 3 $\phi$ 16 ve basınç bölgesinde 2 $\phi$ 10 donatı bulunan kiriştir. Hazırlanan kontrol kirişi(CFRP'siz) ve CFRP'li kiriş modellerinin 200 KN' luk tekil yükleme altında oluşan Yük Artımı-Deplasman grafiği Şekil 6.7 de verilmiştir.



Şekil 5.159. B tipi sayısal kontrol ve CFRP Plakalı kiriş modellerinde oluşan Yük Artımı-deplasman değişimi

Şekil 5.159 'da bütün B tipi sayısal kiriş modellerinde tekil yükleme altında 60 KN değerine ulaşıncaya kadar yük artımı-deplasman değişiminde doğrusal bir artım görülmektedir. CFRP kullanılarak güçlendirilen Ancak bu değer üzerindeki yüklemelerden sonra B0 tipi sayısal kiriş modelinde yük taşıma miktarında düşük bir artıma karşılık deplasman değerlerinde hızlı bir yükseliş belirlenmiştir. Bu kirişte çatlakların önemli miktarda artarak yenilmenin (göçme) oluştuğunu göstermektedir. CFRP kiriş modellerinde ise yük taşıma kapasitelerindeki artışa karşılık deplasman



değerlerinde hızlı bir artıma oluşmuştur. Bu da CFRP plaka kullanılarak gerçekleştirilen güçlendirme sonucunda B tipi sayısal kiriş modellerinde yük taşıma kapasitesinde önemli artımlar sağladığını göstermektedir.

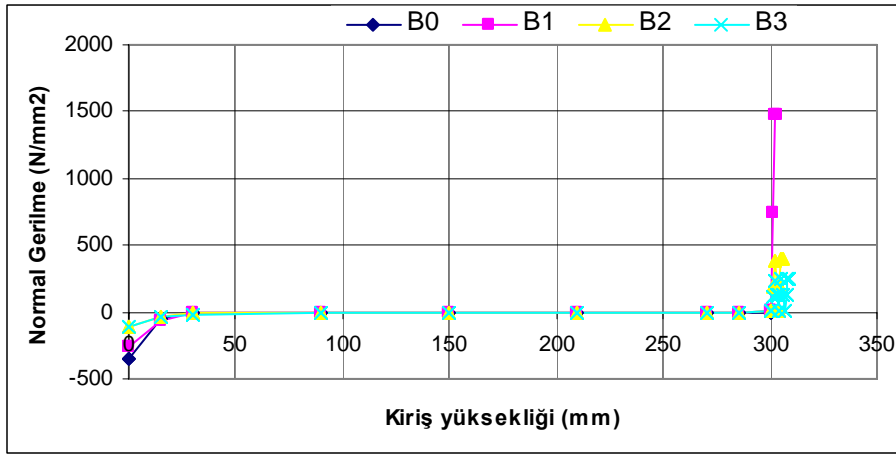
Tablo 5.21. B tipi sayısal kiriş modelleri için kritik yük ve deplasman değerleri

B Tipi Kiriş Modeli	Deplasman (mm)	
	P=60 KN	P=85 KN
B0	8.734	87.231
B1	8,452	72.811
B2	6.398	25.061
B3	5.395	20.315

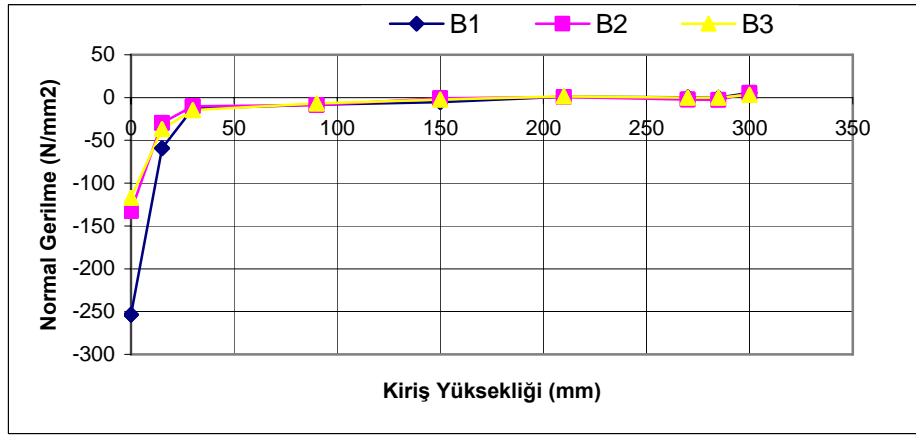
B tipi kirişlerin kiriş modellerinde kiriş yüksekliği boyunca oluşan normal gerilme ( $\sigma_x$ ) değişimi irdelendiğinde CFRP plakalı sistemlerin gerilmelerde önemli azalmalar kazandırdığı görülmektedir. Aşağıdaki tablo 5.22. de B tipi kiriş modellerinde tekil yükün altında kiriş yüksekliği boyunca oluşan Normal Gerilme ( $\sigma_x$ ) değerleri verilmiştir. En büyük normal gerilme değeri tekil kuvvetin uygulandığı noktada meydana gelmektedir. Ancak CFRP li sistemlerde ise kat sayısı değişimlerinin normal gerilme değerindeki azalmalara önemli etki yaptığı görülmektedir.

Tablo 5.22. B Tipi Sayısal Kiriş Modellerinde Normal Gerilme ( $\sigma_x$ ) değerleri değişimi

B tipi kiriş modelleri	Normal Gerilme (N/mm <sup>2</sup> )
B0	-351,482
B1	-253,522
B2	-132,641
B3	-117,012

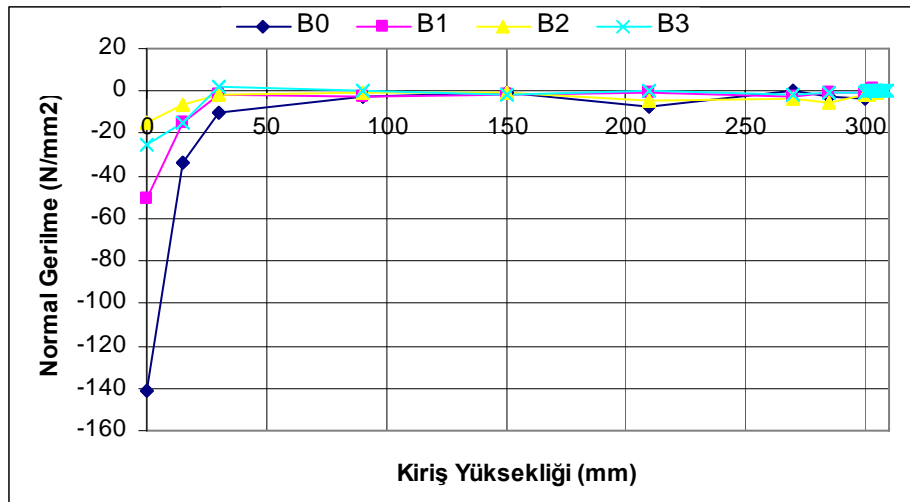


Şekil 5.160. B tipi kiriş modellerinde oluşan Normal Gerilme ( $\sigma_x$ ) değerleri değişimi



Şekil 5.161. B tipi kiriş CFRP li modellerde kiriş yüksekliği boyunca oluşan Normal Gerilme ( $\sigma_x$ ) değerleri değişimi

B tipi kirişlerin kiriş modellerinde kiriş yüksekliği boyunca oluşan normal gerilme ( $\sigma_y$ ) değişimi irdelendiğinde CFRP plakalı sistemlerin gerilmelerde önemli azalmalar kazandırdığı görülmektedir. Aşağıdaki tabloda B tipi kiriş modellerinde Normal Gerilme ( $\sigma_y$ ) değerleri verilmiştir. Şekil 5.163.'te CFRP li sistemlerde ise kat sayısı değişimlerinin normal gerilme değerindeki azalmaları birbirine yaklaşık sonuçlar vermektedir.

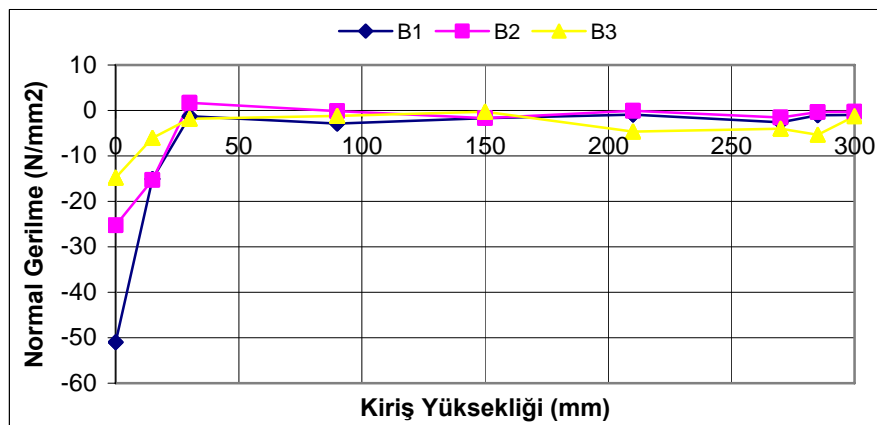


Şekil 5.162 B tipi kiriş modellerinde oluşan normal gerilme ( $\sigma_y$ ) değerleri değişimi

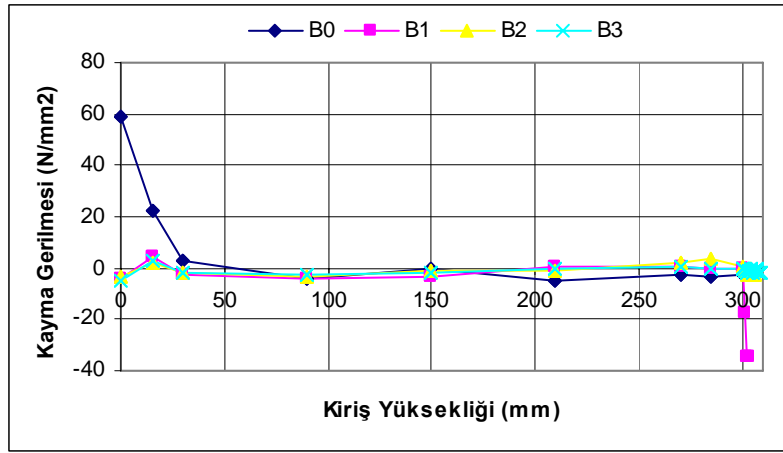
Tablo 5.23 de CFRP'li B tipi sayısal kiriş modellerine plaka kat sayıları değişimin uygulanan tekil yükten itibaren kiriş yüksekliği boyunca normal gerilme ( $\sigma_y$ ) değişimi verilmiştir.

Tablo 5.23. B Tipi Sayısal Kiriş Modellerinde Normal Gerilme ( $\sigma_y$ ) değerleri değişimi

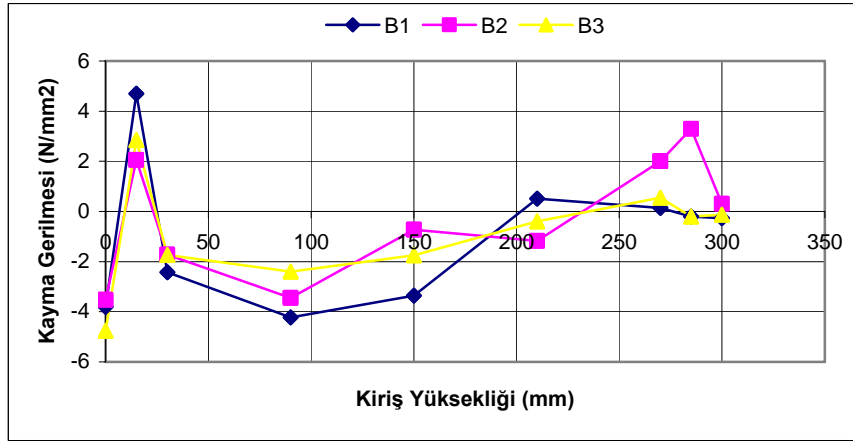
B tipi kiriş modelleri	Normal Gerilme (N/mm <sup>2</sup> )
B0	-141,096
B1	-50,968
B2	-25,263
B3	-14,779



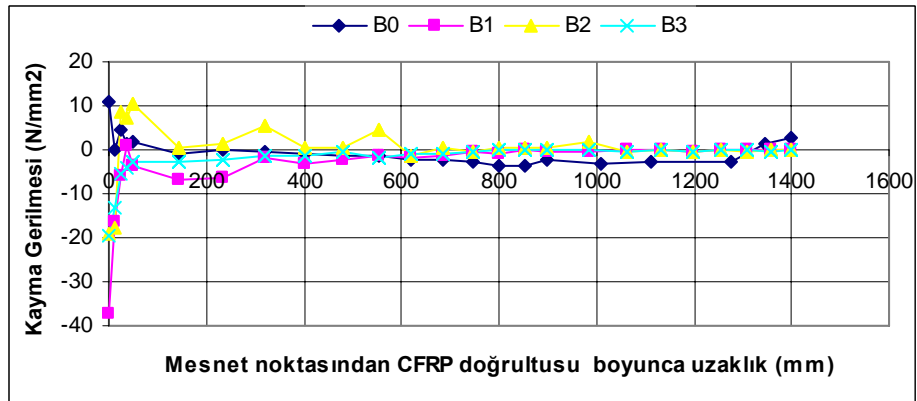
Şekil 5.163. B tipi kiriş CFRP li modellerde kiriş yüksekliği boyunca oluşan Normal Gerilme ( $\sigma_y$ ) değerleri değişimi



Şekil 5.164. B tipi kiriş modellerinde kiriş yüksekliği boyunca oluşan Kayma Gerilmesi ( $\tau_{xy}$ ) değerleri değişimi



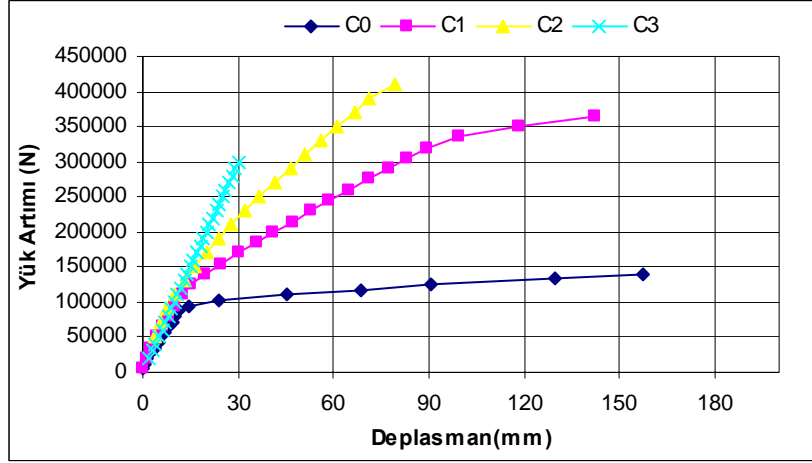
Şekil 5.165. CFRP'li B tipi kiriş modellerinde kiriş yüksekliği boyunca oluşan Kayma Gerilmesi ( $\tau_{xy}$ ) değerleri değişimi



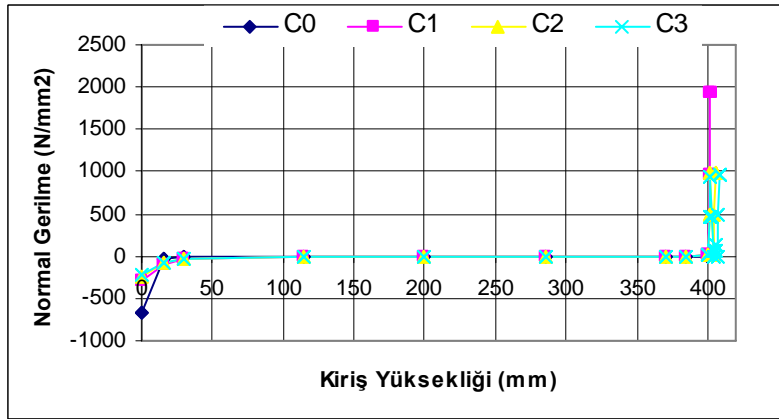
Şekil 5.166 B tipi kiriş modellerinde oluşan mesnet noktasından FRP doğrultusu boyunca Kayma Gerilme ( $\tau_{xy}$ ) değerleri değişimi

### 5.2.3 C tipi Sayısal Kiriş Modeli Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması

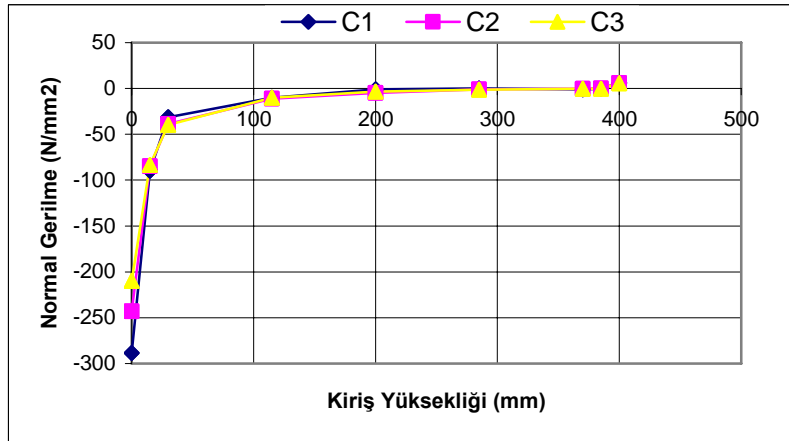
C tipi betonarme kiriş modeli 250x400 boyutlarında ve 4500 mm kiriş açıklığına sahip çekme bölgesinde 4 $\phi$ 18 ve basınç bölgesinde 2 $\phi$ 10 donatı bulunan kiriştir.



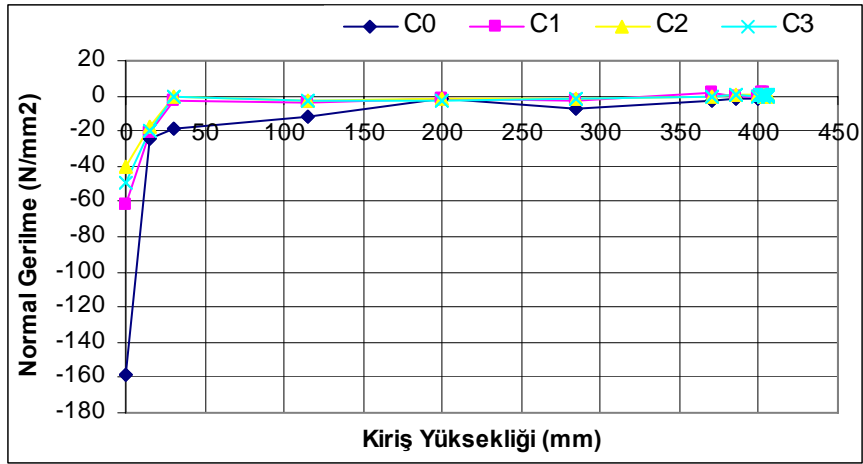
Şekil 5.167. C tipi sayısal kontrol ve CFRP Plakalı kiriş modellerinde oluşan Yük\_deplasman değişimi



Şekil 5.168. C tipi kiriş modellerinde kiriş yüksekliği boyunca oluşan Normal Gerilme ( $\sigma_x$ ) değerleri değişimi



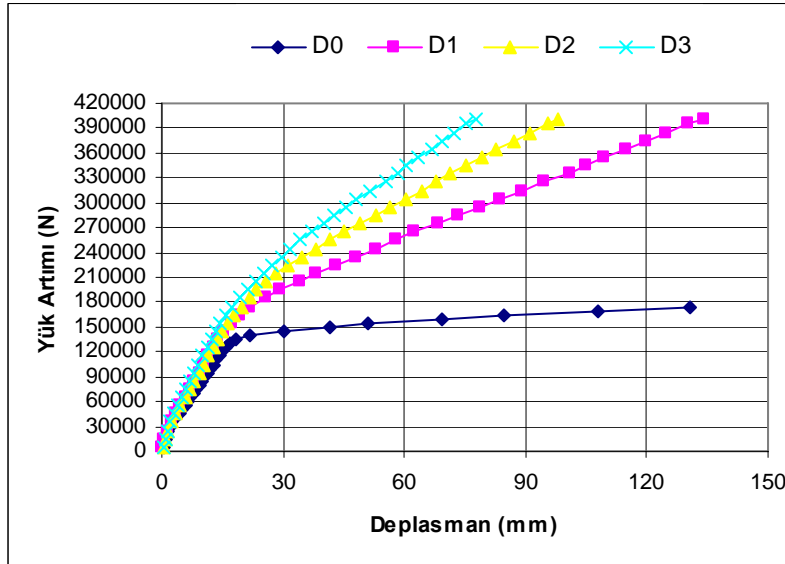
Şekil 5.169. C tipi kiriş modellerinde kiriş yüksekliği boyunca oluşan Normal Gerilme ( $\sigma_y$ ) değerleri değişimi



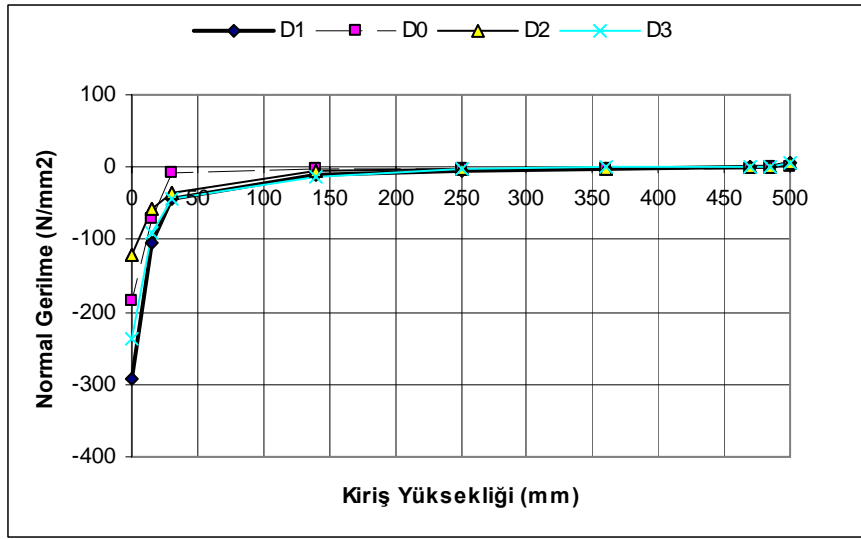
Şekil 5.170. C tipi kiriş modellerinde kiriş yüksekliği boyunca oluşan Kayma Gerilmesi ( $\tau_{xy}$ ) değerleri değişimi

#### 5.2.4 D tipi Sayısal Kiriş Modeli Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması

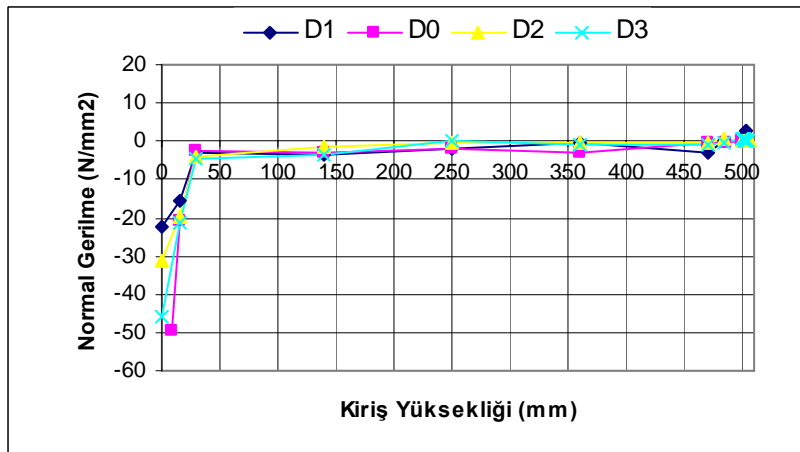
Kiriş kesiti ve boyu en büyük olarak seçilen D tipi sayısal kiriş modeli için hazırlanan (300x500 boyutlarında ve 6000 mm kiriş açıklığına sahip çekme bölgesinde 5 $\phi$ 20 ve basınç bölgesinde 2 $\phi$ 12 donatı bulunan kiriştir.) kontrol kirişi(CFRP'siz) ve CFRP'li kiriş modellerinin Yük Artımı-Deplasman grafiği Şekil 6.4 de verilmiştir.



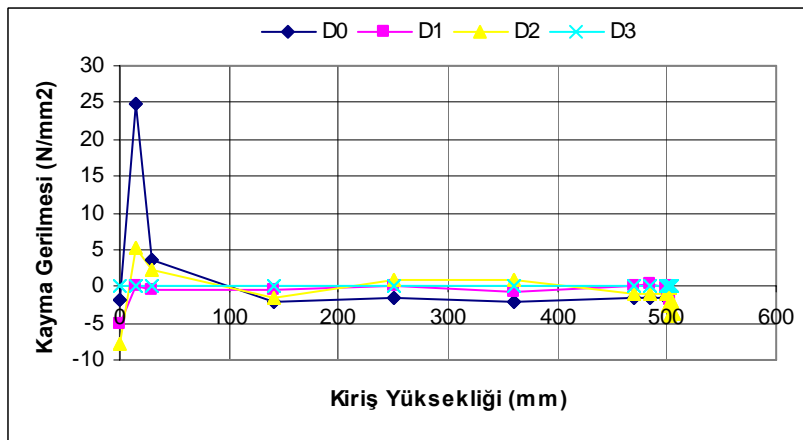
Şekil 5.171. D tipi sayısal kontrol ve CFRP Plakalı kiriş modellerinde P=400 KN'luk tekil yük altında oluşan Yük\_deplasman değişimi



Şekil 5.172. D tipi kiriş modellerinde kiriş yüksekliği boyunca oluşan Normal Gerilme ( $\sigma_x$ ) değerleri değişimi



Şekil 5.173 D tipi kiriş modellerinde kiriş yüksekliği boyunca oluşan Normal Gerilme ( $\sigma_y$ ) değerleri değişimi

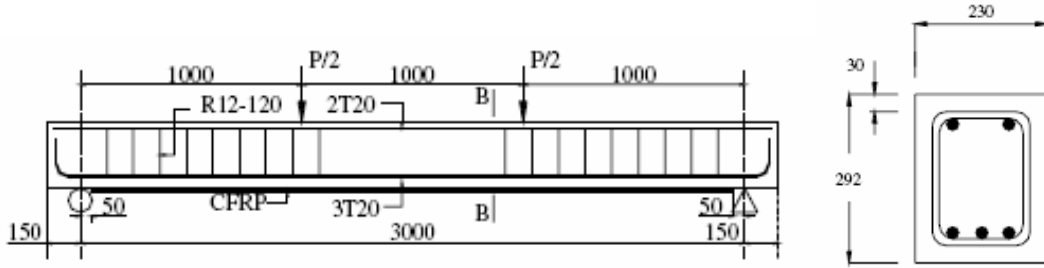


Şekil 5.174. D tipi kiriş modellerinde kiriş yüksekliği boyunca oluşan Kayma Gerilmesi ( $\tau_{xy}$ ) değerleri değişimi

## BÖLÜM 6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

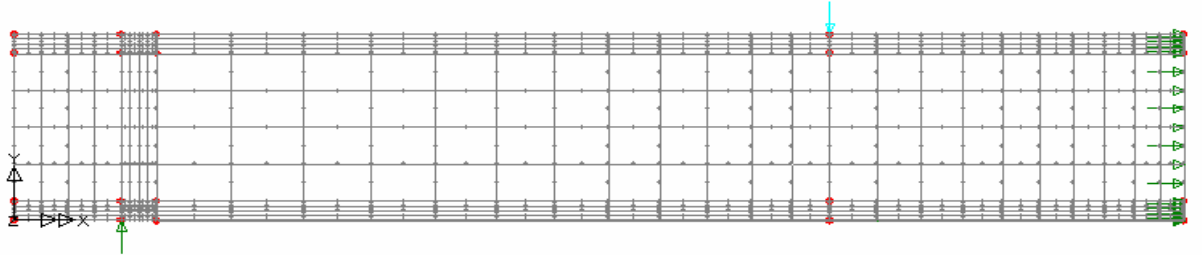
### 6.1. Sayısal Analiz Modeli Sonuçları İle Deneysel Sonuçların Karşılaştırılması

Bu bölümde, M. Maalej ve K.S.Leong tarafından gerçekleştirilen deneysel çalışma sonuçları ile sayısal analiz modeli ile hazırlanan model sonuçları karşılaştırılmıştır(22). Deneysel çalışmada kullanılan kiriş modelinin en ve boy kesiti ile içindeki donatı durumu aşağıdaki şekilde gösterilmiştir.



Şekil 6.1 Deneysel çalışma modeli en ve boy kesiti

Sayısal analiz modeli olarak çözümü hazırlanan deneysel çalışmanın sonlu elemanlar ağı aşağıdaki şekilde verilmiştir.

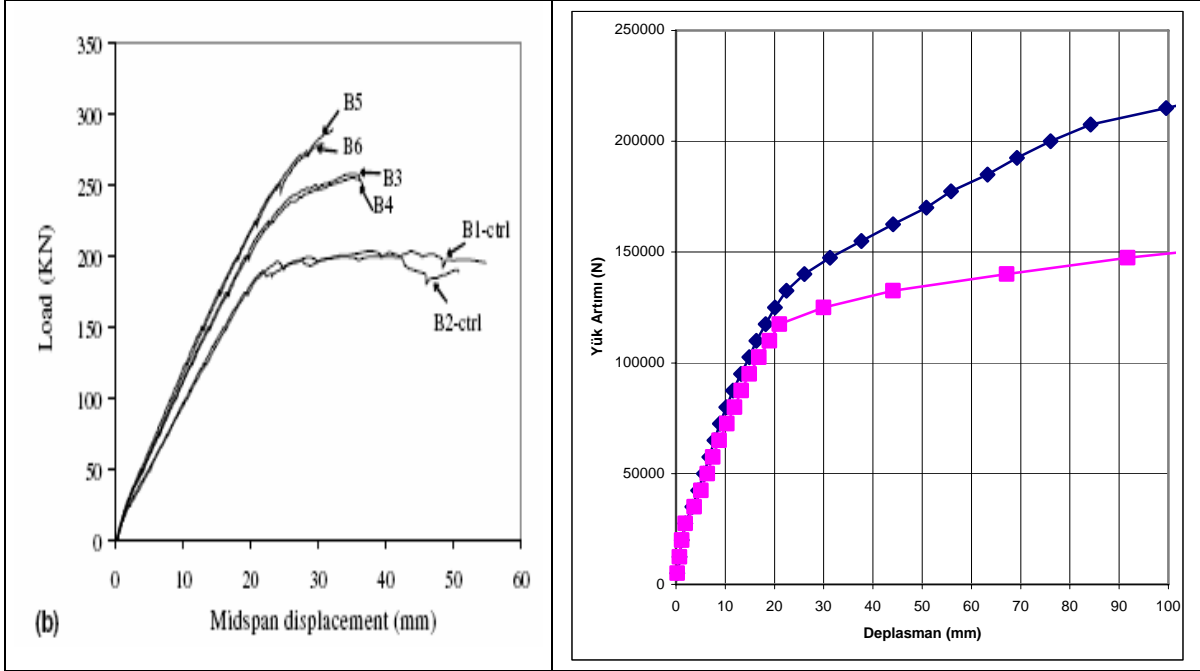


Şekil 6.2. Sonlu elemanlar ağı ve mesnetleme durumu

Deneysel çalışmada hazırlanan modelde beton basınç dayanımı 39,8 MPa ve Elastisite modülü 27 GPa ve poisson oranı ise  $\nu=0.2$  olarak verilmiştir. Çekme ve basınç bölgesinde kullanılan donatı için akma dayanımı 544 MPa ve elastisite modülü 183 GPa seçilmiştir. CFRP yi betonarme kirişe yapıştırmakta kullanılan epoksi reçinesini kalınlığı 0,636 mm, elastisite modülü 1824 MPa verilmiştir. CFRP malzemesinin kalınlığı 0,165 mm, çekme dayanımı 3550 MPa ve elastisite modülü 235 GPa olarak kullanılmıştır.



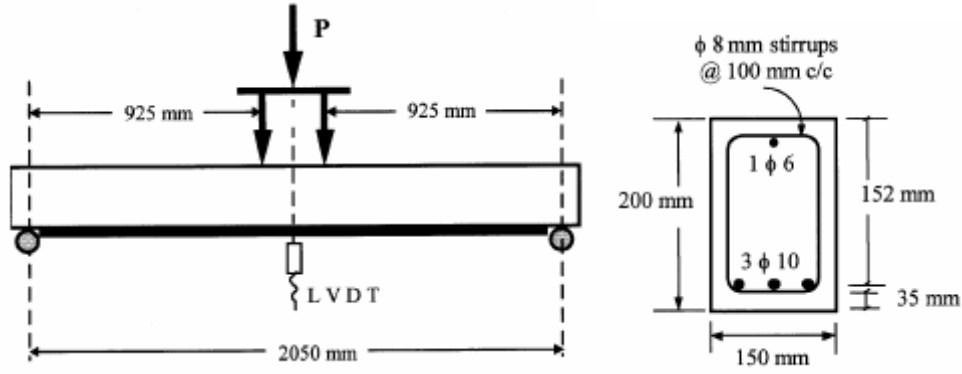
Aşağıdaki şekilde, Doğrusal olmayan analiz sonucunda kiriş orta bölgesinde meydana gelen yük artımı- deplasman grafiği verilmiştir.



Şekil 6.3. Deneysel çalışmada B1 ve B3 modellerine ait Yük Artımı\_ deplasman değişimi karşılaştırılması

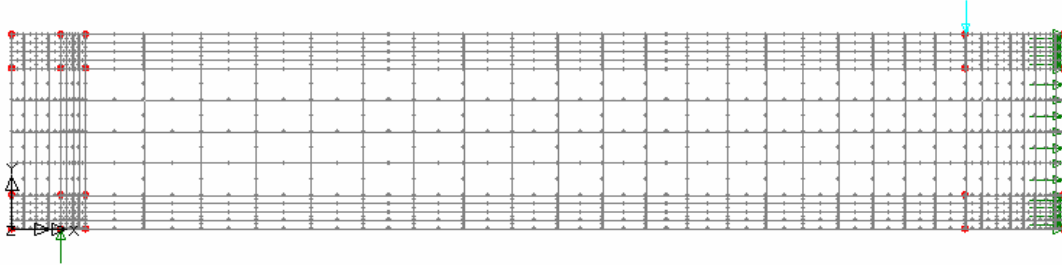
Deneysel çalışmada etriyenin eğilme ve kesme dayanımına katkısı bulunmaktadır. Sayısal analiz modelinde bu değerler göz ardı edilmiştir. Doğrusal olmayan analiz iterasyonlarındaki yakınsaklık, deneysel çalışmada oluşabilecek hata ve davranış hassasiyeti de göz önüne alındığında gerçek davranışı temsil edebilecek sonuçlar elde edildiği görülecektir.

İkinci deneysel çalışmasında ,Tarek H. ALMUSSALEM v.d. (18) tarafından gerçekleştirilen deneysel çalışma sonuçları ile sayısal analiz modeli ile çözümlenmeden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.



Şekil 6.4. Deneysel analiz modeli yükleme durumu ve en kesiti

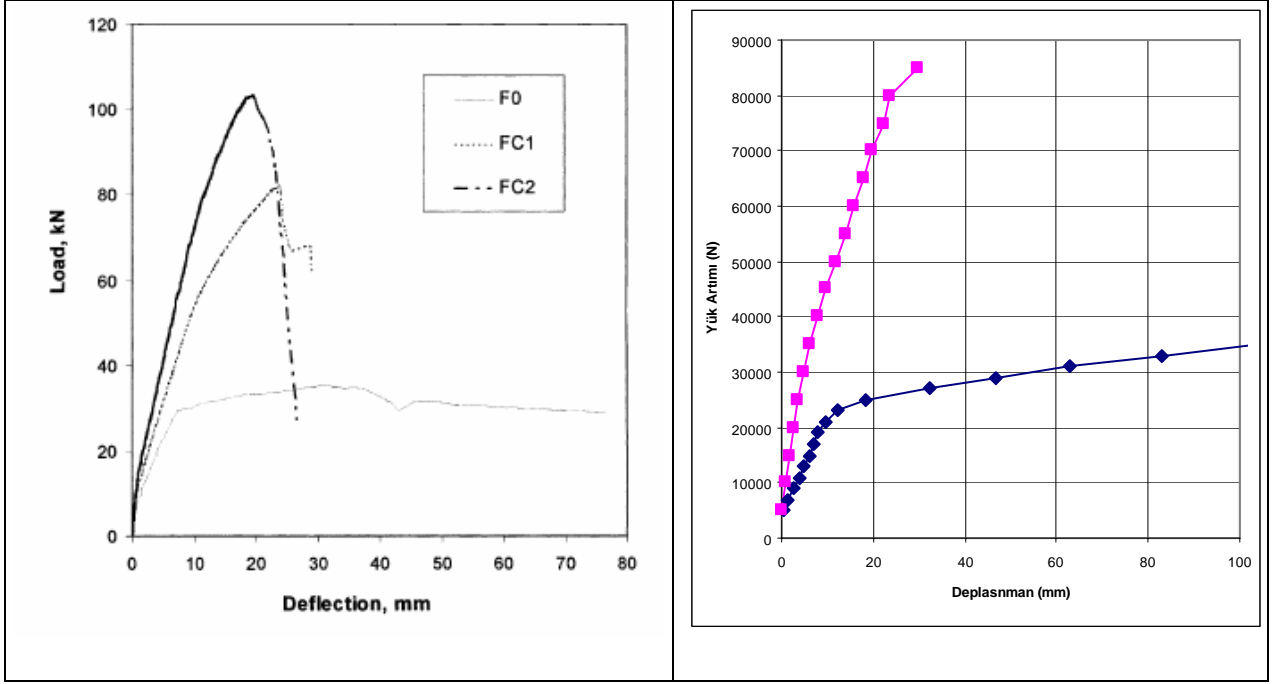
Sayısal analiz modeli olarak çözümü hazırlanan deneysel çalışmanın sonlu elemanlar ağı aşağıdaki şekilde verilmiştir.



Şekil 6.5 Sonlu elemanlar ağı ve mesnetleme durumu

Deneysel çalışmada hazırlanan betonun ortalama basınç gerilmesi 37,5 MPa, poisson oranı  $\nu=0.2$  olarak alınmıştır. Basınç ve çekme bölgesinde kullanılan donatı için akma gerilmesi 500 MPa ,Elastisite modülü 200 GPa verilmiştir. CFRP ise 1 mm kalınlığında kullanılmış olup elastisite modülü 68948 MPa seçilmiştir.

Bilgisayar ortamında Lusas paket programında hazırlanan sayısal analiz modeli sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak analiz edilmiştir.



Şekil 6.6 Deneysel çalışmada F0 ve FC1 modellerinin karşılaştırmalı Yük Artımı-deplasman değişimi

Burada FO ve FC1 modellerinin tekil yükleme altında orta noktasında meydana gelen deplasman miktarları karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Deneysel çalışmada etriye katkısı da göz önüne alınarak belirlenen Yük-Deplasman grafiği ile sayısal analiz sonucunda elde edilen değerler birbirine çok yakındır.

## 6.2. Sonuçlar ve Yorumlar

DeneySEL ve nümerik çalışmalardan elde dilen sonuçlar irdelendiğinde CFRP plaka kullanılarak güçlendirilen betonarme kirişlerin yük ve deplasman kapasitelerinde önemli kazanımlar sağlandığı görülmüştür. Örneğin; Maalej v.d.[22] tarafından gerçekleştirilen deneySEL çalışmada kontrol kirişine göre yük kapasitesi artımı A modelinde %27, B modelinde %29 ve C modelinde % 27,5 olarak belirlenmiştir. Deplasman kapasitesinde ise A modelinde % 51,5, B modelinde %63,5 ve C modelinde % 72 olarak hesaplanmıştır. Bu değerlerin değişiminde kiriş donatı miktarı, malzeme dayanımları ve CFRP kalınlıkları önemli rol oynamaktadır.

Bu tez çalışmasında incelenen A tipi sayısal analiz modelinde A0 kontrol kirişine göre, A1 kirişinde %55, A2 kirişinde %85 ve A3 kirişinde % 115 lik bir yük artımı sağlanmıştır. Deplasman kapasitesinde ise A0 kontrol kirişine göre, A1 kirişinde %85, A2 kirişinde % 89 ve A3 kirişinde ise % 94 lük kazanım sağlanmıştır.

B tipi sayısal kiriş modelinde B0 kontrol kirişine göre, B1 kirişinde % 35, B2 kirişinde % 54 ve B3 kirişinde % 73 değerinde yük artımı sağlanmıştır. Deplasman kapasitesinde ise B1 kirişinde % 31, B2 kirişinde % 44 ve B3 kirişinde % 75 değerinde kazanım sağlanmıştır.

C tipi sayısal kiriş modelinde C0 kontrol kirişine göre güçlendirilmiş durumda yük taşıma kapasitesinde C1 kirişinde % 22, C2 kirişinde % 46 ve C3 kirişinde ise %65 düzeyinde bir artım sağlanmıştır. Deplasman kapasitesinde ise C0 kontrol kirişine göre C1 kirişinde % 35, C2 kirişinde % 42 ve C3 kirişinde ise % 55 düzeyinde bir kazanım sağlanmıştır.

D tipi sayısal kiriş modelinde ise, gerçekleştirilen güçlendirilmesi sonucunda D0 kontrol kirişine göre, D1 kirişinde %19, D2 kirişinde %27 ve D3 kirişinde % 35 değerinde bir yük artımı sağlanmıştır. Deplasman kapasitesi incelendiğinde ise D1 kirişinde % 20, D2 kirişinde %26 ve D3 kirişinde %30 değerinde bir kazanım sağlanmıştır.

Elde edilen tüm deneySEL ve sayısal analiz sonuçları ele alındığında CFRP kullanılarak betonarme kirişlerin güçlendirilmesi etkin bir yöntemdir. Betonarme kirişlerin her bölgesindeki gerilme dağılımlarını, çatlak mekanizmalarını ve kiriş yenilme biçimlerinin belirlenmesinde doktora tezinde kullanılan sayısal analiz modeli metodu yeterli ve gerçekçi sonuçlar vermektedir.

Tablo 6.1. Deneysel çalışmalar ile sayısal analiz modeli sonuçlarının karşılaştırılması

Çalışmalar	Model No	Kiriş Genişliği (mm)	Kiriş Yüksekliği (mm)	FRP Uzunluğu (mm)	FRP Kalınlığı (mm)	A <sub>s</sub>	A <sub>s</sub> '	E <sub>c</sub> (GPa)	E <sub>s</sub> (MPa)	E <sub>f</sub> (MPa)	Yük (kN)	Depls. (mm)
Maalej.(22)	A1,A2	115	146	1450	0,165	3φ10	2φ10	27	180	235	60,4	38,6
Maalej.(22)	A5,A6	115	146	1450	0,33	3φ10	2φ10	27	180	235	87,4	20,9
Tez ,SAM	A1	120	200	1350	1,5	2φ12	2φ8	28,5	210	165	100	19,28
Tez ,SAM	A3	120	200	1350	4,5	2φ12	2φ8	28,5	210	165	100	4,135
Maalej.(22)	B3	230	292	2900	0,165	3φ20	2φ20	27	183	235	263	35,0
Tez ,SAM	B1	200	300	2700	1,5	3φ16	2φ10	28,5	210	165	200	47,80
Anania(4)	CFRP	250	250	2000	0,334	2φ12	2φ12	25,7	200	230	338	16,79
Ascione(5)	Set I	100	140	1500	0,28	4φ14	----	25,456	210	210		
Bodin(51)	P2	150	300	2800	1,2	2φ14	2φ14	38,7	200	150	137	18

### 6.3 Genel Değerlendirmeler

Gerçekleştirilen bu tez çalışmasından ve irdelenen deneysel çalışmalardan

CFRP plaka kullanılarak güçlendirilen sayısal kiriş modellerinin tamamının yük taşıma kapasitesinde %50 ye varan değerlerde artımlar sağlanmıştır.

CFRP plaka kullanılarak güçlendirilen sayısal kiriş modellerinin tamamında normal gerilme ( $\sigma_x, \sigma_y$ ) değerlerinde önemli azalmalar meydana gelmektedir.

CFRP plaka kullanılarak güçlendirilen sayısal kiriş modellerinin tamamında kayma gerilmesi ( $\tau_{xy}$ ) değerlerinde önemli azalmalar meydana gelmektedir.

Deneysel ve analitik çalışmalar göstermiştir ki, CFRP plakalı sistemlerde kiriş boyutları ve mevcut donatıları önemli etki sağlamaktadır. Güncel modellerde sıkça kullanılan D tipi kiriş modelindeki kesitlerde (300x500 mm) gerçekçi çözümler sunmaktadır. Bu kesitteki kirişlerin gerek yük artımı-deplasman değişimde gerekse kesitlerde meydana gelen birim zorlanma ( $\epsilon_x$ ) değerlerinde iyileştirmeler göstermektedir.

Betonarme kirişin güçlendirilmesinde CFRP plaka kullanılmasının kiriş uzunluğuyla doğrudan önemli bir etkisi belirlenmemiştir.

A tipi sayısal kiriş modelinde olduğu gibi çok küçük kesitteki modellerde mevcut kirişin taşıma kapasitesini önemli ölçüde arttırdığından , kiriş taşıma kapasitesi yenildiğinde dahi yük taşımaya devam ettiğiinden istenmeyen gevrek kırılmaya neden olabilmektedir.

Betonarme kirişlerin CFRP kullanılarak güçlendirilmesinde mevcut kirişin donatı oranı ve donatı türü önemli etken olmaktadır.

Gerçekleştirilen çalışma ile hazırlanan sayısal kiriş modellerindeki farklı yük miktarına karşı gelen çatlak mekanizması EK1 de ayrıntılı olarak verilmiştir. Bu şekiller incelendiğinde modellerin yenilme biçimlerinde etken olan kesme ve eğilme çatlaklarının kiriş bölgelerine

dağılımı ve yoğunlaşması net olarak görülmektedir. Her yükleme durumu için çatlak durumu gerçekleştirilen doğrusal olmayan analiz sonucunda kolaylıkla belirlenmektedir.

Bu tez çalışması geliştirilen sayısal analiz modeli yöntemi ile, kiriş boyutları, içindeki donatı oranları, malzeme özellikleri ve uygulama teknikleri farklı her türlü kiriş modeli deneysel çalışmalarla birebir örtüşen sonuçlar elde edilebilecek şekilde bilgisayar ortamında hazırlanabilir. Bu ise çalışmalarda çok fazla ve farklı modellerin gerçekçi ve ayrıntılı sonuçlar elde edilmesini sağlayacaktır. Böylelikle deneysel çalışmalarda model hazırlamak, bunları test ederek gerçekçi sonuçlar almak için harcanacak zaman, emek ve malzeme kaybı minimize edilmiştir.

#### **6.4. Gelecekte Yapılabilecek Çalışmalar**

Bu tez çalışmasında, CFRP plaka kullanılarak güçlendirilen betonarme kirişlerin modellenmesi iki boyutlu olarak gerçekleştirilmiştir. Böylelikle eğilme gerilmesine karşı güçlendirilen modellerin doğrusal olmayan analizi gerçekleştirilmiştir. Bu konu üzerinde çok farklı ve değişik konularda araştırma geliştirilebilir. Bunlardan bazıları şunlardır;

1. Bu çalışma üç boyutlu olarak geliştirilerek , kiriş yan yüzeylerine de CFRP plaka yerleştirilerek hem kesme gerilmelerine hem de eğilme gerilmelerine karşı güçlendirmesi de incelenebilir.
2. Çalışmada farklı malzeme özelliklerine sahip, cam fiber, aramid fiber, karbon fiber dokuma kumaş v.b. değişik malzeme özelliklerine sahip güçlendirme elamanları kullanılarak birbirleri arasındaki farklar irdelenebilir.
3. Aynı uzunlukta fakat farklı donatı oranı, malzeme özellikleri ve kesitteki modeller üzerinde çalışmalar gerçekleştirilerek donatı oranının etkisi, malzeme özellikleri değişiminin etkisi, kesit değişiminin güçlendirme üzerine etkisi gibi konular derinlemesine irdelenebilir.
4. CFRP plaka kullanılarak güçlendirme tekniği, betonarme kirişlere olduğu gibi özellikle köprü döşemelerine, kolonlara ve kolon-kiriş birleşim bölgelerine de uygulanabilir. Bu modelleme esası ile buradaki gerilme değişimleri ve güçlendirme katkısı belirlenebilir.

## KAYNAKLAR

- [1] SMITH, S.T., TENG ,J.G., “FRP-Strengthened RC beams. I: review of debonding strength models” , Engineering Structures, Vol:24, pg:385-395, 2002
- [2] SMITH ,S.T., TENG, J.G., “FRP-Strengthened RC beams. II: assessment of debonding strength models” , Engineering Structures, Vol:24, pg:397-417, 2002
- [3] XIOA, J., LI , J., ZHA, Q, “Experimental study on bond behavior between FRP and concrete” , Construction and Building Materials, Vol: 18, pg:745-752, 2004
- [4] ANANIA, L., BADALA, A.,FAILLA ,G., “Increasing the flexural performance of RC beams strengthened with CFRP materials” , Construction and Building Materials, Vol: 19, pg:55-61, 2005
- [5] ASCIONE, L., BERARDÌ, V.P., FEO, L.,. MANCUSI, G., “A numerical evaluation of the interlaminar stress state in externally FRP plated RC beams” Composites Part B: Engineering ,Vol: 36, pg:83-90, 2005
- [6] HSUAN-TEH, H., MING LIN, F., YIH-YUAN, J., “Nonlinear finite element analysis of reinforced concrete beams strengthened by fiber-reinforced plastics” , Composite Structures, Vol: 63, pg:271-281, 2004
- [7] .YANG, Z.J,.. CHEN, J. F ., PROVERBS, D., “Finite element modelling of concrete cover separation failure in FRP plated RC beams” , Constr. and Building Materials, Vol: 17, pg:3-13, 2003
- [8] PESIC, N., PILAKOUTAS,K., “Concrete beams with externally bonded flexural FRP-reinforcement: analytical investigation of debonding failure” , Composites Part B: Engineering , Vol: 34, pg:327-338, 2003
- [9] ASCIONE, L. , , FEO, L., “Modelling of composite/concrete interface of RC beams strengthened with composite laminates”, Composites Part B: Engineering , Vol: 31, pg:535-540, 2000
- [10] LU ,X.Z., YE, L.P., J.G. ,TENG ,J.J., “Meso-scale finite element model for FRP sheets/plates bonded to concrete” , Engineering Structures, Vol: 27, pg:567-575, 2005



- [11] GAMADA A, SPACANO, G., E., ZARNIC R.,” Experimental and nonlinear finite element studies of RC beams strengthened with FRP Plates”, Composites Part B: Engineering , Vol: 38, pg:277-288, 2007
- [12] BASLER, M., MUNGALL B., FAN S., “Strengthening of Structures with SİKA Carbodur Composite Strengthening System” Proc Of. Int. Conf. On FRP Composites in Civ. Eng., Vol.1. pg. 263-273, Dec.2001
- [13] FERRETTI D., SAVIO M., “Nonlinear model for R/C tensile members strengthened by FRP-plates”, Engineering Fractures Mechanics, Vol. 70, pg.1069-1083, 2003
- [14] GRACE, N., RAGHEB, W.F., ABDEL-SAYED, G., “Development and application of innovative triaxially braided ductile FRP fabric for strengthening concrete beams”, Comp. Structures, Vol.64, pg.521-530, 2004
- [15] LEE, H.K., HAUSMANN, L.R., “Structural repair and strengthening of damaged RC beams with sprayed FRP”, Comp. Structures, Vol.63, pg.201-209, 2004
- [16] TAVAREZ, A.F., BANK, L.C., PLESHA, E.M., “Analysis of Fiber-Reinforced Polymer Composite Grid RC Beams”, ACI Structural Journal, Vol. 100, No.2, pg. 250-258, March-April 2003
- [17] PHAM, H., AL-MAHAIDI, R., “Assessment of available prediction models for the strength of FRP retrofit RC Beams” , Comp. Structures, Vol.66, pg.601-610, 2004
- [18] ALMUSSALAM, T., Al-SALLOUM Y.,” Ultimate strength prediction for RC beams externally strengthened by composite materials”, Composites Part B: Engineering , Vol: 32, pg:609-619, 2001
- [19] RASHEED, H. A., PERVAİZ,S., “Closed form equations for FRP flexural strengthening design of RC beams”, Composites Part B: Engineering , Vol: 34, pg:539-550, 2003
- [20] ARYA, C., CLARKE, J.L., KAY, E.A., O’REGAN, P.D., “TR 55: Design guidance for strengthening concrete structures using fibre composite materials: a review”, Engineering Structures, Vol.24, pg: 889-900, 2002
- [21] BUYUKOZTURK,O., GUNES,O., KARACA,E., “Progress on understanding debonding problems in reinforced concrete and steel members strengthened using FRP Composites” , Construction and Building Materials, Vol.18, pg:9-19, 2004
- [22] MAALEJ, M., LEONG, K.S., “Effect of beam size and FRP thickness on interfacial shear stress concentration end failure mode of FRP-strengthened beams”, Composite Science and Technology, 2005

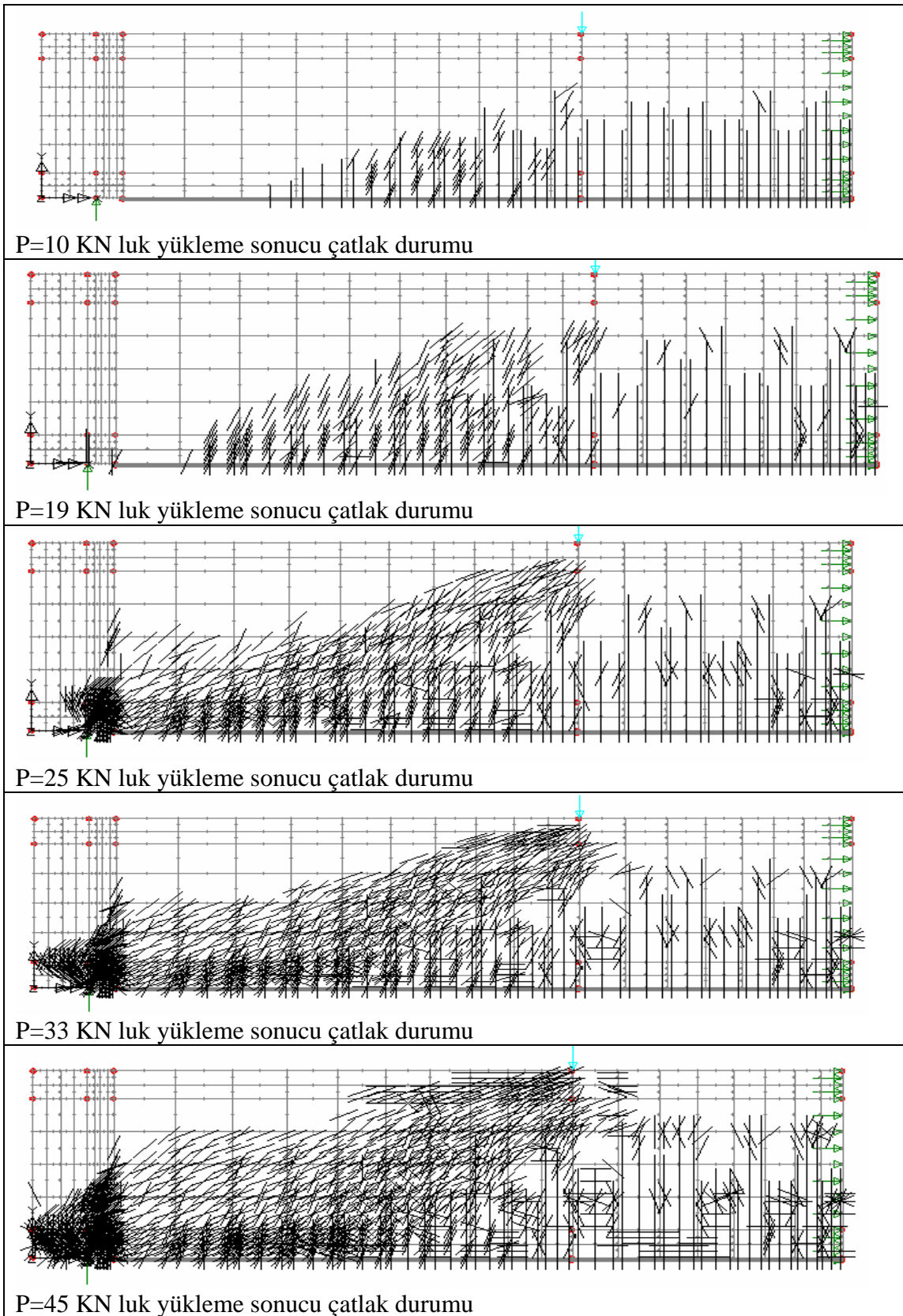
- [23] TALJTEN ,B. ,“FRP strengthening of Concrete structures: new inventions and applications”, Prog. Strct. Engng. Materials.,Vol.6, pg. 162-172, 2004
- [24] RİZKALLİ, S., HASSAN T, HASSAN N., “ Design recommendations for the use of FRP for reinforcement and strengthening of concrete structures”, Prog. Strct. Engng. Materials.,Vol.5, pg. 16-28, 2003
- [25] CHEN, J:F.; PAN, W.K., “ There dimensional stress distribution in FRP-to-concrete bond test specimens”, Construction and Building Materials, Vol.20, pg:46-58, 2006
- [26] TENG, J.G., CHEN, J.F., SMİTH, S.T., LAM,L. , FRP-strengthened RC Structures, John Wiley and Sons, 2001
- [27] NANNİ, A., “FIBER-REINFORCED-PLASTIC (FRP) REINFORCEMENT FOR CONCRETE STRUCTURES Properties and Applications”, ELSEVIER, 1993
- [28] YIN, J., WU, Z.S. “Structural performance of short steel-fiber reinforced beams with externally bonded FRP sheets”, Construction and Building Materials, Vol.17, pg: 463-470, 2003
- [29] GAO, B., LEUNG, K.Y., KIM, J.K., “Failure Diagrams of FRP strengthened RC beams”, Comp. Structures, Vol.77, pg.493-508, 2007
- [30] ALKAN, A.M., “Polimer Matriksli Kompozitlerin Kullanılarak Yapı Güçlendirilmesi Ve İyileştirilmesi ”,Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya , Temmuz 2000
- [31] ÇELİK,A., “Fiber Takviyeli Polimerler Ve Mühendislik Yapılarında Kullanım Alanları”,Yüksek Lisans Tezi,Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü,Sakarya ,Mayıs 2001
- [32] DUMANLAR, N. “Eğilme Yönünden FRP Tekstillerle Güçlendirilmiş dikdörtgen Kesitli Kirişlerin Mekanik Davranışının Deneysel İncelenmesi”, Gazi Üniv. Fen Bilm. Enst. Yüksek Lisan Tezi, 2005
- [35] ŞAHİN,Y., “Kompozit Malzemelere giriş” ,Gazi Kitap yayın Evi , Ekim 2000
- [36] ÖZER, E. “ Betonarme Yapıların Lineer Olmayan Analizi”, Ders Notları, İTÜ. İnşaat Müh. ABD, 2006
- [37]. CHBDC, “Section16: Fibre Reinforced Structures”, Canadian Highway Bridge Design Code, Final Draft, Canada, July 1996
- [38] JCI TC952 on Continuous Fiber Reinforced Concrete: “Technical Reports on Continuous Fiber Reinforced Concrete”, Japan Concrete Instute,1998

- [39] ACI-Committee 440, "Guide for The design and construction of externally bonded FRP Systems for Sternghening of Concrete Structures, ACI, Farmington Hills,US, (2001a)
- [40] *fib* Task Group 9.3, "FRP Reinforcement Structures", International Federation for Structural Concrete, Camision 9,Task Group 9.3,1996
- [41] CEN . Eurocode 2:Design of concrete structures-Part1-1. General rules and rules for buildings, ENV 1992 1-1, Comité Européén de Normalisation, Belgium,1991
- [42] Concrete Society, "Design Guidance for strengthening concrete sturctures using fibre composite materials", Technical report 55, The Concrete Society, UK, 2000
- [43] JSCE, "Recommendation for Design and Construction of Concrete Structures using Continuous Fiber Reinforcing Materials, Japanese Society of Civ. Eng., Concrete Library, No.72, 1997
- [44] Olcay Y., Akyol M., Gemci R., "Polimer Esaslı Lif Takviyeli Kompozit Malzemelerin Arabirim Mukavemeti Üzerine Farklı Kür Metotlarının Etkisinin İncelenmesi", Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Cilt 7, Sayı 1, Bursa,2002
- [45] PHILPS N. L., "Design with Advance Composite Materials, Springer-Verlag, The Design Council, UK, 1989,
- [46] Cam Elyaf, , Bülten Sayı 6, Cam Elyaf Sanayii A.Ş, 1997
- [47] Cam Elyaf Glass Fiber, " Kompozit Kalıplama Yöntemlerine Giriş", Şişecam Yayınları
- [48] LUSAS User's Manuel, LUSAS Finite Element System, FEA Lmt, UK,2000
- [49] TENG, J.G., LAM, L., CHEN, J.F., "Shear strengthening of RC beams with FRP composites", Prog. Struct. Engng. Mater. ,Vol.6, pg:173-184,2004
- [50] GRACE, F.N., SINGH, S.B., "Durability Evaluation of Carbon Fiber-Reinforced Polymer Strengthened Concrete Beams: Experimental Study and Design", ACI Structural Journal, Vol. 102, pg:40-53, 2005
- [51] BODIN, F.B.,DAVİD E.,, RAGNEAU ,E., " Finite element modeling of flexural behaviour of externally bonded CFRP reinforced concrete structures", Engineerin Structures, Vol.24,pg:1423-1429, 2002

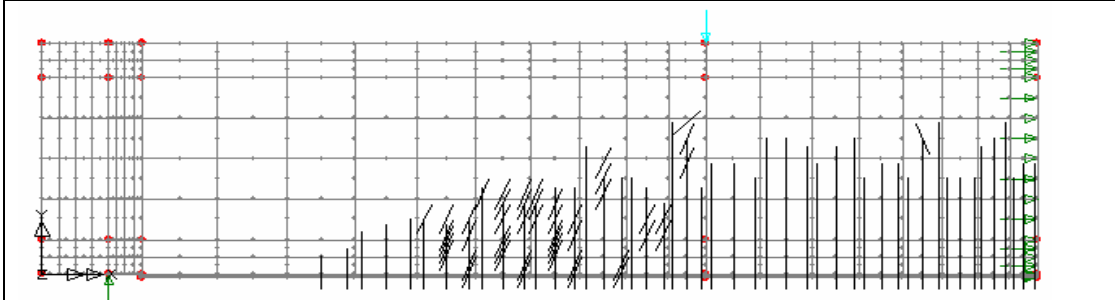
**EKLER**

## EK- A Tipi Sayısal Kiriş Modelleri Çatlak Mekanizması

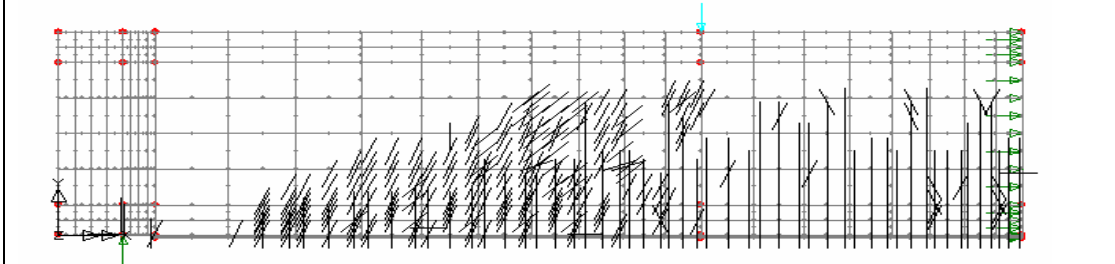
### A0 tipi sayısal kiriş çatlak mekanizması



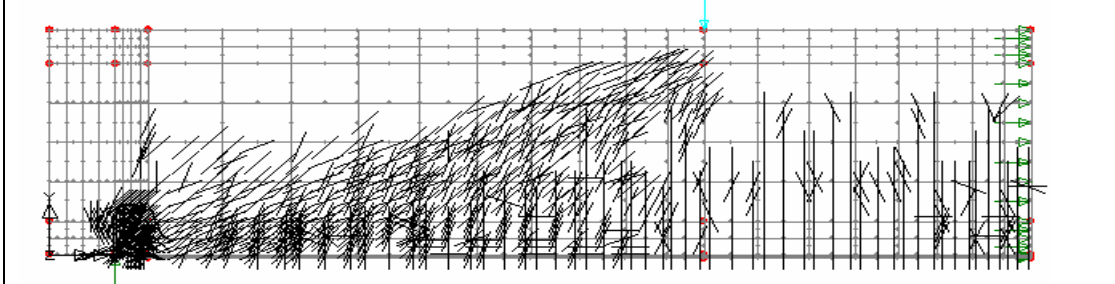
### A1 tipi sayısal kiriş çatlak mekanizması



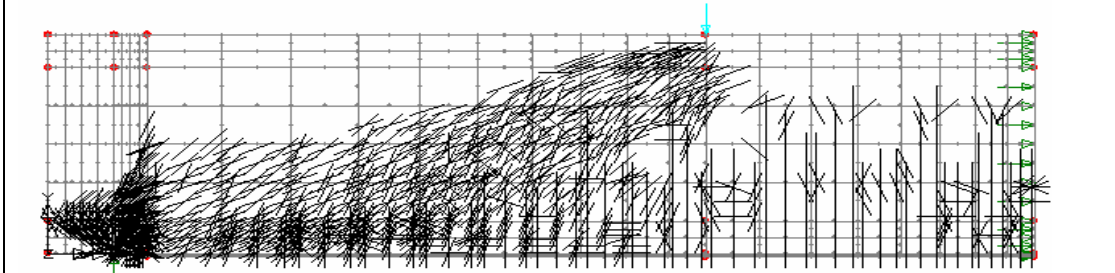
P=10 KN luk yükleme sonucu çatlak durumu



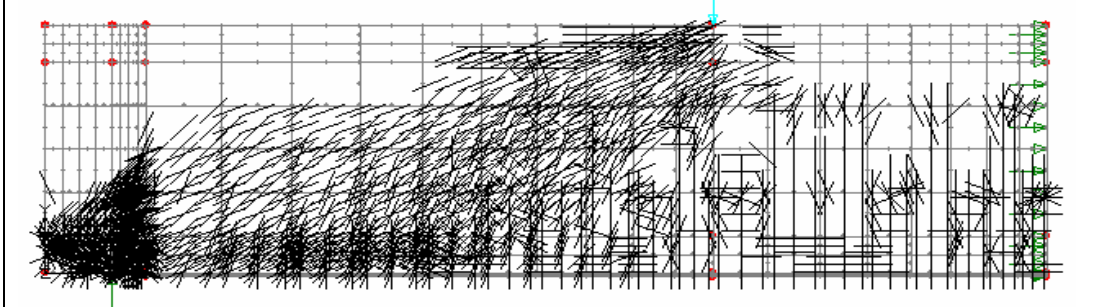
P=19 KN luk yükleme sonucu çatlak durumu



P=25 KN luk yükleme sonucu çatlak durumu

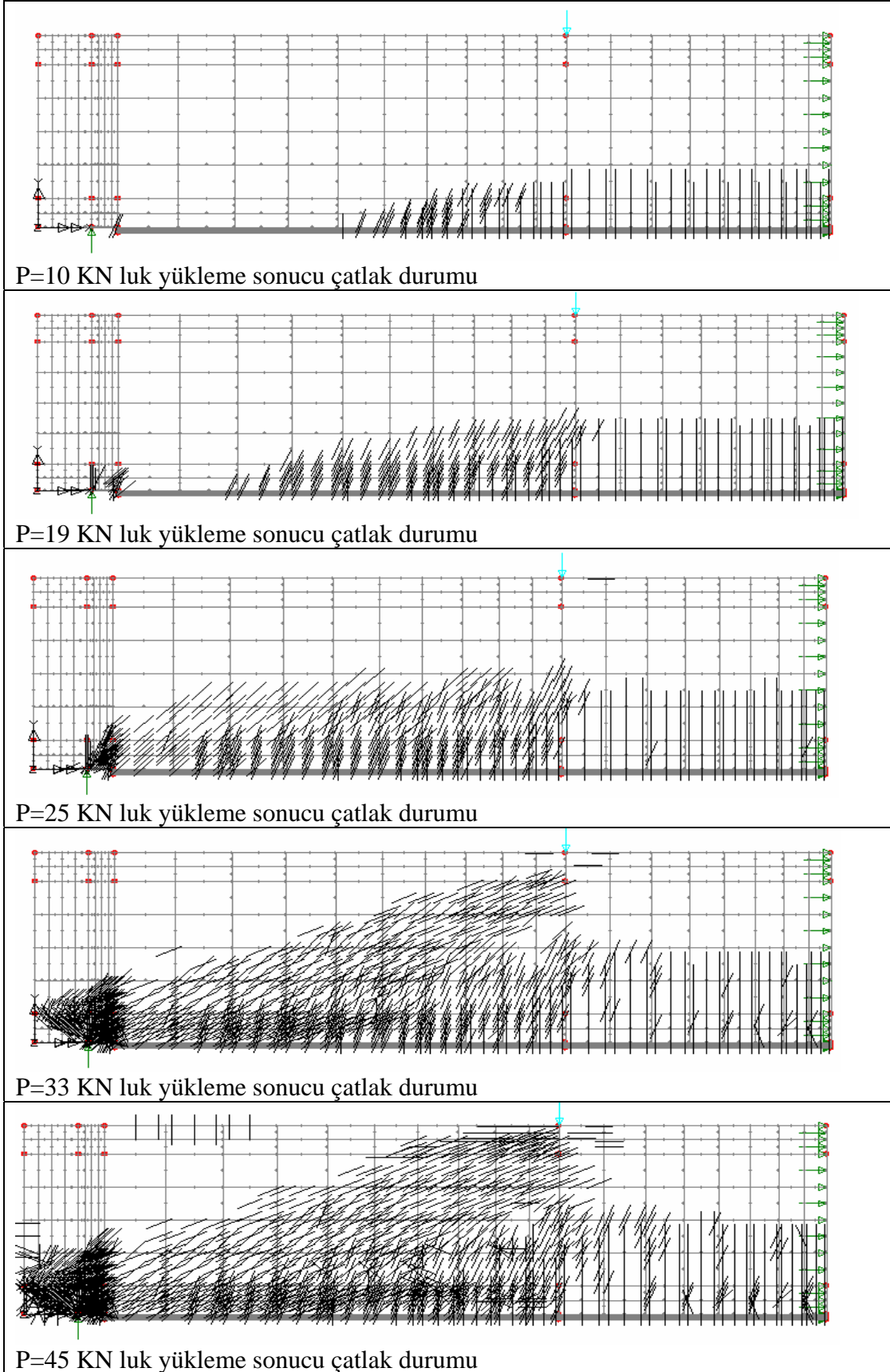


P=33 KN luk yükleme sonucu çatlak durumu

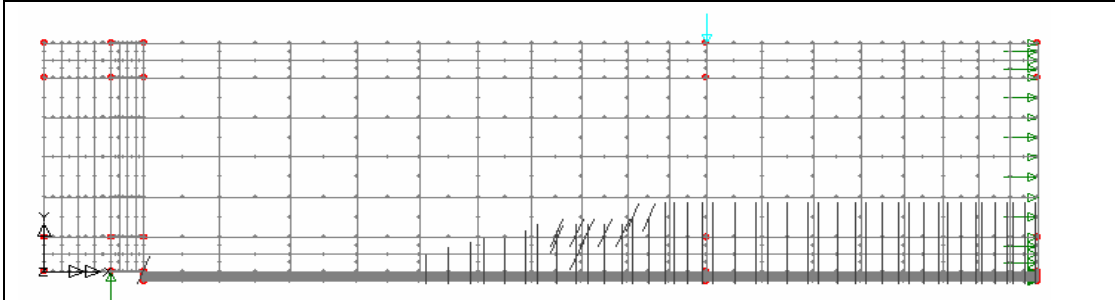


P=45 KN luk yükleme sonucu çatlak durumu

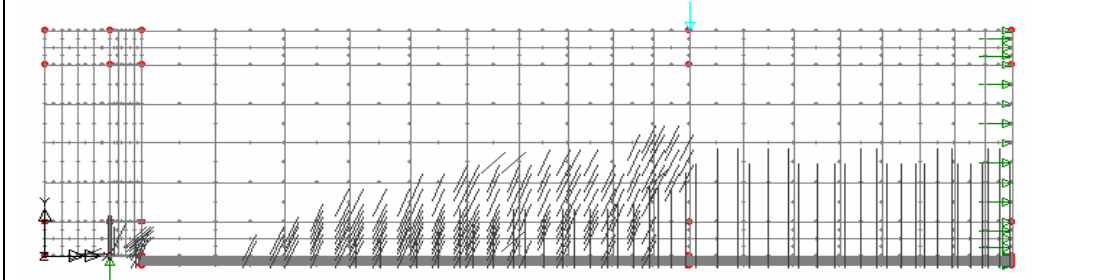
## A2 tipi sayısal kiriş çatlak mekanizması



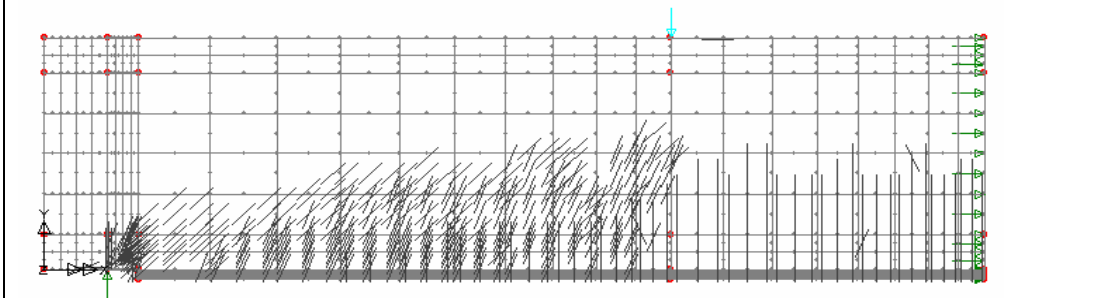
### A3 tipi sayısal kiriş modeli çatlak mekanizması



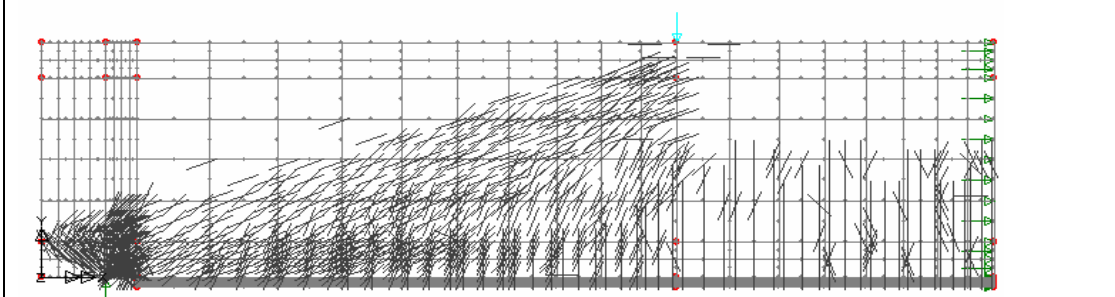
P=10 KN luk yükleme sonucu çatlak durumu



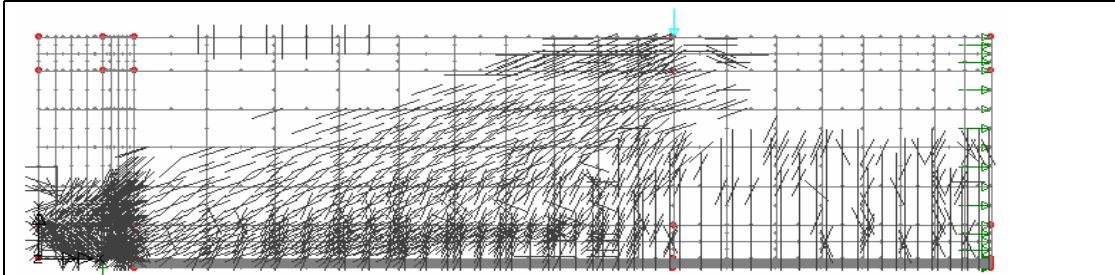
P=19 KN luk yükleme sonucu çatlak durumu



P=25 KN luk yükleme sonucu çatlak durumu



P=33 KN luk yükleme sonucu çatlak durumu

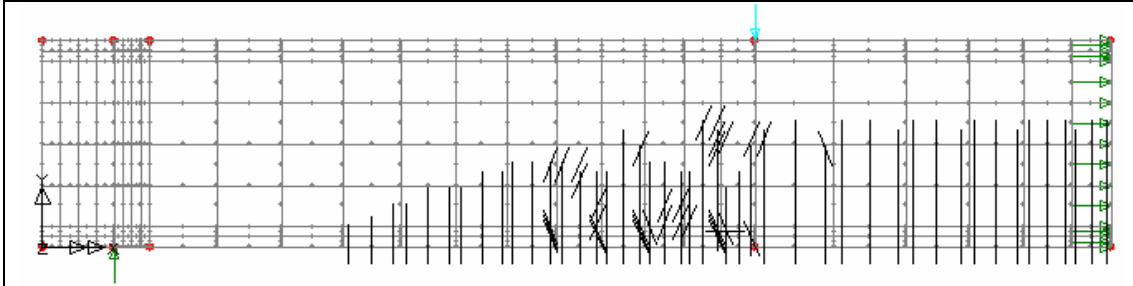


P=45KN luk yükleme sonucu çatlak durumu

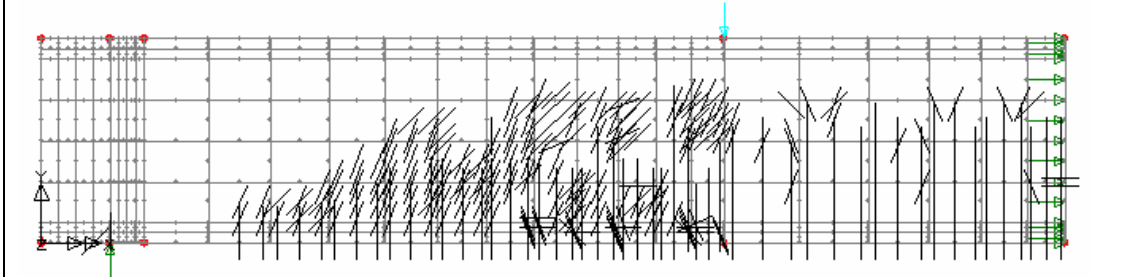


## EK- B Tipi Sayısal Kiriş Modelleri Çatlak Mekanizmaları

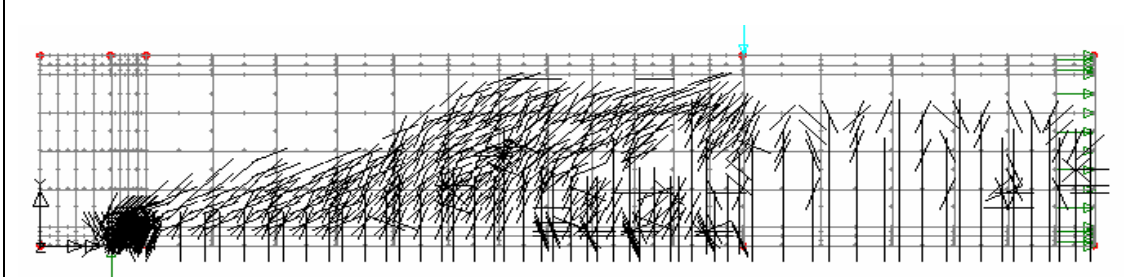
### B0 tipi sayısal kiriş modeli çatlak mekanizması



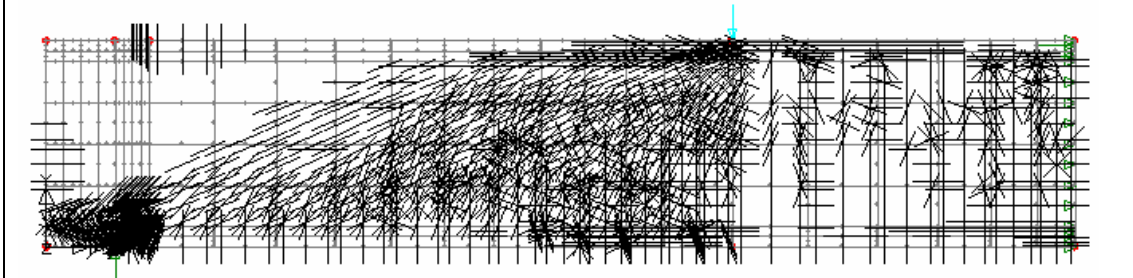
P=20 KN'luk yükleme sonucu çatlak durumu



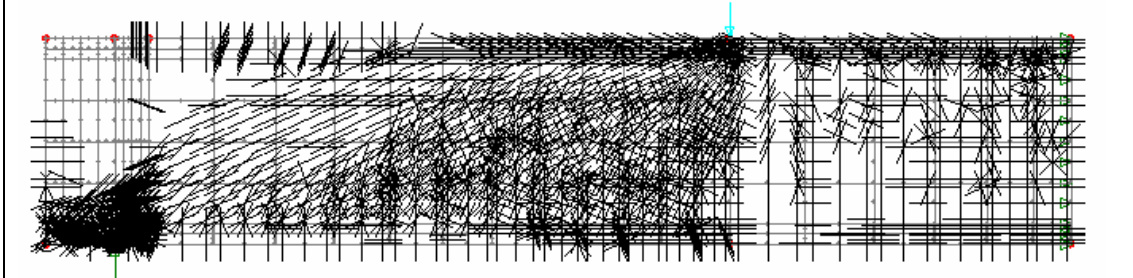
P=40 KN'luk yükleme sonucu çatlak durumu



P=60 KN'luk yükleme sonucu çatlak durumu

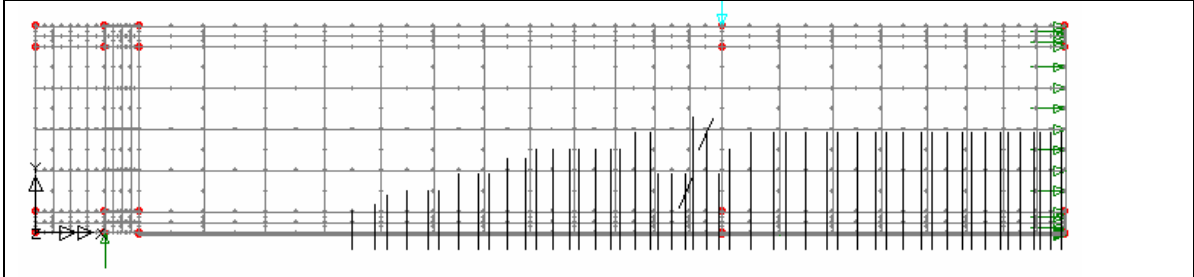


P=90 KN'luk yükleme sonucu çatlak durumu

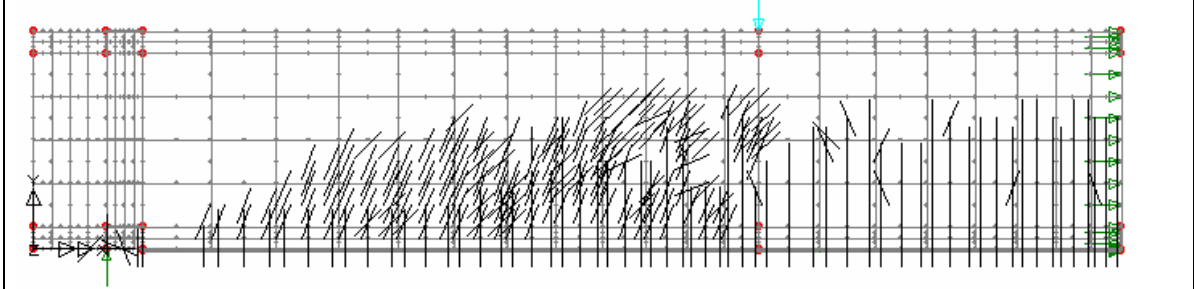


P=120 KN'luk yükleme sonucu çatlak durumu

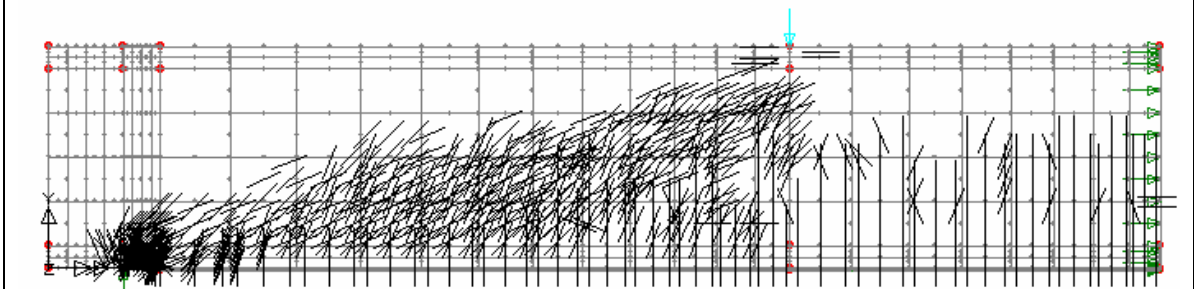
### B1 tipi sayısal kiriş modeli çatlak mekanizması



P=20 KN'luk yükleme sonucu çatlak durumu



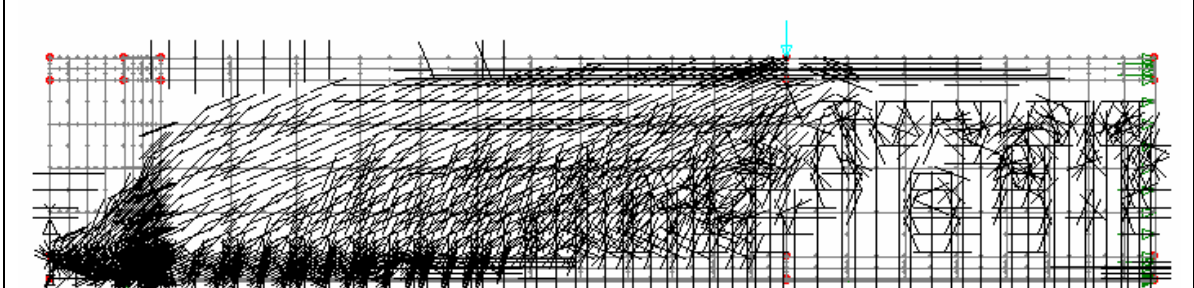
P=50 KN'luk yükleme sonucu çatlak durumu



P=72,5 KN'luk yükleme sonucu çatlak durumu

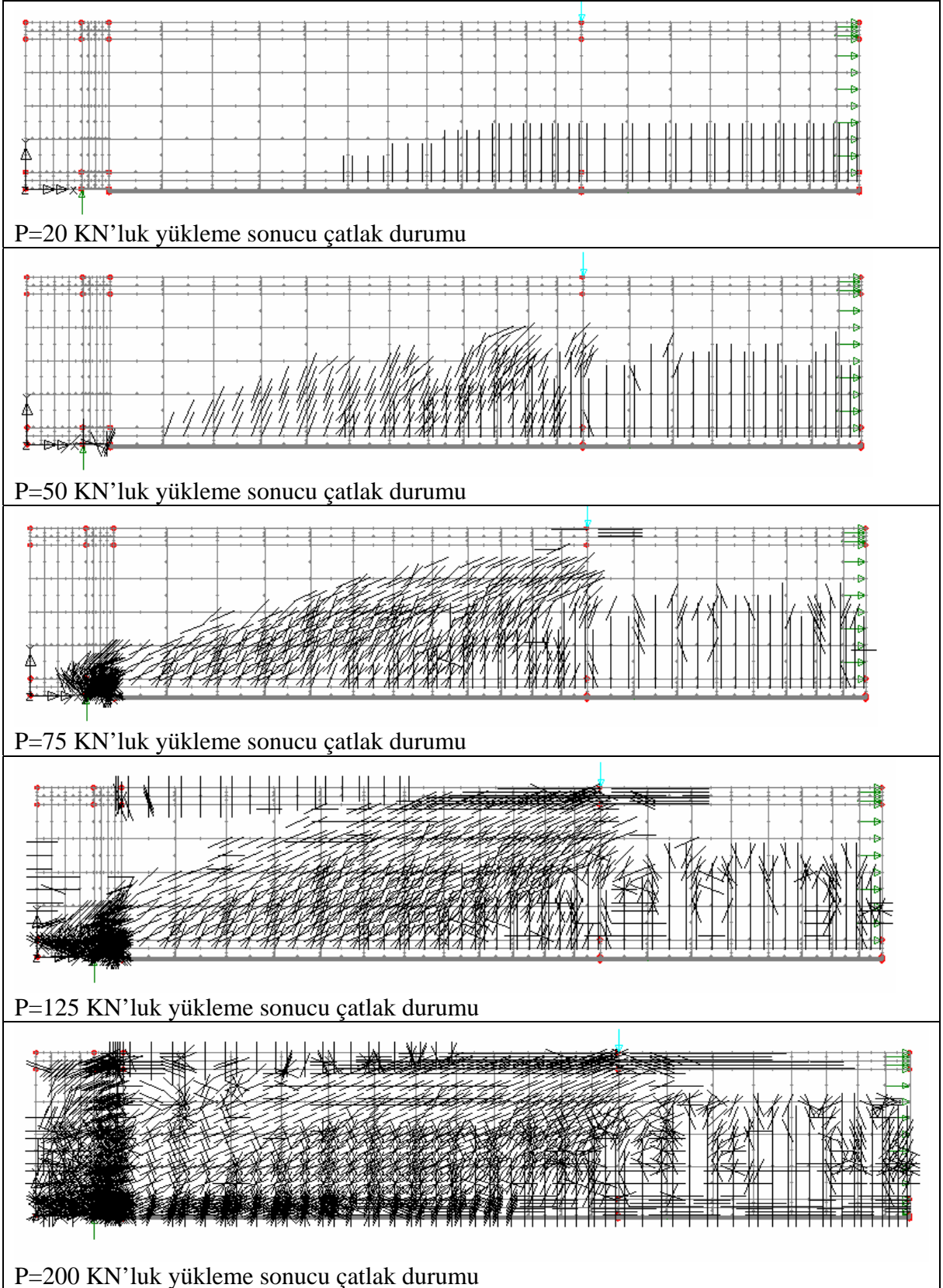


P=142,5 KN'luk yükleme sonucu çatlak durumu

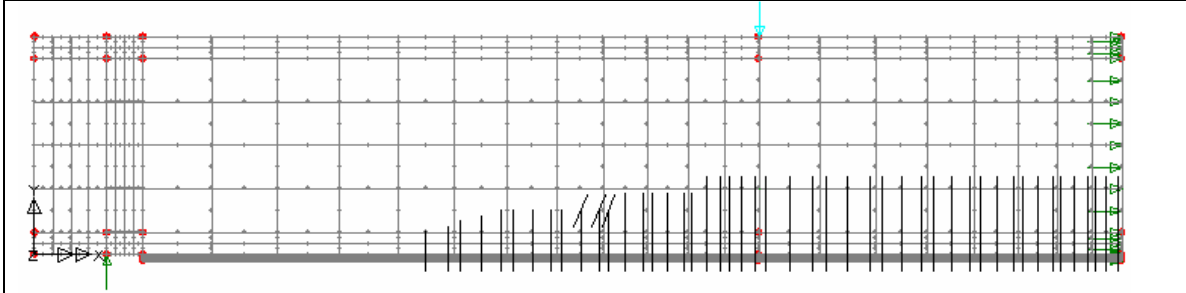


P=200 KN'luk yükleme sonucu çatlak durumu

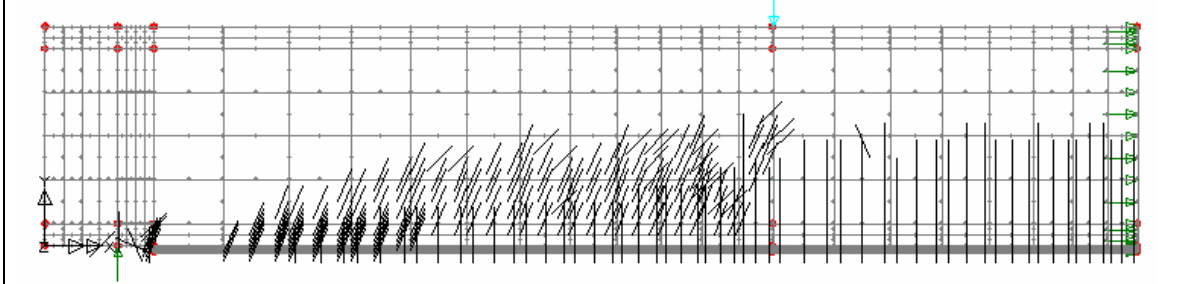
### B2 tipi sayısal kiriş modeli çatlak mekanizması



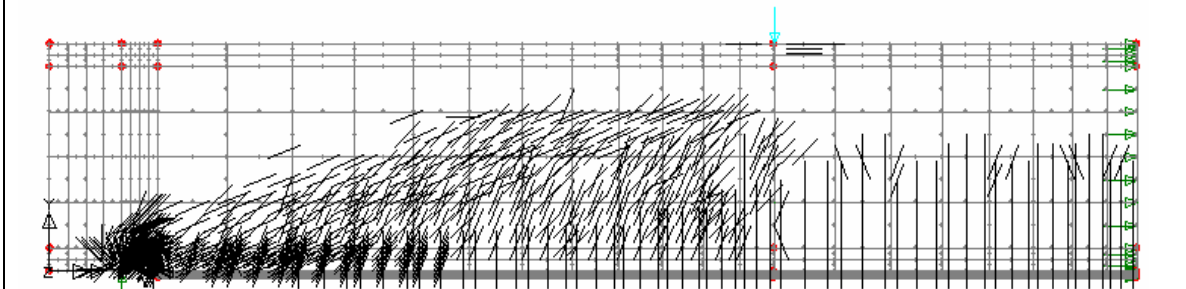
### B3 tipi sayısal kiriş modeli çatlak mekanizması



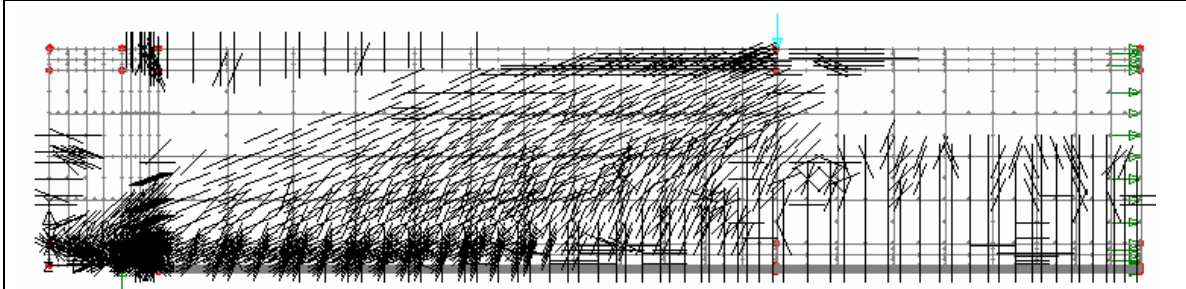
P=20 KN'luk yükleme sonucu çatlak durumu



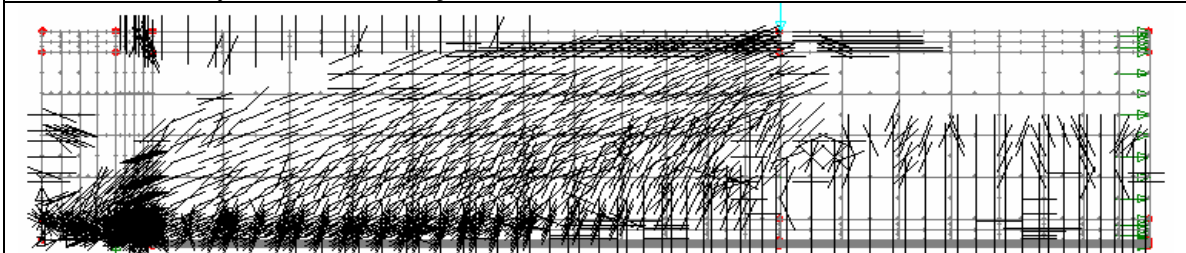
P=50 KN'luk yükleme sonucu çatlak durumu



P=75 KN'luk yükleme sonucu çatlak durumu



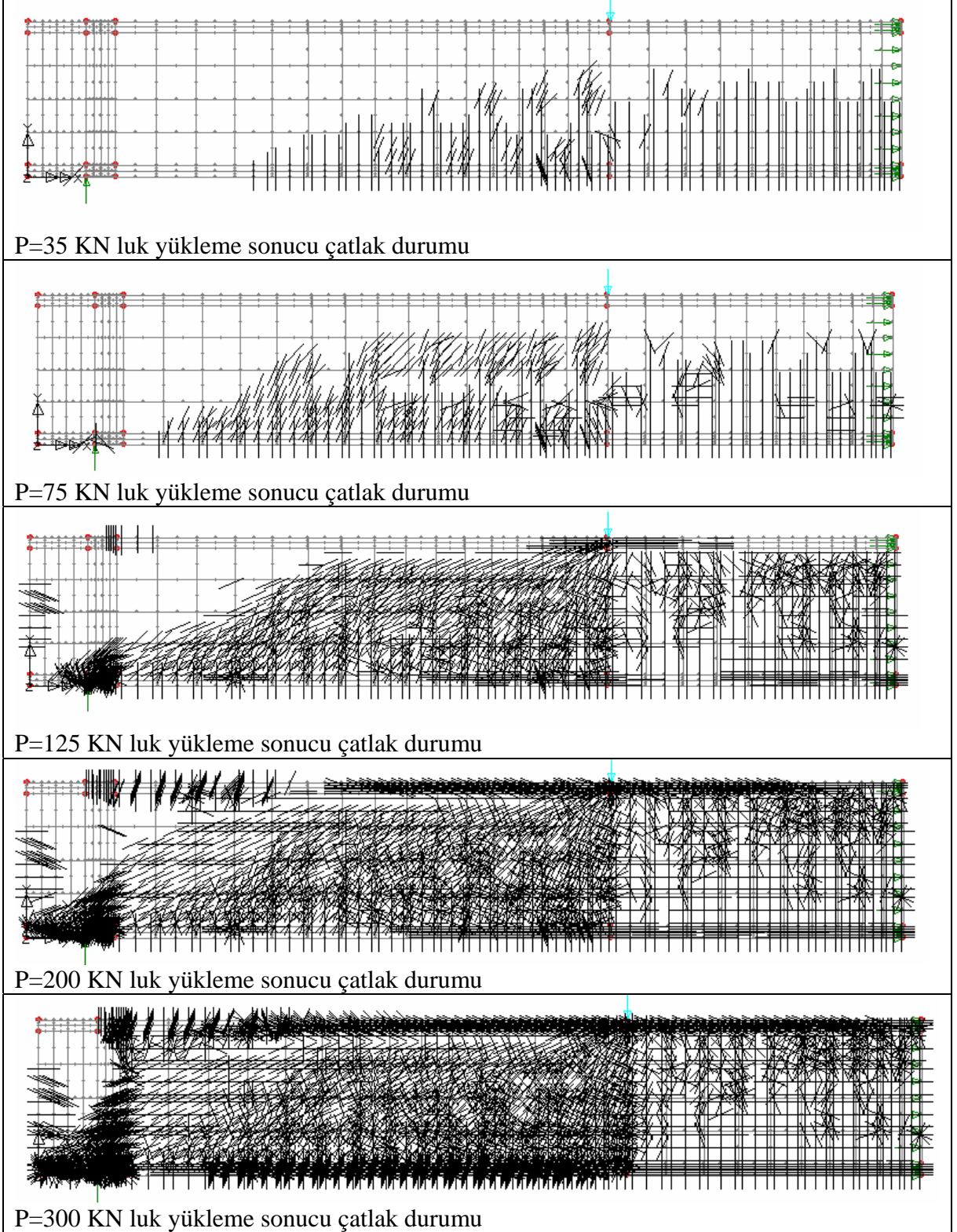
P=125 KN'luk yükleme sonucu çatlak durumu



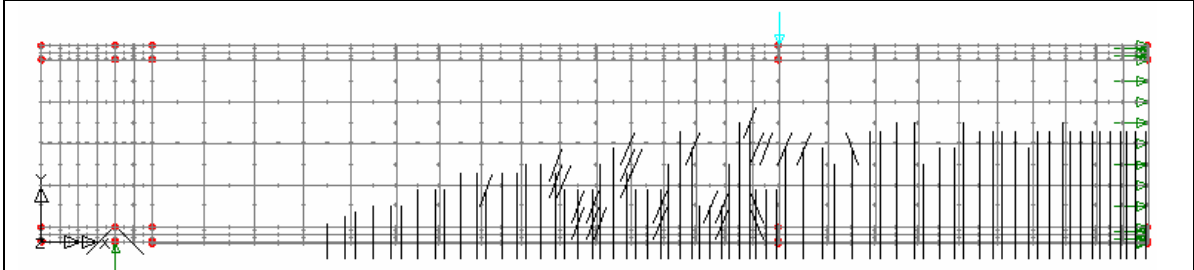
P=200 KN'luk yükleme sonucu çatlak durumu

## EK -C Tipi Sayısal Kiriş Modeli Çatlak Mekanizması

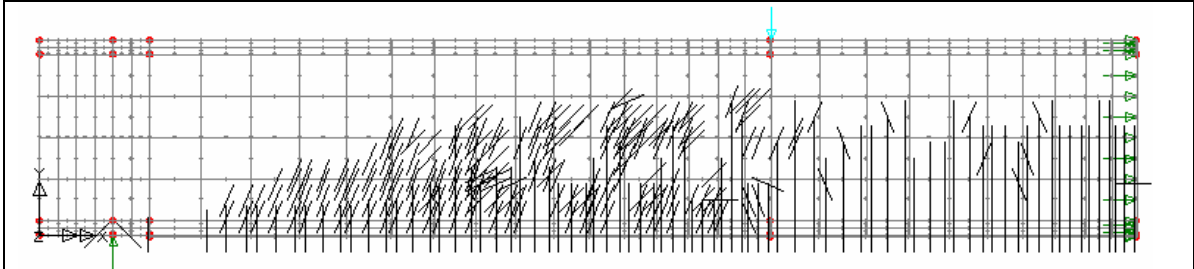
### C0 tipi sayısal kiriş modeli çatlak mekanizması



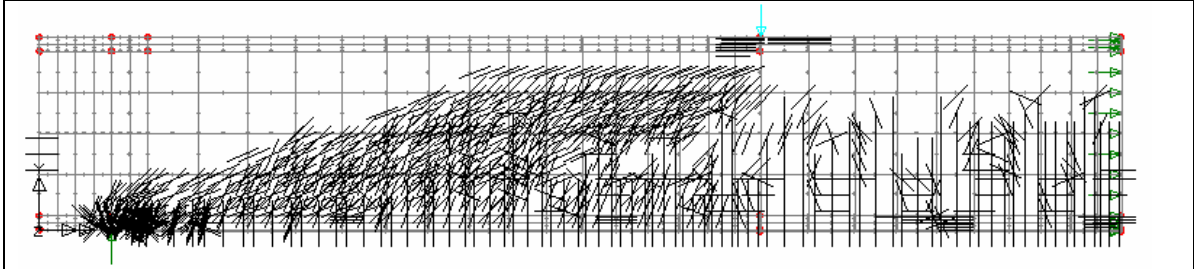
### C1 tipi sayısal kiriş modeli çatlak mekanizması



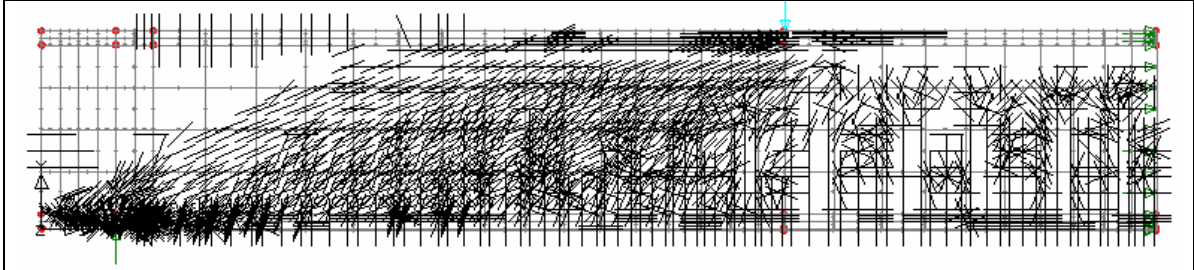
P=35 kN luk yükleme sonucu çatlak durumu



P=75 kN luk yükleme sonucu çatlak durumu



P=125 kN luk yükleme sonucu çatlak durumu

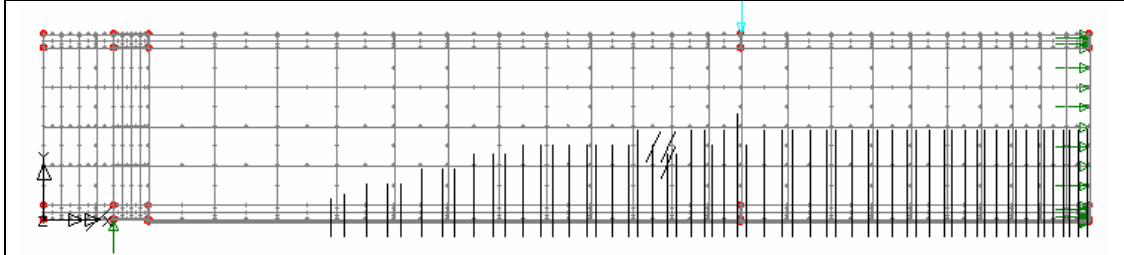


P=200 kN luk yükleme sonucu çatlak durumu

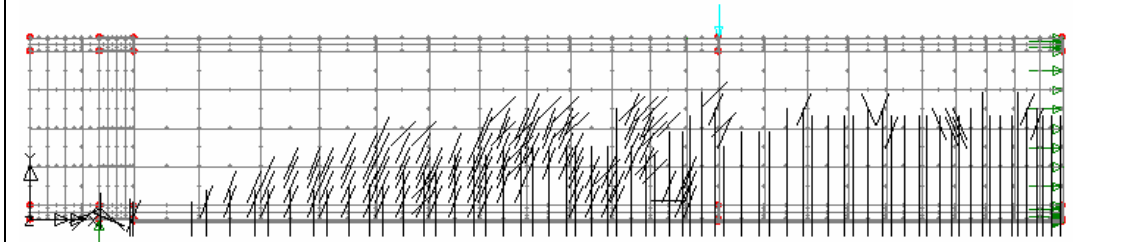


P=300 kN luk yükleme sonucu çatlak durumu

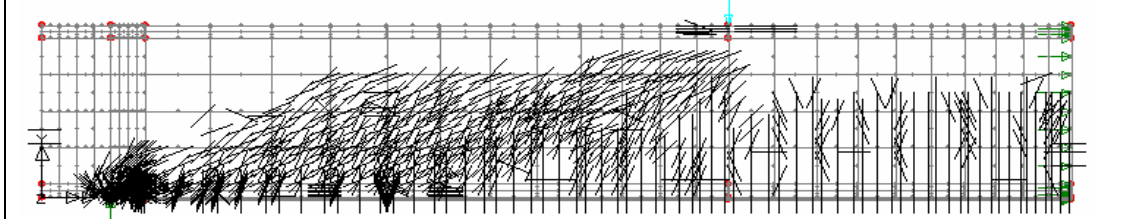
### C2 tipi sayısal kiriş modeli oluşan çatlak mekanizması



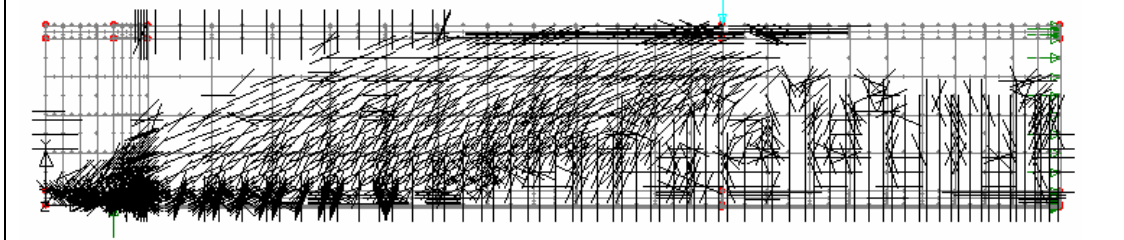
P=35 KN luk yükleme sonucu çatlak durumu



P=75 KN luk yükleme sonucu çatlak durumu



P=125 KN luk yükleme sonucu çatlak durumu

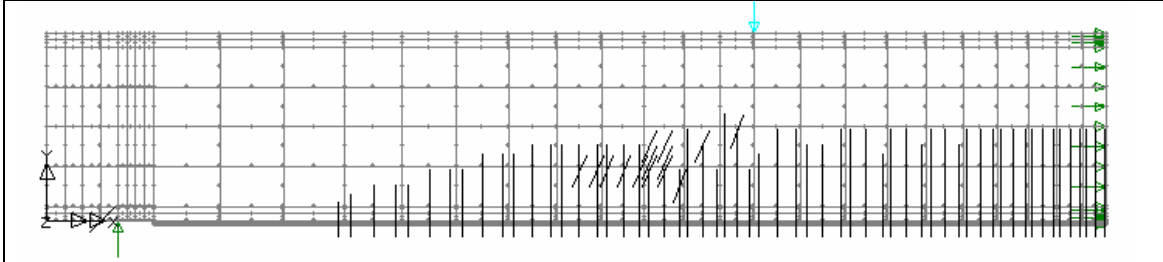


P=200 KN luk yükleme sonucu çatlak durumu

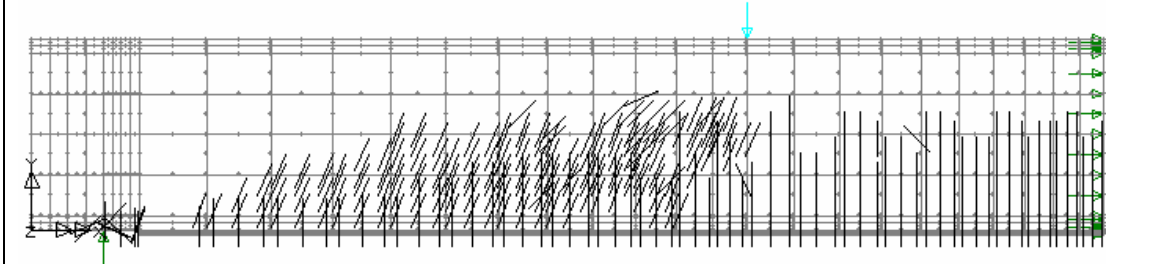


P=300 KN luk yükleme sonucu çatlak durumu

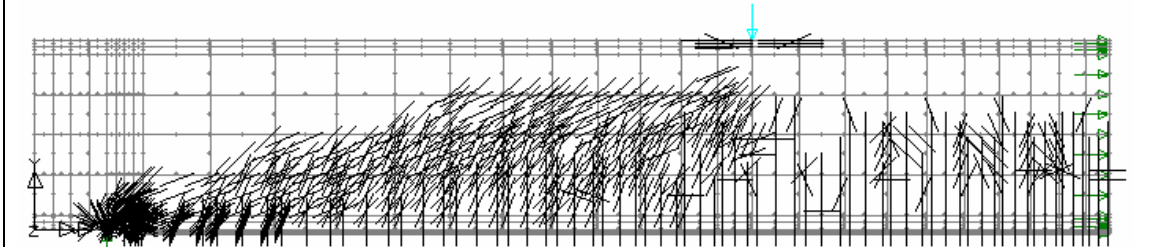
### C3 tipi sayısal kiriş modeli çatlak mekanizması



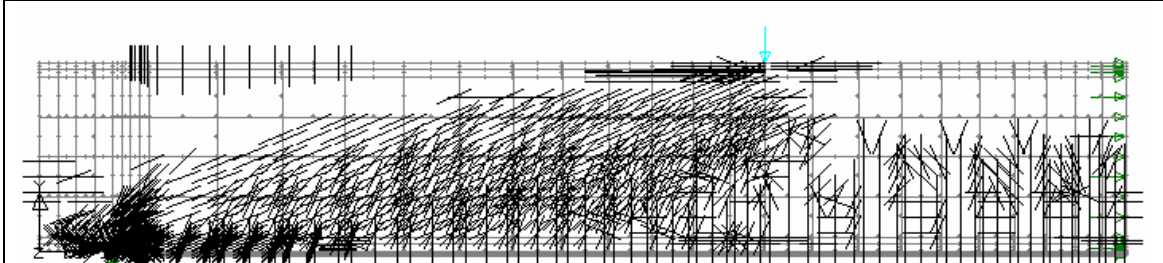
P=35 kN luk yükleme sonucu çatlak durumu



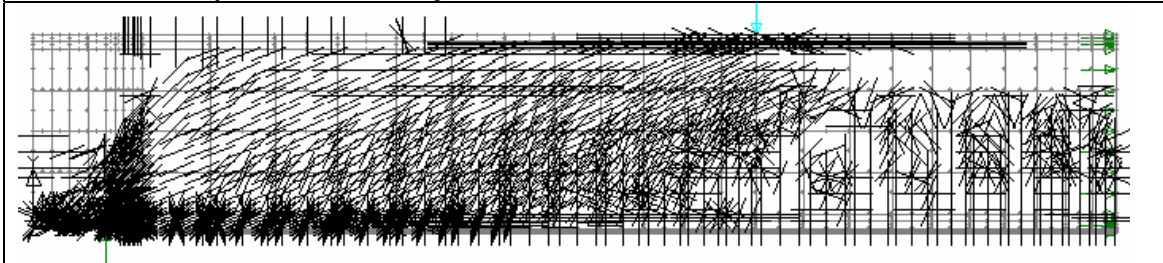
P=75 kN luk yükleme sonucu çatlak durumu



P=1255 kN luk yükleme sonucu çatlak durumu



P=200 kN luk yükleme sonucu çatlak durumu

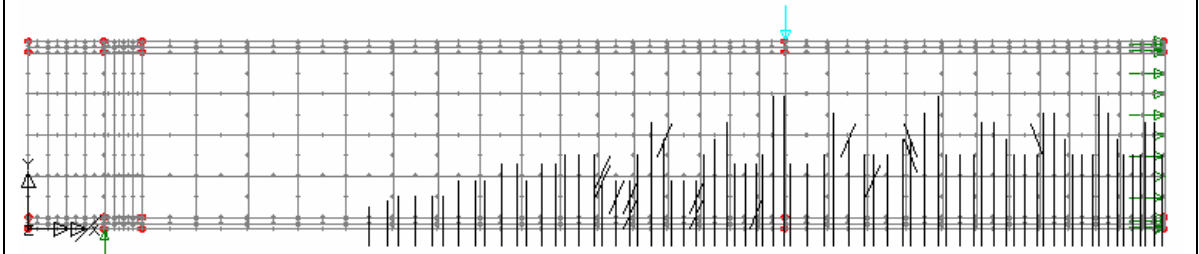


P=300 kN luk yükleme sonucu çatlak durumu

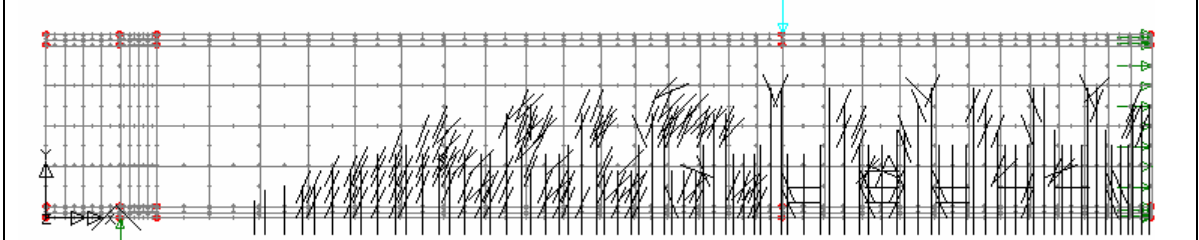


## EK -D Tipi Sayısal Kiriş Modeli Çatlak Mekanizmaları

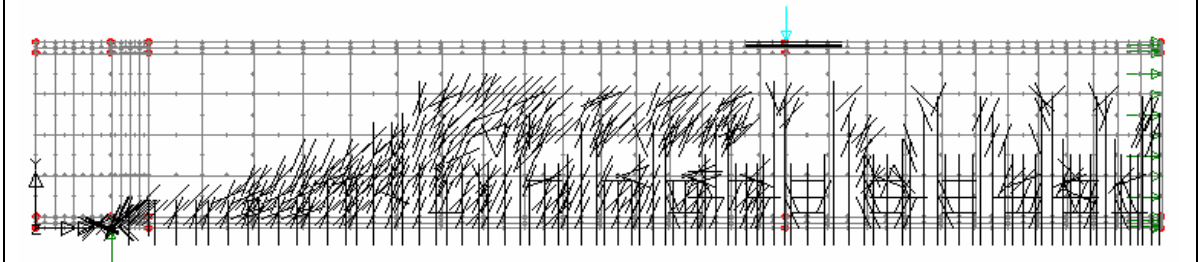
### D0 tipi sayısal kiriş modeli çatlak mekanizması



P=40KN luk yükleme sonucu çatlak durumu



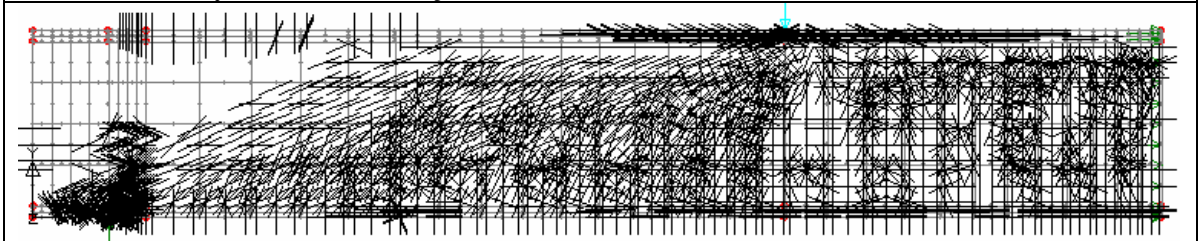
P=75 KN luk yükleme sonucu çatlak durumu



P=125 KN luk yükleme sonucu çatlak durumu

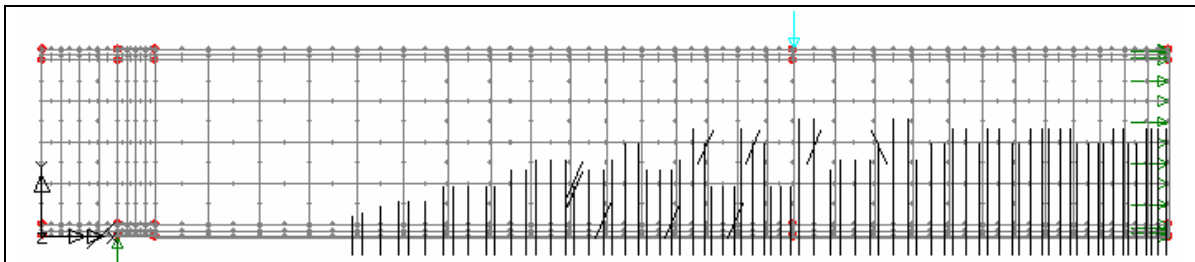


P=175 KN luk yükleme sonucu çatlak durumu

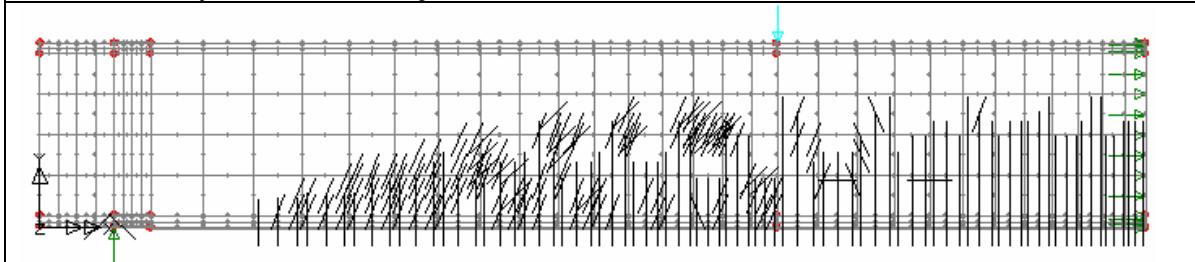


P=200 KN luk yükleme sonucu çatlak durumu

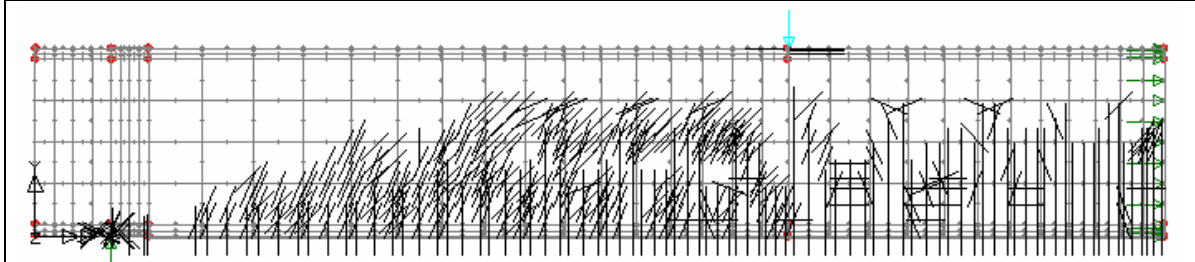
### D1 tipi sayısal kiriş modeli çatlak mekanizması



P=45 kN luk yükleme sonucu çatlak durumu



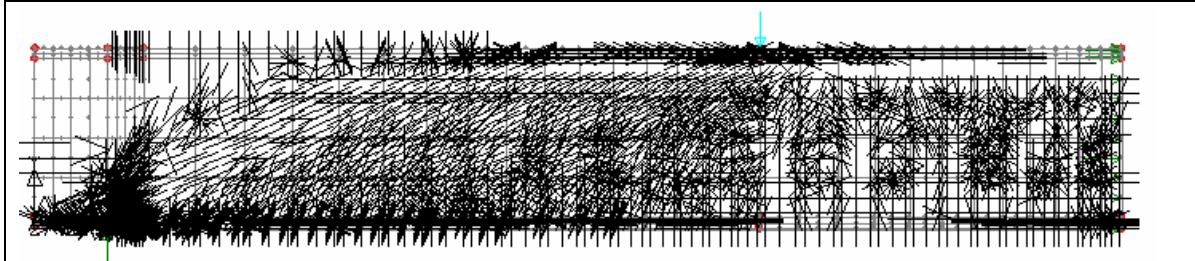
P=75 kN luk yükleme sonucu çatlak durumu



P=125 kN luk yükleme sonucu çatlak durumu

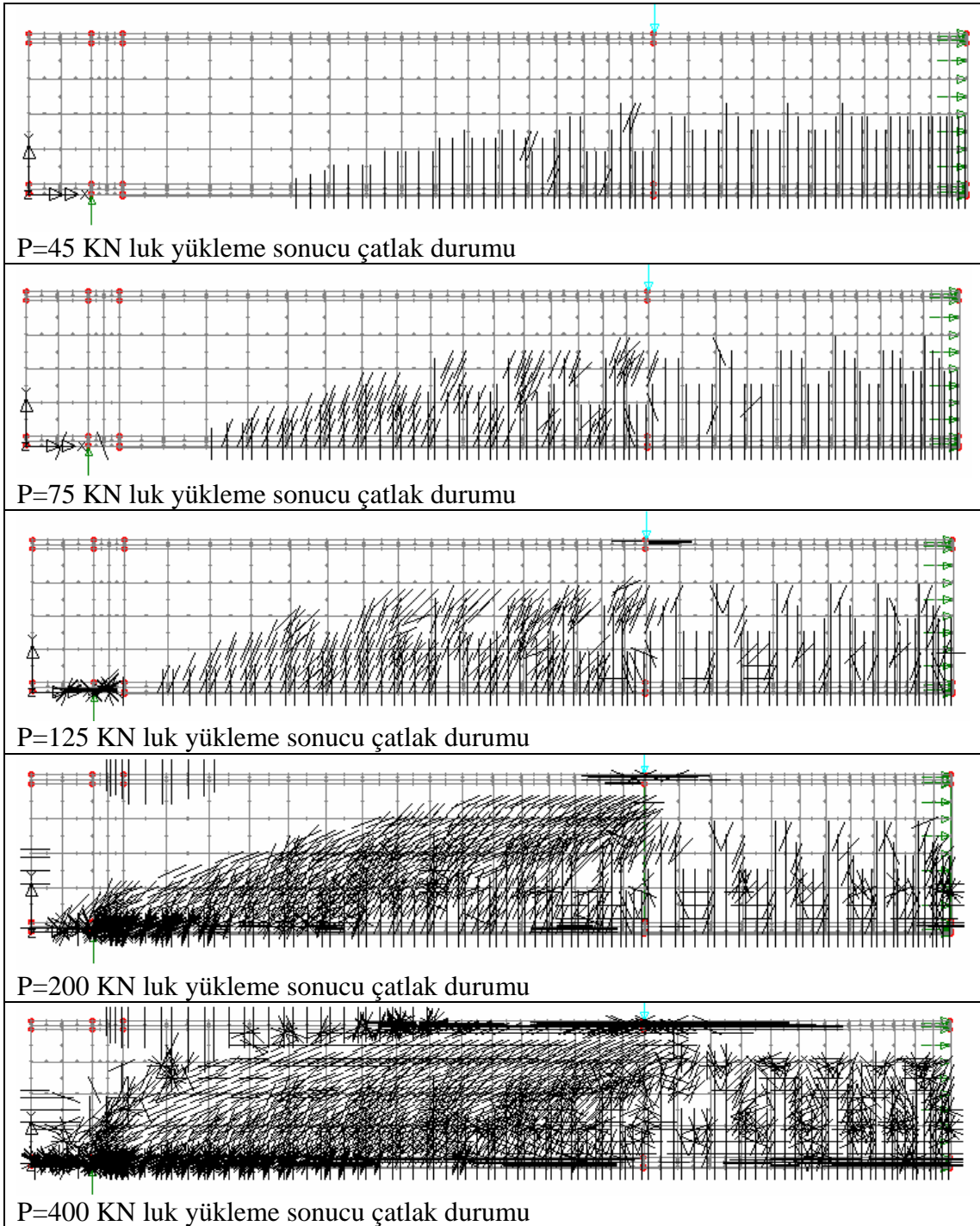


P=200 kN luk yükleme sonucu çatlak durumu

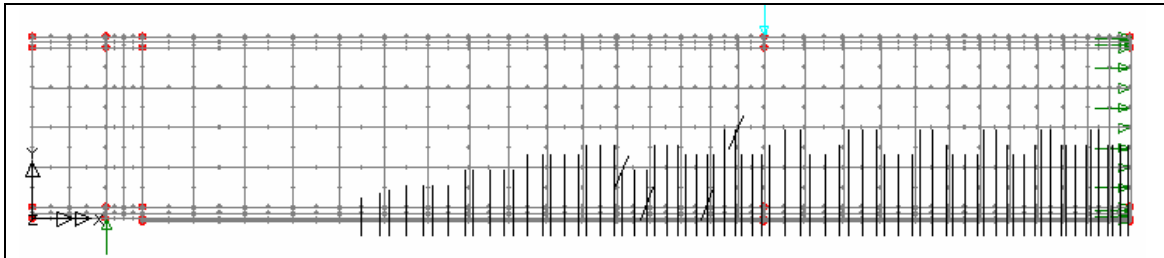


P=400 kN luk yükleme sonucu çatlak durumu

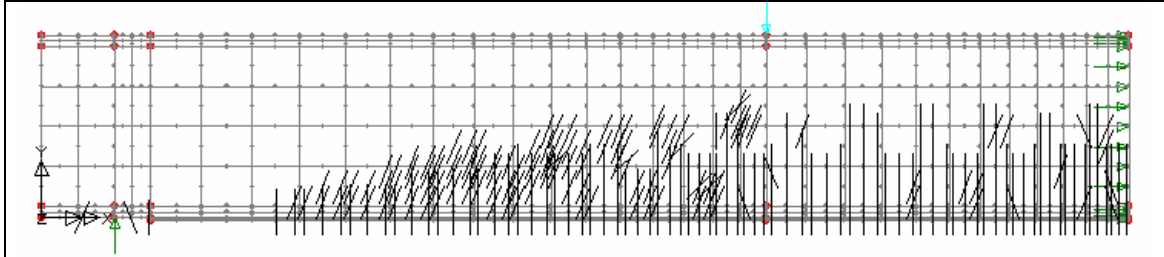
## D2 tipi sayısal kiriş modeli çatlak mekanizması



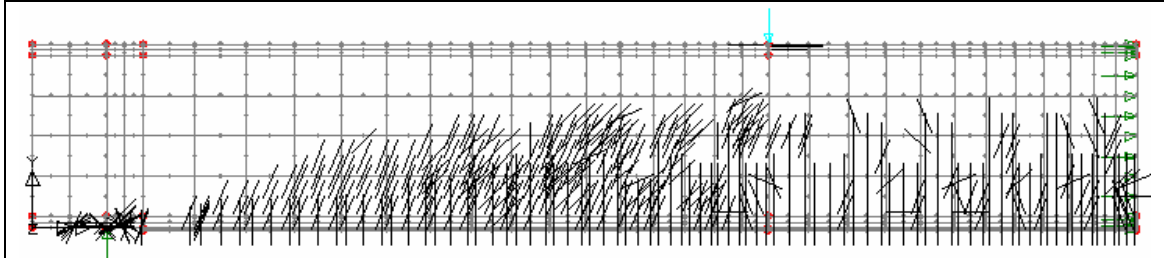
### D3 tipi sayısal kiriş modeli çatlak mekanizması



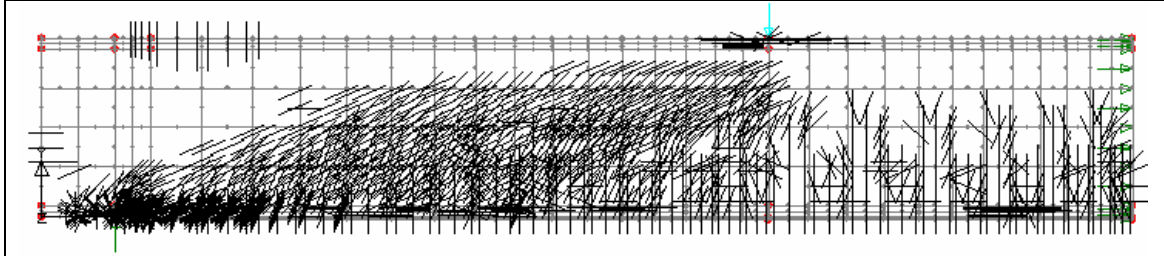
P=45 KN luk yükleme sonucu çatlak durumu



P=75 KN luk yükleme sonucu çatlak durumu



P=125 KN luk yükleme sonucu çatlak durumu



P=200 KN luk yükleme sonucu çatlak durumu



P=400 KN luk yükleme sonucu çatlak durumu

## ÖZGEÇMİŞ

Necati MERT, 10 Kasım 1969 tarihinde Sakarya ili Adapazarı ilçesinde doğdu. İlk öğrenimini Adapazarı Mithatpaşa İlköğretim okulunda(1984), Lise öğrenimini ise Adapazarı Ali Dilmen Lisesinde tamamladı (1987). 1989 yılında girdiği İ.T.Ü. Sakarya Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nden 1993 yılında mezun oldu. Aynı yıl Dumlupınar Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümüne Araştırma Görevlisi olarak atandı. 1993-1994 yılları arasında İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü'nde yüksek lisans yabancı dil hazırlık bölümü bitirdi. 1994-1998 yılları arasında Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'nde yüksek lisans eğitimi tamamladı. 1996 yılında Sakarya Üniversitesi İnşaat Mühendisliği bölümüne araştırma görevlisi olarak atandı ve halen bu görevini sürdürmektedir.