

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

**CFRP SARGILI BETONARME KOLONLARIN
DAVRANIŞININ İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İlker SUBAŞI

Enstitü Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

Enstitü Bilim Dalı : YAPI

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Naci ÇAĞLAR

Ekim 2018

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

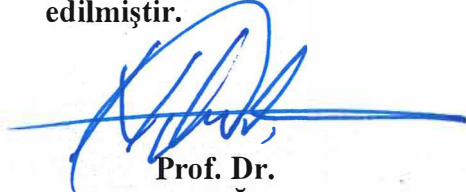
**CFRP SARGILI BETONARME KOLONLARIN
DAVRANIŞININ İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İlker SUBAŞI

Enstitü Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

Bu tez 05/ 10/ 2018 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği ile kabul edilmiştir.



Prof. Dr.
Naci ÇAĞLAR
Jüri Başkanı



Dr. Öğr. Üyesi
Zehra Şule GARİP
Üye



Dr. Öğr. Üyesi
Hakan ÖZTÜRK
Üye

BEYAN

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.

İlker SUBAŞI

05.10.2018

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca değerli bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım, yapılmış olan tez çalışmasının planlanmasından yazılmasına kadar tüm aşamalarında bana danışmanlık ederek bilgi ve tecrübeleriyle beni yönlendiren ve aydınlatan değerli danışmanım Prof. Dr. Naci ÇAĞLAR'a teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans eğitimim boyunca yardımlarını ve desteklerini benden esirgemeyen başta ailem olmak üzere Yüksek İnşaat Mühendisi Erkan BİÇİCİ, Yüksek İnşaat Mühendisi Nadhr ALOLABİ, Yüksek İnşaat Mühendisi Nurdan KÖROĞLU, Arş. Gör. Rojda ORMAN SUBAŞI ve Dr. Öğretim Üyesi Mehmet PALANCI'ya teşekkürü borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	iv
ŞEKİLLER LİSTESİ	vii
TABLolar LİSTESİ	xi
ÖZET	xii
SUMMARY	xiii
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ	1
1.1. Literatürde Yapılan Çalışmalar.....	2
1.2. Tezin Kapsamı ve Amacı	6
1.3. Tezin Organizasyonu.....	7
BÖLÜM 2.	
BETONARME KOLONLARIN FİBER TAKVİYELİ POLİMERLER İLE GÜÇLENDİRİLMESİ	9
BÖLÜM 3.	
MOMENT-EĞRİLİK İLİŞKİSİ.....	15
3.1. Moment Eğrilik İlişkisinin Belirlenmesi.....	16
3.2. Malzeme Modelleri	18
3.2.1. FRP İle Sargılanmamış Beton Malzeme Modeli.....	18
3.2.2. FRP İle Sargılanmış Beton Malzeme Modeli.....	22
3.2.3. FRP Malzeme Modeli.....	25

3.2.4. Donatı Çeliği Modeli.....	25
BÖLÜM 4.	
OPENSEES SONLU ELEMEN MODELİ	26
4.1. OpenSees Sonlu Eleman Modelinin Deneysel Çalışmalarla Karşılaştırılması.....	27
BÖLÜM 5.	
SAYISAL ÇALIŞMA.....	32
BÖLÜM 6.	
SONUÇ VE ÖNERİLER	59
6.1. Sonuçlar	59
6.2. Öneriler	60
KAYNAKLAR.....	61
ÖZGEÇMİŞ	64

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

A_g	: Kolon kesit alanı
A_s	: Toplam boyuna donatı alanı
A_{sx}	: X doğrultusundaki etriye alanı
A_{sy}	: Y doğrultusundaki etriye alanı
AFRP	: Aramid fiber takviyeli polimer
b	: Kolon kesit genişliği
b_c	: X doğrultusundaki çekirdek beton boyutu
c	: Tarafsız eksen derinliği
CFRP	: Karbon fiber takviyeli polimer
D	: Dikdörtgen kesitler için eşdeğer daire çapı
d_c	: Y doğrultusundaki çekirdek beton boyutu
$d\phi$	: Elastik eğride iki komşu nokta arasındaki açı
dx	: Elastik eğride iki komşu nokta arasındaki mesafe
E_c	: Betonun elastisite modülü
E_{sec}	: Betonun sekant modülü
E_j	: FRP malzemesinin elastisite modülü
f_c	: Betonun eksenel gerilmesi
f'_{cc}	: Sargılı betonun maksimum basınç dayanımı
f'_{co}	: Sargısız betonun basınç dayanımı
f'_{cu}	: Betonun nihai dayanımı
f_{lu}	: FRP'nin nihai koşullardaki sınırlandırılmış yanal gerilmesi
f_{fu}	: FRP malzemesinin kopma anındaki eksenel gerilmesi
f'_l	: Kolon kesitinin sınırlandırılmış etkili yanal gerilmesi
f'_{lu}	: FRP'nin nihai koşullardaki sınırlandırılmış etkili yanal gerilmesi
f'_{lx}	: X doğrultusundaki sınırlandırılmış etkili yanal gerilme

f'_{ly}	: Y doğrultusundaki sınırlandırılmış etkili yanal gerilme
FRP	: Fiber takviyeli polimer
f_{ju}	: FRP malzemesinin çekme dayanımı
f_{su}	: Donatının kopma anındaki eksenel gerilmesi
f_{sy}	: Donatının akma anındaki eksenel gerilmesi
f_t	: FRP'nin aktifleşmeye başladığı durumdaki eksenel gerilme
f_{yh}	: Etriyenin akma dayanımı
GFRP	: Cam fiber takviyeli polimer
GPa	: Giga Pascal
h	: Kolon kesitinin derinliği
K	: Eğrilik
k_e	: Sınırlandırma etkililik katsayısı
K_i	: Belirli bir i anındaki eğrilik değeri
kN	: Kilonewton
m	: Metre
M_i	: Belirli bir i anında kolona etki eden moment
mm	: Milimetre
MPa	: Mega Pascal
N	: Eksenel kuvvet
n	: Boyuna donatılar arasındaki mesafe sayısını
N_b	: Dengeli eksenel kuvvet
N_{dm}	: Düşey yükler ve deprem yüklerinin etkisi altında hesaplanan eksenel basınç kuvvetlerinin en büyüğü
N_{max}	: Kolonun taşıyabileceği maksimum eksenel kuvvet
N_1	: Kolonun taşıyabileceği maksimum eksenel kuvvetin 0,1 katı
N_2	: Kolonun taşıyabileceği maksimum eksenel kuvvetin 0,42 katı
OpenSees	: Open system for earthquake engineering simulation
rad	: Radyan
r_c	: Kolon kesiti köşe yarıçapı
s	: Komşu iki etriye arasındaki etriye merkezinden etriye merkezine olan mesafe
s'	: Komşu iki etriye arasındaki temiz mesafe

TDY2007	: Türk Deprem Yönetmeliği 2007
t_j	: FRP malzemesinin kalınlığı
x_c	: Betonda meydana gelen birim şekildeğiştirmenin maksimum beton basınç dayanımına denk gelen birim şekildeğiştirmeye oranı
w_i'	: Komşu iki boyuna donatı arasındaki temiz mesafe
ϵ_c	: Birim deformasyon
ϵ_{cc}	: Sargılı betonun maksimum basınç dayanımına ulaştığı andaki birim deformasyon
ϵ_{ci}	: Belirli bir i anında basınç bölgesinin en dış lifindeki birim deformasyon
ϵ_{co}	: Sargısız betonun maksimum basınç dayanımına ulaştığı andaki birim deformasyon
ϵ_{cu}	: Sargılı betonun nihai durumdaki birim deformasyonu
ϵ_{su}	: Donatının kopma anındaki birim deformasyonu
ϵ_{fu}	: FRP malzemesinin kopma anındaki birim deformasyonu
ϵ_{sp}	: Sargısız betonun yapabileceği maksimum birim deformasyon
ϵ_{sy}	: Donatının akma anındaki birim deformasyonu
ϵ_{s1}	: Çekme bölgesindeki donatının birim deformasyonu
ϵ_{s2}	: Basınç bölgesindeki donatının birim deformasyonu
ϵ_t	: FRP malzemesinin aktif hale geçtiği anda betonda meydana gelen birim deformasyon
ϵ_{jt}	: FRP malzemesinin aktif hale geçtiği noktadaki birim deformasyon değeri
ρ	: Elastik eğride iki komşu noktanın arasındaki açı ile tarafsız eksen arasındaki mesafe
ρ_j	: FRP malzemesinin hacimsel oranı
ρ_{sh}	: Enine donatının hacimsel oranı
ρ_l	: Boyuna donatı oranı
ρ_x	: X doğrultusundaki etriye oranı
ρ_y	: Y doğrultusundaki etriye oranı

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. AFAD, DowAKSA ve Prof. Dr. Alper İlki ve ekibinin gerçekleştirmiş olduğu deneysel çalışma.....	10
Şekil 2.2. Yaygın kullanılan FRP çeşitleri [18].....	11
Şekil 2.3. FRP plaka uygulaması [20].....	12
Şekil 2.4. FRP plaka uygulaması [20].....	12
Şekil 2.5. FRP kumaş uygulaması [20].....	13
Şekil 2.6. FRP kumaş uygulaması [20].....	13
Şekil 2.7. FRP kumaş uygulaması [20].....	14
Şekil 2.8. Betonarme kolonlara FRP uygulaması [21].....	14
Şekil 3.1. Eksenel yük ve eğilme etkisi altındaki eleman parçası ve kesitin birim deformasyon dağılımı.....	16
Şekil 3.2. Betonarme kolon kesit detayı.....	19
Şekil 3.3. FRP malzemesinin gerilme-birim deformasyon ilişkisi.....	25
Şekil 3.4. Donatı çeliğinin gerilme-birim deformasyon ilişkisi.....	25
Şekil 4.1. OpenSees programında tanımlanan kolon kesiti [23].....	26
Şekil 4.2. Iacobucci ve ark.'nın [10] yaptıkları deneysel çalışmada kullanılan kolon kesiti.....	28
Şekil 4.3. Iacobucci ve ark.'nın ASC-1NS isimli deneysel çalışmasının OpenSees ile karşılaştırılması.....	29
Şekil 4.4. Iacobucci ve ark.'nın ASC-2NS isimli deneysel çalışmasının OpenSees ile karşılaştırılması.....	29
Şekil 4.5. Iacobucci ve ark.'nın ASC-3NS isimli deneysel çalışmasının OpenSees ile karşılaştırılması.....	30
Şekil 4.6. Iacobucci ve ark.'nın ASC-4NS isimli deneysel çalışmasının OpenSees ile karşılaştırılması.....	30
Şekil 4.7. Iacobucci ve ark.'nın ASC-5NS isimli deneysel çalışmasının OpenSees	

ile karşılaştırılması.....	31
Şekil 4.8. Iacobucci ve ark.'nın ASC-6NS isimli deneysel çalışmasının OpenSees ile karşılaştırılması.....	31
Şekil 5.1. S420 donatı çeliğine ait gerilme-birim deformasyon grafiği.....	35
Şekil 5.2. Analizlerde kullanılan kolon kesitleri.....	35
Şekil 5.3. Güçlendirilmemiş 350x350 kolonun dengeli eksenel yük değerinin altında kuvvet etki etmesi ile elde edilen moment-eğrilik ilişkisi.....	36
Şekil 5.4. Güçlendirilmemiş 350x350 kolonun dengeli eksenel yük değerinin üzerinde kuvvet etki etmesi ile elde edilen moment-eğrilik ilişkisi.....	36
Şekil 5.5. Güçlendirilmemiş 450x450 kolonun dengeli eksenel yük değerinin altında kuvvet etki etmesi ile elde edilen moment-eğrilik ilişkisi.....	37
Şekil 5.6. Güçlendirilmemiş 450x450 kolonun dengeli eksenel yük değerinin üzerinde kuvvet etki etmesi ile elde edilen moment-eğrilik ilişkisi.....	37
Şekil 5.7. Güçlendirilmemiş 550x550 kolonun dengeli eksenel yük değerinin altında kuvvet etki etmesi ile elde edilen moment-eğrilik ilişkisi.....	38
Şekil 5.8. Güçlendirilmemiş 550x550 kolonun dengeli eksenel yük değerinin üzerinde kuvvet etki etmesi ile elde edilen moment-eğrilik ilişkisi.....	38
Şekil 5.9. 1mm CFRP ile güçlendirilmiş 350x350 kolonun eksenel yük düzeyi düşük kuvvet etki etmesi ile elde edilen moment-eğrilik ilişkisi.....	39
Şekil 5.10. 1mm CFRP ile güçlendirilmiş 350x350 kolonun eksenel yük düzeyi yüksek kuvvet etki etmesi ile elde edilen moment-eğrilik ilişkisi.....	39
Şekil 5.11. 1mm CFRP ile güçlendirilmiş 450x450 kolonun eksenel yük düzeyi düşük kuvvet etki etmesi ile elde edilen moment-eğrilik ilişkisi.....	40
Şekil 5.12. 1mm CFRP ile güçlendirilmiş 450x450 kolonun eksenel yük düzeyi yüksek kuvvet etki etmesi ile elde edilen moment-eğrilik ilişkisi.....	40
Şekil 5.13. 1mm CFRP ile güçlendirilmiş 550x550 kolonun eksenel yük düzeyi düşük kuvvet etki etmesi ile elde edilen moment-eğrilik ilişkisi.....	41
Şekil 5.14. 1mm CFRP ile güçlendirilmiş 550x550 kolonun eksenel yük düzeyi yüksek kuvvet etki etmesi ile elde edilen moment-eğrilik ilişkisi.....	41
Şekil 5.15. 2mm CFRP ile güçlendirilmiş 350x350 kolonun eksenel yük düzeyi düşük kuvvet etki etmesi ile elde edilen moment-eğrilik ilişkisi.....	42
Şekil 5.16. 2mm CFRP ile güçlendirilmiş 350x350 kolonun eksenel yük düzeyi	

yüksek kuvvet etki etmesi ile elde edilen moment-eğrilik ilişkisi.....	42
Şekil 5.17. 2mm CFRP ile güçlendirilmiş 450x450 kolonun eksenel yük düzeyi düşük kuvvet etki etmesi ile elde edilen moment-eğrilik ilişkisi.....	43
Şekil 5.18. 2mm CFRP ile güçlendirilmiş 450x450 kolonun eksenel yük düzeyi yüksek kuvvet etki etmesi ile elde edilen moment-eğrilik ilişkisi.....	43
Şekil 5.19. 2mm CFRP ile güçlendirilmiş 550x550 kolonun eksenel yük düzeyi düşük kuvvet etki etmesi ile elde edilen moment-eğrilik ilişkisi.....	44
Şekil 5.20. 2mm CFRP ile güçlendirilmiş 550x550 kolonun eksenel yük düzeyi yüksek kuvvet etki etmesi ile elde edilen moment-eğrilik ilişkisi.....	44
Şekil 5.21. 3mm CFRP ile güçlendirilmiş 350x350 kolonun eksenel yük düzeyi düşük kuvvet etki etmesi ile elde edilen moment-eğrilik ilişkisi.....	45
Şekil 5.22. 3mm CFRP ile güçlendirilmiş 350x350 kolonun eksenel yük düzeyi yüksek kuvvet etki etmesi ile elde edilen moment-eğrilik ilişkisi.....	45
Şekil 5.23. 3mm CFRP ile güçlendirilmiş 450x450 kolonun eksenel yük düzeyi düşük kuvvet etki etmesi ile elde edilen moment-eğrilik ilişkisi.....	46
Şekil 5.24. 3mm CFRP ile güçlendirilmiş 450x450 kolonun eksenel yük düzeyi yüksek kuvvet etki etmesi ile elde edilen moment-eğrilik ilişkisi.....	46
Şekil 5.25. 3mm CFRP ile güçlendirilmiş 550x550 kolonun eksenel yük düzeyi düşük kuvvet etki etmesi ile elde edilen moment-eğrilik ilişkisi.....	47
Şekil 5.26. 3mm CFRP ile güçlendirilmiş 550x550 kolonun eksenel yük düzeyi yüksek kuvvet etki etmesi ile elde edilen moment-eğrilik ilişkisi.....	47
Şekil 5.27. Beton basınç dayanımı 20 MPa ve eksenel yük düzeyi düşük betonarme kolonlarda moment-eğrilik ilişkisi (350x350).....	49
Şekil 5.28. Beton basınç dayanımı 20 MPa ve eksenel yük düzeyi yüksek betonarme kolonlarda moment-eğrilik ilişkisi (350x350).....	49
Şekil 5.29. Beton basınç dayanımı 20 MPa ve eksenel yük düzeyi düşük betonarme kolonlarda moment-eğrilik ilişkisi (450x450).....	50
Şekil 5.30. Beton basınç dayanımı 20 MPa ve eksenel yük düzeyi yüksek betonarme kolonlarda moment-eğrilik ilişkisi (450x450).....	50
Şekil 5.31. Beton basınç dayanımı 20 MPa ve eksenel yük düzeyi düşük betonarme kolonlarda moment-eğrilik ilişkisi (550x550).....	52
Şekil 5.32. Beton basınç dayanımı 20 MPa ve eksenel yük düzeyi yüksek	

betonarme kolonlarda moment-eğrilik ilişkisi (550x550).....	52
Şekil 5.33. Beton basınç dayanımı 35 MPa ve eksenel yük düzeyi düşük betonarme kolonlarda moment-eğrilik ilişkisi (350x350).....	54
Şekil 5.34. Beton basınç dayanımı 35 MPa ve eksenel yük düzeyi yüksek betonarme kolonlarda moment-eğrilik ilişkisi (350x350).....	54
Şekil 5.35. Beton basınç dayanımı 35 MPa ve eksenel yük düzeyi düşük betonarme kolonlarda moment-eğrilik ilişkisi (450x450).....	56
Şekil 5.36. Beton basınç dayanımı 35 MPa ve eksenel yük düzeyi yüksek betonarme kolonlarda moment-eğrilik ilişkisi (450x450).....	56
Şekil 5.37. Beton basınç dayanımı 35 MPa ve eksenel yük düzeyi düşük betonarme kolonlarda moment-eğrilik ilişkisi (550x550).....	58
Şekil 5.38. Beton basınç dayanımı 35 MPa ve eksenel yük düzeyi yüksek betonarme kolonlarda moment-eğrilik ilişkisi (550x550).....	58

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 4.1. Iacobucci ve ark.'nın [10] yaptıkları deneysel çalışmanın özellikleri...	28
Tablo 5.1. Analizi yapılan parametre değerleri.....	32
Tablo 5.2. CFRP'nin mekanik özellikleri [18].....	33
Tablo 5.3. Hesaplanan N_{max} , N_b , N_{dm} ve seçilen normal kuvvet değerleri.....	34

ÖZET

Anahtar Kelimeler: CFRP, fiber takviyeli polimerler, betonarme kolon, güçlendirilmiş betonarme kolon, sonlu elemanlar, OpenSees.

Son yıllarda yaşanan depremlerin neden olduğu hasarlar ve yıkımlar betonarme yapıların yetersizliğini ortaya çıkarmıştır. Hasarlı betonarme yapıların yıkılması yerine taşıyıcı sistemlerinin güçlendirilmesi ekonomik şartlar göz önünde bulundurulduğu zaman daha rasyonel bir seçenektir.

Bu çalışmada; OpenSees sonlu eleman modeli yardımıyla güçlendirilmemiş ve CFRP ile güçlendirilmiş betonarme kolonların moment-eğrilik ilişkileri ile davranışları incelenmiştir. Moment-eğrilik ilişkileri incelenirken, betonarme kolonların dengeli eksenel kuvvet değerinin altındaki ve üstündeki iki farklı değeri için inceleme yapılmıştır. Ayrıca betonarme kare kolonların boyutları, güçlendirilmiş betonarme kolonların CFRP kalınlığı ve beton basınç dayanımı parametrik çalışmanın değişkenleri olarak seçilmiştir.

Elde edilen moment-eğrilik ilişkileri karşılaştırılarak incelenmiştir. Bu çalışma sonucunda elde edilen moment-eğrilik ilişkileri yardımıyla beton basınç dayanımının, CFRP kalınlığının (0 mm'den 3 mm kadar), eksenel kuvvet düzeyinin ve kolon boyutunun güçlendirilmiş betonarme kolonların davranışı üzerinde etkileri belirlenmiştir.

INVESTIGATION OF THE BEHAVIOR OF CFRP WRAPPED RC COLUMNS

SUMMARY

Keywords: CFRP, fiber reinforced polymers, reinforced concrete, concrete column strengthening, finite elements, OpenSees

The damages and demolitions caused by the earthquakes in recent years have revealed the inadequacy of reinforced concrete structures. The strengthening of bearing systems of the damaged reinforced concrete structures instead of destruction is a more rational option when economic conditions are considered.

In this study; Moment-curvature relationships of unreinforced and CFRP reinforced square concrete columns were investigated by using OpenSees finite element model. When examining moment-curvature relationships, two different values above and below the balanced axial force value of the reinforced column were examined. In addition, the parameters such as the dimensions of the reinforced concrete square columns, the CFRP thickness of the strengthening reinforced concrete columns and the concrete compressive strength were kept variable.

The obtained moment-curvature relationships were examined and compared. The effect of concrete compressive strength, CFRP thickness (from 0 mm to 3 mm), axial force level and column size on the behavior of strengthening reinforced concrete columns were determined with the help of the moment-curvature relations.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Ülkemizde gerçekleşen doğal afetlerin %66'sı depremlerden, %15'i sellerden, %10'u toprak kaymasından, %7'si kaya düşmesinden, %2'si meteorolojik olaylardan kaynaklanmakta olup, en fazla can ve mal kaybını beraberinde getiren doğal afet türünde depremlerdir [1]. Dünyanın en etkin deprem kuşaklarından birinin üzerinde bulunan ülkemizin topraklarının %92'si deprem bölgesi içinde bulunmakta olup, nüfusunun yaklaşık %95'i deprem tehlikesiyle yaşamaktadır [2]. Ülkemizdeki depremlerin yıkıcı etkisi göz önüne alındığında 1939 Erzincan depremi, 1999 İzmit depremi ve 1999 Düzce depremleri ilk sıralarda yer almaktadır.

17 Ağustos 1999 Marmara depreminde ülkemizde yaklaşık 17000 kişi hayatını kaybetmiş olup, yaklaşık 20 milyar dolarlık maddi hasar oluşmuştur. Yaşanan bu depremler sonucunda incelenen betonarme yapıların yetersizlik sebebi olarak yetersiz sistem tasarımı, donatı düzenleme kusurları, işçilik hataları, düşük dayanımlı beton kullanımı, yetersiz malzeme kullanımı gibi kusurlar gösterilebilir. Yaşanan bu deprem sonucunda 66441 konut ve 10901 iş yeri ağır hasar, 67242 konut ve 9927 iş yeri orta hasar, 80160 konut ve 9712 iş yeri hafif hasar almıştır [3]. Bu veriler bizlere 17 Ağustos 1999 Marmara depremi öncesinde inşa edilmiş yapıların çokta güvenli olmadıklarını göstermektedir. Bu tür güvensiz yapılar için iki seçenek mevcuttur. Bunlardan birincisi mevcut yapıyı yıkıp yerine güvenli bir yapı oluşturmaktır. Bu işlem oldukça zaman alan ve maddiyat gerektiren bir süreçtir. İkinci alternatif ise güvensiz durumda bulunan mevcut yapıyı güçlendirme yöntemleriyle güvenli duruma getirmektir.

Yapının taşıyıcı sistemini oluşturan önemli elemanlardan biri olan kolonların güçlendirilmesinde en sık kullanılan yöntem mantolama tekniğidir. Mantolama betonarme mantolama, çelik levhalar ile mantolama ve fiber takviyeli polimer malzemeler ile mantolama olmak üzere üç şekilde uygulanmaktadır.

Fiber takviyeli polimerler (FRP) mevcut kolonların güçlendirilmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. FRP ile güçlendirilmiş bu kolonların dayanımında, rijitliğinde ve sünekliğinde artış gözlemlenmektedir [4]. Bir yapı elemanının davranışının belirlenebilmesi için iki seçenek mevcuttur. Birincisi yapı elemanı üzerinde deneysel çalışma yapmaktır. İkinci yöntem ise sayısal çalışma yöntemlerini kullanarak yapı elemanının davranışını belirlemektir. Sayısal çalışma yöntemleri kullanılırken yapı elemanını oluşturan malzeme özelliklerinin doğru bir şekilde yansıtılması oldukça önemlidir. Aksi takdirde doğru sonuca ulaşmak imkansız olacaktır.

1.1. Literatürde Yapılan Çalışmalar

Bu çalışma kapsamında FRP ile güçlendirilmiş ve güçlendirilmemiş betonarme kolonların davranışları inceleneceğinden, bu konuyla ilgili yapılan literatür araştırması sonucunda bulunan çalışmalardan bazıları aşağıda verilmektedir.

Mander ve ark. [5] yapmış oldukları çalışmada etriye yardımıyla sargılanmış ve sargılanmamış beton malzemesi için gerilme şekildeğiştirme modeli geliştirmişlerdir. Beton malzemesinin etriyeler yardımıyla sarılması, içinde boyuna donatılar barındırması, etriye adım mesafesi, etriye ve boyuna donatı çapları gibi parametreler sargılanmış beton malzeme modelinde etkilidir. Sargılanmamış beton malzeme modelinde ise betonun basınç dayanımı etkilidir. Geliştirilmiş olan gerilme şekildeğiştirme modeli Türk Deprem Yönetmeliği 2007 (TDY2007)'ye göre de kabul edilen beton malzeme modelidir. Geliştirilmiş olan bu malzeme modeli yapılmış olan bu çalışma boyunca FRP ile güçlendirilmemiş kolonların davranışlarının belirlenmesinde kullanılan beton malzeme modelidir.

Youssef ve ark. [6] yapmış oldukları çalışmada FRP ile sargılanmış beton malzemesi için gerilme şekildeğiştirme modeli geliştirmişlerdir. Geliştirilmiş olan bu model

karbon ve cam fiber takviyeli polimerler kullanılarak sargılanmış daire, dikdörtgen ve kare beton numuneleri üzerinde yapılmış deneysel çalışmalardan elde edilen verilere dayandırılmaktadır. Yapılmış olan deneysel çalışmalarda donatı kullanılmamıştır. Ancak geliştirilmiş olan gerilme şekil değiştirme modelinin formülasyonunda, boyuna donatı etkisi göz önüne alınmış iken enine donatı (ettriye) etkisi dikkate alınmamıştır. Gerilme şekil değiştirme modelini etkileyen faktörler arasında kesit geometrisi, kesitin sargılandığı FRP malzemesine ait karakteristik bilgiler, beton basınç dayanımı gibi faktörler bulunmaktadır. Geliştirilmiş olan bu malzeme modeli yapılmış olan bu çalışma boyunca FRP ile güçlendirilmiş kolonların davranışlarının belirlenmesinde kullanılan beton malzeme modelidir.

Pham ve Hadi [4] yaptıkları çalışmada FRP ile güçlendirilmiş kare ve dikdörtgen betonarme kolonlardaki beton malzemesinin davranışını hesaplamak için 190 adet FRP ile güçlendirilmiş dikdörtgen ve kare betonarme kolon üzerinde yapılmış deneyi göz önünde bulundurmuşlardır. Seçilmiş olan deneysel çalışmalar literatürde bulunan ve farklı isimlerin gerçekleştirmiş olduğu deneysel çalışmalardır. Geliştirmiş oldukları model belirli boyut aralığı ve belirli beton basınç dayanımı aralığında yapılmış deneyleri kapsamaktadır. Ayrıca incelenmiş olan deneysel çalışmalarda ve geliştirilmiş olan gerilme şekil değiştirme modelinin formülasyonunda donatı etkisi göz önünde bulundurulmamıştır. İncelenmiş olan deney sonuçları ile geliştirdikleri model arasında iyi bir korelasyon ilişkisi olduğunu göstermişlerdir. Ayrıca sargılamanın etkin olması amacıyla FRP ile sargılama sonucunda kesitlerde oluşan köşe yarıçapı için minimum bir değer önermişlerdir.

Wei ve Wu [7] yaptıkları çalışmada FRP ile sargılanmış dikdörtgen, kare ve dairesel kolonlar için ortak bir gerilme şekil değiştirme modeli önermişlerdir. Bu model önerilirken hem literatürde var olan deneysel çalışmalar hemde önceden geliştirilmiş olan ve bazı gerilme şekil değiştirme modelleri baz alınmıştır. İncelenmiş olan deneysel çalışmalar karbon takviyeli fiber polimer (CFRP), cam takviyeli fiber polimer (GFRP) ve aramid takviyeli fiber polimerleri (AFRP) içermektedir. İncelenmiş olan deneysel çalışmalar ile geliştirilmiş olan matematik model arasındaki hata oranları hesaplanmıştır. Hem deneysel çalışmalar hemde geliştirilen

matematik model arasındaki korelasyon ilişkisi göz önüne alınarak kendi geliştirmiş oldukları matematik modeli önermişlerdir.

Göksu ve ark. [8] yaptıkları çalışmada betonarme kolonların betonarme mantolama ile güçlendirilmesi ve CFRP sargılamasıyla güçlendirilmesi sonucunda değişen sismik davranışlarını araştırmışlardır. Elde ettikleri güçlendirilmiş betonarme kolon davranışlarına ait sonuçları ülkemizde tipik bir yapıya aktararak güçlendirmenin yapılar üzerindeki etkisi belirlenmeye çalışılmıştır. Güçlendirme etkisinin yapıya aktarım işlemi sonlu eleman modellemesi kullanarak yapılmıştır. Seçilmiş olan yapı örneği yapım eksikliklerini barındıran bir yapıdır. Betonarme kolonların CFRP ile sargılanması sonucunda dayanım ve yer değiştirme kapasitelerinde ciddi artış gözlemlenmiştir. Betonarme mantolama durumunda ise dayanım, rijitlik ve yer değiştirme kapasitesinde önemli bir artış gözlemlenmiştir. İncelenen kolonların moment-eğrilik ilişkilerine bakıldığında CFRP sargılaması sonucunda süneklikteki artışın, betonarme mantolama sonucunda ise rijitlikteki artışın belirginliği gözlemlenmektedir.

Hosseini ve ark. [9] çalışmasında CFRP ile güçlendirilmiş ve güçlendirilmemiş farklı sünekliğe sahip kolonları kendi arasında 3 farklı grupta incelemiştir. İlk grupta bulunan kolonlar Amerikan Beton Enstitüsünün ACI318-02 orta düzeydeki moment çerçevelerine göre dizayn edilmiş ve 3 kat CFRP ile sargılanmışlardır. İkinci grupta bulunan kolonlarda ACI318-02 orta düzeydeki moment çerçevelerine göre tasarlanmış olup, CFRP sargılaması içermemektedir. Son grupta bulunan betonarme kolonlar ise ACI318-02 özel moment çerçeveleri için tasarlanmıştır. Kolonların sabit eksenel yük ve artımlı yanal yük etkisi altındaki davranışları kuvvet yerdeğişimi ve moment-eğrilik ilişkisi olarak verilmiştir. Tasarım farklılığı bulunan betonarme kolonların dayanım ve süneklik açısından farkları incelenmiştir.

Iacobucci ve ark. [10] çalışmasında 1971 öncesinde inşa edilmiş yapılarda yeterli etriye bulunmaması sebebiyle deprem davranışlarının yetersiz olduğunu ayrıca ciddi hasar görmüş kolonlarında sismik etkilere karşı yetersiz olduğunu ifade etmişlerdir. Yetersiz betonarme kolonların güçlendirilmesinde, uygulamasının basit ve kolon

performasına katkısı yüksek olması sebebiyle CFRP sargılama malzemesi kullanılmıştır. CFRP ile güçlendirilmiş ve güçlendirilmemiş farklı değişkenleri barındıran kolon numuneleri hazırlanmıştır. Hazırlanan bu kolon numuneleri sabit eksenel yük ve artan yanal yük etkisi altında test edilmiştir. Elde edilen sonuçlar neticesinde CFRP ile güçlendirilmiş kolonların sünekliği yani enerji yutabilme kapasitelerinde, dayanımında ve rijitliğinde artış olduğu gösterilmiştir. Uygun şekilde güçlendirilmiş kolonların hasar görmeden önceki halinden bile daha iyi performans gösterebileceği belirtilmiştir.

Lo ve ark. [11] FRP ile güçlendirilmiş beton kolonlardaki gerilme şekildeğiştirme grafiğini etkileyen parametreler üzerinde bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmayı gerçekleştirmek amacıyla ilk olarak FRP ile sargılanmış kolonlar için sonlu eleman modeli geliştirmişlerdir. Geliştirmiş oldukları sonlu eleman modelini literatürde bulunan deneysel çalışmalar ile doğrulamışlardır. Sonlu eleman modelini kullanarak FRP ile sargılama sonucu dikdörtgen ve kare kesitlerin köşesinde oluşan daire yarıçapının etkisini ve kolon kesitlerinin en/boy oranının etkisini gerilme şekildeğiştirme grafikleri ve kesitlerde oluşan gerilme görselleriyle belirtmişlerdir. Yapılmış olan analizler sonucunda sargılama etkisinin köşe yarıçapının bulunduğu ve kesit merkezine yakın bölgelerde daha fazla etkin olduğunu göstermişlerdir. Ayrıca köşe yarıçapı arttırılarak FRP sargı malzemesinin etkinliğinin arttırılabileceği gözlemlenmektedir. Aynı zamanda kolon kesitinin en/boy oranının bire yakın olmasında FRP etkinliğini arttırmaktadır. Bu incelemeler sonucunda sonlu eleman yöntemiyle yapılan analizler ile deneysel çalışmaların tutarlılığında göstermişlerdir.

Guan [12] yapmış olduğu doktora tezinde FRP ile güçlendirilmiş betonarme kolonlar için gerilme şekildeğiştirme modeli geliştirmeyi amaçlamıştır. Yapmış olduğu çalışmayı dikdörtgen ve dairesel kolonlar için ayrı ayrı ele almıştır. Literatürde yaptığı çalışma sonucunda FRP ile sargılanmış beton malzeme modellerini ve FRP ile sargılanmış betonarme kolon modellerini ayrıntılı bir şekilde incelemiştir. İlk olarak sadece eksenel kuvvetin etkidiği, ikinci olarak eksenel kuvvetin ve eğilme momentinin aynı anda etkidiği ve son olarak eksenel kuvvet ile sismik yüklemenin etki ettiği durum ele alınmıştır. Literatürde bulunan çalışmalar ışığında her durum

için gerilme şekildeğiştirme modeli geliştirilmiştir. Bu modelleri geliştirirken sonlu eleman yöntemide kullanılmıştır. Tüm bu incelemeler sonucunda kendi sunmuş olduğu nümerik model ile yapılmış olan deneysel çalışmalar karşılaştırılmış ve sonuçların tutarlılığı gösterilmiştir.

1.2. Tezin Amacı ve Kapsamı

Yapılmış olan tez çalışması beton basınç dayanımının, betonarme kolon boyutunun, CFRP kalınlığının ve eksenel kuvvet düzeyinin CFRP ile güçlendirilmiş ve güçlendirilmemiş betonarme kare kolonların davranışı üzerindeki etkisini gözlemlemek amacıyla yapılmıştır.

Bu amaçla CFRP ile güçlendirilmiş betonarme kolonların davranışları moment-eğrilik ilişkisi yardımıyla incelenmiştir. İlk olarak literatürden CFRP ile güçlendirilmemiş ve güçlendirilmiş betonarme kolonlar üzerinde yapılan deneysel çalışma sonucunda elde edilmiş moment-eğrilik ilişkileri belirlenmiştir. Literatürden seçilmiş deneysel çalışma sonuçları ile OpenSees sonlu eleman modeli sonucunda elde edilen moment-eğrilik ilişkileri karşılaştırılmıştır. OpenSees sonlu eleman modeli ile deneysel çalışma sonuçlarının birbirine yakın olduğu gösterilmiştir. Doğrulanmış OpenSees sonlu eleman modeli kullanılarak parametrik bir çalışma gerçekleştirilmiştir. CFRP ile güçlendirilmiş kolonlarda beton malzemesi için literatürden Youssef ve ark.'nın [6] geliştirdiği FRP ile sargılanmış betonun gerilme şekildeğiştirme modeli kullanılmıştır. Sayısal çalışma aşamasında betonarme kolonların güçlendirilmesinde sık kullanılan CFRP malzemesi kullanılarak kare kolonların moment-eğrilik ilişkileri belirlenmiştir. Moment-eğrilik ilişkileri belirlenirken CFRP kalınlığı, beton basınç dayanımı, kolon kesit alanı değişken olarak seçilmiştir. Bu değişkenlerin yanı sıra kolonların davranışında belirleyici etkiye sahip olan eksenel kuvvet değeri de, kolonun güçlendirilmemiş hali baz alınarak dengeli eksenel kuvvet değerinin altında ve üstünde olmak üzere değişken olarak tutulmuştur. Elde edilen sonuçlar grafikler halinde verilmiş ve değerlendirilmiştir.

1.3. Tezin Organizasyonu

Yapılmış olan tez çalışması altı ana başlıktan oluşmaktadır. Bu ana başlıklar aşağıda kısaca verilmiştir.

Bölüm birde, ülkemizin deprem gerçeğiyle yaşadığı ve bu yüzden yapılmış olan ve yapılacak olan yapılarımızın depreme dayanıklı olması gerektiğinden, mevcut yapıların taşıyıcı sistemlerini güçlendirme tekniklerinden, fiber takviyeli polimer malzemeler ile kolonların güçlendirilmesinden ve bu konu üzerinde literatürde bulunan çalışmalardan, tezin kapsamı ve amacından, tezin organizasyonundan bahsedilmiştir.

Bölüm ikide, güçlendirmenin gereksiniminden, güçlendirme çeşitlerinden, FRP malzemesinin çeşitleri ve özelliklerinden, uygulanişından ve sağladığı avantajlardan bahsedilmiştir.

Bölüm üçte, moment-eğrilik ilişkisinin ne olduğu, hesaplanma şekli, ne ifade ettiğinden bahsedilmiştir. Elemanların davranışlarının belirlenmesindeki önemi vurgulanmış olup, moment-eğrilik ilişkisini etkileyen faktörler verilmiştir. Ayrıca bu tez kapsamında kullanılan malzeme modelleri de bu bölümde verilmektedir.

Bölüm dördte, moment-eğrilik ilişkisinin belirlenebilmesi amacıyla kullanılan OpenSees sonlu eleman modeli hakkında bilgi verilmiştir. Ayrıca OpenSees sonlu eleman modeli sonuçları literatürden seçilmiş olan deneysel çalışmalar ile karşılaştırılmıştır.

Bölüm beşte, OpenSees sonlu eleman modeli yardımıyla CFRP ile güçlendirilmiş kare kolonların davranışı moment-eğrilik ilişkisi kullanılarak incelenmektedir. Ayrıca eksenel kuvvet değeri, beton basınç dayanımı, CFRP kalınlığı ve kolon kesit alanı gibi parametrelerin CFRP ile güçlendirilmiş kare kolonların moment-eğrilik ilişkisine etkisi incelenmektedir.

Bölüm altıda, CFRP ile güçlendirilmiş kolonların davranışı hakkında elde edilen sonuçlar ve bu sonuçlar üzerinden yapılan öneriler verilmiştir.



BÖLÜM 2. BETONARME KOLONLARIN FİBER TAKVİYELİ POLİMERLER İLE GÜÇLENDİRİLMESİ

Hasar görmemiş yapı elemanlarına veya hasar görmüş yapı elemanlarına onarım işlemi yapıldıktan sonra performansının artırılması amacıyla yapılan işlemlere güçlendirme denilmektedir. Betonarme kolonlarda bu işlem eksenel yük, eğilme momenti ve kesme kuvveti taşıma kapasitesinin ilk durumuna göre üstüne çıkarılması anlamına gelmektedir. Yapılarda güçlendirme ihtiyacı yaşanan doğal afetler sonucu meydana gelen dayanım kaybı, yapının kullanım şeklinin değiştirilmesi, projenin uygulamaya aktarılırken yapılan işçilik hataları, düşük dayanımlı beton kullanımı gibi sebeplerden doğmaktadır [13].

Betonarme kolonların güçlendirilmesinde yaygın olarak betonarme mantolama tekniği, çelik levhalar ile mantolama tekniği ve fiber takviyeli polimer malzemeler ile mantolama tekniği kullanılmaktadır [14].

Güçlendirme yöntemlerinden FRP ile güçlendirme tekniğinin tercih edilmesinin başlıca sebepleri yapı elemanına uygulananın kolay olması, ekipman gerektirmemesi, elemanı kimyasal etkilere ve korozyondan koruması, yüksek mukavemet sağlaması, paslanmaması, manyetik alan oluşturmaması, hafif olması, kolonların eksenel yük taşıma kapasitesini ve yanal öteleme kabiliyetini artırması, mimari tasarımı bozmaması ve her türlü forma uygulanabilmesidir [15].

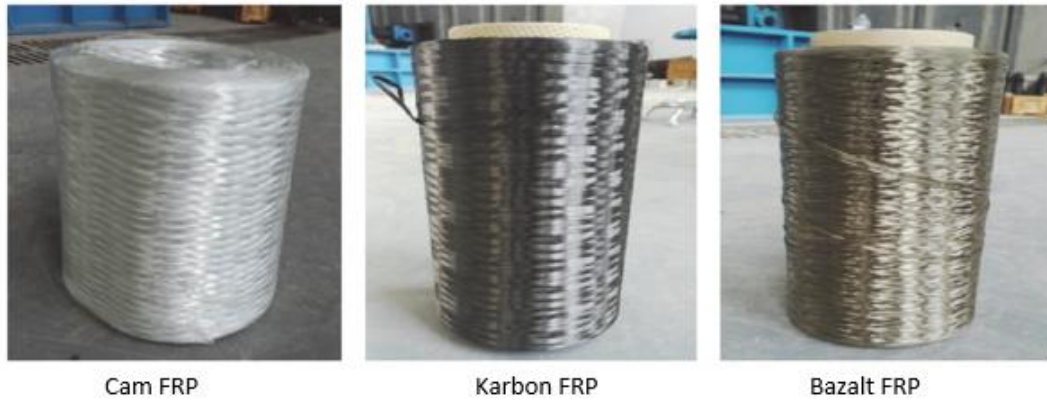
FRP ile güçlendirme kolonlarda sargılama etkisi yarattığından kolonlarda rijitlik ve dayanım artışının yanı sıra şekildeğiştirme kapasitesinde de önemli artış sağlamaktadır. AFAD, DowAKSA ve Prof. Dr. Alper İlki ve ekibinin gerçek ölçekli iki binada yapmış oldukları deneysel çalışmada 1999 depremi öncesine göre dizayn edilmiş aynı şartlara sahip birinin kolonları CFRP ile güçlendirilmiş diğerinin kolonları güçlendirilmemiş iki bina tasarlanmıştır. Tasarlanmış olan binalara aynı

sismik davranış uygulanmıştır. Güçlendirilmemiş bina 0,0135 öteleme oranında yıkılmıştır [16]. Buna karşılık kolonları CFRP ile güçlendirilmiş bina 0,1500 öteleme oranında dahi yıkılmamıştır [16]. Şekil 2.1.'de yapılmış olan deneysel çalışmada CFRP ile güçlendirilmiş ve güçlendirilmemiş bina örneklerinin son durumu gösterilmiştir. Bu deneysel çalışma göz önüne alındığında CFRP malzemesinin kazandırmış olduğu şekil değiştirme özelliği daha net anlaşılmaktadır.



Şekil 2.1. AFAD, DowAKSA ve Prof. Dr. Alper İlki ve ekibinin gerçekleştirmiş olduğu deneysel çalışma [16]

Fiber takviyeli polimer malzeme çeşitlerinden en yaygın kullanılanları karbon, cam, aramid ve bazalttır. Şekil 2.2.'de yaygın kullanılan fiber takviyeli polimer malzemelerden bazılarının görseli mevcuttur. Özellikle inşaat uygulamalarında çekme mukavemetinin daha yüksek olması sebebiyle karbon fiber takviyeli polimer malzemeler daha yaygın kullanılmaktadır [17].



Şekil 2.2. Yaygın kullanılan FRP çeşitleri [18]

CFRP malzemesinin ana bileşenleri orlon, katran, naylon ve karbon liflerden oluşmaktadır [19]. CFRP malzemesi kullanıldığı elemana yüksek mukavemet ve rijitlik kazandırdığından dolayı diğer FRP çeşitlerine göre daha yaygın kullanılmaktadır.

FRP malzemesi iki farklı şekilde uygulanabilmektedir. Bunlar plaka halinde veya kumaş halinde uygulanabilme yöntemidir.

CFRP plakalar, karbon fiber ve epoksi matriksinden oluşmakta olup kolon, kiriş, döşeme ve duvarların taşıma kapasitelerini arttırmak için kullanılabilirler. Bu plakalar yapı elemanlarının çekme bölgelerine, yüksek dayanıma sahip epoksi reçineleri ile yapıştırılırlar. Bu plakalar yük altında akma limitlerine kadar yüksek gerilmeleri karşılayabilirler. Elastisite modülüne göre karbon plakalar değişiklik göstermekte olup, güçlendirme yapılacak olan elemanın durumu ve açıklığına göre seçim yapılabilir. FRP plakaların yapıştırılmasından önce yüzeyin hazırlanması oldukça önemlidir. Şekil 2.3. ve 2.4.'te CFRP plakaların uygulaması gösterilmiştir.



Şekil 2.3. FRP plaka uygulaması [20]



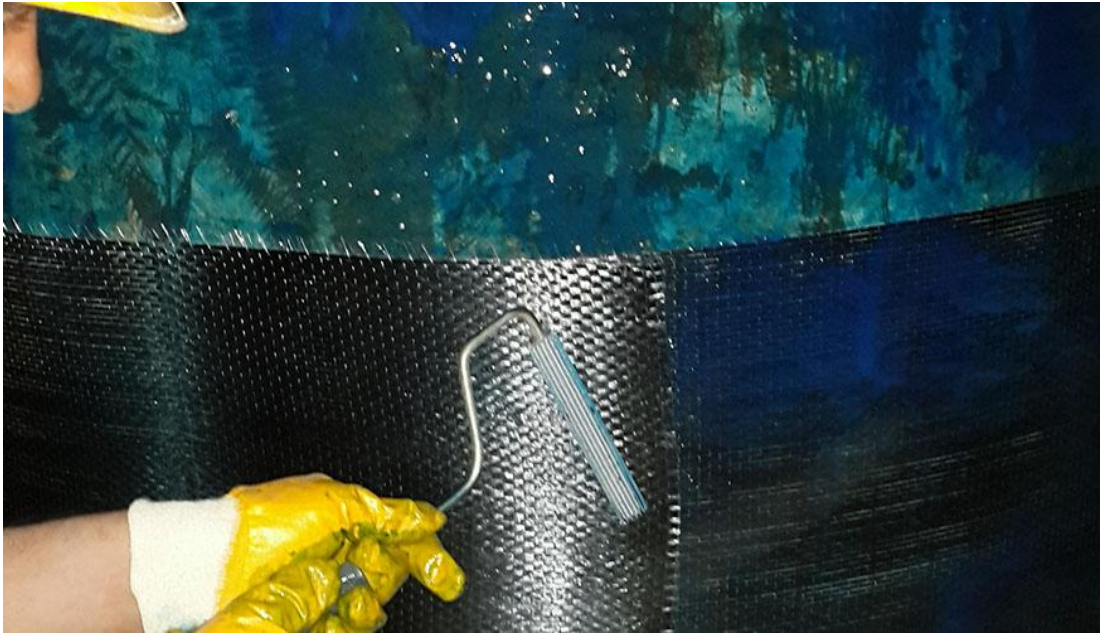
Şekil 2.4. FRP plaka uygulaması [20]

FRP kumaşlar ise tek yönlü veya çift yönlü karbon liflerden oluşmaktadır. Genellikle kiriş, baca, silo, tünel, duvar gibi yapı elemanlarının güçlendirilmesinde kullanılmaktadır. Şekilli ve desenli yapı elemanlarının güçlendirilmesinde ciddi kolaylık sağlamaktadır. Kolonların kesme, kayma, eğilme dayanımını ve darbelere karşı mukavemetini arttırmaktadır. Kirişlerde ise eğilme ve kesme dayanımını arttırmaktadır. FRP kumaşların yapıştırılmasından önce yapıştırma işlemi

yapılacak yüzeyin hazırlanması oldukça önemlidir. Uygun şekilde hazırlanmış yüzeye epoksi sürülüp, FRP kumaşlar gerdirilerek yapıştırılır. Şekil 2.5.- Şekil 2.8.'de FRP kumaşların uygulama örnekleri gösterilmiştir.



Şekil 2.5. FRP kumaş uygulaması [20]



Şekil 2.6. FRP kumaş uygulaması [20]



Şekil 2.7. FRP kumaş uygulaması [20]



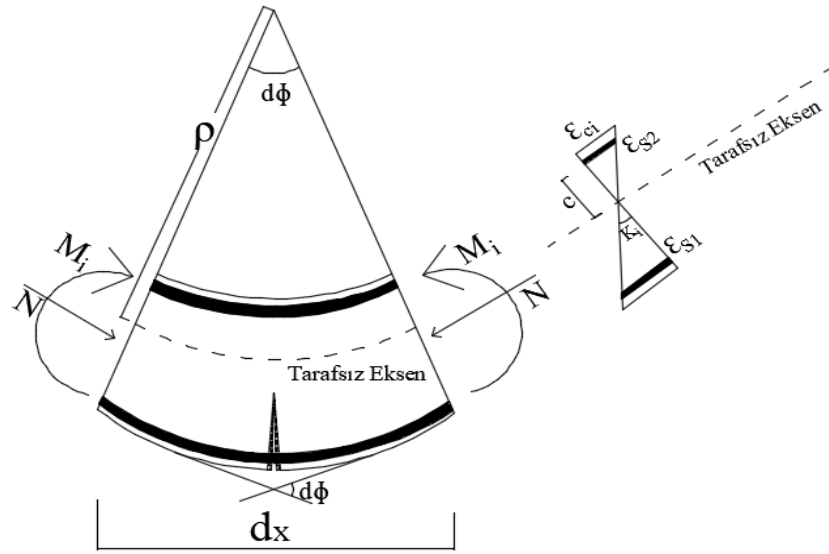
Şekil 2.8. Betonarme kolonlara FRP uygulaması [21]

BÖLÜM 3. MOMENT EĞRİLİK İLİŞKİSİ

Yapı elemanlarının davranışlarının belirlenebilmesi için o elemanı oluşturan kesitlerin davranışının bilinmesi şarttır. Kesitin davranışını belirleyen en önemli etkenler ise kesiti oluşturan malzeme özellikleri ve kesitin geometrisidir. Betonarme kesiti oluşturan malzemelerden beton doğrusal bir davranışa sahip olmayan, çekme ile basınç gerilmeleri altında farklı davranış gösteren bir malzeme olmasına karşılık çelik elasto-plastik davranış gösteren yani çekme ile basınç gerilmeleri altındaki davranışının aynı olduğu varsayılan bir malzemedir. Bu sebeple betonarme malzemenin davranışı doğrusal-elastik değildir. Bu durum hem betonun hemde çeliğin mekanik özelliklerinden kaynaklanmaktadır [22].

Eğilme ve eksenel yük veya yalnız eğilme etkisi altındaki kesitin davranışı gerçek malzeme davranışı esas alınarak yapılan sayısal çalışmalarla ya da deneysel çalışmalar ile elde edilen moment-eğrilik ilişkileriyle gözlemlenebilir. Moment-eğrilik ilişkisiyle kesit davranışının süneklik durumu, rijitliğin nasıl değişim gösterdiği, sargılama etkisi, kabuk ve çekirdek betondaki ezilme durumu gözlemlenebilir [22].

Eğrilik, bir eğrideki iki komşu nokta arasındaki açı değişiminin iki nokta arasındaki uzaklığa bölünmesiyle elde edilen birim boya denk gelen dönme miktarıdır. Bu durum Şekil 3.1.'de görülmektedir. Ayrıca eğriliğin formülasyona dökülmüş hali Denklem 3.1'de verilmiştir.



Şekil 3.1. Eksenel yük ve eğilme etkisi altındaki eleman parçası ve kesitin birim deformasyon dağılımı

$$\text{Eğrilik}=K=\frac{d\phi}{dx}=\frac{1}{\rho}=\frac{\epsilon_{ci}}{c} \quad (3.1)$$

3.1. Moment Eğrilik İlişkisinin Belirlenmesi

Bir kesitin moment-eğrilik ilişkisinin sayısal hesaplama yöntemleriyle doğru bir şekilde hesaplanabilmesi için üç aşamadan oluşan çözümleme yapılmalıdır. İlk olarak denge koşulları sağlanmalıdır. Ardından uygunluk koşulları sağlanmalıdır. Son olarakta kesiti oluşturan malzemelerin gerilme şekildeğiştirme ilişkileri doğru şekilde belirlenmelidir. Betonarme kesitlerde betonun gerilme şekildeğiştirme ilişkisi çekme ve basınç bölgeleri için farklı olarak dikkate alınmalıdır [22].

Moment-eğrilik ilişkisinin sayısal hesaplama yöntemleriyle hesaplanabilmesi için bazı varsayımların yapılması şarttır. Düzlem olarak belirlenmiş kesitler şekildeğişiminden sonrada düzlem içerisinde kalırlar. Donatıda yaşanan şekildeğişimi donatıya komşu beton liflerdekiyle örtüşmektedir. Kesiti oluşturan malzeme modelleri gerçekçidir [22]. Yapılmış olan bu varsayımlar dahilinde moment-eğrilik ilişkisi belirlenebilir.

Moment-eğrilik ilişkisinin belirlenmesinde izlenmesi gereken yol detaylıca şu şekildedir.

- a) Kesit geometrisi tanımlanır. Tanımlanan kesit şeritler halinde bölünür. Herbir şeritte şeriti oluşturan malzemeler ayrı ayrı tanımlanır.
- b) Basınç bölgesinde en dış lif için birim deformasyon değeri (ϵ_{ci}) ve denge durumunu sağlayacak şekilde tarafsız eksen mesafesi (c) değeri için bir kabul yapılır. (Şekil 3.1.)
- c) Yapılmış olan kabullerden yararlanarak uygunluk koşulları sağlanacak şekilde birim deformasyon dağılımı belirlenir. (Şekil 3.1.)
- d) Elde edilmiş olan birim deformasyon dağılımından her bir şeridin ağırlık merkezindeki birim deformasyon değeri belirlenir.
- e) Şeride denk gelen birim deformasyon değerleri kullanılarak her bir şeridin içeriğinde bulunan malzemelerin gerilme birim deformasyon grafiklerinden bu malzemelere denk gelen gerilme değerleri hesaplanır.
- f) Şeridi oluşturan malzemelerdeki gerilme değerleri malzeme alanı ile çarpılarak malzemelerin oluşturduğu iç kuvvet değerleri belirlenir.
- g) Bulunmuş olan iç kuvvet değerleri ile kesite uygulanan eksenel yük değerlerinin toplamı sıfır olmalıdır. Eğer bu kuvvetlerin toplamı sıfır değilse tarafsız eksen derinliği (c) değeri değiştirilerek denge koşulu sağlanıncaya kadar işlemler tekrarlanır.
- h) Kuvvetlerin toplamı sıfır olduğu anda bulunmuş olunan iç kuvvetlerin kesit ağırlık merkezine göre momenti hesaplanır. Denklem 3.1 yardımıyla da eğrilik değeri hesap edilir. Böylece seçilmiş olunan ϵ_{ci} değerindeki moment eğrilik sayısal verileri elde edilmiş olunur.

- i) ε_{ci} değerleri değiştirilerek işlemler tekrarlanır ve yeterli sayıda moment eğrilik verisi elde edildikten sonra veriler grafik haline dönüştürülebilir.

3.2 Malzeme Modelleri

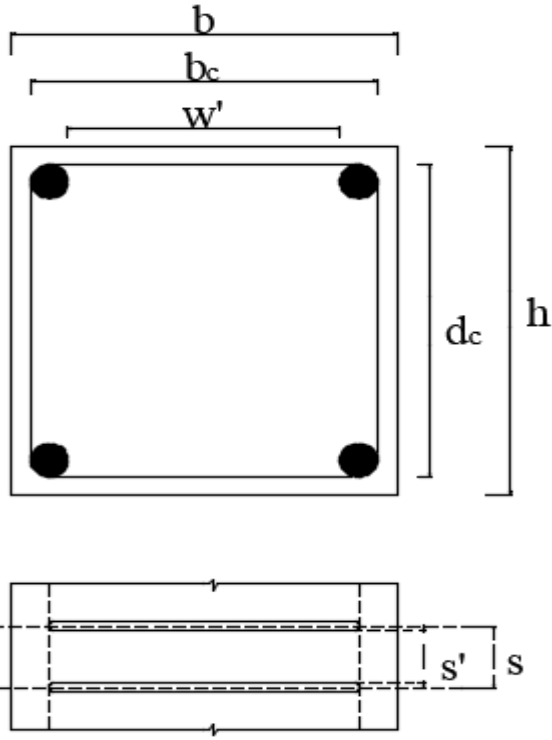
OpenSees sonlu eleman modeli yardımıyla moment-eğrilik ilişkisini veren yazılımın doğru bir şekilde çalışabilmesi için malzeme modellerinin doğru seçilmesi ve programa doğru aktarılması gerekmektedir. Seçilmiş olan malzeme modellerinin OpenSees programına aktarılması, OpenSees kütüphanesinde önceden oluşturulmuş ve OpenSees programının kabul ettiği malzeme davranışları kullanılarak yapılmıştır.

3.2.1. FRP ile sargılanmamış beton malzeme modeli

Mander ve ark.'nın [5] yapmış oldukları çalışmada etriyeler yardımıyla sargılanmış ve sargılanmamış beton malzemesi için gerilme şekil değiştirme modeli geliştirilmiştir. Bu tez kapsamında FRP malzemesi ile sargılanmayan betonarme kolonların davranışında beton malzeme modeli olarak bu model kullanılmıştır. Geliştirilmiş olan bu modelin farklı özelliklere sahip kesitler için kullanılabilmesi amacıyla gerilme şekil değiştirme modelinin formülasyonu Matlab tabanlı bilgisayar koduna aktarılmıştır. Bu modelin formülasyonu ise aşağıda verilmiştir.

$$k_e = \frac{\left(1 - \sum_{i=1}^n \frac{(w'_i)^2}{6 b_c d_c}\right) \left(1 - \frac{s'}{2 b_c}\right) \left(1 - \frac{s'}{2 d_c}\right)}{1 - \rho_l} \quad (3.2)$$

Sınırlandırma etkililik katsayısını ifade eden k_e 'nin hesabı Denklem 3.2'de verilmiştir. Bu denklemde b_c ; x yönündeki etriye merkezinden etriye merkezine çekirdek beton boyutunu, d_c ; y yönündeki etriye merkezinden etriye merkezine çekirdek beton boyutunu, w'_i ; ifadesi komşu iki boyuna donatı arasındaki temiz mesafeyi, s' ; komşu iki etriye arasındaki temiz mesafeyi, n ise betonarme kolon kesitindeki boyuna donatılar arasındaki mesafe sayısını, ρ_l ise boyuna donatı oranını ifade etmektedir. Bu ifadelerin gösterimi Şekil 3.2.'de gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Betonarme kolon kesit detayı

$$\rho_x = \frac{A_{sx}}{s d_c} \quad (3.3)$$

Betonarme elemanlarda x ve y doğrultusunda farklı enine donatılar olabilir. Bu farklılık x doğrultusu için Denklem 3.3'te ifade edilmiştir. A_{sx} ifadesi x doğrultusundaki toplam etriye alanını, s enine donatının etriye merkezinden komşu etriyenin merkezine olan mesafeyi belirtmektedir. Denklem 3.4'te ise aynı durum y doğrultusu için dikkate alınmıştır. Bu denklemde de A_{sy} ifadesi y doğrultusundaki toplam etriye alanını ifade etmektedir.

$$\rho_y = \frac{A_{sy}}{s b_c} \quad (3.4)$$

X doğrultusundaki etkili yanal sınırlama gerilmesi Denklem 3.5'te ifade edilmiştir. f_{yh} ifadesi etriye akma dayanımını belirtmektedir.

$$f'_{lx} = k_e f_{yh} \rho_x \quad (3.5)$$

Y doğrultusundaki etkili yanal sınırlama gerilmeside aynı şekilde Denklem 3.6'da verilmiştir.

$$f'_{ly} = k_e f_{yh} \rho_y \quad (3.6)$$

$$f'_l = \frac{(f'_{lx} + f'_{ly})}{2} \quad (3.7)$$

Etkili yanal sınırlama gerilmesi ise Denklem 3.7'de belirtildiği gibi hesaplandıktan sonra sargılı betonun maksimum basınç gerilmesi yani f'_{cc} Denklem 3.8 kullanılarak hesaplanabilir. Bu denklemdeki f'_{co} ifadesi sargısız betonun basınç dayanımını belirtir.

$$f'_{cc} = f'_{co} \left(-1,254 + 2,254 \sqrt{1 + \frac{7,94 f'_l}{f'_{co}}} - 2 \frac{f'_l}{f'_{co}} \right) \quad (3.8)$$

Sargılı beton modelinde maksimum basınç gerilmesine karşılık gelen birim deformasyon değeri Denklem 3.9 yardımıyla hesaplanır.

$$\epsilon_{cc} = \epsilon_{co} \left[1 + 5 \left(\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} - 1 \right) \right] \quad (3.9)$$

Denklem 3.9'da ϵ_{co} ifadesi sargılanmamış betonun maksimum beton basınç dayanımına ulaştığı andaki birim deformasyon değerini ifade etmektedir. Bu değer 0,002 olarak varsayılmaktadır.

$$\epsilon_{cu} = 0,004 + \frac{1,4 \rho_{sh} f_{yh} \epsilon_{su}}{f'_{cc}} \quad (3.10)$$

Denklem 3.10’da sargılanmış betonun kırılma anındaki birim deformasyon değeri verilmiştir. Bu denklemde ρ_{sh} enine donatının hacimsel oranını, ϵ_{su} enine donatının kopma anındaki birim uzama deformasyonunu ifade etmektedir.

Sargısız betonun basınç dayanımının sıfır olduğu birim şekildeğiştirme değeri (ϵ_{sp}) 0,006 olarak kabul edilmiştir.

Betonun basınç dayanım değerinin hesabı Denklem 3.11’de verilmektedir.

$$f_c = \frac{f'_{cc} x_c r}{r - 1 + x_c r} \quad (3.11)$$

$$x_c = \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{cc}} \quad (3.12)$$

$$E_{sec} = \frac{f'_{cc}}{\epsilon_{cc}} \quad (3.13)$$

$$r = \frac{E_c}{E_c - E_{sec}} \quad (3.14)$$

$$E_c = 4700 \sqrt{f'_{co}} \quad (3.15)$$

Denklem 3.12’de verilen x_c ifadesi betonda değişen birim şekildeğiştirmenin maksimum beton basınç dayanımına denk gelen birim şekildeğiştirmeye oranı olarak tanımlanmaktadır. Denklem 3.13 ise betonunun sekant modülünü ifade eder. Denklem 3.11’in hesaplanması sırasında bulunması gereken r değeride Denklem 3.14 yardımı ile hesaplanır. Denklem 3.15’te ise betonun elastisite modülünün formülasyonu verilmiştir.

3.2.2. FRP ile sargılanmış beton malzeme modeli

Fiber takviyeli polimerler ile güçlendirilmiş betonarme kolonlarda beton malzemesinin gerilme şekildeğiştirme davranışı, güçlendirilmemiş betonarme kolonlardakine göre farklılık göstermektedir. Literatürde yapılan çalışmalar doğrultusunda bu konu üzerinde birçok malzeme modeli geliştirilmiştir. Yapılmış olan bu tez kapsamında FRP ile güçlendirilmiş betonarme kolonların beton malzeme davranışı için Youssef ve ark.'nın [6] geliştirmiş oldukları malzeme modeli kullanılmıştır.

Youssef ve ark.'nın geliştirmiş oldukları bu model dairesel, dikdörtgen ve kare kolonların karbon ve cam fiber takviyeli polimer malzemeler ile sargılanmasını kapsamaktadır. Geliştirmiş oldukları modeli etkileyen faktörler arasında betonun maksimum gerilme değeri, kopma anındaki birim şekildeğiştirme değeri, sargılamada kullanılan malzemenin kendine ait karakteristik özellikleri ve kesit geometrisi bulunmaktadır. Yapmış oldukları istatistiksel analizleri sayısal formülasyonlara dönüştürmüşlerdir. Bu tez kapsamında kare kolonlar inceleneceği için dikdörtgen ve kare kesitler için ortak olarak oluşturulan sayısal formülasyonlar kullanılmıştır. Youssef ve ark.'nın malzeme modelinin sayısal formülasyonu aşağıda verilmiştir.

$$f'_{lu} = k_e f_{lu} \quad (3.16)$$

f'_{lu} yani FRP malzemesinin nihai durumda etkili yanal sınırlama gerilmesi Denklem 3.16 yardımıyla hesaplanmaktadır. Bu denklemde k_e sınırlandırma etkililik katsayısını, f_{lu} FRP malzemesinin nihai haldeki yanal sınırlama gerilmesini ifade etmektedir.

$$f_{lu} = \frac{1}{2} \rho_j f_{ju} \quad (3.17)$$

FRP malzemesinin nihai haldeki yanal sınırlama gerilmesinin hesaplanabilmesi için ρ_j yani FRP malzemesinin hacimsel oranını ve f_{ju} yani FRP malzemesinin çekme mukavemeti bilinmelidir. (Denklem 3.17)

$$\rho_j = \frac{4 t_j}{D} \quad (3.18)$$

Yukarıda verilen (Denklem 3.18) eşitlikteyse FRP malzemesinin hacimsel oranı hesap edilebilmektedir. Bu eşitlikte t_j sargılamada kullanılan FRP malzemesinin kalınlığını, D ise dikdörtgen kesitler için eşdeğer daire çapını ifade etmektedir.

$$D = \frac{2 A_g}{[(b+h)-(4-\pi)r_c]} \quad (3.19)$$

Denklem 3.19'da dikdörtgen kesitler için verilen eşdeğer daire çapı hesaplanabilir. Bu denklemde A_g kolon kesit alanını, b kolon genişliğini, h kolon derinliğini, r_c ise kolonun köşe yarıçapını ifade etmektedir.

$$k_e = \frac{1 - \left[\frac{(b-2r_c)^2 + (h-2r_c)^2}{3 h b} \right] - \rho_l}{1 - \rho_l} \quad (3.20)$$

Sınırlandırma etkililik katsayısının hesabı (Denklem 3.20) yukarıda verilmiştir. Bu denklemde ρ_l boyuna donatı oranını belirtmekte (Denklem 3.21) olup hesabı aşağıda verilmiştir. A_s ise kolondaki toplam boyuna donatı alanını belirtmektedir.

$$\rho_l = \frac{A_s}{b h} \quad (3.21)$$

FRP ile sargılanmış betonun nihai gerilme değerinin hesaplanabilmesi için Denklem 3.22 kullanılmaktadır.

$$\frac{f'_{cu}}{f'_{co}} = 0,5 + 1,225 \left(\frac{f'_{lu}}{f'_{co}} \right)^{\frac{3}{5}} \quad (3.22)$$

FRP ile sargılanmış betonun nihai şekildeğiştirme değeri Denklem 3.23 yardımıyla hesaplanabilmektedir. Bu denklemde bulunan E_j sargılamada kullanılan FRP malzemesinin elastisite modülünü ifade etmektedir.

$$\varepsilon_{cu} = 0,004325 + 0,2625 \left(\frac{f'_{lu}}{f'_{co}} \right) \left(\frac{f_{ju}}{E_j} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.23)$$

Betonarme kolonu sargılayan FRP malzemesinin tamamen işlev gördüğü birinci ve ikinci bölgenin sınır noktasındaki eksenel gerilme değerinin hesabı Denklem 3.24'te verilmiştir. ε_{jt} ifadesi FRP sargılama malzemesinin birinci bölgeden ikinci bölgeye geçişteki birim şekildeğiştirme değeri olup 0,002 olarak kabul edilmektedir.

$$\frac{f_t}{f'_{co}} = 1 + 1,1350 \left(\frac{\rho_j E_j \varepsilon_{jt}}{f'_{co}} \right)^{\frac{5}{4}} \quad (3.24)$$

Betonarme kolonu sargılayan FRP malzemesinin tamamen işlev gördüğü birinci ve ikinci bölgenin sınır noktasındaki eksenel gerilme değerine karşılık gelen birim şekildeğiştirme değeri Denklem 3.25 yardımıyla hesaplanmaktadır.

$$\varepsilon_t = 0,002 + 0,0775 \left(\frac{\rho_j E_j \varepsilon_{jt}}{f'_{co}} \right)^{\frac{6}{7}} \left(\frac{f_{ju}}{E_j} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.25)$$

Youssef ve ark.'nın FRP ile sargılanmış betonlar için geliştirmiş oldukları gerilme şekildeğiştirme modelini farklı kesitler için kullanabilmek amacıyla yukarıdaki formülasyonlar Matlab tabanlı bilgisayar koduna aktarılmıştır.

3.2.3. FRP malzeme modeli

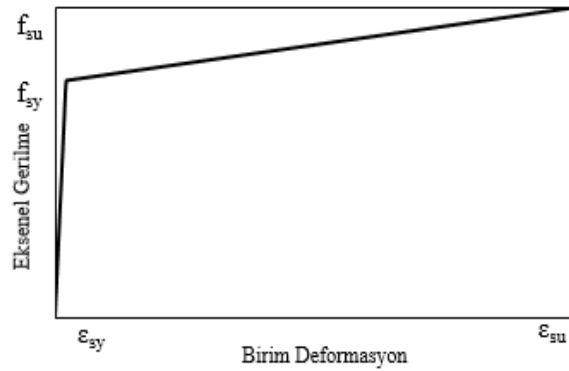
FRP malzemesi ise gerilme şekildeğiştirme ilişkisinde kopma anına kadar lineer davranış göstermektedir. Bu tez çalışmasında karbon takviyeli fiber polimer malzeme kullanılmış olup gerilme şekildeğiştirme ilişkisi grafiksel olarak Şekil 3.3.'te görüldüğü gibidir.



Şekil 3.3. FRP malzemesinin gerilme-birim deformasyon ilişkisi

3.2.4. Donatı çeliği modeli

Donatı çeliğinin gerilme şekildeğiştirme ilişkisi belirlenirken donatının akma noktasına ulaştıktan sonra akma bölgesi ihmal edilerek kopmadan önceki maksimum çekme gerilmesine kadar lineer bir şekilde ulaştığı varsayılmıştır. Bu varsayım işlemi donatı çeliğinin OpenSees programına aktarımının daha ideal olması amacıyla yapılmıştır. (Şekil 3.4.)

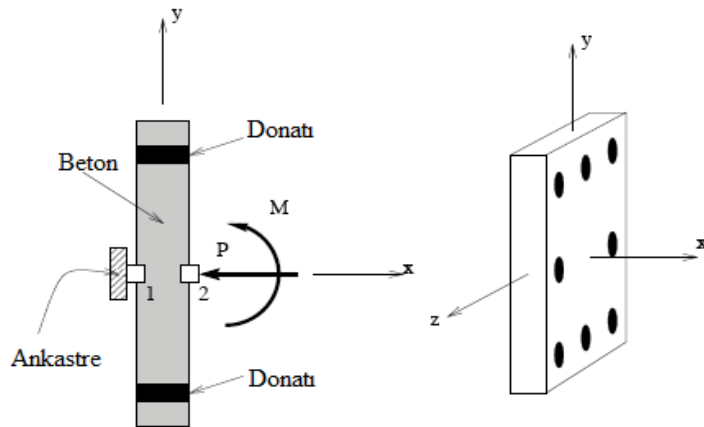


Şekil 3.4. Donatı çeliğinin gerilme-birim deformasyon ilişkisi

BÖLÜM 4. OPENSEES SONLU ELEMAN MODELİ

Yapılmış olan tez çalışmasında, fiber takviyeli polimerler (FRP) ile güçlendirilen betonarme kolonların davranışını belirleyebilmek amacıyla moment-eğrilik ilişkileri incelenmiştir. Moment-eğrilik ilişkileri belirlenirken deneysel çalışma yapılmamıştır. Ancak OpenSees (Open System for Earthquake Engineering Simulation) programı kullanılarak moment-eğrilik ilişkisini veren sonlu eleman modeli incelenen kolon kesitlerine göre düzenlenmiştir.

İlk olarak kesitin iki boyutlu olduğu ve üç serbestlik derecesinden oluştuğu tanımlanmıştır. Moment-eğrilik ilişkisine kolon kesiti üzerinden bakılacağından sonsuz yakınlıkta olan kesitin başına ve sonuna toplam iki adet düğüm noktası tanımlanmıştır. İlk düğüm noktası ankastre olarak tanımlanmış olup, ikinci düğüm noktası ise serbest bırakılmıştır. Bu durum Şekil 4.1.'de gösterilmiştir. Eksenel yük değeri analiz boyunca yapılmış olan tüm parametrik çalışmalarda sabit tutulmuş olup, OpenSees sonlu eleman modelinde bu durum 2 düğüm noktasına etkililerek belirtilmiştir (Şekil 4.1.). Yanal yükleme ise zamanla lineer artacak şekilde kesite uygulanmıştır.



Şekil 4.1. OpenSees programında tanımlanan kolon kesiti [23]

Daha sonrasında betonarme kolon kesitini oluşturan FRP malzemesi, çelik donatı, FRP ile güçlendirilmiş kesitler için beton malzeme modeli, FRP ile güçlendirilmemiş kesitler için beton malzeme modeli gibi malzemeler OpenSees kütüphanesinde bulunan malzeme modelleri yardımıyla OpenSees sonlu eleman modeline tanımlanmıştır. Matlab tabanlı bilgisayar programında malzeme modellerinin önemli noktaları okunarak OpenSees kütüphanesinden seçilen uygun malzeme modeline aktarım sağlanmıştır.

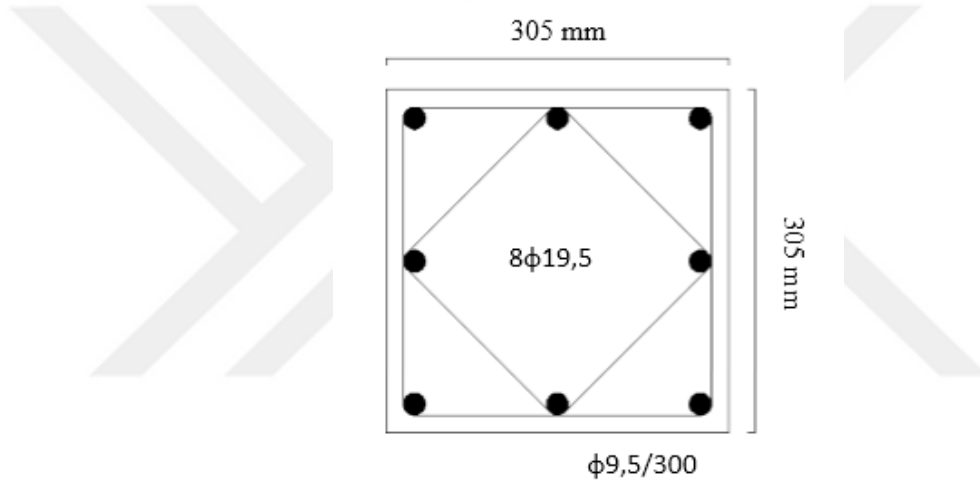
Betonarme kolon kesitinde donatıların yer tayini ve sargılı beton bölgesi, sargısız beton bölgesi, FRP'li bölge, FRP ile sargılanmış beton bölgesi gibi kesit özellikleri ayrı ayrı OpenSees programına tanımlanmıştır. Son olarak programdan yapılması istenen analiz adım sayısı girilmiştir.

4.1 OpenSees Sonlu Eleman Modelinin Deneysel Çalışmalarla Karşılaştırılması

OpenSees sonlu eleman modelinin doğruluğunu gösterebilmek amacıyla literatürden seçilen Iacobucci ve ark. [10]'nın gerçekleştirmiş olduğu CFRP ile güçlendirilmiş betonarme kolonlar üzerinde yapılmış olan deneysel çalışmalar ile OpenSees sonlu eleman modelinden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Literatürden seçilmiş olan deneysel çalışmaya ait incelenen kolonların bilgileri Tablo 4.1.'de verilmiştir [10]. Yaptıkları tüm deneysel çalışmalarda kolon boyutu 305x305 mm olarak verilmiştir. Deneysel çalışma yapılan kolon kesitide Şekil 4.2.'de gösterilmiştir. Deneysel çalışmalarda etriye aralığı 300 mm, etriye akma dayanımı 457 MPa, boyuna donatı akma dayanımı 465 MPa olarak sabit tutulmuştur. CFRP malzemesi ise 76350 MPa elastisite modülüne sahip olup, 962 N/mm/tabaka çekme dayanımına sahip olarak verilmiştir [10].

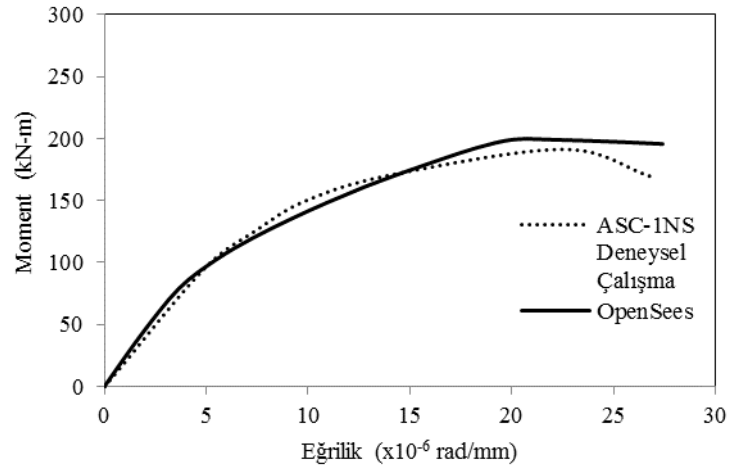
Tablo 4.1. Iacobucci ve ark.'nın [10] yaptıkları deneysel çalışmanın özellikleri

Deneysel Çalışma	Beton Dayanımı(MPa)	FRP Kalınlığı(mm)	Normal Kuvvet(kN)
ASC-1NS	31,4	0	1168,4
ASC-2NS	36,5	1	1290,3
ASC-3NS	36,9	2	2231,2
ASC-4NS	36,9	1	2231,2
ASC-5NS	37,0	3	2237,3
ASC-6NS	37,0	2	1307,9

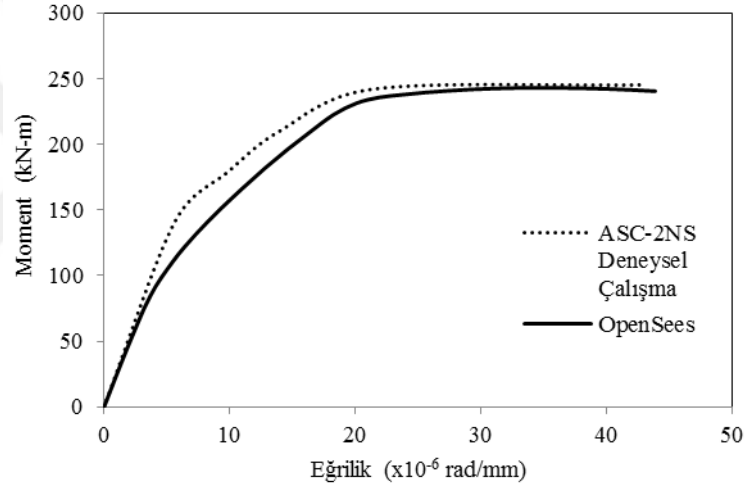


Şekil 4.2. Iacobucci ve ark.'nın [10] yaptıkları deneysel çalışmada kullanılan kolon kesiti

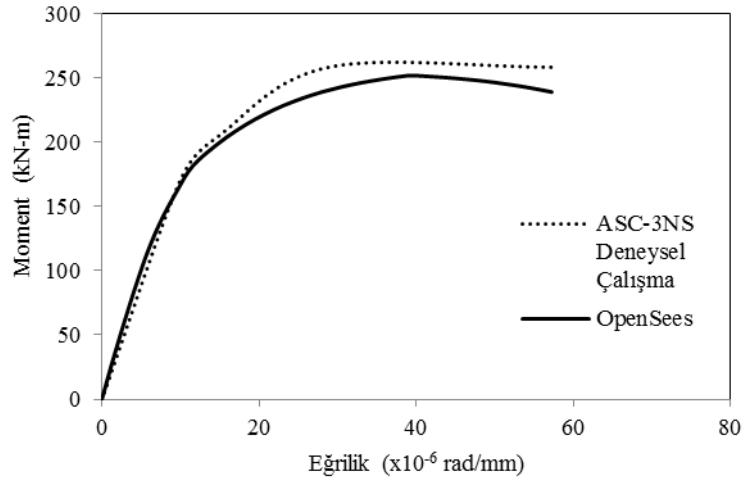
Deneysel sonuçlarla, OpenSees sonlu eleman modelinden elde edilen sonuçların karşılaştırılması Şekil 4.3.- Şekil 4.8.'de verilmiştir.



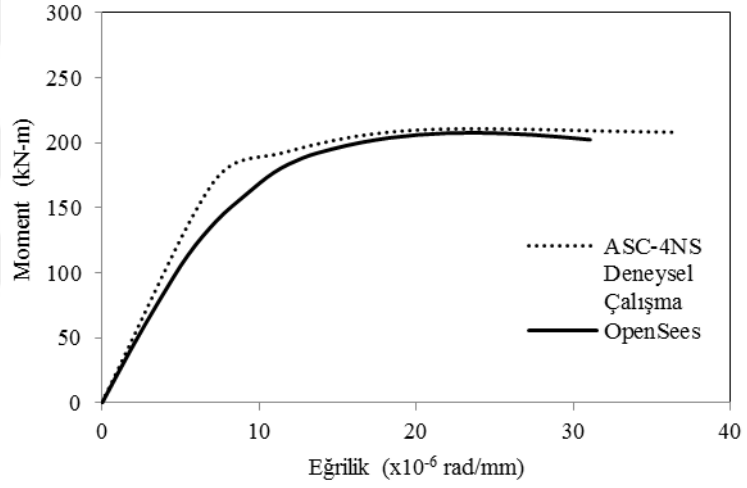
Şekil 4.3. Iacobucci ve ark.'nın ASC-1NS isimli deneysel çalışmasının OpenSees ile karşılaştırılması



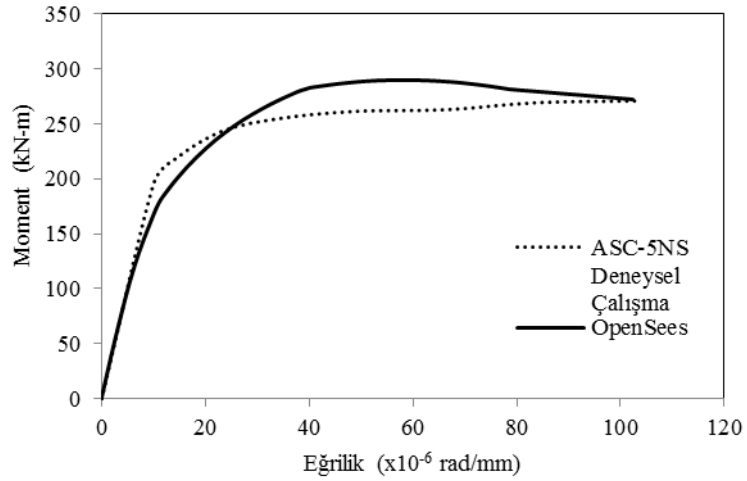
Şekil 4.4. Iacobucci ve ark.'nın ASC-2NS isimli deneysel çalışmasının OpenSees ile karşılaştırılması



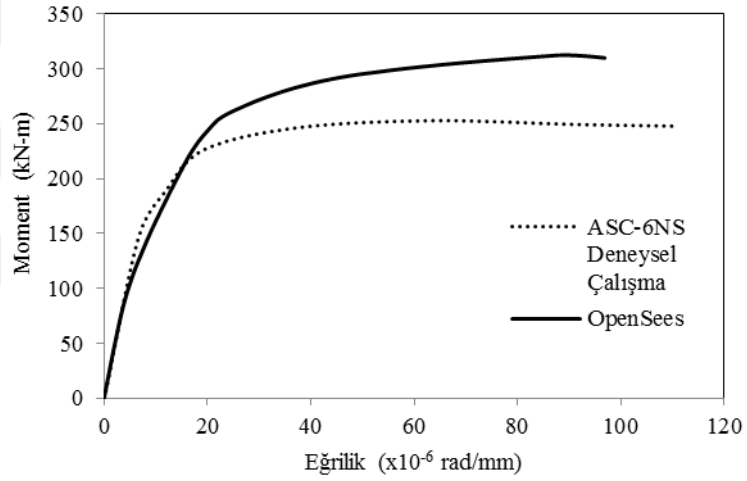
Şekil 4.5. Iacobucci ve ark.'nın ASC-3NS isimli deneysel çalışmasının OpenSees ile karşılaştırılması



Şekil 4.6. Iacobucci ve ark.'nın ASC-4NS isimli deneysel çalışmasının OpenSees ile karşılaştırılması



Şekil 4.7. Iacobucci ve ark.'nın ASC-5NS isimli deneysel çalışmasının OpenSees ile karşılaştırılması



Şekil 4.8. Iacobucci ve ark.'nın ASC-6NS isimli deneysel çalışmasının OpenSees ile karşılaştırılması

Şekil 4.3.-Şekil 4.8.'de görüldüğü gibi OpenSees sonlu eleman modeli, hem CFRP ile güçlendirilmemiş hemde CFRP ile güçlendirilmiş betonarme kolon kesitlerinin davranışları için deneysel çalışma sonuçlarıyla birbirlerine yakın sonuçlar vermektedir. Elde edilen bu sonuçlardan da açıkça görüldüğü gibi bu tez kapsamında oluşturulan OpenSees sonlu eleman modeli, FRP ile güçlendirilmiş ve güçlendirilmemiş betonarme kolonların davranışını gerçekçi bir şekilde yansıtmaktadır. Dolayısıyla doğrulanmış OpenSees sonlu eleman modelinin sayısal çalışmalarda kullanılması uygundur.

BÖLÜM 5. SAYISAL ÇALIŞMA

Bu tez çalışmasında, CFRP ile güçlendirilmiş betonarme kolonların moment-eğrilik ilişkisi ile davranışlarını incelemek amacıyla parametrik bir çalışma yapılmıştır. Parametrik çalışmada, kolon kesit boyutları 350x350mm, 450x450mm ve 550x550mm, beton basınç dayanımları (f'_{co}) 20MPa, 25MPa, 30MPa ve 35MPa ve CFRP kalınlığı (t_j) 1 mm, 2 mm ve 3 mm olarak belirlenmiştir. Ayrıca CFRP ile güçlendirilmemiş ($t_j=0$) betonarme kolonların davranışı da çalışma kapsamına eklenmiştir. Bu kapsamda analizi yapılan betonarme kolonlara ait parametreler Tablo 5.1.'de verilmiştir.

Tablo 5.1. Analizi yapılan parametre değerleri

Kolon Boyutu (mm)	Beton Dayanımı (MPa)	CFRP Kalınlığı (mm)
350x350 450x450 550x550	20	0
		1
		2
		3
	25	0
		1
		2
		3
	30	0
		1
		2
		3
	35	0
		1
		2
		3

Kullanılmış olan CFRP sargılama malzemesinin mekanik özellikleri literatürden seçilmiştir. CFRP sargılama malzemesine ait bilgiler Tablo 5.2.'de verilmiştir.

Tablo 5.2. CFRP'nin mekanik özellikleri [18]

	Elastisite Modülü (GPa)	Çekme Gerilmesi (MPa)
CFRP	205	3500

Parametrik çalışmada eksenel kuvvet değerleri her bir kesit için ayrı ayrı hesaplanmıştır. Eksenel kuvvet değerleri, CFRP malzemesiyle sargılanmamış durumda olan betonarme kolonun taşıyabileceği maksimum eksenel kuvvet değeri (N_{max}) ile dengeli eksenel kuvvet değeri (N_b) dikkate alınarak hesaplanmıştır.

Güçlendirilmemiş betonarme kolon kesitinde ilk olarak sünek kırılmanın hakim olduğu yani basınç bölgesindeki betonun ezilme deformasyonuna erişmesinden önce çekme bölgesindeki donatının akma deformasyonuna eriştiği durumu gözlemleyebilmek amacıyla $0,10N_{max}$ kadar eksenel kuvvet uygulanmıştır. Seçilmiş olan bu değer dengeli eksenel kuvvet değerinden küçüktür (Denklem 5.1). Hesaplanmış olan bu değer kolonun güçlendirilmiş ve güçlendirilmemiş haline uygulanmıştır.

$$N_1 = 0,1N_{max} < N_b \quad (5.1)$$

Daha sonrasında güçlendirilmemiş betonarme kolonda gevrek kırılmayı yani çekme bölgesindeki donatının deformasyonu, akma deformasyonuna erişmeden önce basınç bölgesindeki betonun ezilme deformasyonuna eriştiği durumu gözlemlemek amacıyla $0,42N_{max}$ değeri hesaplanmıştır. Bu değer belirlenirken TDY2007'de belirlenen düşey yükler ve deprem yüklerinin etkisi altında hesaplanan eksenel basınç kuvvetlerinin en büyüğü (N_{dm}) dikkate alınmıştır [24]. Bu değer Denklem 5.2'deki gibi tanımlanmaktadır.

$$N_{dm} = 0,5 f'_{co} A_g \quad (5.2)$$

Gevrek kırılmanın hakim olduğu durumu gözlemlemek amacıyla uygulanmış olan $0,42N_{max}$ değeri Denklem 5.3'ü tüm CFRP ile sargılanmamış kolon kesitlerinde sağlanması amacıyla seçilmiştir. Hesaplanmış olan bu değer kolonun güçlendirilmiş ve güçlendirilmemiş haline uygulanmıştır.

$$N_b < N_2 = 0,42N_{\max} < N_{dm} \quad (5.3)$$

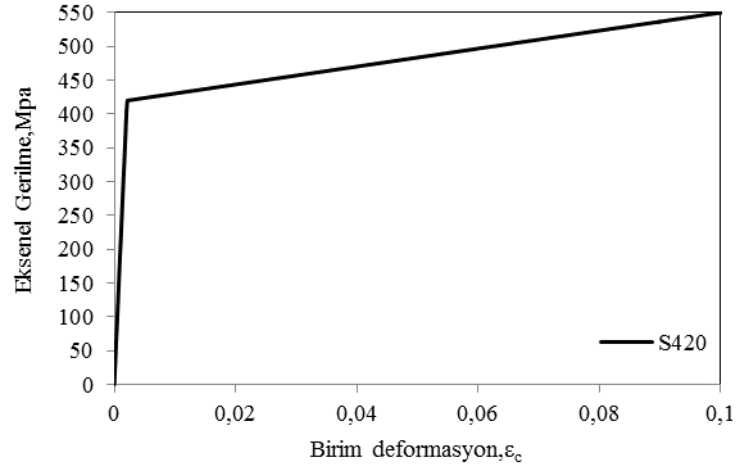
Bu koşullar göz önüne alınarak hesaplanan eksenel kuvvet değerleri de Tablo 5.3.'te verilmiştir.

Tablo 5.3. Hesaplanan $N_{\max}$, N_b , N_{dm} ve seçilen normal kuvvet değerleri

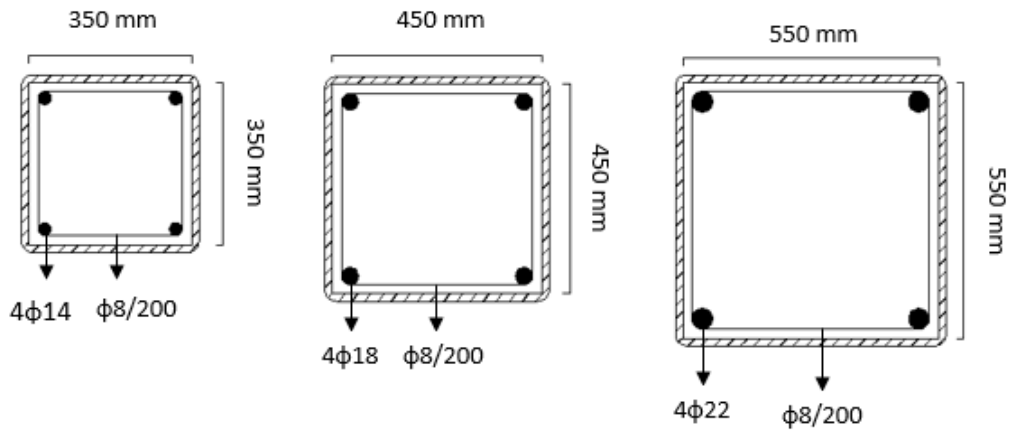
Kolon Boyutu (mm)	Beton Dayanımı (MPa)	$N_{\max}$ (kN)	N_b (kN)	N_{dm} (kN)	$0,1N_{\max}$ (kN)	$0,42N_{\max}$ (kN)
350x350	20	2777	1059	1225	277,7	1166,34
	25	3367	1295	1531	336,7	1414,14
	30	3947	1523	1837,5	394,7	1657,74
	35	4515	1781	2143	451,5	1896,3
450x450	20	4592	1786	2025	459,2	1928,64
	25	5568	2184	2531,25	556,8	2338,56
	30	6529	2569	3037,5	652,9	2742,18
	35	7469	2942	3543,75	746,9	3136,98
550x550	20	6845	2669	3025	684,5	2874,9
	25	8302	3331	3781,25	830,2	3486,84
	30	9735	3918	4537,5	973,5	4088,7
	35	11140	4487	5293,75	1114	4678,8

Yapılan sayısal çalışma boyunca 3 farklı kesit inceleneceğinden donatı oranı (ρ_l) 0,0050 değerinde sabit tutulmuştur. Çalışma boyunca hem etriyeler için hemde boyuna donatılar için S420 donatısı kullanılmıştır. S420 donatısına ait bilgiler TDY2007'den alınmış olup OpenSees programına aktarımı Şekil 5.1.'deki gibi yapılmıştır.

Kullanılan 3 farklı kolon kesiti Şekil 5.2.'de verilmiştir. Kolon kesitlerinde temiz paspayı mesafesi ve kolonların CFRP ile sargılanmasıyla oluşan köşe yarıçapı 16 mm olarak sabit tutulmuştur.

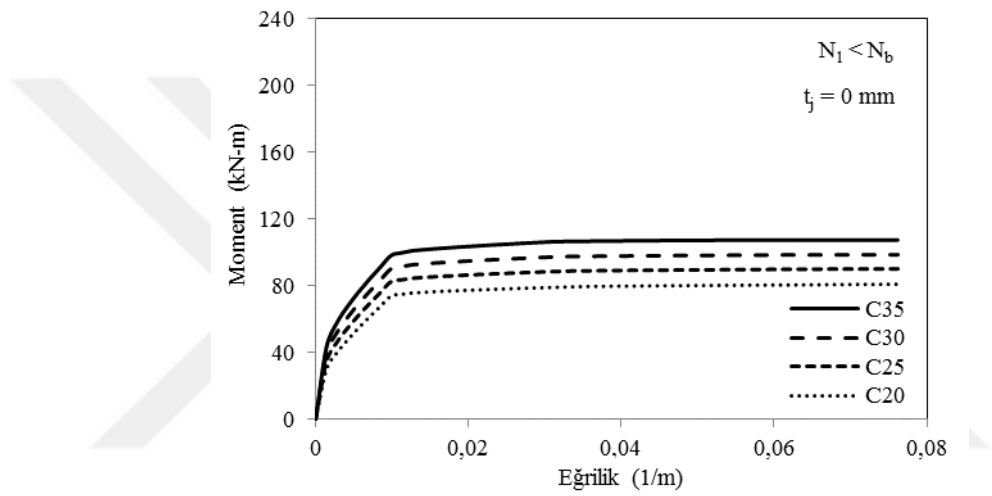


Şekil 5.1. S420 donatı çeliğine ait gerilme-birim deformasyon grafiği

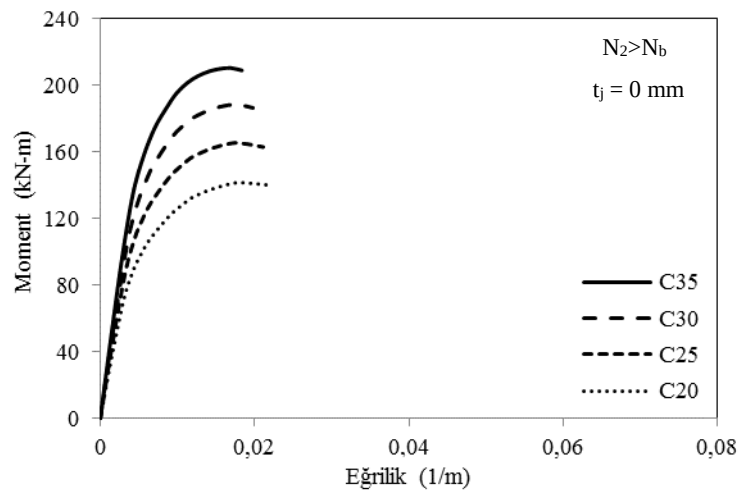


Şekil 5.2. Analizlerde kullanılan kolon kesitleri

350x350 mm kolon kesitine sahip ve CFRP ile sargılanmamış durumda eksenel yük seviyesinin $N_1 < N_b$ olduğu ve eksenel yük seviyesinin $N_b < N_2$ olduğu durumlar için elde edilen moment-eğrilik ilişkileri sırasıyla Şekil 5.3. ve Şekil 5.4.'te verilmiştir. $N_1 < N_b$ durumunda beton basınç dayanımının artış göstermesi süneklikte ciddi bir değişim göstermemektedir. $N_b < N_2$ durumunda ise beton basınç dayanımının artış göstermesi kolon kesitlerindeki sünekliği yaklaşık %5 oranında azaltmaktadır. Ayrıca eksenel kuvvet değerinin N_1 'den N_2 'ye artış göstermesi yaklaşık %70 ile %75 arasında süneklik kaybını beraberinde getirmektedir.

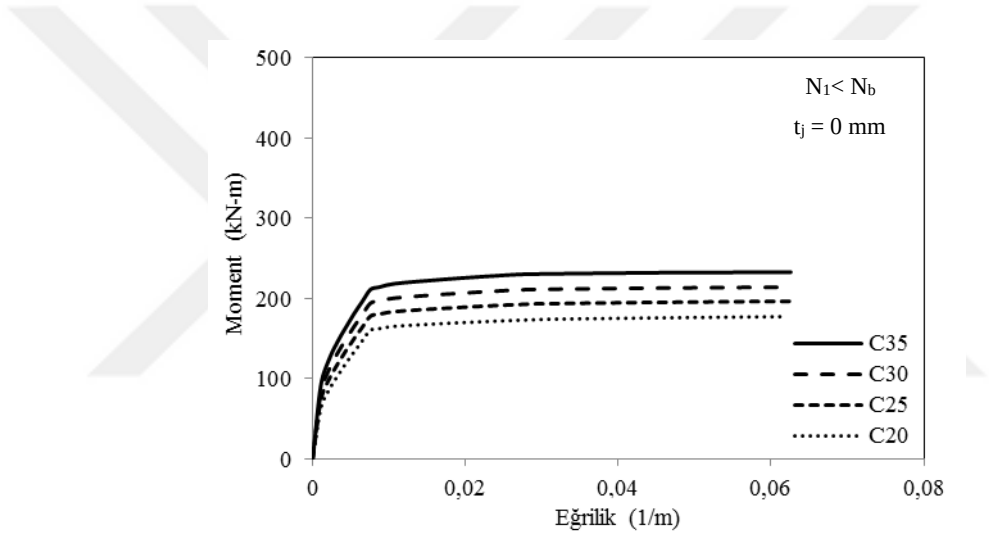


Şekil 5.3. Güçlendirilmemiş 350x350 kolonun dengeli eksenel yük değerinin altında kuvvet etki etmesi ile elde edilen moment-eğrilik ilişkisi

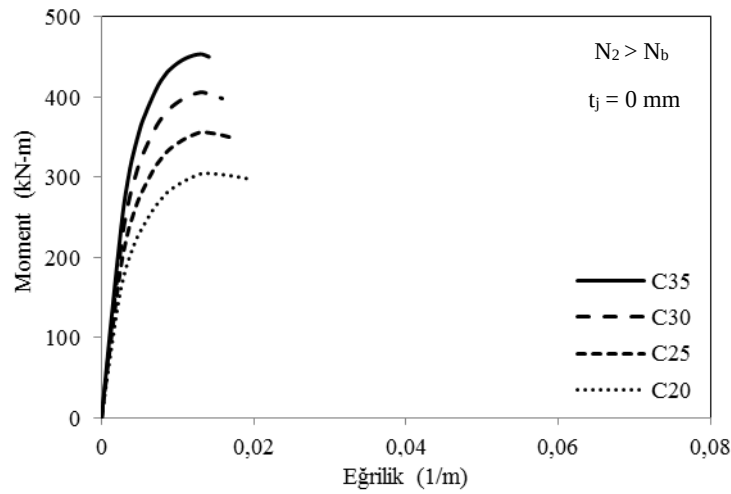


Şekil 5.4. Güçlendirilmemiş 350x350 kolonun dengeli eksenel yük değerinin üzerinde kuvvet etki etmesi ile elde edilen moment-eğrilik ilişkisi

450x450 mm kolon boyutlarına sahip ve CFRP ile güçlendirilmemiş durumda bulunan kolon kesitinin $N_1 < N_b$ etki etmesi durumunda elde edilen moment-eğrilik ilişkisi Şekil 5.5.'te verilmiştir. Aynı koşullara sahip fakat $N_b < N_2$ durumu için elde edilen moment-eğrilik ilişkisi Şekil 5.6.'da verilmiştir. Beton basınç dayanımının artması $N_1 < N_b$ koşulunda sünekliği etkilememektedir. $N_b < N_2$ durumunda ise beton basınç dayanımının artması yaklaşık %5 süneklik kaybı yaratmaktadır. $N_1 < N_b$ olduğu durumda beton basınç dayanımının artması betonarme kolon kesitinin rijitliğini yaklaşık %10 oranında arttırmaktadır. $N_b < N_2$ durumunda ise beton basınç dayanımının artması betonarme kolon kesitinin rijitliğini yaklaşık %15 civarında arttırmaktadır.

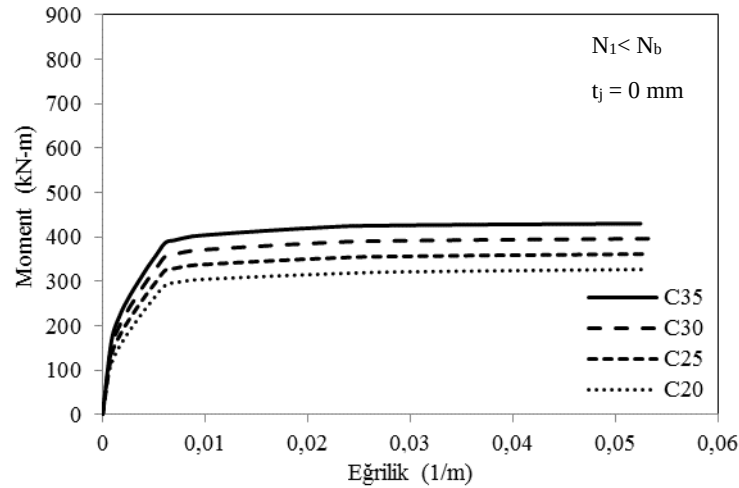


Şekil 5.5. Güçlendirilmemiş 450x450 kolonun dengeli eksenel yük değerinin altında kuvvet etki etmesi ile elde edilen moment-eğrilik ilişkisi

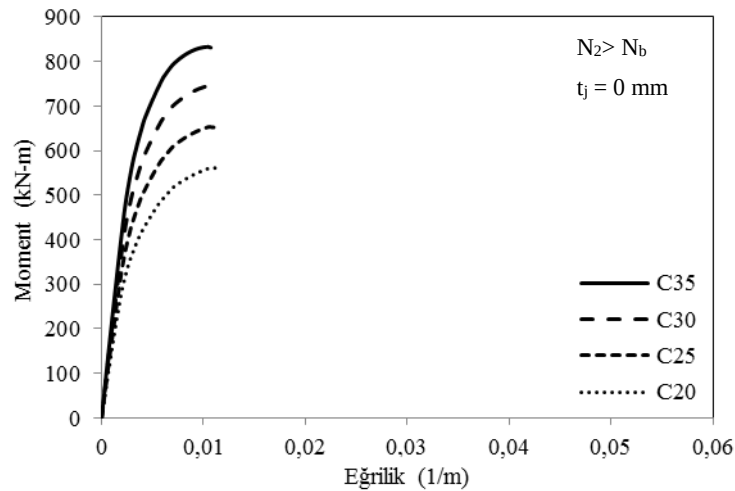


Şekil 5.6. Güçlendirilmemiş 450x450 kolonun dengeli eksenel yük değerinin üzerinde kuvvet etki etmesi ile elde edilen moment-eğrilik ilişkisi

550x550 mm kolon kesitinin CFRP ile güçlendirilmeden elde edilen iki farklı eksenel kuvvet değeri için moment-eğrilik ilişkileri Şekil 5.7. ve Şekil 5.8.'de verilmiştir. Şekil 5.7.'de $N_1 < N_b$ değerine sahip eksenel kuvvet değeri için elde edilen moment-eğrilik ilişkisinde beton basınç dayanımının artması betonarme kolon kesit rijitliğini yaklaşık %10 oranında arttırmaktadır. Şekil 5.8.'de verilen $N_b < N_2$ eksenel kuvvet değerinde ise beton basınç dayanımının artması betonarme kolon kesitinin rijitliğini yaklaşık %10 ile %18 arasında arttırmaktadır. $N_1 < N_b$ olduğu durumda beton basınç dayanımının artması kolon kesitinin dayanımını yaklaşık %10 arttırmaktadır. $N_b < N_2$ olduğu durumda ise beton basınç dayanımının artışı yaklaşık %12 ile %17 arasında dayanım artışı sağlamaktadır.

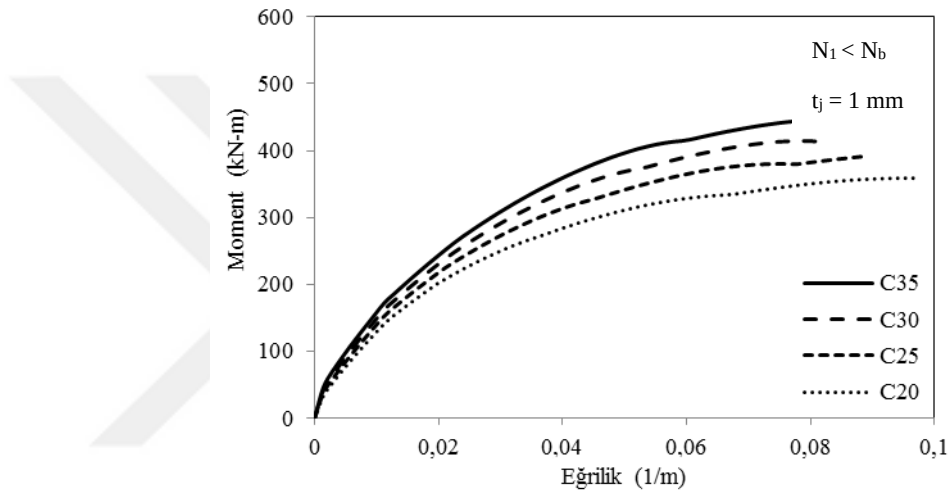


Şekil 5.7. Güçlendirilmemiş 550x550 kolonun dengeli eksenel yük değerinin altında kuvvet etki etmesi ile elde edilen moment-eğrilik ilişkisi

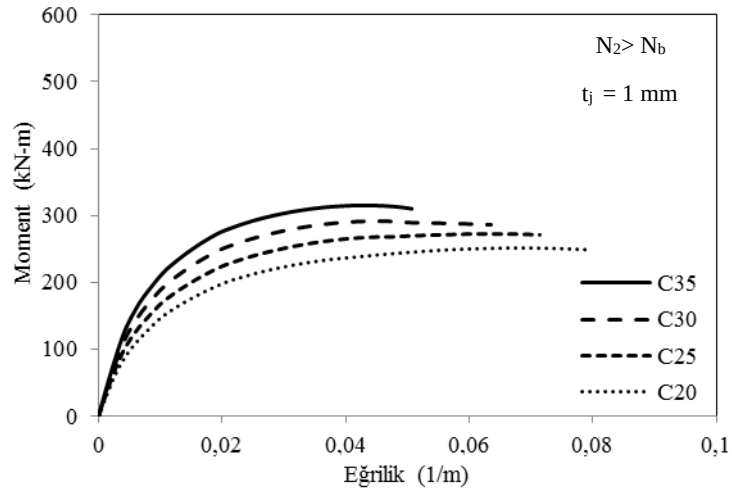


Şekil 5.8. Güçlendirilmemiş 550x550 kolonun dengeli eksenel yük değerinin üzerinde kuvvet etki etmesi ile elde edilen moment-eğrilik ilişkisi

350x350mm kolon kesitine sahip ve 1 mm CFRP ile sargılanmış durumda eksenel yük seviyesinin $N_1 < N_b$ olduğu ve $N_b < N_2$ olduğu durumlar için elde edilen moment-eğrilik ilişkileri sırasıyla Şekil 5.9. ve Şekil 5.10.'da verilmiştir. $N_1 < N_b$ olduğu durumda beton basınç dayanımının artış göstermesi süneklik düzeyinde yaklaşık %3 ile %8 arasında kayıp oluşturmaktadır. $N_b < N_2$ olduğu durumda ise beton basınç dayanımının artış göstermesi %10 ile %18 arasında süneklik kaybı oluşturmaktadır. $N_1 < N_b$ ve $N_b < N_2$ olduğu durumlarda beton basınç dayanımının artması kolon kesit dayanımını yaklaşık %7 arttırmaktadır.

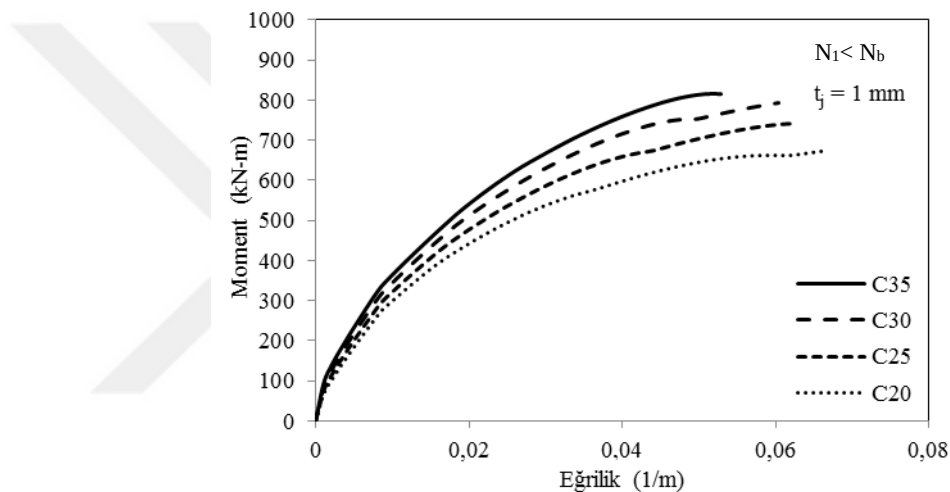


Şekil 5.9. 1mm CFRP ile güçlendirilmiş 350x350 kolonun eksenel yük düzeyi düşük kuvvet etki etmesi ile elde edilen moment-eğrilik ilişkisi

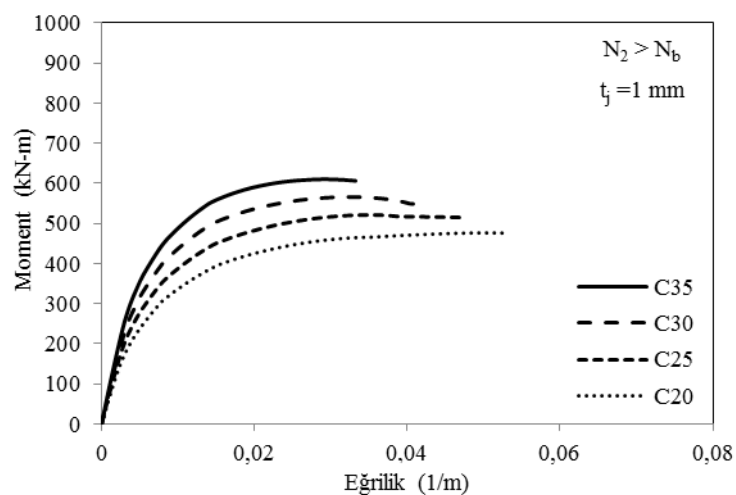


Şekil 5.10. 1mm CFRP ile güçlendirilmiş 350x350 kolonun eksenel yük düzeyi yüksek kuvvet etki etmesi ile elde edilen moment-eğrilik ilişkisi

450x450 mm kolon boyutlarına sahip ve 1 mm CFRP ile sargılanmış iki farklı eksenel kuvvet değeri için elde edilen moment-eğrilik ilişkisi Şekil 5.11. ve Şekil 5.12.'de verilmektedir. $N_1 < N_b$ olduğu durumda beton basınç dayanımının artış göstermesi betonarme kolon kesitinin rijitliğini yaklaşık % 7 oranında arttırmaktadır. $N_b < N_2$ olduğu durumda ise beton basınç dayanımının artması betonarme kolon kesitinin rijitliğini %8 ile %17 arasında değiştirmektedir. 1 mm CFRP ile sargılanmış kolon kesitine etki eden eksenel kuvvet değerinin N_1 'den N_2 'ye artması betonarme kolon kesitinin rijitliğini C20 için yaklaşık %15, C25 için yaklaşık %19, C30 için yaklaşık %30 ve C35 için yaklaşık %33 arttırmaktadır.

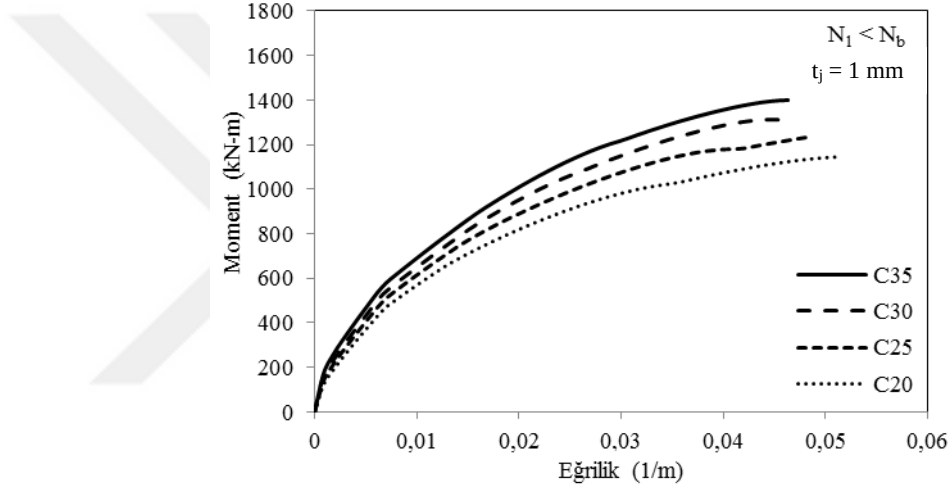


Şekil 5.11. 1mm CFRP ile güçlendirilmiş 450x450 kolonun aksel yük düzeyi düşük kuvvet etki etmesi ile elde edilen moment-eğrilik ilişkisi

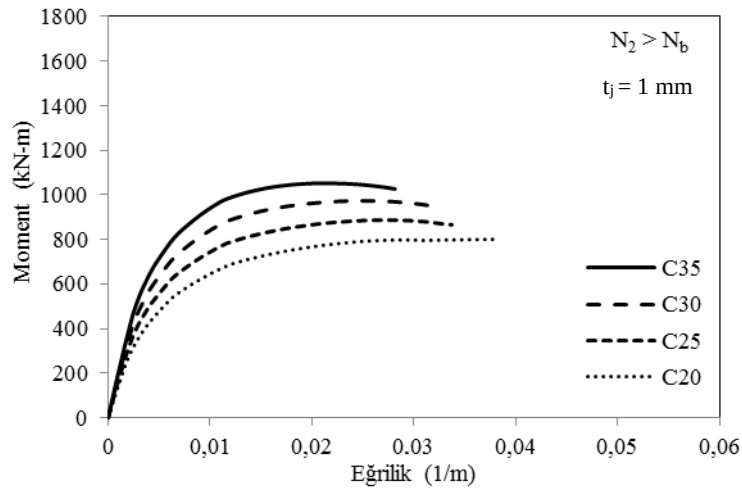


Şekil 5.12. 1mm CFRP ile güçlendirilmiş 450x450 kolonun eksenel yük düzeyi yüksek kuvvet etki etmesi ile elde edilen moment-eğrilik ilişkisi

550x550 mm kolon boyutlarına sahip ve 1 mm CFRP ile sargılanmış kolon kesitine uygulanan iki farklı eksenel kuvvet değeri sonucunda elde edilen moment-eğrilik ilişkileri Şekil 5.13. ve Şekil 5.14.'te verilmiştir. Şekil 5.13.'te kolon kesitinin CFRP sargılaması olmadan $N_1 < N_b$ koşulunu sağladığı durum için, Şekil 5.14.'te CFRP sargılaması olmadan $N_b < N_2$ koşulunu sağladığı durum için elde edilmiştir. $N_1 < N_b$ eksenel kuvvet değerinde, beton basınç dayanımı arttıkça betonarme kolon kesit dayanımı yaklaşık %7 artmaktadır. $N_b < N_2$ durumda ise beton basınç dayanımı arttıkça betonarme kolon kesit dayanımı yaklaşık %10 artış göstermektedir. Eksenel kuvvet değerinin N_1 'den N_2 'ye artış göstermesi C35 ve C30 beton dayanımlarında %25 moment taşıma kapasitesini azaltırken, C25'te %27, C20'de %30 azaltmaktadır.

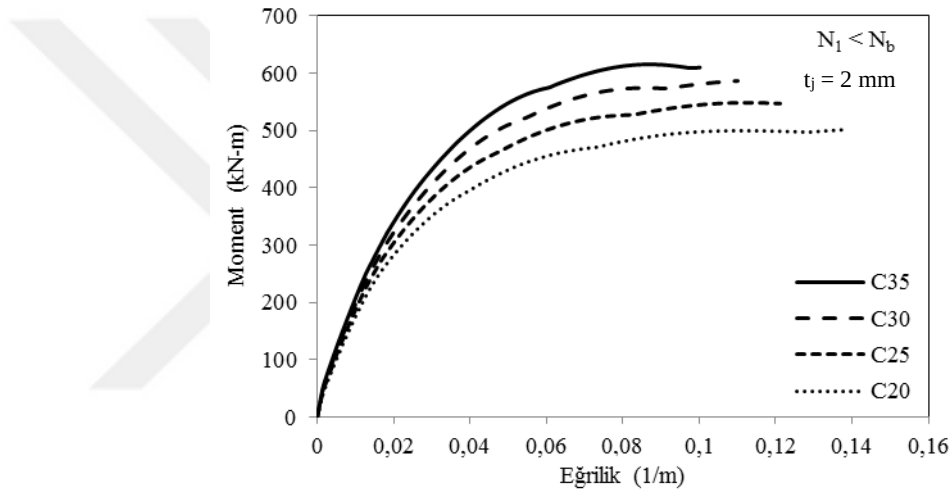


Şekil 5.13. 1mm CFRP ile güçlendirilmiş 550x550 kolonun eksenel yük düzeyi düşük kuvvet etki etmesi ile elde edilen moment-eğrilik ilişkisi

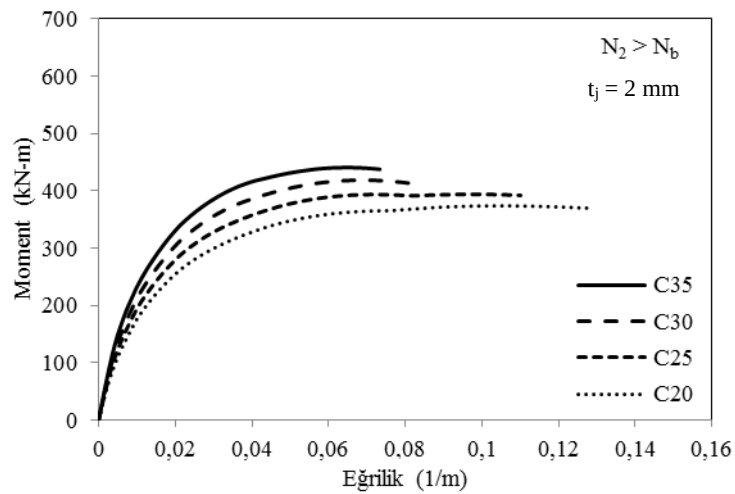


Şekil 5.14. 1mm CFRP ile güçlendirilmiş 550x550 kolonun eksenel yük düzeyi yüksek kuvvet etki etmesi ile elde edilen moment-eğrilik ilişkisi

350x350 mm kolon kesitine sahip ve 2 mm CFRP ile sargılanmış durumda eksenel yük seviyesinin $N_1 < N_b$ olduğu ve $N_b < N_2$ olduğu durumlar için elde edilen moment-eğrilik ilişkileri sırasıyla Şekil 5.15. ve Şekil 5.16.'da verilmiştir. $N_1 < N_b$ eksenel kuvvetinin uygulandığı durumda, beton basınç dayanımının artış göstermesi yaklaşık %10 süneklik kaybını beraberinde getirmektedir. $N_b < N_2$ olduğu durumda ise beton basınç dayanımının artması yaklaşık %14 süneklik kaybını meydana getirmektedir. Ayrıca eksenel yük seviyesinin N_1 'den N_2 'ye yükselmesi beton basınç dayanımlarına göre %17 ile %7 arasında süneklik kaybı oluşturmaktadır. Beton basınç dayanımının yüksek olması süneklik kaybında yüksek olmasını sağlamaktadır.

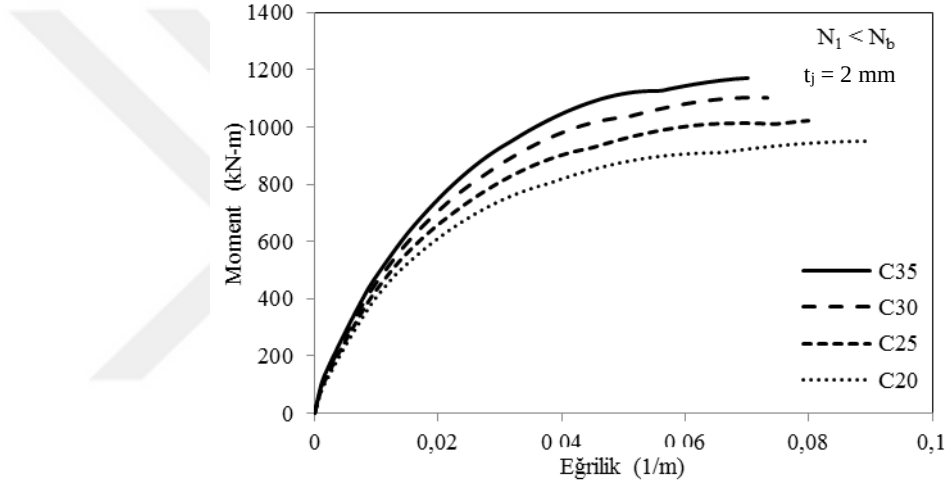


Şekil 5.15. 2mm CFRP ile güçlendirilmiş 350x350 kolonun eksenel yük düzeyi düşük kuvvet etki etmesi ile elde edilen moment-eğrilik ilişkisi

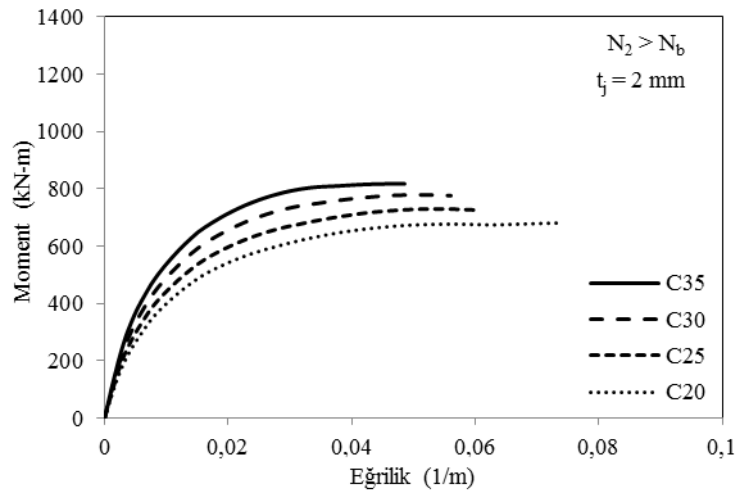


Şekil 5.16. 2mm CFRP ile güçlendirilmiş 350x350 kolonun eksenel yük düzeyi yüksek kuvvet etki etmesi ile elde edilen moment-eğrilik ilişkisi

450x450 mm kolon kesitlerine sahip ve 2 mm CFRP ile sargılanmış kolon kesitine uygulanan iki farklı eksenel kuvvet değeri için elde edilmiş olan moment-eğrilik ilişkileri Şekil 5.17. ve Şekil 5.18.'de verilmiştir. $N_1 < N_b$ eksenel kuvvetin hakim olduğu durumda, beton basınç dayanımının artması betonarme kolon kesitinin rijitliğini yaklaşık %6 arttırmaktadır. $N_b < N_2$ olduğu durumda ise beton basınç dayanımının artış göstermesi rijitliği yaklaşık %11 oranında arttırmaktadır. Eksenel kuvvet değerinin N_1 'den N_2 'ye yükselmesi beton basınç dayanımına göre rijitlik artımını %15 ile %2 arasında arttırmaktadır. Bu durumda beton basınç dayanımı yüksek olan kesitte en fazla rijitlik artışı olduğu gözlemlenmiştir.

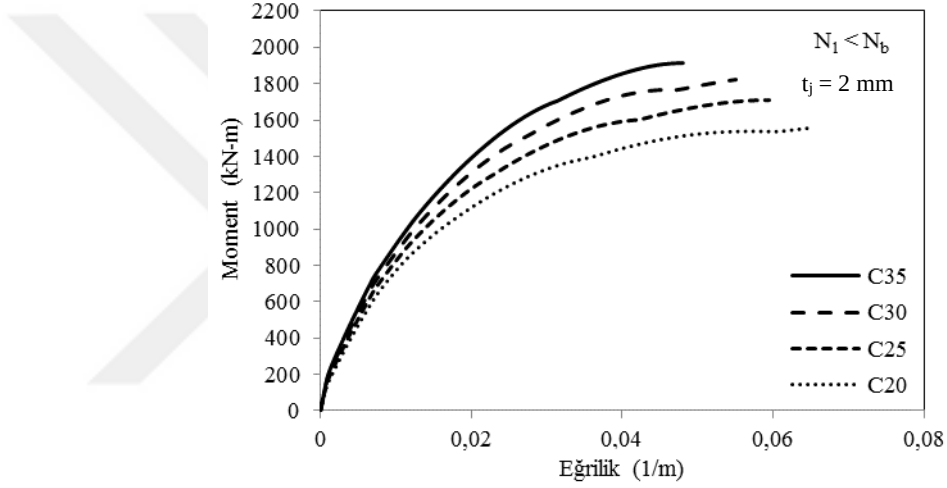


Şekil 5.17. 2mm CFRP ile güçlendirilmiş 450x450 kolonun eksenel yük düzeyi düşük kuvvet etki etmesi ile elde edilen moment-eğrilik ilişkisi

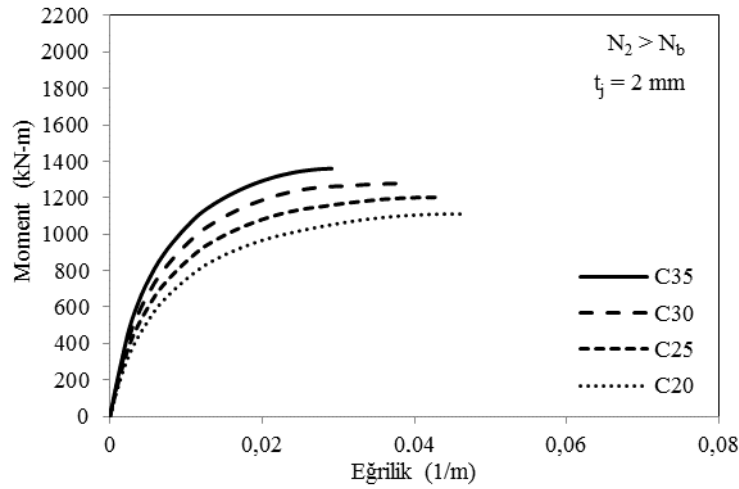


Şekil 5.18. 2mm CFRP ile güçlendirilmiş 450x450 kolonun eksenel yük düzeyi yüksek kuvvet etki etmesi ile elde edilen moment-eğrilik ilişkisi

550x550 mm kolon kesitine sahip 2 mm CFRP ile sargılanmış kolon kesitine uygulanan $N_1 < N_b$ ve $N_b < N_2$ iki farklı eksenel kuvvet değeri için elde edilmiş olan moment-eğrilik ilişkileri Şekil 5.19. ve Şekil 5.20.'de verilmiştir. $N_1 < N_b$ olduğu durumda beton basınç dayanımının artış göstermesi betonarme kolon kesitinin moment taşıma kapasitesini %5 ile %10 arasında arttırmaktadır. $N_b < N_2$ olduğu durumda ise beton basınç dayanımının artış göstermesi betonarme kolon kesitlerinin moment taşıma kapasitelerini yaklaşık %7 arttırmaktadır. Eksenel yük seviyesinin N_1 'den N_2 'ye artış göstermesi betonarme kolon kesitlerinin moment taşıma kapasitelerini yaklaşık %29 azaltmaktadır.

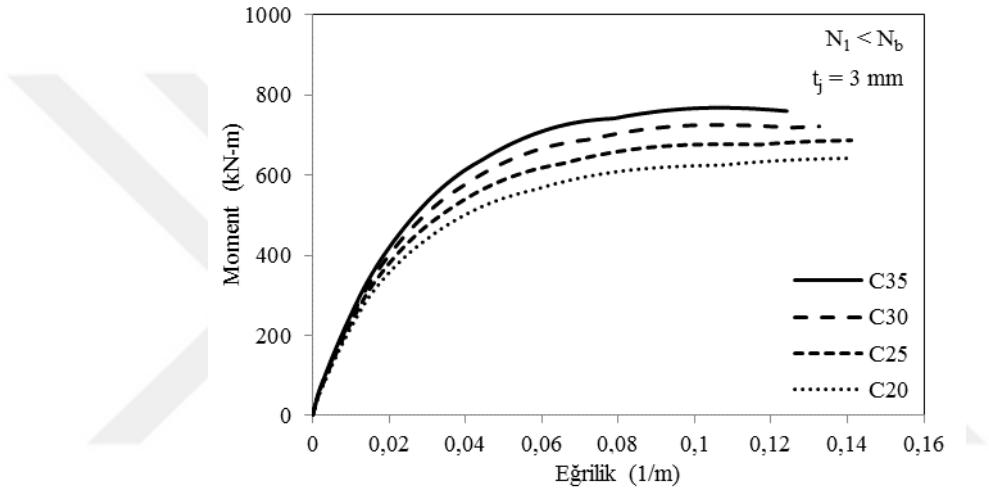


Şekil 5.19. 2mm CFRP ile güçlendirilmiş 550x550 kolonun eksenel yük düzeyi düşük kuvvet etki etmesi ile elde edilen moment-eğrilik ilişkisi

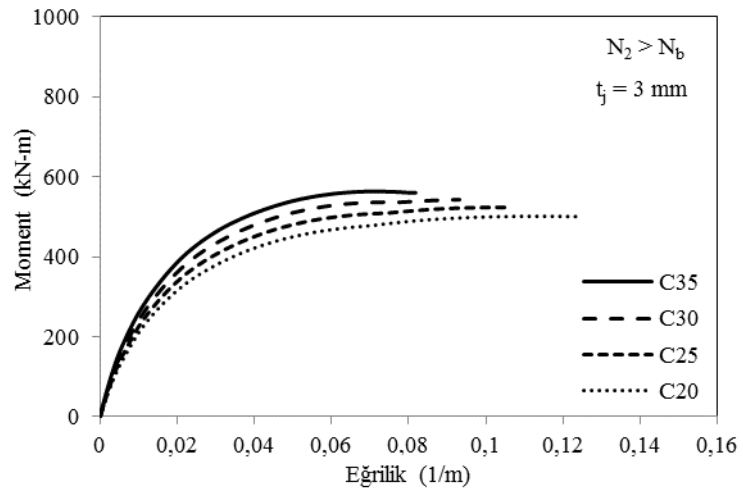


Şekil 5.20. 2mm CFRP ile güçlendirilmiş 550x550 kolonun eksenel yük düzeyi yüksek kuvvet etki etmesi ile elde edilen moment-eğrilik ilişkisi

350x350 mm kolon kesitine sahip 3 mm CFRP ile sargılanmış kolon kesitine uygulanan $N_1 < N_b$ ve $N_b < N_2$ eksenel kuvvet değerleri için elde edilmiş olan moment-eğrilik ilişkileri Şekil 5.21. ve Şekil 5.22.'de verilmiştir. $N_1 < N_b$ durumunda beton basınç dayanımının artış göstermesi betonarme kolon kesitlerinde yaklaşık %5 oranında süneklik kaybını meydana getirmektedir. $N_b < N_2$ durumunda ise beton basınç dayanımının artış göstermesi beraberinde yaklaşık %14 süneklik kaybı oluşturmaktadır. Ayrıca eksenel kuvvetin N_1 'den N_2 'ye artış göstermeside sünekliğin yaklaşık %7 ile %30 arasında azalmasına sebep olmaktadır.

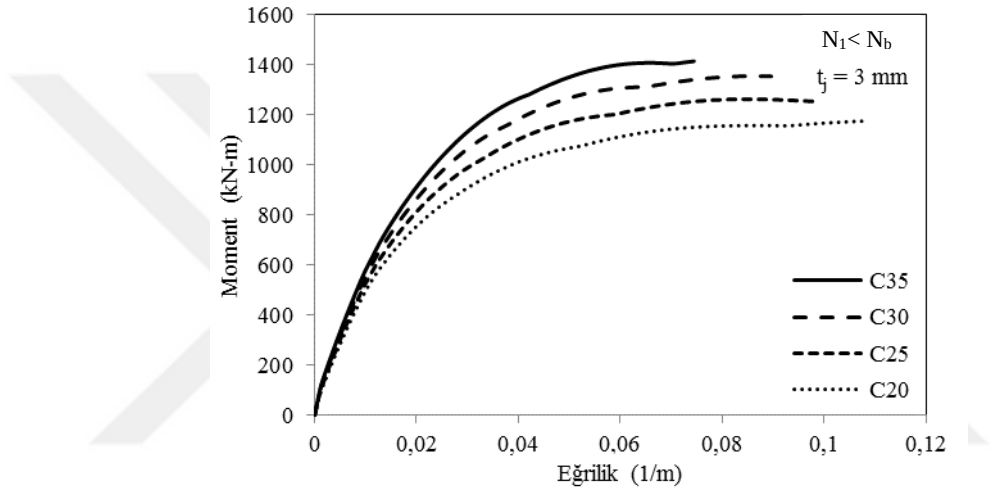


Şekil 5.21. 3mm CFRP ile güçlendirilmiş 350x350 kolonun eksenel yük düzeyi düşük kuvvet etki etmesi ile elde edilen moment-eğrilik ilişkisi

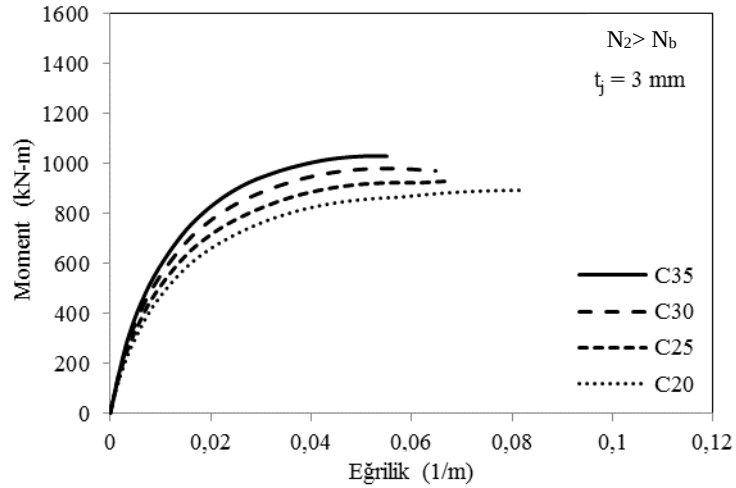


Şekil 5.22. 3mm CFRP ile güçlendirilmiş 350x350 kolonun eksenel yük düzeyi yüksek kuvvet etki etmesi ile elde edilen moment-eğrilik ilişkisi

450x450 mm kolon kesitine sahip 3 mm CFRP ile sargılanmış kolon kesitine uygulanan $N_1 < N_b$ ve $N_b < N_2$ eksenel kuvvet değerleri için elde edilmiş olan moment-eğrilik ilişkileri Şekil 5.23. ve Şekil 5.24.'te verilmiştir. $N_1 < N_b$ eksenel kuvvet değerinde beton basınç dayanımı artış gösterdiğinde betonarme kolon kesitlerin rijitliği yaklaşık %5 oranında artmaktadır. $N_b < N_2$ eksenel kuvvet değerinin hakim olduğu durumda ise beton basınç dayanımının aynı şekilde artması yaklaşık %8 oranında rijitlik artışında beraberinde getirmektedir. Eksenel kuvvet değerinin N_1 'den N_2 'ye artış göstermeside rijitlik artışı sağlamaktadır.

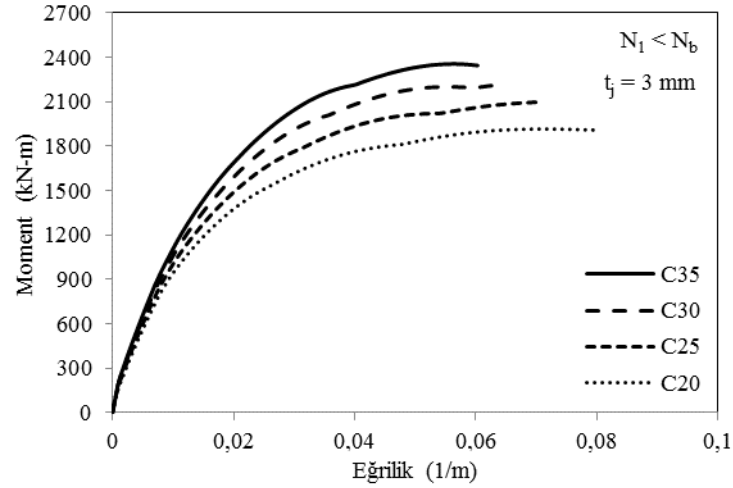


Şekil 5.23. 3mm CFRP ile güçlendirilmiş 450x450 kolonun eksenel yük düzeyi düşük kuvvet etki etmesi ile elde edilen moment-eğrilik ilişkisi

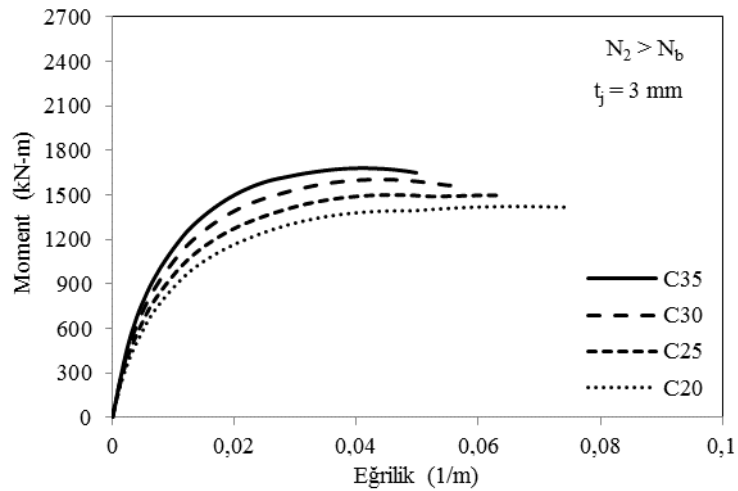


Şekil 5.24. 3mm CFRP ile güçlendirilmiş 450x450 kolonun eksenel yük düzeyi yüksek kuvvet etki etmesi ile elde edilen moment-eğrilik ilişkisi

550x550 mm kolon kesitine sahip 3 mm CFRP ile sargılanmış kolon kesitine uygulanan $N_1 < N_b$ ve $N_b < N_2$ eksenel kuvvet değerleri için elde edilmiş olan moment-eğrilik ilişkileri Şekil 5.25. ve Şekil 5.26.'da verilmiştir. $N_1 < N_b$ durumunda beton basınç dayanımının artış göstermesi betonarme kolon kesit dayanımını yaklaşık %6 oranında arttırmaktadır. $N_b < N_2$ durumunda ise beton basınç dayanımının artış göstermesi yaklaşık %5 oranında moment taşıma kapasitesini arttırmaktadır. Eksenel kuvvet değerinin N_1 'den N_2 'ye artış göstermesi yaklaşık %28 oranında moment taşıma kapasitesinin azalmasına neden olmaktadır. $N_1 < N_b$ eksenel kuvvet değerinde kolon kesitlerinin dayanımı, $N_b < N_2$ eksenel kuvvet değerlerine göre yaklaşık %40 daha fazladır.



Şekil 5.25. 3mm CFRP ile güçlendirilmiş 550x550 kolonun eksenel yük düzeyi düşük kuvvet etki etmesi ile elde edilen moment-eğrilik ilişkisi



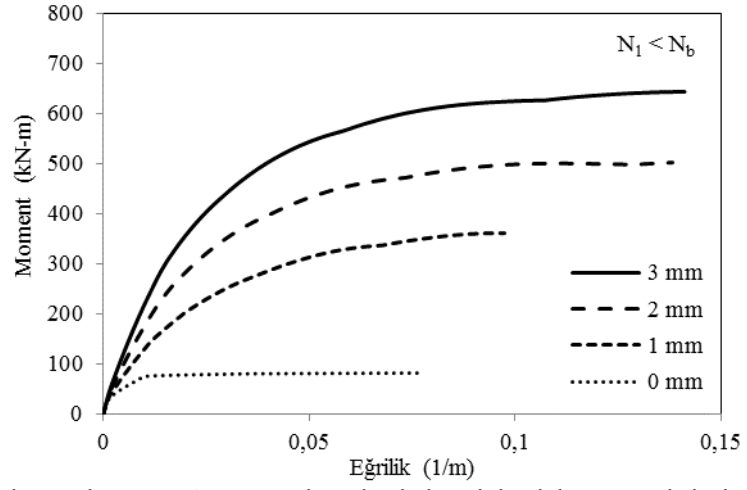
Şekil 5.26. 3mm CFRP ile güçlendirilmiş 550x550 kolonun eksenel yük düzeyi yüksek kuvvet etki etmesi ile elde edilen moment-eğrilik ilişkisi

350x350 mm kolon kesitine ve 20 MPa beton basınç dayanımına sahip, güçlendirilmemiş ve farklı kalınlıklarda CFRP sargılanması ile güçlendirilmiş $N_1 < N_b$ ve $N_b < N_2$ eksenel kuvvet değerlerinin uygulanmasıyla elde edilmiş olan moment-eğrilik ilişkileri sırasıyla Şekil 5.27. ve Şekil 5.28.'de verilmiştir.

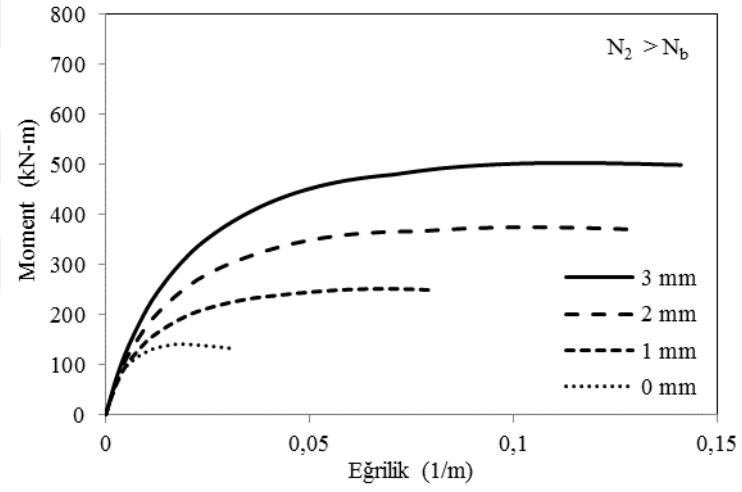
$N_1 < N_b$ eksenel kuvvetin hakim olduğu durumda betonarme kolon kesitinin 1mm CFRP ile güçlendirilmesi yaklaşık %27 süneklik artışı sağlamaktadır. 2 mm CFRP ile güçlendirilmiş betonarme kolon kesitinin sünekliği 1mm CFRP ile güçlendirilmiş betonarme kolona göre yaklaşık %41 daha fazladır. Aynı koşullarda bulunan 2 mm CFRP ile güçlendirilmiş betonarme kolon ile 3 mm CFRP ile güçlendirilmiş betonarme kolonun süneklikleri yaklaşık olarak eşit çıkmıştır.

$N_b < N_2$ eksenel kuvvetin hakim olduğu durumda ise betonarme kolon kesitinin 1 mm CFRP ile güçlendirilmesi yaklaşık 2.5 kat süneklik artışı sağlamaktadır. 2 mm CFRP ile güçlendirilmiş betonarme kolon kesitinin sünekliği 1 mm CFRP ile güçlendirilmiş betonarme kolon kesitine göre yaklaşık %60 daha fazladır. 3 mm CFRP ile güçlendirilmiş betonarme kolon kesitinin sünekliği ise 2 mm CFRP ile güçlendirilmiş göze de %11 daha fazladır.

Eksenel yük seviyesinin N_1 'den N_2 'ye artış göstermesi 3 mm CFRP ile sargılanmış kolonda süneklik açısından hemen hemen bir değişim yaratmamaktadır. 2 mm CFRP ile güçlendirilmiş kolonda ise yaklaşık %8 süneklik azalmasına neden olmaktadır. 1 mm CFRP ile güçlendirilmiş betonarme kolon kesitinde ise bu oran yaklaşık %18'dir. Güçlendirilmemiş betonarme kolon kesitinde ise bu oran yaklaşık %60'a ulaşmaktadır.

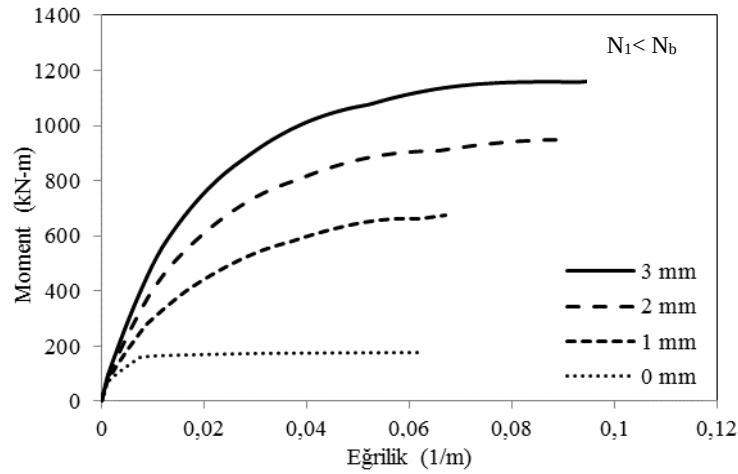


Şekil 5.27. Beton basınç dayanımı 20 MPa ve eksenel yük düzeyi düşük betonarme kolonlarda moment-eğrilik ilişkisi (350x350)

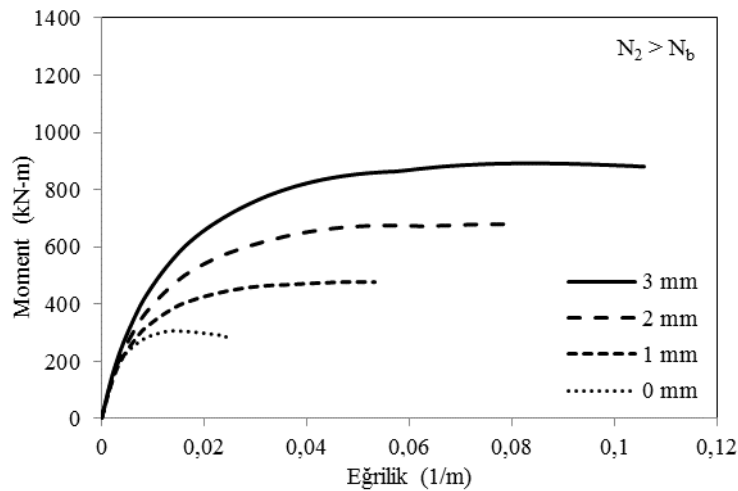


Şekil 5.28. Beton basınç dayanımı 20 MPa ve eksenel yük düzeyi yüksek betonarme kolonlarda moment-eğrilik ilişkisi (350x350)

450x450 mm kolon kesitine ve 20 MPa beton basınç dayanımına sahip, güçlendirilmemiş ve farklı kalınlıklarda CFRP sargılanması ile güçlendirilmiş $N_1 < N_b$ ve $N_b < N_2$ eksenel kuvvet değerlerinin uygulanmasıyla elde edilmiş olan moment-eğrilik ilişkileri sırasıyla Şekil 5.29. ve Şekil 5.30.'da verilmiştir. $N_1 < N_b$ durumunda güçlendirilmemiş betonarme kolonun 1 mm CFRP ile güçlendirilmesi kolon kesitinin rijitliğini yaklaşık %70 arttırmaktadır. 2 mm CFRP ile güçlendirilmiş betonarme kolon ise 1 mm CFRP ile güçlendirilmiş kolon kesitine göre yaklaşık %32 daha rijittir. Ayrıca 3 mm CFRP ile güçlendirilmiş durum, 2 mm CFRP ile güçlendirilmiş duruma göre yaklaşık %22 daha rijittir. $N_b < N_2$ durumunda ise betonarme kolonun 1 mm CFRP ile güçlendirilmesi yaklaşık %16 rijitliği arttırmaktadır. Eksenel yük seviyesinin N_1 'den N_2 'ye artış göstermesi tüm kesitlerde rijitliğin artmasına sebep olmaktadır.



Şekil 5.29. Beton basınç dayanımı 20 MPa ve eksenel yük düzeyi düşük betonarme kolonlarda moment-eğrilik ilişkisi (450x450)



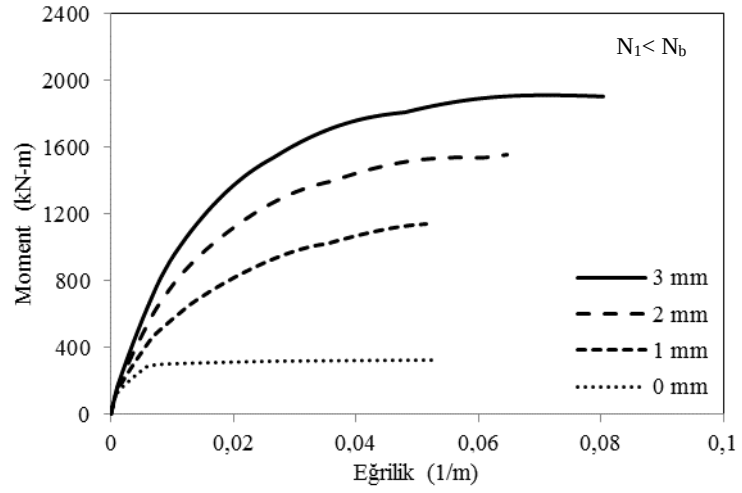
Şekil 5.30. Beton basınç dayanımı 20 MPa ve eksenel yük düzeyi yüksek betonarme kolonlarda moment-eğrilik ilişkisi (450x450)

550x550 mm kolon kesitine ve 20 MPa beton basınç dayanımına sahip, güçlendirilmemiş ve farklı kalınlıklarda CFRP sargılanması ile güçlendirilmiş $N_1 < N_b$ ve $N_b < N_2$ eksenel kuvvet değerlerinin uygulanmasıyla elde edilmiş olan moment-eğrilik ilişkileri sırasıyla Şekil 5.31. ve Şekil 5.32.'de verilmiştir.

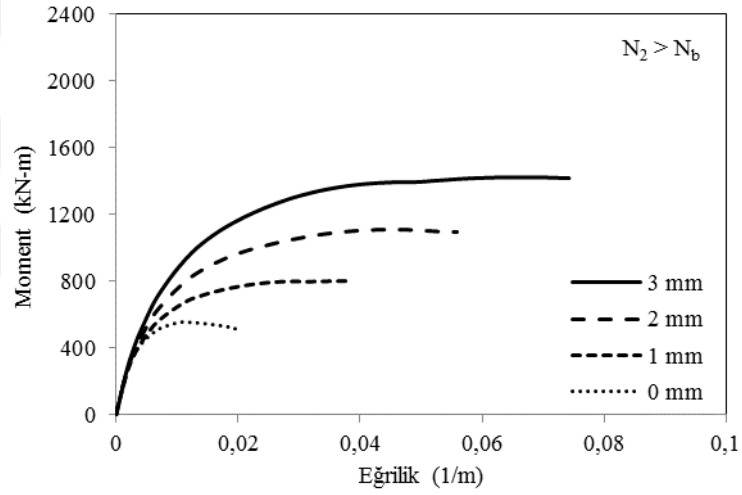
$N_1 < N_b$ durumunda güçlendirilmemiş kolon kesitinin 1 mm CFRP ile sargılanması kesitin moment taşıma kapasitesini yaklaşık 3,5 kat arttırmaktadır. 2 mm CFRP ile güçlendirilmiş betonarme kolon kesiti ise 1 mm CFRP ile güçlendirilmiş duruma göre yaklaşık %35 daha fazla moment taşıma kapasitesine sahiptir. 3 mm CFRP ile güçlendirilmiş hal ise 2 mm CFRP ile güçlendirilmiş durumu göre yaklaşık %22 oranında daha fazla moment taşıyabilir.

$N_b < N_2$ durumda ise güçlendirilmemiş kolon kesitinin 1 mm CFRP ile sargılanması kesitin moment taşıma kapasitesini yaklaşık %43 arttırmaktadır. 2 mm CFRP ile güçlendirilmiş betonarme kolon kesiti ise 1 mm CFRP ile güçlendirilmiş duruma göre yaklaşık %39 daha fazla moment taşıma kapasitesine sahiptir. 3 mm CFRP ile güçlendirilmiş hal ise 2 mm CFRP ile güçlendirilmiş durumu göre yaklaşık %27 oranında daha fazla moment taşıyabilir.

Eksenel yük seviyesinin N_1 'den N_2 'ye artış göstermesi güçlendirilmemiş durumda moment taşıma kapasitesini yaklaşık %70 arttırmaktadır. 1 mm CFRP ile güçlendirilmiş durumda ise yaklaşık %30 azaltmaktadır. 2 mm CFRP ile güçlendirilmiş durumda da yaklaşık %28 oranında bir azalma gözlenirken, 3 mm CFRP ile güçlendirilmiş durumda bu oran yaklaşık %26 olmaktadır.



Şekil 5.31. Beton basınç dayanımı 20 MPa ve eksenel yük düzeyi düşük betonarme kolonlarda moment-eğrilik ilişkisi (550x550)



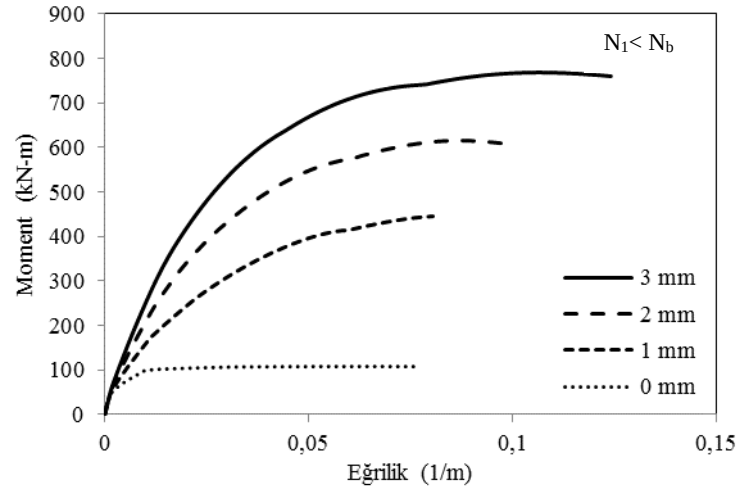
Şekil 5.32. Beton basınç dayanımı 20 MPa ve eksenel yük düzeyi yüksek betonarme kolonlarda moment-eğrilik ilişkisi (550x550)

350x350 mm kolon kesitine ve 35 MPa beton basınç dayanımına sahip, güçlendirilmemiş ve farklı kalınlıklarda CFRP sargılanması ile güçlendirilmiş $N_1 < N_b$ ve $N_b < N_2$ eksenel kuvvet değerlerinin uygulanmasıyla elde edilmiş olan moment-eğrilik ilişkileri sırasıyla Şekil 5.33. ve Şekil 5.34.'te verilmiştir.

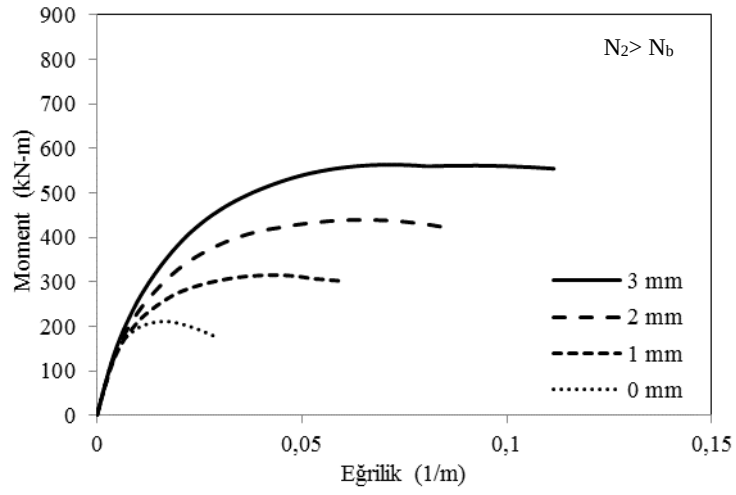
$N_1 < N_b$ olduğu durumda güçlendirilmemiş halde bulunan betonarme kolonun 1 mm CFRP ile güçlendirilmesi yaklaşık %6 süneklik artışı sağlamaktadır. 2 mm CFRP ile güçlendirilmiş betonarme kolonun 1 mm CFRP ile güçlendirilmiş haline göre sünekliği %24 daha fazladır. 3 mm CFRP ile güçlendirilmiş durumdaki kesitin 2 mm CFRP ile güçlendirilmiş haline göre de sünekliği yaklaşık %24 daha fazladır.

$N_b < N_2$ durumunda ise güçlendirilmemiş halde bulunan kolon kesitinin 1 mm CFRP ile güçlendirilmesi sünekliği yaklaşık 2,4 kat arttırmaktadır. 2 mm CFRP ile güçlendirilmiş halde bulunan betonarme kolon kesitinin sünekliği 1 mm CFRP ile güçlendirilmişse göre yaklaşık %38 daha fazladır. 3 mm CFRP ile güçlendirilmiş betonarme kolon kesitinin sünekliği ise 2 mm CFRP ile güçlendirilmiş duruma göre sünekliği %36 daha fazladır.

Ayrıca eksenel yük seviyesinin N_1 'den N_2 'ye artış göstermesi sünekliğin güçlendirilmemiş kolonda yaklaşık %66, 1 mm CFRP ile güçlendirilmiş durumda %26, 2 mm CFRP ile güçlendirilmiş durumda %18, 3 mm CFRP ile güçlendirilmiş durumda ise %10 azalmasına sebep olmaktadır.



Şekil 5.33. Beton basınç dayanımı 35 MPa ve eksenel yük düzeyi düşük betonarme kolonlarda moment-eğrilik ilişkisi (350x350)



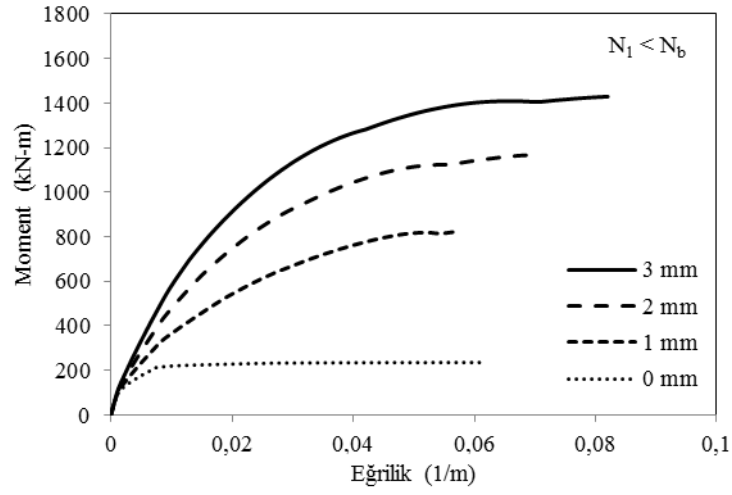
Şekil 5.34. Beton basınç dayanımı 35 MPa ve eksenel yük düzeyi yüksek betonarme kolonlarda moment-eğrilik ilişkisi (350x350)

450x450 mm kolon kesitine ve 35 MPa beton basınç dayanımına sahip, güçlendirilmemiş ve farklı kalınlıklarda CFRP sargılanması ile güçlendirilmiş $N_1 < N_b$ ve $N_b < N_2$ eksenel kuvvet değerlerinin uygulanmasıyla elde edilmiş olan moment-eğrilik ilişkileri sırasıyla Şekil 5.35. ve Şekil 5.36.'de verilmiştir.

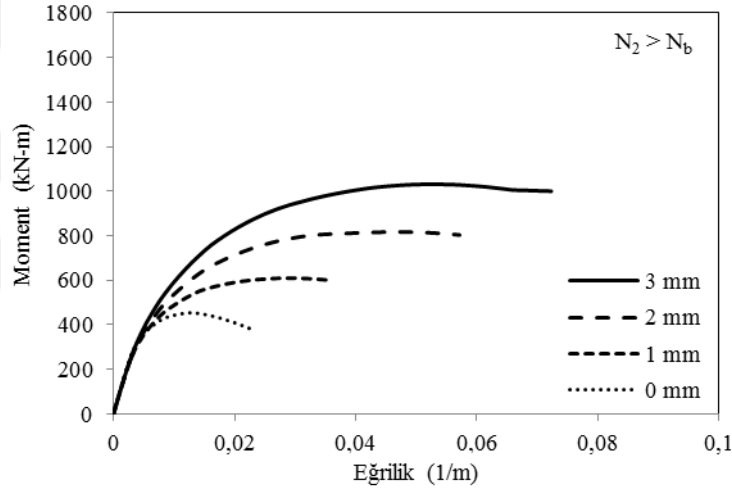
$N_1 < N_b$ olduğu durumda güçlendirilmemiş halde bulunan betonarme kolon kesitini 1 mm CFRP ile güçlendirmek rijitliği yaklaşık %57 arttırmaktadır. 2 mm CFRP ile güçlendirilmiş betonarme kolon kesitinin rijitliğide 1 mm CFRP ile güçlendirilmiş duruma göre yaklaşık %28 daha fazladır. 3 mm CFRP ile güçlendirilmiş kesitin rijitliği 2 mm CFRP ile güçlendirilmiş kesite göre de yaklaşık %19 daha rijittir.

$N_b < N_2$ durumunda ise CFRP kalınlığının artış göstermesi birbirini takip eden kesitlerde rijitliği yaklaşık %7 oranında arttırmaktadır.

Eksenel kuvvet seviyesinin N_1 'den N_2 'ye artış göstermesi rijitliği, güçlendirilmemiş kolon kesitinde yaklaşık 2 kat arttırırken, 1 mm CFRP ile güçlendirilmiş durumda yaklaşık %38, 2 mm CFRP ile güçlendirilmiş durumda yaklaşık %15, 3 mm CFRP ile güçlendirilmiş durumda ise yaklaşık %5 arttırmaktadır.



Şekil 5.35. Beton basınç dayanımı 35 MPa ve eksenel yük düzeyi düşük betonarme kolonlarda moment-eğrilik ilişkisi (450x450)



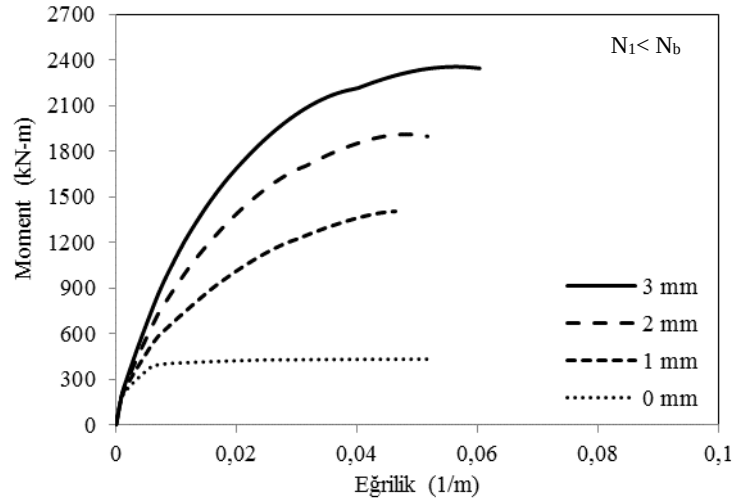
Şekil 5.36. Beton basınç dayanımı 35 MPa ve eksenel yük düzeyi yüksek betonarme kolonlarda moment-eğrilik ilişkisi (450x450)

550x550 mm kolon kesitine ve 35 MPa beton basınç dayanımına sahip, güçlendirilmemiş ve farklı kalınlıklarda CFRP sargılanması ile güçlendirilmiş $N_1 < N_b$ ve $N_b < N_2$ eksenel kuvvet değerlerinin uygulanmasıyla elde edilmiş olan moment-eğrilik ilişkileri sırasıyla Şekil 5.37. ve Şekil 5.38.'de verilmiştir.

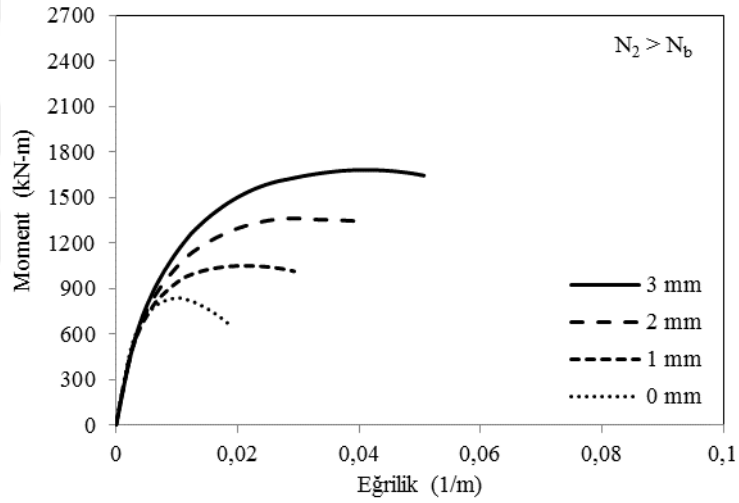
$N_1 < N_b$ olduğu durumda güçlendirilmemiş kolon kesitinin 1 mm CFRP ile güçlendirilmesi yaklaşık 3,23 kat moment taşıma kapasitesini arttırmaktadır. 2 mm CFRP ile güçlendirilmiş kolon kesiti ise 1 mm CFRP ile güçlendirilmiş kolon kesitine göre yaklaşık %36 oranında daha fazla moment taşıma kapasitesine sahiptir. 3 mm CFRP ile güçlendirilmiş kolon kesitide 2 mm CFRP ile güçlendirilmiş kolon kesitine göre yaklaşık %23 oranında dayanımı daha yüksektir.

$N_b < N_2$ durumunda ise betonarme kolon kesitlerinin birbirini takip eden CFRP sargılamalarıyla güçlendirilmesi dayanımı yaklaşık %26 oranında arttırmaktadır.

Eksenel kuvvet seviyesinin N_1 'den N_2 'ye artış göstermesi ise dayanımı güçlendirilmemiş kolon kesitinde yaklaşık %92 oranında arttırırken, 1 mm CFRP ile güçlendirilmiş durumda yaklaşık %25 oranında azaltmakta, 2 mm CFRP ile güçlendirilmiş durumda yaklaşık %29 azaltmakta ve 3 mm CFRP ile güçlendirilmiş durumda ise yaklaşık %29 azaltmaktadır.



Şekil 5.37. Beton basınç dayanımı 35 MPa ve eksenel yük düzeyi düşük betonarme kolonlarda moment-eğrilik ilişkisi (550x550)



Şekil 5.38. Beton basınç dayanımı 35 MPa ve eksenel yük düzeyi yüksek betonarme kolonlarda moment-eğrilik ilişkisi (550x550)

BÖLÜM 6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Yapılmış olan çalışma kapsamında güçlendirilmiş ve güçlendirilmemiş betonarme kolonlar üzerinde beton basınç dayanımının, CFRP kalınlığının, kolon boyutunun ve eksenel kuvvet düzeyinin rijitliği, dayanımı ve sünekliği nasıl etkilediği araştırılmıştır. Sayısal çalışma neticesinde elde edilen sonuçlar ve öneriler verilmektedir.

6.1. Sonuçlar

Bu çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi sıralabilir;

- CFRP ile güçlendirilmemiş betonarme kare kolon kesitinin $N_1 < N_b$ durumunda beton basınç dayanımının artması süneklik üzerinde ciddi bir etki yaratmamaktadır. Buna karşılık $N_2 > N_b$ durumunda beton basınç dayanımının artması sünekliği azda olsa azaltmaktadır.
- CFRP ile güçlendirilmemiş betonarme kare kolon kesitinin eksenel kuvvet değerinin N_1 'den N_2 'ye artış göstermesi yaklaşık %70 ile %77 arasında süneklik kaybını beraberinde getirmektedir.
- CFRP ile güçlendirilmemiş betonarme kare kolon kesitine $N_1 < N_b$ eksenel kuvvetin etki ettiği durumda kolon boyutları artış gösterdikçe nihai eğrilik değerinde yaklaşık %17 oranında azalma gözlemlenmiştir.
- CFRP ile güçlendirilmemiş betonarme kare kolonlarda beton basınç dayanımının artış göstermesi hem $N_1 < N_b$ hemde $N_2 > N_b$ durumlarında betonarme kolon kesit dayanımını arttırmaktadır.
- CFRP ile güçlendirilmemiş betonarme kare kolonlarda eksenel kuvvet değerinin N_1 'den N_2 'ye artış göstermesi betonarme kolon kesitlerinin dayanımını arttırmaktadır. Bu durum incelenen betonarme kare kolonların karşılıklı etki diyagramıyla açıklanabilir.

- f. CFRP ile güçlendirilmemiş betonarme kare kolonlarda $N_1 < N_b$ ve $N_2 > N_b$ durumlarında beton basınç dayanımının artış göstermesi rijitliği arttırmaktadır.
- g. CFRP ile güçlendirilmemiş betonarme kare kolonlarda kolon boyutunun artması hem $N_1 < N_b$ hemde $N_2 > N_b$ durumlarında rijitliği arttırmaktadır.
- h. CFRP ile güçlendirilmiş betonarme kare kolon kesitlerinde beton basınç dayanımının artması sünekliği düşürmektedir. Ancak aynı durumda kesitlerin moment taşıma kapasiteleri ve rijitlikleri artmaktadır.
- i. CFRP ile güçlendirilmiş betonarme kare kolon kesitlerde CFRP sargılamasının artması sünekliği, dayanımı, rijitliği arttırmaktadır.
- j. CFRP ile güçlendirilmiş betonarme kare kolon kesitlerde kolon boyutunun artması $N_1 < N_b$ ve $N_2 > N_b$ durumlarında nihai eğrilik değerinin azalmasına neden olmaktadır.
- k. CFRP ile güçlendirilmiş betonarme kare kolon kesitlerde eksenel kuvvet değerinin artması moment taşıma kapasitesini ve sünekliği azaltırken, rijitliği arttırmaktadır.

6.2. Öneriler

Yapılmış olan bu tez çalışması kapsamında elde edilmiş olan veriler sayısal analiz yöntemleri kullanarak bulunmuştur. Yapılmış olan bu çalışma ilerleyen zamanlarda deneysel çalışmalar ile zenginleştirilebilir.

Bu çalışma, betonarme kare kolonların CFRP ile güçlendirilmesi sonucunda davranışı hakkında ön bilgi sağlamaktadır.

Yapılan çalışma, FRP çeşitlerinden sadece CFRP için gerçekleştirilmiştir. İlerleyen süreçte diğer FRP çeşitlerinin betonarme kolonların güçlendirilmesi üzerindeki etkisinin araştırılması konusunda yapılmış olan bu çalışma yol gösterici nitelikte olabilecektir.

KAYNAKLAR

- [1] Genç, F., Türkiye'de Doğal Afetler ve Doğal Afetlerde Risk Yönetimi. Stratejik Araştırmalar Dergisi, Ankara, 201-226, 2007.
- [2] Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı., Müdahale, İyileştirme ve Sosyoekonomik Açıdan 2011 Van Depremi. Ankara, 2014.
- [3] Özmen, B., 17 Ağustos 1999 İzmit Körfezi Depreminin Hasar Durumu. Türkiye Deprem Vakfı, Ankara, 2000.
- [4] Pham, T., Hadi, M., Stress Prediction Model for FRP Confined Rectangular Concrete Columns with Rounded Corners. Journal of Composites for Construction, 2014.
- [5] Mander, J., Priestle, M., Park, R., Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete. Journal of Structural Engineering, 1804-1826, 1988.
- [6] Youssef, M., Feng, M., Mosallam, A., Stress-Strain Model for Concrete Confined by FRP Composites. Composites Engineering, 614-628, 2007.
- [7] Wei, Y., Wu, Y., Unified Stress-Strain Model of Concrete for FRP Confined Columns. Construction and Building Materials, 381-392, 2012.
- [8] Göksu, C., Demir, C., Darılmaz, K., İlki, A., Kumbasar, N., Static Nonlinear Analysis of A Retrofitted Typical Reinforced Concrete Building in Turkey. 8th U.S. National Conference on Earthquake Engineering, California, 2006.
- [9] Hosseini, A., Khaloo, A., Fadaee, S., Seismic Performance of High-Strength Concrete Square Columns Confined with Carbon Fiber Reinforced Polymers (CFRPs). 32.Cilt. Canadian Journal of Civil Engineering, 569-578, 2005.
- [10] Iacobucci, R., Sheikh, S., Bayrak, O., Retrofit of Square Concrete Columns with Carbon Fiber Reinforced Polymer for Seismic Resistance. 100.Cilt. ACI Structural Journal, 785-794, 2003.

- [11] Lo, S., Kwan, A., Ouyang, Y., Ho, J., Finite Element Analysis of Axially Loaded FRP Confined Rectangular Concrete Columns. 100.Cilt. Engineering Structures, 253-263, 2015.
- [12] Guan., L., Seismic Performance of FRP Confined RC Columns: Stress-Strain Models and Numerical Simulation. Doktora Tezi, 2016.
- [13] Aykaç, B., Can, H., Mantolama yönteminin dikdörtgen kesitli betonarme kolonlarda uygulanabilirliği. 23.Cilt. Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Dergisi, 223-229, 2008.
- [14] Vadoros, K.G., Dritsos, S. E., Concrete jacket construction detail effectiveness when strengthening RC columns. Construction and Building Materials, 264-276, 2008.
- [15] www.besoglu.com/hizmet/frp-kompozit-teknolojisi/, Erişim Tarihi: 03.10.2018.
- [16] www.imoistanbul.org/imoarsiv/seminer-notlari-ekim-2016/bayram-aygun/seminer-notu.pdf, Erişim Tarihi: 03.10.2018.
- [17] Yavuz, G., Lif Takviyeli Polimerlerin Betonarme Kirişlerde Donatı Olarak Kullanımı. 6.Cilt. e-Journal of New World Sciences Academy, 1001-1015, 2011.
- [18] Yang, Z., Wu, K., Experimental Analysis of Tensile Mechanical Properties of Sprayed FRP. Advances in Materials Science and Engineering, 2016.
- [19] Altay, Ç., Karbon Fiber Destekli (CFRP) Lamine Ağaç Malzemenin Bazı Fiziksel ve Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, 2014.
- [20] <http://www.deltekinsaat.com.tr/frp-karbon-lifli-polimer-plaka.html>, Erişim Tarihi: 03.10.2018.
- [21] www.insayapitasarim.com/referanslar/, Erişim Tarihi: 03.10.2018.
- [22] Ersoy,U., Özcebe, G., Sarılmış Betonarme Kesitlerde Moment-Eğrilik İlişkisi Analitik Bir İrdeleme. İMO Teknik Dergi, 1799-1827, 1998.
- [23] http://opensees.berkeley.edu/wiki/index.php/Moment_Curvature_Example, Erişim Tarihi: 03.10.2018.

- [24] Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik, Ankara, 2007.



ÖZGEÇMİŞ

İlker Subaşı, 25.09.1992’de Tokat’ta doğdu. İlk ve orta eğitimini İstanbul’da tamamladı. 2010 yılında Büyükşehir Hüseyin Yıldız Anadolu Lisesi’nden mezun oldu. 2010 yılında başladığı Sakarya Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü’nde 1 yıl İngilizce hazırlık eğitiminin ardından 2015 yılında mezun oldu. 2016 yılında Sakarya Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalının Yapı Bilim dalında yüksek lisans eğitimine başladı. 2017 yılında başlamış olduğu İstanbul Arel Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü’ndeki Araştırma Görevlisi pozisyonundaki görevine halen devam etmektedir.