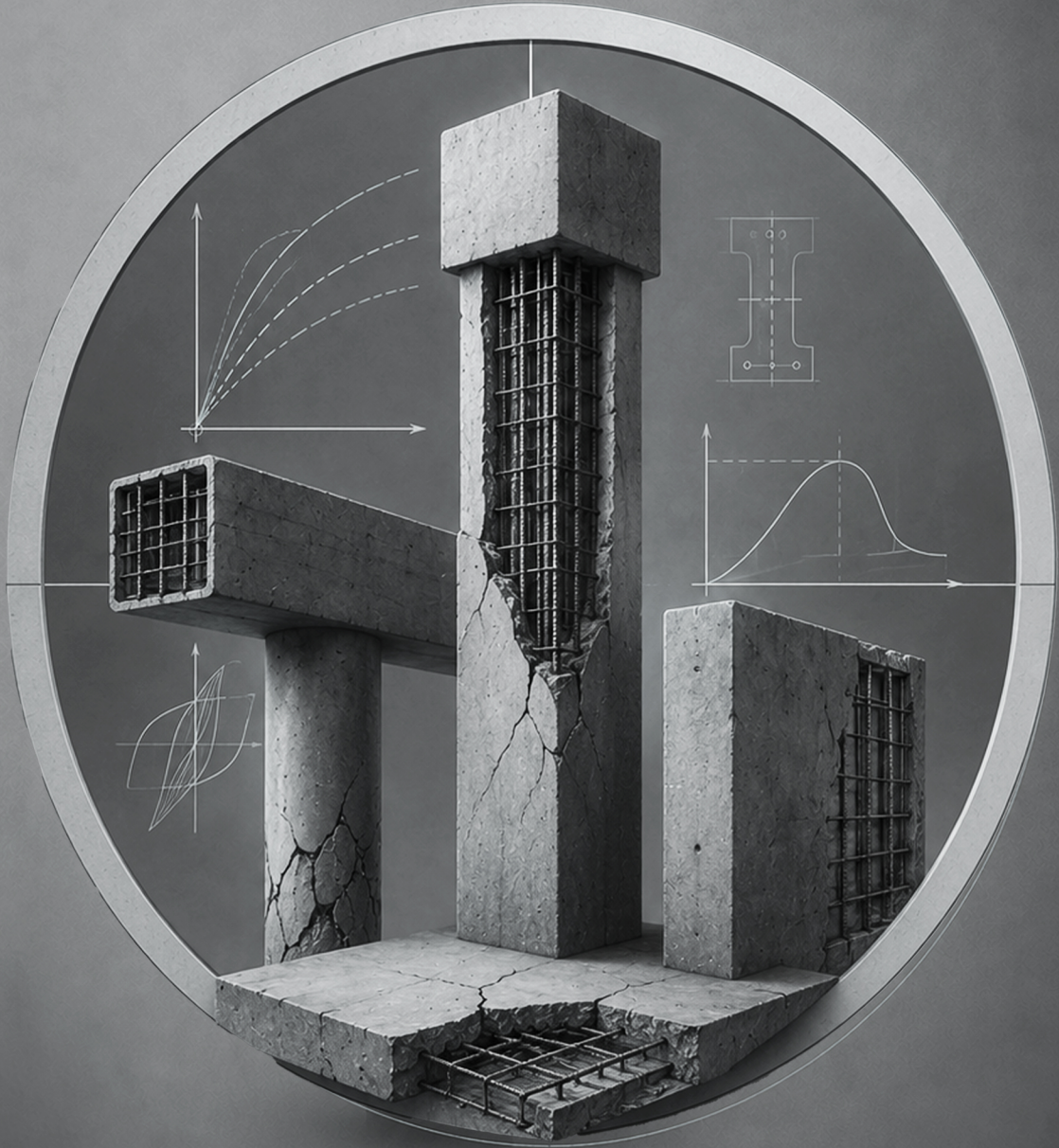


BETONARME YAPISAL ELEMANLARIN DOGRUSAL OLMAYAN MEKANİK DAURANIŞI

Dr. Saeid Foroughi
Prof. Dr. S. Bahadır Yüksel



SELÇUK
UNIVERSITY
PRESS

BETONARME YAPISAL ELEMENLARIN DOĞRUSAL OLMAYAN MEKANİK DAVRANIŞI

YAZARLAR

DR. SAEİD FOROUGHİ

PROF. DR. S. BAHADIR YÜKSEL



SELÇUK
ÜNİVERSİTESİ
YAYINLARI

BETONARME YAPISAL ELEMANLARIN DOĞRUSAL OLMAYAN MEKANİK DAVRANIŞI

Yazarlar: Dr. Saeid Foroughi, Prof. Dr. S. Bahadır Yüksel

ORCIDs: 0000-0002-7556-2118, 0000-0002-4175-1156

Kapak Tasarım&Mizanpaj: Tuğçe DELEN

Selçuk Üniversitesi Yayınları: Haziran, 2026

ISBN: 978-975-448-270-6

DOI: <https://doi.org/10.59726/SUPress/9789754482706>

Anahtar Kavramlar: 1. Doğrusal Olmayan Mekanik Davranış, 2. Eğrilik Sünekliği, 3. Moment-Eğrilik Analizi, 4. Sarıgılı Beton Modelleri, 5. Performansa Dayalı Deprem Mühendisliği.

Atf için: Foroughi, S., Yüksel, S.B., (2026), Betonarme Yapısal Elemanların Doğrusal Olmayan Mekanik Davranışı, Selçuk Üniversitesi Yayınları.



Selçuk Üniversitesi Yayınları, Bilimsel Yayınlar Koordinatörlüğü bünyesinde.

Yayıncı: Selçuk Üniversitesi Yayınları

Yayıncı Sertifika Numarası: 43463

Bilimsel Yayınlar Koordinatörü: Prof. Dr. Tuncer ACAR

Adres: Selçuk Üniversitesi Yayınları, Alaeddin Keykubat Yerleşkesi, Akademi mah. Yeni İstanbul Cad. No:369

Posta Kodu: 42130, Selçuklu-Konya/Türkiye

Web: yayinevi.selcuk.edu.tr

E-posta: yayinevi@selcuk.edu.tr

Tel: 0 (332) 241 00 41



Bu çalışma Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0) lisansı altındadır. Bu çalışmanın bir kopyasını görüntülemek için şu adresi ziyaret edin: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>



Bu lisans, yazar atfının açıkça belirtilmesi koşuluyla, ticari kullanım için değil, kişisel kullanım için çalışmanın herhangi bir bölümünün kopyalanmasına izin verir.

NONLINEAR MECHANICAL BEHAVIOR OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURAL ELEMENTS

AUTHORS

DR. SAEID FOROUGHI

PROF. DR. S. BAHADIR YÜKSEL



Nonlinear Mechanical Behavior of Reinforced Concrete Structural Elements

Authors: Dr. Saeid Foroughi, Prof. Dr. S. Bahadır Yüksel

ORCID: 0000-0002-7556-2118, 0000-0002-4175-1156

Cover Design&Layout: Tuğçe DELEN

Selcuk University Press: June, 2026

ISBN: 978-975-448-270-6

DOI: <https://doi.org/10.59726/SUPress/9789754482706>

Keywords: 1. Non-linear Mechanical Behavior, 2. Curvature Ductility, 3. Moment-Curvature Analysis, 4. Confined Concrete Models, 5. Performance-Based Earthquake Engineering.

Cite This: Foroughi, S., Yüksel, S.B., (2026), Nonlinear Mechanical Behavior of Reinforced Concrete Structural Elements, Selcuk University Press.



Selcuk University Press is under the body of Scientific Publications Coordinatorship.

Publisher: Selcuk University Press

Publisher Certification Number: 43463

Scientific Publications Coordinator: Prof. Dr. Tuncer ACAR

Address: Selçuk Üniversitesi Yayınları, Alaeddin Keykubat Yerleşkesi, Akademi mah. Yeni İstanbul Cad. No:369

Posta Kodu: 42130, Selçuklu-Konya/Türkiye

Web: yayinevi.selcuk.edu.tr

E-posta: yayinevi@selcuk.edu.tr

Phone: 0 (332) 241 00 41



This work is licensed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0). To view a copy of this license, visit <https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>



This license allows for copying any part of the work for personal use, not commercial use, providing author attribution is clearly stated.

İÇİNDEKİLER

ŞEKİLLER LİSTESİ.....	iv
TABLolar LİSTESİ.....	viii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xi
ÖNSÖZ.....	xiii
GİRİŞ.....	1
1. BETON VE DONATI ÇELİĞİ DAVRANIŞ MODELLERİ	4
1.1. Sargısız Beton Modelleri.....	4
1.1.1. Sargısız betonun gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri.....	4
1.1.2. Sargısız beton için geliştirilmiş Hognestad modeli.....	4
1.1.3. Sargısız beton için Mander modeli.....	5
1.1.4. TBDY (2018) sargısız beton modeli.....	6
1.2. Sargılı Beton Modelleri.....	7
1.2.1. Sargılı betonun gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri.....	9
1.2.2. Sargılı beton için Mander modeli.....	9
1.2.3. TBDY (2018)'e göre sargılı beton modeli.....	14
1.2.4. Sargılı beton için Saatçioğlu ve Ravzi modeli.....	16
1.3. Donatı Çeliğinin Gerilme- Şekildeğiştirme Özellikleri.....	21
2. BETONARME KOLONLARIN GERİLME-ŞEKİLDEĞİŞTİRME İLİŞKİLERİ	22
2.1. Kare Kesitli Betonarme Kolonların Gerilme-Şekildeğiştirme İlişkileri.....	24
2.1.1. 400 mm × 400 mm kare enkesitli kolonun gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi:.....	24
2.1.2. 500mm×500mm kare enkesitli kolonun gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi.....	48
2.2. Dikdörtgen Kesitli Betonarme Kolonların Gerilme-Şekildeğiştirme İlişkileri ...	56
2.2.1. 300 mm × 550 mm ve 400 mm × 600 mm dikdörtgen enkesitli kolonun gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi.....	56
2.3. Dairesel Kesitli Betonarme Kolonların Gerilme-Şekildeğiştirme İlişkileri.....	65
2.3.1. 450 mm, 565 mm ve 600 mm dairesele enkesitli kolonun gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi.....	65
3. BETONARME ELEMANLARIN MOMENT-EĞRİLİK İLİŞKİLERİ VE SÜNEKLİK DAVRANIŞI	76
3.1. Moment-Eğrilik İlişkisi.....	76
3.2. Betonarme Yapısal Elemanların Eğrilik Sünekliği.....	78
3.3. Betonarme Kirişler için Eğrilik-Süneklik Yaklaşımları.....	79
3.4. Betonarme Kolonların Moment-Eğrilik ile Eğrilik Süneklik İlişkileri.....	81
3.4.1. 400 mm × 400 mm kare enkesitli kolonun moment-eğrilik ilişkisi ve eğrilik süneklik davranışı.....	82

3.4.2. 500 mm×500 mm kare enkesitli kolonun moment-eğrilik ilişkisi ve eğrilik süneklik davranışı.....	87
3.4.3. 300 mm×550 mm dikdörtgen enkesitli kolonun moment-eğrilik ilişkisi ve eğrilik süneklik davranışı.....	95
3.4.4. 400 mm × 600 mm dikdörtgen enkesitli kolonun moment-eğrilik ilişkisi ve eğrilik süneklik davranışı.....	100
3.4.5. 450 mm dairesel enkesitli kolonun moment-eğrilik ilişkisi ve eğrilik süneklik davranışı	108
3.4.6. 565 mm dairesel enkesitli kolonun moment-eğrilik ilişkisi ve eğrilik süneklik davranışı	114
3.4.7. 600 mm dairesel enkesitli kolonun moment-eğrilik ilişkisi ve eğrilik süneklik davranışı	119
3.4.8. Farklı sargılı beton modellerine göre betonarme kolonların moment-eğrilik ilişkileri.....	126
4. BETONARME KİRİŞLERİN DOĞRUSAL OLMAYAN DAVRANIŞI	133
4.1. Betonarme Kirişlerin Moment-Eğrilik ve Eğrilik Sünekliği İlişkileri	133
4.2. Betonarme Kirişlerde Eğrilik Sünekliğinin Hesaplanması.....	143
5. BETONARME PERDE DUVARLARIN DOĞRUSAL OLMAYAN DAVRANIŞI	152
5.1. Betonarme Perde Duvarların Gerilme-Şekildeğiştirme İlişkileri	153
5.1.1. 300mm×3000mm enkesitli perde duvarın gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi	153
5.2. Betonarme Perde Duvarların Moment-Eğrilik ile Eğrilik Süneklik İlişkileri ...	159
6. GENEL DEĞERLENDİRME VE UYGULAMA ÖNERİLERİ	165
6.1. Temel Çıkarımlar.....	165
6.2. Uygulama Önerileri	166
6.3. Genel Değerlendirme.....	166
KAYNAKLAR.....	167

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. Sargısız beton için gerilme-şekildeğiştirme eğrisi (Hognestad, 1951).....	5
Şekil 1.2. Sargılı ve sargısız beton için gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi (Mander ve ark., 1988) ...	6
Şekil 1.3. Sargılı ve sargısız beton için gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi (TBDY, 2018).....	7
Şekil 1.4. Kent-Park tarafından önerilen gerilme-şekildeğiştirme modeli (Kent ve Park, 1971)....	8
Şekil 1.5. Sargı donatılı kesitlerde etkin sarılmış beton çekirdek alanı (Mander ve ark., 1988) ...	10
Şekil 1.6. Sargı donatılı kesitlerde etkin sarılmış beton çekirdek alanı (Mander ve ark., 1988) ...	12
Şekil 1.7. Sargılı beton modeli için kullanılan parametreler (TBDY, 2018).....	14
Şekil 1.8. Saatçioğlu ve Ravzi tarafından geliştirilen monotonik artan yükleme için gerilme-şekildeğiştirme bağlantısı (Saatçioğlu ve Ravzi, 1992)	17
Şekil 1.9. Dairesel kolonlarda yanal sargı basıncı (Saatçioğlu ve Ravzi, 1992).....	17
Şekil 1.10. Kare kolonlarda yanal sargı basıncı (Saatçioğlu ve Ravzi, 1992)	18
Şekil 1.11. Dikdörtgen kolonlarda yanal sargı basıncı (Saatçioğlu ve Ravzi, 1992).....	19
Şekil 1.12. Donatı çeliği için gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri (TBDY, 2018).....	21
Şekil 2.1. Doğrusal olmayan hesaplamalarda kullanılan betonarme kolon modellerinin kesit görünüşü	23
Şekil 2.2. TBDY (2018)'e göre 400 mm × 400 mm enkesitli kolon modellerinin gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri	27
Şekil 2.3. TBDY (2018)'e göre 400 mm × 400 mm enkesitli kolon modellerinin gerilme ve birim şekildeğiştirme değerlerinin karşılaştırmalı ilişkileri	28
Şekil 2.4. Mander modeline göre 400 mm × 400 mm enkesitli kolon modellerinin gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri	33
Şekil 2.5. Mander modeline göre 400 mm × 400 mm enkesitli kolon modellerinin gerilme ve birim şekildeğiştirme değerlerinin karşılaştırmalı ilişkileri	34
Şekil 2.6. Saatçioğlu ve Ravzi modeline göre 400 mm × 400 mm enkesitli kolon modellerinin gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri.....	38
Şekil 2.7. Saatçioğlu ve Ravzi modeline göre 400 mm × 400 mm enkesitli kolon modellerinin gerilme ve şekildeğiştirme değerlerinin karşılaştırmalı ilişkileri	39
Şekil 2.8. Farklı sargılı beton modellere göre 400 mm × 400 mm enkesitli kolonlar için elde edilen hesap sonuçlarının karşılaştırılması	44
Şekil 2.9. TBDY (2018)'e göre 500 mm × 500 mm enkesitli kolonların gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri.....	49
Şekil 2.10. Mander modeline göre 500 mm×500 mm enkesitli kolonların gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri.....	50
Şekil 2.11. Saatçioğlu ve Ravzi modeline göre 500 mm×500 mm enkesitli kolonların gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri	51

Şekil 2.12. Farklı sargılı beton modellere göre 500 mm × 500 mm enkesitli kolonlar için elde edilen hesap sonuçlarının karşılaştırılması	53
Şekil 2.13. Mander modeline göre 300 mm × 550 mm enkesitli kolonların gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri.....	58
Şekil 2.14. Mander modeline göre 400 mm × 600 mm enkesitli kolonların gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri.....	58
Şekil 2.15. Saatçioğlu ve Ravzi modeline göre 300 mm × 550 mm enkesitli kolonların gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri	60
Şekil 2.16. Saatçioğlu ve Ravzi modeline göre 400 mm × 600 mm enkesitli kolonların gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri	60
Şekil 2.17. Farklı sargılı beton modellere göre 300 mm × 550 mm enkesitli kolonlar için elde edilen hesap sonuçlarının karşılaştırılması	62
Şekil 2.18. Farklı sargılı beton modellere göre 400 mm × 600 mm enkesitli kolonlar için elde edilen hesap sonuçlarının karşılaştırılması	63
Şekil 2.19. Mander modeline göre 450 mm enkesitli kolonların gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri	67
Şekil 2.20. Mander modeline göre 565 mm enkesitli kolonların gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri	68
Şekil 2.21. Mander modeline göre 600 mm enkesitli kolonların gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri	68
Şekil 2.22. Saatçioğlu ve Ravzi modeline göre 450 mm enkesitli kolonların gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri	70
Şekil 2.23. Saatçioğlu ve Ravzi modeline göre 565 mm enkesitli kolonların gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri	71
Şekil 2.24. Saatçioğlu ve Ravzi modeline göre 600 mm enkesitli kolonların gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri	71
Şekil 2.25. Farklı sargılı beton modellere göre 450 mm enkesitli kolonlar için elde edilen hesap sonuçlarının karşılaştırılması.....	73
Şekil 2.26. Farklı sargılı beton modellere göre 565 mm enkesitli kolonlar için elde edilen hesap sonuçlarının karşılaştırılması.....	74
Şekil 2.27. Farklı sargılı beton modellere göre 600 mm enkesitli kolonlar için elde edilen hesap sonuçlarının karşılaştırılması.....	74
Şekil 3.1. Betonarme yapısal elemanların tipik moment-eğrilik ilişkileri	77
Şekil 3.2. Eğrilik-sünekliği değerlerinin hesaplanması	78
Şekil 3.3. 400 mm × 400 mm kare enkesitli betonarme kolon modellerinin farklı tasarım parametrelere göre moment-eğrilik ilişkileri.....	86
Şekil 3.4. 400 mm × 400 mm kare enkesitli betonarme kolonların farklı parametrelerin maksimum moment ve sünekliğe etkisi	87

Şekil 3.5. 500 mm×500 mm kare enkesitli kolonların farklı tasarım parametrelerine göre moment-eğrilik ilişkileri (sargı donatısı $\Phi 10/50$ mm).....	92
Şekil 3.6. 500 mm×500 mm kare enkesitli kolonların farklı parametrelerin maksimum moment ve sünekliğe etkisi.....	93
Şekil 3.7. 300 mm×550 mm dikdörtgen enkesitli kolonların farklı tasarım parametrelerine göre moment-eğrilik ilişkileri.....	98
Şekil 3.8. 300 mm × 550 mm dikdörtgen en-kesitli kolonlarda farklı parametrelerin moment ve sünekliğe etkisi.....	99
Şekil 3.9. 400 mm × 600 mm dikdörtgen en-kesitli kolonların farklı tasarım parametrelerine göre moment-eğrilik ilişkileri.....	104
Şekil 3.10. 400 mm × 600 mm dikdörtgen en-kesitli kolonlarda farklı parametrelerin moment ve sünekliğe etkisi.....	106
Şekil 3.12. 450 mm kolonlarda farklı tasarım parametrelere göre moment-eğrilik ilişkileri	111
Şekil 3.13. 450 mm kolonlarda farklı tasarım parametrelerin moment, eğrilik ve süneklik değerlerine etkisinin karşılaştırması.....	113
Şekil 3.14. 565 mm dairesel enkesitli kolonların farklı parametrelere göre moment-eğrilik ilişkileri	117
Şekil 3.15. 565mm dairesel enkesitli kolonların farklı parametrelerin moment ve sünekliğe etkisi	118
Şekil 3.16. 600 mm dairesel enkesitli kolon modellerinin farklı parametrelere göre karşılaştırmalı moment-eğrilik ilişkileri.....	123
Şekil 3.17. 600 mm dairesel enkesitli kolonların farklı parametrelerin moment ve sünekliğe etkisi	124
Şekil 3.18. Farklı sargılı beton modeller için kare kolonların moment-eğrilik ilişkileri	128
Şekil 4.1. Moment Eğrilik analizlerinde kullanılan betonarme kiriş modelinin kesit görünüşü .	136
Şekil 4.2. Çift donatılı betonarme kirişlerin karşılaştırmalı moment-eğrilik ilişkileri.....	139
Şekil 4.3. ρ'/ρ ve beton basınç dayanımının moment ve eğrilik üzerindeki etkisi	139
Şekil 4.4. Farklı tasarım parametrelerinin betonarme kiriş elemanların eğrilik sünekliği üzerindeki etkisi	141
Şekil 4.5. Betonarme kirişlerde donatı derecesinin eğrilik sünekliği üzerindeki etkisi.....	144
Şekil 4.6. Tasarım parametrelerinin eğrilik süneklik faktörünün $9.40 \times 2.72 - 1.69\lambda$ oranı üzerindeki etkisi	145
Şekil 4.7. Farklı tasarım parametrelerinin önerilen eğrilik süneklik faktörü oranı üzerindeki etkisi	146
Şekil 4.8. Farklı tasarım parametrelere göre önerilen denklemden ve sayısal analizlerden elde edilen eğrilik süneklik faktörlerinin karşılaştırılması.....	147

Şekil 4.9. Çift donatılı betonarme kirişlerde farklı tasarım parametrelerine göre elde edilen analiz sonuçlarının karşılaştırmalı ilişkileri.....	150
Şekil 5.1. Hesaplarda kullanılan 300 mm×3000 mm enkesitli perde duvar modellerinin görünüşü	153
Şekil 5.2. Mander modeline göre 300 mm × 3000 mm enkesitli betonarme perde duvarların uç bölgelerine ait gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri.....	155
Şekil 5.3. Saatçioğlu ve Ravzi modeline göre 300 mm × 3000 mm enkesitli betonarme perde duvarların uç bölgelerine ait gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri	156
Şekil 5.4. Farklı sargılı beton modellerine göre 300 mm × 3000 mm enkesitli betonarme perde duvarların uç bölgelerinde elde edilen karşılaştırmalı gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri	157
Şekil 5.5. 300 mm × 3000 mm enkesitli betonarme perde duvarların farklı tasarım parametrelerine göre moment-eğrilik ilişkileri.....	162
Şekil 5.6. 300 mm × 3000 mm enkesitli betonarme perde duvarların farklı aksenal yük seviyeleri için farklı parametrelerin eğrilik sünekliliği üzerindeki etkisi	163

TABLULAR LİSTESİ

Tablo 1.1. Malzeme modellerinde kullanılan parametreler (TBDY, 2018).....	21
Tablo 2.1. 400 mm × 400 mm kare enkesitli betonarme kolon modellerinin kesit bilgileri ve detayları.....	25
Tablo 2.2. TBDY (2018)'e göre 400 mm × 400 mm enkesitli kolon modellerinin farklı tasarım parametrelerine göre hesap sonuçları.....	26
Tablo 2.3. Mander modeline göre 400 mm × 400 mm enkesitli kolon modellerinin farklı tasarım parametrelerine göre hesap sonuçları.....	31
Tablo 2.4. Saatçioğlu ve Ravzi modeline göre 400 mm × 400 mm enkesitli kolon modellerinin farklı tasarım parametrelerine göre hesap sonuçları.....	36
Tablo 2.5. 500 mm × 500 mm kare enkesitli betonarme kolon modellerinin kesit bilgileri ve detayları.....	48
Tablo 2.6. TBDY (2018)'e göre 500 mm × 500 mm kare enkesitli kolon modellerinin hesap sonuçları.....	49
Tablo 2.7. Mander modeline göre 500 mm × 500 mm kare enkesitli kolon modellerinin hesap sonuçları.....	50
Tablo 2.8. Saatçioğlu ve Ravzi modeline göre 500 mm × 500 mm kare enkesitli kolon modellerinin hesap sonuçları.....	51
Tablo 2.9. Farklı sargılı beton modellere göre 500 mm × 500 mm enkesitli kolonların hesap sonuçların karşılaştırması.....	52
Tablo 2.10. Dikdörtgen enkesitli betonarme kolon modellerinin kesit bilgileri ve detayları.....	56
Tablo 2.11. Mander modeline göre 300 mm × 550 mm dikdörtgen enkesitli kolon modellerinin hesap sonuçları (C30, boyuna donatı: Φ20 mm).....	57
Tablo 2.12. Mander modeline göre 400 mm × 600 mm dikdörtgen enkesitli kolon modellerinin hesap sonuçları (C30, boyuna donatı: Φ20 mm).....	57
Tablo 2.13. Saatçioğlu ve Ravzi modeline göre 300 mm × 550 mm dikdörtgen enkesitli kolon modellerinin hesap sonuçları (beton sınıfı C30, boyuna donatı: Φ20 mm).....	59
Tablo 2.14. Saatçioğlu ve Ravzi modeline göre 400 mm × 600 mm dikdörtgen enkesitli kolon modellerinin hesap sonuçları (beton sınıfı C30, boyuna donatı: Φ20 mm).....	59
Tablo 2.15. Farklı sargılı beton modellere göre 300 mm × 550 mm enkesitli kolonların hesap sonuçların karşılaştırması.....	61
Tablo 2.16. Farklı sargılı beton modellere göre 400 mm × 600 mm enkesitli kolonların hesap sonuçların karşılaştırması.....	61
Tablo 2.17. Dairesel enkesitli betonarme kolon modellerinin kesit bilgileri ve detayları.....	65
Tablo 2.18. Mander modeline göre 450 mm dairesel enkesitli kolon modellerinin hesap sonuçları.....	66

Tablo 2.19. Mander modeline göre 565 mm dairesel enkesitli kolon modellerinin hesap sonuçları	66
Tablo 2.20. Mander modeline göre 600mm dairesel enkesitli kolon modellerinin hesap sonuçları	67
Tablo 2.21. Saatçioğlu ve Ravzi modeline göre 450 mm dairesel enkesitli kolon modellerinin hesap sonuçları	69
Tablo 2.22. Saatçioğlu ve Ravzi modeline göre 565 mm dairesel enkesitli kolon modellerinin hesap sonuçları	69
Tablo 2.23. Saatçioğlu ve Ravzi modeline göre 600 mm dairesel enkesitli kolon modellerinin hesap sonuçları	70
Tablo 2.24. Farklı sargılı beton modellere göre 450 mm enkesitli kolonların hesap sonuçların karşılaştırması.....	72
Tablo 2.25. Farklı sargılı beton modellere göre 565 mm enkesitli kolonların hesap sonuçların karşılaştırması.....	72
Tablo 2.26. Farklı sargılı beton modellere göre 600 mm enkesitli kolonların hesap sonuçların karşılaştırması.....	73
Tablo 3.1. Tasarlanan 400 mm × 400 mm kare enkesitli kolon modellerine ait kesit detayları ...	83
Tablo 3.2. Tasarlanan 500 mm×500 mm kare enkesitli kolon modellerine ait parametreler.....	88
Tablo 3.3. Tasarlanan 300 mm × 550 mm dikdörtgen enkesitli kolon modellerine ait parametreler	96
Tablo 3.4. Tasarlanan 400 mm×600 mm dikdörtgen enkesitli kolon modellerine ait parametreler	100
Tablo 3.5. Tasarlanan 450 mm dairesel enkesitli kolon modellerine ait parametreler.....	108
Tablo 3.6. Tasarlanan 565 mm dairesel enkesitli kolon modellerine ait parametreler.....	114
Tablo 3.7. Tasarlanan 600 mm dairesel enkesitli kolon modellerine ait parametreler.....	119
Tablo 3.8. Farklı sargı donatısı çapları için sargılı beton modellerine göre moment ve eğrilik değerlerinin karşılaştırılması	129
Tablo 3.9. Farklı sargı donatısı aralıkları ve eksenel yük seviyeleri için farklı sargılı beton modellerine göre hesaplanan nihai moment ve eğrilik değerlerinin karşılaştırılması.....	130
Tablo 4.1. Tasarlanan betonarme kiriş kesitleri için detaylar.....	135
Tablo 4.2. Farklı beton basınç dayanımı ve donatı oranı parametreleri için hesaplanan eğrilik süneklik değerleri	140
Tablo 4.3. Farklı f_{ck} ve ρ'/ρ oranları için eğrilik süneklik katsayısının analitik hesap sonuçları ile Denklem (4.7) kullanılarak elde edilen değerlerin karşılaştırılması	146
Tablo 5.1. Tasarlanan 300 mm × 3000 mm enkesitli perde duvar modellerine ait detaylar	154
Tablo 5.2. Tasarlanan 300 mm × 3000 mm enkesitli perde duvarlar için gövde ve uç bölgelerinde düşey donatı sınırlamaları	154

Tablo 5.3. Mander modeline göre 300 mm × 3000 mm enkesit boyutlarına sahip betonarme perde duvarların uç bölgelerine ilişkin hesap sonuçları	155
Tablo 5.4. Saatçioğlu ve Ravzi modeline göre 300 mm × 3000 mm enkesit boyutlarına sahip betonarme perde duvarların uç bölgelerine ilişkin hesap sonuçları	156
Tablo 5.5. Farklı sargılı beton modellerine göre 300 mm × 3000 mm enkesitli betonarme perde duvarların uç bölgelerinde elde edilen hesap sonuçlarının karşılaştırılması.....	157

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

A_c	: Sargı donatısının eksenleri arasında kalan çekirdek beton alanıdır [mm ²].
A_{cc}	: Çekirdek betonun net en-kesit alanıdır [mm ²].
A_e	: Etkili olarak sarılmış kesitin, iki enine donatı seviyesi ortasında kalan etkili alanıdır [mm ²].
A_s	: Boyuna donatıların toplam en-kesit alanıdır [mm ²].
A_{sp}, A_{os}	: Spiral/sargı donatısının en-kesit alanıdır [mm ²].
A_{sx}, A_{sy}	: x ve y yönlerinde kullanılan sargı donatılarının en-kesit alanıdır [mm ²].
A_o	: Dairesel kolonda fretin kesit alanıdır [mm ²].
a	: Sargı donatısına mesnet oluşturan iki boyuna donatı merkezi arasındaki uzaklıktır [mm].
b_c, d_c	: Çekirdek betonunu sargılayan etriyelerin eksenleri arasında kalan kesit boyutlarıdır [mm].
b_k	: Çekirdek boyutudur (en dıştaki enine donatı eksenleri arası mesafe) [mm].
b_o, h_o	: Göbek betonunu sargılayan etriyelerin eksenleri arasında kalan kesit boyutlarıdır [mm].
d_b	: Boyuna donatı çapıdır [mm].
D	: Dairesel kolonun çekirdek çapıdır [mm].
d_s	: Dairesel kolonlarda çekirdek çapıdır [mm].
f'_{co}	: Sargısız betonun basınç dayanımıdır [MPa].
f'_{cc}	: Sargılı betonun basınç dayanımıdır [MPa].
f_e	: Etkili sargılama basıncıdır [MPa].
f_{ck}	: Betonun karakteristik basınç dayanımıdır [MPa].
f_{ce}	: Betonun ortalama basınç dayanımıdır [MPa].
f_{yk}	: Donatı çeliğinin karakteristik akma dayanımıdır [MPa].
f_{ye}	: Donatı çeliğinin ortalama akma dayanımıdır [MPa].
f_{ywk}	: Sargı donatısının karakteristik akma dayanımıdır [MPa].
f_{ywe}	: Enine donatının ortalama akma dayanımıdır [MPa].
f_{su}	: Donatı çeliğinin karakteristik kopma dayanımıdır [MPa].
f'_{lx}, f'_{ly}	: x ve y yönlerinde çekirdek betonuna etkileyen yanıl basınçlardır [MPa].
f'_l	: Çekirdek betonuna etkileyen ortalama yanıl basınçtır [MPa].
h	: Kesit yüksekliğidir [mm].
k_e	: Sargı etkisi katsayısıdır.
M_y	: Akma momentidir [kNm].
M_u	: Nihai moment kapasitesidir [kNm].
s	: Enine donatı aralığıdır [mm].
s'	: Enine donatının net aralığıdır [mm].
w'_i, a_i	: Yatayda etriye veya çiroz tarafından mesnetlenen boyuna donatılar arası mesafedir [mm].
α_{se}	: Sargı donatısı etkinlik katsayısıdır.
$\rho_{sh,min}$: İki doğrultudaki hacimsel enine donatı oranının küçük olanıdır.
ρ_{cc}	: Boyuna donatı alanının çekirdek beton alanına oranıdır.

ρ_x, ρ_y	: x ve y yönlerinde enine donatının hacimsel oranıdır.
ρ_s	: Sargı donatısının hacimsel oranıdır.
ϵ_c	: Beton basınç birim şekil değiştirmesidir.
ϵ_{co}	: Sargısız betonun birim kısalmasıdır.
ϵ_{cc}	: f'_{co} dayanımına karşılık gelen birim kısalmadır.
ϵ_{cu}	: Betonun en büyük birim şekil değiştirmesidir.
ϵ_{sy}	: Donatı çeliğinin akma birim şekil değiştirmesidir.
ϵ_{sp}	: Donatı çeliğinin pekleşme birim şekil değiştirmesidir.
ϵ_{su}	: Donatı çeliğinin kopma birim şekil değiştirmesidir.
σ_{2ex} ve σ_{2ey}	: Kolon çekirdek alanına etkileyen eşdeğer yanal gerilmelerdir [MPa].
ϕ_y	: Akma eğriliğidir [1/m].
ϕ_u	: Göçme öncesi eğriliktir [1/m].

Kısaltmalar

kN	: KiloNewton
mm	: Milimetre
MPa	: MegaPascal (gerilme birimi)
M-φ	: Moment-eğrilik ilişkisi
SH	: Sınırlı Hasar performans düzeyi
TBDY	: Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, 2018
TS500	: Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları, 2000

ÖNSÖZ

Betonarme yapılar, çağdaş inşaat mühendisliğinin, hem en yaygın kullanılan hem de davranış bakımından en karmaşık taşıyıcı sistemleri arasında yer almaktadır. Özellikle deprem, rüzgar ve benzeri olağanüstü etkiler altında sergiledikleri mekanik tepkilerin doğru biçimde anlaşılması; can güvenliğinin sağlanması, yapısal hasarların sınırlandırılması ve sürdürülebilir mühendislik çözümlerinin geliştirilmesi açısından temel bir gerekliliktir. Bu bağlamda, betonarme yapıların yalnızca elastik davranış varsayımları ile değerlendirilmesi yeterli olmamakta; gerçekçi ve güvenilir sonuçlar elde edebilmek için doğrusal olmayan mekanik davranışının ayrıntılı biçimde ele alınması zorunlu hale gelmektedir.

Deprem mühendisliğinde son yıllarda benimsenen performansa dayalı yaklaşım, yapıların deprem etkileri altındaki davranışını yalnızca dayanım düzeyi ile değil; hasar dağılımı, süneklik kapasitesi ve enerji yutma potansiyeli gibi şekildeğiştirme esaslı ölçütler üzerinden değerlendirmeyi öngörmektedir. Bu yaklaşımın sağlıklı biçimde uygulanabilmesi ise betonarme yapı elemanlarının doğrusal olmayan davranışlarının malzeme, kesit ve eleman düzeyinde doğru biçimde modellenmesine bağlıdır. Betonun çatlama ve ezilme davranışı, donatı çeliğinin akma sonrası plastik şekildeğiştirmeleri, sargı donatısının beton çekirdeği üzerindeki etkisi ve bu süreçlerin kesit rijitliği ile süneklik üzerindeki yansımaları, betonarme elemanların deprem performansını belirleyen temel mekanizmalar arasında yer almaktadır.

Bu kitap, “Betonarme Yapısal Elemanlarının Lineer Olmayan Yöntemler ile Deprem Performanslarının Belirlenmesi” başlıklı doktora tez çalışmasından üretilmiş olup, tez kapsamında elde edilen kuramsal birikimin ve sayısal analiz sonuçlarının daha geniş bir mühendislik ve akademik çevreye aktarılmasını amaçlamaktadır. Çalışmada, betonarme kiriş, kolon ve perde duvar gibi temel taşıyıcı elemanların doğrusal olmayan mekanik davranışları; beton ve donatı çeliğine ait gerilme-şekildeğiştirme modelleri, moment-eğrilik ilişkileri ve süneklik kavramları çerçevesinde sistematik bir bütünlük içinde ele alınmıştır. Farklı kesit geometrileri, eksenel yük seviyeleri, donatı oranları ve sargı düzenlemelerinin eleman davranışı üzerindeki etkileri, ayrıntılı parametrik çalışmalarla ortaya konulmuştur.

Kitabın hazırlanmasındaki temel amaç; doğrusal olmayan davranış kavramlarını yalnızca matematiksel bir analiz problemi olarak değil, fiziksel anlamı ve mühendislik yorumu ile birlikte ele alarak okuyucuya bütüncül bir bakış açısı kazandırmaktır. Bu doğrultuda, teorik açıklamalar sayısal analizlerle desteklenmiş; moment-eğrilik ve eğrilik sünekliği gibi kavramların mühendislik uygulamalarındaki karşılıkları açık biçimde ortaya konulmaya çalışılmıştır. Ayrıca, betonarme kirişler için eğrilik sünekliğinin belirlenmesine yönelik geliştirilen yeni yaklaşım ile literatüre özgün bir metodolojik katkı sunulması hedeflenmiştir.

Eser; başta deprem mühendisliği ve yapı mekaniği alanında çalışan akademisyenler olmak üzere, lisans, lisansüstü öğrenciler ve betonarme yapıların tasarım ve değerlendirilmesiyle ilgilenen uygulayıcı mühendisler için kapsamlı bir başvuru kaynağı olarak tasarlanmıştır. Kitapta kuramsal altyapı, ayrıntılı analizler ve sayısal karşılaştırma, hem akademik çalışmalara hem de mühendislik pratiğine katkı sağlaması amacıyla sunulmuştur.

Bu kitabı, betonarme yapısal elemanların doğrusal olmayan mekanik davranışlarının daha iyi anlaşılmasına, deprem mühendisliği alanındaki akademik bilgi birikiminin gelişmesine ve mühendislik uygulamalarında daha güvenli ve bilinçli kararlar alınmasına katkı sağlaması amacı ile oluşturduk.

Dr. Saeid Foroughi

Prof. Dr. S. Bahadır Yüksel

GİRİŞ

Deprem etkileri altında yapı güvenliğinin sağlanması, çağdaş yapı mühendisliğinin en temel ve aynı zamanda en karmaşık problemlerinden birini oluşturmaktadır. Özellikle son yıllarda meydana gelen yıkıcı depremler, yalnızca mevcut yapı stokunun sismik performans yetersizliklerini değil, aynı zamanda geleneksel analiz ve tasarım yaklaşımlarının yapıların gerçek davranışını temsil etmedeki sınırlılıklarını da açık biçimde ortaya koymuştur. Bu durum, doğrusal elastik kabullere dayalı klasik yöntemlerin ötesine geçilmesini ve yapı davranışının doğrusal olmayan mekanik esaslar çerçevesinde ele alınmasını zorunlu hale getirmiştir. Bu bağlamda, yapıların deprem performansının güvenilir biçimde değerlendirilebilmesi, malzeme, kesit ve eleman düzeyinde doğrusal olmayan davranışın bütüncül bir yaklaşımla modellenmesini gerektirmektedir.

Betonarme yapılar, gerek Türkiye’de gerekse dünya genelinde en yaygın kullanılan taşıyıcı sistem türlerinden biridir. Betonun yüksek basınç dayanımı ile donatı çeliğinin üstün çekme dayanımının birlikte çalışmasına dayanan bu kompozit sistemler; kiriş, kolon, perde ve döşeme gibi farklı davranış özelliklerine sahip elemanlardan oluşmaktadır. Deprem etkileri altında bu elemanlar, iç kuvvet düzeyi, eksenel yük oranı ve sınır koşullarına bağlı olarak belirgin biçimde doğrusal olmayan davranış sergilemektedir. Betonun çekme etkisi altında çatlaması, basınç bölgesinde ezilmesi; donatı çeliğinin akma sınırını aşarak plastik şekil değiştirmeler geliştirmesi ve buna bağlı olarak kesit rijitliğinin azalması gibi mekanizmalar, betonarme eleman davranışının doğrusal kabul edilemeyeceğini açıkça göstermektedir. Bu nedenle betonarme yapıların gerçekçi analizi, doğrusal olmayan davranışın doğru ve güvenilir biçimde modellenmesine bağlıdır.

Geleneksel dayanım esaslı tasarım yaklaşımı, yapıların belirli bir güvenlik düzeyini sağlamasını hedeflemekle birlikte, hasarın nerede ve nasıl geliştiği, süneklik kapasitesinin ne ölçüde kullanıldığı ve göçmeye giden mekanizmaların karakteri hakkında sınırlı bilgi sunmaktadır. Buna karşılık performansa dayalı deprem mühendisliği yaklaşımı, yapıların deprem etkileri altındaki davranışını; hasar düzeyleri, yer değiştirme talepleri ve süneklik kapasiteleri üzerinden değerlendirmekte ve bu yönüyle daha gerçekçi ve mühendislik açısından anlamlı bir çerçeve sunmaktadır. Bu yaklaşımın temelini ise doğrusal olmayan analiz yöntemleri oluşturmaktadır. Artımsal itme (pushover) analizleri, doğrusal olmayan zaman tanım alanı analizleri ve plastik mafsalsal esaslı modelleme teknikleri, yapıların deprem performansının belirlenmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Yapı mühendisliğinde taşıyıcı sistem davranışı, esas olarak yük-şekil değiştirmeye ilişkileri üzerinden tanımlanmaktadır. Doğrusal davranış varsayımı altında iç kuvvetler ile şekil değiştirmeler arasında orantılı bir ilişki bulunduğu kabul edilir ve malzeme davranışının elastik olduğu varsayılır. Bu yaklaşım matematiksel açıdan basitlik sağlamak ve özellikle servis yükleri altındaki değerlendirmelerde etkin bir şekilde kullanılmaktadır (Sheppard, 2021). Ancak betonarme yapılar açısından bu varsayım yalnızca düşük gerilme düzeylerinde ve sınırlı deformasyon koşullarında geçerlidir. Çatlama, plastikleşme ve hasar gelişiminin söz konusu olduğu durumlarda doğrusal analiz yöntemleri, hasar dağılımı ve göçme mekanizmalarının belirlenmesinde yetersiz kalmaktadır (Zameeruddin ve Sangle, 2021).

Gerçek davranış ise çoğunlukla doğrusal olmayan karakterdedir. Doğrusal olmayan davranış, iç kuvvetler ile şekil değiştirmeler arasındaki ilişkinin doğrusal olmaktan çıkması ve rijitlik ile dayanım parametrelerinin yüklemeye sürecine bağlı olarak değişmesi şeklinde tanımlanmaktadır (Chopra, 2017). Betonarme sistemlerde bu davranışın temel kaynakları; betonun çatlaması ve

ezilmesi, donatı çeliğinin akması, rijitlik kayıpları ve plastik mafsal oluşumudur. Bu mekanizmalar, kalıcı deformasyonların oluşmasına ve enerji sönmüleme kapasitesinin devreye girmesine neden olmaktadır. Özellikle deprem gibi tekrarlı ve yüksek genlikli yüklemeler altında betonarme sistemlerin davranışı belirgin şekilde doğrusal olmayan karakter göstermektedir (Park ve Paulay, 1975; MacGregor ve Wight, 2012).

Doğrusal olmayan analizlerin güvenilirliği, büyük ölçüde kullanılan malzeme modellerinin doğruluğuna bağlıdır. Beton ve donatı çeliği için tanımlanan gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri, kesit davranışının temel belirleyicisidir. Bu noktada özellikle sargı etkisi, betonun dayanımını ve sünekliğini önemli ölçüde artırarak taşıyıcı elemanların performansını doğrudan etkilemektedir. Sargılı ve sargısız beton modellerinin karşılaştırılması ve bu modellerin kesit davranışına etkilerinin incelenmesi, doğrusal olmayan analizlerin temel bileşenlerinden biri haline gelmiştir. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY, 2018) ile birlikte Mander ve ark. (1988) ve Saatçioğlu ve Razvi (1992) tarafından geliştirilen modeller, bu alandaki temel referanslar arasında yer almaktadır.

Betonarme elemanların doğrusal olmayan davranışının anlaşılmasında moment-eğrilik ilişkileri merkezi bir rol oynamaktadır. Bu ilişkiler, bir kesitin taşıma kapasitesini, rijitlik değişimini ve süneklik potansiyelini doğrudan yansıtmaktadır. Moment-eğrilik eğrisi üzerinden tanımlanan eğrilik sünekliği ise elemanların plastik dönme kapasitesini temsil ederek deprem performansının değerlendirilmesinde kritik bir parametre olarak öne çıkmaktadır. Bu nedenle moment-eğrilik analizi, hem kesit düzeyinde davranışın anlaşılmasında hem de plastik mafsal esaslı yapı analizlerinde temel bir analiz aracı olarak kabul edilmektedir.

Bu kitapta, betonarme yapısal elemanların doğrusal olmayan mekanik davranışı; malzeme modelleri, kesit analizi ve performans değerlendirmesi boyutlarıyla bütüncül bir çerçevede ele alınmaktadır. Çalışma kapsamında beton ve donatı çeliğine ait doğrusal olmayan gerilme-şekildeğiştirme modelleri analitik olarak incelenmiş; farklı sargı koşullarının kesit davranışı üzerindeki etkileri karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Betonarme kolon, kiriş ve perde duvar elemanları için moment-eğrilik ilişkileri, eğrilik sünekliği, plastik mafsal gelişimi ve eksenel yük-moment etkileşimi gibi performans parametreleri; farklı kesit geometrileri, donatı oranları ve eksenel yük seviyeleri dikkate alınarak parametrik analizler kapsamında sistematik olarak analiz edilmiştir.

Çalışmanın önemli katkılarından biri, betonarme kirişler için eğrilik sünekliğinin belirlenmesine yönelik geliştirilen yeni yaklaşımdır. Bu yaklaşım, kesit davranışını yalnızca matematiksel bir eğri olarak değil; çatlak oluşumu, akma gelişimi ve göçme sürecini içeren fiziksel hasar mekanizmalarıyla birlikte ele alarak daha tutarlı ve uygulanabilir bir değerlendirme imkanı sunmaktadır. Ayrıca farklı beton modellerinin aynı kesit koşulları altında ürettiği sonuçların karşılaştırılmasıyla, malzeme model seçiminin performans değerlendirmesi üzerindeki kritik etkisi açık biçimde ortaya konulmuştur.

Bu kitap, betonarme yapı elemanlarının doğrusal olmayan davranışını yalnızca teorik bir çerçevede ele almakla kalmayıp, mühendislik uygulamalarına doğrudan katkı sağlayacak analitik ve sayısal bir altyapı sunmayı amaçlamaktadır. Bu yönüyle eser; lisans ve lisansüstü öğrenciler, araştırmacılar ve uygulayıcı mühendisler için kapsamlı bir başvuru kaynağı niteliği taşımaktadır. Aynı zamanda doğrusal olmayan kesit analizleri ile yapı düzeyindeki performans değerlendirmeleri arasında kuramsal bir köprü kurarak, performans dayalı deprem mühendisliği yaklaşımının daha etkin ve bilinçli uygulanmasına katkı sağlamayı hedeflemektedir.

Bu çerçevede kitapta, betonarme yapı sistemlerinin deprem etkileri altındaki davranışı; doğrusal ve doğrusal olmayan mekanik esaslar, malzeme modelleme yaklaşımları ve performans değerlendirme ölçütleri temelinde sistematik ve bütüncül bir yaklaşımla değerlendirilmiştir. Bu kapsamda, yapı güvenliğinin sağlanması, hasar mekanizmalarının öngörülmesi ve kontrollü göçme hedeflerinin gerçekleştirilmesine yönelik mühendislik yaklaşımlarına hem kuramsal hem de uygulamaya dönük katkılar sunulması amaçlanmaktadır.

1. BETON VE DONATI ÇELİĞİ DAVRANIŞ MODELLERİ

Betonarme yapıların doğrusal olmayan davranışının modellenmesinde, malzemelerin gerilme-şekildeğiştirme ilişkilerinin doğru biçimde tanımlanması kritik öneme sahiptir. Bu bölümde beton ve donatı çeliği için kullanılan temel gerilme-şekildeğiştirme modelleri, malzeme davranışının elastik ve elastik-plastik sınırlar ötesindeki karakterini yansıtacak biçimde ele alınmaktadır.

1.1. Sargısız Beton Modelleri

1.1.1. Sargısız betonun gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri

Betonarme taşıyıcı elemanlarda kullanılan betonun mekanik davranışı, esas olarak gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi ile tanımlanmaktadır. Sargısız beton, enine donatı veya herhangi bir yanal sargı etkisi altında bulunmayan ve yalnızca kendi malzeme özellikleri doğrultusunda davranan beton olarak tanımlanmakta; bu nedenle basınç ve çekme etkileri altında daha gevrek bir karakter sergilemektedir. Betonarme kesitlerde kabuk betonu bölgeleri veya sargının etkin olmadığı alanlar, genellikle sargısız beton varsayımı ile modellenmektedir.

Sargısız betonun gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri, betonarme elemanların gevrek davranış eğilimlerini, sınırlı süneklik kapasitelerini ve deprem performansını belirleyen temel unsurlardan biridir. Bu nedenle sargısız beton davranışının doğru biçimde modellenmesi, betonarme yapıların doğrusal olmayan analizlerinde ve performans değerlendirmelerinde kritik bir mühendislik gerekliliğidir.

1.1.2. Sargısız beton için geliştirilmiş Hognestad modeli

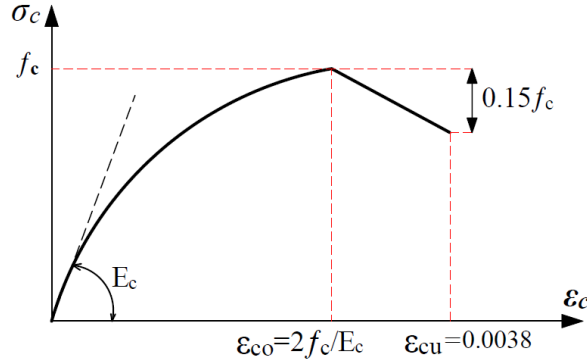
Hognestad (1951) tarafından sargısız beton için önerilen gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi Şekil 1.1'de gösterilmiştir. Gerilme-şekildeğiştirme ilişkisinde maksimum gerilme için oluşan şekildeğiştirme değerine kadar parabolik artar, bu değerden sonra doğrusal olarak azalır. Model $\varepsilon_{cu}=0.0038$ maksimum şekildeğiştirme değerine kadar geçerlidir. Maksimum gerilme genelde kolonlardaki boyut etkisi nedeni ile beton silindir dayanımının %85'i olarak alınır ($f_c = 0.85f_{ck}$). Maksimum gerilmeye karşılık olan birim kısalma, $\varepsilon_{co} = 2f_c/E_c$ olarak verilmişse de basit olarak $\varepsilon_{co} = 0.002$ alınabilir. Modeldeki elastisite modülü için Hognestad (1951) tarafından $E_c = 12680 + 460f_c$ bağıntısı önerilmiştir. E_c ve f_c , MPa cinsinden ifade edilmelidir. Sargısız beton için gerilme-şekildeğiştirme bağıntıları Denklem (1.1 ve 1.2)'de verilmiştir.

$$\sigma_c = f_c \left[\frac{2\varepsilon_c}{\varepsilon_{co}} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{co}} \right)^2 \right] \quad \varepsilon_c \leq \varepsilon_{co} \quad (1.1)$$

$$\sigma_c = f_c \left[1 - \left(\frac{0.15(\varepsilon_c - \varepsilon_{co})}{\varepsilon_{cu} - \varepsilon_{co}} \right) \right] \quad \varepsilon_{co} < \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cu} \quad (1.2)$$

Verilen bağıntılarda yer alan gerilme ve birim şekildeğiştirme parametreleri teknik olarak şu şekilde tanımlanmaktadır: σ_c , betonun basınç gerilmesini (MPa); f_c , betonun tek eksenli basınç

dayanımını (MPa); ε_c , beton lifindeki basınç birim şekildeğiştirmesini ifade etmektedir. Ayrıca ε_{co} , betonun maksimum basınç dayanımına (f_c) ulaştığı andaki birim şekildeğiştirme değerini; ε_{cu} ise betonun nihai (göçme) basınç birim şekildeğiştirmesini temsil etmekte olup ezilme sınırını tanımlamaktadır.



Şekil 1.1. Sargısız beton için gerilme-şekildeğiştirme eğrisi (Hognestad, 1951)

1.1.3. Sargısız beton için Mander modeli

Mander ve ark. (1988) tarafından sargılı beton için önerilen teorik gerilme-şekildeğiştirme modelinde, sargı etkisinin göz önüne alınmaması durumunda bu model sargısız beton için de geçerli olmaktadır. Sargısız betonarme elemanlar için, sargılı beton modelindeki x ve y yönünde betona uygulanan etkili yanal basınçları sıfır olarak dikkate alınmaktadır ($f_l' = 0$). Betona uygulanan etkili yanal basınçların sıfır olduğu durumda sargısız beton modeli ile bulunan basınç dayanımının etkin sargı basıncının bir fonksiyonu olan λ_c katsayısı, $\lambda_c = 1.0$ 'dir. $\lambda_c = 1.0$ olması nedeniyle $f_{cc}' = f_{co}'$ ve $\varepsilon_{cc} = \varepsilon_{co}$ değerleri elde edilir. Sargısız beton için gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi Denklem (1.3-1.6)'da verilmiştir.

$$f_c = \frac{f_{cc}' x r}{r - 1 + x^r} \quad \varepsilon_c \leq 2\varepsilon_{co} \quad (1.3)$$

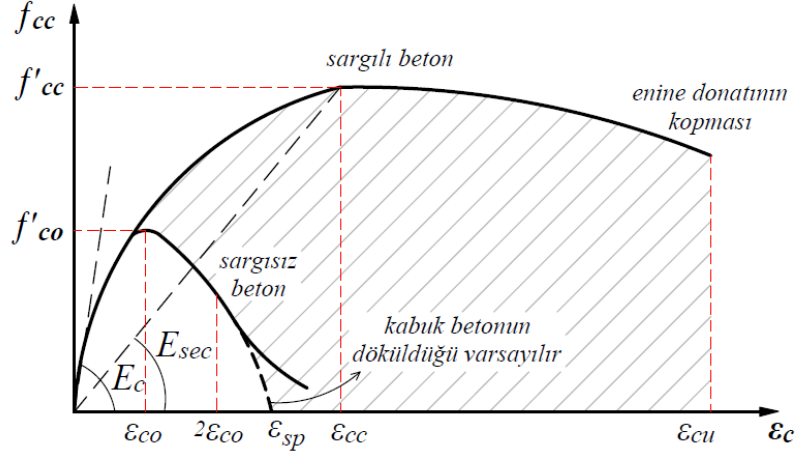
$$f_c = f_{cc}' \left(\frac{2r}{r - 1 + 2^r} \right) \left(1 - \frac{\varepsilon_c - 2\varepsilon_{co}}{\varepsilon_{cu} - 2\varepsilon_{co}} \right) \quad 2\varepsilon_{co} < \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cu} \quad (1.4)$$

$$x = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{co}} \quad , \quad r = \frac{E_c}{E_c - E_{sec}} \quad (1.5)$$

$$E_c = 5000\sqrt{f_{cc}'} \text{ MPa} \quad , \quad E_{sec} = \frac{f_{cc}'}{\varepsilon_{cc}} \quad (1.6)$$

Mander sargısız beton modelinde, betonun maksimum gerilmeye ulaştığı birim şekildeğiştirme değeri $\varepsilon_{co} = 0.002$ olarak alınır. Sargısız beton eğrisi, $2\varepsilon_{co}$ değerinden sonra kabuk betonunun ezilerek döküldüğünü varsayarak doğrusal olarak maksimum birim şekildeğiştirme değerine ulaşır. Kabuk betonun dökülmediği düşünüldüğünde birim şekildeğiştirme bir miktar daha artmaktadır.

Şekil 1.2’de görüleceği gibi sargısız beton için eğri, $2\varepsilon_{co} = 0.004$ değerine kadar parabolik olarak devam eder. Bu değerden sonra, $0.004 < \varepsilon_c \leq 0.005$ aralığında, gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi doğrusaldır ve $\varepsilon_c=0.005$ ’de beton dayanımı sıfırdır.



Şekil 1.2. Sargılı ve sargısız beton için gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi (Mander ve ark., 1988)

1.1.4. TBDY (2018) sargısız beton modeli

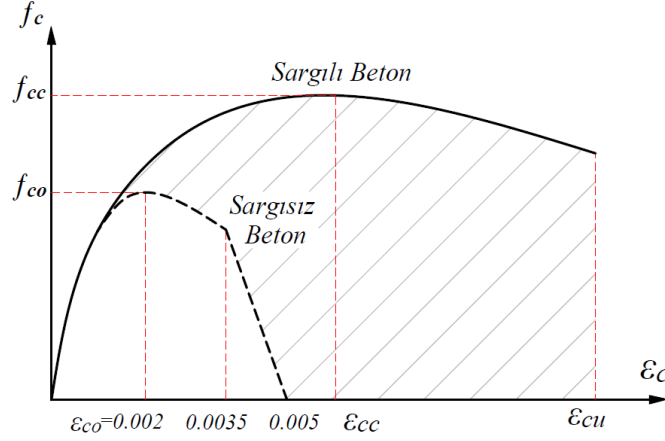
Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY, 2018), betonarme yapıların doğrusal olmayan analizlerinde beton davranışını, şekildeğiştirme esaslı performans değerlendirme yaklaşımı çerçevesinde tanımlamaktadır. Bu kapsamda sargısız beton; enine donatı tarafından etkin biçimde yanal yönde sınırlandırılmayan, başta kabuk betonu olmak üzere sargı etkisinin ihmal edilebildiği beton bölgelerini temsil eden bir malzeme modeli olarak ele alınmaktadır. Yönetmelikte benimsenen bu yaklaşım, betonarme elemanların deprem etkileri altında sergilediği hasar gelişiminin daha gerçekçi biçimde modellenmesini amaçlamaktadır.

TBDY (2018)’de sargısız betonun basınç altındaki gerilme-şekildeğiştirme davranışı; başlangıçta doğrusal elastik bir bölge, bunu izleyen maksimum basınç dayanımına ulaşma evresi ve dayanım sonrasında yumuşama gösteren doğrusal olmayan bir davranış bölgesi ile idealize edilmektedir. Maksimum basınç gerilmesine karşılık gelen birim şekildeğiştirme değeri sınırlı tutulmakta; bu sınırın aşılmasıyla birlikte betonun taşıma kapasitesinde hızlı bir azalma öngörülmektedir. Bu idealizasyon, sargısız betonun gevrek kırılma eğilimini ve sınırlı süneklik kapasitesini temsil etmeye yönelik güvenli tarafta kalan bir yaklaşım sunmaktadır.

TBDY (2018), sargısız betonun çekme davranışını doğrusal olmayan analizlerde taşıyıcı bir katkı olarak dikkate almamakta; çatlama sonrasında betonun çekme dayanımının ihmal edilebileceğini varsaymaktadır. Bu kabul, betonarme elemanlarda çekme gerilmelerinin esas olarak donatı çeliği tarafından taşındığı klasik betonarme kuramı ile uyumludur ve hesap süreçlerinin sadeleştirilmesine katkı sağlamaktadır.

Yönetmelikte, doğrusal olmayan yöntemler kullanılarak şekildeğiştirmeye göre performans değerlendirmesi yapılması durumunda, başka bir malzeme modeli seçilmediği sürece değiştirilmiş Mander gerilme-şekildeğiştirme bağıntılarının (Şekil 1.3) kullanılmasının esas alındığı belirtilmektedir. Bu bağıntılar hem sargılı hem de sargısız beton için geçerlidir. Şekil 1.3’te

görüldüğü üzere, sargısız beton için gerilme-şekildeğiştirme eğrisi, $\varepsilon_c = 0.0035$ değerine kadar parabolik bir karakter sergilemekte; $0.0035 < \varepsilon_c \leq 0.005$ aralığında ise doğrusal bir azalma göstermektedir. Bu modelde, $\varepsilon_c = 0.005$ değerinde betonun basınç dayanımının sıfıra düştüğü kabul edilmektedir.



Şekil 1.3. Sargılı ve sargısız beton için gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi (TBDY, 2018)

1.2. Sargılı Beton Modelleri

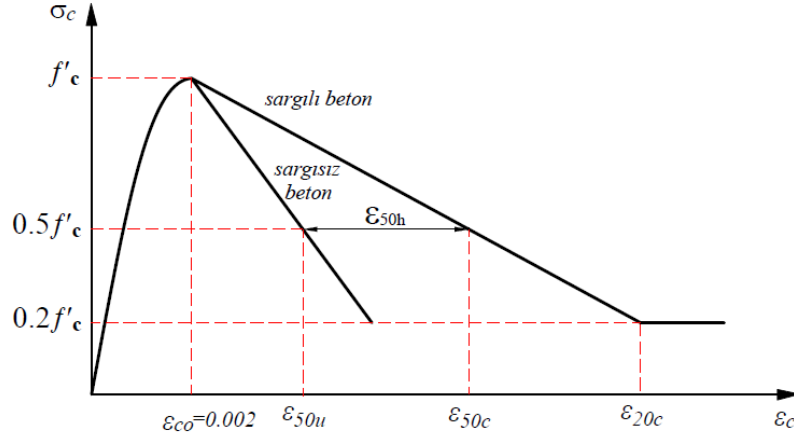
Betonarme taşıyıcı elemanlarda enine donatı tarafından yanal yönde sınırlandırılan beton, sargılı beton olarak tanımlanmaktadır. Sargı etkisi altındaki beton, sargısız betona kıyasla daha yüksek basınç dayanımı, daha büyük nihai birim şekildeğiştirme kapasitesi ve belirgin biçimde artmış süneklik ve enerji yutma yeteneği sergilemektedir. Bu nedenle özellikle kolonların ve perde duvarların plastik mafsallık bölgeleri gibi yüksek şekildeğiştirmelerin beklendiği kritik bölgelerde betonun doğrusal olmayan davranışının gerçekçi biçimde modellenebilmesi için sargı etkisinin dikkate alınması zorunludur.

Sargılı betonun mekanik davranışı, enine donatının beton çekirdeği üzerinde oluşturduğu yanal basınç sayesinde şekillenmektedir. Bu yanal basınç; betonun maksimum basınç dayanımının artmasına, tepe gerilmesine karşılık gelen birim şekildeğiştirmenin büyümesine ve dayanım sonrası yumuşama bölgesinin daha kontrollü ve kademeli gerçekleşmesine neden olmaktadır. Bu davranış, betonarme elemanların deprem etkileri altında daha sünek bir yanıt vermesine ve göçme öncesinde daha büyük şekildeğiştirmelere ulaşabilmesine olanak sağlamaktadır.

Literatürde sargılı betonun gerilme-şekildeğiştirme davranışını tanımlamak amacıyla çok sayıda analitik model geliştirilmiştir. Bu modeller arasındaki temel farklılıklar; sargı basıncının tanımlanma biçimi, etkin sargı katsayılarının belirlenmesi, beton çekirdeği geometrisinin dikkate alınışı ve enine donatı düzenlemesinin modele dahil edilme yöntemlerinden kaynaklanmaktadır. Ayrıca deneysel verilerin kapsamı ve modelin hedeflediği uygulama alanı da modeller arasında önemli ayrımlar oluşturmaktadır.

Kent ve Park (1971) modeli, sargılı beton davranışını tanımlayan erken dönem yaklaşımlardan biri olup, sargı etkisini görece sınırlı ve basitleştirilmiş bir çerçevede ele almaktadır. Bu modelde betonun basınç altındaki dayanım artışı sınırlı tutulmakta; maksimum gerilme sonrası yumuşama

davranişı doğrusal veya parçalı doğrusal bir eğri ile idealize edilmektedir. Modelin basit yapısı, uygulama kolaylığı sağlamakla birlikte, ileri düzey doğrusal olmayan analizlerde sınırlı temsil yeteneğine sahiptir. (Şekil 1.4)



Şekil 1.4. Kent-Park tarafından önerilen gerilme-şekildeğiştirme modeli (Kent ve Park, 1971)

Mander ve ark. (1988) tarafından geliştirilen model, sargılı beton davranışını tanımlayan en yaygın ve deneysel verilerle güçlü biçimde desteklenen yaklaşımlardan biridir. Bu modelde sargı basıncı; enine donatı oranı, donatı akma dayanımı ve beton çekirdeği geometrisi dikkate alınarak etkin bir yanıl basınç olarak tanımlanmaktadır. Söz konusu yanıl basınç sayesinde betonun hem maksimum basınç dayanımı hem de nihai birim şekildeğiştirme kapasitesi artırılmaktadır. Model, sünek davranışı ve plastik mafsıl oluşumunu gerçekçi biçimde temsil etmesi nedeniyle performansa dayalı analizlerde yaygın biçimde tercih edilmektedir. (Şekil 1.2)

Saatçioğlu ve Razvi (1992) modeli ise sargı etkisini beton çekirdeği üzerinde oluşan etkin yanıl basınç dağılımı üzerinden ele almakta; enine donatı aralığı, donatı düzeninin düzensizliği ve sargı süreksizliklerinin etkilerini daha ayrıntılı biçimde modele dahil etmektedir. Bu yönüyle model, özellikle düzensiz sargı koşullarına sahip betonarme elemanların davranışının değerlendirilmesinde öne çıkmaktadır. (Şekil 1.8)

TBDY (2018), sargılı beton davranışını şekildeğiştirme esaslı performans değerlendirme yaklaşımı kapsamında ele almakta ve beton çekirdeği için artırılmış basınç dayanımı ile birim şekildeğiştirme sınırları tanımlamaktadır. Yönetmelikte benimsenen yaklaşım, literatürde geliştirilen sargılı beton modelleri ile uyumlu olup, uygulamaya yönelik, güvenli ve hesap süreçlerini sadeleştiren bir çerçeve sunmaktadır.

Bu bağlamda sargılı beton modelleri, betonarme yapı elemanlarının doğrusal olmayan davranışının, süneklik kapasitesinin ve deprem performansının doğru biçimde değerlendirilmesinde temel bir rol üstlenmektedir. Kullanılan model; moment-eğrilik ilişkilerinin elde edilmesi, plastik mafsıl özelliklerinin tanımlanması ve performans düzeylerinin belirlenmesi üzerinde doğrudan etkili olmakta; bu nedenle analiz amacı ve eleman özellikleri ile uyumlu bir sargılı beton modelinin seçilmesi büyük önem taşımaktadır.

1.2.1. Sargılı betonun gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri

Sargılı donatılı betonarme elemanların davranışını incelemeye yönelik literatürde yer alan analitik modellerde, genel olarak belirli başlı parametreler esas alınmaktadır. Bu parametreler; sargılı donatısı oranı, beton ve donatı çeliğinin mekanik özellikleri, düşey ve enine donatıların kesit içerisindeki dağılımı ile taşıyıcı sistem elemanlarının enkesit geometrisi olarak sıralanabilir. Söz konusu parametreler, beton çekirdeği üzerinde oluşan etkin yanal basıncın büyüklüğünü ve dağılımını doğrudan etkilemektedir.

Literatürde geliştirilen analitik modellerin önemli bir bölümü, ölçekli ve görece basit donatı yerleşimine sahip kolon deneylerine dayalı olarak elde edilmiştir. Bu deneysel çalışmalar, sargılı etkisinin betonun basınç dayanımı ve şekildeğiştirme kapasitesi üzerindeki etkilerini ortaya koymakta; elde edilen sonuçlar analitik bağıntıların geliştirilmesinde temel veri kaynağı olarak kullanılmaktadır.

Bu bölümde, betonarme taşıyıcı sistem elemanlarının doğrusal olmayan davranışının daha iyi anlaşılabilmesi amacıyla, Mander ve ark. (1988), TBDY (2018) ile Saatçioğlu ve Razvi (1992) tarafından önerilen sargılı beton gerilme-şekildeğiştirme modelleri ele alınmakta ve bu modellerin temel varsayımları ile karakteristik özellikleri açıklanmaktadır. Söz konusu modellerin karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesi, performans dayalı analizlerde uygun beton modelinin seçimine yönelik kuramsal bir zemin oluşturmaktadır.

1.2.2. Sargılı beton için Mander modeli

Mander ve ark. (1988) tarafından geliştirilen sargılı beton modeli, betonarme taşıyıcı elemanlarda enine donatı aracılığıyla sağlanan yanal sınırlandırmanın, betonun basınç altındaki gerilme-şekildeğiştirme davranışı üzerindeki etkilerini analitik olarak tanımlamayı amaçlayan kapsamlı bir yaklaşımdır. Model; dairesel, kare ve dikdörtgen enkesit geometrilerine sahip betonarme elemanlarda, spiral veya etriye tipi sargılı donatılarının etkisini dikkate alacak biçimde geliştirilmiş olup, hem monotonik hem de tersinir tekrarlı yükleme koşulları altında uygulanabilir niteliktedir. Bu özellikleriyle Mander modeli, sargılı beton davranışını açıklayan en yaygın ve kabul görmüş analitik modellerden biri olarak literatürde önemli bir yer edinmiştir.

Mander modelinde sargılı etkisi, etkin yanal sargılı basıncı kavramı üzerinden tanımlanmakta; bu basınç değeri enine donatı oranı, donatı akma dayanımı, etriye veya spiral aralığı ile çekirdek betonun geometrik özellikleri dikkate alınarak hesaplanmaktadır. Dairesel kesitli ve spiral donatılı elemanlarda yanal sargılı basıncı, kesit çevresi boyunca daha homojen bir dağılım sergilerken; kare veya dikdörtgen kesitli elemanlarda bu etki köşelerde yoğunlaşmakta ve kesit genelinde düzensiz bir dağılım göstermektedir. Bu nedenle modelde, farklı kesit geometrileri ve sargılı düzenleri için etkinlik katsayıları tanımlanarak, yanal sınırlandırmanın gerçekçi düzeyde temsil edilmesi sağlanmaktadır.

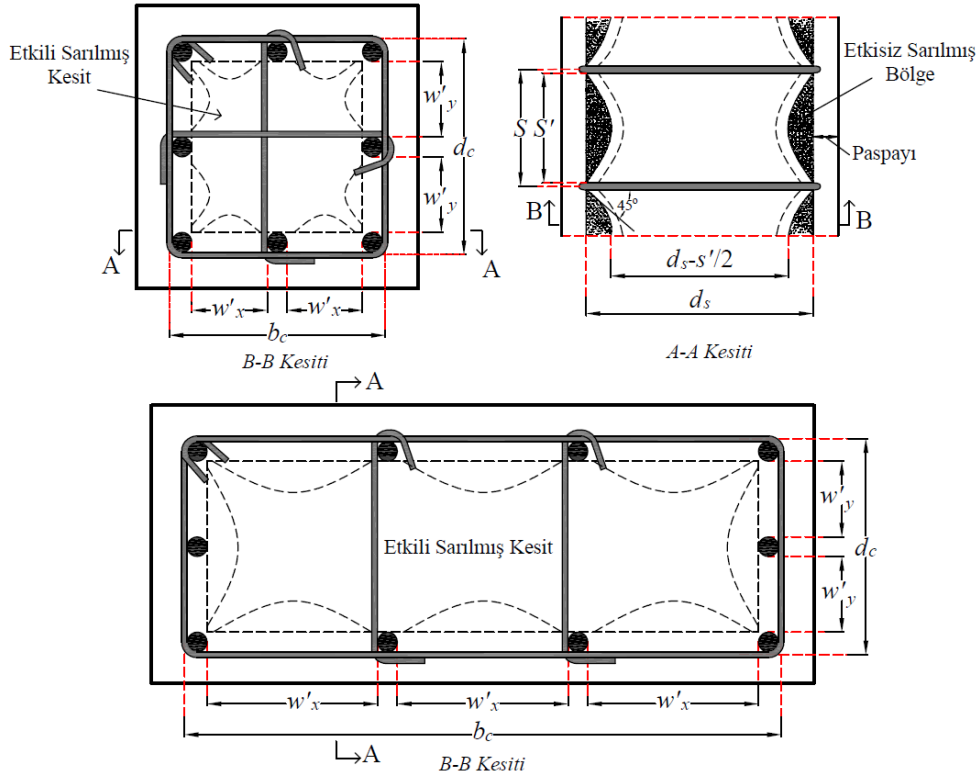
Sargılı betonun basınç altındaki gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi, Mander modeli kapsamında sürekli ve doğrusal olmayan bir eğri ile ifade edilmektedir. Bu eğri, düşük gerilme seviyelerinde yaklaşık doğrusal elastik bir davranış sergilemekte; yükleme arttıkça beton rijitliğinde azalma meydana gelmekte ve sargılı etkisi sayesinde artırılmış bir maksimum basınç dayanımına ulaşılmaktadır. Aynı zamanda, bu tepe gerilmesine karşılık gelen birim şekildeğiştirme değeri sargısız beton durumuna kıyasla önemli ölçüde artmakta; betonun yumuşama bölgesi daha kontrollü ve sünek bir karakter kazanmaktadır. Bu durum, sargılı betonun enerji yutma

kapasitesinin ve deprem performansının belirgin biçimde iyileşmesine olanak tanımaktadır. Model, başlangıçta monotonik yükleme koşulları esas alınarak geliştirilmiş olmasına rağmen, çevrimsel yükler altındaki betonarme eleman davranışının temsilinde de yaygın biçimde kullanılmaktadır. Özellikle kolon ve perde gibi düşey taşıyıcı elemanlarda plastik mafsallık bölgelerinin modellenmesinde, Mander sargılı beton modeli deneysel sonuçlarla yüksek düzeyde uyum göstermekte ve doğrusal olmayan analizlerde güvenilir çıktılar sağlamaktadır. Bu yönüyle model, performansa dayalı deprem mühendisliği yaklaşımlarında temel referanslardan biri olarak kabul edilmektedir.

Mander modeline göre kare ve dikdörtgen kesitler için sargılı beton basınç dayanımı:

Mander beton modeline göre sargılı ve sargısız betonun gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi Şekil 1.2’de verilmiştir. Mander modeline göre kare ve dikdörtgen enkesitli kolonların etkili olarak sargılı kesit görünümü Şekil 1.5’te verilmiştir. Sargı donatısının eksenleri arasında kalan çekirdek beton alanı (A_c), çekirdek betonun net enkesit alanının (A_{cc}) ve boyuna donatı alanının çekirdek beton alanına oranı (ρ_{cc}) Denklem (1.7)’den hesaplanmaktadır. Denklemde b_c ve d_c çekirdek betonunu sargılayan etriyelerin eksenleri arasında kalan kesit boyutu, A_s boyuna donatıların toplam enkesit alanıdır.

$$A_c = b_c d_c \quad , \quad A_{cc} = b_c d_c (1 - \rho_{cc}) \quad , \quad \rho_{cc} = \frac{\sum A_s}{b_c d_c} \quad (1.7)$$



Şekil 1.5. Sargılı donatılı kesitlerde etkin sarılmış beton çekirdek alanı (Mander ve ark., 1988)

Etkili olarak sarılmış kesitin iki enine donatı seviyesinin ortasında etkili olarak sarılan kesit alanı (A_e), Denklem (1.8) ile hesaplanmaktadır. Etkili olarak sarılmış olan alanın sargılı betonun net enkesit alanına (A_{cc}) oranı (k_e), Denklem (1.9) ile hesaplanmaktadır. Denklemlerde k_e ; sargı etkisi katsayısı, s ; boyuna doğrultuda etriyelerin eksenleri arasındaki aralığı ve s' ; boyuna doğrultuda etriyelerin net aralığı ve w'_i yatayda bir etriye kolu veya çiroz tarafından mesnetlenen boyuna donatıların arasındaki mesafedir.

$$A_e = \left(b_c d_c - \sum_i^n \frac{(w'_i)^2}{6} \right) \left(1 - \frac{s'}{2b_c} \right) \left(1 - \frac{s'}{2d_c} \right) \quad (1.8)$$

$$k_e = \frac{A_e}{A_{cc}} \quad (1.9)$$

Etkin sargı gerilmesini ifade etmek için A_{sx} ve A_{sy} kesit üzerinde x ve y yönlerinde kullanılan sargı donatılarının enkesit alanı olmak üzere, ρ_x ve ρ_y bu yönlerde enine donatının hacimsel oranı Denklem (1.10)'dan hesaplanmaktadır.

$$\rho_x = \frac{A_{sx}}{s d_c}, \quad \rho_y = \frac{A_{sy}}{s b_c}, \quad \rho_s = \rho_x + \rho_y \quad (1.10)$$

x ve y yönde çekirdek betonuna uygulanan etkili yanıl basınç Denklem (1.11 ve 1.12)'den hesaplanmaktadır. Çekirdek betonuna uygulanan etkili yanıl basınç kuvveti (f'_i) Denklem (1.13)'ten hesaplanmaktadır. Her iki yönde de farklı sargı basıncı değerleri elde edilmesi durumunda değerlerin ortalamasının alınması önerilmektedir.

$$f_{lx} = \frac{A_{sx}}{s d_c} f_{yh} = \rho_x f_{yh}, \quad f_{ly} = \frac{A_{sy}}{s b_c} f_{yh} = \rho_y f_{yh} \quad (1.11)$$

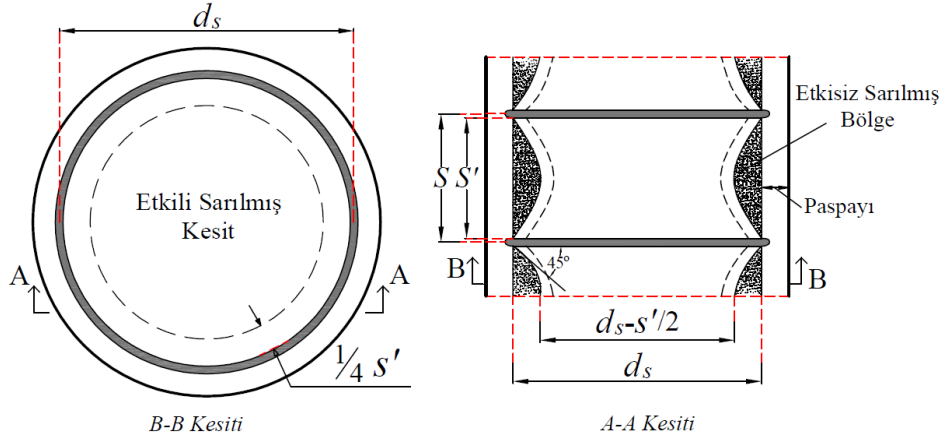
$$f'_{lx} = k_e \frac{A_{sx}}{s d_c} f_{yh} = k_e f_{lx}, \quad f'_{ly} = k_e \frac{A_{sy}}{s b_c} f_{yh} = k_e f_{ly} \quad (1.12)$$

$$f'_i = \frac{1}{2} \left(k_e \frac{A_{sx}}{s' d_c} f_{yh} + k_e \frac{A_{sy}}{s' b_c} f_{yh} \right) \quad (1.13)$$

Mander modeline göre dairesel kesitler için sargılı beton basınç dayanımı:

Mander ve ark. (1988) modeline göre dairesel enkesitli kolonların etkili olarak sargılı kesit görünümü Şekil 1.6'da verilmiştir. Dairesel kesitler için çekirdek betonun net enkesit alanı (A_{cc}) ve etkili olarak sarılan kesitin iki sargı donatısının net aralığının ortasında etkili olarak sarılan kesit alanı (A_e) Denklem (1.14 ve 1.15) ile hesaplanmaktadır. Denklemlerde; s' düşey doğrultuda iki spiral

veya dairesel net aralığı, d_s , ise çekirdek çapıdır. Dairesel etriyeler için sargı etkisi katsayısı (k_e) Denklem (1.16) ile hesaplanmaktadır.



Şekil 1.6. Sargı donatılı kesitlerde etkin sarılmış beton çekirdek alanı (Mander ve ark., 1988)

$$A_{cc} = \frac{\pi}{4} d_s^2 (1 - \rho_{cc}) \quad (1.14)$$

$$A_e = \frac{\pi}{4} \left(d_s - \frac{s'}{2} \right)^2 = \frac{\pi}{4} d_s^2 \left(1 - \frac{s'}{2d_s} \right)^2 \quad (1.15)$$

$$k_e = \frac{A_e}{A_{cc}} = \frac{\left(1 - \frac{s'}{2d_s} \right)^2}{(1 - \rho_{cc})} \quad (1.16)$$

Benzer şekilde dairesel spiraller için sargı etkisi katsayısı (k_e) Denklem (1.17) ile hesaplanmalıdır.

$$k_e = \frac{A_e}{A_{cc}} = \frac{\left(1 - \frac{s'}{2d_s} \right)^2}{(1 - \rho_{cc})} \quad (1.17)$$

Spiral veya dairesel etriyelerle sarılmış çekirdek betona uygulanan yanal sargı basıncı Denklem (1.18)'den hesaplanmaktadır.

$$2f_{yh} A_{sp} = f_l s d_s \quad (1.18)$$

Burada f_{yh} ; sargı donatısının akma dayanımı, A_{sp} ; sargı donatısı çubuğunun alanı, f_l ; betona uygulanan yanal sargı basıncı ve s ; spiral veya dairesel etriyelerin merkezinden merkezine ölçülen mesafedir. ρ_s ; sargı donatısı hacminin çekirdek betonunu hacmine oranı Denklem (1.19)'dan hesaplanmaktadır.

$$\rho_s = \frac{A_{sp} \pi d_s}{\frac{\pi}{4} d_s s} = \frac{4A_{sp}}{d_s s} \quad (1.19)$$

Denklem (1.18) ve Denklem (1.19)'dan;

$$f_l = \frac{1}{2} \rho_s f_{yh} \quad (1.20)$$

Dairesel kesitli kolonlarda betona uygulanan etkili yanal basınç değeri Denklem (1.21)'den hesaplanmaktadır.

$$f_l' = \frac{1}{2} k_e \rho_s f_{yh} \quad (1.21)$$

Etkili sargı basıncı, sargısız beton basınç dayanımı ifadelerinin de bilinmesi ile birlikte, sargılı beton basınç dayanımı (f_{cc}') için Denklem (1.22) kullanılmaktadır.

$$f_{cc}' = f_{co}' \left(-1.254 + 2.254 \sqrt{1 + \frac{7.94 f_l'}{f_{co}'}} - 2 \frac{f_l'}{f_{co}'} \right) \text{ MPa} \quad (1.22)$$

Sargılı betonda beton basınç gerilmesi f_c , basınç birim şekildeğiştirmesi ε_c 'nin fonksiyonu olarak Denklem (1.23)'te verilmiştir. Aşağıdaki bağıntılarda f_c ve ε_c sırasıyla herhangi bir andaki beton dayanımını ve karşılık gelen şekildeğiştirmeyi temsil etmektedir. Monotonik olarak yüklenen betonda oluşacak gerilme aşağıdaki bağıntılar ile bulunabilir. f_{cc}' 'ye karşı gelen birim kısalma (ε_{cc}) Denklem (1.24)'te tanımlanmıştır. ε_{co} normal dayanımlı betonlar için yaklaşık olarak 0.002 olarak önerilmiştir. Betondaki en büyük birim şekildeğiştirme değeri ε_{cu} enine donatıda oluşan ilk kopma anındaki değere karşılık gelir. Sargılı betondaki maksimum basınç birim şekildeğiştirmesi ε_{cu} Denklem (1.25)'te verilmiştir. Denklemde ρ_s toplam enine donatının hacimsel oranını, ε_{su} enine donatı çeliğinde maksimum gerilme altındaki birim uzama şekildeğiştirmesini göstermektedir.

$$f_c = \frac{f_{cc}' x r}{r - 1 + x^r} \quad (1.23)$$

$$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_{co} \left[1 + 5 \left(\frac{f_{cc}'}{f_{co}'} - 1 \right) \right] \quad (1.24)$$

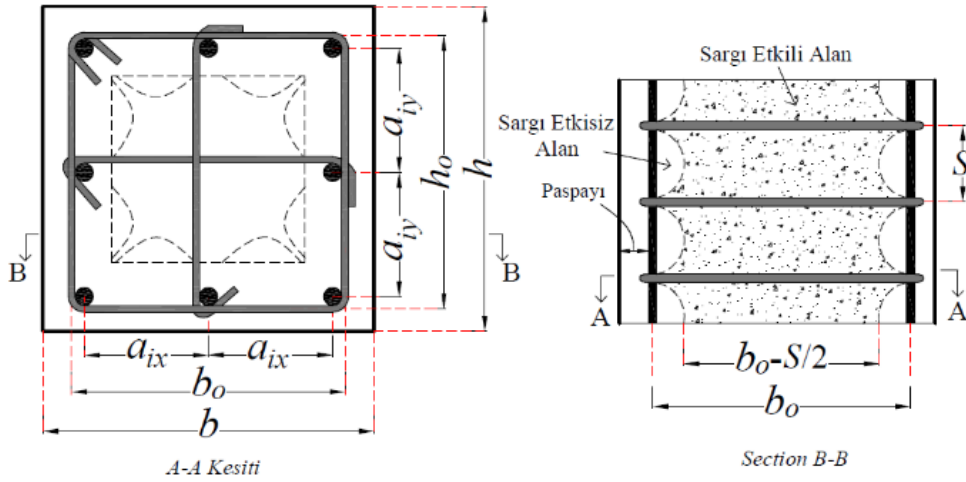
$$\varepsilon_{cu} = 0.004 + \frac{1.4 \rho_s f_{yw} \varepsilon_{su}}{f_{cc}'} \quad (1.25)$$

1.2.3. TBDY (2018)'e göre sargılı beton modeli

Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY, 2018), betonarme yapıların doğrusal olmayan analizlerinde beton malzeme davranışının gerçekçi biçimde temsil edilebilmesi amacıyla, sargısız ve sargılı beton için tanımlı gerilme-şekildeğiştirme modellerinin kullanılmasını öngörmektedir. Yönetmelikte betonun basınç altındaki doğrusal olmayan davranışı, kabuk betonu ile enine donatı tarafından sınırlandırılmış çekirdek betonun ayrı ayrı dikkate alınması esasına dayanmaktadır. Bu yaklaşım, betonarme elemanların deprem etkileri altında maruz kaldıkları hasar gelişiminin ve süneklik özelliklerinin daha doğru biçimde modellenmesini amaçlamaktadır.

TBDY (2018)'e göre sargısız ve sargılı beton için esas alınan gerilme-şekildeğiştirme bağıntısı, Şekil 1.3'te şematik olarak gösterilen idealize edilmiş doğrusal olmayan bir model ile ifade edilmektedir. Yönetmelikte tanımlanan sargılı beton modeli, esas itibarıyla Mander ve ark. (1988) tarafından geliştirilen analitik modele dayanmaktadır. Bununla birlikte TBDY (2018), mühendislik uygulamalarında hesap birliğini sağlamak ve farklı yorumların önüne geçmek amacıyla, modelde kullanılan parametreleri açık biçimde tanımlamakta ve belirli sınır değerler getirmektedir. Bu kapsamda sargılı beton davranışının tanımlanmasında kullanılan temel parametreler; sargılı betonun maksimum basınç dayanımı, bu dayanıma karşılık gelen birim şekildeğiştirme değeri, nihai basınç şekildeğiştirmesi ve betonun başlangıç elastisite modülünden oluşmaktadır.

TBDY (2018)'e göre sargılı beton modeli için kullanılan bu parametreler, Şekil 1.7'de ayrıntılı olarak gösterilmiştir. Şekilde, sargılı betonun basınç altındaki davranış eğrisi üzerinde karakteristik noktalar açık biçimde tanımlanmakta; betonun elastik davranış sınırı, maksimum basınç gerilmesi ve dayanım kaybının başladığı bölge net bir şekilde ortaya konulmaktadır. Bu tanımlama, doğrusal olmayan analizlerde kullanılan beton malzeme modelinin hem sayısal kararlılık hem de fiziksel gerçekçilik açısından tutarlı bir çerçeve sunmasını sağlamaktadır.



Şekil 1.7. Sargılı beton modeli için kullanılan parametreler (TBDY, 2018)

TBDY (2018)'e göre dikdörtgen kesitli betonarme elemanlarda etkili sargılama basıncı, birbirine dik iki doğrultu için tanımlanan etkili sargı basınçlarının ortalaması olarak alınmaktadır. Buna göre etkili sargılama basıncı f_e , Denklem (1.26) ile ifade edilmektedir.

Sargılamanın etkinliğini temsil eden sargılama etkinlik katsayısı k_e , kesit geometrisi, etriye aralığı (s) ve donatı düzeni dikkate alınarak Denklem (1.27)'ye göre hesaplanmaktadır. Sargılı beton dayanımı f_{cc} ile sargısız beton dayanımı f_{co} arasındaki ilişki ise Denklem (1.28)'de verilen bağıntı ile tanımlanmaktadır.

Sargılı beton modeli, sargısız beton için elde edilen basınç dayanımının, etkin sargı basıncının bir fonksiyonu olan λ_c katsayısı ile çarpılması esasına dayanmaktadır. Sargılı betonda basınç gerilmesi-şekildeğiştirme ilişkisi, TBDY (2018) kapsamında Mander ve ark. (1988) tarafından önerilen model esas alınarak tanımlanmakta ve doğrusal olmayan analizlerde kullanılmaktadır.

$$f_{ex} = k_e \rho_x f_{yw} \quad , \quad f_{ey} = k_e \rho_y f_{yw} \quad , \quad f_e = (f_{ex} + f_{ey})/2 \quad (1.26)$$

$$k_e = \left(1 - \frac{\sum a_i^2}{6b_o h_o}\right) \left(1 - \frac{s}{2b_o}\right) \left(1 - \frac{s}{2h_o}\right) \left(1 - \frac{A_s}{b_o h_o}\right)^{-1} \quad (1.27)$$

$$f_{cc} = \lambda_c f_{co} \quad , \quad \lambda_c = 2.254 \sqrt{1 + 7.94 \frac{f_e}{f_{co}}} - 2 \frac{f_e}{f_{co}} - 1.254 \quad (1.28)$$

1.2.4. Sargılı beton için Saatçioğlu ve Ravzi modeli

Saatçioğlu ve Razvi (1992), farklı kesit geometrilerine ve sargı düzenlerine sahip çok sayıda sargılı betonarme eleman üzerinde gerçekleştirdikleri kapsamlı deneysel çalışmalar sonucunda, sargılı betonun basınç altındaki gerilme-şekildeğiştirme davranışını temsil eden analitik bir model önermişlerdir. Geliştirilen bu model, dairesel ve dikdörtgen kesitli betonarme elemanlarda spiral veya etriye tipi sargı donatılarının beton davranışı üzerindeki etkilerini dikkate alacak şekilde tanımlanmıştır. Bu yönüyle model, özellikle sargı etkisinin deneysel veriler ışığında değerlendirilmesi bakımından literatürde önemli bir yer tutmaktadır.

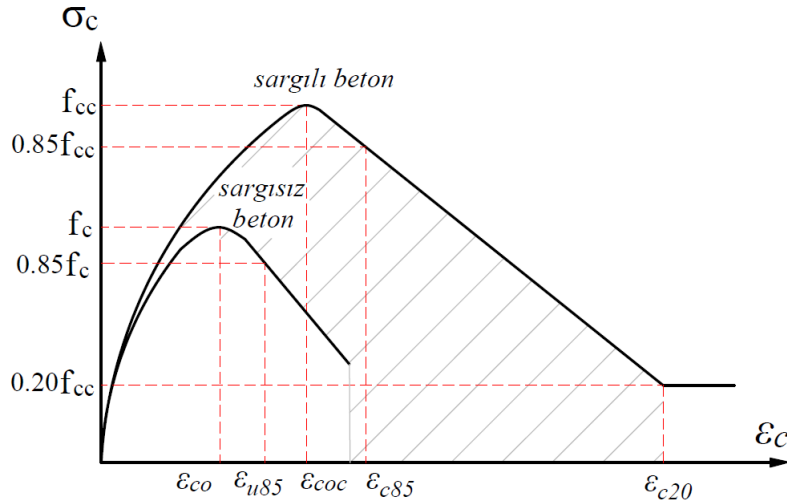
Saatçioğlu ve Razvi (1992) tarafından önerilen gerilme-şekildeğiştirme modeli, üç temel davranış bölgesinden oluşmaktadır. İlk bölgede, beton gerilmesi parabolik bir artış göstererek maksimum basınç dayanımına yaklaşmaktadır. Bunu izleyen ikinci bölgede, beton basınç dayanımı doğrusal bir biçimde azalarak tepe gerilmesinin yaklaşık %20'si düzeyine kadar düşmektedir. Üçüncü ve son bölgede ise, beton gerilmesi bu seviyede sabit kalarak artan şekildeğiştirmeler boyunca devam etmektedir. Modelin bu karakteristik davranışı, Şekil 1.8'de şematik olarak gösterilmektedir. Bu tanımlama, özellikle sargılı betonun ileri şekildeğiştirme seviyelerindeki sünek davranışını temsil etmeye yönelik pratik ve anlaşılır bir çerçeve sunmaktadır.

Modelin dikkat çekici özelliklerinden biri, yanal sargı basıncının etkisini açık biçimde tanımlamasıdır. Saatçioğlu ve Razvi (1992) beton modeli, yanal sargı basıncının sıfır veya ihmal edilebilir düzeyde olduğu durumda, Hognestad (1951) tarafından tanımlanan sargısız betonun tek eksenli basınç gerilme-şekildeğiştirme modeline karşılık gelmektedir. Bu özellik, modelin hem sargısız hem de sargılı beton davranışını tek bir teorik çerçeve içinde tanımlayabilmesine olanak sağlamakta ve farklı sargı düzeyleri arasında parametrik süreklilik sunmaktadır.

Sargılı betonun maksimum basınç dayanımı, yanal sargı basıncının etkisi dikkate alınarak Denklem (1.29) ile ifade edilmektedir. Bu bağlamda, beton dayanımındaki artış doğrudan sargı basıncı ile ilişkilendirilmekte ve modelin deneysel temelli yapısı vurgulanmaktadır. Normal dayanımlı betonlar için, Denklem (1.29)'da yer alan katsayılardan k_3 değeri genellikle 0.85 olarak kabul edilmektedir. Bu varsayım, deneysel sonuçlarla uyumlu olacak şekilde modelin mühendislik uygulamalarında sadeleştirilmiş biçimde kullanılmasını sağlamaktadır.

Saatçioğlu ve Razvi (1992) modeli, özellikle plastik mafsallarda betonun ileri düzey şekildeğiştirme davranışının temsil edilmesinde önemli bir avantaj sunmaktadır. Gerilmenin belirli bir seviyede sabit kaldığı üçüncü davranış bölgesi, betonarme elemanların büyük deplasmanlar altında taşıma kapasitesini tamamen kaybetmeden sünek davranış sergileyebilmesini açıklamaya yönelik bir yaklaşımdır. Bu yönüyle model, performansa dayalı deprem mühendisliği analizlerinde, özellikle yüksek süneklik talebinin söz konusu olduğu durumlarda anlamlı sonuçlar üretebilmektedir.

$$f_{cc} = k_3 f_c + k_1 \sigma_2 \quad , \quad k_1 = \frac{6.7}{(\sigma_2)^{0.17}} \quad (1.29)$$

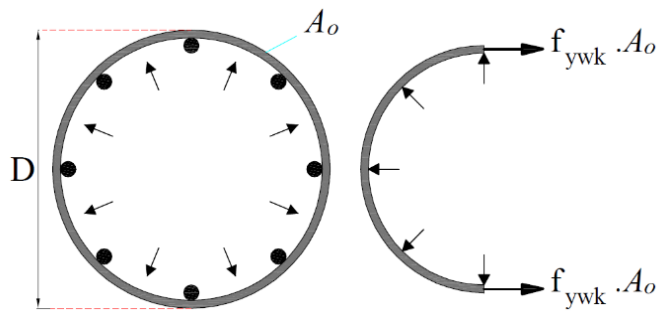


Şekil 1.8. Saatçioğlu ve Ravzi tarafından geliştirilen monotonik artan yükleme için gerilme-şekildeğiştirme bağlantısı (Saatçioğlu ve Ravzi, 1992)

Dairesel kesitler için sargılı beton basınç dayanımı:

Sık aralıklarla yerleştirilmiş dairesel veya spiral sargı donatısı ile kolon boyuna donatısının varlığı ve sürekliliği sayesinde, beton çekirdek etrafında gelişen yanal sargı basıncının düzgün dağıldığı kabul edilebilir. Söz konusu basınç Şekil 1.9'da görüldüğü gibi hesaplanabilir. Dairesel fretle sarılmış beton için çıkarılan σ_2 denklemi aşağıda verilmiştir. Bu denklemde A_o , s ve f_{ywk} , sırasıyla fretin kesit alanı, fret aralığı ve fret donatısının akma dayanımı ve D , çekirdek çapıdır.

$$\sigma_2 = \frac{2A_o}{D(s)} f_{ywk} \quad (1.30)$$



Şekil 1.9. Dairesel kolonlarda yanal sargı basıncı (Saatçioğlu ve Ravzi, 1992)

Kare kesitler için sargılı beton basınç dayanımı:

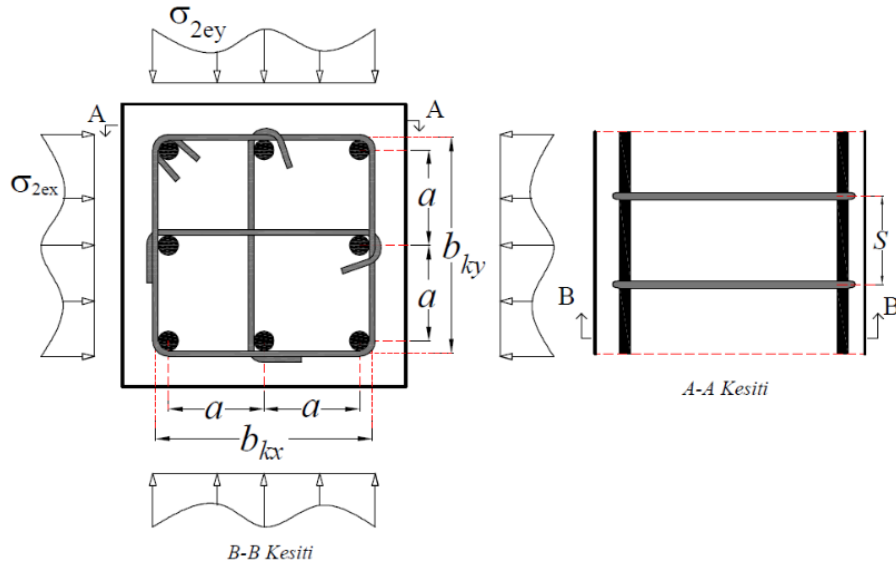
Sargı donatısının kare olduğu durumlarda sargı donatısında eğilme deformasyonu hakimdir. Bu nedenle köşelerde sargı etkisi belirginken, sargı etkisi sargı donatısının açıklık ortasında azaldığı için betona uygulanan basınç düzgün yayılı değildir (Şekil 1.10). Basınç dağılımındaki bu değişmeyi dikkate alabilmek için σ_2 yerine, eşdeğer düzgün yayılı basınç σ_{2e} , kullanılmasını önermektedir (Denklem 1.31).

DeneySEL verilerden yararlanarak σ_{2e} için Denklem (1.32) verilmiştir. Kare kesitler için; ($b_x = b_y$). Eşdeğer sargı basıncı, ortalama sargı basıncını β ile tanımlanacak bir azaltma katsayısına bağlı olarak tanımlanmıştır (Denklem 1.33). Denklemdeki a sargı donatısına mesnet oluşturan iki boyuna donatı merkezi arasındaki uzaklıktır.

$$f_{cc} = k_3 f_c + k_1 \sigma_{2e} \quad , \quad k_1 = \frac{6.7}{(\sigma_{2e})^{0.17}} \quad (1.31)$$

$$\sigma_{2e} = \beta \sigma_2 \quad , \quad \sigma_2 = \frac{\sum A_o f_{yw} k(\sin \alpha)}{(s b_k)} \quad (1.32)$$

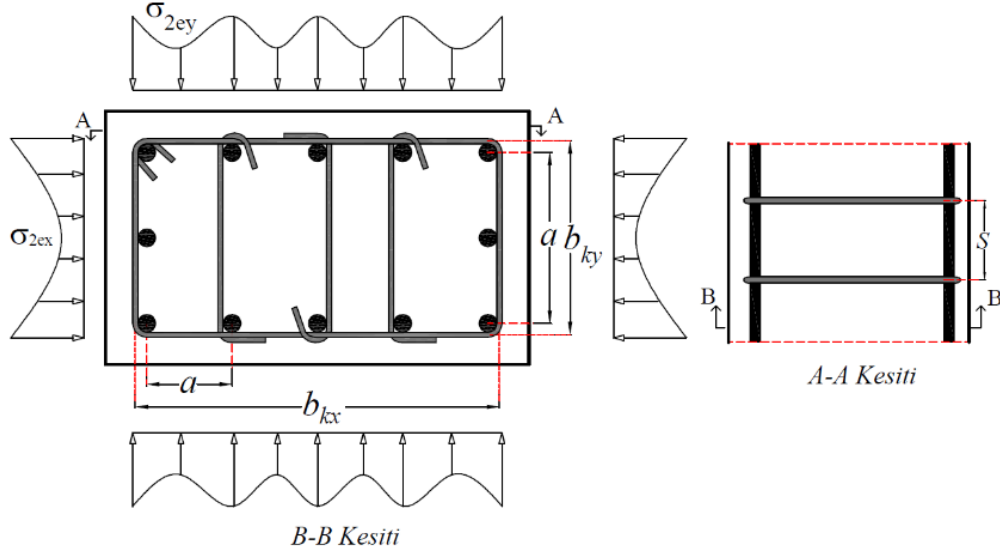
$$\beta = 0.26 \sqrt{\left(\frac{b_k}{a}\right) \left(\frac{b_k}{s}\right) \left(\frac{1}{\sigma_2}\right)} \leq 1.0 \quad (1.33)$$



Şekil 1.10. Kare kolonlarda yanıl sargı basıncı (Saatçioğlu ve Ravzi, 1992)

Dikdörtgen kesit için sargılı beton basınç dayanımı:

Dairesel ve kare kesitler için belirtilen hesap yöntemi, dikdörtgen kesitli kolon elemanlarda da kullanılabilir. Dikdörtgen kesitli elemanlarda uzun kenara etkiyen sargı basıncı, kısa kenara etkiyen sargı basıncına göre beton dayanımı üzerinde daha çok etkili olmaktadır. Deneysel verilerin incelenmesi sonucunda dikdörtgen kesitli kolon elemanın uzun ve kısa kenarlarına etkiyen sargı basıncının kenar uzunlukları ile orantılı olduğu anlaşılmaktadır (Şekil 1.11).



Şekil 1.11. Dikdörtgen kolonlarda yanıl sargı basıncı (Saatçioğlu ve Ravzi, 1992)

σ_{2ex} ve σ_{2ey} kolon çekirdek alanına etkiyen ve sırasıyla b_{kx} ve b_{ky} kenarlarına dik olarak yayıldığı kabul edilen eşdeğer yanıl sargı gerilmeleridir.

$$\sigma_{2e} = \frac{(\sigma_{2ex} b_{kx} + \sigma_{2ey} b_{ky})}{(b_{kx} + b_{ky})}, \quad \sigma_{2x} = \frac{\sum A_{ox} f_{ywk} \sin \alpha}{(s b_{kx})}, \quad \sigma_{2y} = \frac{\sum A_{oy} f_{ywk} \sin \alpha}{(s b_{ky})} \quad (1.34)$$

Dikdörtgen kesitlerde, β azaltma katsayısı x ve y yönü için ayrı ayrı hesaplanmalıdır. a_x ve a_y sırası ile b_{kx} ve b_{ky} kenarları boyunca yanıl olarak desteklenmemiş iki boyuna donatı arasındaki, donatı merkezinden merkezine, en büyük mesafelerdir.

$$\beta_x = 0.26 \sqrt{\left(\frac{b_{kx}}{a_x}\right) \left(\frac{b_{kx}}{s}\right) \left(\frac{1}{\sigma_{2x}}\right)} \leq 1.0, \quad \beta_y = 0.26 \sqrt{\left(\frac{b_{ky}}{a_y}\right) \left(\frac{b_{ky}}{s}\right) \left(\frac{1}{\sigma_{2y}}\right)} \leq 1.0 \quad (1.35)$$

$$\sigma_{2ex} = \beta_x \sigma_{2x}, \quad \sigma_{2ey} = \beta_y \sigma_{2y} \quad (1.36)$$

Sargı donatılı betonun gerilme-şekildeğiştirme eğrisinin elde edilebilmesi için f_{cc} 'nin hesaplanması yeterli değildir. f_{cc} 'ye karşı gelen birim kısalmanın (ε_{coc})'da tanımlanması gereklidir (Denklem 1.37). Ayrıca eğrinin ε_{coc} 'dan sonraki bölümü de tanımlanmalıdır. $0.85f_{cc}$ 'ye karşı gelen birim kısalma için Denklem (1.38) tanımlanmaktadır. Sargısız beton için $\varepsilon_{u85} = 0.0038$ ve $\varepsilon_{co} = 0.002$ olarak dikkate alınmaktadır.

$$\varepsilon_{coc} = \varepsilon_{co}[1 + 5\lambda] \quad , \quad \lambda = \frac{k_1 \sigma_{2e}}{k_3 f_c} \quad (1.37)$$

$$\varepsilon_{c85} = 260 \rho \varepsilon_{coc} + \varepsilon_{u85} \quad , \quad \rho = \frac{\sum A_{oxy} \sin \alpha}{s(b_{kx} + b_{ky})} \quad (1.38)$$

Eğrinin birinci bölümü:

$$\sigma_c = f_{cc} \left[\left(\frac{2\varepsilon_c}{\varepsilon_{coc}} \right) - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{coc}} \right)^2 \right]^{\frac{1}{1+2\lambda}} \leq f_{cc} \quad (1.39a)$$

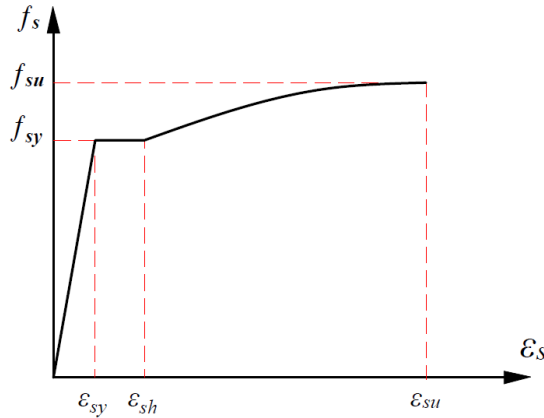
Eğrinin ikinci bölümü:

$$\sigma_c = f_{cc} + \left(\frac{f_{cc} - f_{c85}}{\varepsilon_{coc} - \varepsilon_{c85}} \right) (\varepsilon_c - \varepsilon_{coc}) \quad (1.39b)$$

1.3. Donatı Çeliğinin Gerilme- Şekildeğiştirme Özellikleri

Donatı çeliğinin mekanik tepkisi, elastik, akma ve akma sonrası plastik deformasyon evrelerini kapsayan doğrusal olmayan bir gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi çerçevesinde tanımlanmaktadır. Elastik bölgede gerilme ile şekildeğiştirme arasında doğrusal bir bağıntı mevcut olup, malzeme bu aşamada Hooke Kanunu ile uyumlu davranış sergilemektedir. Akma gerilmesinin aşılmasının ardından donatı çeliği, gerilmeye anlamlı bir artış olmaksızın yüksek plastik deformasyon kapasitesi sergilemekte; bu özellik betonarme elemanların süneklik düzeyinin belirlenmesinde temel bir rol oynamaktadır. Gelişen plastik deformasyonlar, plastik mafsall oluşumunu mümkün kılarak deprem enerjisinin eleman düzeyinde sönmülmesine katkı sağlamakta ve gevrek göçme yerine kademeli hasar mekanizmalarının ortaya çıkmasına imkan vermektedir. Bu bağlamda, donatı çeliğinin doğrusal olmayan davranışının doğru ve temsili biçimde modellenmesi, performans dayalı deprem analizlerinin güvenilirliği açısından kritik öneme sahiptir. TBDY (2018) kapsamında, doğrusal olmayan analizler ile şekildeğiştirmeye dayalı değerlendirmelerde kullanılmak üzere donatı çeliği için idealize edilmiş gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri tanımlanmıştır. İlgili bağıntılar, elastik davranış evresi, akma platosu ve akma sonrası pekleşme ile kopma noktasına kadar devam eden plastik davranışı kapsayacak şekilde üç aşamalı bir model yaklaşımıyla ifade edilmektedir. Donatı çeliğine ait söz konusu gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri Şekil 1.12’de gösterilmekte olup, modellemede esas alınan temel malzeme parametreleri Tablo 1.1’de sunulmaktadır.

$$\begin{aligned}
 f_s &= E_s \varepsilon_s & \varepsilon_s &\leq \varepsilon_{sy} \\
 f_s &= f_{sy} & \varepsilon_{sy} < \varepsilon_s &\leq \varepsilon_{sh} \\
 f_s &= f_{su} - (f_{su} - f_{sy}) \frac{(\varepsilon_{su} - \varepsilon_s)^2}{(\varepsilon_{su} - \varepsilon_{sh})^2} & \varepsilon_{sh} < \varepsilon_s &\leq \varepsilon_{su}
 \end{aligned} \tag{1.40}$$



Şekil 1.12. Donatı çeliği için gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri (TBDY, 2018)

Tablo 1.1. Malzeme modellerinde kullanılan parametreler (TBDY, 2018)

Malzeme	Parametre	Değer
Donatı Çeliği: B420C	Donatı çeliğinin akma birim şekildeğiştirmesi (ε_{sy})	0.0021
	Donatı çeliğinin pekleşme birim şekildeğiştirmesi (ε_{sp})	0.008
	Donatı çeliğinin kopma birim şekildeğiştirmesi (ε_{su})	0.080
	Donatı çeliğinin karakteristik akma dayanımı (f_{yk})	420MPa
	Donatı çeliğinin karakteristik kopma dayanımı (f_{su})	550MPa

2. BETONARME KOLONLARIN GERİLME-ŞEKİLDEĞİŞTİRME İLİŞKİLERİ

Betonarme kolonlar, düşey yüklerin taşınması ve yapısal stabilitenin sağlanması açısından taşıyıcı sistemin en kritik elemanlarıdır. Deprem etkileri altında elastik sınırların aşılması, kolon davranışını hasar gelişimi, göçme mekanizması ve sistem performansı açısından belirleyici hale getirmektedir. Bu nedenle kolonların davranışı, malzeme, kesit ve eleman düzeyinde doğrusal olmayan mekanik esaslar çerçevesinde değerlendirilmelidir.

Kolon davranışı; beton ve donatı çeliğinin doğrusal olmayan gerilme-şekildeğiştirme özellikleri ile eksenel yük düzeyi, kesit geometrisi, boyuna ve enine donatı oranları ve detaylandırma koşullarının etkileşimine bağlıdır. Deprem yüklemesi altında eğilme momenti, eksenel kuvvet ve kesme kuvvetinin eş zamanlı etkisi, kolonları çok eksenli gerilme durumuna maruz bırakmakta ve kesit tepkisini karmaşıklaştırmaktadır. Bu nedenle davranışın güvenilir biçimde öngörülebilmesi için doğrusal olmayan analiz yöntemleri esas alınmaktadır.

Kolon performansının belirlenmesinde beton ve çeliğin şekildeğiştirme kapasiteleri temel parametrelerdir. Kesit düzeyinde davranışın incelenmesinde moment-eğrilik ilişkileri temel analiz aracı olarak kullanılmakta; akma momenti, nihai moment kapasitesi ve eğrilik sünekliği bu eğriler üzerinden belirlenmektedir. Donatı akmasıyla birlikte plastik mafsallık bölgeleri oluşmakta ve doğrusal olmayan deformasyonlar bu bölgelerde yoğunlaşmaktadır (Park ve Paulay, 1975).

Kolonlarda sargı donatısı, çekirdek beton üzerinde yanal basınç oluşturarak hem basınç dayanımını hem de nihai birim şekildeğiştirme kapasitesini artırmaktadır. Bu etkinin modellenmesi amacıyla, bu kitapta TBDY (2018), Mander ve ark. (1988) ile Saatçioğlu ve Razvi (1992) modelleri esas alınmış; sargı etkinlik katsayısı, etkin yanal basınç, sargılı beton dayanımı ve maksimum birim şekildeğiştirme değerleri analitik olarak belirlenmiştir. Boyuna donatı oranı, sargı donatısı oranı ve beton basınç dayanımı gibi değişkenler parametrik olarak analiz edilmiştir.

Kolon davranışı, moment-eğrilik ilişkileri üzerinden değerlendirilmiş ve beton ile donatı çeliği için doğrusal olmayan malzeme modelleri uygulanmıştır. Analitik çalışmalarda kullanılan kolon kesitleri ve donatı detaylandırmaları, eksenel yük düzeyi ve sargı donatısının kolon davranışı üzerindeki etkilerini açık biçimde ortaya koyacak şekilde tasarlanmıştır. Bu çerçevede, her bir kolon için gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri hesaplanmış; bu verilerden moment-eğrilik ilişkileri ve eğrilik süneklik değerleri elde edilerek, farklı tasarım parametrelerinin kolonun taşıma kapasitesi ve sünekliği üzerindeki etkileri kapsamlı bir biçimde analiz edilmiştir.

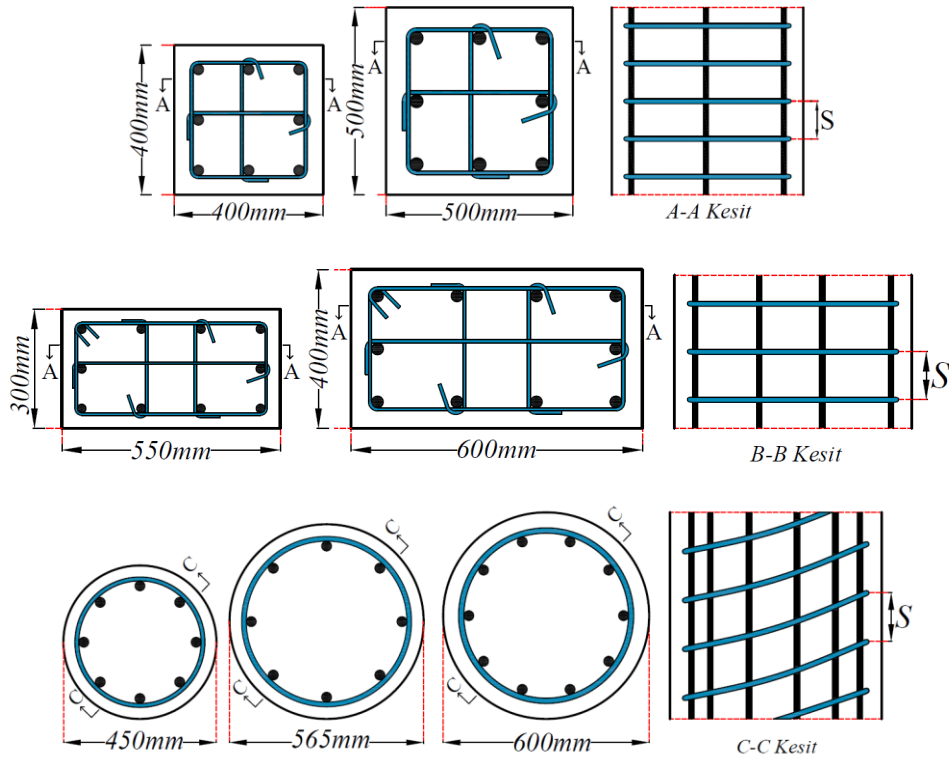
Bu bölüm kapsamında, betonarme kolonların doğrusal olmayan davranışını etkileyen temel parametrelerin analitik olarak incelenmesi amacıyla farklı kesit geometrilerine, beton basınç dayanımlarına, boyuna ve enine donatı oranlarına ve eksenel yük seviyelerine sahip kolon modelleri tasarlanmıştır (Şekil 2.1). Şekil 2.1’de, doğrusal olmayan analizlerde esas alınan betonarme kolon modellerine ait kare, dikdörtgen ve dairesel kesitlerin geometrik özellikleri ile donatı düzenlemeleri ayrıntılı olarak sunulmaktadır. Kolon modelleri; farklı kesit geometrileri, boyutlar, boyuna ve enine donatı oranları ile eksenel yük seviyelerini temsil edecek biçimde tanımlanmış olup, doğrusal olmayan kesit davranışının karşılaştırmalı olarak incelenmesine olanak sağlayacak şekilde kurgulanmıştır.

Kare ve dikdörtgen kesitli kolon modelleri; 400 mm×400 mm, 500 mm×500 mm, 300 mm×550 mm ve 400 mm×600 mm boyutlarında tasarlanmıştır. Bu kesitlerde sargı donatısı aralığı (s) ve boyuna donatı yerleşimi sistematik olarak değiştirilerek farklı süneklik ve rijitlik düzeyleri temsil edilmiştir. Şekilde yer alan A-A ve B-B kesit görünümleri, boyuna donatıların kesit içindeki

dağılımını ve enine donatıların beton çekirdeği üzerinde oluşturduğu yanal sargı etkisini açık biçimde ortaya koymaktadır. Bu düzenlemeler, kare ve dikdörtgen kesitli kolonlarda gerilme-şekildeğiştirme ve moment-eğrilik ilişkilerinin gelişimini, plastik mafsallıkların oluşumunu ve süneklik kapasitesinin belirlenmesini analitik olarak değerlendirmeye imkan tanımaktadır.

Dairesel kesitli kolon modellerinde ise çaplar 450 mm, 565 mm ve 600 mm olarak belirlenmiş olup, spiral sargı donatısının düzeni C-C kesitinde gösterilmiştir. Spiral donatı, beton çekirdeği üzerinde sürekli ve üniform bir yanal basınç oluşturarak betonun basınç dayanımını ve nihai şekildeğiştirme kapasitesini artırmaktadır. Bu etki, dairesel kesitli kolonların eğilme ve aksel yüklerin birlikte etkisi altında daha sünek bir davranış sergilemesine ve enerji yutma kapasitesinin yükselmesine katkı sağlamaktadır. Dairesel kesitler, özellikle eksantrik yükleme ve çok eksenli gerilme durumlarında, kesit düzeyinde moment-eğrilik davranışının güvenilir biçimde belirlenmesine imkan veren uygun bir modelleme yaklaşımı sağlamaktadır.

Şekil 2.1’de sunulan kolon kesit modelleri, doğrusal olmayan analiz kapsamında kolonların gerilme-şekildeğiştirme davranışı ile kesitsel moment-eğrilik yanıtının belirlenmesine esas teşkil eden temel bir referans niteliğindedir. Farklı kesit geometrileri, boyuna ve enine donatı oranları ile sargı düzenlemeleri; kolon kesitlerinin elastik ve plastik evrelerdeki rijitlik değişimlerinin, taşıma kapasitesinin, dayanım azalması sürecinin ve maksimum şekildeğiştirme kapasitelerinin karşılaştırmalı olarak incelenmesine olanak vermektedir. Bu bağlamda söz konusu modeller, betonarme kolonların deprem etkileri altındaki doğrusal olmayan davranışının sistematik biçimde değerlendirilmesini mümkün kılmakta ve performans esaslı mühendislik tasarımı için güvenilir bir analitik altyapı oluşturmaktadır.



Şekil 2.1. Doğrusal olmayan hesaplamalarda kullanılan betonarme kolon modellerinin kesit görünüşü

Betonarme kolonlarda gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri, aksel yük ve eğilme momenti etkisi altındaki kesit davranışının tanımlanmasında temel bir rol oynamaktadır. Bu ilişkiler, beton ve donatı çeliğinin doğrusal olmayan malzeme davranışlarının eşzamanlı olarak modellenmesine dayanmakta olup, kolon kesitlerinin taşıma kapasitesi, rijitlik azalması ve süneklik performansının sayısal olarak belirlenmesini mümkün kılmaktadır.

Deprem etkisi altındaki betonarme elemanlar büyük şekildeğiştirmelere maruz kaldıklarında, yük taşıma kapasiteleri büyük ölçüde sargılı betonun davranışı ile belirlenmektedir. Bu nedenle, sargılı betonun performansını incelemek amacıyla farklı sargı donatısı çapı, sargı donatısı aralığı ve beton sınıfına sahip kolon modelleri değerlendirilmiştir. İncelenen kolonlar; 400 mm × 400 mm ve 500 mm × 500 mm kare enkesitli, 300 mm × 550 mm ve 400 mm × 600 mm dikdörtgen enkesitli ve 450 mm, 565 mm ve 600 mm çaplı dairesel enkesitli olarak seçilmiştir. TBDY (2018) standardına göre, kolonlarda boyuna donatı alanı brüt kesitin %1'inden az, %4'ünden fazla olmayacak şekilde tasarlanmıştır. Analizlerde, kolonlar için TBDY (2018), Mander ve ark. (1988) ile Saatçioğlu ve Razvi (1992) sargılı beton modelleri uygulanmış; bu modeller aracılığıyla gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri elde edilmiş ve elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

2.1. Kare Kesitli Betonarme Kolonların Gerilme-Şekildeğiştirme İlişkileri

2.1.1. 400 mm × 400 mm kare enkesitli kolonun gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi:

Bu bölümde, kare enkesitli betonarme kolonların doğrusal olmayan davranış özelliklerinin tasarım parametrelerine bağlı olarak incelenebilmesi amacıyla, enkesit boyutları 400 mm × 400 mm olan kolon modelleri ele alınmıştır. İncelenen tüm modellerde boyuna donatı düzeni sabit tutulmuş ve 8Φ22 mm olarak seçilmiştir.

Kolon davranışı üzerinde çekirdek betonun yanıl sargı düzeyinin etkilerini değerlendirebilmek amacıyla farklı sargı donatısı düzenlemeleri dikkate alınmıştır. Bu kapsamda üç farklı sargı donatısı çapı (Φ8 mm, Φ10 mm ve Φ12 mm) ile yedi farklı sargı donatısı aralığı (50 mm, 75 mm, 100 mm, 125 mm, 150 mm, 175 mm ve 200 mm) kullanılmıştır.

Beton basınç dayanımının doğrusal olmayan davranış üzerindeki etkisinin incelenebilmesi amacıyla beş farklı beton dayanım sınıfı (C30, C35, C40, C45 ve C50) modele dahil edilmiştir. Kolon modellerine ait geometrik özellikler, donatı düzenlemeleri ve malzeme parametreleri Tablo (2.1)'de özetlenmiştir (Foroughi ve Yüksel, 2022).

Geometrik özellikler ve boyuna donatı düzeni tüm modellerde sabit kabul edilmiş; çekirdek betonun yanıl kısıtlanma düzeyini belirleyen sargı donatısı detayları ile beton basınç dayanımı parametrik değişkenler olarak tanımlanmış ve bu parametrelerin kolonların doğrusal olmayan davranış karakteristikleri üzerindeki etkileri analitik yöntemlerle araştırılmıştır.

Tablo 2.1. 400 mm × 400 mm kare enkesitli betonarme kolon modellerinin kesit bilgileri ve detayları

Malzeme	Boyuna Donatı (mm)	No	Sargı Donatısı (mm)	No	Sargı Donatısı (mm)	No	Sargı Donatısı (mm)
C30 C35 C40 C45 C50	8Φ22	C1	Φ8/50	C8	Φ10/50	C15	Φ12/50
		C2	Φ8/75	C9	Φ10/75	C16	Φ12/75
		C3	Φ8/100	C10	Φ10/100	C17	Φ12/100
		C4	Φ8/125	C11	Φ10/125	C18	Φ12/125
		C5	Φ8/150	C12	Φ10/150	C19	Φ12/150
		C6	Φ8/175	C13	Φ10/175	C20	Φ12/175
		C7	Φ8/200	C14	Φ10/200	C21	Φ12/200

A-A Kesit

TBDY (2018) sargılı beton modeli:

Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY, 2018) esas alınarak tasarlanan 400 mm × 400 mm enkesit boyutlarına sahip betonarme kolon modelleri için sargılı beton davranışını tanımlayan temel mekanik parametreler hesaplanmıştır. Bu kapsamda, sargı etkinlik katsayısı (k_e), çekirdek betonuna etki eden etkili yanıl basınç (f_e), sargılı betonun basınç dayanımı (f_{cc}), bu dayanımda karşılık gelen birim şekildeğiştirme değeri (ϵ_{cc}) ile sargılı betonun nihai (maksimum) birim şekildeğiştirme kapasitesi (ϵ_{cu}) belirlenmiştir. Elde edilen bu sayısal sonuçlar, ilgili parametreler açısından sistematik biçimde değerlendirilerek Tablo (2.2)'de sunulmuştur.

Ayrıca, farklı tasarım parametrelerinin sargılı beton davranışını üzerindeki etkilerini ortaya koymak amacıyla, sargılı beton için hesaplanan gerilme-birim şekildeğiştirme (σ - ϵ) ilişkileri grafiksel olarak ifade edilmiştir. Bu ilişkiler, sargı koşullarının betonun dayanım ve süneklik özellikleri üzerindeki etkisini açık biçimde göstermek üzere Şekil 2.2'de verilmiştir. Bunun yanı sıra, farklı model ve parametre kombinasyonları için elde edilen hesap sonuçları, karşılaştırmalı bir değerlendirme yapılmasına olanak sağlayacak şekilde grafikler halinde özetlenmiş ve Şekil 2.3'te sunulmuştur. Böylece, sargı etkisinin betonarme kolonların taşıma kapasitesi ve deformasyon davranışını üzerindeki katkısı, hem nicel hem de görsel olarak kapsamlı bir biçimde ortaya konulmuştur.

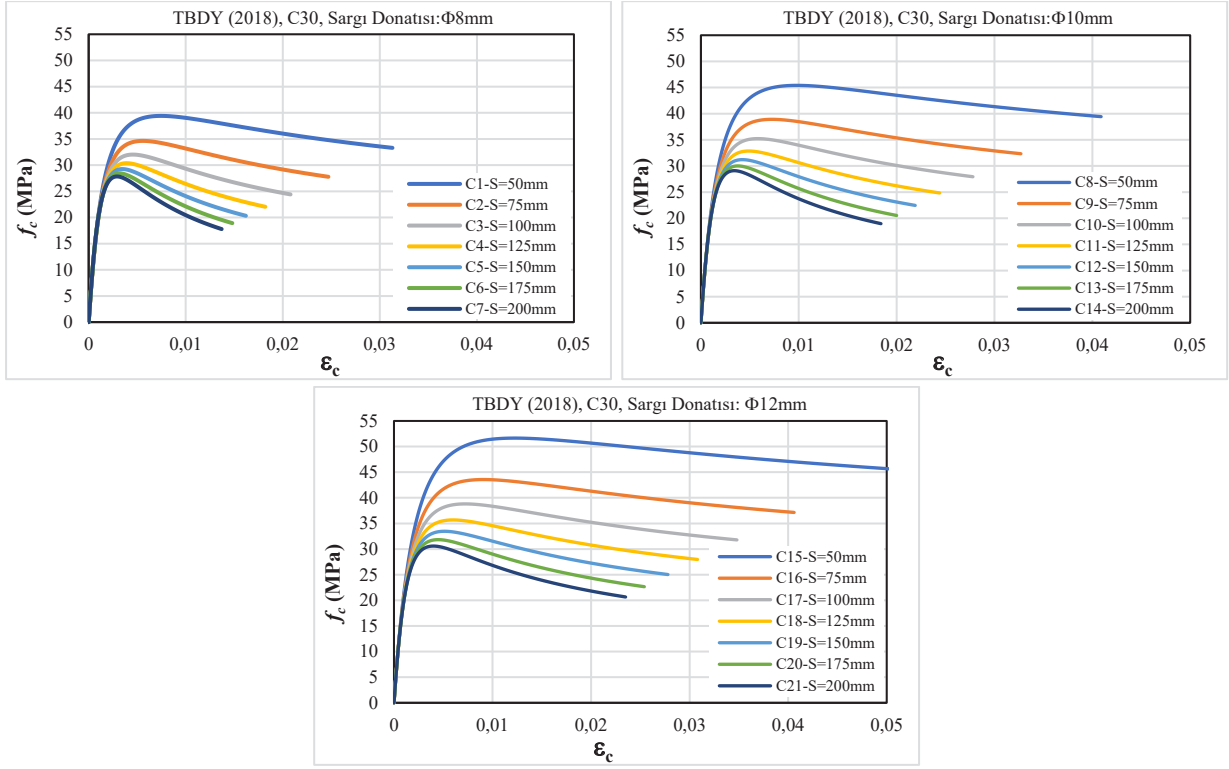
Tablo 2.2. TBDY (2018)'e göre 400 mm × 400 mm enkesitli kolon modellerinin farklı tasarım parametrelerine göre hesap sonuçları

a) Farklı sargı donatısı çapı ve aralığı (boyuna donatı: 8Φ22 mm, C30)

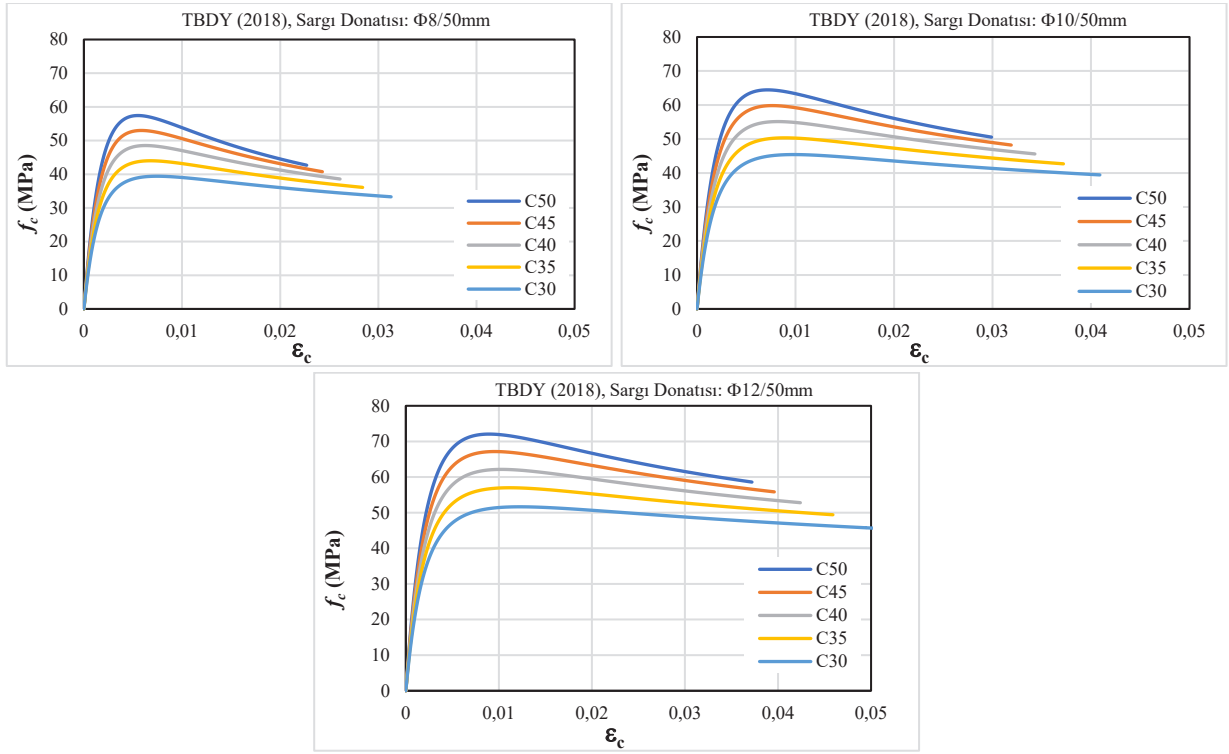
No	Sargı Donatısı (mm)	k_e	f_{ex}, f_{ey}, f_e (MPa)	f_{cc} (MPa)	ϵ_{cc}	ϵ_{cu}
C1	Φ8/50	0.64	2.44	39.4	0.0075	0.0313
C2	Φ8/75	0.59	1.50	34.6	0.0056	0.0247
C3	Φ8/100	0.54	1.03	32.0	0.0046	0.0208
C4	Φ8/125	0.49	0.75	30.4	0.0039	0.0182
C5	Φ8/150	0.45	0.57	29.3	0.0035	0.0162
C6	Φ8/175	0.40	0.44	28.4	0.0032	0.0148
C7	Φ8/200	0.36	0.35	27.8	0.0029	0.0137
C8	Φ10/50	0.64	3.84	45.5	0.0098	0.0409
C9	Φ10/75	0.59	2.35	39.0	0.0073	0.0327
C10	Φ10/100	0.54	1.62	35.3	0.0058	0.0278
C11	Φ10/125	0.49	1.18	32.9	0.0049	0.0244
C12	Φ10/150	0.45	0.89	31.2	0.0042	0.0219
C13	Φ10/175	0.40	0.69	30.0	0.0038	0.020
C14	Φ10/200	0.36	0.55	29.1	0.0034	0.0184
C15	Φ12/50	0.64	5.50	51.6	0.0123	0.0503
C16	Φ12/75	0.59	3.40	43.6	0.0091	0.0406
C17	Φ12/100	0.54	2.30	38.8	0.0072	0.0348
C18	Φ12/125	0.50	1.70	35.7	0.0060	0.0308
C19	Φ12/150	0.45	1.30	33.5	0.0051	0.0278
C20	Φ12/175	0.41	1.00	31.8	0.0045	0.0254
C21	Φ12/200	0.37	0.80	30.6	0.0040	0.0235

b) Farklı beton sınıfı (boyuna donatı: 8Φ22 mm)

No	Sargı Donatısı (mm)	Malzeme	k_e	f_{ex}, f_{ey}, f_e (MPa)	f_{cc} (MPa)	ϵ_{cc}	ϵ_{cu}
C1	Φ8/50	C30	0.637	2.4	39.4	0.0075	0.0313
		C35			44.0	0.0068	0.0284
		C40			48.5	0.0063	0.0261
		C45			53.0	0.0059	0.0243
		C50			57.4	0.0055	0.0227
C8	Φ10/50	C30	0.640	3.8	45.5	0.0098	0.0409
		C35			50.3	0.0089	0.0372
		C40			55.1	0.0082	0.0343
		C45			59.8	0.0076	0.0319
		C50			64.4	0.0072	0.0299
C15	Φ12/50	C30	0.643	5.5	51.6	0.0123	0.0503
		C35			57.0	0.0112	0.0459
		C40			62.2	0.0103	0.0424
		C45			67.2	0.0096	0.0396
		C50			72.1	0.0090	0.0372

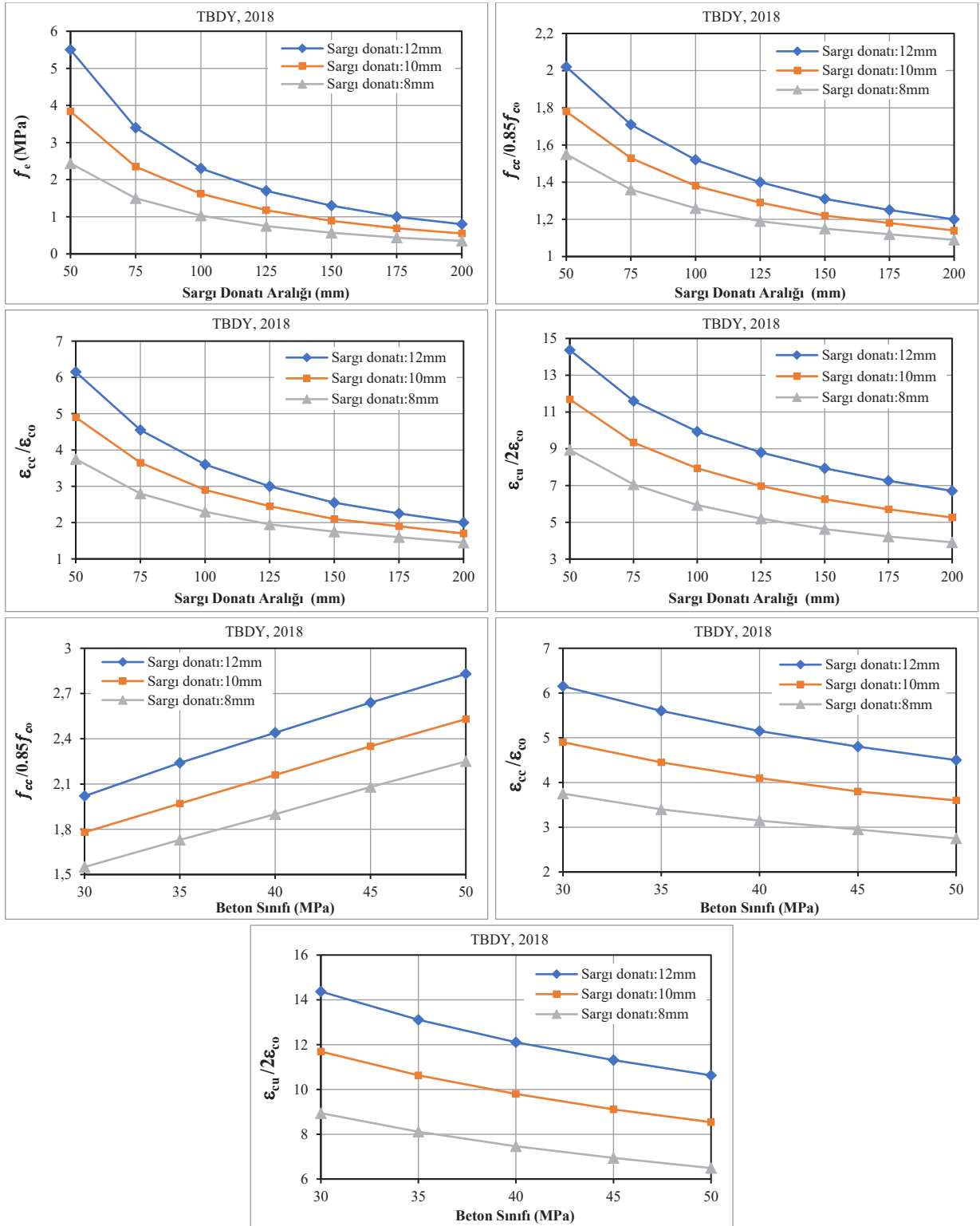


a) Farklı sargı donatısı oranı (boyuna donatı: Φ22 mm)



b) Farklı beton basınç dayanımı (boyuna donatı: Φ22 mm)

Şekil 2.2. TBDY (2018)'e göre 400 mm × 400 mm enkesitli kolon modellerinin gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri



Şekil 2.3. TBDY (2018)'e göre 400 mm × 400 mm enkesitli kolon modellerinin gerilme ve birim şekildeğiştirme değerlerinin karşılaştırmalı ilişkileri

Sargı donatısı çapı ve aralığının etkisi:

Sargı donatısı çapı ve aralığının çekirdek betonun mekanik davranışı üzerindeki etkisi, Tablo 2.2 ile Şekil 2.2-a ve Şekil 2.3 sonuçları birlikte değerlendirilerek analiz edilmiştir. Analiz bulguları, sargı donatısı aralığının artmasıyla birlikte sargı etkinlik katsayısı (k_e) ve buna bağlı olarak çekirdek betonuna etki eden etkili yanal basınç (f_e) değerlerinin düzenli biçimde azaldığını göstermektedir. Örneğin, $\Phi 8$ mm sargı donatısı için aralığın 50 mm'den 200 mm'ye çıkarılması durumunda k_e değeri 0.64'ten 0.36'ya, f_e değeri ise 2.44 MPa'dan 0.35 MPa'ya düşmektedir. Bu durum, beton çekirdeği üzerinde oluşan etkin yanal basınç gerilmelerinin azaldığını ve buna bağlı olarak k_e değeri belirgin düzeyde düştüğünü göstermektedir. Benzer eğilimler $\Phi 10$ mm ve $\Phi 12$ mm çaplı sargı donatısına sahip modellerde de gözlenmiştir. Buna karşılık, sabit sargı donatısı aralığında sargı donatısı çapının artırılması, daha yüksek yanal basınç değerleri oluşturarak sargılı beton basınç dayanımını (f_{cc}) artırmaktadır. C30 beton sınıfına sahip C15 kolon modelinde $\Phi 12/50$ mm sargı donatısı düzeni için $f_{cc}=51.6$ MPa olarak belirlenmiştir. Buna karşılık, $\Phi 8/50$ mm sargı donatısı için C1 modelinde $f_{cc}=39.4$ MPa seviyesinde kalmıştır.

Şekil 2.2-a'de verilen gerilme-şekildeğiştirme eğrileri, sargı donatısı oranının artmasına bağlı olarak hem maksimum gerilmeye karşılık gelen birim şekildeğiştirme (ϵ_{cc}) hem de maksimum birim şekildeğiştirme kapasitesinin (ϵ_{cu}) belirgin biçimde arttığını göstermektedir. Büyük çaplı ve sık aralıklı sargı donatısı kullanılan modellerde pik sonrası gerilme azalmasının daha yavaş gerçekleştiği ve eğrilerin daha uzun bir plastik deformasyon bölgesi sergilediği görülmektedir. Buna karşılık, düşük sargı donatısı oranına sahip modellerde eğriler erken pik yapmakta ve gerilme kısa bir deformasyon aralığında hızla azalmaktadır. Bu davranış, yetersiz yanal sargı nedeniyle çatlak ilerlemesinin hızlanması ile ilişkilidir.

Şekil 2.3'te sunulan karşılaştırmalarda, sargı donatısı aralığının artmasıyla birlikte f_e , f_{cc} , ϵ_{cc} ve ϵ_{cu} değerlerinde düzenli bir azalma meydana geldiğini doğrulamaktadır. Dolayısıyla, sargı donatısı çapı ve aralığı, betonun hem dayanım hem de deformasyon kapasitesini belirleyen temel tasarım parametreleri olarak öne çıkmaktadır.

Beton basınç dayanımının etkisi:

Tablo 2.2-b'de, sabit sargı donatısı düzenlemeleri altında beton basınç dayanımının (C30-C50) sargılı beton davranışı üzerindeki etkisi ortaya konulmuştur. Sonuçlar, beton basınç dayanımı arttıkça f_{cc} anlamlı biçimde yükseldiğini göstermektedir. Örneğin, $\Phi 8/50$ mm sargı düzenlemesine sahip modelde beton sınıfının C30'dan C50'ye çıkarılması, f_{cc} değerinde yaklaşık %46 oranında artış sağlamıştır. Buna karşılık, beton dayanımındaki artış ϵ_{cc} ve ϵ_{cu} değerlerinde kademeli bir azalmaya neden olmuştur. Şekil 2.2-b'de sunulan gerilme-şekildeğiştirme eğrileri, beton dayanımı arttıkça f_{cc} değerinin yükseldiğini; ancak ϵ_{cu} değerinin azaldığını açıkça göstermektedir. Bu durum, yüksek dayanımlı betonların daha rijit ve görece daha gevrek davranış sergilemesiyle uyumludur. Ancak sargı donatısının sağladığı yanal basınç sayesinde, yüksek dayanımlı betonlarda ani dayanım kaybının sınırlandırıldığı ve maksimum gerilme sonrası belirli bir deformasyon kapasitesinin korunduğu gözlenmektedir. Özellikle $\Phi 10/50$ mm ve $\Phi 12/50$ mm sargı düzenlemelerinde, beton dayanımı artsa dahi ϵ_{cc} ve ϵ_{cu} değerlerinin görece yüksek seviyelerde kaldığı belirlenmiştir.

Karakteristik gerilme ve birim şekildeğiştirme değerlerinin karşılaştırılması:

Şekil 2.3'te, farklı sargı donatısı çapı ve aralıkları ile beton basınç dayanımlarına bağlı olarak hesaplanan etkili yanal basınç (f_e), sargılı beton basınç dayanımı (f_{cc}) ve bu dayanımlara karşılık gelen karakteristik birim şekildeğiştirme değerleri (ε_{cc} ve ε_{cu}) karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Grafikler, sargı aralığı arttıkça hem f_e hem de f_{cc} değerlerinin düzenli biçimde azaldığını; buna paralel olarak ε_{cc} ve ε_{cu} değerlerinde de düşüş meydana geldiğini göstermektedir. Bu eğilim, sargı donatısı aralığındaki artışın beton çekirdeği üzerindeki etkin sargı basıncını azaltmasıyla açıklanmaktadır.

Beton basınç dayanımındaki artış ise f_{cc} değerlerini yükseltmekte, ancak deformasyon kapasitesi üzerinde sınırlayıcı bir etki oluşturmaktadır. Bu durum, beton dayanımı ile süneklik arasında ters yönlü bir ilişkinin bulunduğunu ortaya koymaktadır. Bununla birlikte, büyük çaplı sargı donatısı kullanılan modellerde beton dayanımı artsa dahi ε_{cc} ve ε_{cu} değerlerinin görece yüksek seviyelerde kalması, etkin sargı düzenlemelerinin bu olumsuz etkiyi kısmen dengeleyebildiğini göstermektedir.

Şekil 2.2 ve Şekil 2.3 birlikte değerlendirildiğinde, TBDY (2018)'e göre tasarlanan betonarme kolonlarda sargı donatısı özelliklerinin betonun gerilme-şekildeğiştirme davranışı üzerinde doğrudan ve belirleyici bir rol oynadığı anlaşılmaktadır. Etkin sargı düzenlemeleri betonun hem taşıma kapasitesini hem de deformasyon yeteneğini artırarak daha sünek ve kontrollü bir davranış sağlamakta; buna karşılık beton dayanımındaki artış, süneklik açısından daha dikkatli bir tasarım yaklaşımını gerekli kılmaktadır.

Mander Sargılı Beton Modeli:

Mander sargılı beton modeline (Mander ve ark., 1988) göre 400 mm × 400 mm enkesitli kolon modellerinde hesaplanan çekirdek betonuna uygulanan etkili yanal basınç kuvveti (f'_l), sargılı beton basınç dayanımı (f'_{cc}), birim şekildeğiştirme (ϵ_{cc}) ve sargılı betonun maksimum birim şekildeğiştirme (ϵ_{cu}) elde edilmiş ve karşılaştırılmıştır (Tablo 2.3). Mander modeline göre farklı parametreler için elde edilen gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri karşılaştırmalı olarak Şekil 2.4'te verilmiştir. Farklı parametreler için hesaplanan gerilme ve birim şekildeğiştirme değerlerinin sargısız beton için verilen gerilme ve şekildeğiştirme sınır değerlerine oranı Şekil 2.5'te verilmiştir.

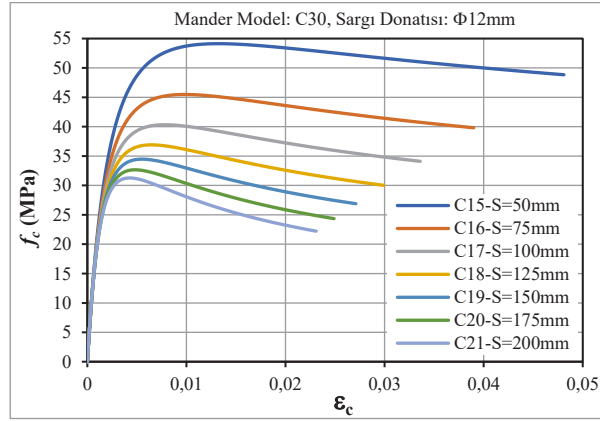
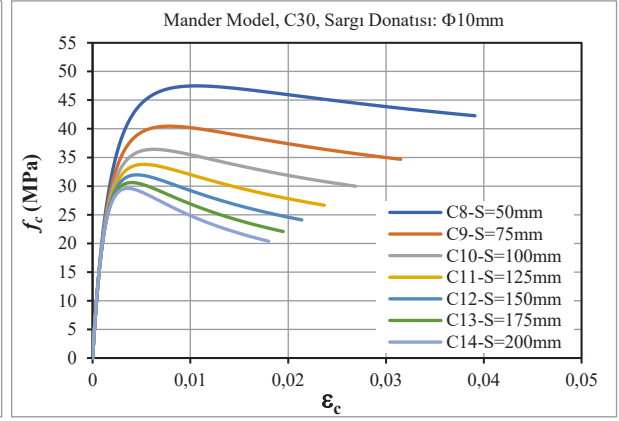
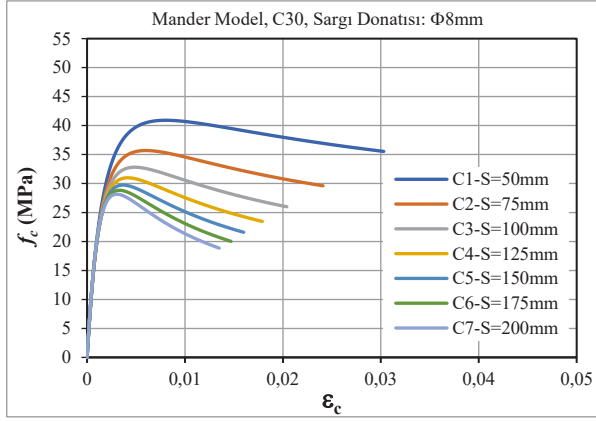
Tablo 2.3. Mander modeline göre 400 mm × 400 mm enkesitli kolon modellerinin farklı tasarım parametrelerine göre hesap sonuçları

a) Farklı sargı donatısı çapı ve aralığı (boyuna donatı: 8Φ22 mm, C30)

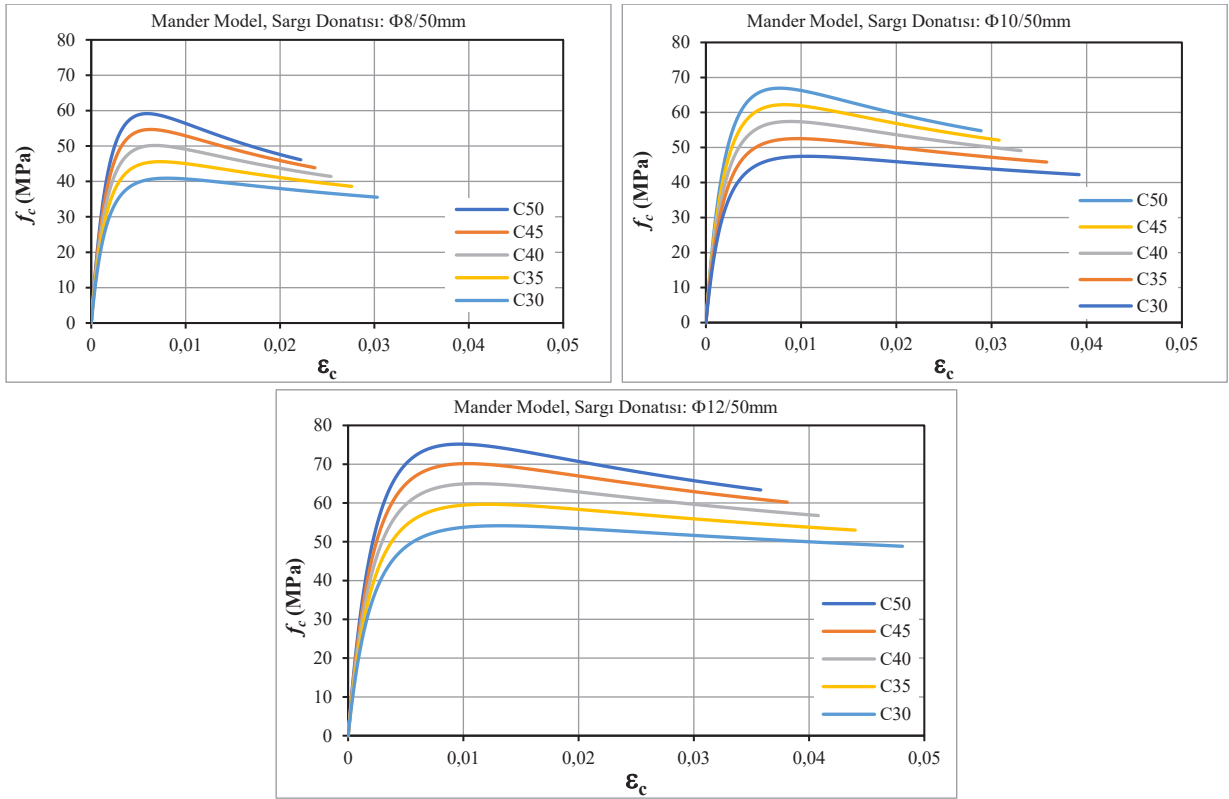
No	Sargı Donatısı (mm)	k_e	f_{lx}, f_{ly} (MPa)	f'_{lx}, f'_{ly}, f'_l (MPa)	f'_{cc} (MPa)	ϵ_{cc}	ϵ_{cu}
C1	Φ8/50	0.72	3.8	2.8	40.9	0.0080	0.0303
C2	Φ8/75	0.66	2.6	1.7	35.7	0.0060	0.0241
C3	Φ8/100	0.61	1.9	1.2	32.8	0.0049	0.0204
C4	Φ8/125	0.56	1.5	0.9	31.0	0.0042	0.0179
C5	Φ8/150	0.51	1.3	0.6	29.7	0.0037	0.0160
C6	Φ8/175	0.46	1.1	0.5	28.8	0.0033	0.0147
C7	Φ8/200	0.41	1.0	0.4	28.2	0.0030	0.0135
C8	Φ10/50	0.73	6.0	4.3	47.5	0.0106	0.0392
C9	Φ10/75	0.67	4.0	2.7	40.5	0.0079	0.0315
C10	Φ10/100	0.62	3.0	1.8	36.4	0.0063	0.0269
C11	Φ10/125	0.56	2.4	1.3	33.8	0.0053	0.0238
C12	Φ10/150	0.51	2.0	1.0	32.0	0.0045	0.0214
C13	Φ10/175	0.47	1.7	0.8	30.6	0.0040	0.0196
C14	Φ10/200	0.42	1.5	0.6	29.6	0.0036	0.0181
C15	Φ12/50	0.73	8.5	6.2	54.1	0.0132	0.0481
C16	Φ12/75	0.67	5.7	3.8	45.5	0.0098	0.0390
C17	Φ12/100	0.62	4.3	2.6	40.3	0.0078	0.0336
C18	Φ12/125	0.57	3.4	1.9	36.9	0.0065	0.0299
C19	Φ12/150	0.52	2.8	1.5	34.5	0.0055	0.0271
C20	Φ12/175	0.47	2.4	1.1	32.7	0.0048	0.0249
C21	Φ12/200	0.42	2.1	0.9	31.3	0.0043	0.0231

b) Farklı beton sınıfı (boyuna donatı: 8Φ22 mm)

Sargı Donatısı	Malzeme	k_e	f_{lx}, f_{ly} (MPa)	f'_{lx}, f'_{ly}, f'_l (MPa)	f'_{cc} (MPa)	ϵ_{cc}	ϵ_{cu}
Φ8/50 mm	C30	0.72	3.8	2.8	40.9	0.0080	0.0303
	C35				45.6	0.0073	0.0276
	C40				50.2	0.0068	0.0254
	C45				54.7	0.0063	0.0237
	C50				59.2	0.0059	0.0222
Φ10/50 mm	C30	0.73	6.0	4.3	47.5	0.0106	0.0392
	C35				52.5	0.0097	0.0358
	C40				57.4	0.0089	0.0331
	C45				62.2	0.0083	0.0308
	C50				66.9	0.0078	0.0289
Φ12/50 mm	C30	0.73	8.5	6.2	54.1	0.0132	0.0481
	C35				59.7	0.0121	0.0440
	C40				65.0	0.0111	0.0408
	C45				70.2	0.0103	0.0381
	C50				75.2	0.0097	0.0358

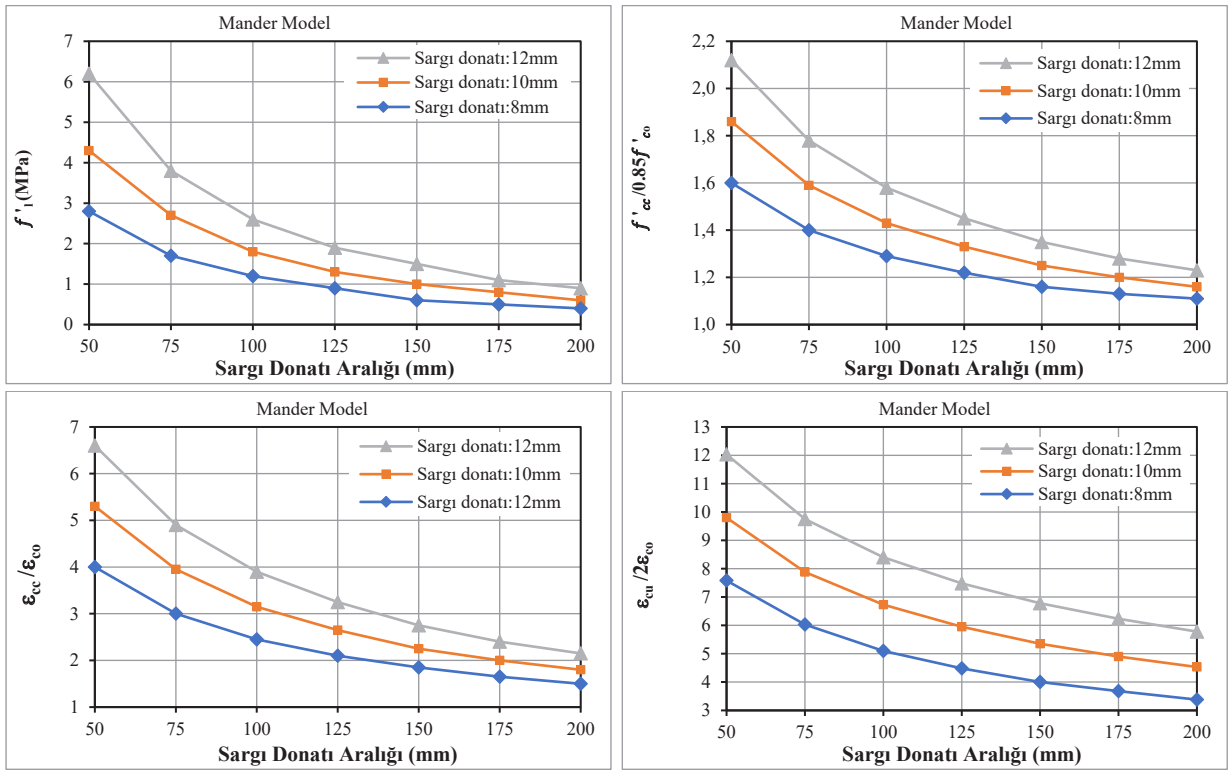


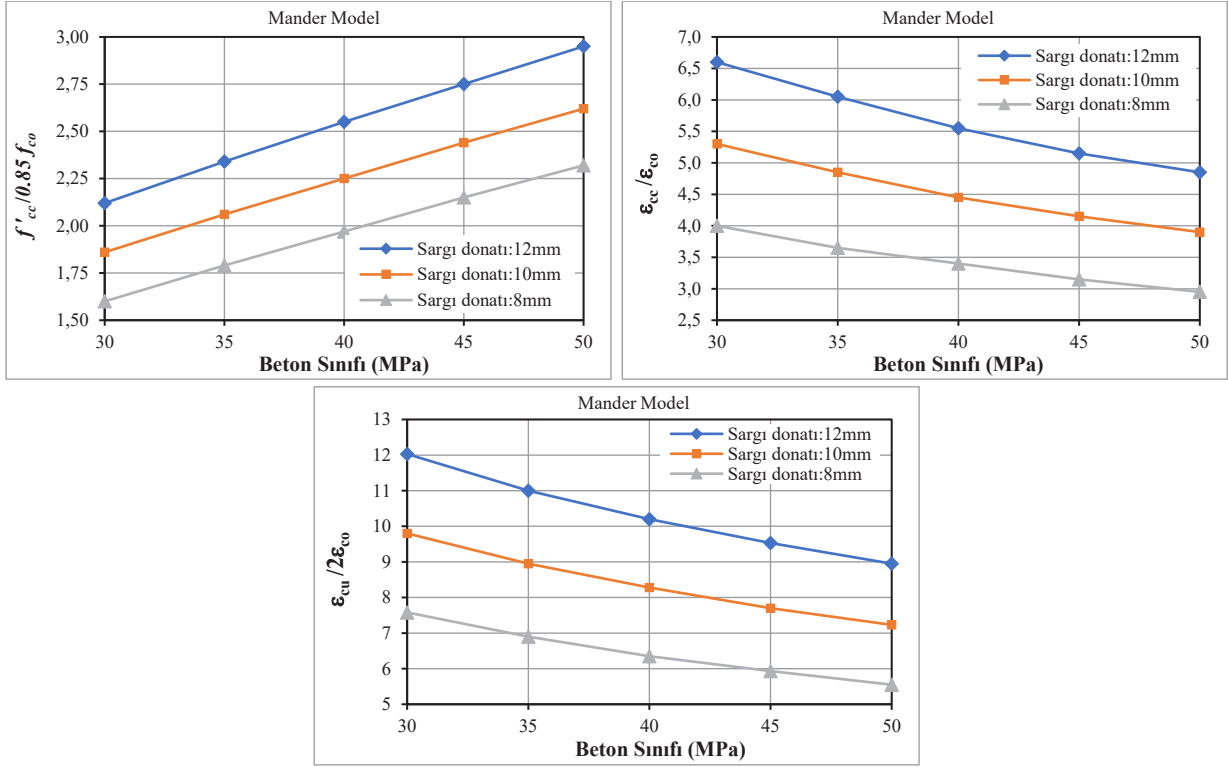
a) Farklı sargı donatısı oranı (boyuna donatı: Φ22 mm)



b) Farklı beton basınç dayanımı (boyuna donatı: $\Phi 22$ mm)

Şekil 2.4. Mander modeline göre 400 mm \times 400 mm enkesitli kolon modellerinin gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri





Şekil 2.5. Mander modeline göre 400 mm x 400 mm enkesitli kolon modellerinin gerilme ve birim şekildeğiştirme değerlerinin karşılaştırmalı ilişkileri

Sargı donatısı çapı ve aralığının etkisi:

Mander modeline göre farklı sargı donatısı çapı ve aralıklarına sahip kolon modellerinin incelenmesi, sargı aralığı arttıkça sargı etkinlik katsayısının (k_e) sistematik biçimde azaldığını göstermektedir. $\Phi 8$ mm sargı donatısı için 50 mm aralıkta 0.72 olan k_e değerinin 200 mm aralıkta 0.41'e düşmesi, sargı donatısı aralığındaki artışın beton çekirdeği üzerindeki sargı etkisini zayıflatmış açıkça ortaya koymaktadır. Benzer biçimde, çekirdek betonuna etkileyen etkin yanal basınç bileşenleri (f_{lx} , f_{ly}) ile bunlardan hesaplanan etkili yanal basınç (f'_l), sargı aralığının artmasıyla belirgin şekilde azalmaktadır. Yanal basınç düzeyindeki bu azalma, sargılı beton basınç dayanımına (f'_{cc}) doğrudan yansımakta; sık aralıklı sargıya sahip modellerde f'_{cc} değerleri daha yüksek seviyelerde elde edilmektedir.

Sabit sargı donatısı aralığında sargı donatısı çapının artırılması ise beton çekirdeğinde daha yüksek ve daha homojen bir yanal sargı basıncı oluşturarak f'_{cc} değerinin artmasına neden olmaktadır. Bu artış yalnızca dayanım düzeyini değil, deformasyon kapasitesini de artırmaktadır. Büyük çaplı ve sık aralıklı sargı donatısı kullanılan modellerde ϵ_{cc} ve ϵ_{cu} değerlerinin maksimum seviyelere ulaşması, sargı donatısının betonun süneklik ve enerji yutma kapasitesini artıran temel mekanizma olduğunu göstermektedir. Şekil 2.4-a'da sunulan gerilme-şekildeğiştirme eğrileri, sargı donatısı parametrelerinin beton davranışı üzerindeki belirleyici rolünü doğrulamaktadır. Sargı aralığının azaltılması ve sargı donatısı çapının artırılması, etkin yanal basıncı yükselterek Mander modelinin öngördüğü şekilde f'_{cc} ile buna karşılık gelen karakteristik birim şekildeğiştirme değerlerinin (ϵ_{cc} ve ϵ_{cu}) artmasına yol açmaktadır. Özellikle $\Phi 12/50$ mm düzenlemesine sahip modellerde eğrilerin daha yüksek tepe gerilmelerinde pik yaptığı ve pik sonrası gerilme azalımının daha yatay bir eğilim

izlediği görülmektedir. Bu davranış, yüksek sargı donatısı oranının gevrek kırılma eğilimini baskıladığını ve daha geniş bir post-pik taşıma kapasitesi bölgesi sağladığını göstermektedir. Buna karşılık, sargı aralığının 200 mm'ye çıkarılması durumunda eğriler daha düşük tepe gerilmelerinde sonlanmakta ve pik gerilme sonrası taşıma kapasitesi bölgesi belirgin biçimde daralmaktadır.

Beton basınç dayanımının etkisi:

Tablo 2.3-b'de, farklı beton sınıflarının (C30-C50) sargılı beton davranışı üzerindeki etkisi sabit sargı donatısı düzenlemeleri altında değerlendirilmiştir. Analiz sonuçları, beton basınç dayanımı arttıkça sargılı beton basınç dayanımının (f'_{cc}) sistematik biçimde yükseldiğini göstermektedir. Örneğin, $\Phi 12/50$ mm sargı düzenlemesinde beton sınıfının C30'dan C50'ye çıkarılması f'_{cc} değerinde yaklaşık %39 oranında artış sağlamıştır. Beton dayanımındaki artışın, ϵ_{cc} ve ϵ_{cu} değerlerinde kademeli bir azalmaya yol açtığı belirlenmiştir. Bu durum, yüksek dayanımlı betonların artan rijitlikleri ve gevrek davranış eğilimleriyle uyumludur. Sargı donatısı deformasyon kapasitesini artırmakla birlikte, beton dayanımı yükseldikçe bu katkının göreceli etkisi azalmaktadır.

Şekil 2.4-b'deki gerilme-şekildeğiştirme eğrileri, beton dayanımı arttıkça maksimum gerilmenin yükseldiğini, ancak maksimum gerilmeye karşılık gelen birim şekildeğiştirmenin azaldığını göstermektedir. Büyük çaplı ve sık aralıklı (örneğin $\Phi 12$ mm) sargı donatısı kullanımı, yüksek dayanım sınıflarında dahi pik sonrası taşıma kapasitesinin korunmasına katkı sağlayarak belirli bir deformasyon kapasitesinin sürdürülebilmesine imkan tanımaktadır.

Karşılaştırmalı grafiklerin değerlendirilmesi

Şekil 2.5'te sunulan karşılaştırmalı grafikler, sargı donatısı aralığı ve beton basınç dayanımının; etkin yanal basınç (f_l), dayanım artış oranı (f'_{cc}/f'_{co}) ve normalize edilmiş birim şekildeğiştirme değerleri üzerindeki etkilerini bütüncül biçimde ortaya koymaktadır. Grafiklere göre:

- Sargı donatısı aralığı arttıkça tüm donatı çapları için etkin yanal basınç ve dayanım artış oranı düzenli biçimde azalmaktadır. Bu eğilim, çekirdek beton üzerindeki sargı basıncının zayıflamasıyla doğrudan ilişkilidir.
- Daha büyük çaplı sargı donatısı ($\Phi 12$ mm) aynı aralıkta daha yüksek etkin yanal basınç değerleri üretmekte ve bu durum donatı çapı ile sargı etkinliği arasında güçlü bir korelasyon bulunduğunu göstermektedir.
- Beton basınç dayanımı arttıkça f'_{cc}/f'_{co} oranı yükselmekte; buna karşılık normalize edilmiş birim şekildeğiştirme değerleri azalmaktadır. Bu durum, yüksek dayanımlı betonlarda dayanım kazanımının daha belirgin, deformasyon kapasitesindeki artışın ise sınırlı olduğunu ortaya koymaktadır.

Genel olarak, Mander modeli kullanılarak elde edilen analiz sonuçları, sargı donatısı parametrelerinin ve beton basınç dayanımının sargılı beton davranışı üzerinde doğrudan ve belirleyici etkiler oluşturduğunu göstermektedir. Sık aralıklı ve büyük çaplı sargı donatısı, çekirdek betonun hem dayanımını hem de deformasyon kapasitesini önemli ölçüde artırmakta; buna karşılık beton dayanımındaki artış süneklik kazanımını sınırlamaktadır. Bu bulgular, deprem etkisi altındaki betonarme kolon tasarımında sargı donatısının yalnızca dayanım artırıcı bir detay değil, yapısal performansı belirleyen temel bir tasarım parametresi olarak değerlendirilmesi gerektiğini açıkça ortaya koymaktadır.

Saatçioğlu ve Ravzi Sargılı Beton Modeli:

Saatçioğlu ve Ravzi (1992) modeli kullanılarak, 400 mm × 400 mm enkesit boyutuna sahip betonarme kolon modelleri için çekirdek betonuna etkiyen eşdeğer yanal sargı gerilmesi (σ_{2e}), sargılı beton basınç dayanımı (f_{cc}), bu dayanıma karşılık gelen birim şekildeğiştirme (ϵ_{cco}) ile $0.2f_{cc}$ seviyesine karşılık gelen birim şekildeğiştirme değeri (ϵ_{c20}) hesaplanmış ve sonuçlar karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular Tablo 2.4'te sunulmuştur. Hesaplanan parametreler esas alınarak, Saatçioğlu ve Ravzi modeline göre gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri oluşturulmuş ve farklı tasarım parametrelerinin sargılı beton davranışı üzerindeki etkileri Şekil 2.6'da karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir. Ayrıca, sargılı beton için elde edilen gerilme ve birim şekildeğiştirme değerlerinin, sargısız beton için tanımlanan sınır değerlere oranları belirlenmiş ve bu oranlar Şekil 2.7'de sunulurken sargı donatısının dayanım ve süneklik üzerindeki etkisi nicel olarak ortaya konulmuştur.

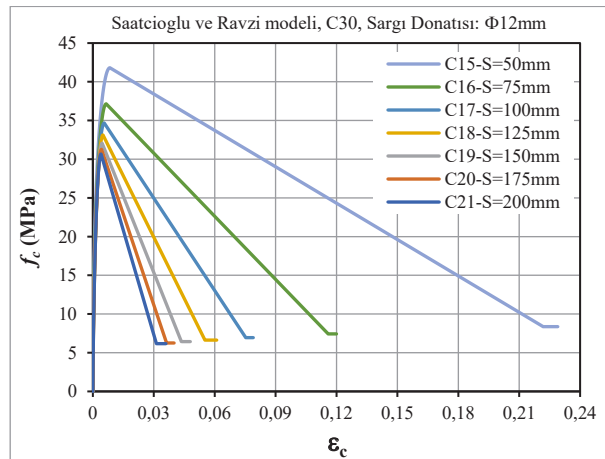
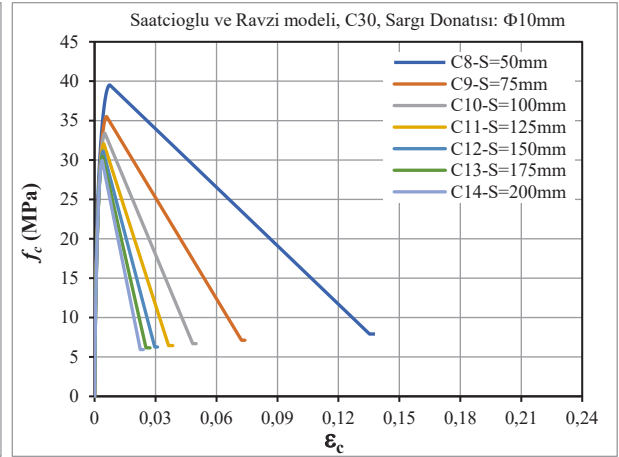
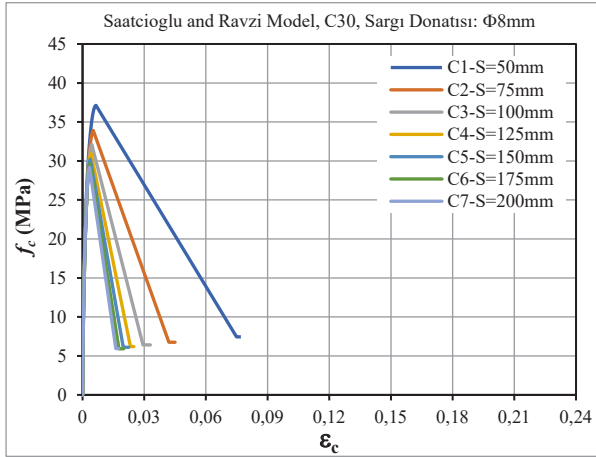
Tablo 2.4. Saatçioğlu ve Ravzi modeline göre 400 mm × 400 mm enkesitli kolon modellerinin farklı tasarım parametrelerine göre hesap sonuçları

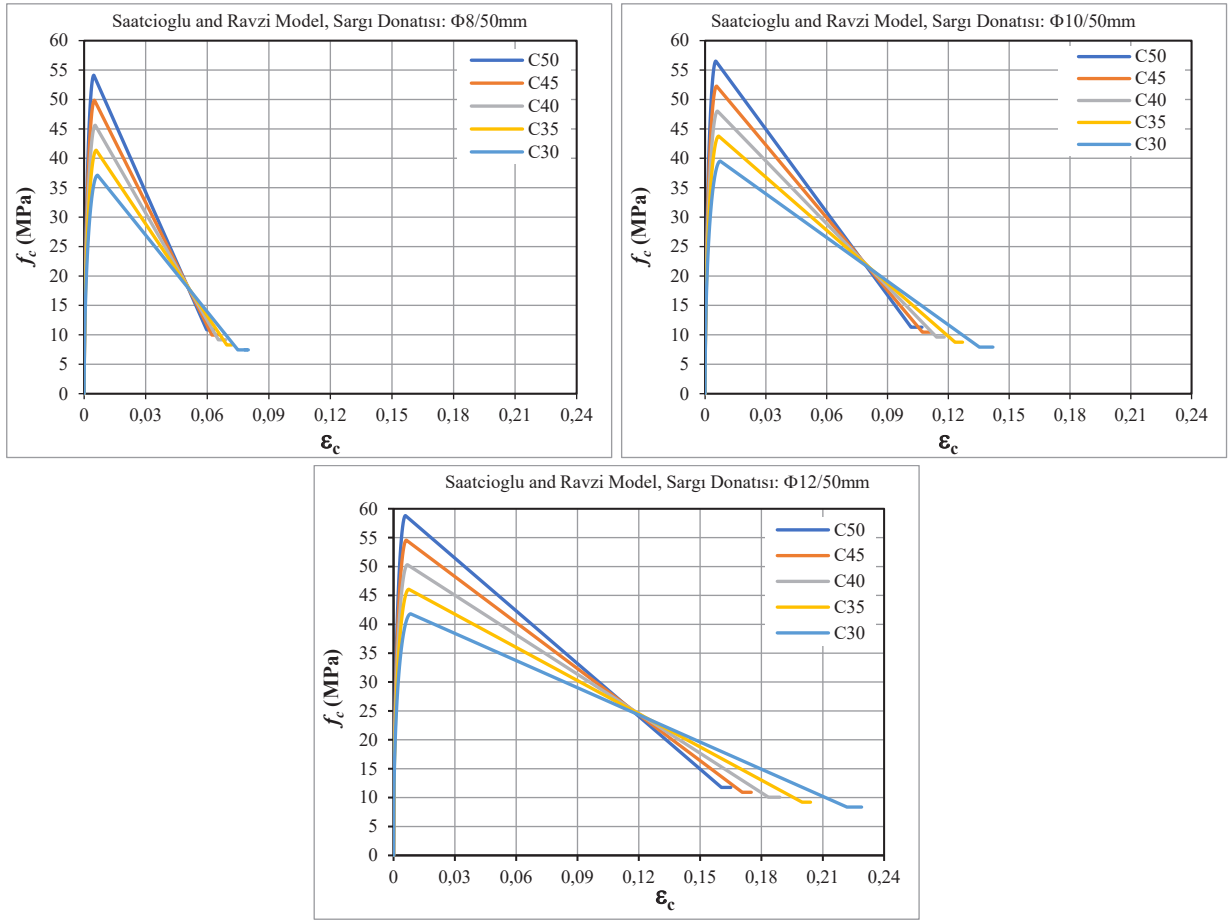
a) Farklı sargı donatısı çapı ve aralığı (boyuna donatı: $\Phi 22$ mm, C30)

No	Sargı donatısı (mm)	β	σ_{2e} (MPa)	f_{cc} (MPa)	ϵ_{coc}	ϵ_{c20}
C1	$\Phi 8/50$	0.506	1.94	37.1	0.0066	0.0749
C2	$\Phi 8/75$		1.29	33.8	0.0053	0.0419
C3	$\Phi 8/100$		0.97	32.0	0.0046	0.0294
C4	$\Phi 8/125$		0.78	30.9	0.0041	0.0233
C5	$\Phi 8/150$		0.65	30.2	0.0038	0.0198
C6	$\Phi 8/175$		0.55	29.6	0.0036	0.0177
C7	$\Phi 8/200$		0.49	29.2	0.0034	0.0163
C8	$\Phi 10/50$	0.408	2.43	39.5	0.0075	0.1353
C9	$\Phi 10/75$		1.62	35.5	0.0059	0.0723
C10	$\Phi 10/100$		1.22	33.4	0.0051	0.0483
C11	$\Phi 10/125$		0.97	32.1	0.0046	0.0364
C12	$\Phi 10/150$		0.81	31.1	0.0042	0.0296
C13	$\Phi 10/175$		0.70	30.5	0.0039	0.0254
C14	$\Phi 10/200$		0.61	29.9	0.0037	0.0225
C15	$\Phi 12/50$	0.340	2.92	41.8	0.0084	0.2218
C16	$\Phi 12/75$		1.95	37.1	0.0066	0.1159
C17	$\Phi 12/100$		1.46	34.7	0.0056	0.0753
C18	$\Phi 12/125$		1.17	33.1	0.0050	0.0552
C19	$\Phi 12/150$		0.97	32.1	0.0046	0.0436
C20	$\Phi 12/175$		0.83	31.3	0.0043	0.0363
C21	$\Phi 12/200$		0.73	30.7	0.0040	0.0313

b) Farklı beton sınıfı (boyuna donatı: $\Phi 22$ mm)

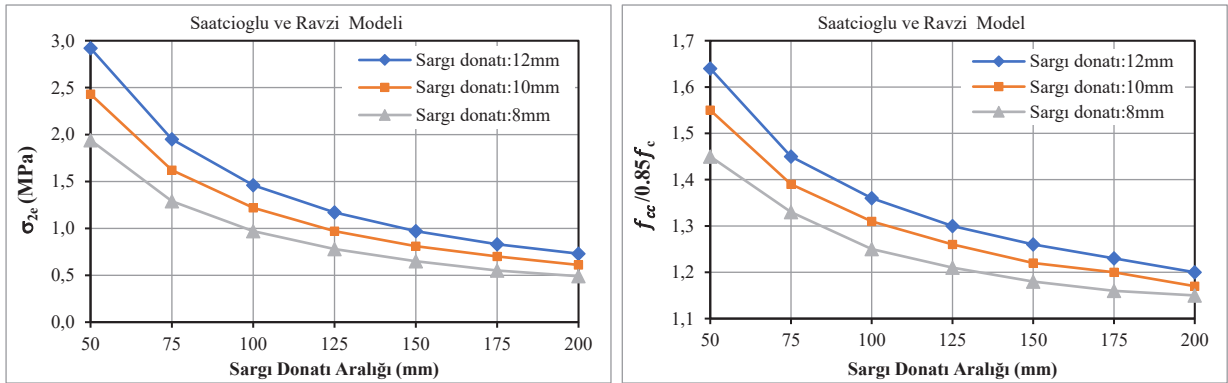
No	Sargı donatısı (mm)	Malzeme	β	σ_{2e} (MPa)	f_{cc} (MPa)	ϵ_{coc}	ϵ_{c20}
C1	$\Phi 8/50$	C30	0.506	1.94	37.1	0.0066	0.0749
		C35			41.4	0.0059	0.0695
		C40			45.6	0.0054	0.0654
		C45			49.9	0.0050	0.0623
		C50			54.1	0.0047	0.0597
C8	$\Phi 10/50$	C30	0.408	2.43	39.5	0.0075	0.1353
		C35			43.8	0.0067	0.1233
		C40			48.0	0.0061	0.1142
		C45			52.3	0.0057	0.1072
		C50			56.5	0.0053	0.1016
C15	$\Phi 12/50$	C30	0.340	2.92	41.8	0.0084	0.2218
		C35			46.1	0.0075	0.1999
		C40			50.3	0.0068	0.1834
		C45			54.6	0.0063	0.1706
		C50			58.8	0.0058	0.1604

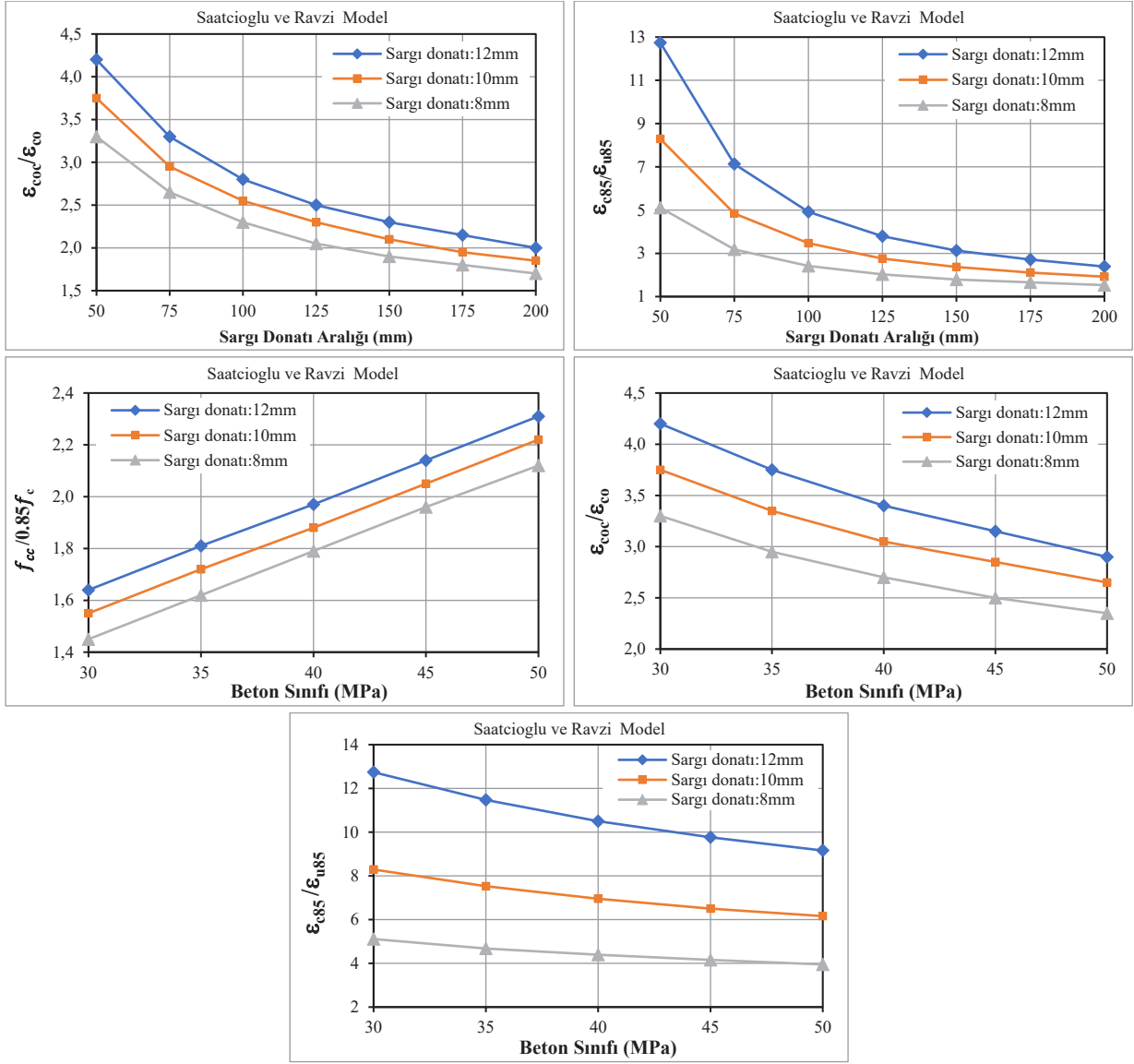

 a) Farklı sargı donatısı oranı (boyuna donatı: $\Phi 22$ mm)



b) Farklı beton basınç dayanımı (boyuna donatı: $\Phi 22$ mm)

Şekil 2.6. Saatçioğlu ve Ravzi modeline göre 400 mm \times 400 mm enkesitli kolon modellerinin gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri





Şekil 2.7. Saatçioglu ve Ravzi modeline göre 400 mm × 400 mm enkesitli kolon modellerinin gerilme ve şekildeğiştirme değerlerinin karşılaştırmalı ilişkileri

Sargı donatısı çapı ve aralığının etkisi:

Farklı sargı donatısı çapı ve aralıklarının dikkate alındığı analiz sonuçları, sargı aralığı arttıkça eşdeğer yanal sargı gerilmesinin (σ_{2e}) ve buna bağlı olarak sargılı beton basınç dayanımının (f_{cc}) düzenli biçimde azaldığını göstermektedir. $\Phi 8$ mm, $\Phi 10$ mm ve $\Phi 12$ mm donatı gruplarının tümünde, 50 mm sargı aralığına sahip modeller en yüksek σ_{2e} ve f_{cc} değerlerini üretirken, 200 mm aralıkta bu değerlerin belirgin biçimde düştüğü görülmektedir.

Sargı etkinlik katsayısının (β) azalması, çekirdek betonun üç eksenli gerilme durumunu zayıflatmakta ve sargının sağladığı ilave dayanım katkısını sınırlamaktadır. Buna paralel olarak, karakteristik birim şekildeğiştirme değerleri olan ϵ_{coc} ve özellikle post-pik davranışı temsil eden ϵ_{c20} değerlerinde de azalma meydana gelmektedir.

Sabit sargı donatısı aralığında sargı donatısı çapının artırılması ise olumlu yönde bir etki oluşturmaktadır. Sargı donatısının kesit alanındaki artışı, daha yüksek σ_{2e} değerlerinin elde edilmesini sağlamakta ve özellikle $\Phi 12/50$ mm düzenlemesinde hem dayanım hem de deformasyon kapasitesi belirgin biçimde yükselmektedir.

Şekil 2.6-a'da sunulan $400 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$ enkesitli kolon modellerine ait gerilme-şekildeğiştirme eğrileri, bu bulguları doğrulamaktadır. Sargı oranının artmasıyla birlikte σ_{2e} ve buna bağlı olarak f_{cc} değerlerinin yükseldiği; eğrilerin pik sonrası bölgede daha yatay bir azalma eğilimi sergilediği görülmektedir.

Beton basınç dayanımının etkisi:

Sabit sargı donatısı düzenlemeleri altında farklı beton sınıflarının incelendiği analizlerde, beton basınç dayanımı arttıkça f_{cc} doğrusal bir artış eğilimi gösterdiği belirlenmiştir. C30'dan C50'ye geçişte tüm sargı donatısı gruplarında f_{cc} değerlerinin sistematik biçimde yükseldiği görülmektedir. Bununla birlikte, beton dayanımındaki artış ile ε_{coc} ve ε_{c20} değerlerinde azalma gerçekleşmektedir.

Şekil 2.6-b'de yer alan gerilme-şekildeğiştirme eğrileri, beton basınç dayanımının artmasıyla maksimum basınç gerilmesinin yükseldiğini; buna karşılık maksimum gerilmeye karşılık gelen birim şekildeğiştirme değerlerinin azaldığını ortaya koymaktadır. Eğrilerin post-pik bölgede daha dik bir düşüş sergilemesi, yüksek dayanımlı betonlarda gevreklik eğiliminin arttığını göstermektedir. Bununla birlikte, Saatçioğlu ve Ravzi (1992) modelinin sargı etkisini dikkate alan yaklaşımı sayesinde, yüksek dayanımlı betonlarda dahi pik sonrası ani dayanım kaybının sınırlandırıldığı ve belirli bir deformasyon kapasitesinin sürdürülebildiği görülmektedir.

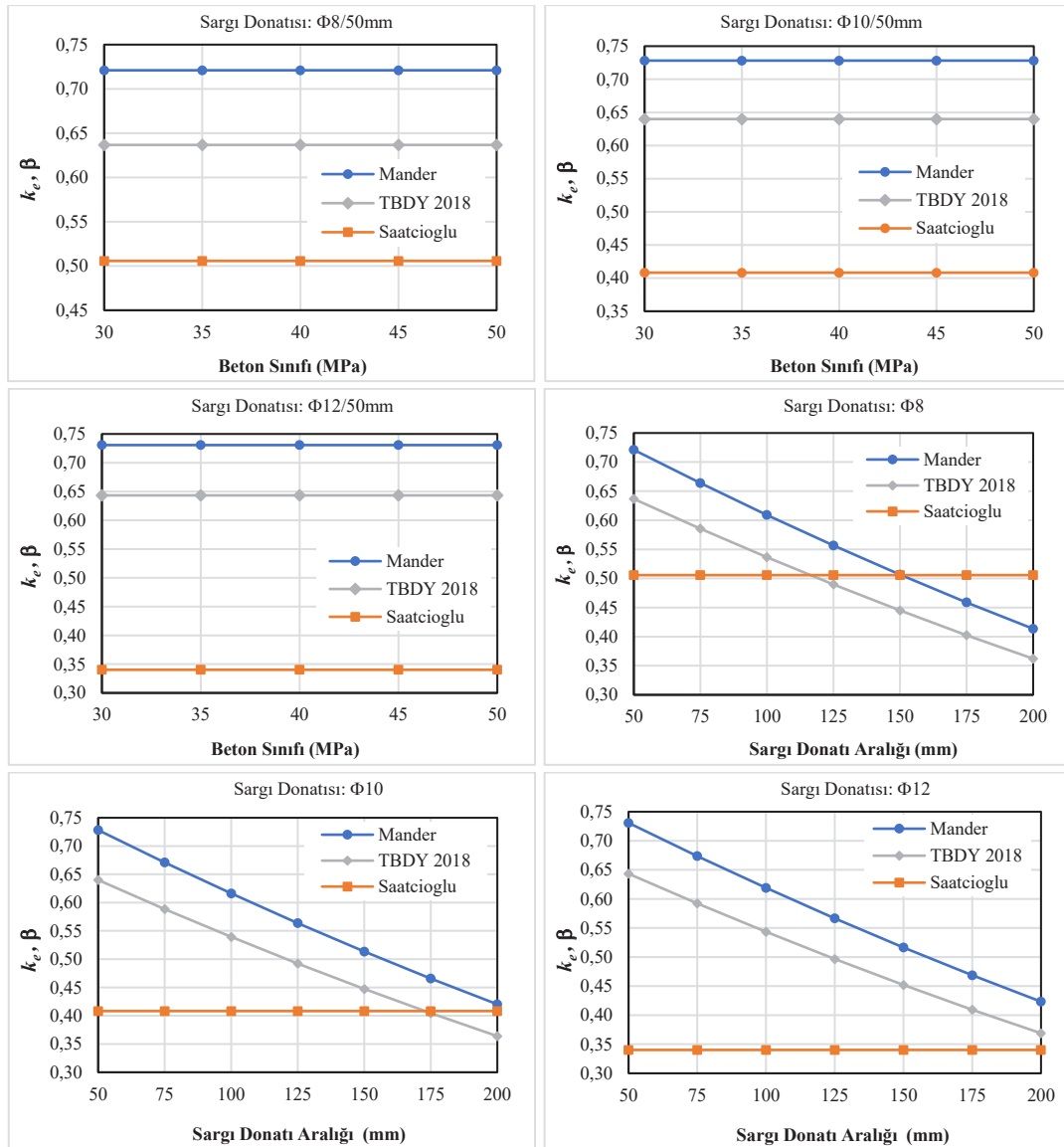
Gerilme ve birim şekildeğiştirme parametrelerinin karşılaştırmalı incelenmesi:

Şekil 2.7'de, Saatçioğlu ve Ravzi (1992) modeline göre hesaplanan eşdeğer yanal sargı gerilmesi (σ_{2e}), sargılı beton dayanım oranı ($f_{cc}/0.85f_c$), ε_{coc} ve ε_{c20} gibi karakteristik parametrelerin, sargı donatısı aralığı ve beton sınıfına bağlı değişimleri oran bazında sunulmuştur. Grafikler, sargı donatısı aralığının artmasıyla birlikte σ_{2e} ve f_{cc} oranlarında düzenli bir azalma meydana geldiğini göstermektedir. Buna paralel olarak, ε_{coc} ve özellikle ε_{c20} değerlerinin belirgin biçimde düşmesi, düşük sargı oranlarının betonun maksimum dayanım sonrası deformasyon kapasitesi ciddi ölçüde sınırladığını ortaya koymaktadır. Bu sonuç, Saatçioğlu ve Ravzi modelinin süneklik değerlendirmesinde ε_{c20} parametresine verdiği önemin sayısal karşılığını açık biçimde doğrulamaktadır.

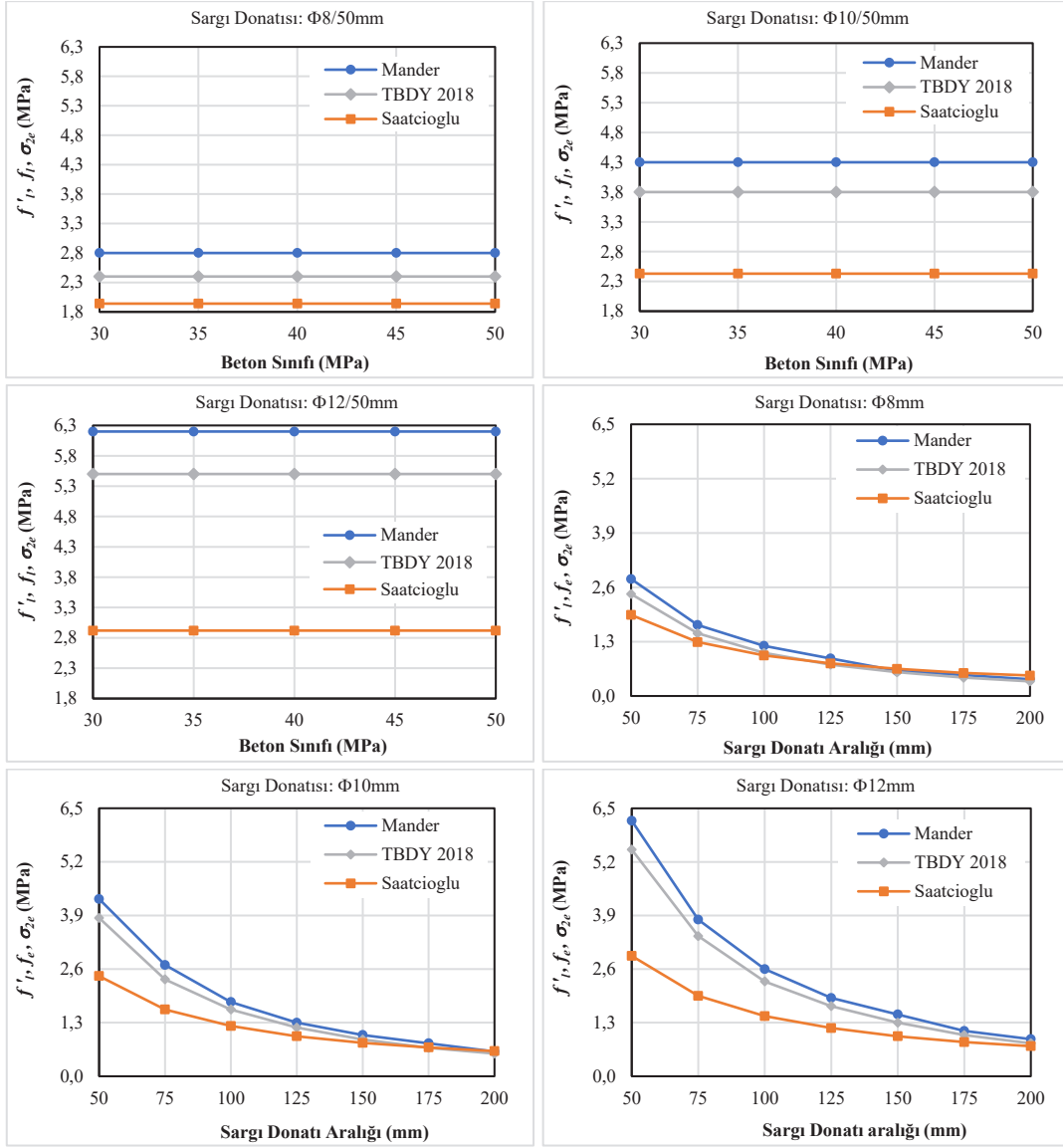
Beton basınç dayanımının artışı ise $f_{cc}/0.85f_c$ oranını yükseltirken, ε_{coc} ve ε_{c20} değerlerinde azalmaya neden olmaktadır. Bu durum, beton dayanımı ile deformasyon kapasitesi arasında ters yönlü bir ilişkinin bulunduğunu ve bu ilişkinin ancak etkin bir sargı düzenlemesi ile dengelenebileceğini göstermektedir. Özellikle büyük çaplı sargı donatısı kullanılan modellerde, beton sınıfı artsa dahi ε_{c20} değerlerinin görece yüksek seviyelerde kaldığı görülmekte; bu bulgu, sargının süneklik üzerindeki belirleyici rolünü bir kez daha vurgulamaktadır.

TBDY (2018), Mander ve ark. (1988) ile Saatçioğlu ve Razvi (1992) Sargılı Beton Modeli:

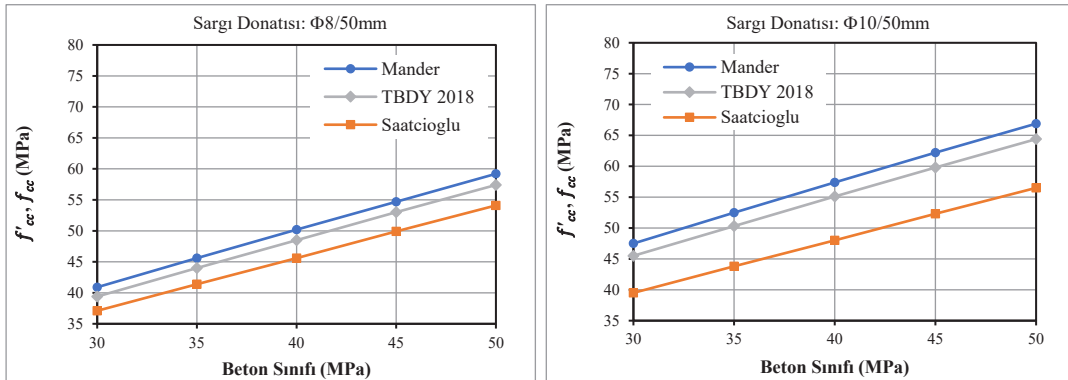
TBDY (2018), Mander ve ark. (1988) ile Saatçioğlu ve Razvi (1992) tarafından önerilen sargılı beton modellerinin gerilme-şekildeğiştirme davranışlarını karşılaştırmalı olarak değerlendirmek amacıyla sayısal analizler gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, 400 mm × 400 mm enkesit boyutuna sahip betonarme kolon modelleri ele alınmış; farklı beton sınıfları, sargı donatısı çapları ve sargı donatısı aralıkları için sargılı beton basınç dayanımları ile karakteristik birim şekildeğiştirme değerleri hesaplanmıştır. Hesaplanan bu parametreler esas alınarak her bir model için gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri oluşturulmuş; elde edilen sonuçlar, farklı tasarım parametrelerinin ve model yaklaşımlarının sargılı beton davranışı üzerindeki etkilerini ortaya koyacak biçimde grafikler halinde özetlenerek karşılaştırılmıştır (Şekil 2.8).

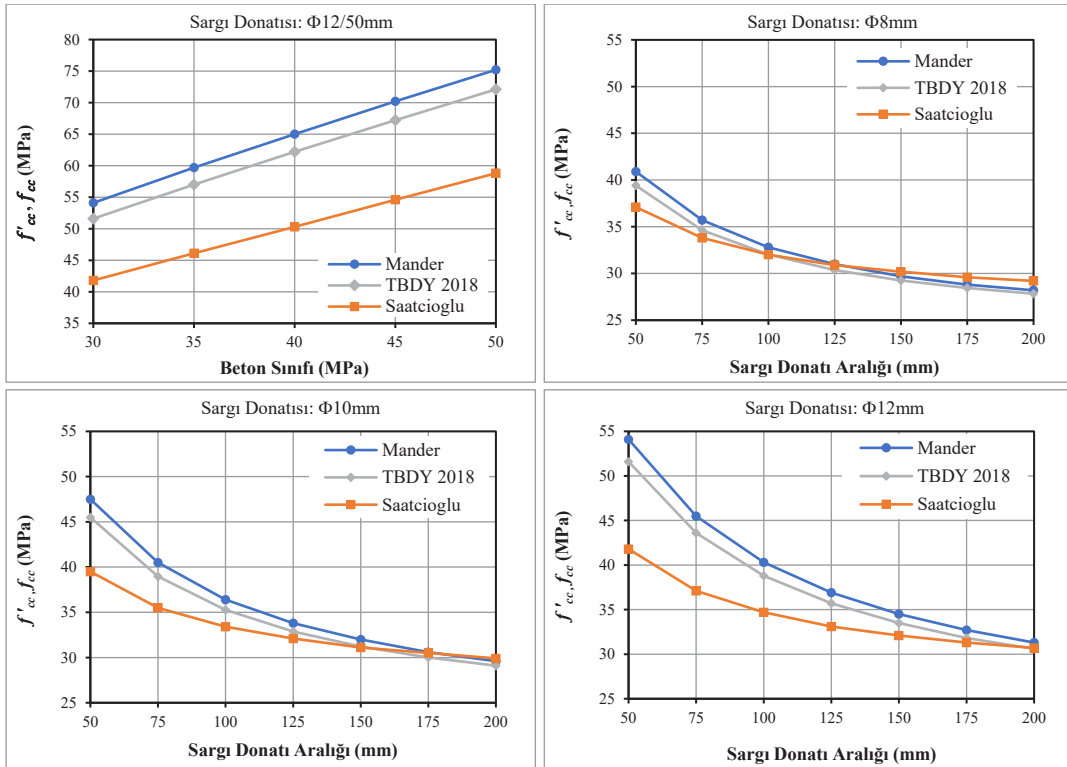


a) Sargı etkinlik katsayı değerleri

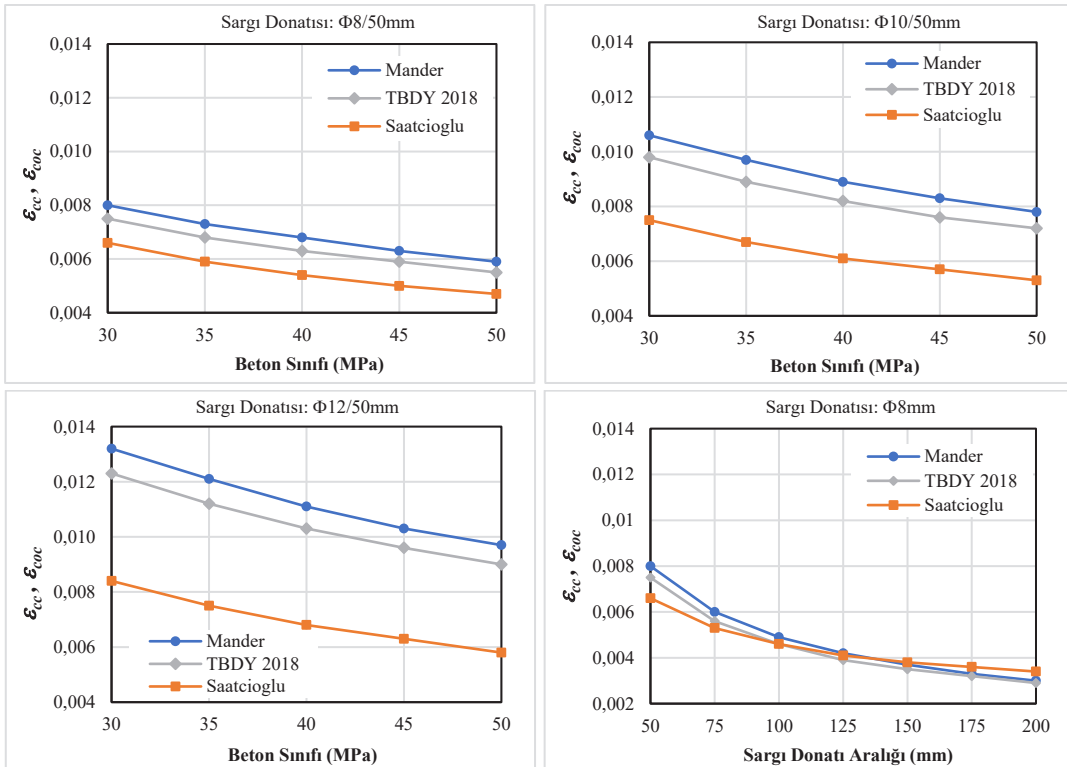


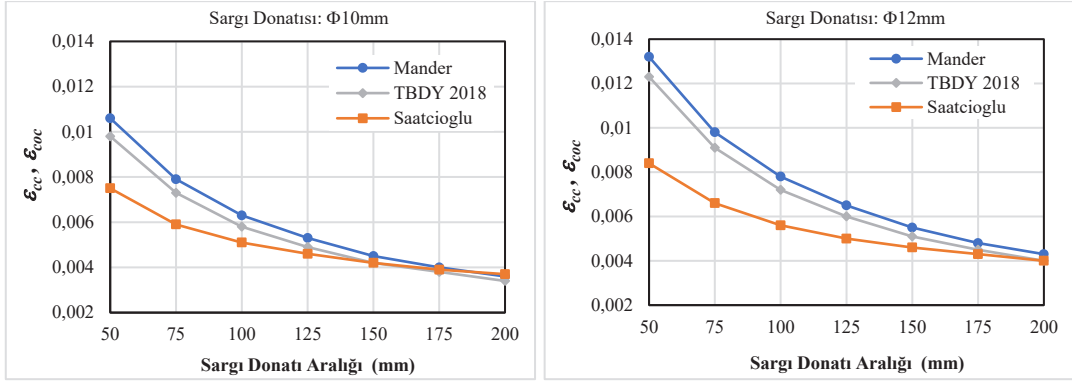
b) Etkili yanıl basınç kuvvet değeri



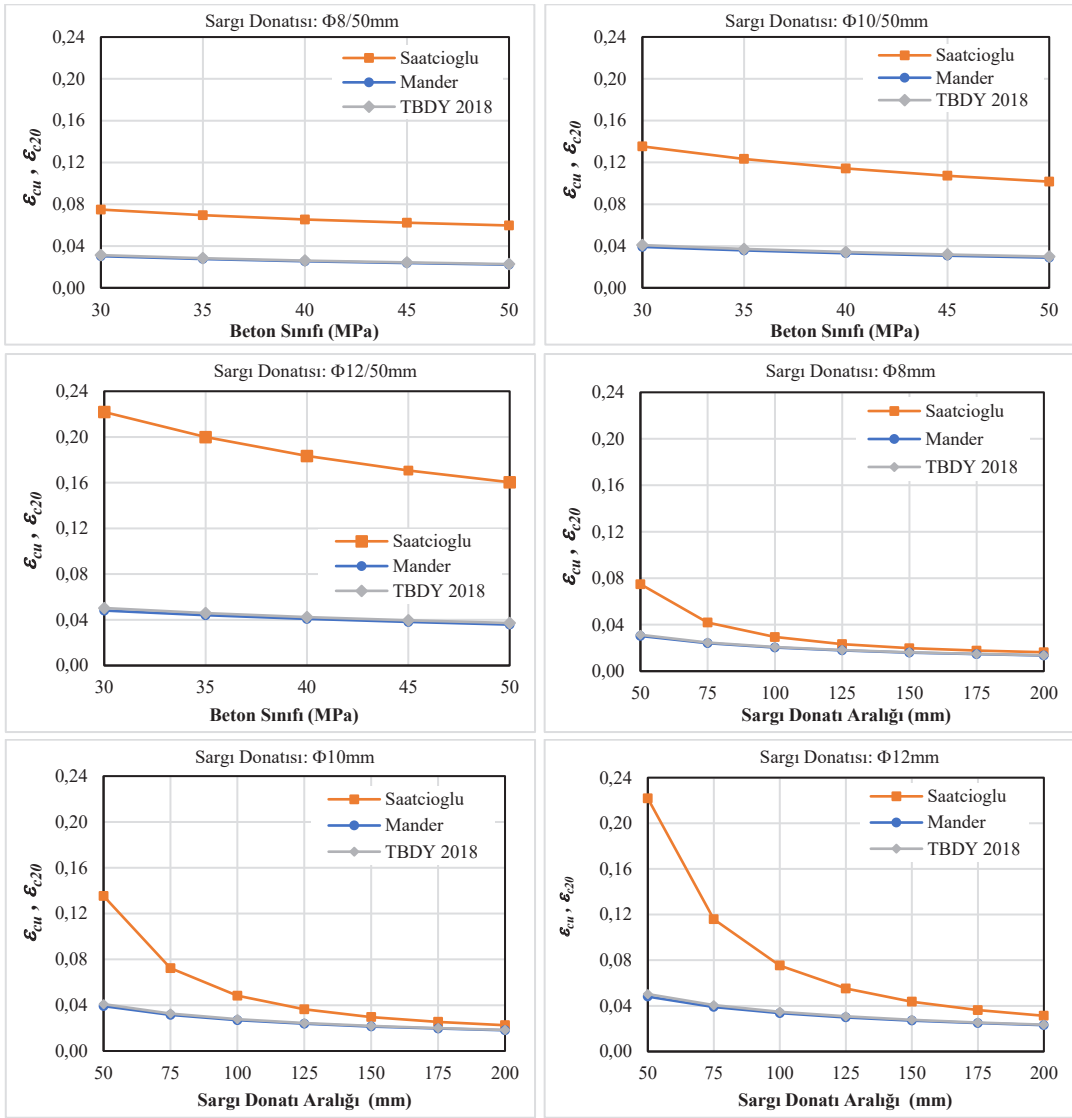


c) Sargılı beton basınç dayanımları





d) Sargılı beton basınç dayanımına karşı gelen birim şekildeğiştirme değerleri



e) Sargılı betonda hesaplanan maksimum basınç birim şekildeğiştirme değerleri

Şekil 2.8. Farklı sargılı beton modellere göre 400 mm × 400 mm enkesitli kolonlar için elde edilen hesap sonuçlarının karşılaştırılması

Sargı etkinlik katsayısının değerlendirilmesi (k_e , β):

Analiz sonuçları, sargı etkinlik katsayılarının beton dayanımının artmasıyla birlikte genel olarak azalma eğilimi gösterdiğini ortaya koymaktadır. Bu eğilim, yüksek dayanımlı betonların daha gevrek bir davranış sergilemesi ve sargı donatısının çekirdek beton üzerindeki görece kısıtlama etkisinin zayıflaması ile ilişkilendirilebilir. Buna karşılık, düşük beton sınıflarında (C30-C35) sargı donatısının çevreleyici etkisi daha belirgin olup, etkinlik katsayılarının daha yüksek değerlere ulaştığı görülmektedir.

Sargı donatısı çapının $\Phi 8$ mm'den $\Phi 12$ mm'ye yükseltilmesi, sabit donatı aralığı koşullarında k_e ve β değerlerinde artışa neden olmakta; bu durum, yanal kısıtlamanın daha etkin hale geldiğini göstermektedir. Ancak model bazında yapılan karşılaştırmalar, söz konusu artışın büyüklüğünün kullanılan analitik yaklaşıma bağlı olarak değiştiğini ortaya koymaktadır. Bu bağlamda, Mander modeli genellikle daha yüksek etkinlik katsayıları öngörürken, Saatçioğlu ve Ravzi yaklaşımı daha düşük düzeyde sargı katkısı öngören ve güvenli tarafta kalan tahminler sunmaktadır; TBDY (2018) sonuçları ise bu iki yaklaşım arasında konumlanarak yönetmelik temelli güvenlik anlayışını yansıtmaktadır.

Beton sınıfı ve sargı donatısı aralığındaki değişimlerin sargı etkinliği üzerindeki görece etkilerini açık biçimde ortaya koymaktadır. Sabit sargı donatısı aralığında (50 mm), beton dayanımının 30-50 MPa aralığında değişmesi, tüm modellerde k_e ve β değerlerinde sınırlı bir farklılaşmaya yol açmaktadır. Bu durum, sargı etkinliğinin belirleyici unsurunun beton dayanımından ziyade sargı donatısının geometrik düzenlemesi olduğunu göstermektedir. Aynı koşullar altında Mander modelinin sistematik olarak en yüksek katsayıları verdiği, TBDY (2018)'in orta seviyede kaldığı ve Saatçioğlu ve Ravzi modelinin ise güvenlik tarafında kalan, görece düşük katsayılar öngördüğü belirlenmiştir.

Buna karşılık, sargı donatısı aralığının 50 mm'den 200 mm'ye çıkarılması, tüm model yaklaşımlarında sargı etkinliğinde belirgin bir azalmaya neden olmaktadır. Donatı aralığının artması, çekirdek betonunun çevresel basınç altında tutulma derecesini azaltmakta ve bu durum etkin sargı katsayılarının hızla düşmesine yol açmaktadır. Bu azalma eğilimi, Mander ve TBDY (2018) modellerinde yaklaşık doğrusal bir karakter sergilerken; Saatçioğlu ve Ravzi modelinde katsayıların görece daha sabit kalması, söz konusu yaklaşımın etriye aralığı değişimine karşı daha sınırlı bir duyarlılık içerdiğini göstermektedir.

Etkili yanal basınç gerilmeleri (f'_l , σ_{2e}):

Etkili yanal basınç gerilmeleri incelendiğinde, beton dayanımı arttıkça f'_l değerlerinin de arttığı, ancak bu artışın doğrusal olmadığı görülmektedir. Bu durum, sargı donatısının beton çekirdeği üzerindeki sargı etkisinin, beton dayanımıyla birlikte belirli bir sınırdan sonra marjinal fayda üretmesine bağlanabilir.

Sargı aralığının 50 mm'den 200 mm'ye çıkarılması, tüm modellerde yanal basınç gerilmelerinin belirgin biçimde azalmasına neden olmaktadır. Bu sonuç, sık sargı donatısı düzenlemenin sargı etkinliğini artırdığına ilişkin literatür bulgularını doğrulamaktadır. Özellikle geniş sargı aralıklarında Saatçioğlu ve Ravzi modelinin daha düşük yanal basınç değerleri vermesi, modelin sünek davranışın aşırı tahmin edilmesini önlemeye yönelik yapısını ortaya koymaktadır.

Sargılı beton basınç dayanımı (f'_{cc}):

Sargılı beton basınç dayanımı sonuçları, sargı donatısının betonun basınç dayanımını anlamlı düzeyde artırdığını açıkça göstermektedir. Bu artış, düşük beton sınıflarında daha belirgin olup, yüksek beton sınıflarında görece olarak azalmaktadır. Başka bir ifadeyle, sargı etkisi dayanım artırıcıdan çok süneklik artırıcı bir rol üstlenmektedir.

Model karşılaştırmaları, Mander yaklaşımının f'_{cc} değerlerini daha yüksek tahmin ettiğini, TBDY (2018) ile Saatçioğlu ve Ravzi yaklaşımının ise daha düşük ve güvenlik tarafında kalan f'_{cc} değerleri verdiği belirlenmiştir. Bu durum, özellikle tasarım güvenliği açısından TBDY (2018)'in güvenlik tarafında kaldığını göstermektedir. Sargı donatısı aralığının büyümesiyle birlikte f'_{cc} değerlerinde hızlı bir düşüş meydana gelmekte, 200 mm aralığında sargı etkisinin oldukça sınırlı kaldığı görülmektedir.

Sargılı beton basınç dayanımına karşılık gelen birim şekildeğiştirme (ϵ_{cc}):

Sargılı betonun basınç dayanımına karşılık gelen birim şekildeğiştirme değerleri (ϵ_{cc}), sargı donatısının geometrik özelliklerine duyarlı bir davranış sergilemektedir. Analiz sonuçları, sargı donatısı çapının artırılması ve sargı donatısı aralığının azaltılması durumunda ϵ_{cc} değerlerinin belirgin biçimde yükseldiğini göstermektedir. Bu bulgu, sargı donatısının çekirdek beton üzerindeki sargı etkisini artırarak enerji yutma kapasitesini geliştirdiğini ve sünek davranışı desteklediğini ortaya koymaktadır. Beton dayanımının artmasıyla birlikte ϵ_{cc} değerlerinde yalnızca sınırlı bir artış veya bazı durumlarda azalma eğiliminin gözlenmesi, yüksek dayanımlı betonların daha gevrek bir davranış sergilemesiyle ilişkilendirilebilir.

Sabit 50 mm sargı donatısı aralığında yapılan değerlendirmelerde, beton sınıfı yükseldikçe ϵ_{cc} değerlerinin kademeli olarak azaldığı belirlenmiştir. Buna karşılık, aynı beton sınıfında sargı donatısı çapının büyütülmesi ve sargı düzenlemesinin yoğunlaştırılması, ϵ_{cc} değerlerinde artışa yol açmaktadır.

Sargı donatısı aralığının artırılması durumunda ise ϵ_{cc} değerlerinde hızlı ve belirgin bir düşüş gözlenmektedir. Özellikle 150 mm - 200 mm aralığında, sargı donatısının betonun deformasyon kapasitesine katkısının oldukça sınırlı kaldığı görülmektedir. Model karşılaştırmaları incelendiğinde, Mander yaklaşımının en yüksek ϵ_{cc} değerlerini öngördüğü, TBDY (2018)'in bu değerlere yakın sonuçlar sunduğu ve Saatçioğlu ve Ravzi modelinin ise daha düşük deformasyon kapasiteleri tahmin ederek güvenli tarafta kalan ve sınırlayıcı nitelikte bir yaklaşım benimsediği görülmektedir.

Maksimum basınç birim şekildeğiştirmeleri (ϵ_{cu}):

Betondaki en büyük birim şekildeğiştirme değeri (ϵ_{cu}), sargılı betonun süneklik kapasitesini tanımlayan en kritik parametrelerden biridir. Analiz sonuçları, sargı donatısı aralığının artmasıyla birlikte ϵ_{cu} değerlerinin tüm modellerde sistematik olarak azaldığını göstermektedir. Özellikle 50 mm - 75 mm sargı donatısı aralığında elde edilen yüksek ϵ_{cu} değerleri, kolonların belirgin bir süneklik kapasitesine sahip olduğunu ortaya koyarken; 150 mm- 200 mm aralığında bu kapasitenin önemli ölçüde azaldığı görülmektedir.

Model bazında yapılan karşılaştırmalar, maksimum birim şekildeğiştirme tahminlerinde belirgin farklılıklar bulunduğunu göstermektedir. Bu kapsamda, Mander modelinin ϵ_{cu} değerlerini genel olarak en yüksek düzeyde öngördüğü, Saatçioğlu ve Ravzi modelinin ise daha sınırlı deformasyon kapasiteleri sunduğu belirlenmiştir. TBDY (2018) yaklaşımı ise söz konusu iki model arasında konumlanarak, süneklik taleplerini güvenli tarafta karşılamaya yönelik dengeli bir çerçeve sunmaktadır.

Beton sınıfı ve sargı donatısı düzenlemesinin nihai deformasyon kapasitesi üzerindeki etkilerini açık biçimde ortaya koymaktadır. Sabit 50 mm sargı donatısı aralığında beton dayanımının artmasıyla birlikte ϵ_{cu} değerlerinin tüm modellerde azalma eğilimi göstermesi, yüksek dayanımlı betonların daha düşük nihai şekildeğiştirme kapasitesine sahip olduğunu teyit etmektedir. Model sonuçları arasındaki farklılıklar dikkate alındığında, Saatçioğlu ve Ravzi modelinin ϵ_{cu} tahminlerinin Mander ve TBDY (2018) yaklaşımlarına kıyasla bazı durumlarda görece daha yüksek değerler sunduğu görülmektedir. Bu durum, ilgili modelin nihai deformasyon kapasitesini daha yüksek düzeyde öngördüğünü ve dolayısıyla süneklik potansiyelini görece artırılmış biçimde temsil ettiğini göstermektedir.

2.1.2. 500mm×500mm kare enkesitli kolonun gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi

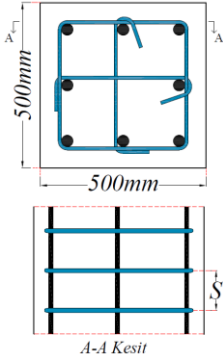
Bu bölümde, kare enkesitli betonarme kolonların doğrusal olmayan davranış özelliklerinin ayrıntılı biçimde incelenebilmesi amacıyla, enkesit boyutları 500 mm × 500 mm olan kolon modelleri ele alınmıştır. Tablo 2.5'te geometrik özellikleri ve donatı detayları sunulan bu kolonlar için, sargılı beton davranışının tanımlanmasında TBDY (2018), Mander ve ark. (1988) ile Saatçioğlu ve Razvi (1992) tarafından önerilen sargılı beton modelleri esas alınarak betonun gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri elde edilmiştir. Tasarlanan kolon modellerinde, sargı donatısının çekirdek beton üzerindeki etkin yanal basınç etkisini bütüncül olarak değerlendirebilmek amacıyla farklı donatı geometrileri ve aralık düzenlemeleri dikkate alınmıştır. Bu doğrultuda, üç farklı sargı donatısı çapı ($\Phi 8$ mm, $\Phi 10$ mm ve $\Phi 12$ mm), üç farklı sargı donatısı aralığı (50 mm, 75 mm ve 100 mm) ile on bir farklı boyuna donatı çapı ($\Phi 20$ mm- $\Phi 40$ mm) kullanılmıştır. Tüm modellerde beton sınıfı C30 olarak seçilerek, değişkenlerin davranış üzerindeki etkilerinin karşılaştırılabilir olması sağlanmıştır.

Önerilen sargılı beton modelleri esas alınarak gerçekleştirilen hesaplamalar sonucunda, her bir kolon modeli için sargı etkinlik katsayıları, sargı donatısı tarafından çekirdek betonuna uygulanan etkin yanal basınç değerleri, sargılı betonun basınç gerilmeleri ile buna karşılık gelen birim şekildeğiştirme değerleri belirlenmiştir. Bu parametreler, sargı donatısı düzenlemesinin betonun dayanım ve şekildeğiştirme kapasitesi üzerindeki etkilerini nicel olarak ortaya koymakta ve kolonların süneklik potansiyelinin değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır.

TBDY (2018) Sargılı Beton Modeli:

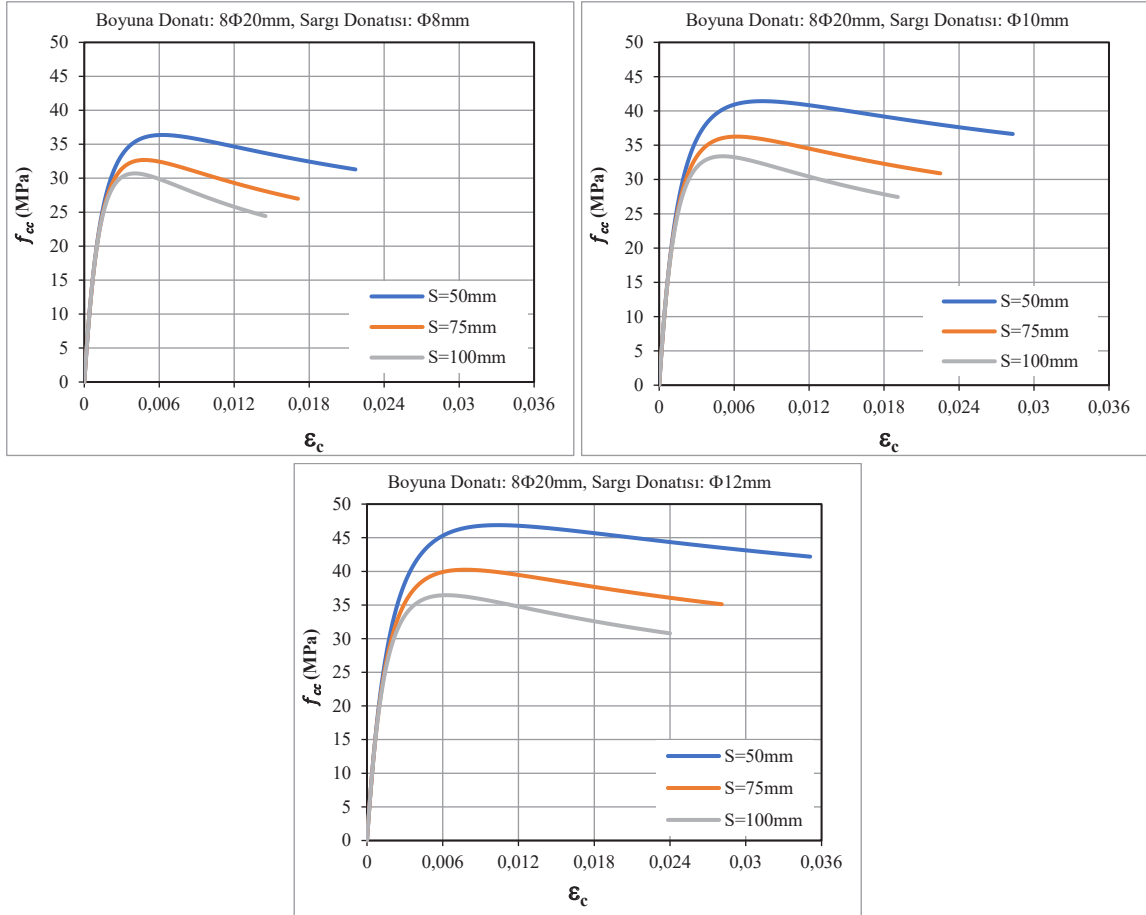
TBDY (2018) esaslarına göre analiz edilen 500×500 mm kare kesitli betonarme kolonlara ilişkin sonuçlar Tablo 2.6'da sunulmuştur (Yüksel ve Foroughi, 2019). Farklı sargı ve boyuna donatı düzenlemelerine ait beton gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri ise Şekil 2.9'da karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Elde edilen bulgular, sargı donatısı çapı ve aralığındaki değişimlerin betonun basınç dayanımı ve nihai şekildeğiştirme kapasitesi üzerinde belirgin etkiler oluşturduğunu göstermektedir. Bu sonuçlar, sargı donatısı detaylandırmasının kolonların doğrusal olmayan davranışı ve süneklik performansı üzerindeki kritik rolünü ortaya koymaktadır.

Tablo 2.5. 500 mm × 500 mm kare enkesitli betonarme kolon modellerinin kesit bilgileri ve detayları

Kolon Kesit Geometrisi	Boyuna Donatı (mm)	Sargı Donatısı	
		Çap (mm)	Aralık(mm)
	$\Phi 20$ mm	$\Phi 8$ mm $\Phi 10$ mm $\Phi 12$ mm	50 mm 75 mm 100 mm
	$\Phi 22$ mm		
	$\Phi 24$ mm		
	$\Phi 26$ mm		
	$\Phi 28$ mm		
	$\Phi 30$ mm		
	$\Phi 32$ mm		
	$\Phi 34$ mm		
	$\Phi 36$ mm		
	$\Phi 38$ mm		
	$\Phi 40$ mm		

Tablo 2.6. TBDY (2018)'e göre 500 mm × 500 mm kare enkesitli kolon modellerinin hesap sonuçları

Boyuna Donatı (mm)	Sargı donatısı (mm)	k_e	f_e (MPa)	f_{cc} (MPa)	ϵ_{cc}	ϵ_{cu}
8Φ20 mm	Φ8/50	0.64	1.8	36.4	0.0063	0.0217
	Φ8/75	0.60	1.1	32.7	0.0048	0.0171
	Φ8/100	0.56	0.8	30.7	0.0040	0.0145
	Φ10/50	0.64	2.9	41.4	0.0082	0.0283
	Φ10/75	0.60	1.8	36.3	0.0062	0.0225
	Φ10/100	0.57	1.3	33.4	0.0051	0.0191
	Φ12/50	0.64	4.2	46.9	0.0104	0.0351
	Φ12/75	0.60	2.6	40.2	0.0078	0.0281
	Φ12/100	0.57	1.8	36.5	0.0063	0.0240

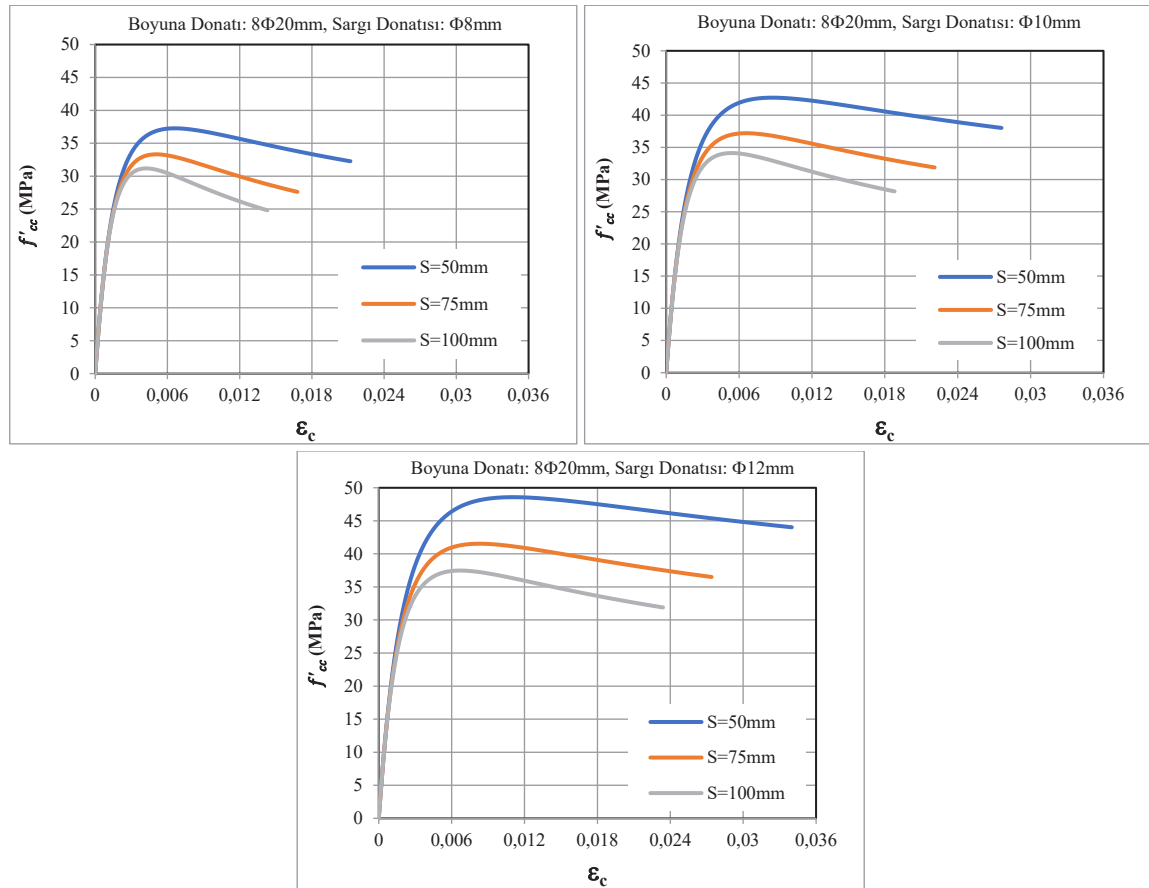
**Şekil 2.9.** TBDY (2018)'e göre 500 mm × 500 mm enkesitli kolonların gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri

Mander Sargılı Beton Modeli:

Mander sargılı beton modeli esas alınarak analiz edilen 500mm × 500mm kare enkesitli betonarme kolonlara ait hesap sonuçları Tablo 2.7’de sunulmuştur. Farklı parametrelere göre elde edilen gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri karşılaştırmalı olarak Şekil 2.10’da verilmiştir.

Tablo 2.7. Mander modeline göre 500 mm × 500 mm kare enkesitli kolon modellerinin hesap sonuçları

Boyuna Donatı (mm)	Sargı donatısı (mm)	k_e	f_{lt} (MPa)	f'_{lt} (MPa)	f'_{cc} (MPa)	ϵ_{cc}	ϵ_{cu}
8Φ20 mm	Φ8/50 mm	0.70	2.9	2.0	37.3	0.0066	0.0212
	Φ8/75 mm	0.66	1.9	1.3	33.3	0.0051	0.0168
	Φ8/100 mm	0.62	1.4	0.9	31.2	0.0042	0.0143
	Φ10/50 mm	0.71	4.5	3.2	42.7	0.0088	0.0276
	Φ10/75 mm	0.66	3.0	2.0	37.2	0.0066	0.0221
	Φ10/100 mm	0.62	2.3	1.4	34.1	0.0054	0.0188
	Φ12/50 mm	0.71	6.5	4.6	48.6	0.0110	0.0340
	Φ12/75 mm	0.67	4.3	2.9	41.5	0.0083	0.0274
	Φ12/100 mm	0.63	3.3	2.1	37.5	0.0067	0.0234



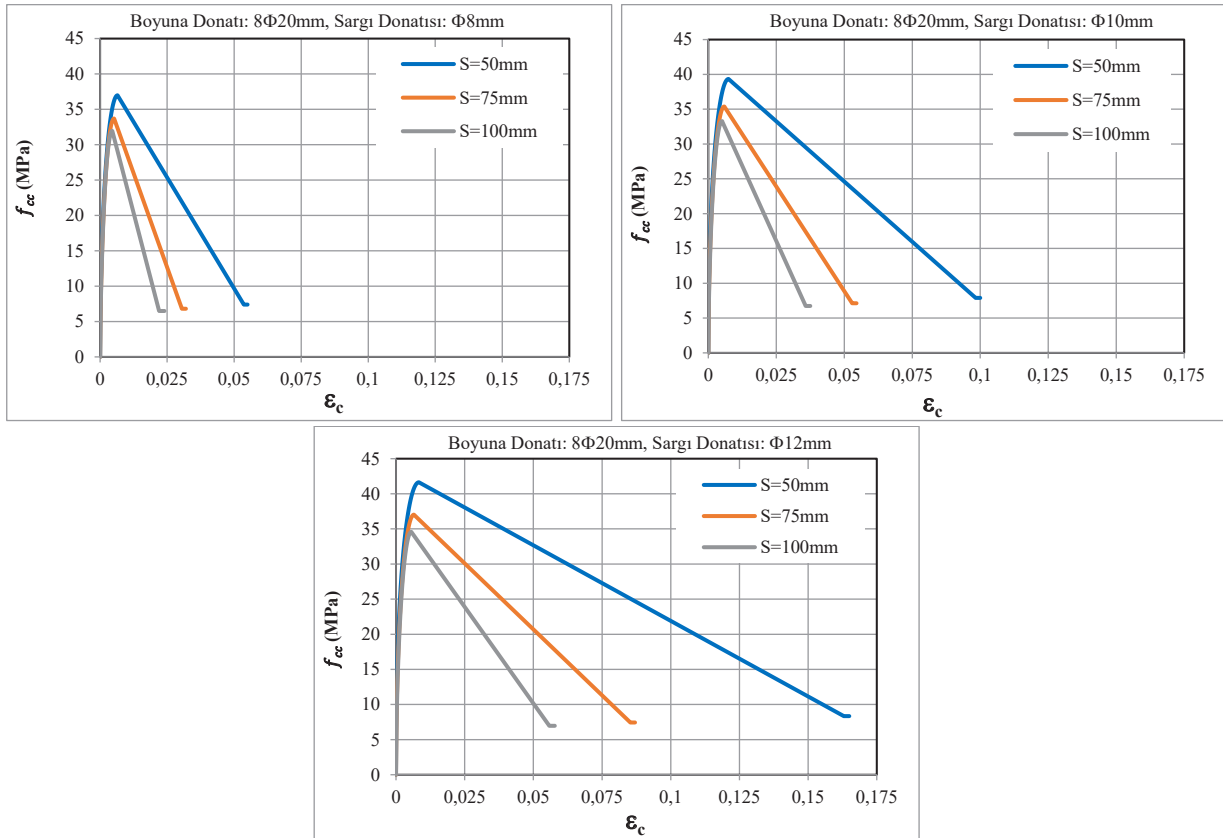
Şekil 2.10. Mander modeline göre 500 mm×500 mm enkesitli kolonların gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri

Saatçioğlu ve Ravzi Sargılı Beton Modeli:

Tasarlanan kare enkesitli betonarme kolon modellerinin Saatçioğlu ve Ravzi (1992) modeline göre hesap sonuçları Tablo 2.8’de verilmiştir. Farklı sargı donatısı oranları için elde edilen gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri karşılaştırmalı olarak Şekil 2.11’de verilmiştir.

Tablo 2.8. Saatçioğlu ve Ravzi modeline göre 500 mm × 500 mm kare enkesitli kolon modellerinin hesap sonuçları

Boyuna donatı	Sargı donatısı	σ_2 (MPa)	σ_{2e} (MPa)	k_1	f_{cc} (MPa)	ϵ_{coc}	ϵ_{c85}	ϵ_{c20}
8 Φ 20 mm	Φ 8/50 mm	2.9	1.9	6.0	37.0	0.0065	0.0153	0.0536
	Φ 8/75 mm	1.9	1.3	6.4	33.7	0.0052	0.0130	0.0470
	Φ 8/100 mm	1.4	1.0	6.8	32.0	0.0045	0.0118	0.0435
	Φ 10/50 mm	4.5	2.4	5.8	39.3	0.0074	0.0244	0.0983
	Φ 10/75 mm	3.0	1.6	6.2	35.4	0.0058	0.0201	0.0820
	Φ 10/100 mm	2.3	1.2	6.5	33.3	0.0050	0.0178	0.0734
	Φ 12/50 mm	6.5	2.9	5.6	41.6	0.0083	0.0373	0.1630
	Φ 12/75 mm	4.3	1.9	6.0	37.0	0.0065	0.0300	0.1320
	Φ 12/100 mm	3.3	1.4	6.3	34.6	0.0055	0.0262	0.1156



Şekil 2.11. Saatçioğlu ve Ravzi modeline göre 500 mm×500 mm enkesitli kolonların gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri

TBDY (2018), Mander ve ark. (1988) ile Saatçioğlu ve Razvi (1992) Sargılı Beton Modellerinin karşılaştırılması:

Farklı parametre ve özelliklerde tasarlanan 500 mm × 500 mm enkesitli kolon kesitlerine ait TBDY (2018), Mander ve ark. (1988) ve Saatçioğlu ve Razvi (1992) modellerine göre elde edilen sonuçlar Tablo 2.9'da sunulmuştur. Farklı sargılı beton modellere göre 500 mm × 500 mm enkesitli kolonlar için elde edilen hesap sonuçlarının ilişkileri karşılaştırılmalı olarak Şekil 2.12'de verilmiştir.

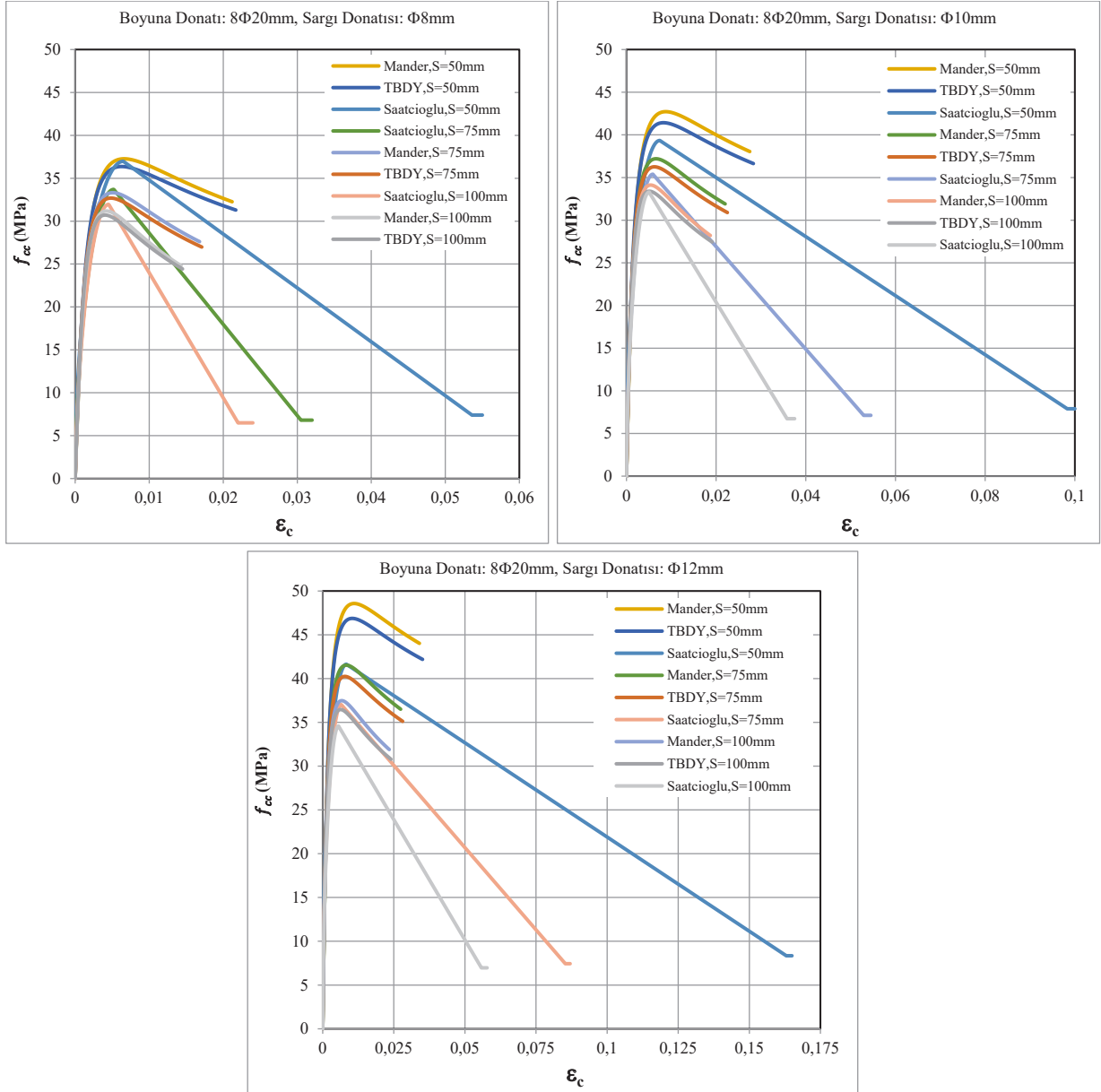
Tablo 2.9. Farklı sargılı beton modellere göre 500 mm × 500 mm enkesitli kolonların hesap sonuçlarının karşılaştırması

a) Farklı sargı donatısı çapı ve aralığı

Boyuna Donatı	Sargı Donatısı	TBDY (2018)		Mander Modeli		Saatçioğlu ve Razvi Modeli	
		f'_{cc} (MPa)	ϵ_{cc}	f'_{cc} (MPa)	ϵ_{cc}	f_{cc} (MPa)	ϵ_{coc}
8Φ20 mm	Φ8/50 mm	36.4	0.0063	37.3	0.0066	37.0	0.0065
	Φ8/75 mm	32.7	0.0048	33.3	0.0051	33.7	0.0052
	Φ8/100 mm	30.7	0.0040	31.2	0.0042	32.0	0.0045
	Φ10/50 mm	41.4	0.0082	42.7	0.0088	39.3	0.0074
	Φ10/75 mm	36.3	0.0062	37.2	0.0066	35.4	0.0058
	Φ10/100 mm	33.4	0.0051	34.1	0.0054	33.3	0.0050
	Φ12/50 mm	46.9	0.0104	48.6	0.0110	41.6	0.0083
	Φ12/75 mm	40.2	0.0078	41.5	0.0083	37.0	0.0065
	Φ12/100 mm	36.5	0.0063	37.5	0.0067	34.6	0.0055

b) Farklı boyuna donatı çapı

Boyuna Donatı	Sargı Donatısı	TBDY (2018)		Mander Modeli		Saatçioğlu ve Razvi Modeli	
		f_{cc} (MPa)	ϵ_{cc}	f'_{cc} (MPa)	ϵ_{cc}	f_{cc} (MPa)	ϵ_{coc}
8Φ20 mm	Φ8/50 mm	36.37	0.0063	37.3	0.0066	37.0	0.0065
8Φ22 mm		36.43	0.0063	37.4	0.0067	37.0	0.0065
8Φ24 mm		36.50	0.0063	37.5	0.0067	37.0	0.0065
8Φ26 mm		36.57	0.0063	37.7	0.0068	37.0	0.0065
8Φ28 mm		36.64	0.0064	37.8	0.0068	37.1	0.0065
8Φ30 mm		36.71	0.0064	37.9	0.0069	37.1	0.0065
8Φ32 mm		36.79	0.0064	38.1	0.0069	37.1	0.0065
8Φ34 mm		36.87	0.0065	38.2	0.0070	37.1	0.0065
8Φ36 mm		36.95	0.0065	38.3	0.0070	37.2	0.0065
8Φ38 mm		37.04	0.0065	38.5	0.0071	37.2	0.0065
8Φ40 mm		37.13	0.0066	38.6	0.0071	37.2	0.0065



Şekil 2.12. Farklı sargılı beton modellere göre 500 mm × 500 mm enkesitli kolonlar için elde edilen hesap sonuçlarının karşılaştırılması

Sargı donatısı aralığının belirleyici rolü:

500 mm × 500 mm kare enkesitli betonarme kolonlar modellerinde sargı donatısı aralığının artmasıyla birlikte; sargı etkinlik katsayısı (k_e), etkin yanal basınç gerilmesi (f_e , f_l ve f'_l , σ_{2e}), sargılı beton basınç dayanımı (f'_{cc} , f_{cc}), tepe gerilmesine karşılık gelen birim şekildeğiştirme (ϵ_{cc} , ϵ_{coc}) ve nihai basınç birim şekildeğiştirmesi (ϵ_{cu} , ϵ_{c20}) değerlerinde sistematik azalma gözlenmektedir.

Bu bulgu, çekirdek betonun tek eksenli gerilme durumundan etkin üç eksenli gerilme durumuna geçişini mümkün kılan yanal sargı basıncı mekanizmasının, doğrudan sargı donatısı tarafından belirlendiğini göstermektedir. Sargı donatısı aralığının artması, kesit içerisinde etkin olarak sınırlandırılan beton çekirdeğinin hacimsel oranını azaltmakta; böylece yanal sargı basıncının kesit boyunca sürekliliği ve üniform dağılımı bozulmaktadır. Bu durum, sargı donatısı akması ile mobilize edilen pasif yanal basınç gerilmesinin gelişimini ve sürekliliğini zayıflatarak üç eksenli basınç durumunun etkinliğini düşürmektedir.

Sargı donatısı çapının artmasının etkisi:

Sargı donatısı çapının $\Phi 8$ mm'den $\Phi 12$ mm'ye çıkarılması tüm modellerde:

- Yanal basınç kapasitesini belirgin biçimde artırmakta,
- Basınç dayanımında anlamlı yükselmeye yol açmakta,
- Özellikle nihai deformasyon kapasitesini ciddi ölçüde artırmaktadır.

Bu durum, sargılı beton davranışının esas olarak sargı donatısı oranı ve buna bağlı gelişen pasif yanal basınç mekanizması ile kontrol edildiğini doğrulamaktadır. Dayanım artışının yanında, post-pik davranışın daha kararlı hale gelmesi ve enerji yutma kapasitesinin artması, sargı yoğunluğunun süneklik üzerindeki doğrudan etkisini göstermektedir.

Boyuna donatı çapının etkisi:

Boyuna donatı çapının $8\Phi 20$ mm'den $8\Phi 40$ mm'ye çıkarılması tüm modellerde basınç dayanımı üzerinde sınırlı artış üretmiş, ancak bu artış sargı donatısı düzenlemesinin etkisine kıyasla ikincil düzeyde kalmıştır. Şekildeğiştirme parametreleri üzerindeki etkisi ise oldukça zayıftır. Bu bulgu, sargılı beton davranışının belirlenmesinde boyuna donatının değil, sargı donatısının baskın mekanizma olduğunu net biçimde ortaya koymaktadır.

Modeller arası farklılıkların teknik değerlendirmesi

Dayanım tahminleri:

Mander modeli, etkin yanal basıncı doğrudan gerilme-şekildeğiştirme bağıntısına entegre eden analitik yapısı nedeniyle en yüksek f'_{cc} değerlerini üretmektedir. Üç eksenli gerilme durumuna bağlı dayanım artışını daha belirgin yansıtmaktadır.

TBDY (2018) sonuçları genel eğilim bakımından Mander modeline paralel olmakla birlikte, sistematik olarak daha düşük dayanım tahminleri vermektedir. Bu durum yönetmeliğin güvenlik odaklı, tasarım esaslı ve kontrollü bir artış mekanizması benimsediğini göstermektedir.

Saatçioğlu ve Razvi modeli, dayanım artışını daha sınırlı öngörmekte ve özellikle yüksek sargı donatısı oranlarında diğer iki modele kıyasla daha düşük ve güvenli tarafta kalan basınç dayanımı tahminleri üretmektedir.

Dayanım tahminlerinde model sıralaması genel olarak: Mander > TBDY (2018) > Saatçioğlu ve Razvi şeklinde ortaya çıkmaktadır.

Deformasyon ve süneklik tahminleri:

Modeller arasındaki en belirgin farklılık deformasyon kapasitesi tahminlerinde yoğunlaşmaktadır.

Mander modeli, hem ε_{cc} hem de ε_{cu} değerlerini sistematik olarak daha yüksek tahmin etmekte; post-pik davranışı daha yaygın ve sünek göstermektedir. Tepe gerilmesi sonrası dayanım kaybı daha kademeli gerçekleşmektedir.

TBDY (2018), deformasyon kapasitesini Mander modeline kıyasla daha kontrollü sınırlar içinde tahmin etmektedir. Yönetmelik yaklaşımı süneklik artışını kabul etmekle birlikte tasarım güvenliği çerçevesinde sınırlamaktadır.

Saatçioğlu ve Razvi modeli, tepe gerilmesine karşılık gelen şekildeğiştirme değerlerinde diğer modellere göre daha düşük değerler üretmekle birlikte, post-pik bölgedeki ε_{c85} ve özellikle ε_{c20} parametreleri ile nihai deformasyon kapasitesini farklı bir parametre seti üzerinden tanımlamaktadır. Yüksek ε_{c20} değerleri, modelin enerji yutma kapasitesini analitik olarak güçlü biçimde temsil ettiğini göstermektedir; ancak dayanım artışları emniyet tarafında kalan bir yaklaşımla tahmin edilmektedir.

Süneklik tahminlerinde tepe şekildeğiştirmesi bakımından (ε_{cc}) model sıralaması genel olarak: Mander > TBDY (2018) > Saatçioğlu-Razvi şeklindedir; ancak post-pik tanımlama yaklaşımı bakımından Saatçioğlu ve Razvi modeli kavramsal olarak farklı bir çerçeve sunmaktadır.

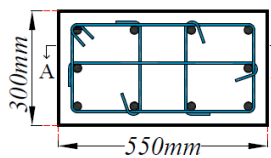
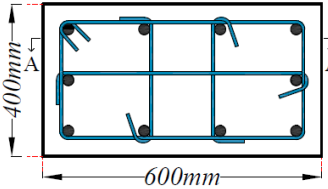
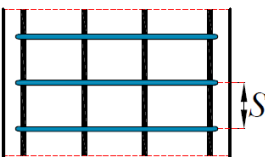
2.2. Dikdörtgen Kesitli Betonarme Kolonların Gerilme-Şekildeğiştirme İlişkileri

2.2.1. 300 mm × 550 mm ve 400 mm × 600 mm dikdörtgen enkesitli kolonun gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi

Bu bölümde, 300 × 550 mm ve 400 × 600 mm dikdörtgen kesitli betonarme kolonlarda sargılı betonun aksel basınç altındaki doğrusal olmayan davranışı, farklı analitik modeller kapsamında incelenmiştir. Değerlendirmelerde Mander et al. (1988) ile Saatçioğlu ve Razvi (1992) tarafından geliştirilen sargılı beton modelleri esas alınmıştır. Kesit geometrisi sabit tutulurken, donatı düzenine ilişkin parametreler sistematik olarak değiştirilmiş ve sargı ile boyuna donatının çekirdek beton davranışı üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Bu kapsamda boyuna donatı çapı $\Phi 20$ - $\Phi 40$ mm aralığında on bir farklı değer olarak seçilmiş; her bir durum için $\Phi 8$ mm, $\Phi 10$ mm ve $\Phi 12$ mm sargı donatı çapları ile 50 mm, 75 mm ve 100 mm etriye aralıkları tanımlanmıştır. Böylece boyuna donatı oranı ile sargılama etkisinin birlikte değerlendirilebildiği kapsamlı bir parametre matrisi oluşturulmuştur. Tüm analizlerde beton sınıfı C30 olarak kabul edilmiştir. 300 × 550 mm ve 400 × 600 mm kesitlere ait geometri ve donatı kombinasyonları, Tablo 2.10'da özetlenmiştir (Yüksel ve Foroughi, 2019; Foroughi, 2022).

Tablo 2.10. Dikdörtgen enkesitli betonarme kolon modellerinin kesit bilgileri ve detayları

Beton Sınıfı	Boyuna Donatı (mm)	Sargı Donatısı	
		Çap (mm)	Aralık (mm)
C30	$\Phi 20$ mm	$\Phi 8$ mm $\Phi 10$ mm $\Phi 12$ mm	50 mm 75 mm 100 mm
	$\Phi 22$ mm		
	$\Phi 24$ mm		
	$\Phi 26$ mm		
	$\Phi 28$ mm		
	$\Phi 30$ mm		
	$\Phi 32$ mm		
	$\Phi 34$ mm		
	$\Phi 36$ mm		
	$\Phi 38$ mm		
	$\Phi 40$ mm		

Kolon Kesit Geometrisi		
		

Her bir kolon modeli için, sargılı betonun aksel basınç altındaki gerilme-şekildeğiştirme bağıntıları ilgili analitik modeller kullanılarak elde edilmiş; böylece sargı etkisine bağlı olarak betonun basınç dayanımı ve nihai birim şekildeğiştirme kapasitesindeki değişimler sayısal olarak hesaplanmıştır. İncelenen modeller, performans esaslı tasarım çerçevesinde dikdörtgen enkesitli betonarme kolonların doğrusal olmayan davranışının daha gerçekçi ve güvenilir biçimde temsil edilmesine olanak sağlayan analitik bir altyapı sunmaktadır.

Mander Sargılı Beton Modeli:

Mander modeli (Mander ve ark., 1988) temel alınarak gerçekleştirilen hesaplamalar sonucunda, farklı boyuna donatı ve sargı donatısı parametreleri dikkate alınarak elde edilen gerilme-şekildeğiştirme parametreleri, 300 mm × 550 mm enkesitli kolonlar için Tablo 2.11’de, 400 mm × 600 mm enkesitli kolon modellerine ilişkin sayısal analiz sonuçları ise Tablo 2.12’de özetlenmiştir.

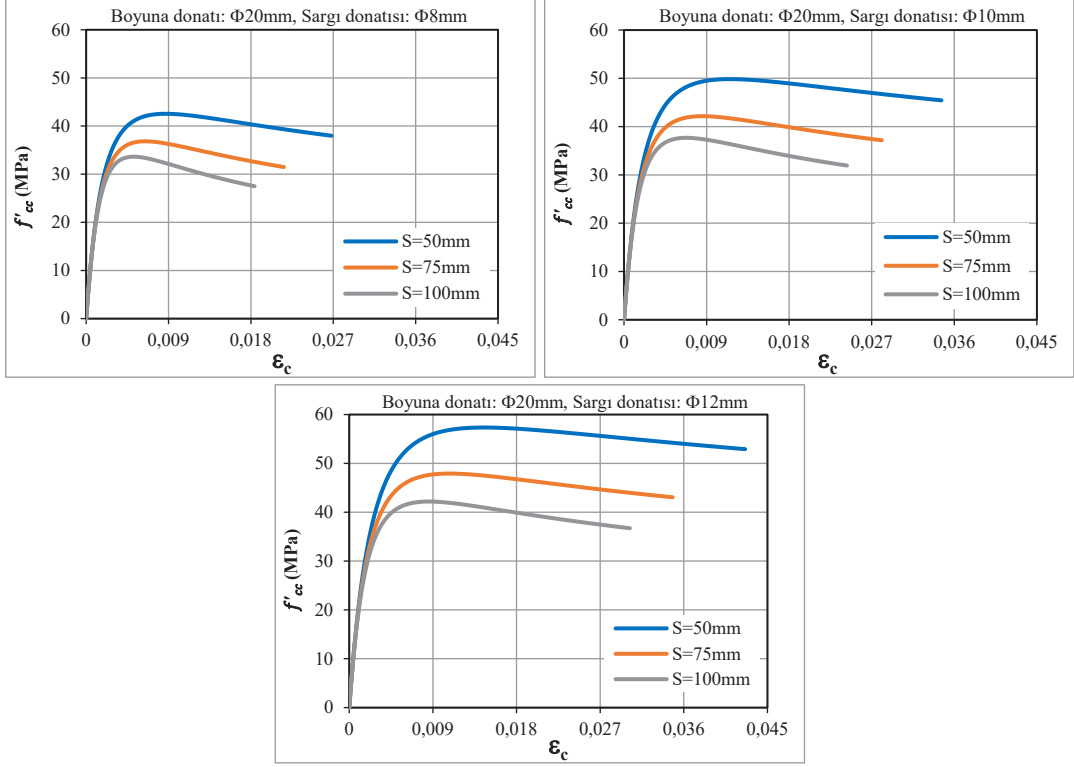
Tablo 2.11. Mander modeline göre 300 mm × 550 mm dikdörtgen enkesitli kolon modellerinin hesap sonuçları (C30, boyuna donatı: $\Phi 20$ mm)

Sargı Donatısı	f_{lx} (MPa)	f_{ly} (MPa)	f_l (MPa)	f'_{lx} (MPa)	f'_{ly} (MPa)	f'_l (MPa)	f'_{cc} (MPa)	ϵ_{cc}	ϵ_{cu}
$\Phi 8/50$ mm	3.4	5.2	4.3	2.5	3.8	3.1	42.6	0.0087	0.0268
$\Phi 8/75$ mm	2.3	3.5	2.9	1.5	2.3	1.9	36.8	0.0064	0.0216
$\Phi 8/100$ mm	1.7	2.6	2.2	1.0	1.6	1.3	34.6	0.0052	0.0184
$\Phi 10/50$ mm	5.4	8.3	6.8	3.9	6.0	5.0	49.8	0.0115	0.0346
$\Phi 10/75$ mm	3.6	5.5	4.5	2.4	3.7	3.0	42.2	0.0085	0.0281
$\Phi 10/100$ mm	2.7	4.1	3.4	1.7	2.5	2.1	37.7	0.0068	0.0243
$\Phi 12/50$ mm	7.8	12.0	9.9	5.7	8.8	7.3	57.3	0.0145	0.0426
$\Phi 12/75$ mm	5.2	8.0	6.6	3.5	5.4	4.5	47.9	0.0108	0.0348
$\Phi 12/100$ mm	3.9	6.0	4.9	2.4	3.7	3.1	42.2	0.0085	0.0302

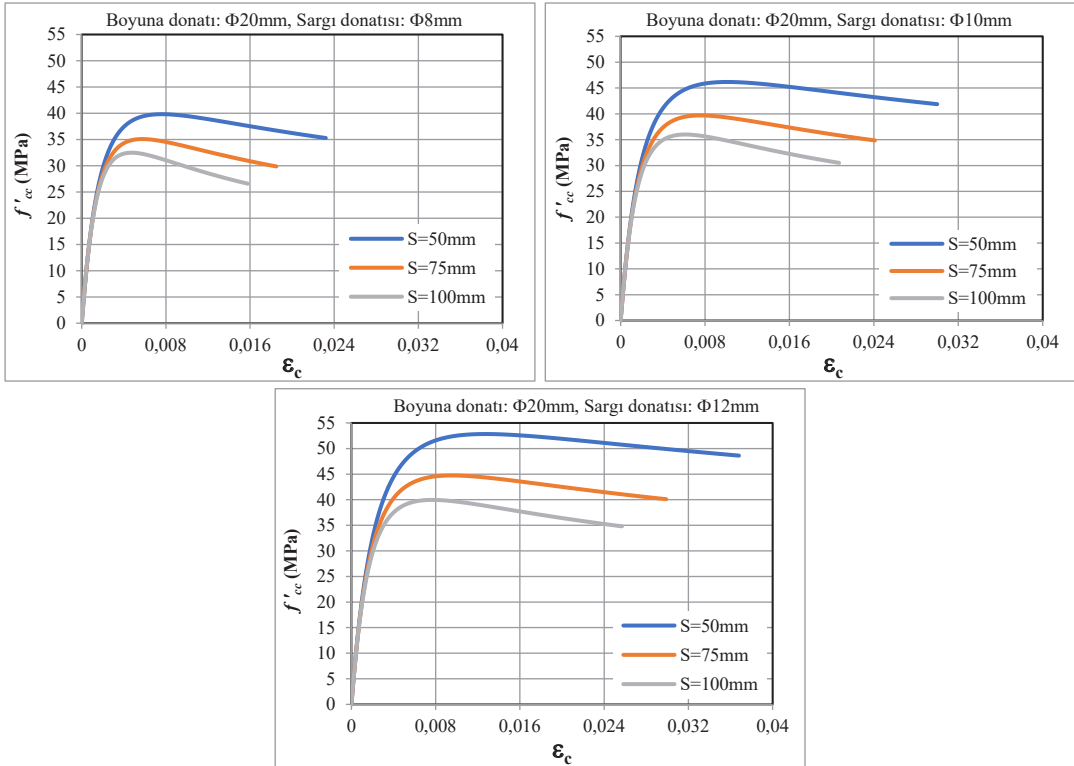
Tablo 2.12. Mander modeline göre 400 mm × 600 mm dikdörtgen enkesitli kolon modellerinin hesap sonuçları (C30, boyuna donatı: $\Phi 20$ mm)

Sargı Donatısı	f_{lx} (MPa)	f_{ly} (MPa)	f_l (MPa)	f'_{lx} (MPa)	f'_{ly} (MPa)	f'_l (MPa)	f'_{cc} (MPa)	ϵ_{cc}	ϵ_{cu}
$\Phi 8/50$ mm	3.1	3.7	3.4	2.3	2.7	2.5	39.8	0.0076	0.0232
$\Phi 8/75$ mm	2.1	2.5	2.3	1.4	1.7	1.6	35.1	0.0058	0.0185
$\Phi 8/100$ mm	1.6	1.9	1.7	1.0	1.2	1.1	32.5	0.0047	0.0158
$\Phi 10/50$ mm	4.9	5.8	5.4	3.7	4.4	4.0	46.2	0.0101	0.0300
$\Phi 10/75$ mm	3.3	3.9	3.6	2.3	2.7	2.5	39.7	0.0076	0.0241
$\Phi 10/100$ mm	2.4	2.9	2.7	1.6	1.9	1.8	36.0	0.0061	0.0207
$\Phi 12/50$ mm	7.1	8.4	7.7	5.3	6.4	5.8	52.8	0.0127	0.0368
$\Phi 12/75$ mm	4.7	5.6	5.2	3.3	4.0	3.7	44.7	0.0095	0.0299
$\Phi 12/100$ mm	3.5	4.2	3.9	2.3	2.8	2.6	40.0	0.0077	0.0257

Elde edilen sonuçlar, boyuna donatı oranı ve sargı donatısı parametrelerindeki değişimlerin sargılı beton davranışı üzerindeki etkilerinin sayısal olarak belirlenmesine ve karşılaştırmalı analizler yoluyla değerlendirilmesine imkan vermektedir. Bu kapsamda, 300 × 550 mm kesitli kolon modelleri için sargılı betonun gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri hesaplanmış ve sargı donatısı oranındaki değişimlerin çekirdek beton dayanımı ile nihai birim şekildeğiştirme kapasitesi üzerindeki etkileri karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. İlgili gerilme-şekildeğiştirme eğrileri 300 × 550 mm kesitli kolonlar için Şekil 2.13’te, 400 × 600 mm kesitli kolonlar için elde edilen sargılı beton davranışı ise Şekil 2.14’te sunulmuştur.



Şekil 2.13. Mander modeline göre 300 mm x 550 mm enkesitli kolonların gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri



Şekil 2.14. Mander modeline göre 400 mm x 600 mm enkesitli kolonların gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri

Saatçioğlu ve Ravzi Sargılı Beton Modeli:

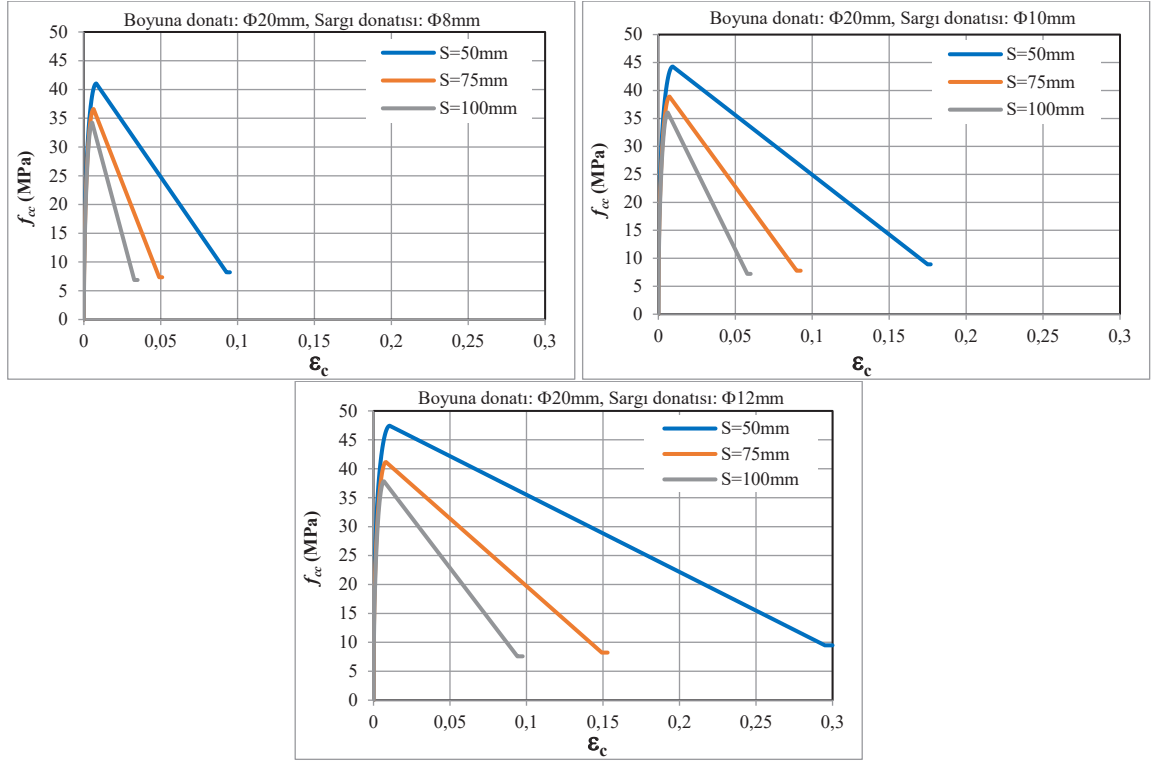
Tasarlanan 300 mm × 550 mm enkesitli betonarme kolon modellerine ait farklı tasarım parametreleri doğrultusunda Saatçioğlu ve Ravzi (1992) modeline göre elde edilen hesap sonuçları Tablo 2.13'te, 400 mm × 600 mm enkesitli dikdörtgen kolon modelleri için söz konusu model çerçevesinde hesaplanan sonuçlar ise Tablo 2.14'te sunulmuştur. Saatçioğlu ve Ravzi (1992) modeline göre, 300 mm × 550 mm enkesitli betonarme kolon modelleri için sargılı betonun gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri hesaplanmış ve farklı sargı donatısı oranları dikkate alınarak karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir (Şekil 2.15). Benzer şekilde, 400 mm × 600 mm enkesitli dikdörtgen kolon modelleri için elde edilen sargılı beton gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri de aynı model çerçevesinde hesaplanmış ve farklı sargı donatısı oranlarına göre parametrik analizler yapılmıştır (Şekil 2.16).

Tablo 2.13. Saatçioğlu ve Ravzi modeline göre 300 mm × 550 mm dikdörtgen enkesitli kolon modellerinin hesap sonuçları (beton sınıfı C30, boyuna donatı: Φ20 mm)

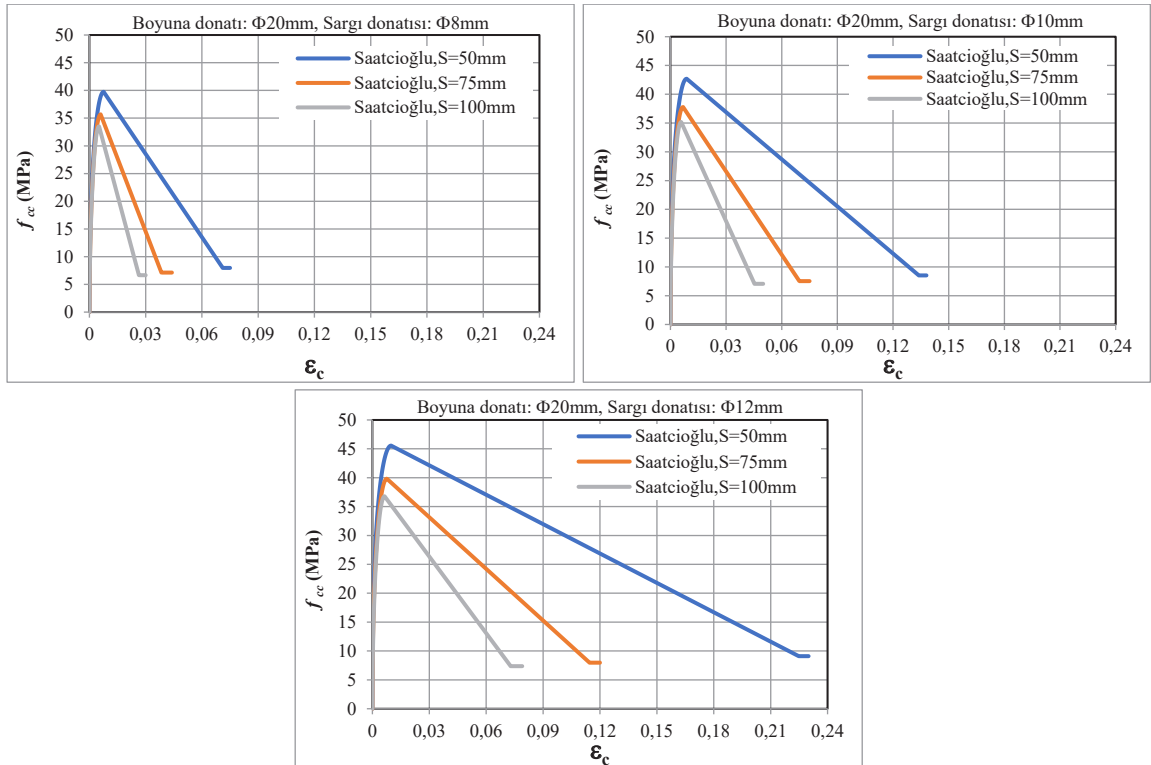
Sargı Donatısı	σ_{2x} (MPa)	σ_{2y} (MPa)	σ_{2ex} (MPa)	σ_{2ey} (MPa)	σ_{2e} (MPa)	f_{cc} (MPa)	ϵ_{coc}	ϵ_{c85}	ϵ_{c20}
Φ8/50 mm	3.4	5.2	1.6	3.3	2.8	41.0	0.0081	0.0240	0.0928
Φ8/75 mm	2.3	3.5	1.1	2.2	1.8	36.6	0.0063	0.0144	0.0490
Φ8/100 mm	1.7	2.6	0.8	1.7	1.4	34.2	0.0054	0.0105	0.0328
Φ10/50 mm	5.4	8.3	2.0	4.2	3.5	44.3	0.0093	0.0404	0.1752
Φ10/75 mm	3.6	5.5	1.3	2.8	2.3	38.9	0.0072	0.0227	0.0899
Φ10/100 mm	2.7	4.1	1.0	2.1	1.7	36.1	0.0061	0.0158	0.0578
Φ12/50 mm	7.8	12.0	2.4	5.0	4.2	47.4	0.0106	0.0639	0.295
Φ12/75 mm	5.2	8.0	1.6	3.4	2.8	41.2	0.0081	0.0345	0.1492
Φ12/100 mm	3.9	6.0	1.2	2.5	2.1	37.8	0.0068	0.0232	0.0940

Tablo 2.14. Saatçioğlu ve Ravzi modeline göre 400 mm × 600 mm dikdörtgen enkesitli kolon modellerinin hesap sonuçları (beton sınıfı C30, boyuna donatı: Φ20 mm)

Sargı Donatısı	σ_{2x} (MPa)	σ_{2y} (MPa)	σ_{2ex} (MPa)	σ_{2ey} (MPa)	σ_{2e} (MPa)	f_{cc} (MPa)	ϵ_{coc}	ϵ_{c85}	ϵ_{c20}
Φ8/50 mm	3.1	3.7	1.8	2.9	2.5	39.7	0.0076	0.0195	0.0711
Φ8/75 mm	2.1	2.5	1.2	2.0	1.7	35.7	0.0060	0.0121	0.0384
Φ8/100 mm	1.6	1.9	0.9	1.5	1.2	33.5	0.0051	0.0091	0.0264
Φ10/50 mm	4.9	5.8	2.2	3.7	3.1	42.7	0.0087	0.0322	0.1339
Φ10/75 mm	3.3	3.9	1.5	2.4	2.1	37.8	0.0068	0.0186	0.0695
Φ10/100 mm	2.4	2.9	1.1	1.8	1.6	35.2	0.0058	0.0132	0.0453
Φ12/50 mm	7.1	8.4	2.7	4.4	3.7	45.6	0.0099	0.0502	0.2248
Φ12/75 mm	4.7	5.6	1.8	2.9	2.5	39.8	0.0076	0.0277	0.1145
Φ12/100 mm	3.5	4.2	1.3	2.2	1.9	36.8	0.0064	0.0189	0.0729



Şekil 2.15. Saatçioğlu ve Ravzi modeline göre 300 mm x 550 mm enkesitli kolonların gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri



Şekil 2.16. Saatçioğlu ve Ravzi modeline göre 400 mm x 600 mm enkesitli kolonların gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri

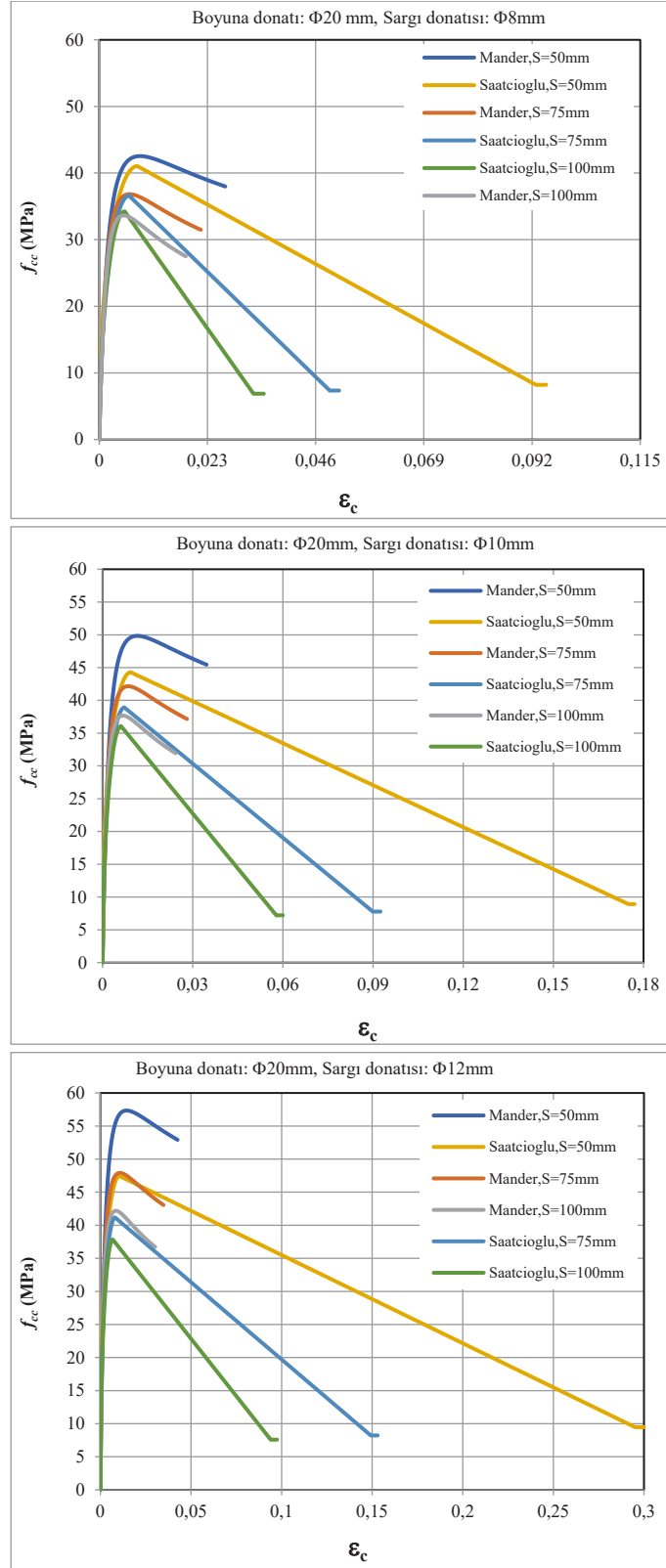
300 mm × 550 mm enkesitli dikdörtgen kolon modelleri için Mander ile Saatçioğlu ve Razvi sargılı beton modelleri kullanılarak hesaplanan sargılı beton basınç dayanımı ve maksimum basınç gerilmesine karşılık gelen birim kısalma değerlerinin karşılaştırmalı sonuçları Tablo 2.15'te sunulmuştur. Aynı kesit için Mander ile Saatçioğlu ve Razvi modellerine göre belirlenen gerilme-şekildeğiştirme ilişkilerinin karşılaştırılması ise Şekil 2.17'de verilmiştir. Farklı sargılı beton modelleri esas alınarak 400 mm × 600 mm enkesitli kolonlar için elde edilen hesap sonuçlarının karşılaştırılması Tablo 2.16'da sunulmuştur. Söz konusu kesit için farklı modellere göre elde edilen gerilme-şekildeğiştirme eğrilerinin karşılaştırılması ise Şekil 2.18'de gösterilmiştir.

Tablo 2.15. Farklı sargılı beton modellere göre 300 mm × 550 mm enkesitli kolonların hesap sonuçlarının karşılaştırması

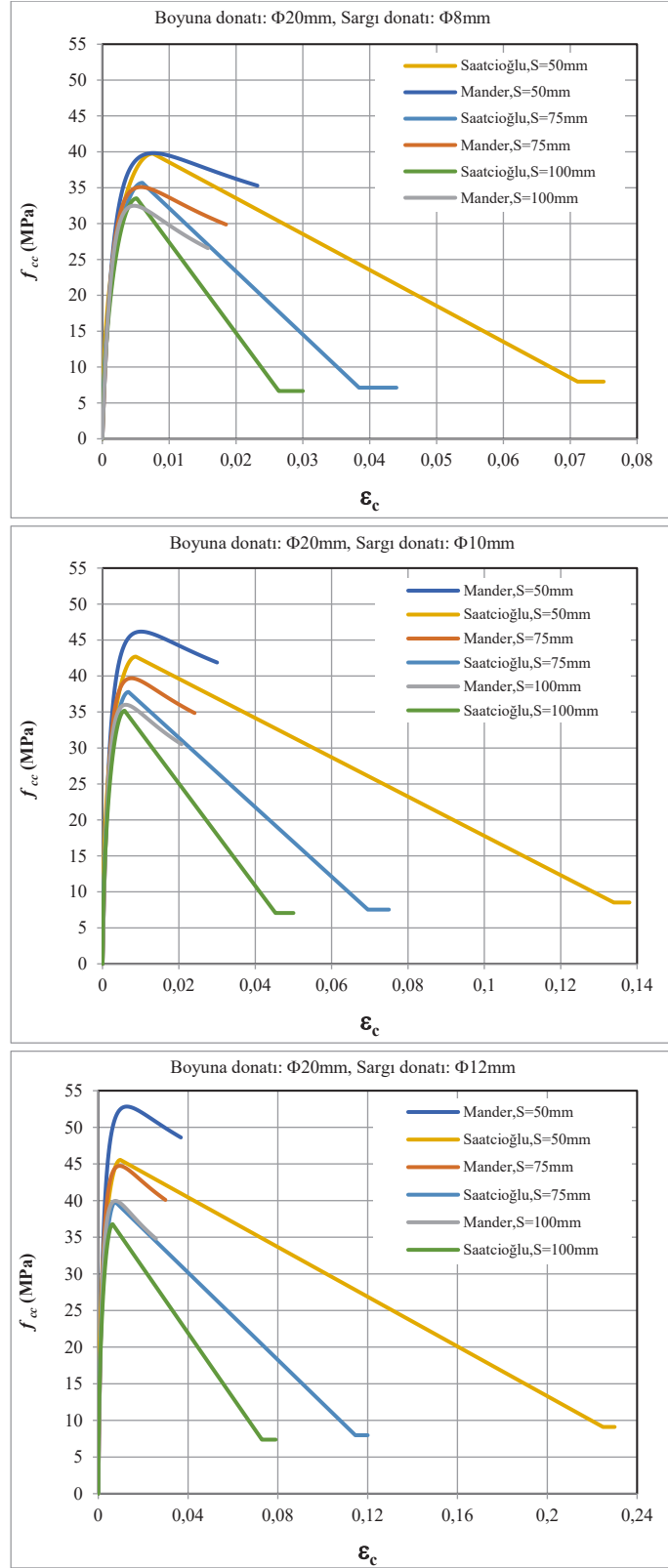
Boyuna Donatı (mm)	Sargı Donatısı (mm)	Mander Modeli		Saatçioğlu-Razvi Modeli	
		f'_{cc} (MPa)	ϵ_{cc}	f_{cc} (MPa)	ϵ_{coc}
10Φ20 mm	Φ8/50 mm	42.55	0.0087	41.04	0.0081
	Φ8/75 mm	36.83	0.0064	36.60	0.0063
	Φ8/100 mm	34.63	0.0052	34.24	0.0054
	Φ10/50 mm	49.84	0.0115	44.28	0.0093
	Φ10/75 mm	42.16	0.0085	38.91	0.0072
	Φ10/100 mm	37.68	0.0068	36.06	0.0061
	Φ12/50 mm	57.34	0.0145	47.44	0.0106
	Φ12/75 mm	47.91	0.0108	41.17	0.0081
	Φ12/100 mm	42.19	0.0085	37.84	0.0068

Tablo 2.16. Farklı sargılı beton modellere göre 400 mm × 600 mm enkesitli kolonların hesap sonuçlarının karşılaştırması

Boyuna Donatı (mm)	Sargı Donatısı (mm)	Mander Modeli		Saatçioğlu-Razvi Modeli	
		f'_{cc} (MPa)	ϵ_{cc}	f_{cc} (MPa)	ϵ_{coc}
10Φ20 mm	Φ8/50 mm	39.8	0.0076	39.7	0.0076
	Φ8/75 mm	35.1	0.0058	35.7	0.0060
	Φ8/100 mm	32.5	0.0047	33.5	0.0051
	Φ10/50 mm	46.2	0.0101	42.7	0.0087
	Φ10/75 mm	39.7	0.0076	37.8	0.0068
	Φ10/100 mm	36.0	0.0061	35.2	0.0058
	Φ12/50 mm	52.8	0.0127	45.6	0.0099
	Φ12/75 mm	44.7	0.0095	39.8	0.0076
	Φ12/100 mm	40.0	0.0077	36.8	0.0064



Şekil 2.17. Farklı sargılı beton modellere göre 300 mm × 550 mm enkesitli kolonlar için elde edilen hesap sonuçlarının karşılaştırılması



Şekil 2.18. Farklı sargılı beton modellere göre $400\text{ mm} \times 600\text{ mm}$ enkesitli kolonlar için elde edilen hesap sonuçlarının karşılaştırılması

Mander modeline göre davranışın değerlendirilmesi:

Tablo 2.11 - Şekil 2.13 ile Tablo 2.12 - Şekil 2.14 birlikte ele alındığında, Mander modelinin dikdörtgen kesitli kolonlarda sargı etkisini yönsel bileşenler üzerinden tanımladığı açıkça görülmektedir. Uzun kenar doğrultusunda (y-y) elde edilen yanal basınç değerlerinin (f_{ly} ve f'_{ly}), kısa kenar doğrultusundaki (x-x) karşılıklarından daha yüksek olması, kesit en-boy oranının etkin sargı katsayısı üzerindeki belirleyici etkisini ortaya koymaktadır. Bu yönsel farklılık, çekirdek betonun çevresel olarak üniform biçimde sınırlandırılmadığını ve etkin sargı alanının kesit içinde homojen dağılmadığını göstermektedir.

Dikdörtgen kesit geometrisi nedeniyle köşe bölgelerinde yoğunlaşan sargı etkisine karşın, uzun kenar boyunca ara bölgelerde sargı etkisinin azalması; etkin yanal basıncın doğrultuya bağlı olarak değişmesine ve ortalama etkin yanal basıncın (f'_l) sınırlı kalmasına neden olmaktadır. Bu durum, dairesel kesitlere kıyasla dikdörtgen kesitlerde sargı etkinliğinin daha düşük ve heterojen karakterli olduğunu teyit etmektedir. Parametrik değerlendirme sonuçları, sargı donatısı çapının artırılması ve sargı donatısı aralığının azaltılmasıyla birlikte etkin yanal basınç bileşenlerinin arttığını; buna bağlı olarak sargılı beton basınç dayanımının (f'_{cc}) ve bu dayanım seviyesine karşılık gelen birim kısalmanın (ϵ_{cc}) yükseldiğini göstermektedir. Yoğun sargı düzenlemelerinde (örneğin $\Phi 12/50$ mm), yalnızca tepe dayanımında artış değil, aynı zamanda nihai birim kısalma (ϵ_{cu}) değerinde belirgin bir artış tespit edilmiştir. Bu bulgu, sargı oranındaki artışın çekirdek betonun süneklik kapasitesini önemli ölçüde geliştirdiğini ortaya koymaktadır. Post-pik bölgede gerilme düşüşünün daha kademeli gerçekleşmesi, enerji yutma kapasitesinin arttığını ve göçme mekanizmasının geciktiğini göstermektedir. Dolayısıyla Mander modeli çerçevesinde, sargı donatısının geometrik ve mekanik parametreleri yalnızca basınç dayanımını artırmakla kalmamakta; aynı zamanda deformasyon kapasitesi, süneklik ve artık taşıma gücü üzerinde de belirleyici rol oynamaktadır.

Saatçioğlu ve Razvi modeline göre davranışın değerlendirilmesi:

Saatçioğlu ve Razvi tarafından geliştirilen model kapsamında elde edilen bulgular (Tablo 2.13-2.14 ve Şekil 2.15-2.16), sargı etkisinin etkin yanal basınç kavramı temelinde ve mekanik denge esaslarına dayalı olarak tanımlandığını göstermektedir. Model, etkin yanal basıncı daha düşük düzeylerde tahmin eden bir yapıya sahiptir. Dikdörtgen kesitli kolonlarda x ve y doğrultularında hesaplanan yanal gerilmeler arasında farklılık bulunmakta; uzun kenar doğrultusunda belirlenen etkin sargı basıncı değerleri kısa kenar doğrultusuna göre daha yüksek gerçekleşmektedir.

Modelde tanımlanan etkin yanal basınç (σ_{2e}) değerlerinin, karşılaştırmalı değerlendirmelerde Mander yaklaşımına kıyasla daha düşük seviyelerde kaldığı gözlenmektedir. Etkin yanal basıncın düşük düzeyde kalması, sargılı beton basınç dayanımındaki artışın da sınırlı gerçekleşmesine neden olmaktadır. Buna karşılık modelin belirgin üstünlüğü, post-pik davranışın ayrıntılı parametrelerle tanımlanmasıdır. Özellikle ϵ_{c85} ve ϵ_{c20} değerleri, taşıma kapasitesinin maksimum dayanım sonrasında hangi deformasyon düzeylerine kadar sürdürülebileceğini göstermektedir. Sık sargı düzenlemelerinde ϵ_{c20} değerlerinin yüksek olması, çekirdek betonun maksimum dayanım sonrasında gerilme kapasitesini geniş bir birim kısalma aralığında sürdürebildiğini ve gevrek göçme eğiliminin azaldığını göstermektedir. Gerilme-şekildeğiştirme eğrilerinin post-pik kesiminde gerilmenin daha düşük azalma eğilimi göstermesi, modelin süneklik ve enerji yutma kapasitesi değerlendirmelerine ağırlık verdiğini ortaya koymaktadır. Bu bağlamda, Saatçioğlu ve Razvi modeli dayanım artışını sınırlı öngörmesine karşın, göçme sonrası davranışın temsilinde ve deformasyon kapasitesinin tanımlanmasında kapsamlı bir analitik çerçeve sunmaktadır.

2.3. Dairesel Kesitli Betonarme Kolonların Gerilme-Şekildeğiştirme İlişkileri

2.3.1. 450 mm, 565 mm ve 600 mm dairesel enkesitli kolonun gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi

Bu bölümde, dairesel kesitli betonarme kolonlarda sargı etkisinin betonun mekanik davranışı üzerindeki katkısı, farklı sargılı beton modelleri çerçevesinde incelenmiştir. Bu amaçla literatürde yaygın olarak kullanılan Mander ve ark. (1988) ile Saatçioğlu ve Razvi (1992) modelleri esas alınarak 450 mm, 565 mm ve 600 mm çapındaki kolon kesitleri için doğrusal olmayan davranış analizleri gerçekleştirilmiştir. Özellikle çekirdek betonun sargı donatısı tarafından oluşturulan yanal basınç altında geliştirdiği dayanım artışı ve nihai birim şekildeğiştirme kapasitesi sayısal olarak değerlendirilmiştir. Analiz edilen 450 mm, 565 mm ve 600 mm çapındaki kolonlara ait kesit geometrileri ve donatı düzenleri Tablo 2.17’de özetlenmiştir. Kesit davranışını etkileyen parametrelerin sistematik biçimde incelenebilmesi için boyuna donatı çapı $\Phi 20$ - $\Phi 40$ mm aralığında on bir farklı değer olarak tanımlanmıştır. Buna ek olarak, her bir boyuna donatı düzeni için $\Phi 8$ mm, $\Phi 10$ mm ve $\Phi 12$ mm sargı donatısı ile 50 mm, 75 mm ve 100 mm sargı donatısı aralıkları dikkate alınarak geniş bir parametrik çalışma seti oluşturulmuştur (Foroughi, 2022). Bu yaklaşım, sargı donatısı oranı ve aralığındaki değişimlerin betonun basınç dayanımı, nihai şekildeğiştirme kapasitesi ve süneklik davranışı üzerindeki etkilerinin ayrıntılı biçimde karşılaştırılmasına imkan vermiştir. Tüm modellerde beton sınıfı C30 olarak kabul edilmiştir. Elde edilen gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri, farklı sargılı beton modellerinin dairesel kesitli kolon davranışını belirgin biçimde farklılaştırdığını ortaya koymakta ve bu kesitlerin süneklik ile enerji sönmüleme kapasitesinin değerlendirilmesine önemli katkılar sunmaktadır.

Tablo 2.17. Dairesel enkesitli betonarme kolon modellerinin kesit bilgileri ve detayları

Beton Sınıfı	Boyuna Donatı	Sargı Donatısı	
	Çap (mm)	Çap (mm)	Aralık(mm)
C30	$\Phi 20$ mm	$\Phi 8$ mm $\Phi 10$ mm $\Phi 12$ mm	50 mm 75 mm 100 mm
	$\Phi 22$ mm		
	$\Phi 24$ mm		
	$\Phi 26$ mm		
	$\Phi 28$ mm		
	$\Phi 30$ mm		
	$\Phi 32$ mm		
	$\Phi 34$ mm		
	$\Phi 36$ mm		
	$\Phi 38$ mm		
	$\Phi 40$ mm		
Kolon Kesit Geometrisi			

Mander Sargılı Beton Modeli:

Mander modeli kapsamında tasarlanan dairesel enkesitli kolon modellerinde elde edilen sargılı beton davranışları, farklı parametreler çerçevesinde sistematik olarak analiz edilmiştir. 450 mm enkesit boyutuna sahip dairesel kolon modelleri için hesaplanan sonuçlar, sargı donatısı çapı ve aralıklarına göre Tablo 2.18’de sunulmuştur (Foroughi, 2022). Söz konusu modellerde sargılı betonun gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri, 8 mm, 10 mm ve 12 mm çaplı sargı donatıları dikkate alınarak Şekil 2.19’da detaylı biçimde tanımlanmıştır. 565 mm enkesitli dairesel kolon modelleri için yapılan hesaplamalarda, Mander modeli esas alınarak elde edilen sargılı beton parametreleri Tablo 2.19’da karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Bu modellerde sargılı betonun gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri, farklı sargı donatısı çapı ve aralıkları dikkate alınarak Şekil 2.20’de sunulmuştur (Yüksel ve Foroughi, 2019). 600 mm enkesitli dairesel kolon modelleri için ise sargı etkinlik katsayıları, sargılı beton basınç dayanımları ve gerilme-şekildeğiştirme parametreleri ayrıntılı olarak hesaplanmış ve karşılaştırmalı biçimde Tablo 2.20’de sunulmuştur. Söz konusu modellerde, Mander yaklaşımı doğrultusunda sargılı betonun gerilme-şekildeğiştirme bağıntıları tanımlanmış; farklı sargı donatısı oranlarına karşılık gelen ilişkiler Şekil 2.21’de detaylandırılmıştır (Foroughi, 2022). Bu analizler, Mander modelinin dairesel enkesitli kolonlarda sargı donatısı parametrelerinin dayanım ve deformasyon kapasitesine etkilerini parametrik ve düzenli bir biçimde ortaya koymaktadır. Özellikle sargı donatısı çapı ve aralığının değişimi, sargı etkinliğini ve post-pik davranışı doğrudan etkilemekte, bu da gerilme-şekildeğiştirme eğrilerinde açıkça gözlenebilmektedir.

Tablo 2.18. Mander modeline göre 450 mm dairesel enkesitli kolon modellerinin hesap sonuçları

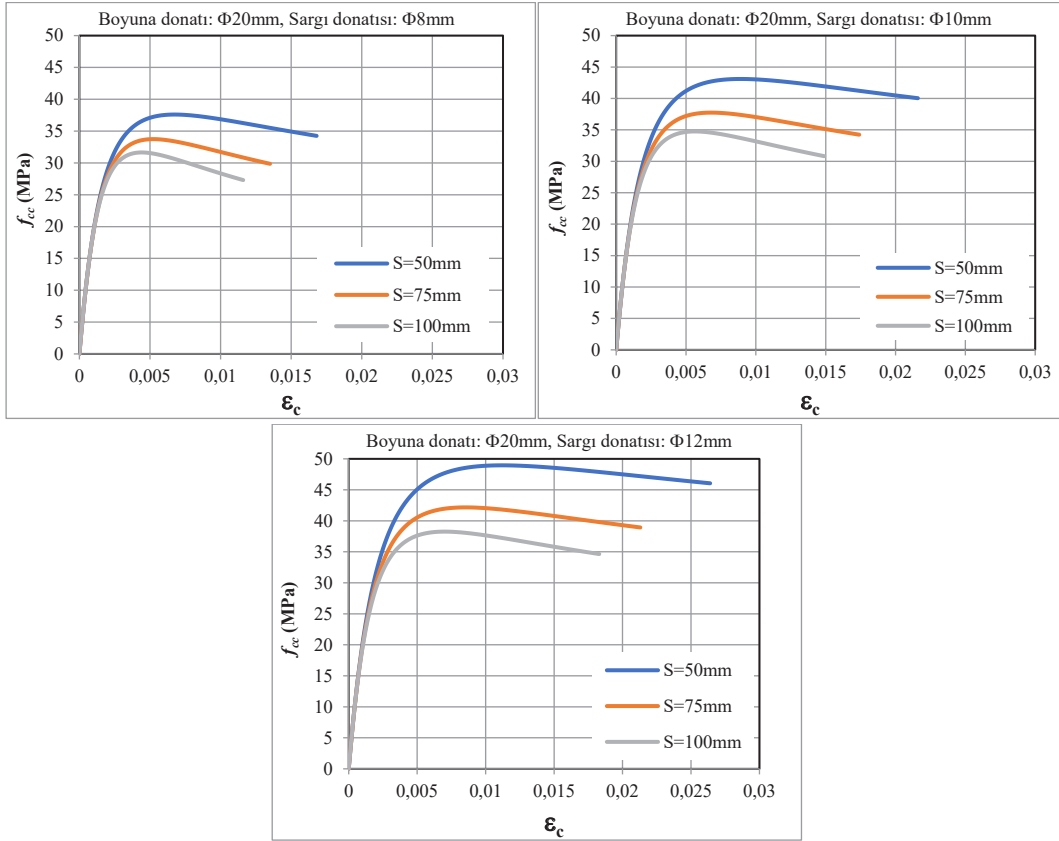
Boyuna Donatı	Sargı Donatısı	k_e	f_l (MPa)	f'_l (MPa)	f'_{cc} (MPa)	ϵ_{cc}	ϵ_{cu}
8 Φ 20 mm	Φ 8/50 mm	0.962	2.15	2.07	37.6	0.0067	0.0168
	Φ 8/75 mm	0.929	1.44	1.33	33.7	0.0052	0.0135
	Φ 8/100 mm	0.897	1.08	0.97	31.6	0.0044	0.0116
	Φ 10/50 mm	0.964	3.38	3.26	43.1	0.0089	0.0216
	Φ 10/75 mm	0.931	2.26	2.10	37.7	0.0068	0.0174
	Φ 10/100 mm	0.899	1.69	1.52	34.8	0.0056	0.0149
	Φ 12/50 mm	0.966	4.90	4.73	49.0	0.0112	0.0264
	Φ 12/75 mm	0.934	3.26	3.05	42.2	0.0085	0.0213
	Φ 12/100 mm	0.901	2.45	2.21	38.3	0.0070	0.0183

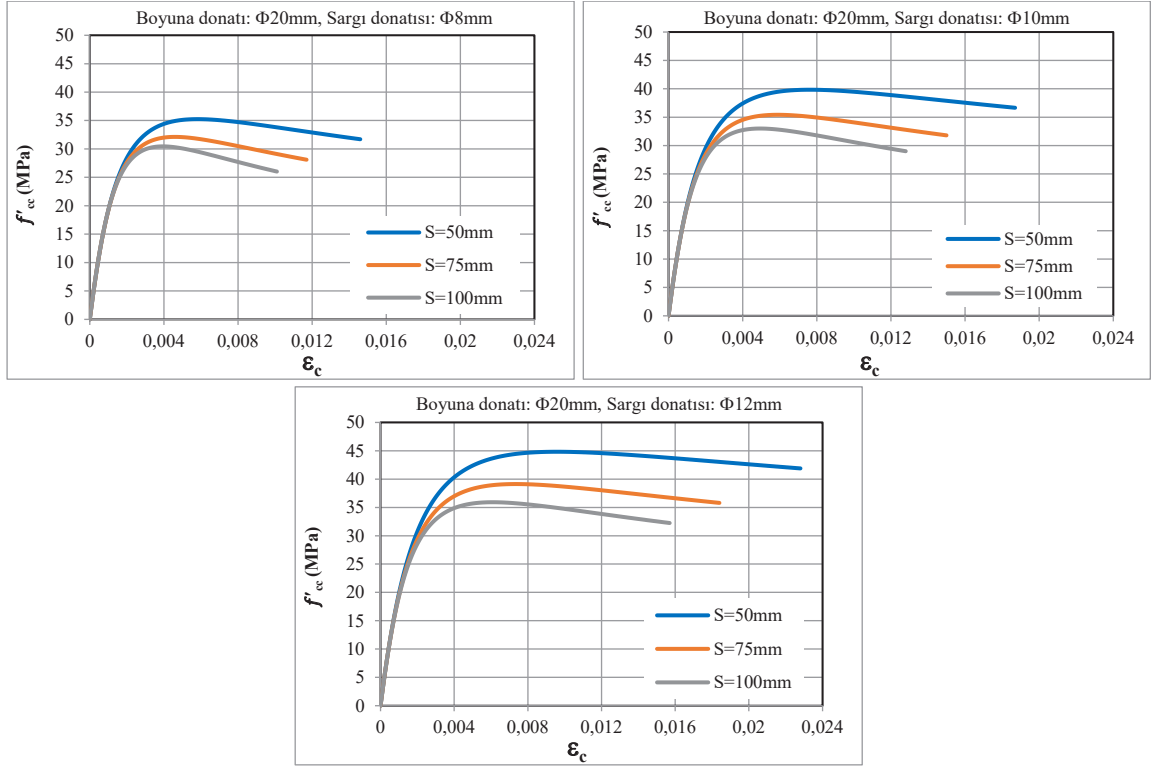
Tablo 2.19. Mander modeline göre 565 mm dairesel enkesitli kolon modellerinin hesap sonuçları

Boyuna Donatı	Sargı Donatısı	k_e	f_l (MPa)	f'_l (MPa)	f'_{cc} (MPa)	ϵ_{cc}	ϵ_{cu}
8 Φ 20 mm	Φ 8/50	0.968	1.66	1.61	35.24	0.0085	0.0145
	Φ 8/75	0.943	1.11	1.05	32.12	0.0046	0.0117
	Φ 8/100	0.918	0.83	0.77	30.45	0.0039	0.0101
	Φ 10/50	0.970	2.61	2.53	39.83	0.0076	0.0187
	Φ 10/75	0.945	1.74	1.64	35.42	0.0059	0.0150
	Φ 10/100	0.920	1.30	1.20	33.00	0.0049	0.0128
	Φ 12/50	0.972	3.77	3.67	44.82	0.0095	0.0228
	Φ 12/75	0.946	2.52	2.38	39.12	0.0073	0.0184
	Φ 12/100	0.921	1.88	1.74	35.91	0.0060	0.0157

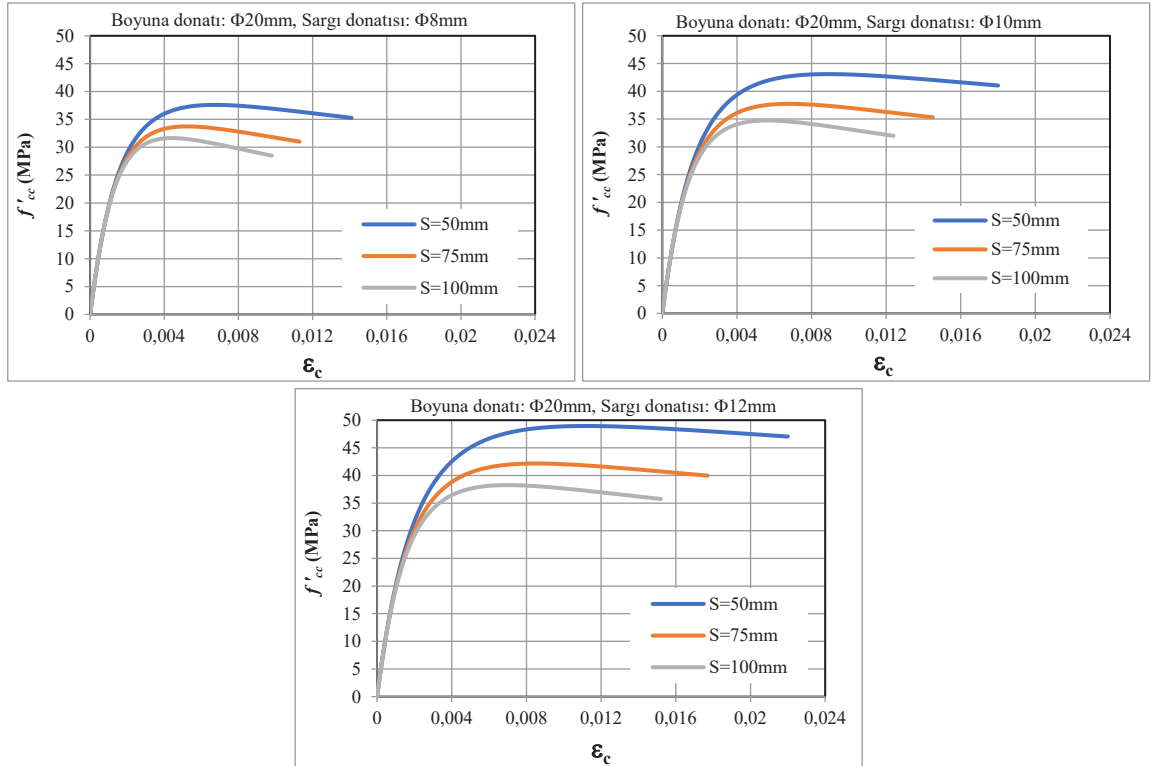
Tablo 2.20. Mander modeline göre 600mm dairesel enkesitli kolon modellerinin hesap sonuçları

Boyuna Donatı	Sargı Donatısı	k_e	f_t (MPa)	f'_t (MPa)	f'_{cc} (MPa)	ϵ_{cc}	ϵ_{cu}
10 Φ 20 mm	Φ 8/50 mm	0.972	1.56	1.51	34.7	0.0056	0.0141
	Φ 8/75 mm	0.949	1.04	0.99	31.8	0.0045	0.0113
	Φ 8/100 mm	0.925	0.78	0.72	30.2	0.0038	0.0098
	Φ 10/50 mm	0.974	2.44	2.38	39.1	0.0073	0.0180
	Φ 10/75 mm	0.950	1.63	1.55	34.9	0.0057	0.0145
	Φ 10/100 mm	0.927	1.22	1.13	32.6	0.0048	0.0124
	Φ 12/50 mm	0.976	3.53	3.45	43.9	0.0092	0.0220
	Φ 12/75 mm	0.952	2.35	2.24	38.4	0.0071	0.0177
	Φ 12/100 mm	0.929	1.77	1.64	35.4	0.0059	0.0152

**Şekil 2.19.** Mander modeline göre 450 mm enkesitli kolonların gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri



Şekil 2.20. Mander modeline göre 565 mm enkesitli kolonların gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri



Şekil 2.21. Mander modeline göre 600 mm enkesitli kolonların gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri

Saatçioğlu ve Ravzi Sargılı Beton Modeli:

450 mm dairesel enkesitli betonarme kolon modelleri için, Saatçioğlu ve Ravzi modeli temel alınarak yapılan hesaplamaların sonuçları Tablo 2.21’de sunulmuştur. Söz konusu modellerde, farklı sargı donatısı oranları için sargılı betonun gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri Şekil 2.22’de detaylı olarak tanımlanmıştır.

565 mm çapındaki dairesel enkesite sahip kolon modelleri için elde edilen hesap sonuçları Tablo 2.22’de karşılaştırmalı biçimde verilmiştir. Aynı modeller kapsamında sargılı betonun gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri ise farklı sargı donatısı oranları dikkate alınarak Şekil 2.23’te gösterilmiştir.

600 mm dairesel enkesitli betonarme kolon modellerinde, Saatçioğlu ve Ravzi modeline göre yapılan hesaplamaların sonuçları Tablo 2.23’te özetlenmiştir. Bu modellerde sargılı betonun gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri ise Şekil 2.24’te sunulmuştur. Bu analizler, Saatçioğlu ve Ravzi modeli çerçevesinde dairesel enkesitli kolonlarda sargı donatısı parametrelerinin dayanım ve deformasyon davranışına etkilerini sistematik ve parametrik bir şekilde ortaya koymaktadır.

Tablo 2.21. Saatçioğlu ve Ravzi modeline göre 450 mm dairesel enkesitli kolon modellerinin hesap sonuçları

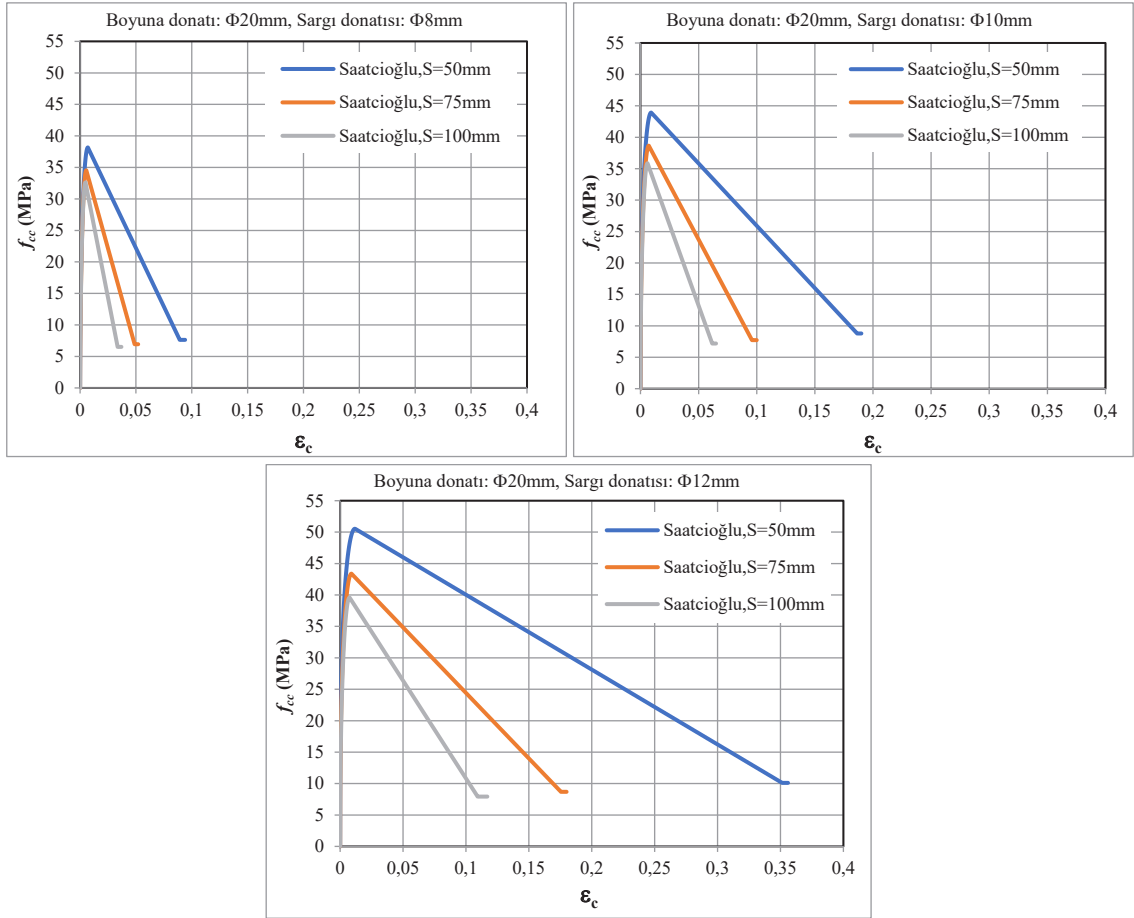
Boyuna Donatı	Sargı Donatısı	σ_2 (MPa)	k_1	f_{cc} (MPa)	ϵ_{coc}	ϵ_{c85}	ϵ_{c20}
8 Φ 20 mm	Φ 8/50 mm	2.15	5.88	38.2	0.0070	0.0224	0.0892
	Φ 8/75 mm	1.44	6.30	34.5	0.0055	0.0137	0.0488
	Φ 8/100 mm	1.08	6.62	32.6	0.0048	0.0102	0.0336
	Φ 10/50 mm	3.38	4.45	43.9	0.0092	0.0424	0.1864
	Φ 10/75 mm	2.26	5.83	38.7	0.0072	0.0238	0.0959
	Φ 10/10mm	1.69	6.13	35.9	0.0061	0.0165	0.0617
	Φ 12/50 mm	4.90	5.11	50.5	0.0118	0.0755	0.3513
	Φ 12/75 mm	3.26	5.48	43.4	0.0090	0.0402	0.1755
	Φ 12/100 mm	2.45	5.75	39.6	0.0075	0.0266	0.1093

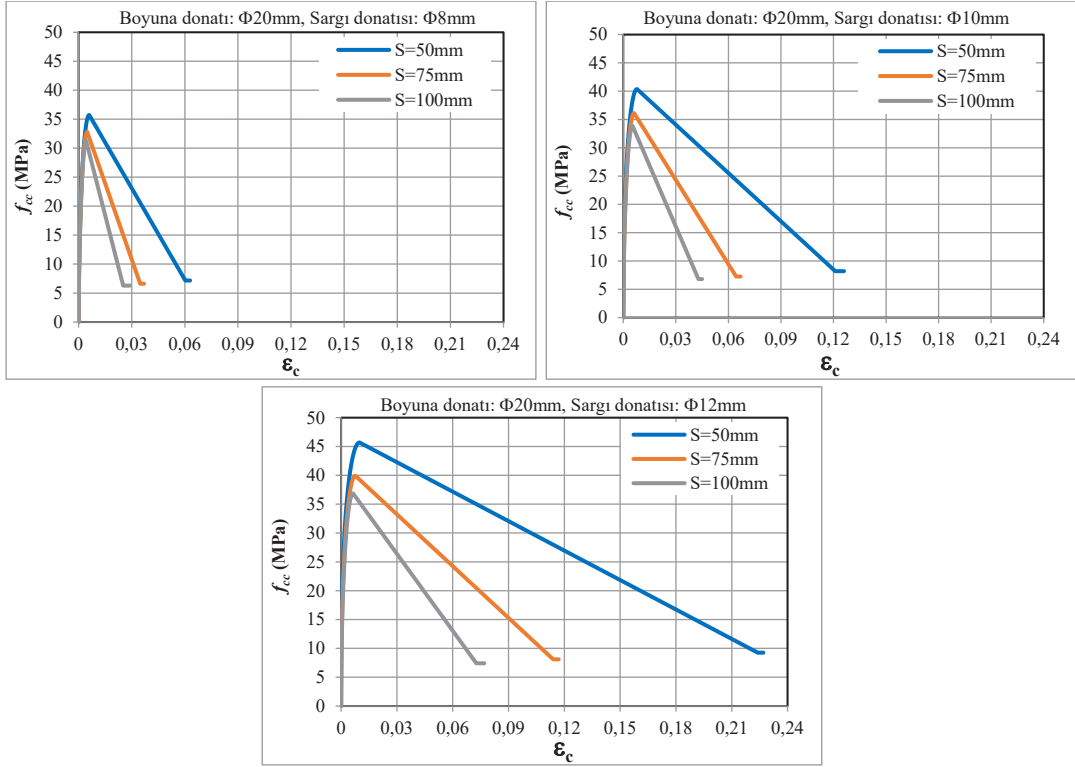
Tablo 2.22. Saatçioğlu ve Ravzi modeline göre 565 mm dairesel enkesitli kolon modellerinin hesap sonuçları

Boyuna Donatı	Sargı Donatısı	σ_2 (MPa)	k_1	f_{cc} (MPa)	ϵ_{coc}	ϵ_{c85}	ϵ_{c20}
8 Φ 20 mm	Φ 8/50 mm	1.67	6.14	35.7	0.0060	0.0162	0.0603
	Φ 8/75 mm	1.11	6.58	32.8	0.0048	0.0104	0.0348
	Φ 8/100 mm	0.83	6.91	31.3	0.0042	0.0081	0.0252
	Φ 10/50 mm	2.61	5.69	40.4	0.0078	0.0291	0.1214
	Φ 10/75 mm	1.74	6.10	36.1	0.0061	0.0170	0.0644
	Φ 10/100 mm	1.31	6.40	33.9	0.0052	0.0123	0.0429
	Φ 12/50 mm	3.78	5.35	45.7	0.0099	0.0501	0.2246
	Φ 12/75 mm	2.52	5.73	39.9	0.0076	0.0276	0.1143
	Φ 12/100 mm	1.89	6.01	36.9	0.0064	0.0189	0.0727

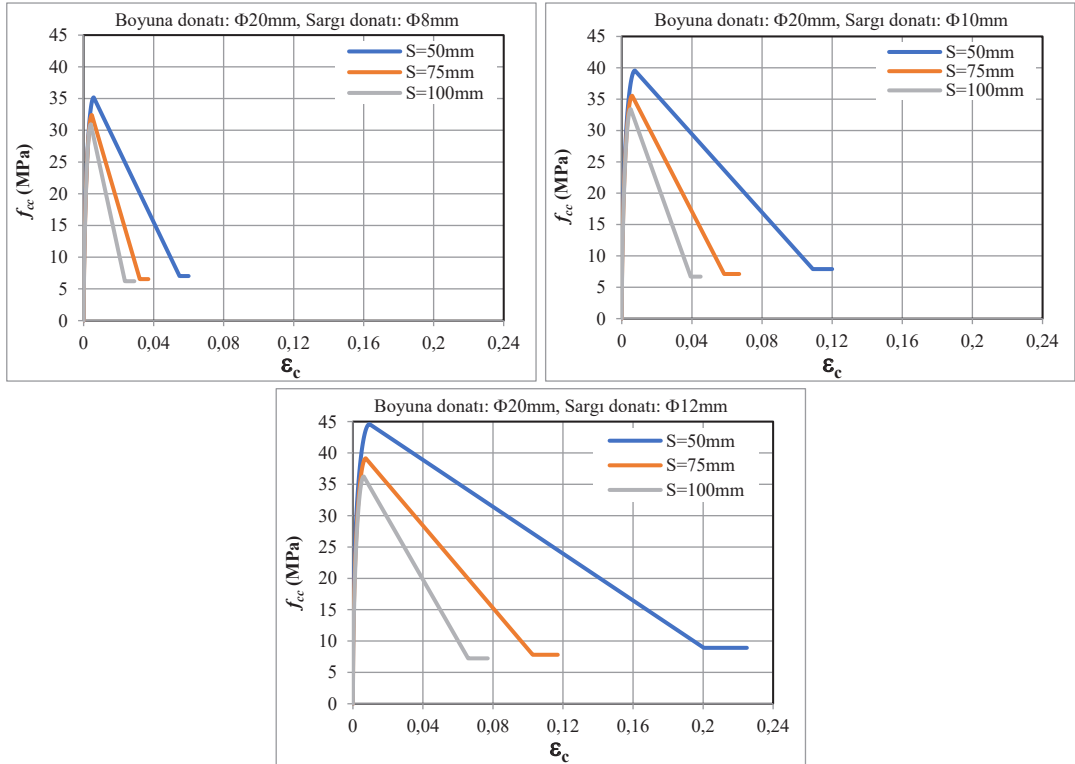
Tablo 2.23. Saatçioğlu ve Ravzi modeline göre 600 mm dairesel enkesitli kolon modellerinin hesap sonuçları

Boyuna Donatı	Sargı Donatısı	σ_2 (MPa)	k_1	f_{cc} (MPa)	ϵ_{coc}	ϵ_{c85}	ϵ_{c20}
10 Φ 20 mm	Φ 8/50 mm	1.56	6.21	35.2	0.0058	0.0150	0.0548
	Φ 8/75 mm	1.04	6.66	32.4	0.0047	0.0099	0.0322
	Φ 8/100 mm	0.78	6.99	30.9	0.0041	0.0078	0.0236
	Φ 10/50 mm	2.44	5.76	39.6	0.0075	0.0265	0.1090
	Φ 10/75 mm	1.63	6.17	35.5	0.0059	0.0158	0.0584
	Φ 10/100 mm	1.22	6.48	33.4	0.0051	0.0115	0.0393
	Φ 12/50 mm	3.53	5.41	44.6	0.0095	0.0453	0.2004
	Φ 12/75 mm	2.35	5.79	39.1	0.0073	0.0252	0.1027
	Φ 12/100 mm	1.77	6.08	36.2	0.0062	0.0174	0.0658

**Şekil 2.22.** Saatçioğlu ve Ravzi modeline göre 450 mm enkesitli kolonların gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri



Şekil 2.23. Saatçioğlu ve Ravzi modeline göre 565 mm enkesitli kolonların gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri



Şekil 2.24. Saatçioğlu ve Ravzi modeline göre 600 mm enkesitli kolonların gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri

Mander ile Saatçioğlu ve Razvi modellerinin sargılı beton davranışına etkilerinin karşılaştırmalı incelenmesi:

450 mm dairesel enkesitli betonarme kolon modellerinde, Mander ve Saatçioğlu ve Razvi modellerine göre hesaplanan sargılı beton dayanımı ve maksimum gerilmeye karşılık gelen birim kısalma değerlerinin karşılaştırması Tablo 2.24'te sunulmuştur. Bu kolonların gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri, her iki model açısından Şekil 2.25'te gösterilmiştir.

565 mm enkesitli dairesel kolon modellerinde, aynı modeller çerçevesinde elde edilen sargılı beton dayanımı ve maksimum gerilmeye karşılık gelen birim kısalma değerlerinin karşılaştırması Tablo 2.25'te verilmiştir. Bu modellerin gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri, Mander ve Saatçioğlu-Razvi yaklaşımlarına göre Şekil 2.26'da detaylandırılmıştır.

600 mm enkesitli dairesel kolon modellerinde yapılan hesaplamalarda ise, Mander ve Saatçioğlu-Razvi modellerine göre sargılı beton dayanımı ve maksimum gerilmeye karşılık gelen birim kısalma değerlerinin karşılaştırması Tablo 2.26'da sunulmuştur. 600 mm dairesel enkesitli kolonların gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri, her iki modelin hesaplanan gerilme-şekildeğiştirme ilişkilerini karşılaştırmalı olarak Şekil 2.27'de verilmiştir. Bu karşılaştırmalar, Mander ile Saatçioğlu ve Razvi modellerinin sargılı beton dayanımı ve deformasyon kapasitesini farklı biçimlerde tahmin ettiğini ortaya koymaktadır.

Tablo 2.24. Farklı sargılı beton modellere göre 450 mm enkesitli kolonların hesap sonuçların karşılaştırması

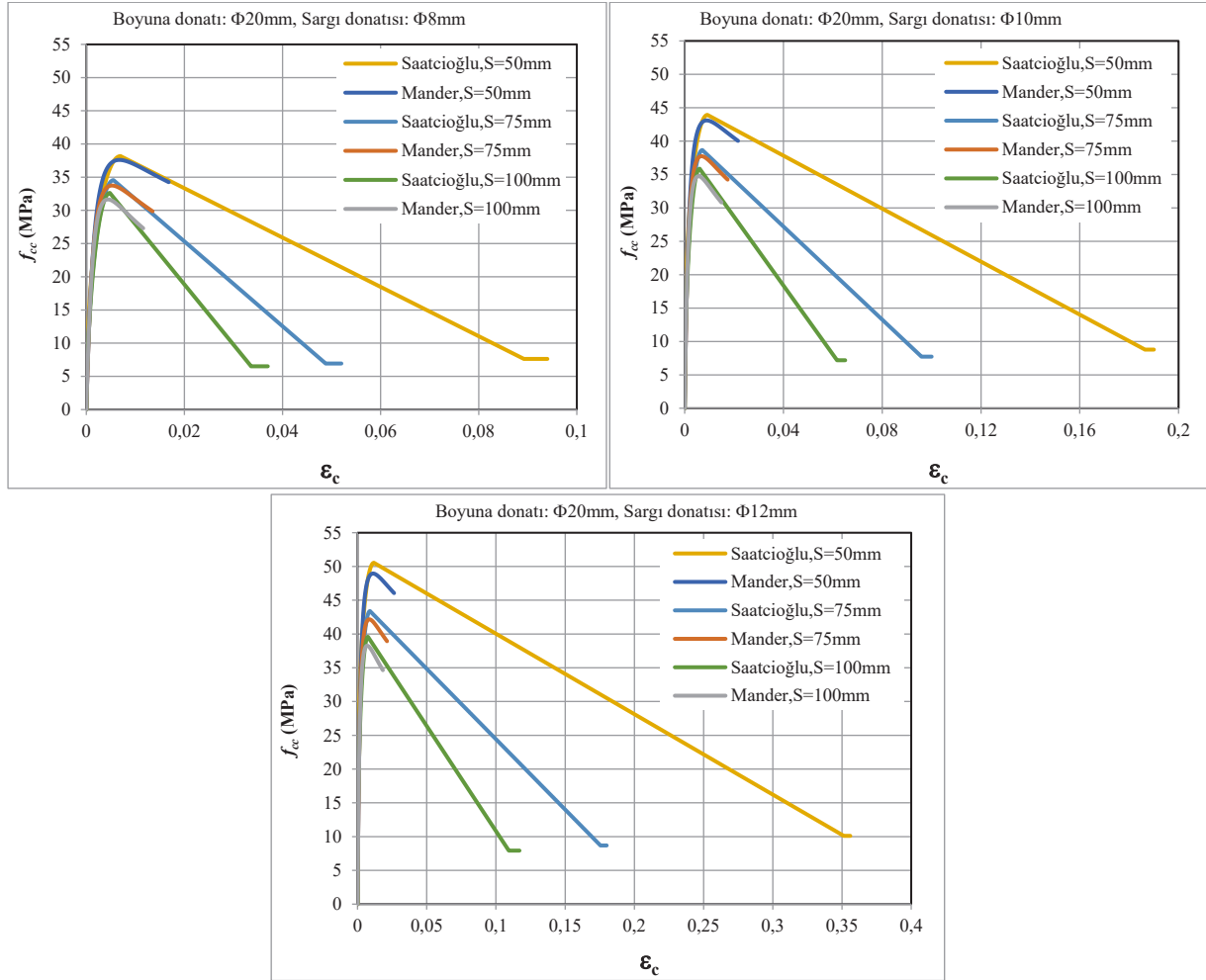
Boyuna Donatı	Sargı Donatısı	Mander Modeli		Saatçioğlu-Razvi Modeli	
		f'_{cc} (MPa)	ϵ_{cc}	f_{cc} (MPa)	ϵ_{c0c}
8Φ20 mm	Φ8/50 mm	37.6	0.0067	38.2	0.0070
	Φ8/75 mm	33.7	0.0052	34.5	0.0055
	Φ8/100 mm	31.6	0.0044	32.6	0.0048
	Φ10/50 mm	43.1	0.0089	43.9	0.0092
	Φ10/75 mm	37.7	0.0068	38.7	0.0072
	Φ10/100 mm	34.8	0.0056	35.9	0.0061
	Φ12/50 mm	49.0	0.0112	50.5	0.0118
	Φ12/75 mm	42.2	0.0085	43.4	0.0090
	Φ12/100 mm	35.4	0.0059	39.6	0.0075

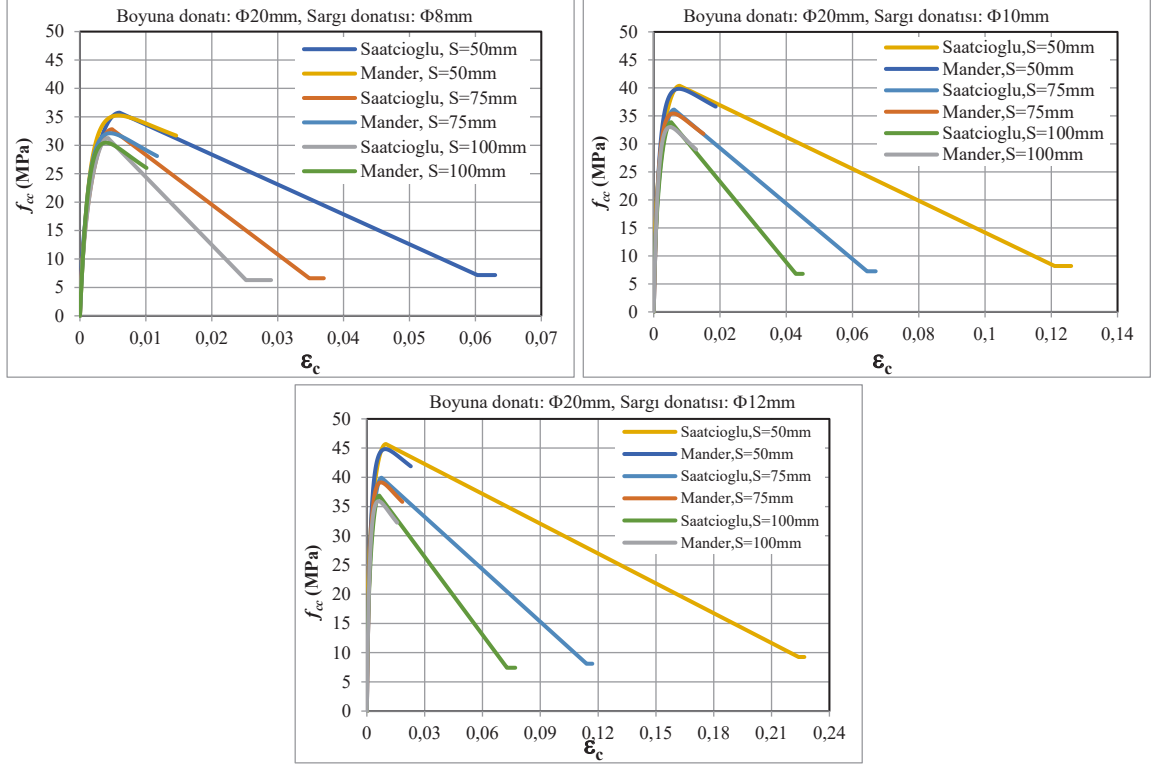
Tablo 2.25. Farklı sargılı beton modellere göre 565 mm enkesitli kolonların hesap sonuçların karşılaştırması

Boyuna Donatı	Sargı Donatısı	Mander Modeli		Saatçioğlu-Razvi Modeli	
		f'_{cc} (MPa)	ϵ_{cc}	f_{cc} (MPa)	ϵ_{c0c}
8Φ20 mm	Φ8/50 mm	35.2	0.0085	35.7	0.0060
	Φ8/75 mm	32.1	0.0046	32.8	0.0048
	Φ8/100 mm	30.5	0.0039	31.3	0.0042
	Φ10/50 mm	39.8	0.0076	40.4	0.0078
	Φ10/75 mm	35.4	0.0059	36.1	0.0061
	Φ10/100 mm	33.0	0.0049	33.9	0.0052
	Φ12/50 mm	44.8	0.0095	45.7	0.0099
	Φ12/75 mm	39.1	0.0073	39.9	0.0076
	Φ12/100 mm	35.9	0.0060	36.9	0.0064

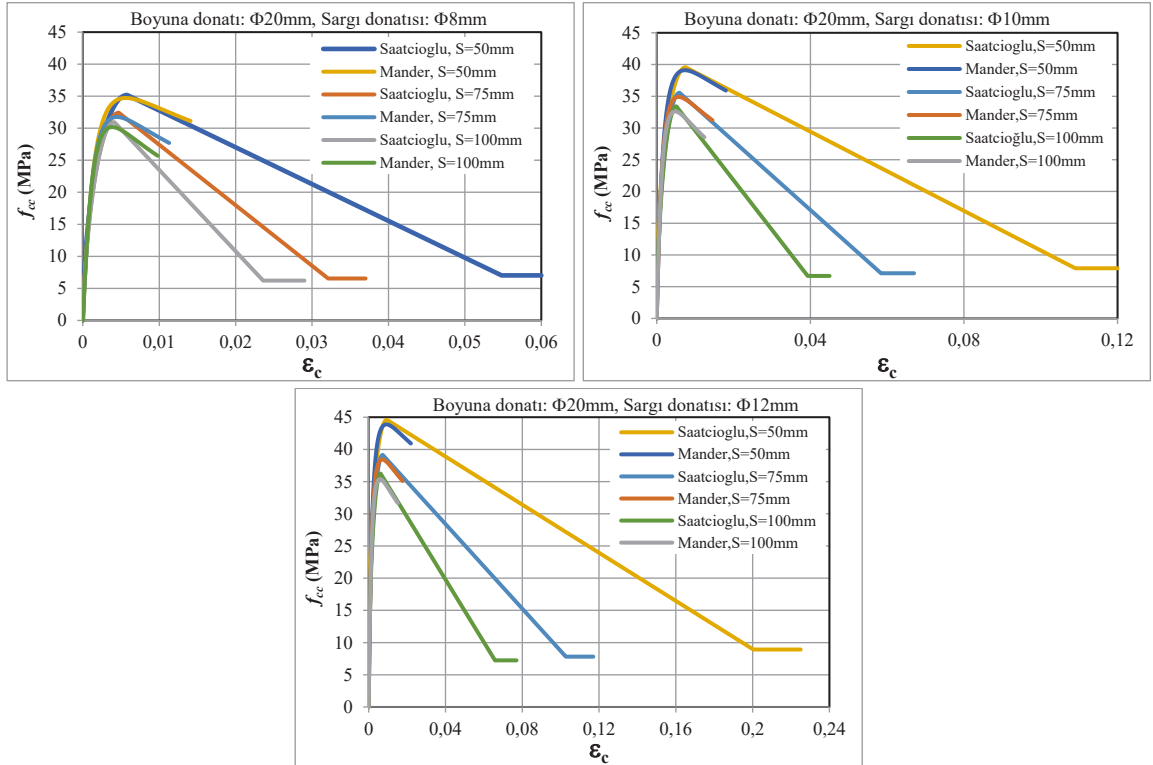
Tablo 2.26. Farklı sargılı beton modellere göre 600 mm enkesitli kolonların hesap sonuçlarının karşılaştırması

Boyuna Donatı	Sargı Donatısı	Mander Modeli		Saatciöğlü-Razvi Modeli	
		f'_{cc} (MPa)	ϵ_{cc}	f_{cc} (MPa)	ϵ_{coc}
10 Φ 20 mm	Φ 8/50 mm	34.7	0.0056	35.2	0.0058
	Φ 8/75 mm	31.8	0.0045	32.4	0.0047
	Φ 8/100 mm	30.2	0.0038	30.9	0.0041
	Φ 10/50 mm	39.1	0.0073	39.6	0.0075
	Φ 10/75 mm	34.9	0.0057	35.5	0.0059
	Φ 10/100 mm	32.6	0.0048	33.4	0.0051
	Φ 12/50 mm	43.9	0.0092	44.6	0.0095
	Φ 12/75 mm	38.4	0.0071	39.1	0.0073
	Φ 12/100 mm	35.4	0.0059	36.2	0.0062

**Şekil 2.25.** Farklı sargılı beton modellere göre 450 mm enkesitli kolonlar için elde edilen hesap sonuçlarının karşılaştırılması



Şekil 2.26. Farklı sargılı beton modellere göre 565 mm enkesitli kolonlar için elde edilen hesap sonuçlarının karşılaştırılması



Şekil 2.27. Farklı sargılı beton modellere göre 600 mm enkesitli kolonlar için elde edilen hesap sonuçlarının karşılaştırılması

Mander modeline göre davranışın değerlendirilmesi:

Mander modeline göre yapılan analizler, 450 mm, 565 mm ve 600 mm çaplı dairesel kolon modellerinde sargı donatısının dayanım ve deformasyon kapasitesi üzerindeki etkilerini kapsamlı biçimde ortaya koymaktadır. Elde edilen sonuçlar, kesit boyutu farklılıklarına rağmen sargı donatısının temel davranış mekanizmasının benzer eğilimler sergilediğini göstermektedir. Tüm kesit boyutlarında, sargı donatısı çapının artması etkin yanal basınç değerlerinin yükselmesine ve çekirdek betonun üç eksenli basınç durumu altında daha kararlı bir davranış sergilemesine neden olmaktadır. Bu durum, sargı yoğunluğunun artmasıyla birlikte hem f'_{cc} hem de ε_{cc} ve ε_{cu} değerlerinde belirgin bir artışa yol açmaktadır. Özellikle $\Phi 12/50$ mm sargı düzenlemelerinde, tüm kesit boyutlarında hem dayanım hem de deformasyon kapasitesinin eş zamanlı olarak geliştirilmesi, yoğun sargının çekirdek betonu üzerindeki etkinliğini ortaya koymaktadır. Etkin sargı katsayıları (k_e), tüm kesit boyutlarında yüksek değerler almakta ve dairesel kesit geometrisinin sargı donatısının çekirdek beton üzerinde yüksek derecede etkin ve sürekli bir çevresel sargılama etkisi sağladığını göstermektedir. Mander modeline göre sargılı beton davranışı, tüm dairesel kesit boyutlarında aşağıdaki temel özellikleri sergilemektedir:

- Sargı donatısı çapı ve aralığı, maksimum dayanım ve birim şekildeğiştirme kapasitesini belirleyen kritik parametrelerdir.
- Post-pik bölgede kademeli gerilme azalımı, sargının göçme sürecini kontrol altına almasını sağlar ve ani dayanım kayıplarını önler.
- Kesit boyutu arttıkça çekirdek beton hacminin büyümesi sargının etkinliğini kısmen azaltabilse de, uygun sargı yoğunluğu ve aralığıyla bu etki dengelenebilmektedir.
- Tüm kesitlerde sargı donatısı, hem dayanım hem de deformasyon kapasitesini eş zamanlı olarak iyileştirmekte ve post-pik davranışın daha stabil olmasını sağlamaktadır.

Bu bulgular, Mander modelinin dairesel kolonlarda sargı donatısının performansını parametrik olarak öngördüğünü ve kesit boyutundan bağımsız olarak aynı temel davranış mekanizmasını takip ettiğini ortaya koymaktadır. Dolayısıyla, Mander modeline göre tasarlanan dairesel kolonlarda sargı etkinliği, hem dayanım hem de süneklik açısından tutarlı ve öngörülebilir bir etki sergilemektedir.

Saatçioğlu ve Razvi modeline göre davranışın değerlendirilmesi:

Saatçioğlu ve Razvi (1992) modeli kapsamında yapılan analizler, 450 mm, 565 mm ve 600 mm çaplı dairesel kolonlarda sargı donatısının dayanım ve deformasyon kapasitesine etkilerini kapsamlı biçimde ortaya koymaktadır. Elde edilen sonuçlar, kesit boyutları farklı olsa da modelin temel davranış eğilimlerinin tüm kesitlerde tutarlı biçimde gözlemlendiğini göstermektedir. Tüm kesit boyutlarında, sargı etkisini Mander modeline kıyasla, maksimum dayanım artışlarını daha sınırlı ve kontrollü biçimde tahmin etmektedir. Maksimum dayanım değerleri Mander modeline yakın olmakla birlikte, post-pik davranışı temsil eden ε_{c85} ve ε_{c20} birim kısalma parametreleri belirgin farklılık göstermektedir. Özellikle $\Phi 12/50$ mm sık sargı düzenlemelerinde, ε_{c20} değerlerinin yüksekliği tüm kesitlerde ileri deformasyon seviyelerinde beton çekirdeğinin göçme sonrası taşıma kapasitesini önemli ölçüde koruduğunu ve enerji tüketme kapasitesini artırdığını göstermektedir. Sargı donatısı aralığının artırılmasıyla birlikte, hem maksimum dayanım hem de deformasyon kapasitesinde belirgin azalmalar gözlenmektedir. Bu eğilim, modelin tüm kesitlerde sargının hem dayanım hem de süneklik üzerindeki kritik rolünü vurguladığını göstermektedir.

3. BETONARME ELEMANLARIN MOMENT-EĞRİLİK İLİŞKİLERİ VE SÜNEKLİK DAVRANIŞI

3.1. Moment-Eğrilik İlişkisi

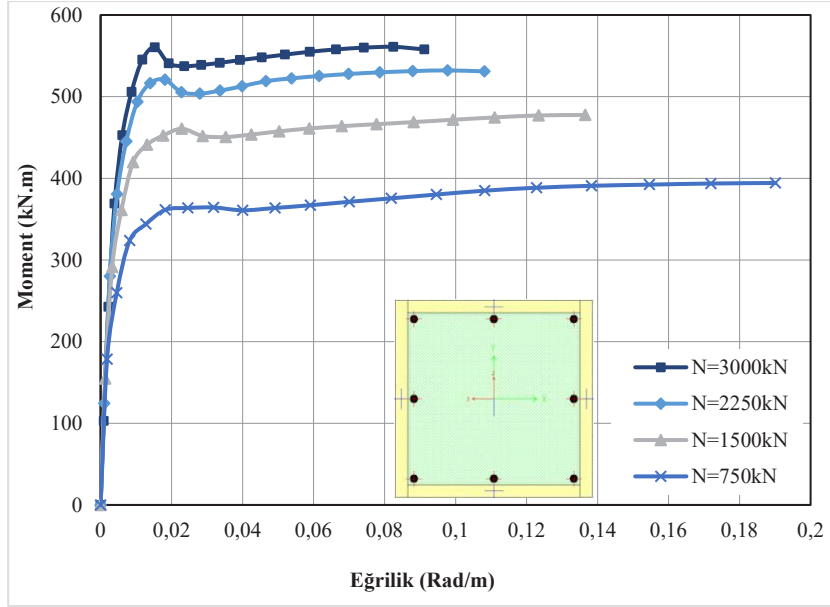
Moment-eğrilik ilişkisi, betonarme elemanların kesit düzeyindeki doğrusal olmayan davranışlarını tanımlamak amacıyla geliştirilmiş temel analitik yaklaşımlardan biridir. Bu ilişki, bir kesitte oluşan iç moment ile kesitte meydana gelen eğrilik arasındaki bağlantıyı esas almakta ve elemanların dayanım, rijitlik, süneklik ile enerji yutma kapasitelerinin belirlenmesine olanak sağlamaktadır (Park ve Paulay, 1975; MacGregor ve Wight, 2012). Özellikle deprem etkisi altındaki betonarme yapıların performans değerlendirilmesinde moment-eğrilik analizi, plastik mafsal oluşumu ve göçme mekanizmalarının anlaşılmasında kritik bir araçtır (Paulay ve Priestley, 1992; Chopra, 2017).

Moment-eğrilik analizinin temel varsayımı, düzlem kesitlerin şekildeğiştirme sonrasında da düzlem kalmasıdır. Bu varsayım doğrultusunda beton ve donatı çeliğinin birim şekildeğiştirmeleri eğrilik ile ilişkilendirilir ve kesitteki iç kuvvet dengesi malzeme davranış modelleri aracılığıyla sağlanır. Eğrilik artışıyla birlikte beton ve donatıdaki doğrusal olmayan davranışlar, kesitin moment taşıma kapasitesi ve süneklik özelliklerinin belirlenmesinde temel parametreler olarak değerlendirilir (Mander ve ark., 1988).

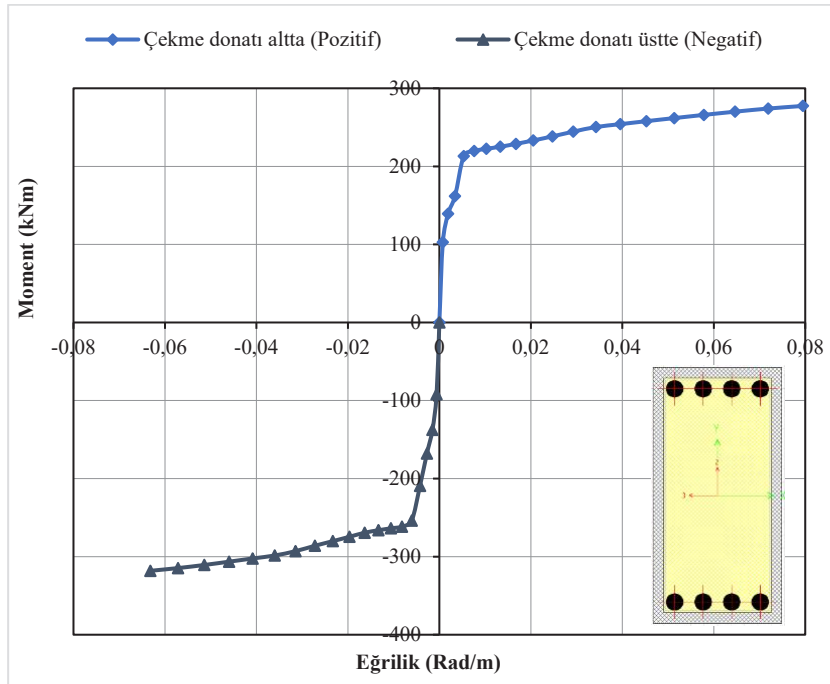
Tipik bir moment-eğrilik eğrisi, elastik, akma ve akma sonrası olmak üzere üç temel davranış bölgesine ayrılır. Elastik bölgede kesit davranışı büyük ölçüde doğrusal olup, rijitlik beton ve donatının birlikte çalışmasıyla belirlenir. Donatının akma sınırına ulaşmasıyla plastik şekildeğiştirmeler gelişir ve eğrilik artışı hızlanır. Akma sonrası bölgede ise betonun ezilme davranışı ile donatı çeliğinin sünekliği, kesitin nihai moment ve eğrilik kapasitesini belirleyen başlıca unsurlardır (Park ve Paulay, 1975; Paulay ve Priestley, 1992; Mander ve ark., 1988).

Moment-eğrilik ilişkisi, kesit dayanımının yanı sıra kesit sünekliği ve plastik dönme kapasitesinin belirlenmesinde de temel bir çerçeve sunar. Kesit sünekliği genellikle nihai eğriliğin akma eğriliğine oranı ile tanımlanır ve deprem sırasında enerji yutma kapasitesini temsil eden analitik bir performans göstergesi olarak değerlendirilir.

Moment-eğrilik ilişkilerinin doğru bir şekilde belirlenmesinde, beton ve donatı çeliğinin gerilme-şekildeğiştirme modellerinin gerçekçi olarak kullanılması esastır. Bu ilişkiler, kesit mukavemeti, eğilme rijitliği ve sünekliğinin tahmin edilmesinde kritik öneme sahiptir ve doğrusal olmayan analizlerde zorunlu girdi olarak kullanılmaktadır (Foroughi ve ark., 2021). Şekil 3.1’de betonarme kolon, kiriş ve perde duvarlar için tipik moment-eğrilik ilişkileri şematik olarak gösterilmektedir. Bu ilişkiler, sismik yük altında betonarme yapıların performansının güvenilir bir şekilde değerlendirilmesi ve sünek tasarım ilkelerinin uygulanabilmesi için temel bir referans niteliği taşır.



Betonarme kolon, perde duvar

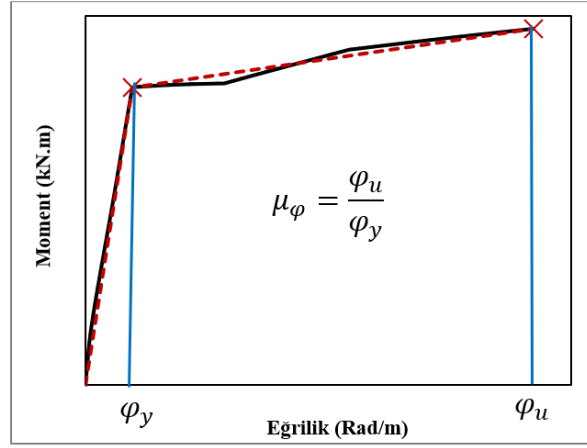


Betonarme kiriş

Şekil 3.1. Betonarme yapısal elemanların tipik moment-eğrilik ilişkileri

3.2. Betonarme Yapısal Elemanların Eğrilik Sünekliği

Eğrilik sünekliği (μ_ϕ), betonarme yapısal elemanların deprem etkileri altında elastik sınırların ötesinde, ani dayanım kaybı olmaksızın büyük şekildeğiştirmelere izin verebilme kapasitesini tanımlayan temel bir kesit parametresidir. Deprem mühendisliği perspektifinden süneklik, yapıların göçme öncesi davranışlarının kontrol edilebilir olmasını sağlamakta ve böylece yapısal güvenlik ile enerji sönümlenme kapasitesinin artırılmasına olanak tanımaktadır. Bu bağlamda, eğrilik sünekliği, sünekliğin kesit düzeyinde ölçülebilir bir performans parametresi olarak kabul edilmektedir (Park ve Paulay, 1975; Paulay ve Priestley, 1992). Eğrilik sünekliği genellikle nihai eğriliğin akma eğriliğine oranı ($\mu_\phi = \phi_u / \phi_y$) olarak ifade edilmektedir. ϕ_y , akma anındaki eğriliği, ϕ_u , göçme durumuna karşılık gelen nihai eğriliği temsil etmektedir (Şekil 3.2).



Şekil 3.2. Eğrilik-sünekliği değerlerinin hesaplanması

Eğrilik süneklik oranı, betonarme elemanların plastik dönme kapasitesi ve enerji yutma potansiyeli ile doğrudan ilişkilidir. Yani, μ_ϕ değeri yüksek olan bir kesit, deprem sırasında daha yüksek deformasyon kapasitesine ve daha etkin enerji sönümlenme yeteneğine sahiptir (Priestley ve ark., 2007). Dolayısıyla eğrilik sünekliği, hem yapı elemanlarının güvenliğini değerlendirmek hem de performansa dayalı tasarım ilkelerine uygun analizler gerçekleştirmek için kritik bir parametre olarak ön plana çıkmaktadır.

Eğrilik sünekliği üzerinde etki eden faktörler çok yönlüdür. Beton ve donatı çeliğinin mekanik özellikleri, kesit geometrisi, donatı düzeni ve eksenel yük seviyesi, sünekliğin belirlenmesinde temel rol oynamaktadır. Özellikle sargı donatısının beton çekirdek bölgesindeki etkinliği, betonun basınç altındaki şekildeğiştirme kapasitesini artırmakta ve böylece nihai eğriliğin yükselmesine, dolayısıyla eğrilik sünekliğinin artmasına katkı sağlamaktadır (Mander ve ark., 1988; Saatçioğlu ve Razvi, 1992). Bu çerçevede, eğrilik sünekliği, moment-eğrilik ilişkileri ile bütünleşik bir şekilde ele alınmalı ve betonarme elemanların deprem etkisi altındaki doğrusal olmayan davranışlarının analitik ve deneysel yöntemlerle güvenilir biçimde belirlenmesinde kullanılmalıdır. Böylece, yapı elemanlarının enerji yutma kapasitesi, plastik dönme davranışı ve performans hedefleri sistematik biçimde değerlendirilebilmektedir.

3.3. Betonarme Kirişler için Eğrilik-Süneklik Yaklaşımları

Betonarme kirişlerin eğrilik sünekliği, yapıların deprem performansını belirleyen temel parametrelerden biri olarak kabul edilmektedir. Bu nedenle literatürde, kirişlerin elastik sınırların ötesinde deformasyon kapasitesini ve enerji yutma davranışını değerlendirebilmek amacıyla, çeşitli analitik ve deneysel yaklaşımlar geliştirilmiştir. Araştırmalar, farklı beton sınıfları, donatı düzenleri ve kesit tiplerine bağlı olarak eğrilik-süneklik ilişkilerini tanımlamaya odaklanmıştır; özellikle tek donatılı ve çift donatılı kirişler üzerinde moment-eğrilik analizleri kullanılarak kapsamlı değerlendirmeler yapılmıştır.

Statik yükler altında normal ve yüksek dayanımlı betonarme kirişlerin sünekliği ve eğilme davranışı ile ilgili çok sayıda çalışma literatürde yer almaktadır (Pam ve ark., 2001a; 2001b; Ho ve ark., 2004; Rashid ve Mansur, 2005; Jang ve ark., 2008; Lam ve ark., 2009a; 2009b; Arslan ve Cihanli, 2010; Au ve ark., 2011; Bai ve Au, 2011; Lee, 2013). Bu çalışmaların önemli bir kısmı, kirişlerin kesit özellikleri, donatı oranları ve malzeme dayanımlarının süneklik ve moment kapasitesi üzerindeki etkilerini incelemiştir.

Literatürde önerilen ilişkiler temel alınarak farklı beton basınç dayanımları ve basınç ile çekme donatı oranlarına sahip çift donatılı betonarme kiriş modellerinin eğilme sünekliği analitik olarak değerlendirilmiştir. Bu bağlamda, Kwan ve Ho (2010), Kwan ve ark. (2002), Lee (2013) ve Pam ve ark. (2001a) tarafından önerilen analitik ilişkiler kullanılarak çift donatılı kirişlerin eğrilik sünekliği incelenmiş ve bu elemanların süneklik kapasitelerini tanımlayan temel denklemler aşağıda özetlenmiştir.

Pam ve ark., (2001a); beton basınç dayanımı $f_{ck}=30-100$ MPa, donatı çeliği akma dayanımı $f_{yk}=400-460$ MPa, çekme donatı oranı (ρ) %1-%5 ve basınç donatı oranı (ρ') %0-%1.5 aralıklarında betonarme kiriş kesitlerinin sonuçlarına dayanarak eğrilik süneklik faktörü için Denklem (3.1)'i sunmuşlardır. Süneklik faktörü, regresyon analizi ve elde edilen eğilme sünekliğinin doğrudan değerlendirilmesi için aşağıdaki formül, f_{ck} , ρ ve ρ' oranları ile ilişkilendirilmiştir. ρ ; çekme donatı oranı, ρ_b ; dengeli donatı oranı, ρ' ; basınç donatısı oranı ve f_{ck} ; beton basınç dayanımıdır.

$$\mu = 10.7(f_{ck})^{-0.45}[(\rho - \rho')/\rho_b]^{-1.25} \times [1 + 95.2(f_{ck})^{-1.1}(\rho'/\rho)^3] \quad (3.1)$$

Denklem (3.1)'de son terim 1 ile değiştirilerek, süneklik faktörü için basitleştirilmiş Denklem (3.2) Kwan ve ark., (2002) tarafından önerilmiştir.

$$\mu = 10.7(f_{ck})^{-0.45}[(\rho - \rho')/\rho_b]^{-1.25} \quad (3.2)$$

Kwan ve Ho (2010), doğrusal olmayan moment-eğrilik analizi yapmadan betonarme kirişlerin eğilme sünekliğinin doğrudan değerlendirilmesini sağlamak için regresyon analizini kullanarak çeşitli yapısal parametrelerle ilişkilendirilen μ değerlerini (Denklem 3.3a ve 3.3b) literatüre sunmuşlardır. Bu denklemlerde, $\lambda = (\rho - \rho')/\rho_b$ donatı derecesi ve f_r sargılama basıncıdır. Farklı yapısal parametrelerin etkilerini incelemek için, beton basınç dayanımı (f_{ck}) 40-100 MPa arasında, donatı çeliği akma dayanımı (f_y) 250-600 MPa, sargılama basıncı (f_r) 0-4 MPa, basınç

donatısı oranı (ρ') %0-%2, çekme donatısı oranı (ρ) ve dengeli donatı oranının (ρ_b) 0.40-2.0 katı aralıklarında değiştirilerek regresyon analizleri yapılmıştır.

$$\mu = 10.7m(\lambda)^{-1.25n}(f_{ck})^{-0.45}(f_y/460)^{-0.25} \quad (3.3a)$$

$$m = 1 + 2.5(f_{ck})^{0.5}(f_r/f_{ck}) , \quad n = 1 + 5.0(f_r/f_{ck}) \quad (3.3b)$$

Lee (2013), beton basınç dayanımının, donatı çeliği akma dayanımının ve basınç donatısı dahil donatı oranının; moment-eğrilik davranışı ve çift donatılı betonarme kiriş kesitlerinin eğrilik süneklik faktörü üzerindeki etkilerini incelemiştir. Parametrik çalışmada, betonun karakteristik basınç dayanımı (f_{ck}), hem normal hem de yüksek mukavemetli betonları kapsayacak şekilde 30 MPa ila 100 MPa arasında değişmektedir; donatı çeliğinin akma dayanımı (f_{yk}), 300-600 MPa arasında değişmektedir. Çekme donatısı oranı tek ve çift donatılı betonarme kiriş kesitlerinin tümü için dengeli donatı oranının %10-%100 ve çift donatılı betonarme kiriş elemanları için basınç donatısı oranı, çekme donatısı oranının %0-%100 arasında değişmektedir. Lee (2013); çift donatılı betonarme kiriş kesitlerinde, malzeme mukavemeti, donatı oranı ve basınç donatısının gerilmesi gibi parametrelerin etkisi göz önünde bulundurularak, eğrilik süneklik faktörünün tahmin denklemi bir önceki parametrik çalışmaya dayanılarak sunulmuştur (Denklem 3.4). f_{sc} , basınç donatısının gerilmesidir.

$$\mu_\varphi = \left[\left(\rho - \rho' \frac{f_{sc}}{f_y} \right) / \rho_b \right]^{-1.283} (f_y)^{-0.230} [-0.6(f_{ck})^2 + 95.2(f_{ck}) + 2506.2] \times 10^{-3} \quad (3.4)$$

Bu kitapta betonarme yapısal elemanlar için kesitsel moment-eğrilik davranışları, daha önce açıklanan yöntemle hesaplanmıştır. Eğrilik süneklikleri, taşıyıcı elemanların moment-eğrilik ilişkilerinden hesaplanmış, kesitin eğrilik sünekliğini etkileyen ana faktörler araştırılmıştır. Çalışmanın devamında, farklı tasarım parametrelerinin etkisi dikkate alınarak çift donatılı betonarme kiriş kesitlerinin eğrilik süneklik faktörünün belirlenmesi amacıyla Foroughi ve Yüksel (2022b) tarafından önerilen analitik denklem ayrıntılı biçimde ele alınmış ve incelenen kiriş kesitleri için uygulanmıştır. Gerçekleştirilen sayısal analizler sonucunda elde edilen moment-eğrilik ilişkileri temel alınarak eğrilik süneklik faktörü hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar, önerilen denklemin tahmin performansını değerlendirmek amacıyla literatürde yaygın olarak kullanılan diğer tahmin bağıntıları ile karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Bu karşılaştırmalar sonucunda, söz konusu denklemin eğrilik sünekliğinin tahmininde yeterli doğruluk düzeyini sağladığı ve farklı parametre kombinasyonları altında kesit davranışını güvenilir biçimde temsil edebildiği belirlenmiştir.

3.4. Betonarme Kolonların Moment-Eğrilik ile Eğrilik Süneklik İlişkileri

Bu bölümde, farklı kesit geometrilerine sahip betonarme kolonların doğrusal olmayan davranışları, moment-eğrilik ilişkileri temelinde sistematik olarak değerlendirilmiştir. Analitik değerlendirmelerde, kolon kesitlerinin elastik sınır ötesi davranışını belirleyen başlıca tasarım parametreleri; beton basınç dayanımı, boyuna donatı oranı, sargı donatısı oranı ve eksenel yük seviyesi olarak parametrik olarak ele alınmıştır. Bu parametrelerin kolon davranışı üzerindeki etkileri, yalnızca moment taşıma kapasitesi bağlamında değil, aynı zamanda eğrilik sünekliği ve plastik şekil değiştirme kapasitesi perspektifinde de değerlendirilmiştir.

Moment-eğrilik analizleri, doğrusal olmayan kesit davranışının güvenilir bir şekilde temsil edilmesi amacıyla SAP2000 yapısal analiz programı kullanılarak yürütülmüştür. Analizlerde beton ve donatı çeliği için doğrusal olmayan malzeme modelleri kullanılmıştır. Kabuk betonunun davranışı sargısız beton modeli ile, çekirdek betonunun davranışı ise sargılı beton modeli ile tanımlanmıştır. Sargılı beton modellerinde Mander ve ark. (1988), Saatçioğlu ve Ravzi (1992) ile TBDY (2018) esasları dikkate alınmıştır. Donatı çeliği için TBDY (2018)'de önerilen, akma sonrası pekleşmeyi de içeren doğrusal olmayan çelik modeli kullanılmıştır. Bu yaklaşım, beton ve çeliğin birlikte çalışmasını ve kolon kesitlerinde akma sonrası davranışın gerçekçi biçimde modellenmesini mümkün kılmaktadır.

Yapılan moment-eğrilik analizleri sonucunda, kolon kesitlerinde kabuk ve çekirdek betonunda ezilme ve kırılma durumları ile donatı çeliğinde akma ve pekleşme aşamaları ayrı ayrı belirlenmiştir. Elde edilen bu kritik davranış noktaları, kolon kesitlerinin elastik, akma ve akma sonrası evrelerini tanımlamakta; aynı zamanda eğrilik sünekliği ve plastik dönme kapasitesinin hesaplanmasına olanak sağlamaktadır. Analiz sonuçları, davranışın farklı aşamalarını açık biçimde ortaya koyacak şekilde tablolar ve grafiklerle karşılaştırmalı değerlendirmeler halinde sunulmuştur.

Betonarme kolonların doğrusal olmayan davranışında eksenel yük seviyesi, moment-eğrilik ilişkilerinin şekillenmesinde belirleyici bir parametre olarak öne çıkmaktadır. Deprem ve düşey yüklerin ortak etkisi altında oluşan eksenel basınç kuvvetlerinin, kolon kesitinin taşıma kapasitesi ile uyumlu olması gerekmektedir. Bu bağlamda, TBDY (2018)'de tanımlanan ve en büyük tasarım eksenel kuvveti için geçerli olan $A_c \geq N_{dmax}/0.40f_{ck}$ koşulu sağlanacak şekilde kolon kesitleri tasarlanmıştır. Burada A_c beton kesit alanını, f_{ck} karakteristik beton basınç dayanımını ve $N_{d,max}$ tasarım eksenel basınç kuvvetini ifade etmektedir.

Analitik incelemelerde, kolon kesitlerinde maksimum eksenel basınç kapasitesi $N_{max} = A_c \times f_{ck}$ olarak tanımlanmış ve farklı eksenel yük oranlarının davranış üzerindeki etkisini ortaya koyabilmek amacıyla N/N_{max} oranının 0.00, 0.10, 0.20, 0.30 ve 0.40 değerleri için moment-eğrilik analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu yaklaşım sayesinde, artan eksenel yük seviyesinin kolon kesitlerinin rijitliği, dayanımı ve eğrilik sünekliği üzerindeki etkileri bütüncül bir çerçevede değerlendirilmiştir. Elde edilen moment-eğrilik ve eğrilik süneklik verileri, betonarme kolonların doğrusal olmayan davranışının kapsamlı biçimde anlaşılmasına ve sünek tasarım ilkelerinin geliştirilmesine önemli katkılar sağlamaktadır. Farklı malzeme özellikleri, donatı düzenlemeleri ve eksenel yük seviyeleri altında elde edilen bu ilişkiler, kolonların deprem etkileri altındaki performansının güvenilir biçimde değerlendirilmesine olanak sunmakta ve performans temelli deprem mühendisliği yaklaşımları için sağlam bir analitik altyapı oluşturmaktadır.

3.4.1. 400 mm × 400 mm kare enkesitli kolonun moment-eğrilik ilişkisi ve eğrilik süneklik davranışı

Bu bölümde, kare enkesitli betonarme kolonların doğrusal olmayan davranışı ile eğrilik sünekliği ilişkisini ortaya koymak amacıyla parametrik kolon modelleri oluşturulmuştur. Analiz kapsamında, farklı boyuna donatı oranları, sargı donatısı düzenleri ve eksenel yük seviyelerini içeren kapsamlı bir sayısal çalışma gerçekleştirilmiştir. Bölümün temel amacı, sargı etkisi ve eksenel yük düzeyinin kesitsel davranış üzerindeki belirleyici rolünün ortaya konulmasıdır.

Çalışmada iki farklı kare enkesitli kolon grubu ele alınmıştır. İlk model grubunu 400 mm × 400 mm, ikinci model grubunu ise 500 mm × 500 mm enkesit boyutuna sahip betonarme kolonlar oluşturmaktadır (Foroughi ve Yüksel, 2020a, 2020b). Söz konusu kesitlere ait geometrik özellikler, donatı düzenleri ve analiz parametreleri tanımlanmış olup, moment-eğrilik davranışı ile eğrilik sünekliği performansına ilişkin değerlendirmeler ilgili alt başlıklar altında ayrıntılı olarak sunulmuştur. Oluşturulan kolon modelleri, kare kesitli betonarme kolonların moment-eğrilik davranışının yalnızca kesit boyutuna bağlı olmadığını; aynı zamanda sargı donatısı düzeni, boyuna donatı oranı ve eksenel yük düzeyi gibi temel tasarım değişkenlerinin etkileşimi altında şekillendiğini gösterecek şekilde kurgulanmıştır.

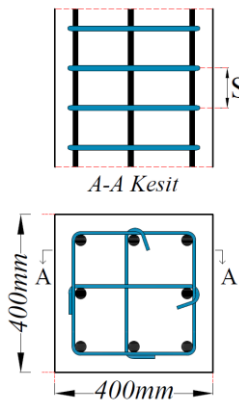
Bu kapsamda 400 mm × 400 mm kare enkesitli betonarme kolonların doğrusal olmayan davranışı, beton ve donatı çeliğinin doğrusal olmayan malzeme özellikleri dikkate alınarak moment-eğrilik ilişkileri üzerinden analiz edilmiştir. Analitik çalışmalarda, her bir betonarme kolon modeli için beş farklı eksenel yük seviyesi tanımlanmıştır. Bu eksenel yükler sırasıyla; $N_1 = 0$, $N_2 = 480$ kN, $N_3 = 960$ kN, $N_4 = 1440$ kN ve $N_5 = 1920$ kN olarak seçilmiştir. Belirlenen eksenel yük seviyeleri, kolon davranışı üzerinde eksenel kuvvetin etkisini sistematik biçimde inceleyebilmek amacıyla, geniş bir eksenel yük aralığını kapsayacak şekilde düzenlenmiştir.

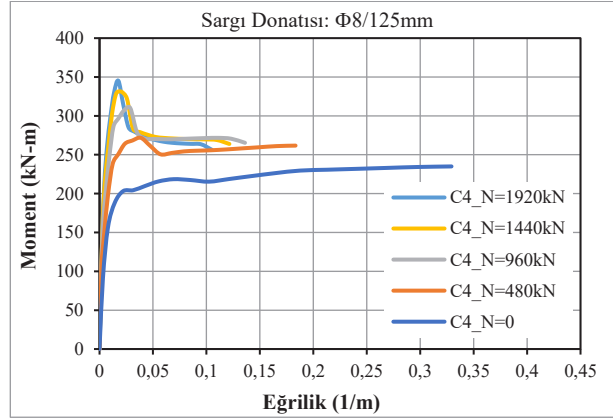
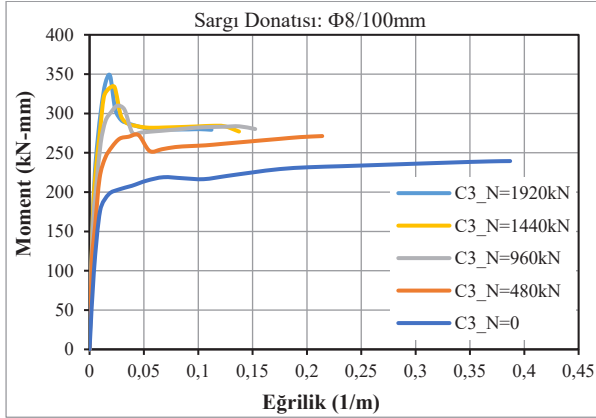
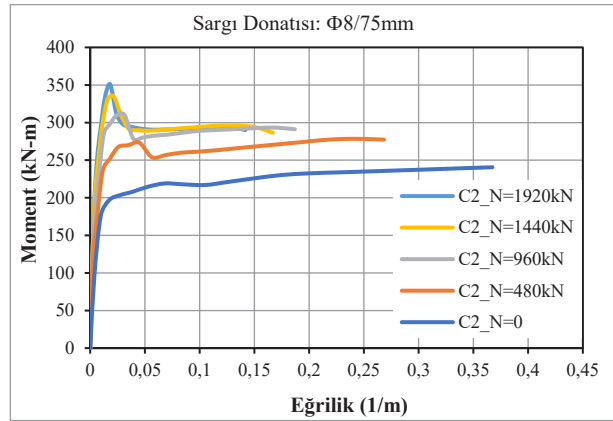
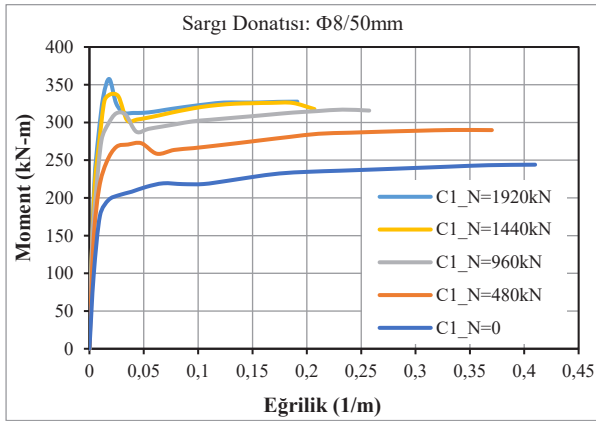
Kolon kesitlerinde enine donatı düzenlemesinin doğrusal olmayan davranış üzerindeki etkilerini ortaya koyabilmek amacıyla iki farklı sargı donatısı çapı ($\Phi 8$ mm ve $\Phi 10$ mm) ile yedi farklı sargı donatısı aralığı (50 mm, 75 mm, 100 mm, 125 mm, 150 mm, 175 mm ve 200 mm) dikkate alınmıştır. Böylece sargı donatısı oranındaki değişimin, çekirdek betonun sargı etkisi, kesit dayanımı ve eğrilik sünekliği üzerindeki etkileri ayrıntılı olarak değerlendirilmiştir.

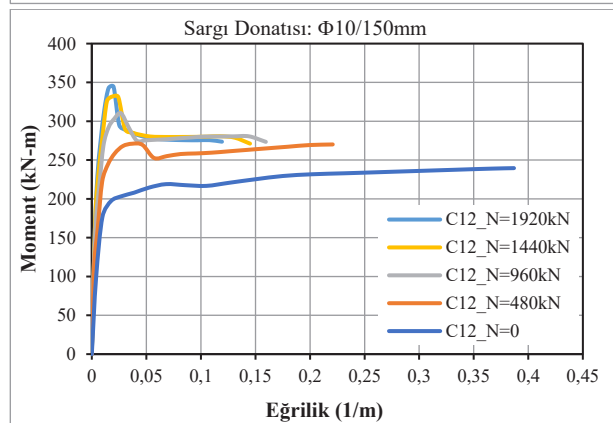
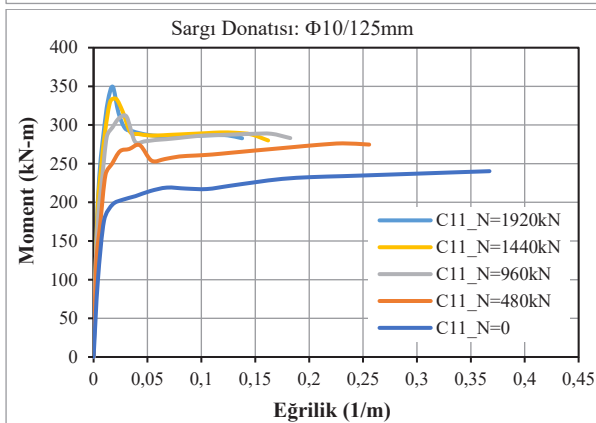
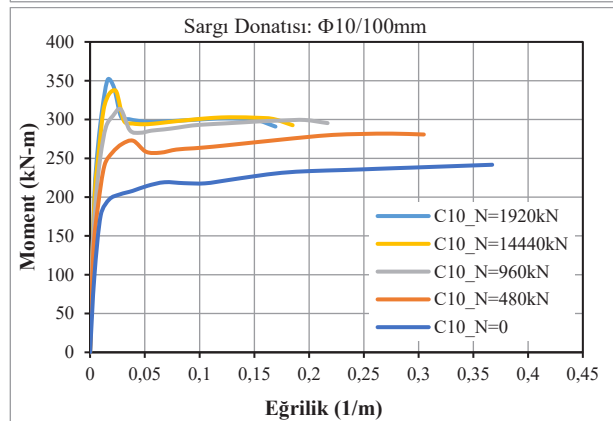
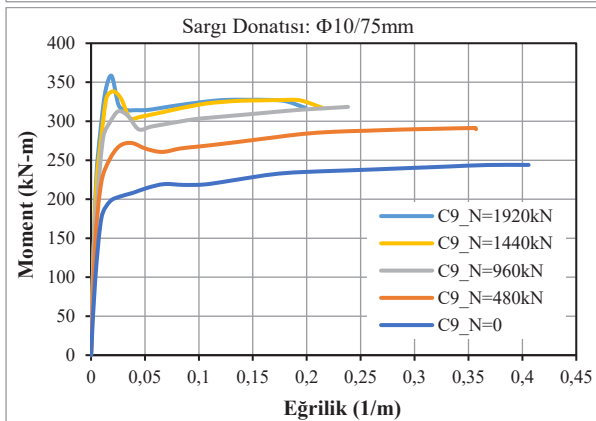
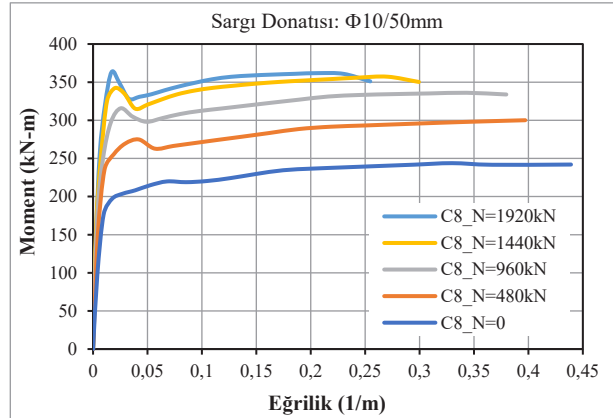
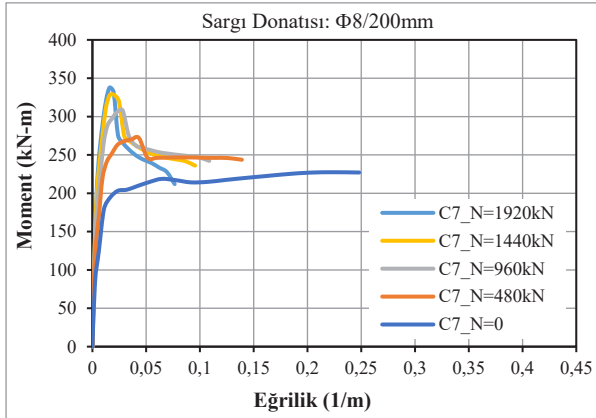
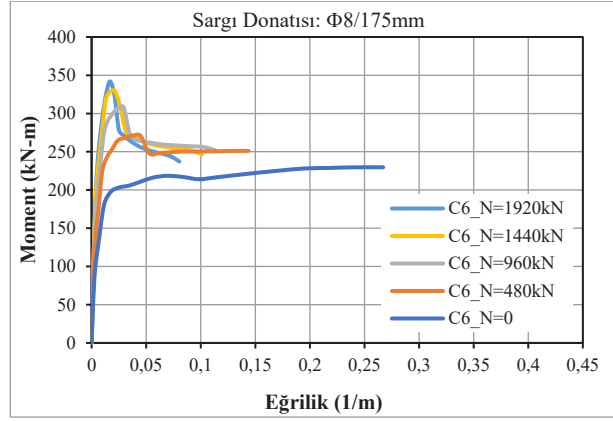
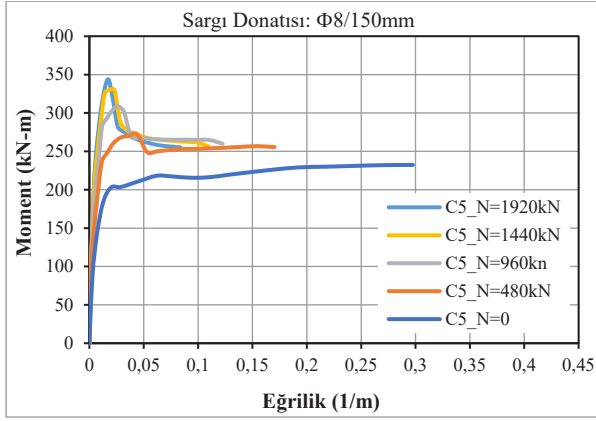
Boyuna donatı düzenlemesi ise tüm kolon modellerinde boyuna donatı $8\Phi 22$ mm olarak sabit alınmıştır. Bu yaklaşım sayesinde, boyuna donatı oranının etkisi ihmal edilerek, eksenel yük seviyesi ve sargı donatısı parametrelerinin kolon davranışı üzerindeki etkileri daha açık biçimde incelenebilmiştir. Tüm betonarme kolon modellerinde beton sınıfı C30 ve donatı çeliği sınıfı B420C olarak seçilmiştir.

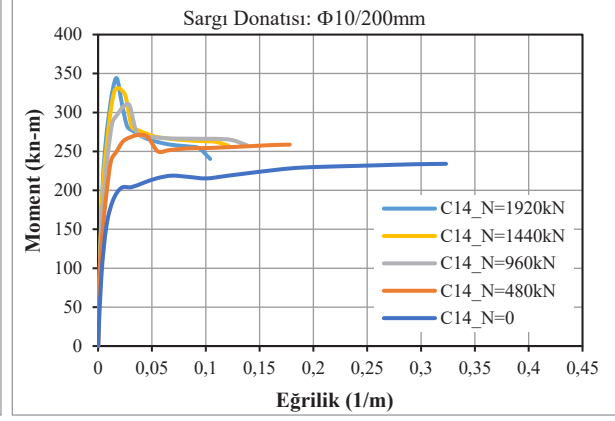
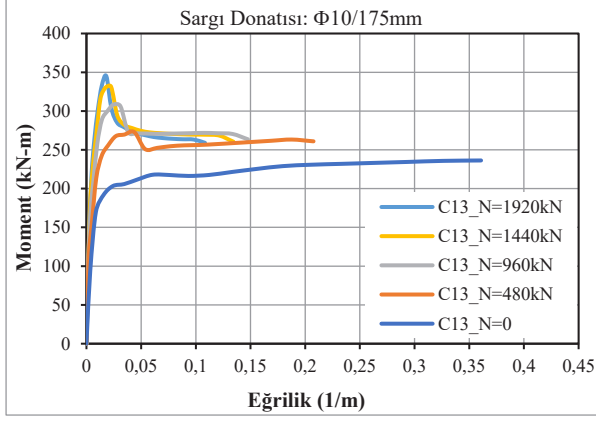
Tasarlanan betonarme kolon modellerine ait kesit geometrileri, donatı düzenlemeleri ve temel malzeme özellikleri Tablo 3.1’de sunulmuştur (Foroughi ve Yüksel, 2020a). Moment-eğrilik analizlerinden elde edilen bulgular doğrultusunda, 400 mm × 400 mm kare kesitli betonarme kolonlara ait moment-eğrilik ilişkileri farklı sargı donatısı düzenleri ve farklı eksenel yük seviyeleri için belirlenmiştir. Bu ilişkiler kesit rijitliği, akma noktası, nihai moment kapasitesi ve eğrilik sünekliği açısından karşılaştırmalı olarak incelenmiş ve sonuçlar Şekil 3.3’te verilmiştir.

Tablo 3.1. Tasarlanan 400 mm × 400 mm kare enkesitli kolon modellerine ait kesit detayları

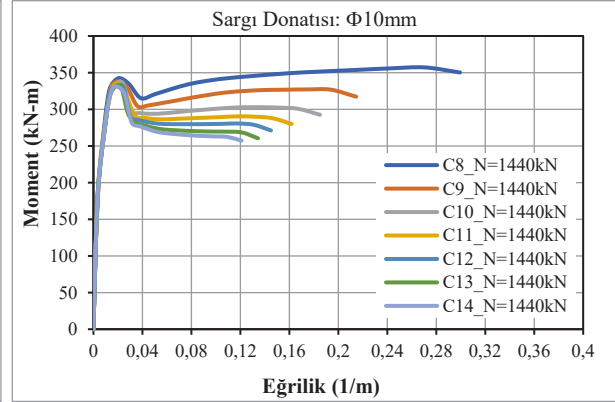
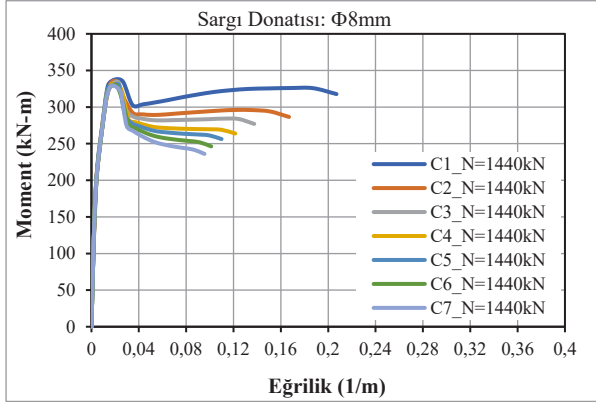
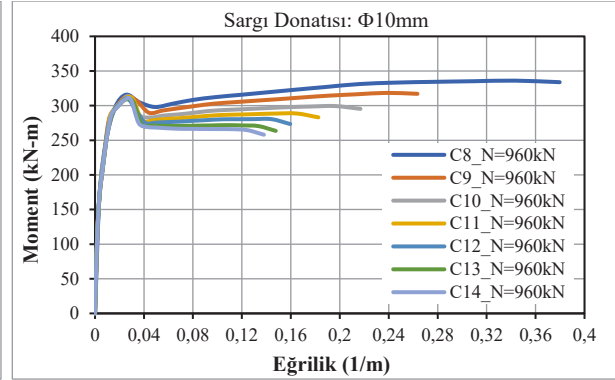
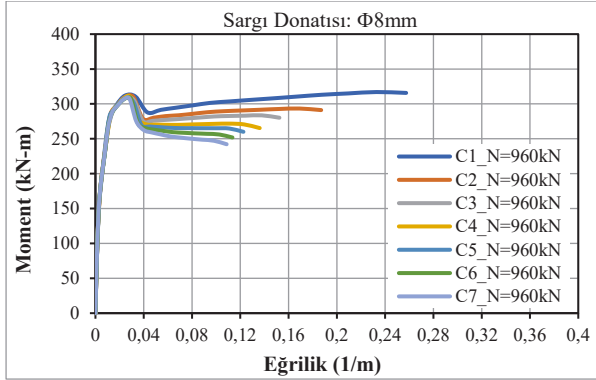
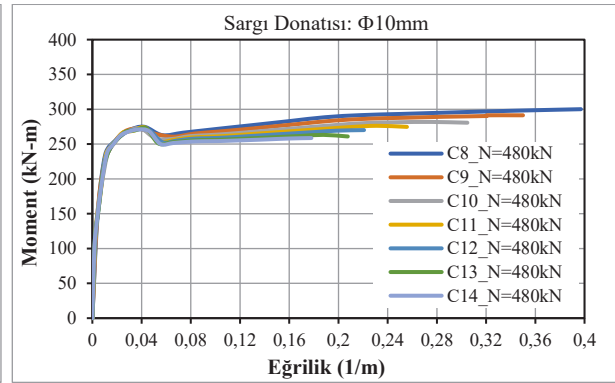
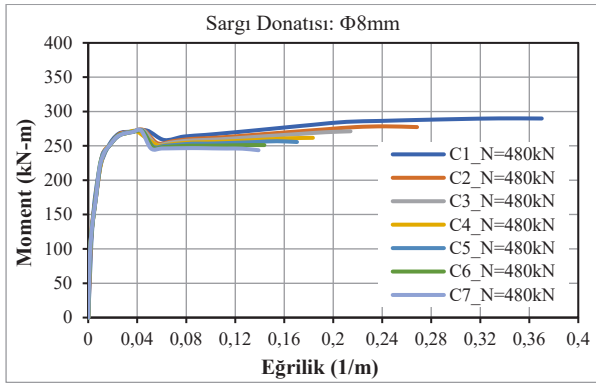
Kolon Kesit Geometrisi	Kesit No	Boyuna donatı	Sargı donatısı	Eksenel Yük (N/N_{max})
	C1	8Φ22 mm	Φ8/50 mm	0.00 0.10 0.20 0.30 0.40
	C2		Φ8/75 mm	
	C3		Φ8/100 mm	
	C4		Φ8/125 mm	
	C5		Φ8/150 mm	
	C6		Φ8/175 mm	
	C7		Φ8/200 mm	
	C8		Φ10/50 mm	
	C9		Φ10/75 mm	
	C10		Φ10/100 mm	
	C11		Φ10/125 mm	
	C12		Φ10/150 mm	
	C13		Φ10/175 mm	
	C14		Φ10/200 mm	

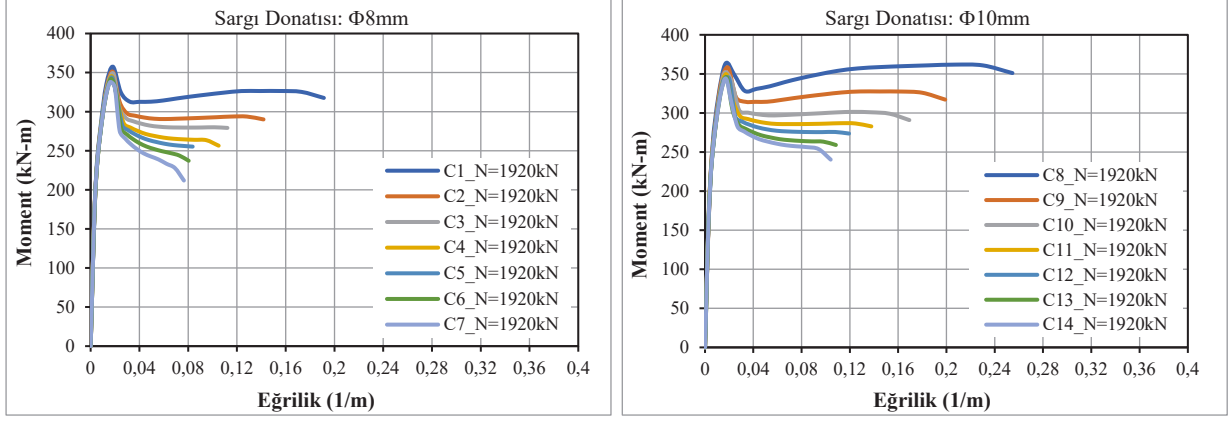






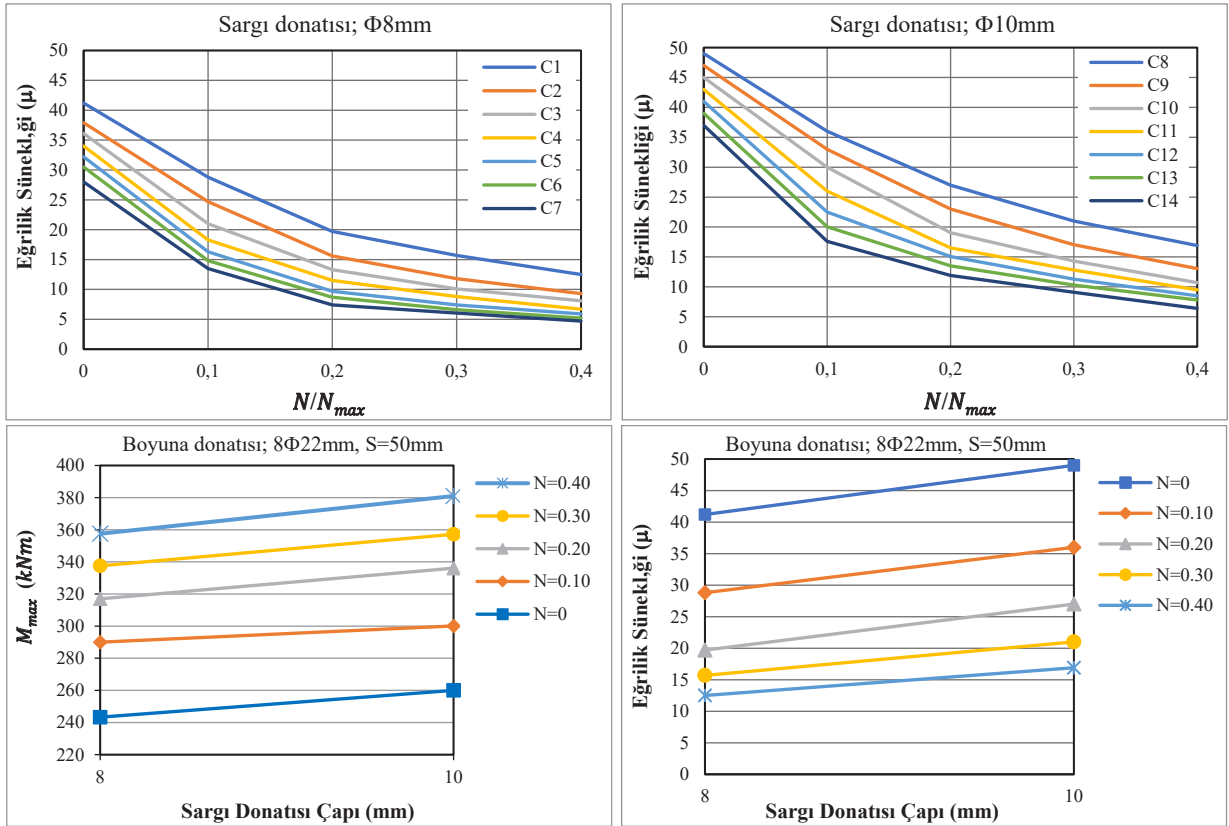
a) Farklı eksenel yük seviyeleri (boyuna donatı: 8Φ22 mm)

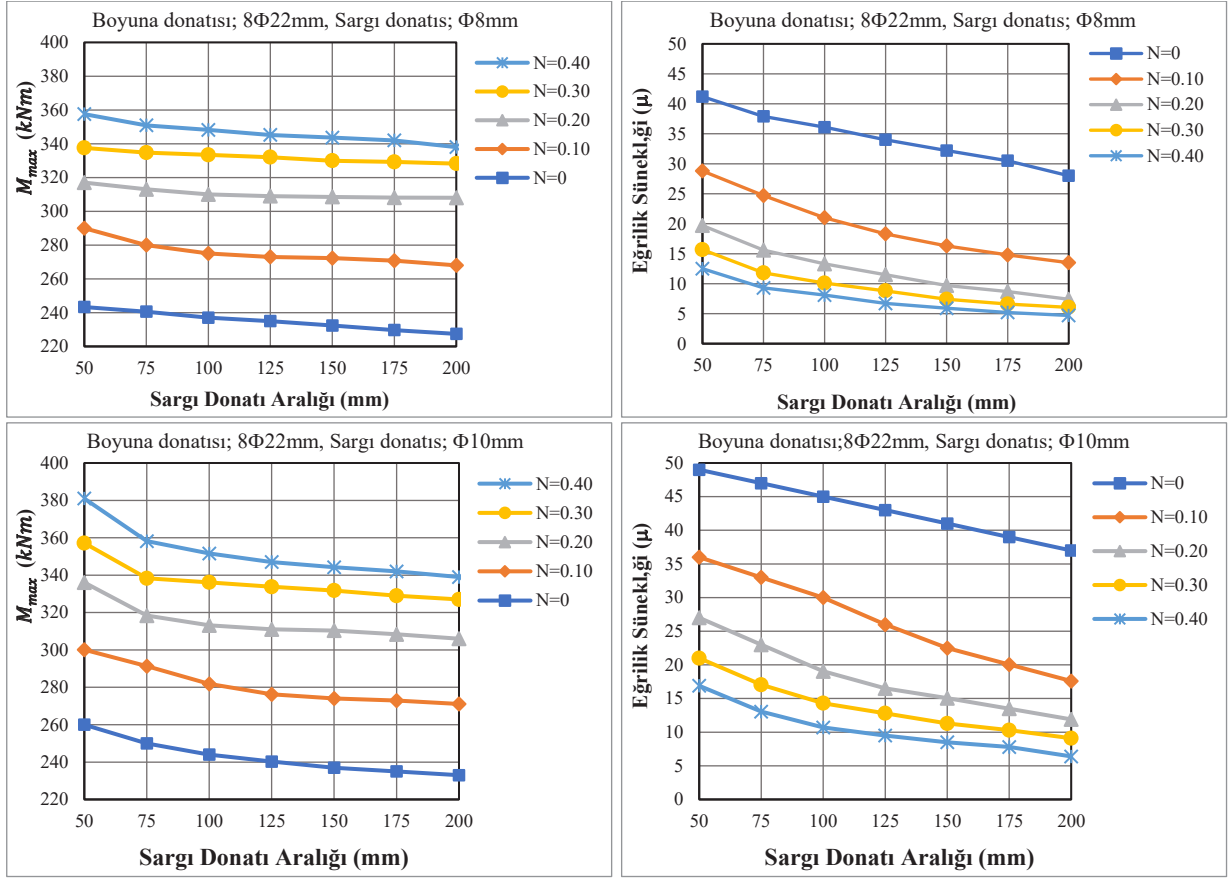



 b) Farklı sargı donatısı oranı (boyuna donatı: $8\Phi 22$ mm)

Şekil 3.3. 400 mm x 400 mm kare enkesitli betonarme kolon modellerinin farklı tasarım parametrelere göre moment-eğrilik ilişkileri

Moment-eğrilik analizlerinden elde edilen sonuçlara dayanarak her bir kolon kesiti için maksimum moment kapasitesi (M_{max}) ile eğrilik sünekliği (μ_{φ}) hesaplanmıştır. Elde edilen bu parametreler farklı tasarım değişkenleri açısından karşılaştırmalı olarak incelenmiş ve böylece kesit geometrisi, sargı donatısı düzeni ve eksenel yük seviyesinin kolonların dayanım ve deformasyon kapasitesi üzerindeki etkileri analitik olarak değerlendirilmiştir. Bu değerlendirmelere ilişkin sonuçlar Şekil 3.4'te verilmiş olup, özellikle sargı donatısının sağladığı sınırlandırma etkisi ile eksenel yük düzeyinin eğrilik sünekliği üzerindeki belirgin etkisi ortaya konulmaktadır.





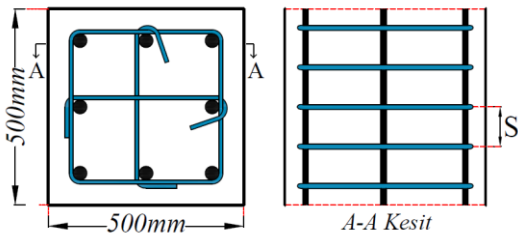
Şekil 3.4. 400 mm \times 400 mm kare enkesitli betonarme kolonların farklı parametrelerin maksimum moment ve sünekliği etkisi

3.4.2. 500 mm \times 500 mm kare enkesitli kolonun moment-eğrilik ilişkisi ve eğrilik süneklik davranışı

Bu bölümde, 500 mm \times 500 mm kare enkesit boyutlarına sahip betonarme kolonların doğrusal olmayan kesit davranışı, geniş bir parametre uzayı tanımlanarak ayrıntılı biçimde değerlendirilmiştir. Çalışmanın temel amacı, boyuna donatı miktarı, sargı donatısı özellikleri ve eksenel yük düzeyinin kolon kesitlerinin moment taşıma kapasitesi ve eğrilik sünekliği üzerindeki göreceli etkilerini analitik olarak ortaya koymaktır. Bu doğrultuda, kolon kesitlerinde boyuna donatı oranının davranış üzerindeki etkisini değerlendirebilmek amacıyla altı farklı boyuna donatı çapı ($\Phi 20$ mm, $\Phi 22$ mm, $\Phi 24$ mm, $\Phi 26$ mm, $\Phi 28$ mm ve $\Phi 30$ mm) seçilmiştir. Boyuna donatı oranındaki artışın akma momenti ve nihai moment kapasitesi üzerindeki etkilerinin belirlenmesi hedeflenmiştir. Enine donatı düzenlemesi kapsamında ise sargı donatısının beton çekirdeği üzerindeki sargılama etkisini temsil edebilmek için üç farklı sargı donatısı çapı ($\Phi 8$ mm, $\Phi 10$ mm ve $\Phi 12$ mm) dikkate alınmıştır. Ayrıca, sargı donatısı aralığının etkisini incelemek üzere her bir donatı çapı için üç farklı sargı aralığı (50 mm, 75 mm ve 100 mm) tanımlanmıştır (Tablo 3.2). Bu yaklaşım sayesinde, sargı donatısının hem geometrik özellikleri hem de yerleşim sıklığı bakımından kolon davranışı üzerindeki etkileri ayrı ayrı değerlendirilebilmiştir (Froughi ve Yüksel, 2021).

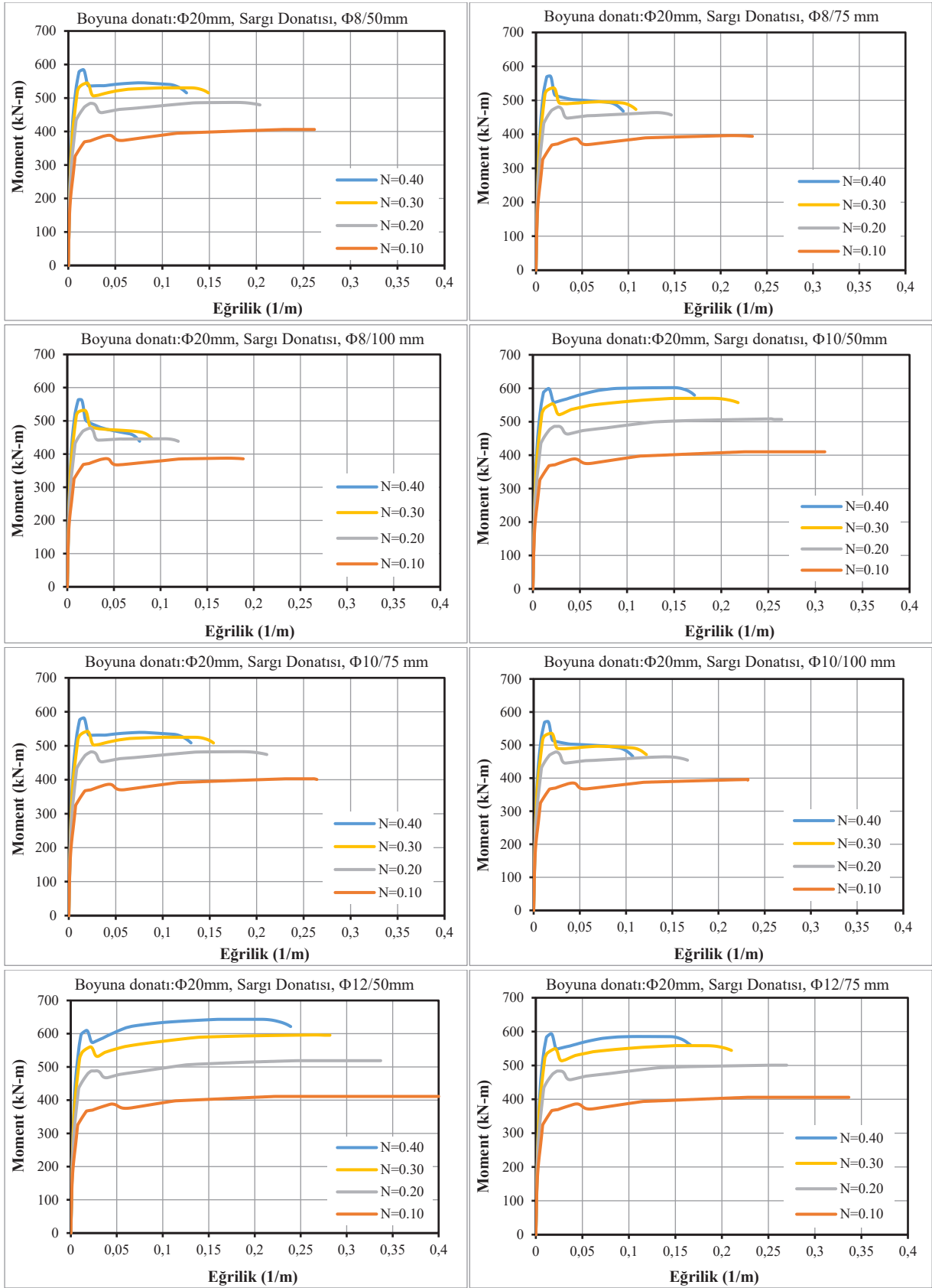
Tanımlanan boyuna donatı, sargı donatısı çapı ve sargı donatısı aralığı kombinasyonları ile birlikte, kolon kesitleri dört farklı eksenel yük seviyesi altında analiz edilmiştir. Eksenel yükler, $N_1 = 750$ kN, $N_2 = 1500$ kN, $N_3 = 2250$ kN ve $N_4 = 3000$ kN olarak belirlenmiş olup, bu yük düzeyleri kolon davranışının düşük eksenel basınçtan yüksek eksenel basınç değerlerine kadar olan değişimini temsil edecek şekilde seçilmiştir. Tüm modellerde beton sınıfı C30 ve donatı çeliği sınıfı B420C olarak sabit tutulmuş; böylece malzeme özelliklerinden kaynaklanan değişkenlik elimine edilerek, donatı düzeni ve eksenel yük etkileri ön plana çıkarılmıştır.

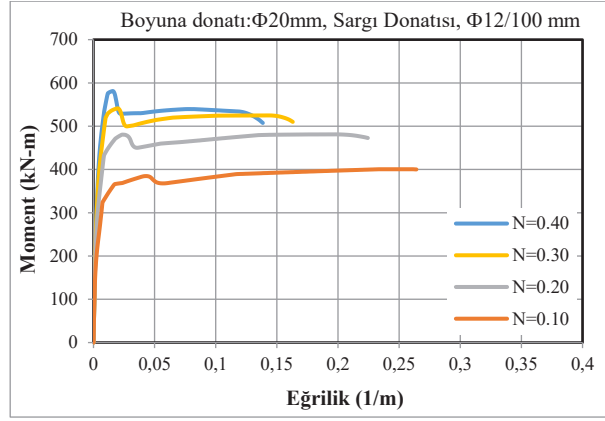
Tablo 3.2. Tasarlanan 500 mm×500 mm kare enkesitli kolon modellerine ait parametreler

Kesit Boyutları (mm)		Boyuna Donatı	Sargı Donatısı		N/N_{max}
b	h		Çap	Aralık	
500 mm	500 mm	8Φ20 mm	Φ8 mm Φ10 mm Φ12 mm	50 mm 75 mm 100 mm	0.10 0.20 0.30 0.40
		8Φ22 mm			
		8Φ24 mm			
		8Φ26 mm			
		8Φ28 mm			
		8Φ30 mm			
Kolon Kesit Geometrisi					
					

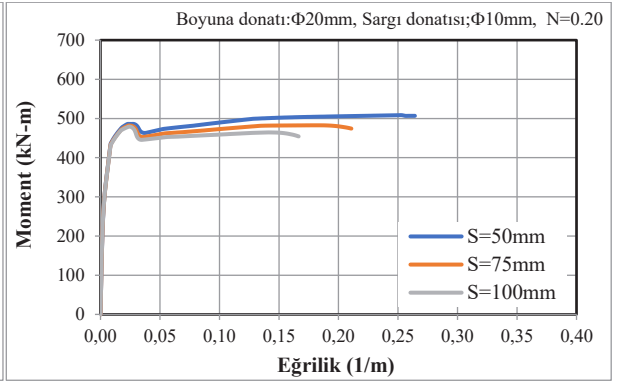
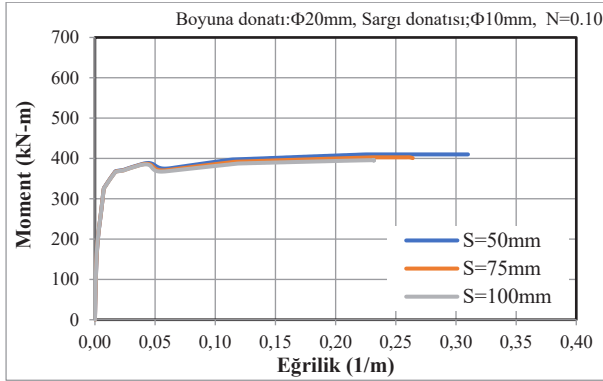
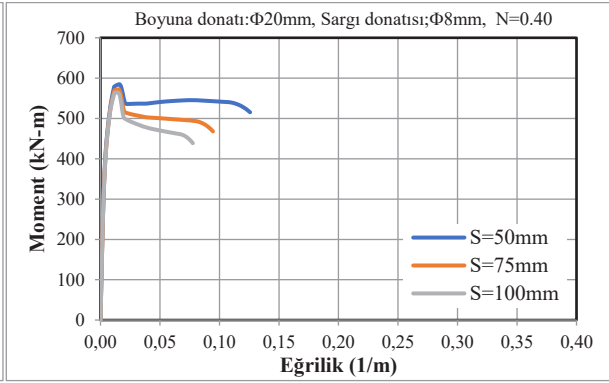
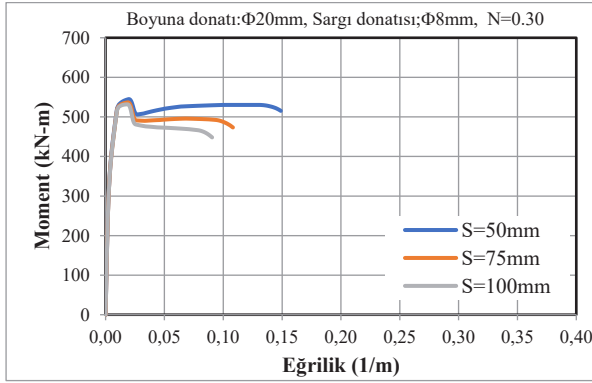
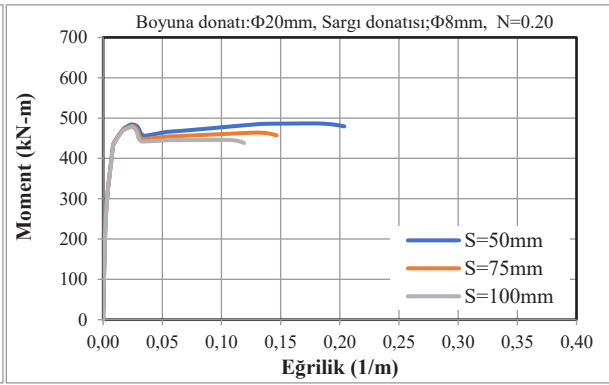
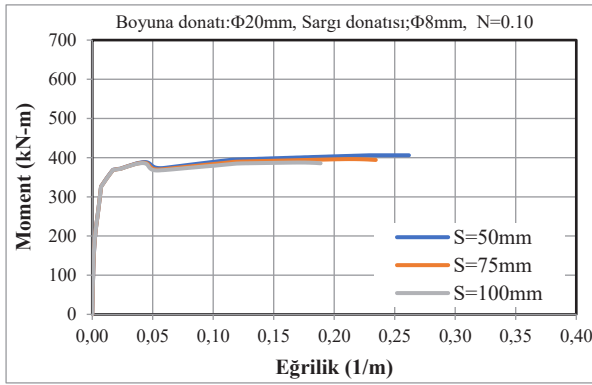
Belirlenen tüm parametrelerin kombinasyonları dikkate alınarak tasarlanan betonarme kolon modelleri üzerinde doğrusal olmayan moment-eğrilik analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizler sonucunda elde edilen moment-eğrilik eğrileri, kolon kesitlerinin elastik davranıştan akma ve akma sonrası bölgeye kadar uzanan tepkilerini ayrıntılı biçimde yansıtmaktadır. Farklı tasarım parametrelerine sahip kolon modellerine ait karakteristik moment-eğrilik ilişkileri Şekil 3.5'te sunulmuştur.

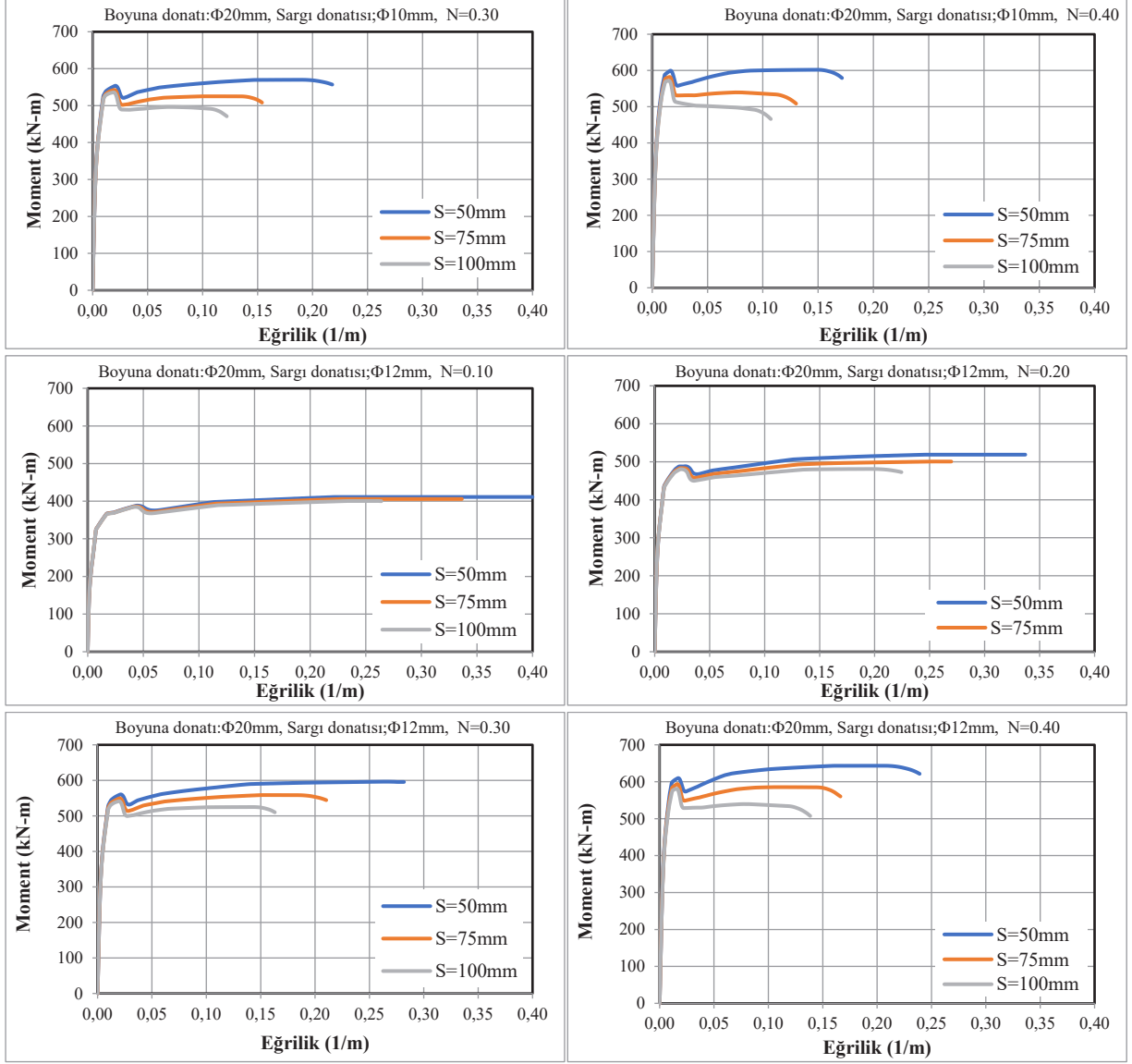
Moment-eğrilik eğrilerinden elde edilen sonuçlar kullanılarak, her bir kolon kesiti için maksimum moment kapasitesi (M_{max}) ve eğrilik sünekliği (μ_ϕ) değerleri hesaplanmıştır. Bu büyüklükler, boyuna donatı çapı, sargı donatısı oranı ve eksenel yük seviyesine bağlı olarak karşılaştırmalı biçimde değerlendirilmiş; söz konusu parametrelerin kolon kesitlerinin dayanım ve süneklik performansı üzerindeki etkileri nicel olarak ortaya konulmuştur. Elde edilen karşılaştırmalı sonuçlar Şekil 3.6'da verilmiş olup, özellikle sargı donatısı düzenlemesi ve eksenel yük seviyesinin eğrilik sünekliği üzerindeki belirleyici rolü açık biçimde gözlenmektedir. Bu kapsamlı parametre incelemesi, 500 mm × 500 mm kare enkesitli betonarme kolonlarda sünek davranışın sağlanabilmesi için donatı düzenlemesi ve eksenel yük düzeyinin birlikte ele alınmasının gerekliliğini ortaya koymakta; performans esaslı tasarım yaklaşımları açısından önemli sonuçlar sunmaktadır.



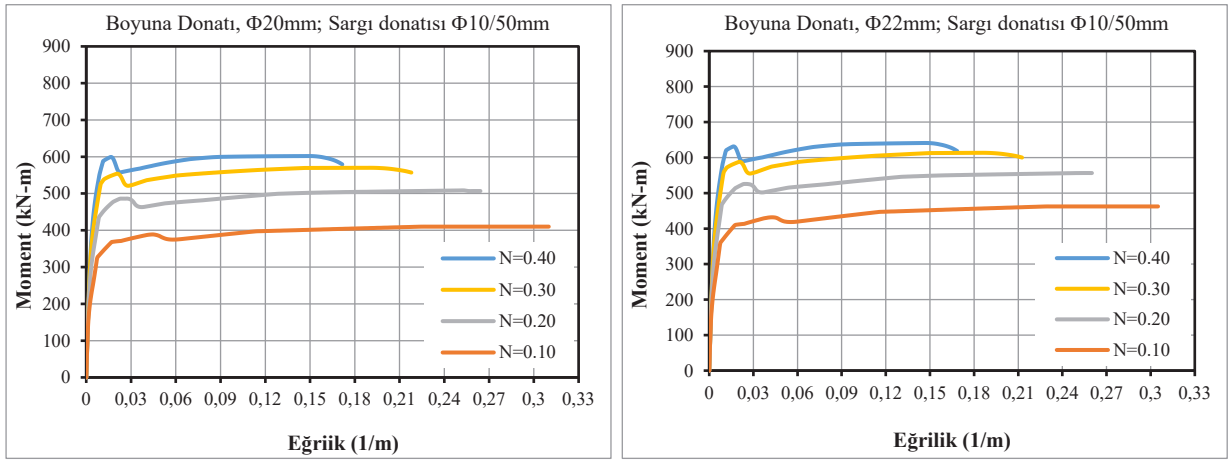


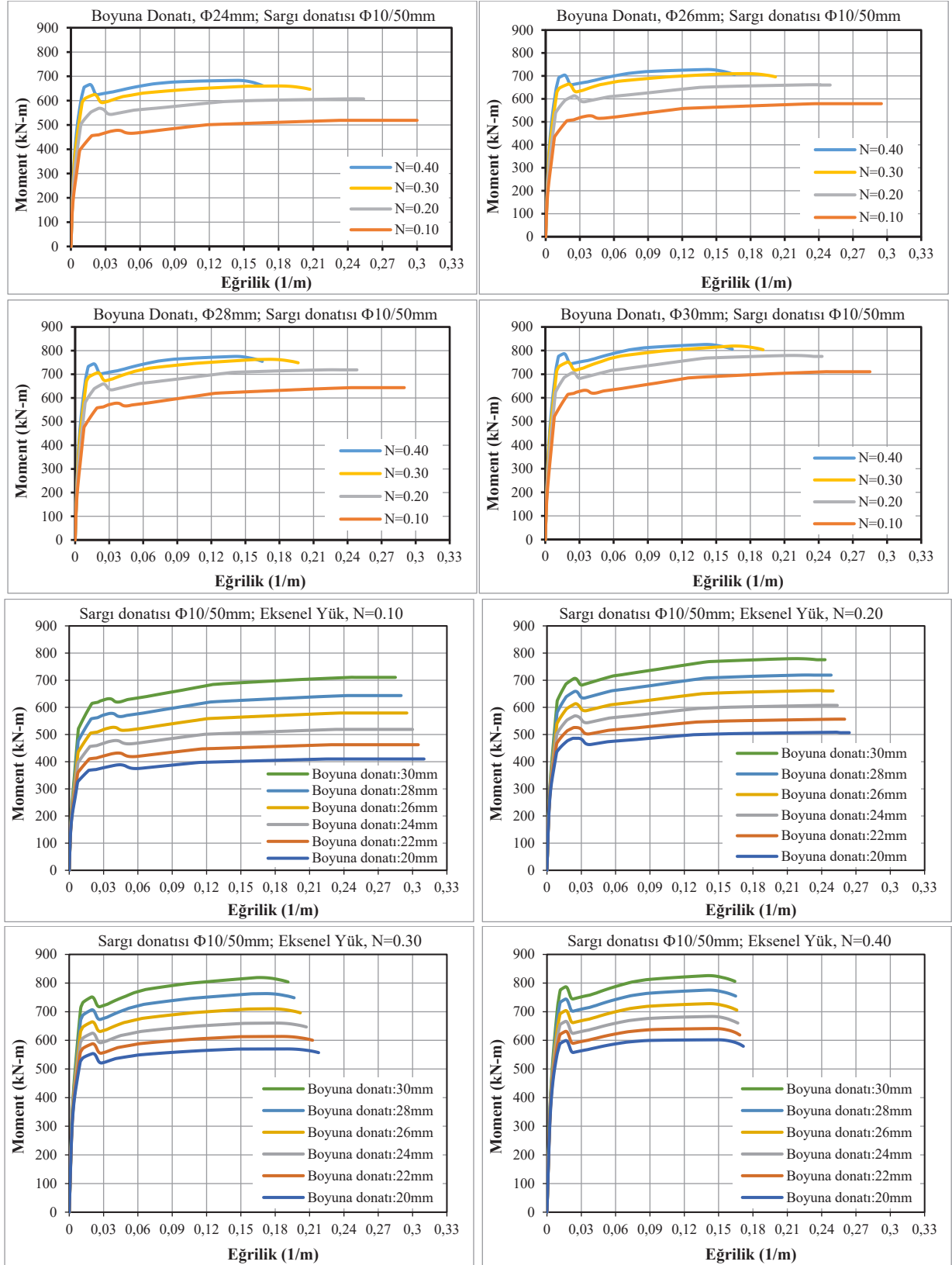
a) Farklı sargı donatısı oranı





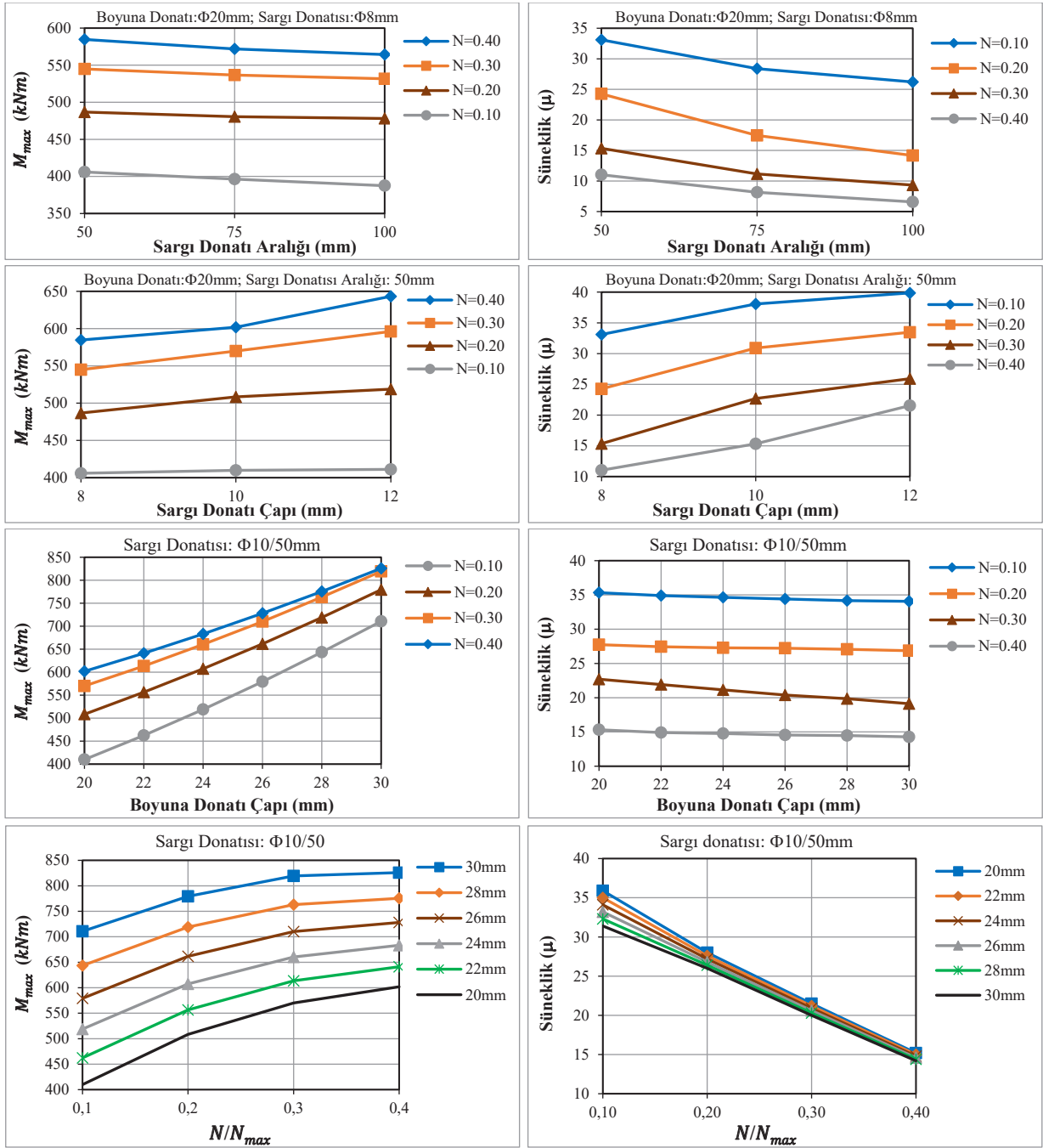
b) Farklı sargı donatısı aralığı





c) Farklı boyuna donatı oranı

 Şekil 3.5. 500 mm×500 mm kare enkesitli kolonların farklı tasarım parametrelerine göre moment-eğrilik ilişkileri (sargı donatısı $\Phi 10/50$ mm)



Şekil 3.6. 500 mm×500 mm kare enkesitli kolonların farklı parametrelerin maksimum moment ve süneklığe etkisi

400 mm × 400 mm ve 500 mm × 500 mm kare enkesitli betonarme kolon modelleri için gerçekleştirilen moment-eğrilik analizleri birlikte değerlendirildiğinde, kesit davranışının temel olarak aksenal yük oranı, boyuna donatı oranı ve sargı donatısı düzeni tarafından kontrol edildiği açık biçimde görülmektedir. Her iki kesit grubunda elde edilen eğriler, söz konusu parametrelerin kesitin hem taşıma kapasitesi hem de plastik deformasyon karakteri üzerinde benzer eğilimler oluşturduğunu göstermektedir. Öncelikle aksenal yük düzeyi, kare kolonların moment-eğrilik

davranışını belirleyen en kritik parametrelerden biri olarak ortaya çıkmaktadır. Eksenel yük oranındaki artış, kesitte basınç bölgesinin etkinliğini artırarak maksimum eğilme momenti kapasitesinin yükselmesine neden olmaktadır. Ancak bu artışa paralel olarak nihai eğrilik değerlerinin sistematik biçimde azaldığı görülmektedir. Basınç bölgesinde oluşan yüksek gerilmeler betonun daha erken ezilmesine yol açmakta ve kesitin plastik dönme kapasitesini sınırlamaktadır. Bu nedenle düşük eksenel yük seviyelerinde kare kolonlar daha geniş bir plastik davranış bölgesinin oluşmasına neden olmakta, yüksek eksenel yükler altında davranışın daha sınırlı ve görece gevrek bir karaktere yaklaştığı anlaşılmaktadır. Eğrilik sünekliği açısından değerlendirildiğinde de benzer bir eğilim ortaya çıkmakta; eksenel yük oranının artmasıyla birlikte eğrilik süneklik katsayılarının ($\mu_\varphi = \varphi_u/\varphi_y$) belirgin biçimde azaldığı görülmektedir.

Sargı donatısı düzeni ise kare kolon davranışı üzerinde süneklik açısından belirleyici rol oynamaktadır. Sargı donatısı aralığının azalmasıyla birlikte çekirdek beton daha etkin biçimde yanal yönde sargılanmaktadır. Bu durum betonun ezilme davranışını geciktirerek kesitin doğrusal olmayan deformasyon kapasitesini artırmakta ve moment-eğrilik eğrilerinde daha geniş bir plastik davranış bölgesinin oluşmasına neden olmaktadır. Bu durum, kesitin hem nihai eğrilik kapasitesini hem de enerji tüketme potansiyelini artırmaktadır. Sargı donatısı aralığının artması durumunda ise çekirdek beton üzerindeki yanal sargılama etkisi zayıflamakta, bu nedenle betonun yükleme sürecinde gelişen enine deformasyonları etkin biçimde sınırlandıramamaktadır. Bunun sonucunda basınç bölgesinde beton ezilmesi daha erken gerçekleşmekte ve moment-eğrilik eğrilerinde tepe momentine ulaşıldıktan sonraki bölgede dayanımın daha hızlı azaldığı bir davranış ortaya çıkmaktadır. Bu davranış kesitin eğrilik sünekliği üzerinde doğrudan etkili olmakta; sargı donatısı aralığının artmasıyla birlikte çekirdek beton üzerindeki etkin sargı etkisi azalmakta ve buna bağlı olarak kesitin ulaşabildiği nihai eğrilik kapasitesi sınırlanmaktadır. Bu nedenle geniş aralıklı sargı donatısına sahip kesitlerde eğrilik süneklik katsayılarının belirgin biçimde azaldığı görülmektedir. Analiz sonuçları, plastik mafsal bölgelerinde sargı donatısının kare kolon performansı açısından kritik bir tasarım değişkeni olduğunu açık biçimde göstermektedir.

Boyuna donatı oranının etkisi özellikle moment kapasitesi açısından belirgin hale gelmektedir. Boyuna donatı miktarındaki artış, çekme bölgesinin taşıma gücünü artırarak kesitin ulaşabildiği maksimum moment değerlerini yükseltmektedir. Bununla birlikte donatı oranındaki artışın eğrilik kapasitesi üzerinde aynı ölçüde olumlu bir etkisi olmadığı görülmektedir. Yüksek boyuna donatı oranlarında kesitin eğilme rijitliği artmakta ve plastik deformasyon gelişimi görece sınırlanabilmektedir. Parametrelerin birlikte etkisi incelendiğinde, eksenel yük ile sargı donatısı arasında güçlü bir etkileşim bulunduğu görülmektedir. Özellikle yüksek eksenel yük seviyelerinde çalışan kare kolonlarda yeterli sargı donatısı sağlanmadığında eğrilik sünekliği önemli ölçüde azalmaktadır. Buna karşın sık aralıklı sargı donatısı, beton çekirdeğini daha etkin biçimde sınırlandırarak basınç ezilmesini geciktirmekte ve eksenel yük artışının süneklik üzerindeki olumsuz etkisini kısmen azaltmaktadır. Bu durum moment-eğrilik eğrilerinde daha kararlı bir post-pik davranışı olarak gözlenmektedir.

Eksenel yük seviyesi dayanımı artırırken sünekliği sınırlandıran bir etki yaratmakta; boyuna donatı oranı moment kapasitesini yükseltmekle birlikte aşırı değerlerde deformasyon kapasitesini kısıtlayabilmektedir. Buna karşılık sargı donatısı, kare kesitli betonarme kolonlarda eğrilik kapasitesi ve süneklik davranışını belirleyen en etkili tasarım parametresi olarak öne çıkmaktadır. Bu bulgular, deprem etkisi altındaki betonarme kolon tasarımında yeterli sargı donatısının sağlanmasının, kesitin stabil plastik davranış geliştirebilmesi açısından temel bir gereklilik olduğunu ortaya koymaktadır.

3.4.3.300 mm×550 mm dikdörtgen enkesitli kolonun moment-eğrilik ilişkisi ve eğrilik süneklik davranışı

Dikdörtgen kesitli kolonların doğrusal olmayan davranışı; beton dayanım sınıfı, boyuna donatı oranı ile sargı donatısının çapı ve aralığı temel tasarım parametreleri olarak ele alınarak değerlendirilmiştir. Bu kapsamda, söz konusu değişkenlerin kesitin moment taşıma kapasitesi, deformasyon kapasitesi ve süneklik özellikleri üzerindeki etkileri sayısal analizler yoluyla sistematik ve karşılaştırmalı biçimde ortaya konulmuştur.

Oluşturulan parametrik model grubunda iki farklı kesit geometrisi dikkate alınmıştır. İlk grubu 300 mm × 550 mm, ikinci grubu ise 400 mm × 600 mm boyutlarına sahip dikdörtgen betonarme kolon kesitleri oluşturmaktadır. Bu kesitlere ait geometrik özellikler ve donatı düzenleri tanımlanmış; her bir model için moment-eğrilik ilişkileri elde edilerek eğilme dayanımı, eğrilik kapasitesi ve süneklik özellikleri karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

Bu bölümde 300 mm × 550 mm dikdörtgen enkesitli betonarme kolonların doğrusal olmayan kesitsel davranışı moment-eğrilik analizleri kapsamında analiz edilmiştir. Oluşturulan modellerde kesit tepkisini etkileyen temel tasarım değişkenlerinin etkilerini ortaya koyabilmek amacıyla geniş bir parametre aralığı tanımlanmıştır. Bu kapsamda boyuna donatı çapı $\Phi 20$ mm ile $\Phi 30$ mm arasında değişen altı farklı değer olarak tanımlanmıştır. Çekirdek beton üzerindeki sargı etkisini incelemek amacıyla ise üç farklı sargı donatısı çapı ($\Phi 8$ mm, $\Phi 10$ mm ve $\Phi 12$ mm) ve üç farklı sargı donatısı aralığı (50 mm, 75 mm ve 100 mm) dikkate alınmıştır (Foroughi ve Yüksel, 2020b).

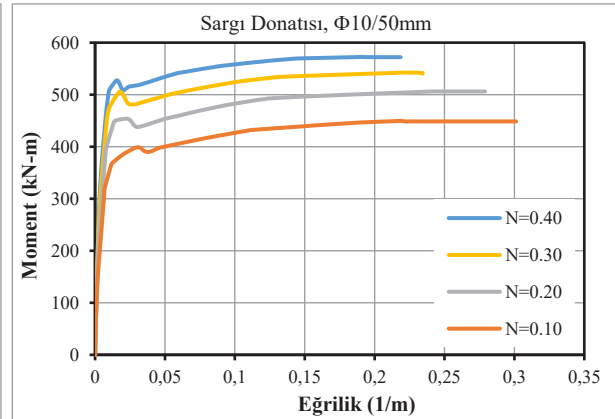
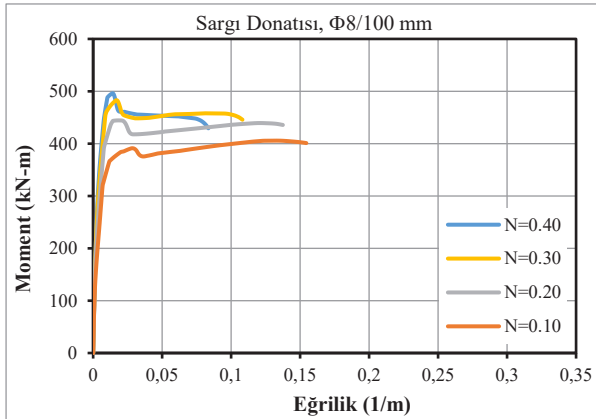
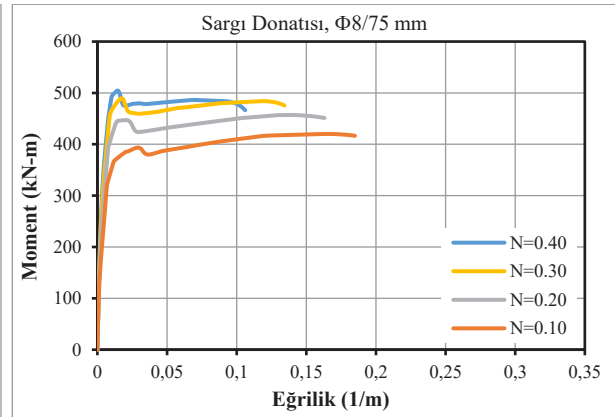
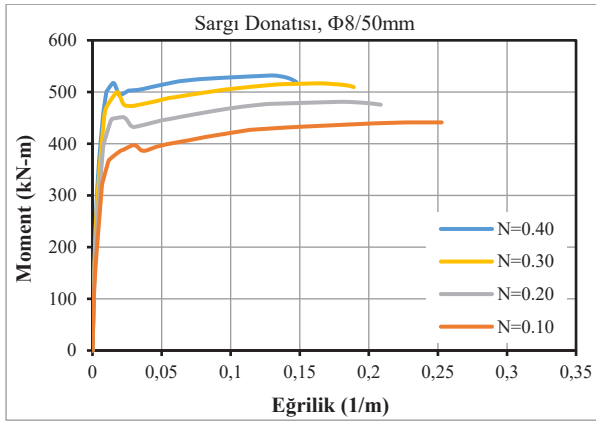
Kolon davranışında önemli bir parametre olan aksel yük etkisini değerlendirmek amacıyla dört farklı yük seviyesi tanımlanmıştır ($N_1 = 495$ kN, $N_2 = 990$ kN, $N_3 = 1485$ kN ve $N_4 = 1980$ kN). Böylece aksel yük düzeyinin moment kapasitesi ve eğrilik sünekliği üzerindeki etkilerinin karşılaştırmalı olarak incelenmesi mümkün olmuştur. İncelenen tüm modellerde beton sınıfı C30, donatı çeliği sınıfı ise B420C olarak sabit tutulmuştur. Kolon kesitlerine ait geometrik ve donatı özellikleri Tablo 3.3'te verilmiştir (Foroughi ve Yüksel, 2020b).

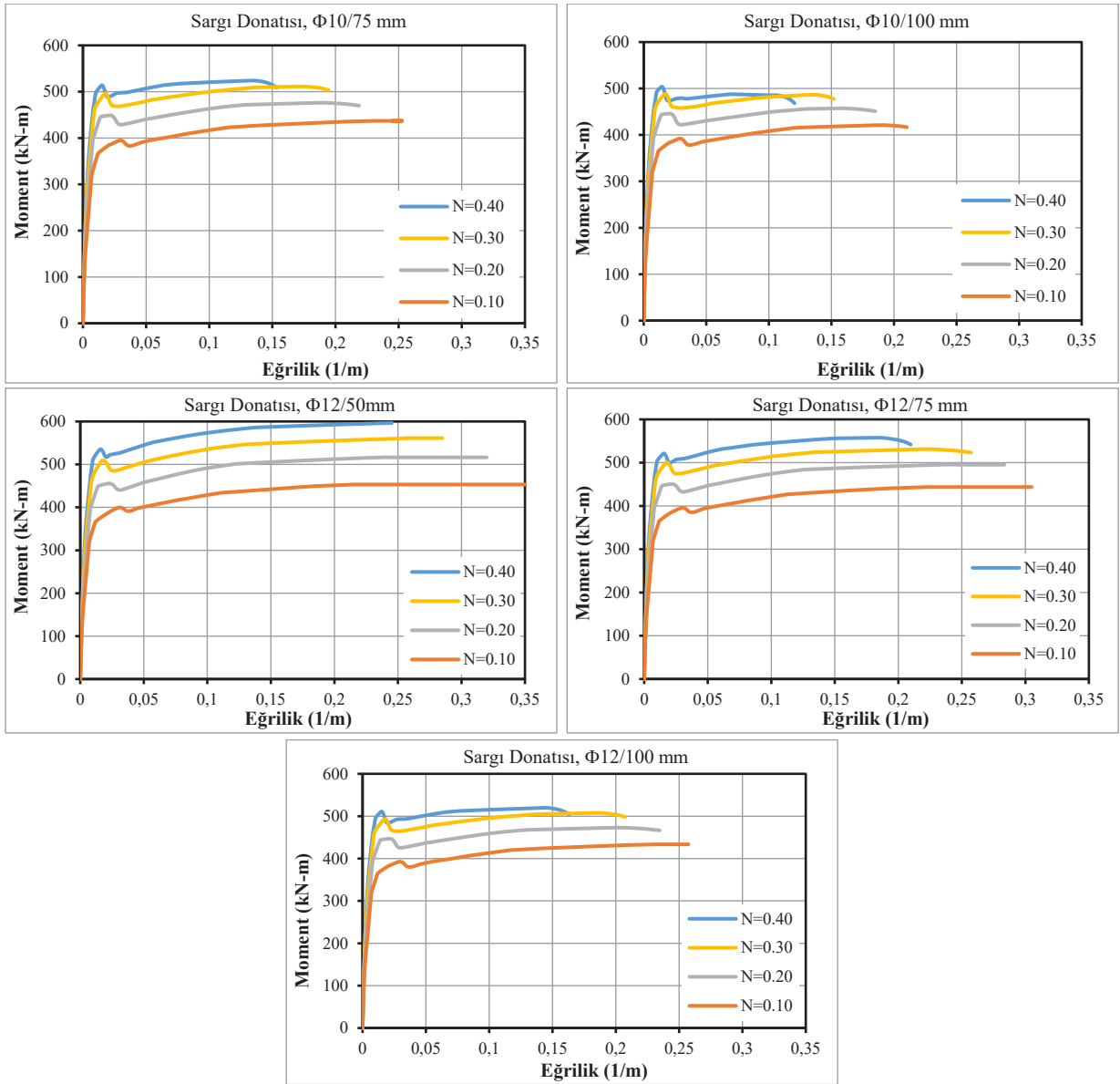
Gerçekleştirilen analizler sonucunda kesitlerin farklı parametre kombinasyonları altındaki moment-eğrilik tepkileri elde edilmiştir. Boyuna donatı oranı, sargı donatısı düzeni ve aksel yük düzeyindeki değişimlerin kesit rijitliği, maksimum moment kapasitesi ve akma sonrası deformasyon davranışı üzerindeki etkileri moment-eğrilik diyagramları üzerinden değerlendirilmiştir. Elde edilen moment-eğrilik ilişkileri Şekil 3.7'de karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Analiz sonuçlarından yararlanılarak maksimum moment kapasitesi ve eğrilik süneklik katsayıları hesaplanmış, söz konusu parametreler üzerindeki tasarım değişkenlerinin etkileri bütüncül olarak değerlendirilmiştir. Ayrıca farklı donatı düzenlemeleri ve aksel yük seviyelerinin moment kapasitesi ile süneklik üzerindeki etkileri Şekil 3.8'de grafiksel olarak gösterilmiştir. Bu değerlendirmeler, söz konusu dikdörtgen kolon kesitlerinin sünek davranış kapasitesinin ve performans esaslı tasarım açısından belirleyici parametrelerin ortaya konulmasına katkı sağlamaktadır.

Tablo 3.3. Tasarlanan 300 mm × 550 mm dikdörtgen enkesitli kolon modellerine ait parametreler

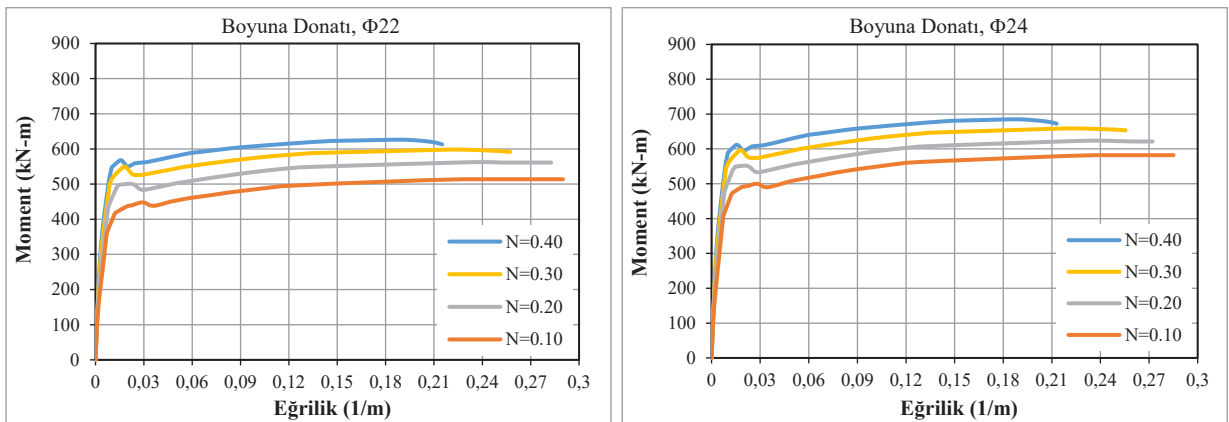
Kesit Boyutları (mm)		Boyuna Donatı	Sargı donatısı		N/N_{max}
b	h		Çap	Aralık	
300 mm	550 mm	10Φ20 mm	Φ8 mm Φ10 mm Φ12 mm	50 mm 75 mm 100 mm	0.10 0.20 0.30 0.40
		10Φ22 mm			
		10Φ24 mm			
		10Φ26 mm			
		10Φ28 mm			
		10Φ30 mm			

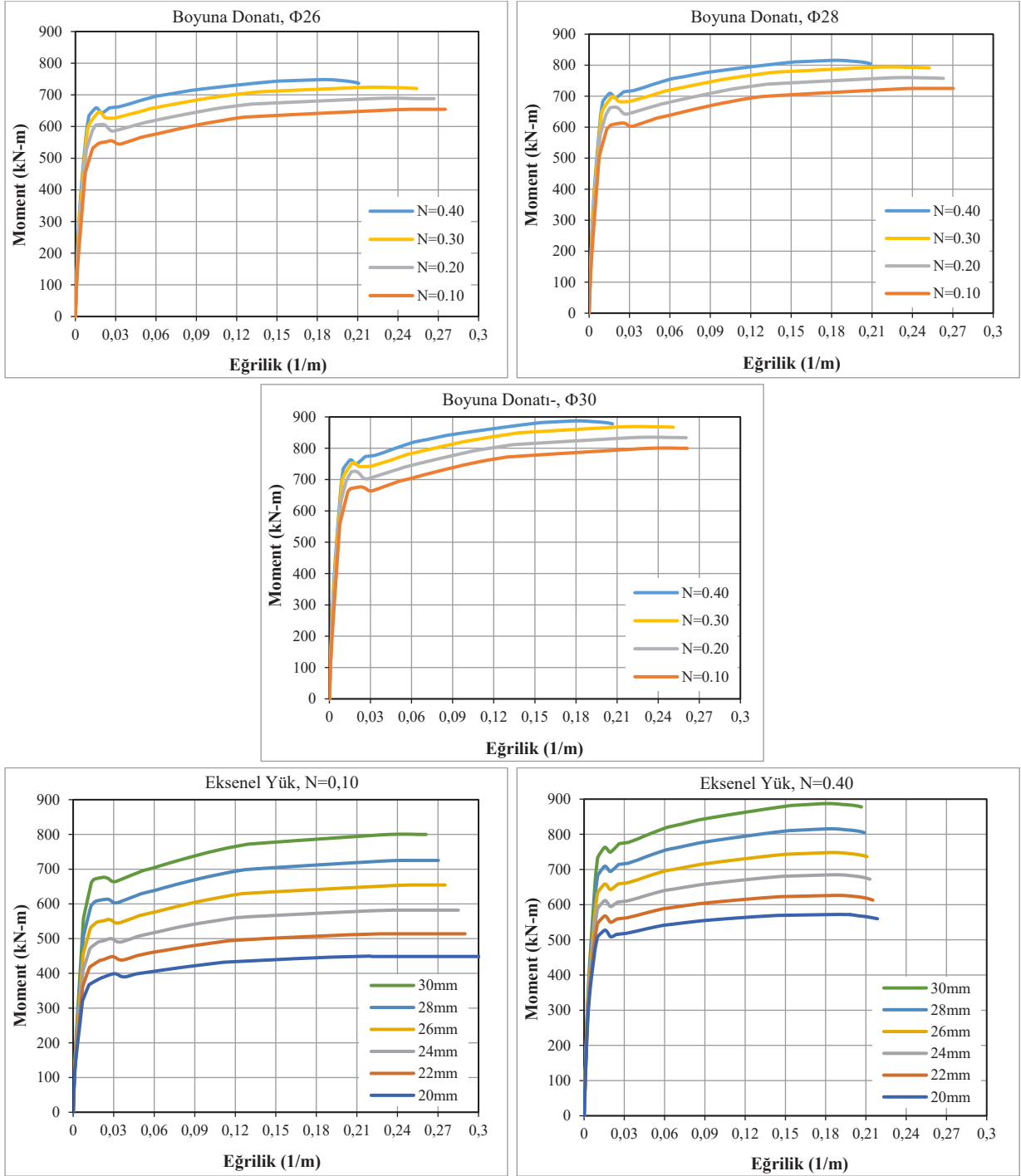
Kolon Kesit Geometrisi





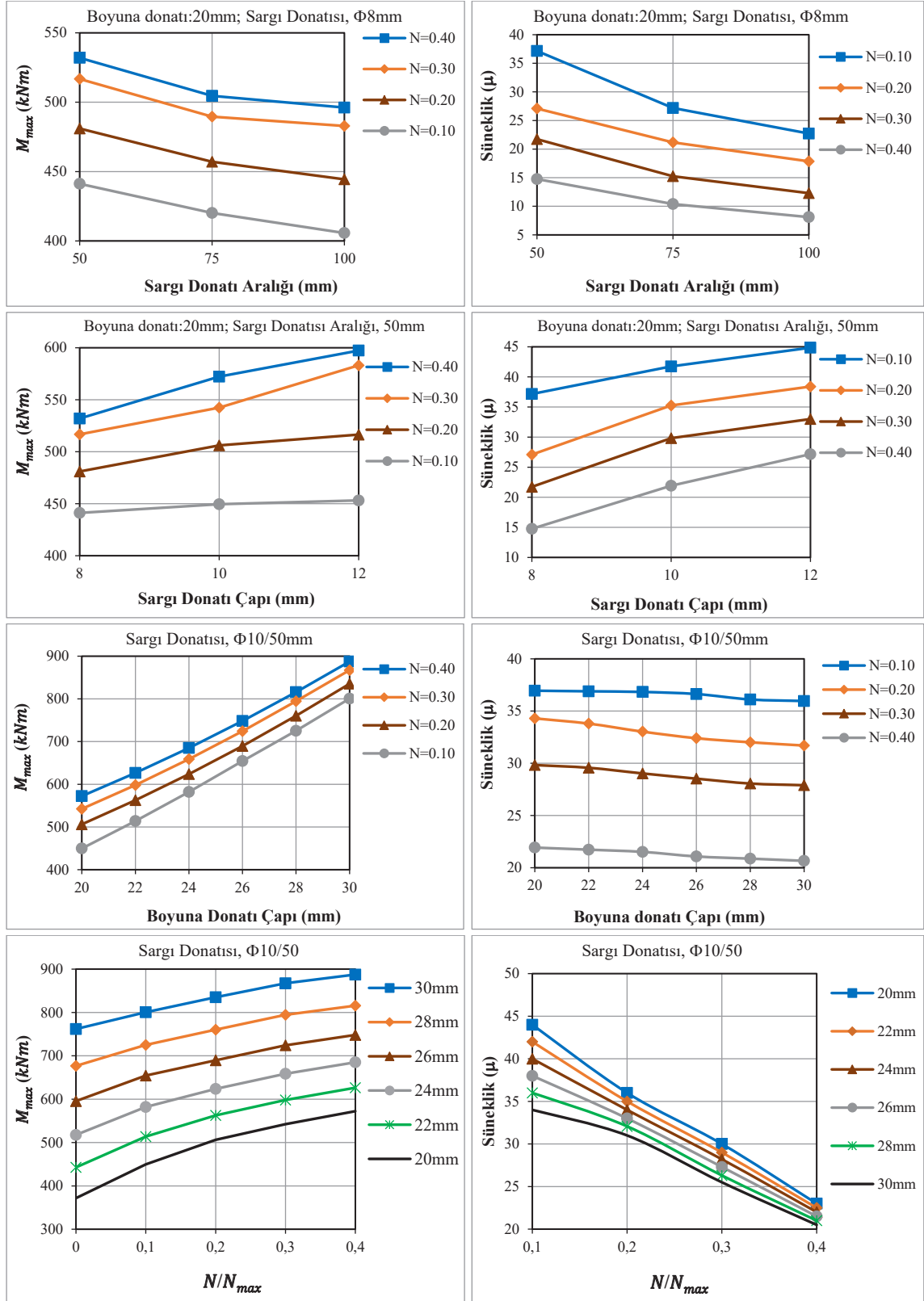
a) Farklı sargı donatısı oranı (boyuna donatı $\Phi 20$ mm)





b) Farklı boyuna donatı oranı (sargı donatısı; $\Phi 10/50$ mm)

Şekil 3.7. 300 mm×550 mm dikdörtgen enkesitli kolonların farklı tasarım parametrelerine göre moment-eğrilik ilişkileri



Şekil 3.8. 300 mm x 550 mm dikdörtgen en-kesitli kolonlarda farklı parametrelerin moment ve sünekliğe etkisi

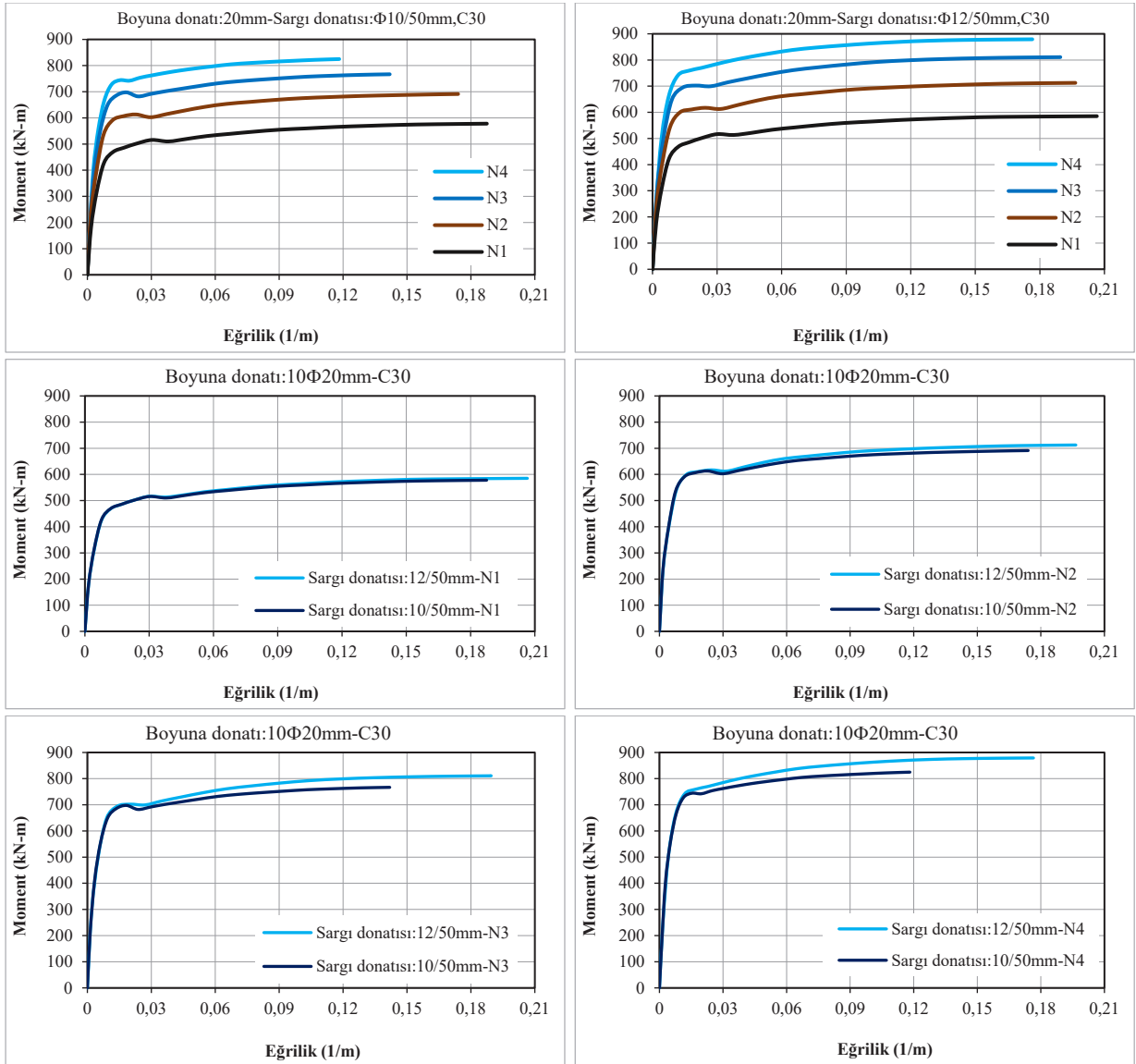
3.4.4. 400 mm × 600 mm dikdörtgen enkesitli kolonun moment-eğrilik ilişkisi ve eğrilik süneklik davranışı

Bu bölümde 400 mm × 600 mm dikdörtgen enkesitli betonarme kolonların doğrusal olmayan kesitsel davranışı, malzemelerin gerçekçi gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri dikkate alınarak gerçekleştirilen moment-eğrilik analizleri ile değerlendirilmiştir. Oluşturulan modellerde kesit davranışını etkileyen temel tasarım değişkenlerini inceleyebilmek amacıyla kapsamlı bir parametre seti kullanılmıştır. Bu kapsamda boyuna donatı çapı $\Phi 20$ mm ile $\Phi 30$ mm arasında değişen altı farklı değer olarak tanımlanmıştır. Çekirdek beton üzerindeki sargı etkisini değerlendirmek amacıyla iki farklı sargı donatısı çapı ($\Phi 10$ mm ve $\Phi 12$ mm) ile üç farklı sargı donatısı aralığı (50 mm, 75 mm ve 100 mm) dikkate alınmıştır. Ayrıca eksenel yük düzeyinin kesitsel davranış üzerindeki etkisini incelemek amacıyla her model dört farklı (N/N_{max} oranı 0.10, 0.20, 0.30 ve 0.40) eksenel yük seviyesi altında analiz edilmiştir (C30 için; $N_1 = 420$ kN, $N_2 = 1140$ kN, $N_3 = 2160$ kN ve $N_4 = 2880$ kN). Kolon kesitleri için uygulanan eksenel yük seviyeleri, beton sınıfına bağlı olarak farklı değerler alacak şekilde tanımlanmıştır. Kolon kesitlerine ait geometrik ve donatı özellikleri Tablo 3.4'te verilmiştir (Foroughi, 2022). Bu kesit grubunda ayrıca beton basınç dayanımının davranış üzerindeki etkisini değerlendirmek amacıyla farklı beton sınıfları kullanılmıştır. Bu doğrultuda C30, C35, C40, C45 ve C50 beton sınıfları dikkate alınarak beton dayanımındaki değişimin moment kapasitesi, eğrilik kapasitesi ve süneklik üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Tüm modellerde donatı çeliği sınıfı B420C olarak sabit tutulmuş ve böylece beton dayanımının kesitsel performans üzerindeki etkisi doğrudan değerlendirilebilmiştir.

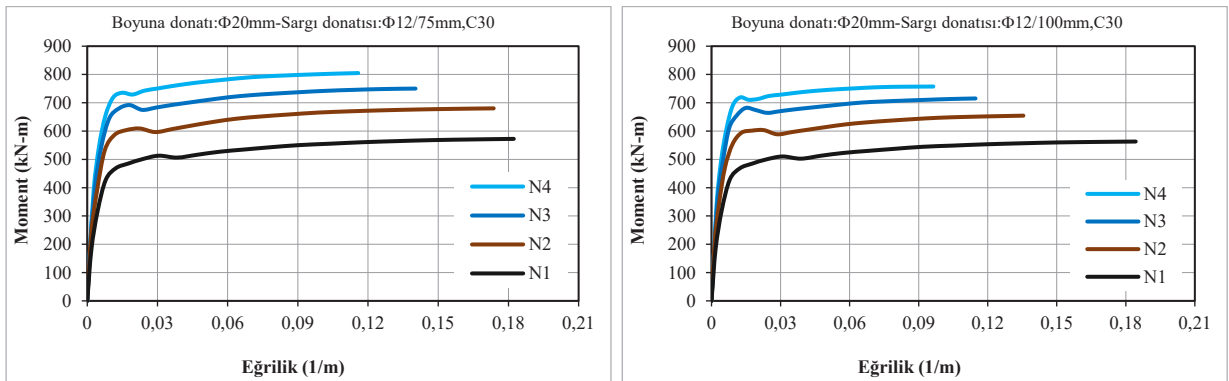
Gerçekleştirilen analizler sonucunda elde edilen moment-eğrilik ilişkileri Şekil 3.9'da karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Bu eğrilerden yararlanılarak hesaplanan eğrilik süneklik değerleri ile tasarım parametreleri arasındaki ilişkiler Şekil 3.10'da verilmiştir. Sonuçlar, beton dayanımı, sargı donatısı düzeni ve eksenel yük düzeyinin kolon kesitlerinin moment kapasitesi ile deformasyon kapasitesi üzerinde belirleyici olduğunu göstermektedir. Bu bulgular, özellikle performans esaslı tasarım yaklaşımlarında dikdörtgen kesitli betonarme kolonların sünek davranışının değerlendirilmesine yönelik önemli çıkarımlar sunmaktadır.

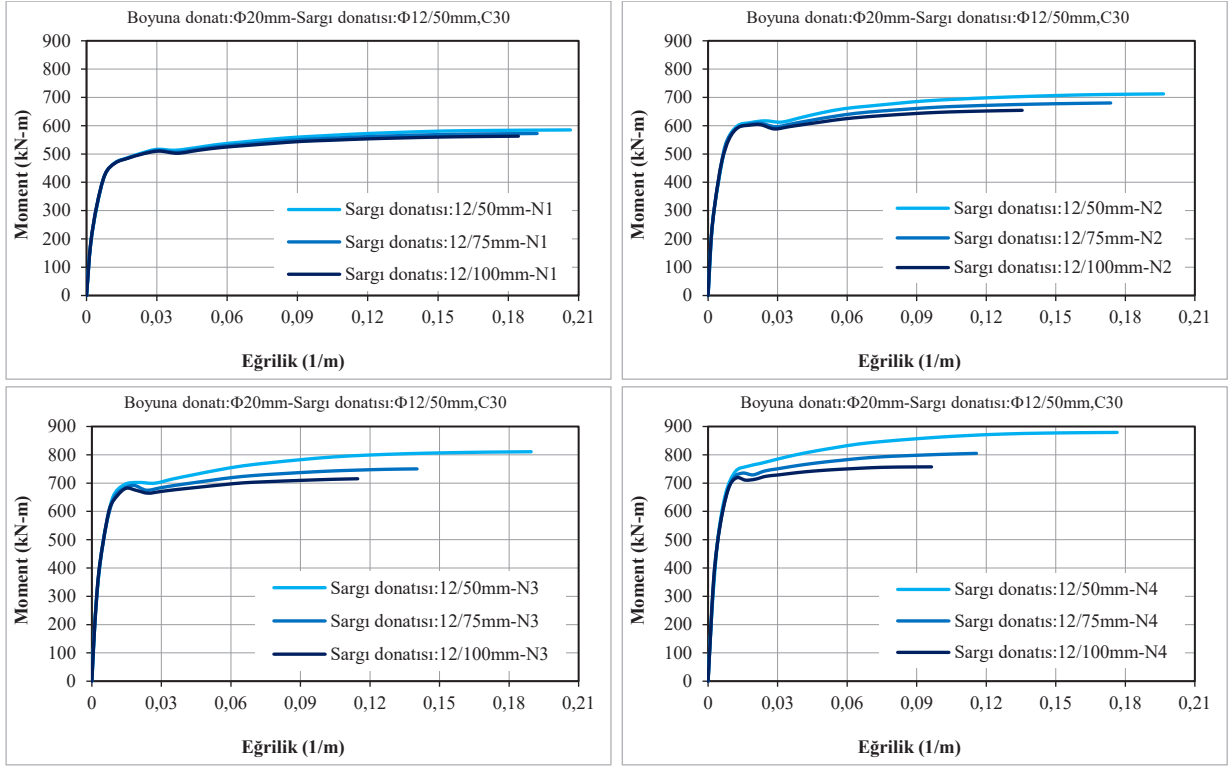
Tablo 3.4. Tasarlanan 400 mm×600 mm dikdörtgen enkesitli kolon modellerine ait parametreler

Kesit Boyutları (mm)		Malzeme	Boyuna Donatı	Sargı donatısı		N/N_{max}
b	h			Çap	Aralık	
400 mm	600 mm	C30	10 $\Phi 20$ mm	$\Phi 10$ mm $\Phi 12$ mm	50 mm 75 mm 100 mm	0.10 0.20 0.30 0.40
		C35	10 $\Phi 22$ mm			
		C40	10 $\Phi 24$ mm			
		C45	10 $\Phi 26$ mm			
		C50	10 $\Phi 28$ mm			
			10 $\Phi 30$ mm			
Kolon Kesit Geometrisi						

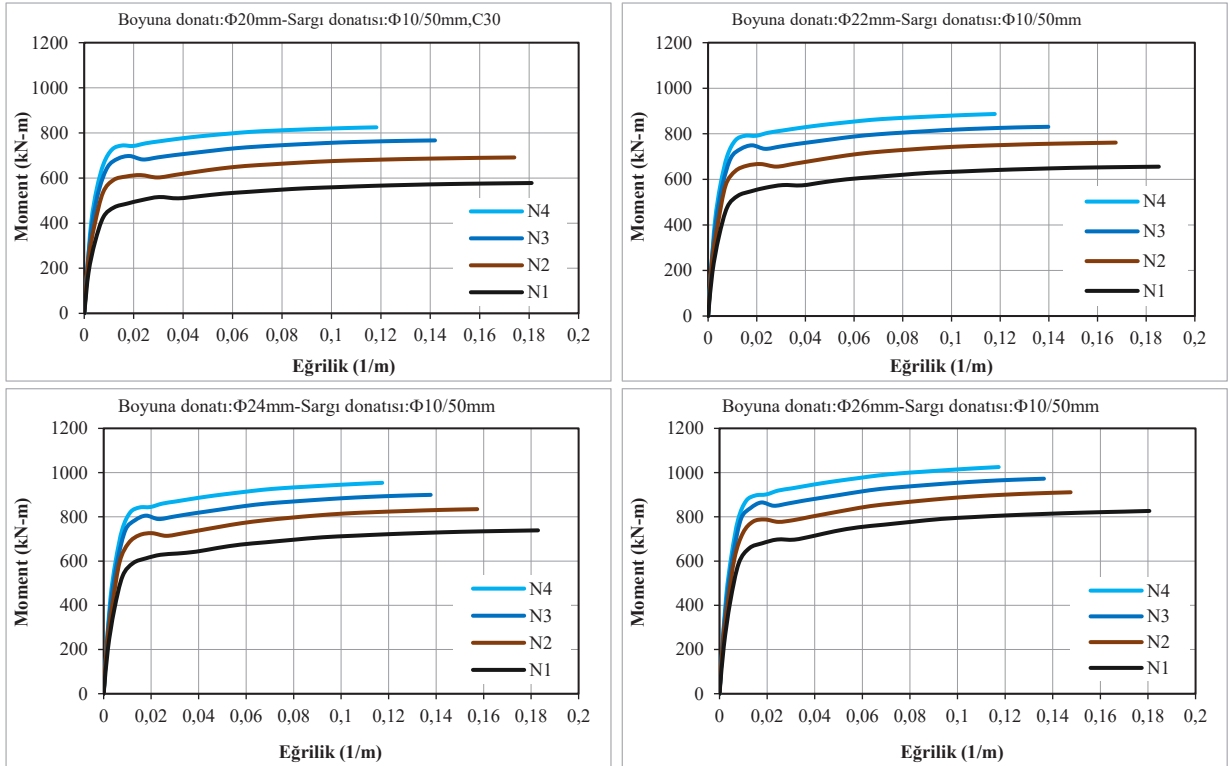


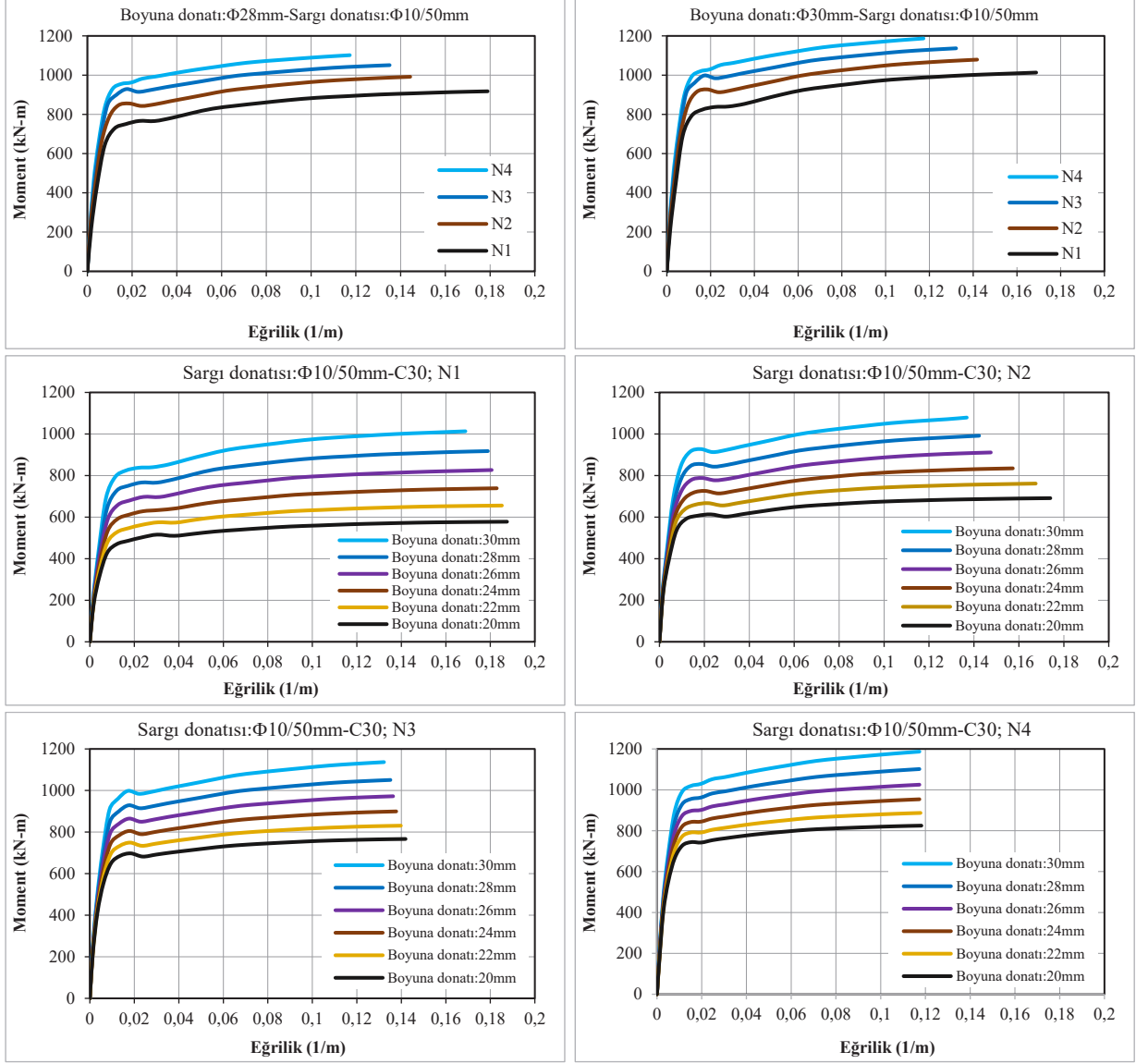
a) Farklı sargı donatısı çapı



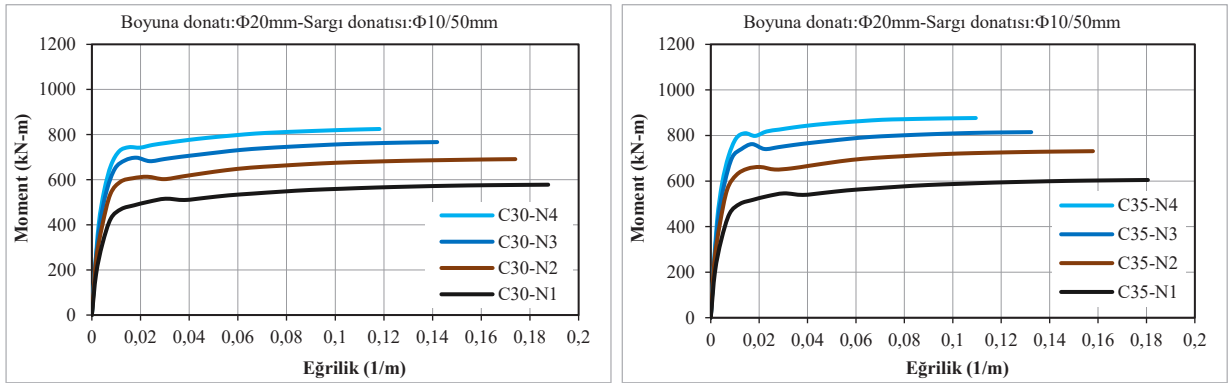


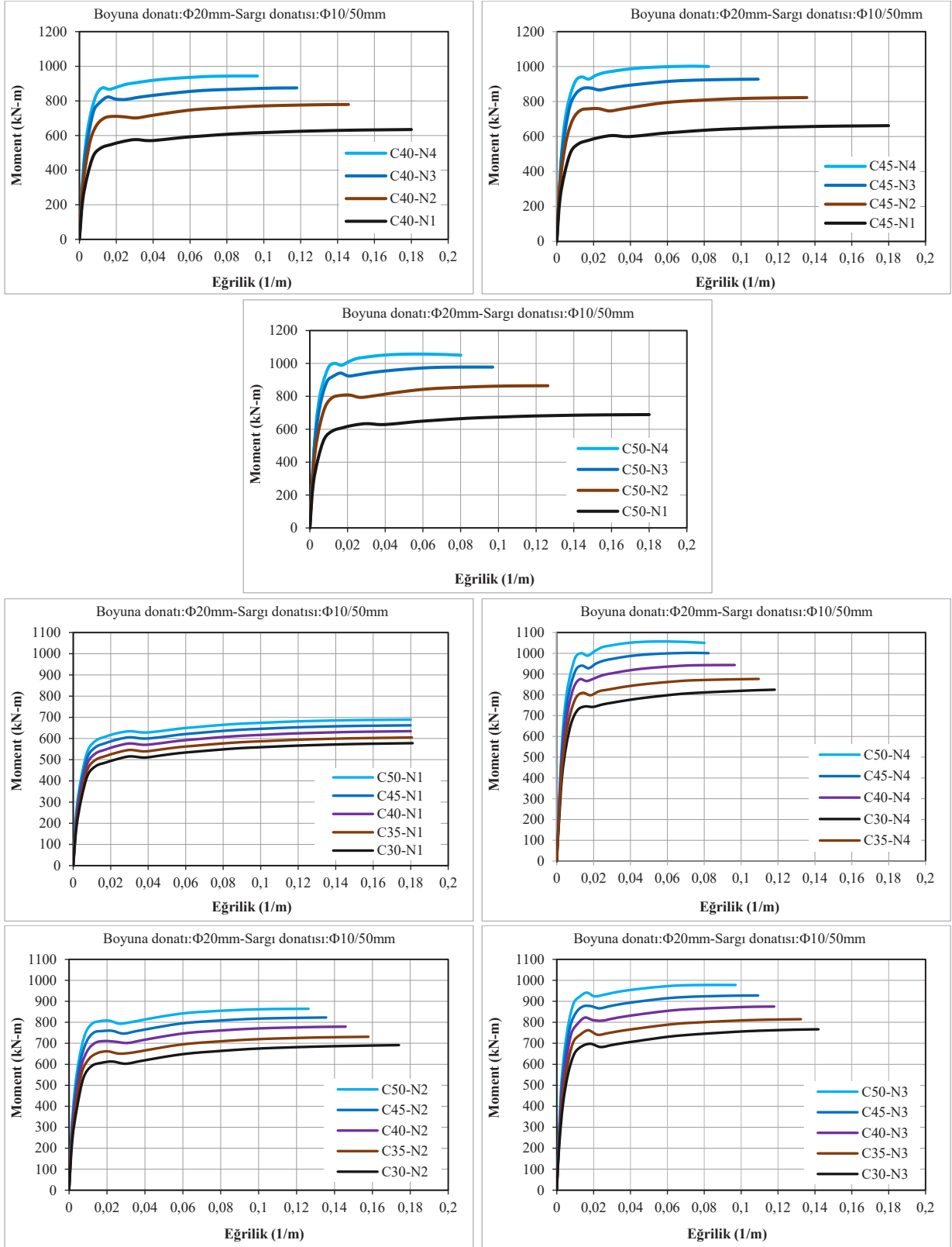
b) Farklı sargı donatısı aralığı





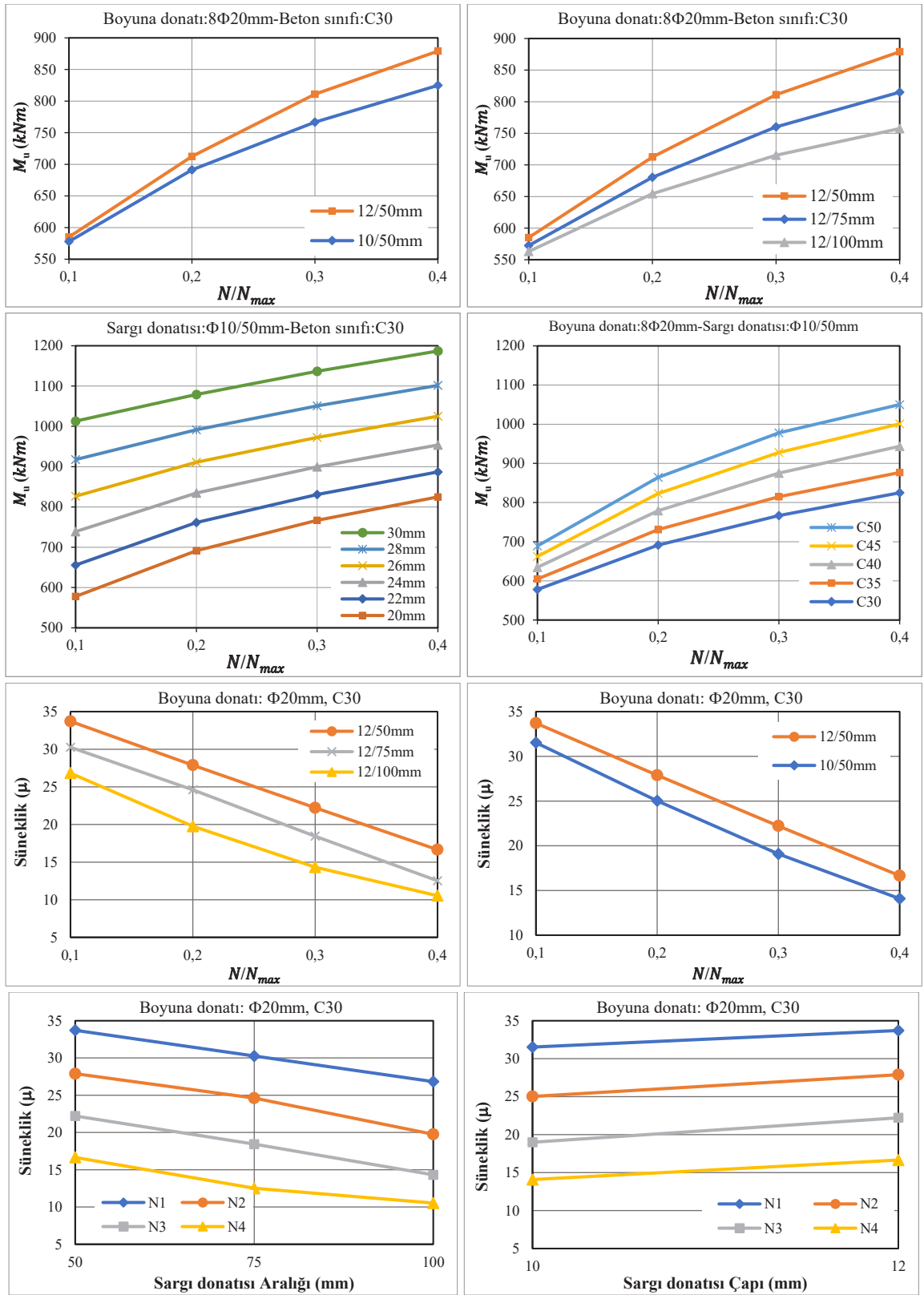
c) Farklı boyuna donatı oranı

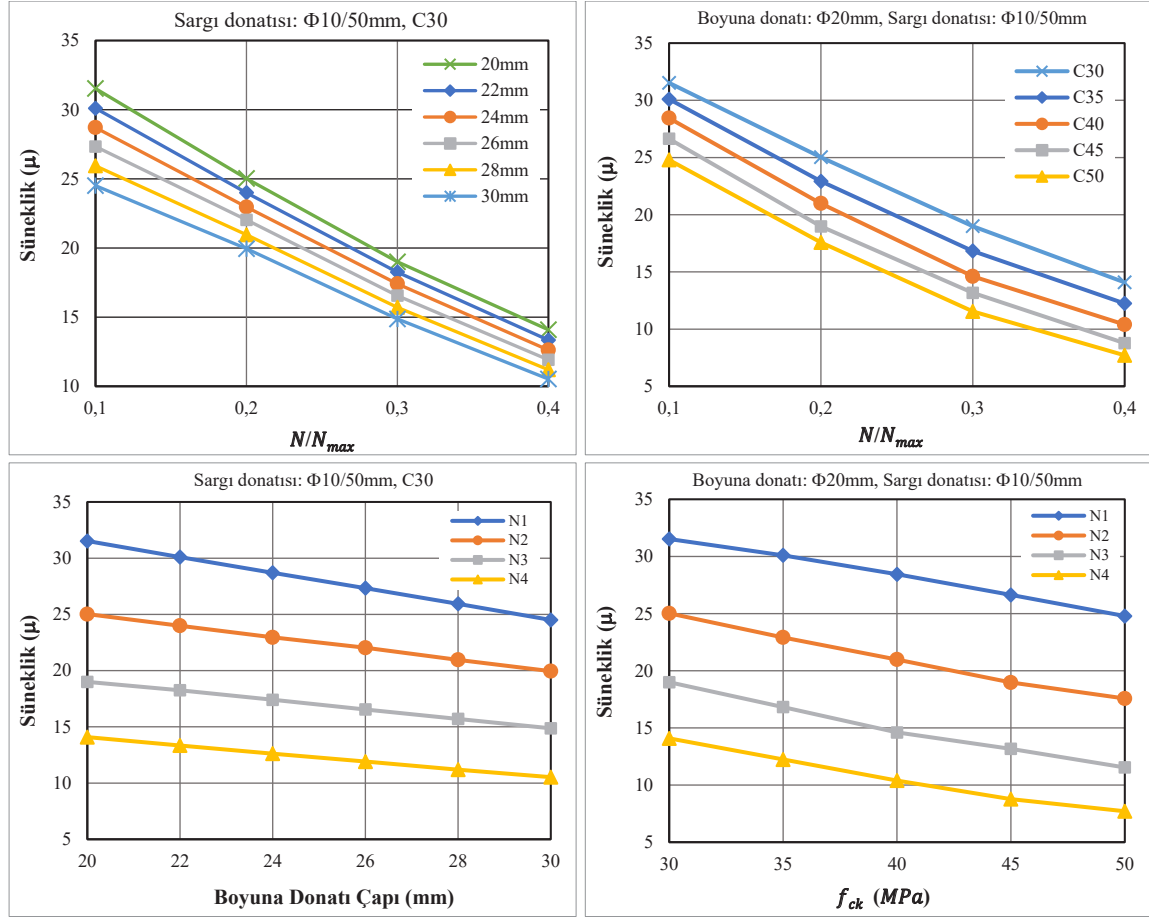




d) Farklı beton sınıfı

Şekil 3.9. 400 mm x 600 mm dikdörtgen en-kesitli kolonların farklı tasarım parametrelerine göre moment-eğrilik ilişkileri





Şekil 3.10. 400 mm x 600 mm dikdörtgen en-kesitli kolonlarda farklı parametrelerin moment ve sünekliliğe etkisi

Farklı tasarım parametrelerinin eğrilik sünekliliği üzerindeki etkisi

300 mm x 550 mm ve 400 mm x 600 mm dikdörtgen enkesitli betonarme kolon modellerine ait moment-eğrilik ve eğrilik süneklilik incelemeleri birlikte değerlendirildiğinde, kolon davranışının temel olarak boyuna donatı oranı, sargı donatısı düzeni ve eksenel yük düzeyi tarafından kontrol edildiği görülmektedir. Her iki dikdörtgen kesit grubunda da incelenen parametrelerin etkileri benzer eğilimler göstermektedir.

Boyuna donatı oranı, dikdörtgen kesitli kolonların eğilme kapasitesini kontrol eden başlıca parametrelerden biridir. Boyuna donatı oranındaki artış, çekme bölgesinde gelişen iç kuvvet kapasitesini artırarak moment-eğrilik ilişkilerinde daha yüksek tepe moment değerlerinin oluşmasına neden olmaktadır.

Sargı donatısı düzeni, dikdörtgen kesitli betonarme kolonların moment-eğrilik davranışının akma sonrası evresini ve eğrilik sünekliliği kapasitesini belirleyen temel tasarım parametrelerinden biri olarak öne çıkmaktadır. Sargı donatısı aralığının azalmasıyla birlikte moment-eğrilik eğrilerinin akma sonrası bölgesinde daha kararlı ve yayılı bir plastik davranış gelişmekte, buna bağlı olarak kesitin ulaşabildiği nihai eğrilik değerleri artış göstermektedir. Çekirdek beton üzerinde oluşan yanal sargı etkisi, basınç bölgesindeki betonun ezilme sürecini geciktirmekte ve akma sonrası aşamada dayanım kaybının daha kademeli biçimde gerçekleşmesini sağlamaktadır. Bu durum, kesitin enerji yutma kapasitesini artırarak sünek davranışın daha belirgin hale gelmesine katkıda

bulunmaktadır. Bu nedenle sargı donatısı, dikdörtgen kesitli kolonlarda hem deformasyon kapasitesini hem de süneklik performansını belirleyen en kritik tasarım değişkenlerinden biri olarak değerlendirilmektedir.

Artan aksenal yük oranı, dikdörtgen kesitli betonarme kolonların moment-eğrilik davranışını belirgin biçimde etkileyen temel parametrelerden biridir. Aksenal basınç kuvvetinin artmasıyla birlikte kesitte oluşan ortalama basınç gerilmeleri yükselmekte, bu durum basınç bölgesindeki betonun nihai birim şekildeğiştirme sınırına daha erken ulaşmasına neden olmaktadır. Sonuç olarak moment-eğrilik eğrilerinin akma sonrası bölümünde plastik şekildeğiştirme kapasitesi azalmakta ve kesitin eğrilik sünekliği sınırlanmaktadır. Bununla birlikte, yeterli düzeyde sargı donatısı ile etkin biçimde sargılanan çekirdek betonu daha yüksek basınç deformasyonlarına ulaşabildiği görülmektedir. Bu durum, artan aksenal yükün neden olduğu gevrekleşme eğiliminin belirli ölçüde dengelenmesine olanak sağlamakta ve kesitin akma sonrası deformasyon kapasitesinin korunmasına katkı sunmaktadır. Bu bulgu, özellikle deprem etkilerine maruz dikdörtgen kesitli kolonlarda, aksenal yük düzeyi ile sargı donatısı etkinliği arasındaki etkileşimin sünek davranışın sürdürülebilirliği açısından kritik bir tasarım parametresi olduğunu göstermektedir.

Beton basınç dayanımındaki artış, dikdörtgen kesitli betonarme kolonlarda moment taşıma kapasitesini artıran önemli parametrelerden biri olarak belirlenmiştir. Daha yüksek dayanımlı beton kullanımı kesitin eğilme dayanımını artırmakla birlikte, moment-eğrilik eğrilerinin akma sonrası bölümünde dayanım azalmasının daha keskin bir karakter kazanmasına neden olabilmektedir. Bu durum, yüksek dayanımlı beton kullanılan kolon kesitlerinde uygun sargı donatısı düzenlemeleri ile desteklenmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Yeterli sargı donatısı ile etkin biçimde sargılanan çekirdek beton, daha yüksek basınç birim şekildeğiştirmelerine ulaşabilmekte ve böylece yüksek dayanımlı betonun daha kararlı ve dengeli bir deformasyon kapasitesi sergilemesi mümkün olmaktadır.

Eğrilik sünekliği açısından elde edilen sonuçlar incelendiğinde, en belirleyici tasarım parametresinin sargı donatısı olduğu açık biçimde ortaya çıkmaktadır. Sık aralıklı sargı donatısı içeren dikdörtgen kolon modellerinde eğrilik süneklik katsayılarının belirgin ölçüde arttığı; buna karşılık yetersiz sargı koşullarında süneklik kapasitesinin önemli ölçüde azaldığı görülmektedir.

Dikdörtgen enkesitli betonarme kolonların moment-eğrilik davranışı ve eğrilik sünekliği performansı, kesitin dayanım kapasitesini artıran parametreler ile deformasyon kapasitesini kontrol eden parametreler arasındaki karşılıklı etkileşim tarafından belirlenmektedir. Boyuna donatı oranı ve beton basınç dayanımı kesitin eğilme momenti kapasitesini artıran temel değişkenler olarak öne çıkarken, sünek davranışın sürdürülebilirliği büyük ölçüde sargı donatısının sağladığı yanal sargı etkisine bağlıdır.

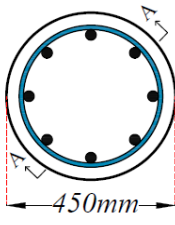
3.4.5. 450 mm dairesel enkesitli kolonun moment-eğrilik ilişkisi ve eğrilik süneklik davranışı

450 mm çaplı dairesel betonarme kolon kesitlerinin doğrusal olmayan eğilme davranışı, kesit düzeyinde gerçekleştirilen moment-eğrilik analizleri ile değerlendirilmiştir. Analizlerde, kesitsel tepkiyi belirleyen temel parametreler olarak boyuna donatı oranı, sargı donatısı oranı ve eksenel yük düzeyi dikkate alınmıştır; söz konusu değişkenlerin kesitin eğilme momenti kapasitesi ve deformasyon kapasitesi üzerindeki etkileri sistematik biçimde değerlendirilmiştir.

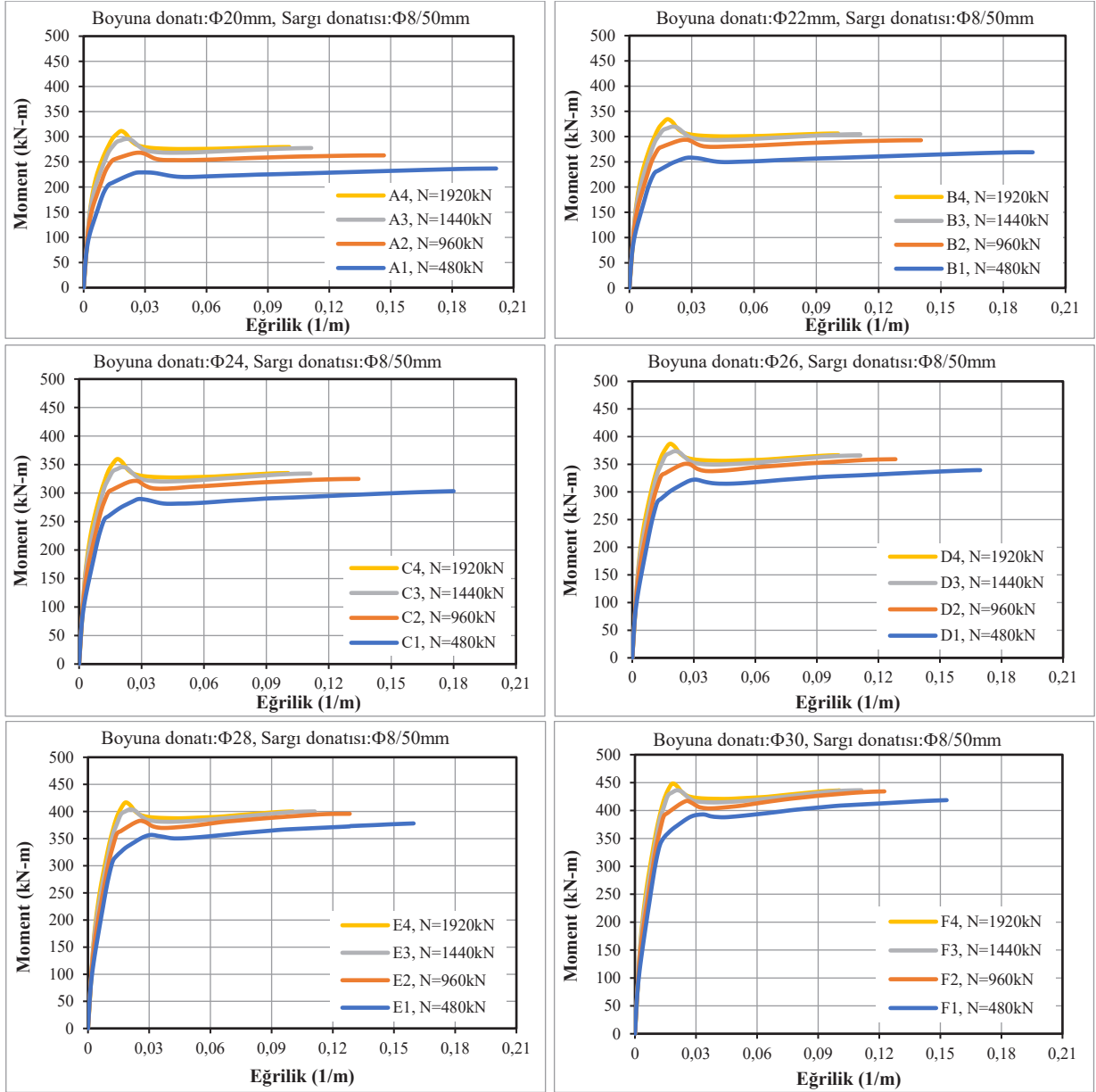
Analitik çalışmada tasarlanan 450 mm çaplı dairesel kolon modellerine ait kesit geometrileri, donatı konfigürasyonları ve uygulanan eksenel yük seviyeleri Tablo 3.5'te sunulmuştur. Boyuna donatı oranının moment-eğrilik ilişkisi üzerindeki etkisini ortaya koyabilmek amacıyla kesitlerde $\Phi 20$ mm ile $\Phi 30$ mm arasında değişen altı farklı boyuna donatı çapı tanımlanmıştır.

Çekirdek betonun sargı etkisini değerlendirmek amacıyla her bir boyuna donatı düzeni için iki farklı sargı donatısı çapı ($\Phi 8$ mm ve $\Phi 10$ mm) dikkate alınmıştır. Böylece sargı donatısı oranındaki değişimin betonun basınç altındaki şekildeğiştirme kapasitesi ve kesitin eğrilik sünekliği üzerindeki katkısı karşılaştırmalı olarak araştırılmıştır. Bununla birlikte farklı eksenel yük seviyeleri altında gerçekleştirilen analizler, eksenel basınç kuvvetindeki artışın moment kapasitesi ile nihai eğrilik değerleri üzerindeki etkisinin belirlenmesine olanak sağlamıştır.

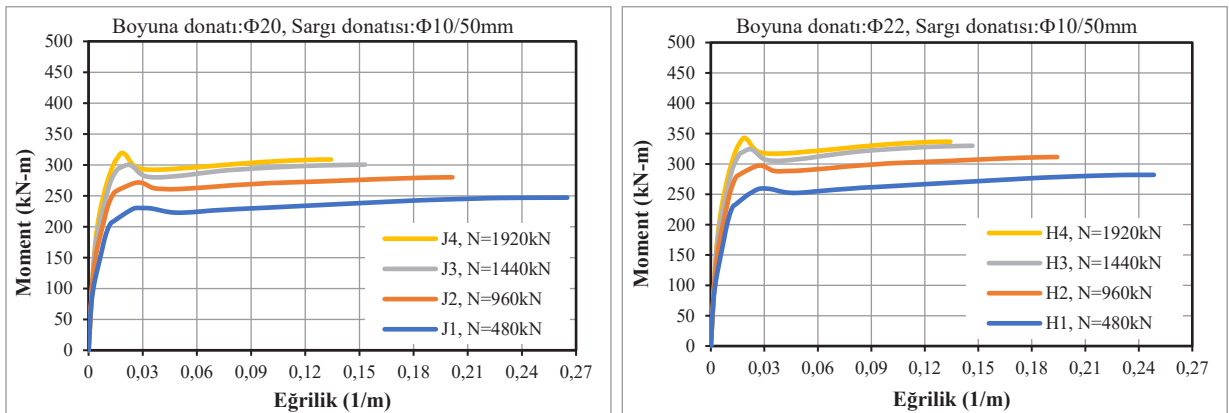
Tablo 3.5. Tasarlanan 450 mm dairesel enkesitli kolon modellerine ait parametreler

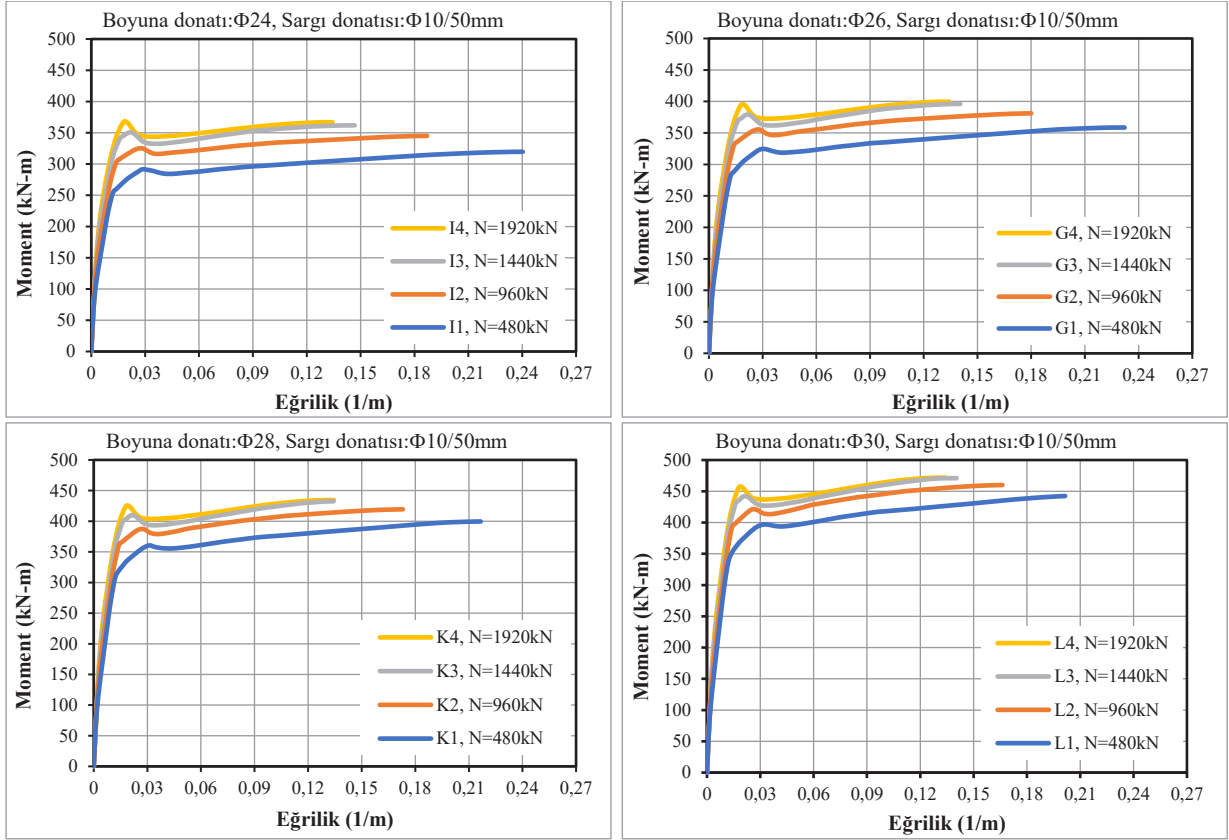
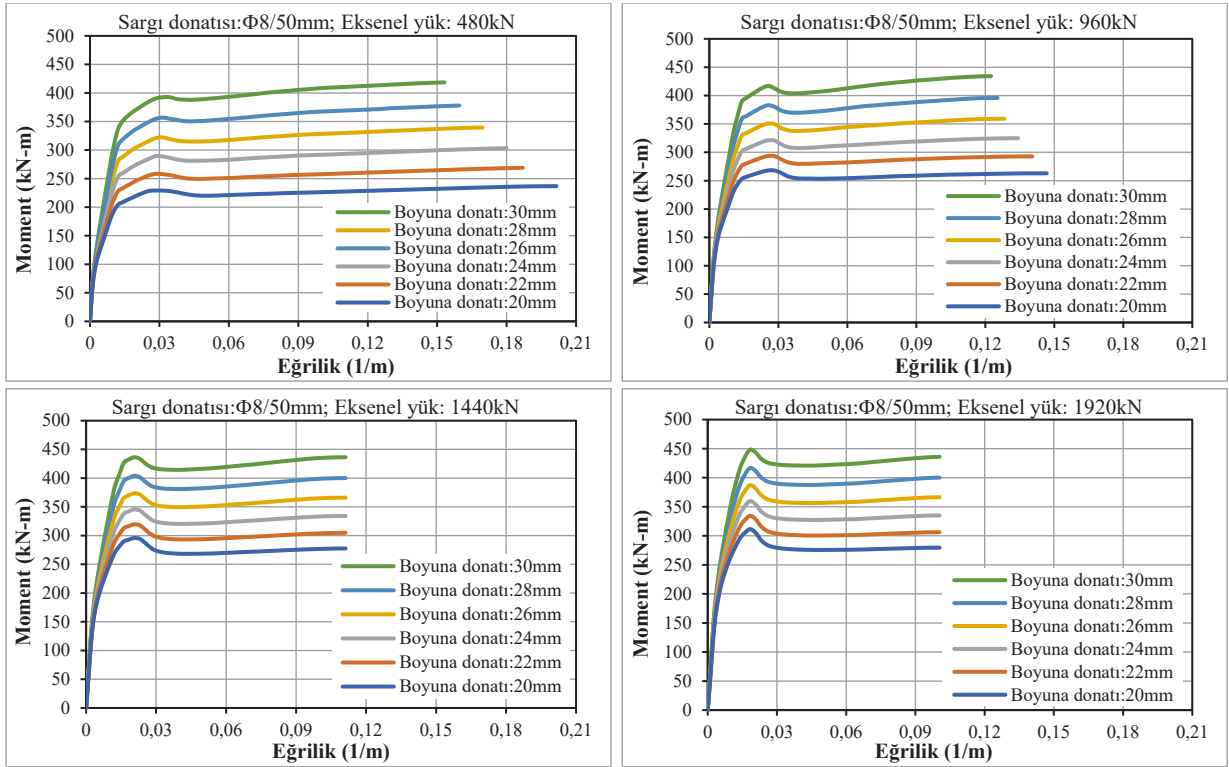
Kesit	Kesit Boyutu (mm)	Boyuna Donatı	Sargı donatısı	Eksenel Yük (N/N_{max})
A		8 $\Phi 20$ mm	$\Phi 8/50$ mm	0.10 0.20 0.30 0.40
B		8 $\Phi 22$ mm		
C		8 $\Phi 24$ mm		
D		8 $\Phi 26$ mm		
E		8 $\Phi 28$ mm		
F		8 $\Phi 30$ mm		
J		8 $\Phi 20$ mm	$\Phi 10/50$ mm	0.10 0.20 0.30 0.40
H		8 $\Phi 22$ mm		
I		8 $\Phi 24$ mm		
G		8 $\Phi 26$ mm		
K		8 $\Phi 28$ mm		
L		8 $\Phi 30$ mm		

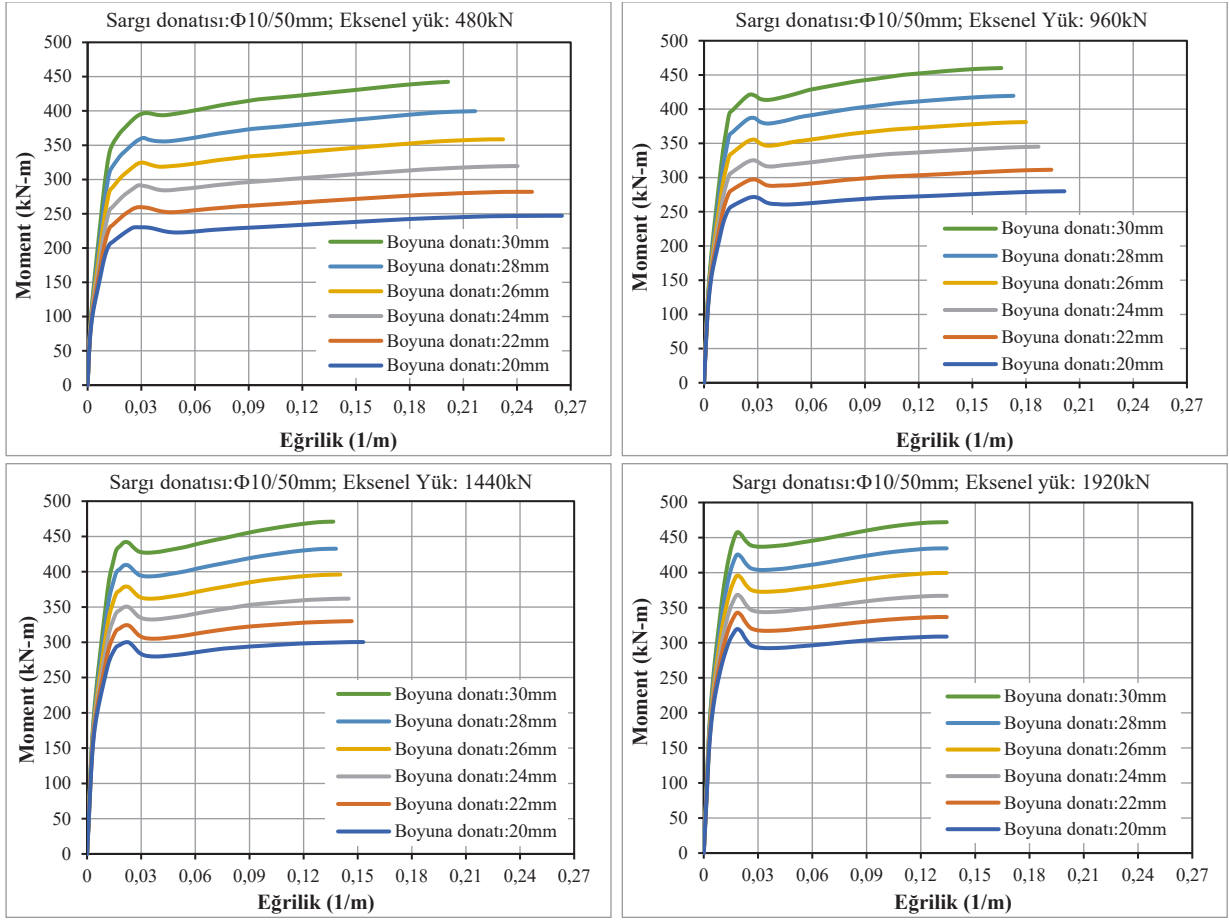
Tasarlanan bu modellerin moment-eğrilik ilişkisi SAP2000 programıyla elde edilmiştir. Eksenel kuvvetin kesit davranışı üzerindeki etkisini incelemek amacıyla, dairesel enkesitli kolon modelleri dört farklı eksenel yük ($N_1=480$ kN, $N_2=960$ kN, $N_3=1440$ kN ve $N_4=1920$ kN) altında analiz edilmiştir. 450 mm çaplı dairesel kolonlarda farklı tasarım parametrelerine göre moment-eğrilik ilişkileri elde edilmiş ve karşılaştırmalı olarak Şekil 3.12'de verilmiştir. 450 mm çaplı dairesel kolonlarda farklı tasarım parametrelerinin moment, eğrilik ve süneklik değerlerine etkisinin karşılaştırması Şekil 3.13'te verilmiştir.



a) Farklı eksenel yük seviyesi (sargı donatısı çapı: Φ8/50 mm)

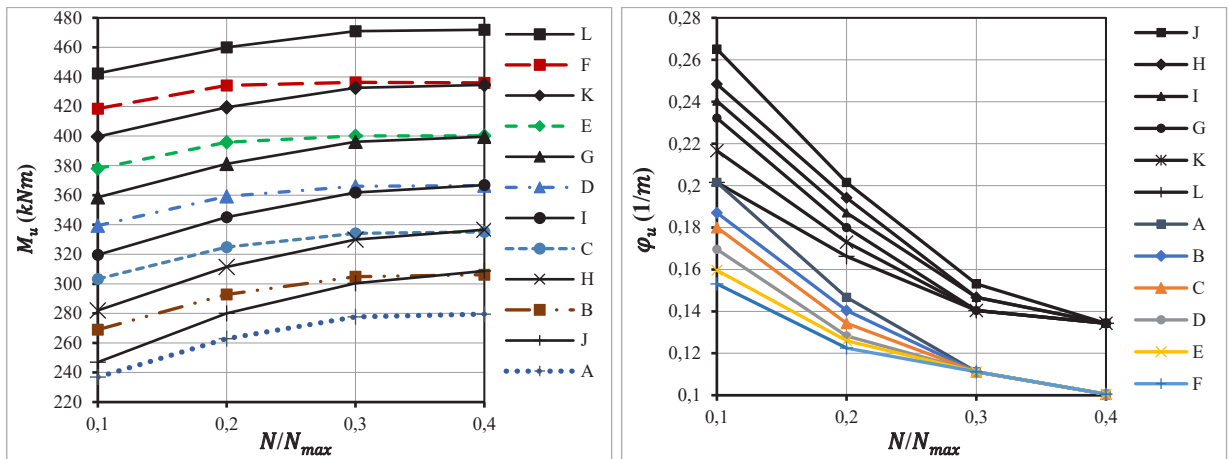


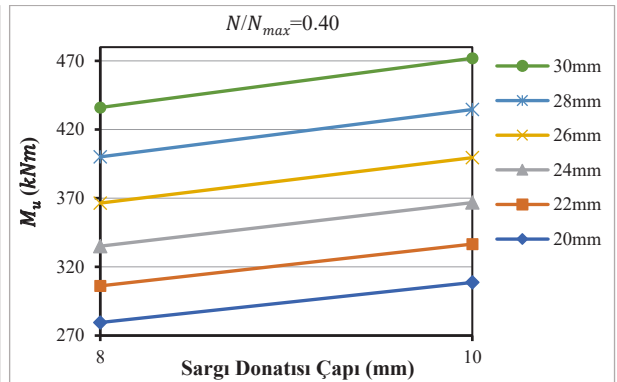
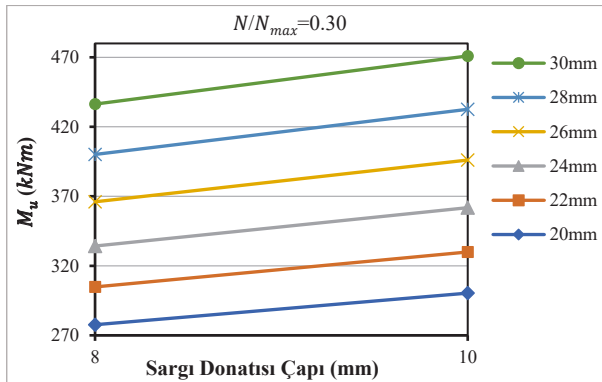
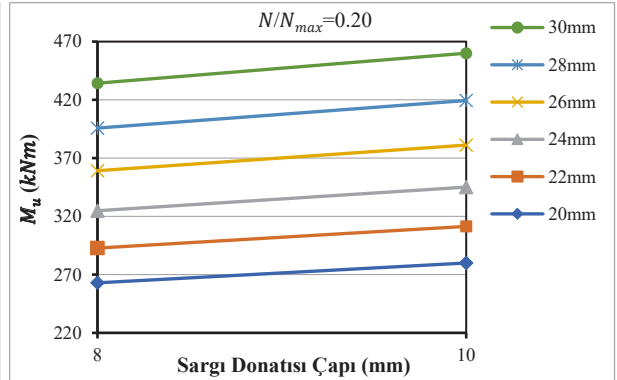
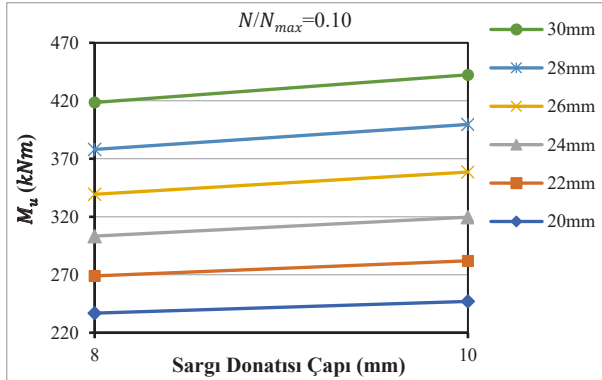
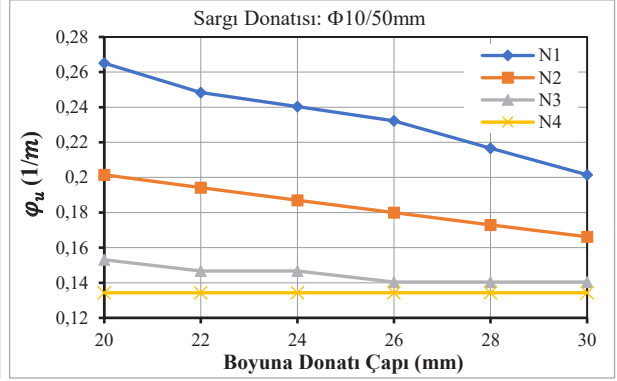
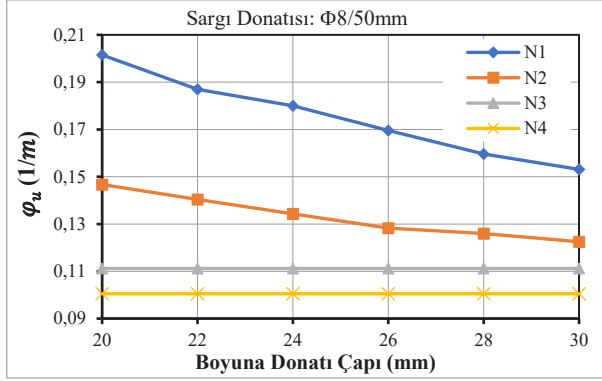
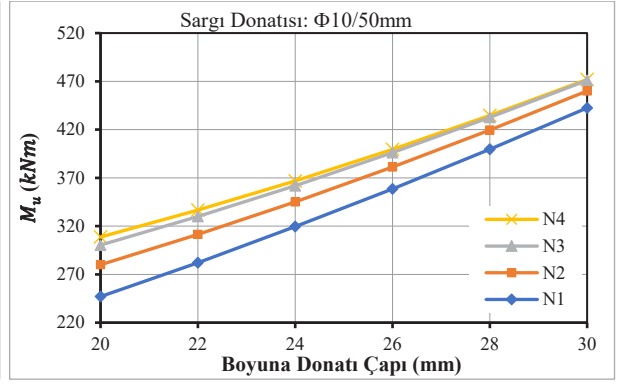
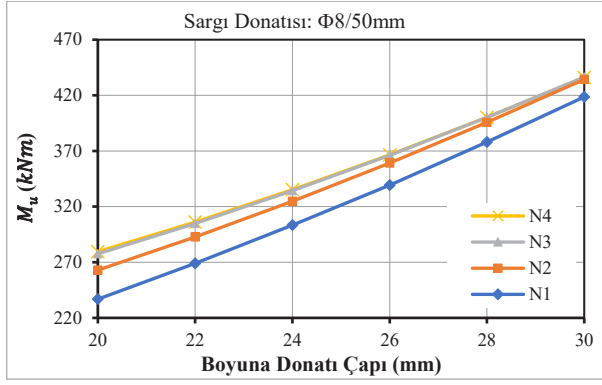

 b) Farklı eksenel yük seviyesi (sargı donatısı; $\Phi 10/50$ mm)

 c) Farklı boyuna donatı oranı (sargı donatısı; $\Phi 8/50$ mm)

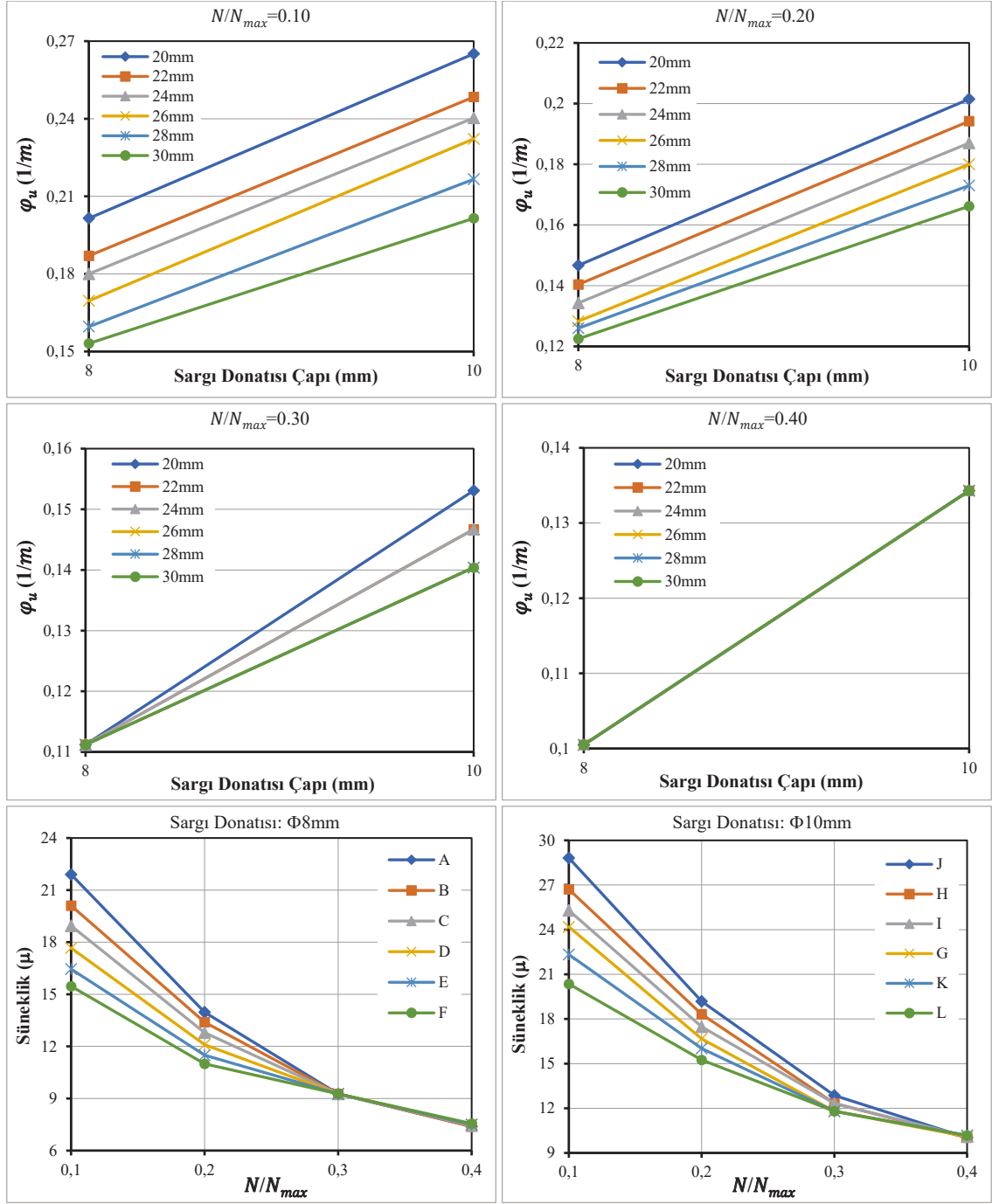


d) Farklı boyuna donatı oranı (sargı donatısı; $\Phi 10/50$ mm)

Şekil 3.11. 450 mm kolonlarda farklı tasarım parametrelere göre moment-eğrilik ilişkileri





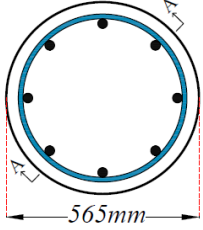


Şekil 3.12. 450 mm kolonlarda farklı tasarım parametrelerinin moment, eğrilik ve süneklik değerlerine etkisinin karşılaştırması

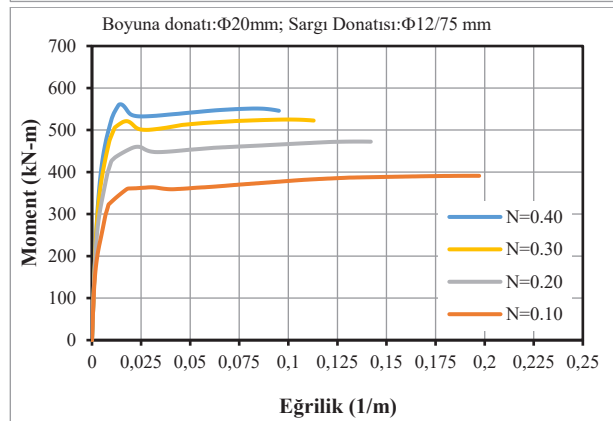
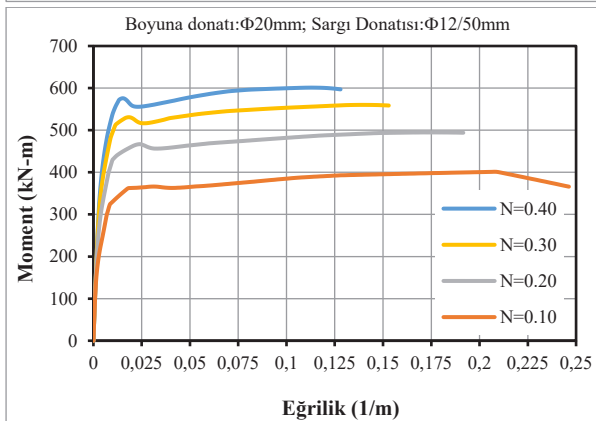
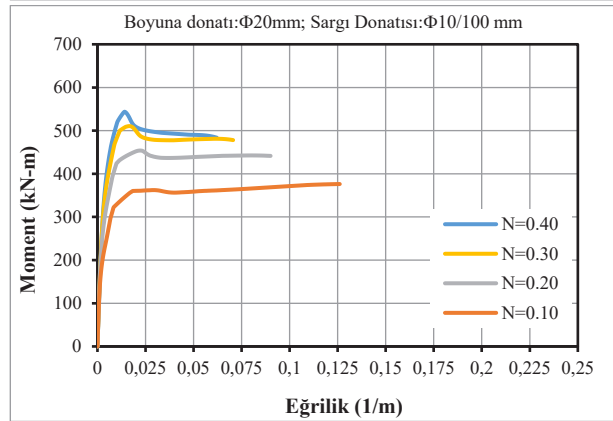
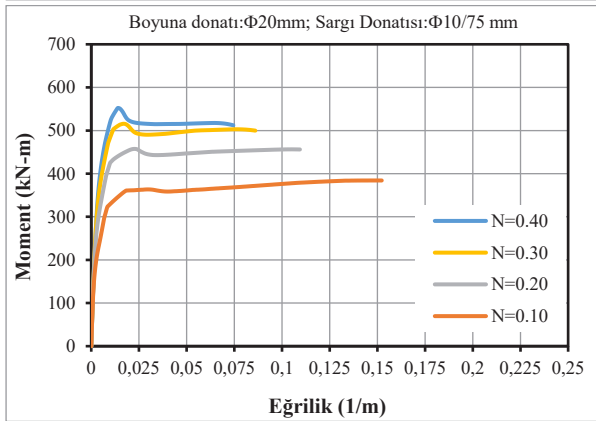
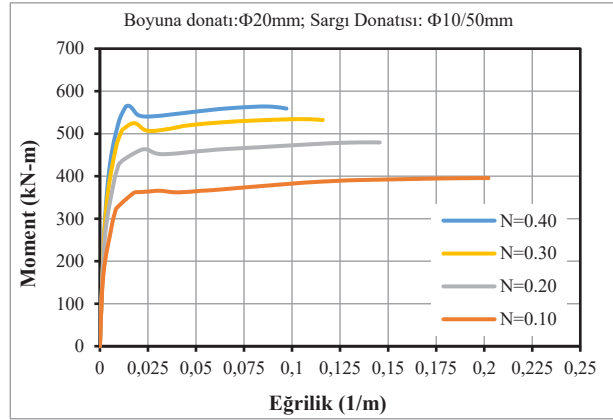
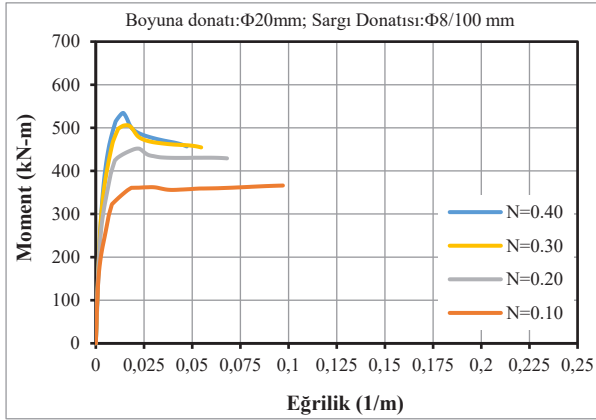
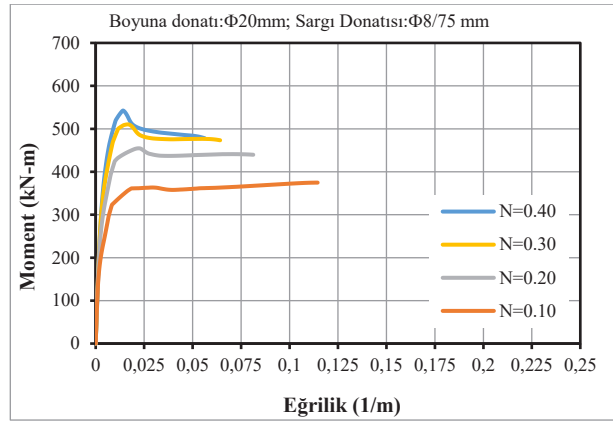
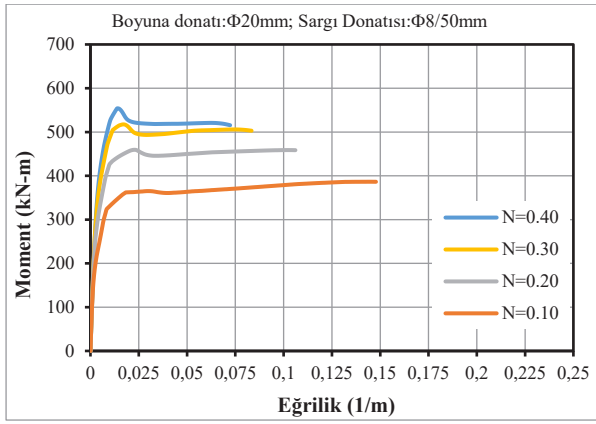
3.4.6. 565 mm dairesel enkesitli kolonun moment-eğrilik ilişkisi ve eğrilik süneklik davranışı

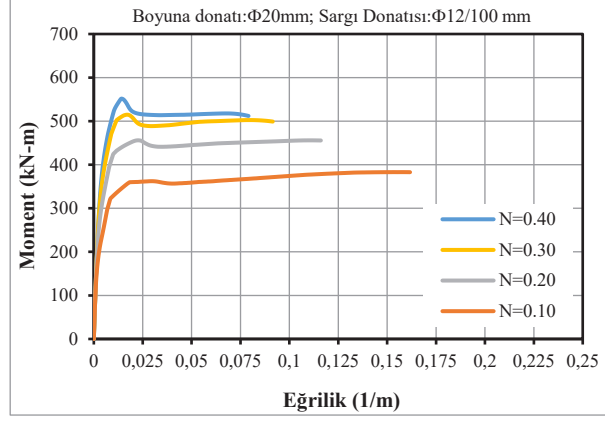
Bu bölümde, 565 mm çapındaki dairesel betonarme kolon kesitlerinin doğrusal olmayan eğilme davranışı, farklı donatı düzenlemeleri ve eksenel yük düzeyleri altında gerçekleştirilen moment-eğrilik analizleri ile değerlendirilmiştir. Tasarlanan kolon modellerinde, boyuna donatı oranının kesit performansına etkisini incelemek üzere $\Phi 20$ mm ile $\Phi 30$ mm arasında değişen altı farklı boyuna donatı çapı tanımlanmıştır. Bu düzenlemeler sayesinde, kesitin moment taşıma kapasitesindeki artışın yanı sıra akma sonrası eğrilik gelişimi ve süneklik düzeyindeki değişimler ayrıntılı olarak izlenebilmiştir. Enine donatının beton çekirdeği üzerindeki sargı etkisini değerlendirmek amacıyla ise üç farklı sargı donatısı çapı ($\Phi 8$ mm, $\Phi 10$ mm ve $\Phi 12$ mm) dikkate alınmış; her bir donatı çapı için üç farklı sargı donatısı aralığı (50 mm, 75 mm ve 100 mm) kullanılarak sargı etkinliği sistematik biçimde değiştirilmiştir (Tablo 3.6). Kolon kesitlerinin eksenel yük-eğilme etkileşimi altındaki davranışını irdelemek amacıyla, tüm modeller dört farklı eksenel yük düzeyi ($N_1=750$ kN, $N_2=1500$ kN, $N_3=2250$ kN ve $N_4=3000$ kN) altında analiz edilmiştir (Foroughi ve Yüksel, 2020b).

Tablo 3.6. Tasarlanan 565 mm dairesel enkesitli kolon modellerine ait parametreler

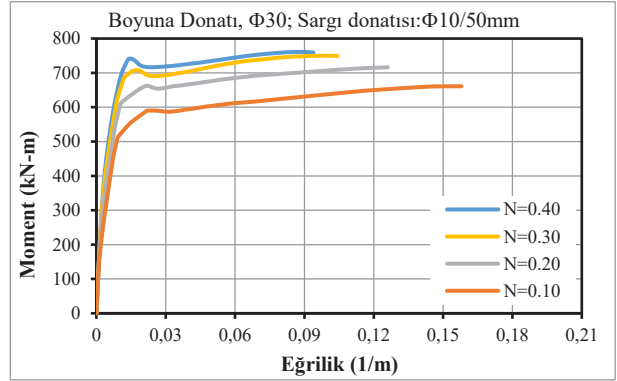
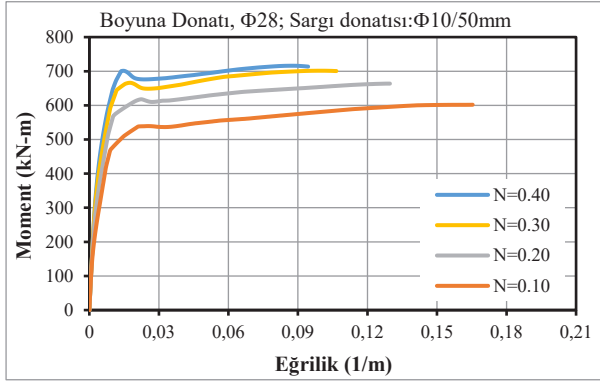
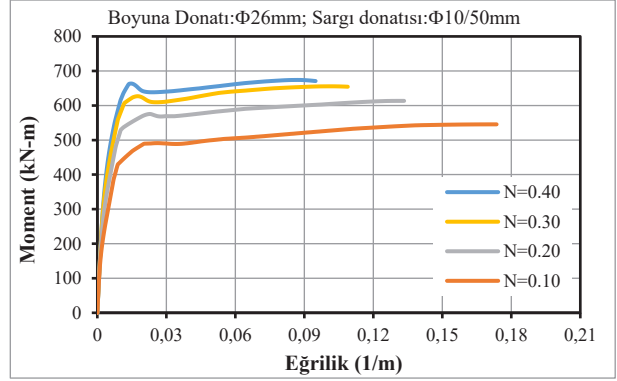
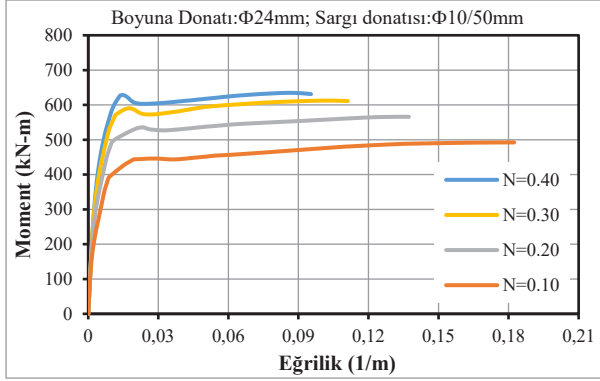
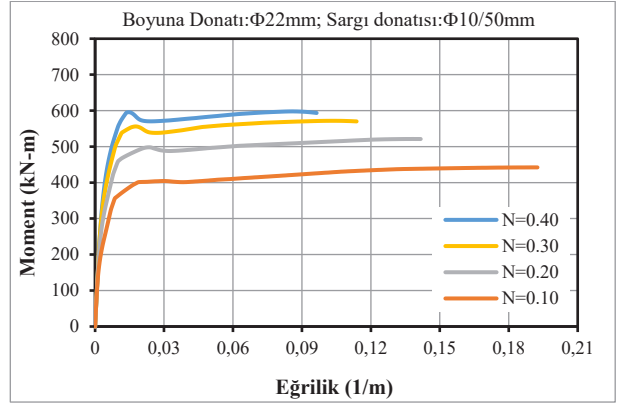
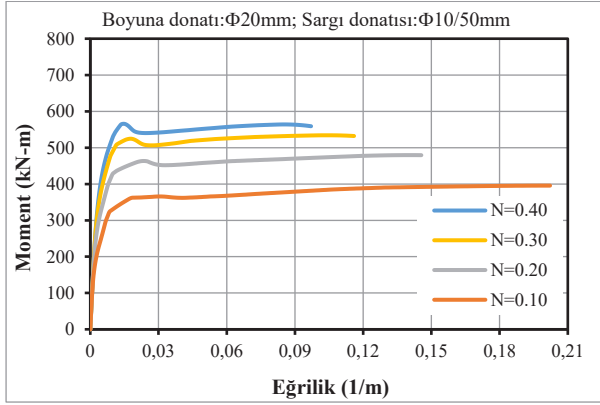
No	Kesit Boyutları (mm)	Boyuna Donatı	Sargı donatısı		N/N_{max}
			Çap	Aralık	
CR1		8 $\Phi 20$ mm	$\Phi 8$ mm $\Phi 10$ mm $\Phi 12$ mm	50 mm 75 mm 100 mm	0.10 0.20 0.30 0.40
CR2		8 $\Phi 22$ mm			
CR3		8 $\Phi 24$ mm			
CR4		8 $\Phi 26$ mm			
CR5		8 $\Phi 28$ mm			
CR6		8 $\Phi 30$ mm			

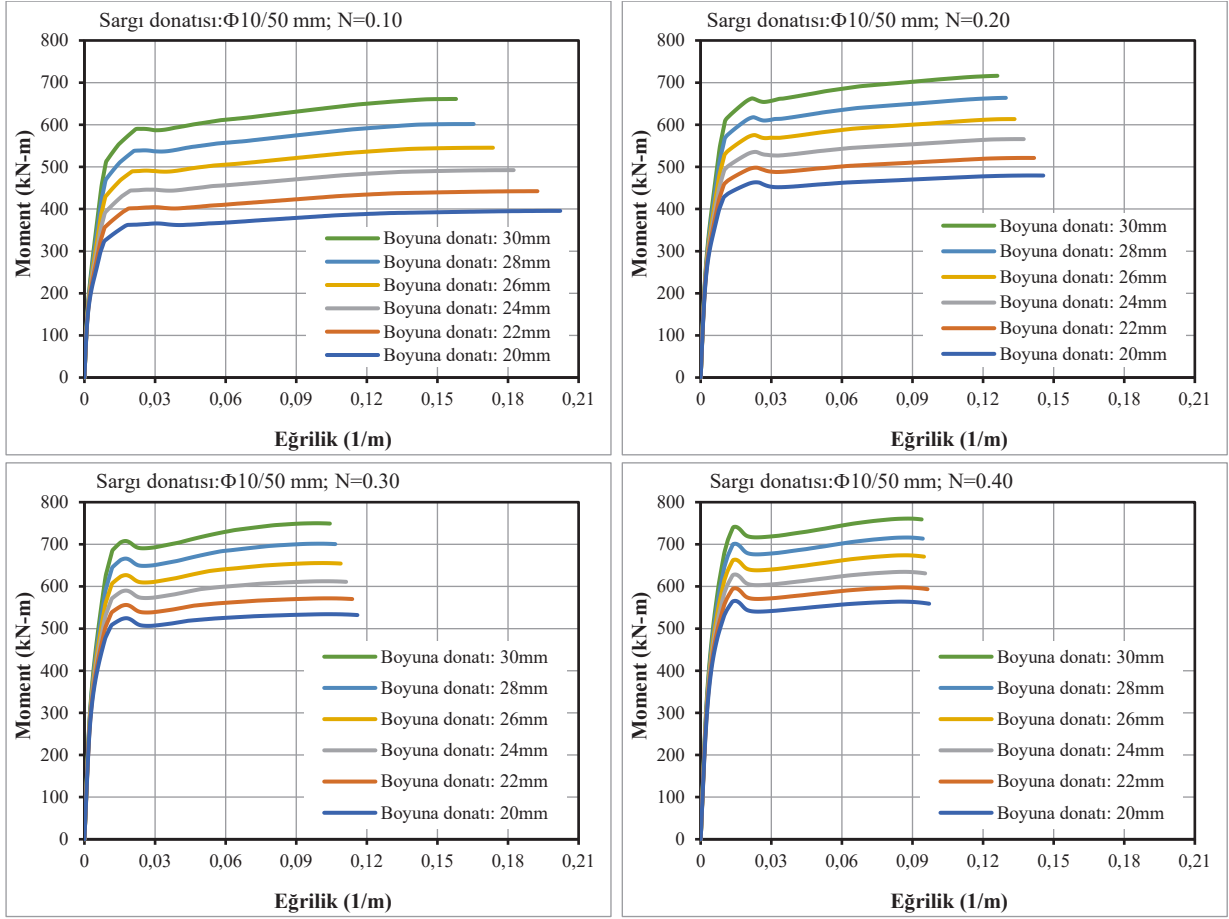
Gerçekleştirilen moment-eğrilik analizleri sonucunda elde edilen veriler, 565mm çapındaki dairesel betonarme kolonlarda donatı oranı ve sargı etkinliği arttıkça kesit dayanımının belirgin biçimde yükseldiğini; buna karşılık eksenel yük seviyesindeki artışın eğrilik sünekliği üzerinde baskılayıcı bir etki oluşturduğunu göstermektedir. Farklı tasarım parametrelerine bağlı olarak elde edilen moment-eğrilik ilişkileri karşılaştırmalı olarak Şekil 3.14'te sunulmuş; bu ilişkilerden hesaplanan maksimum moment (M_{max}) ve eğrilik süneklik (μ_ϕ) değerlerinin değişimi ise Şekil 3.15'te grafiksel olarak değerlendirilmiştir.



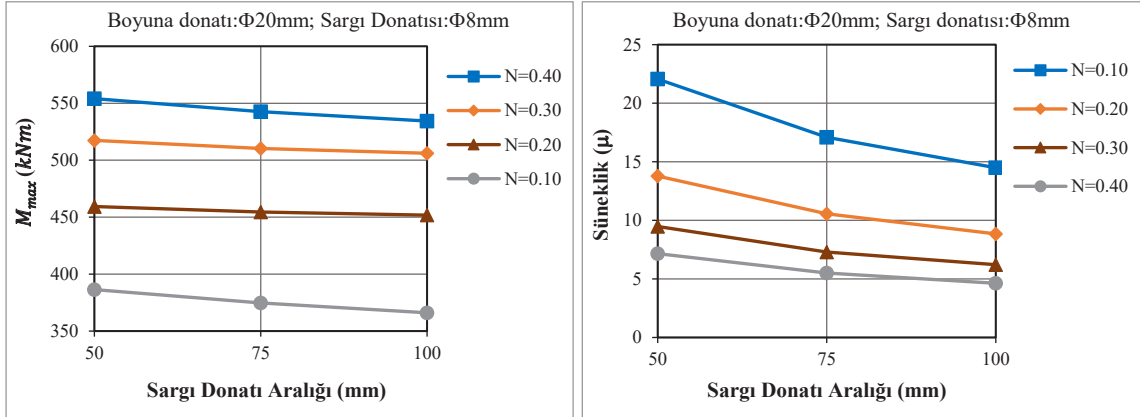


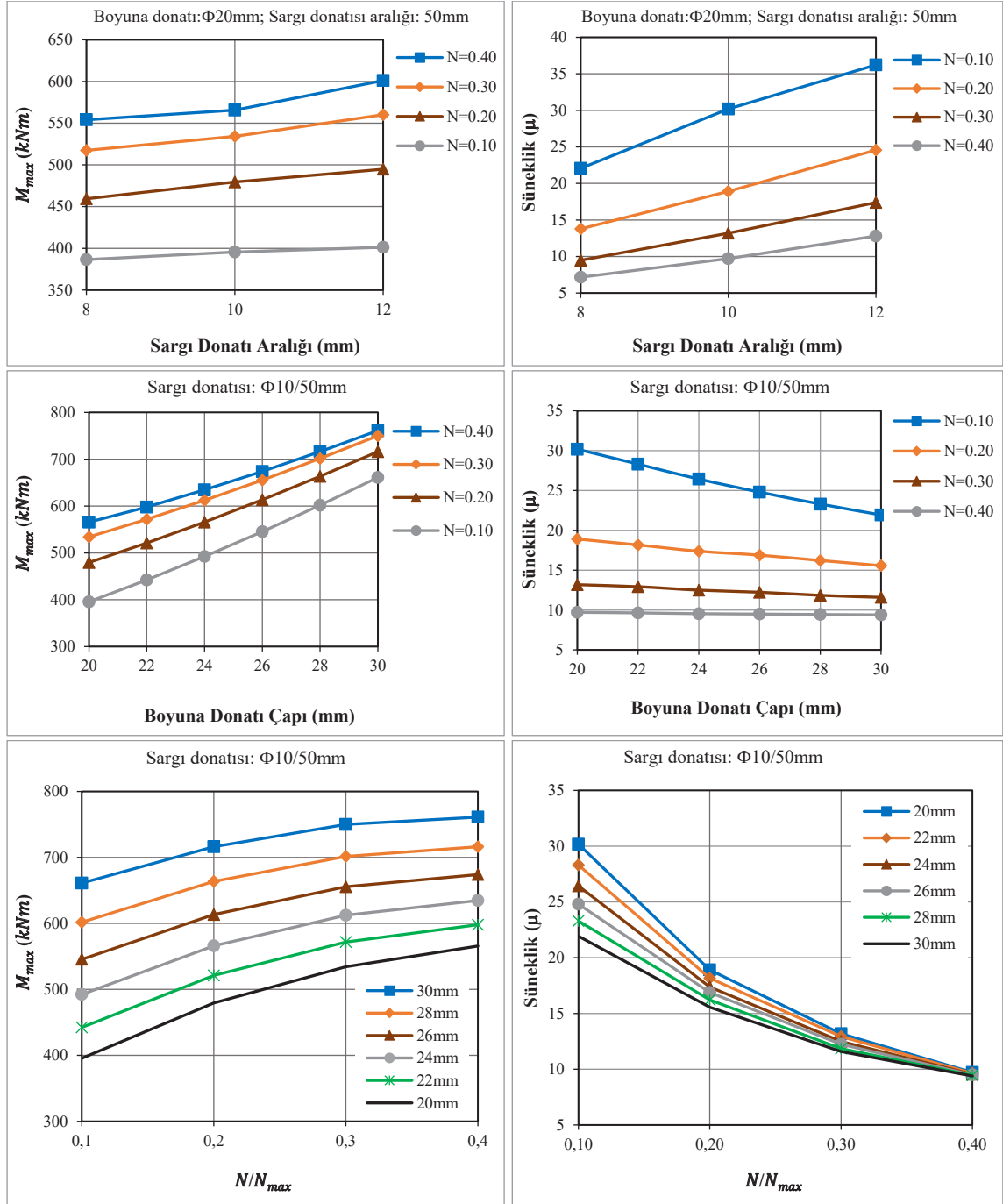
a) Farklı sargı donatısı oranı (Boyuna donatı; Φ20 mm)



b) Farklı boyuna donatı çapı (Sargı donatısı, $\Phi 10/50$ mm)

Şekil 3.13. 565 mm dairesel enkesitli kolonların farklı parametrelere göre moment-eğrilik ilişkileri





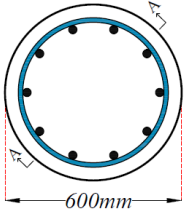
Şekil 3.14. 565mm dairesel enkesitli kolonların farklı parametrelerin moment ve süneklige etkisi

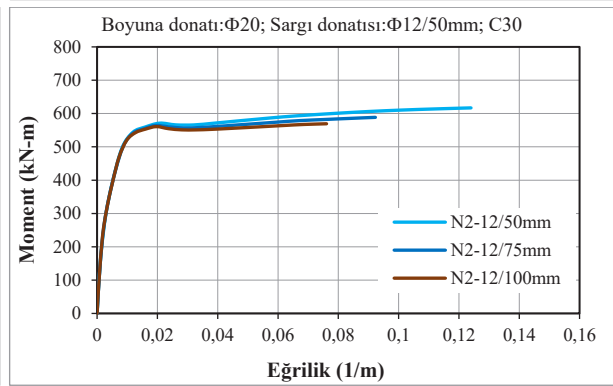
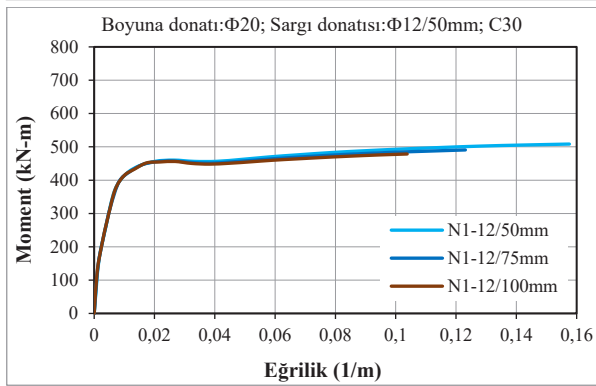
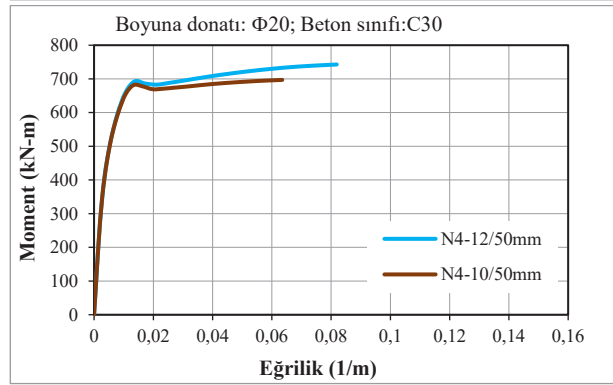
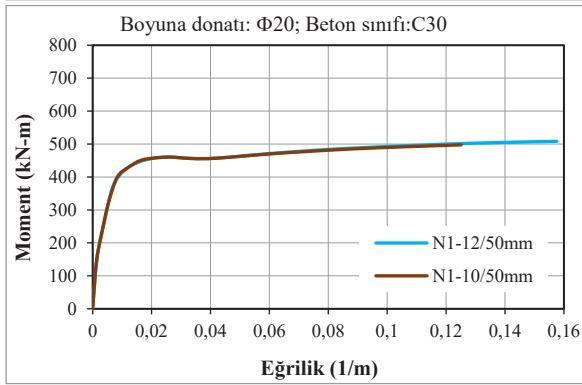
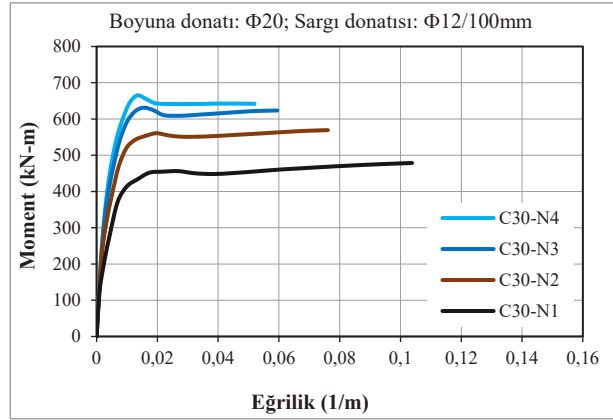
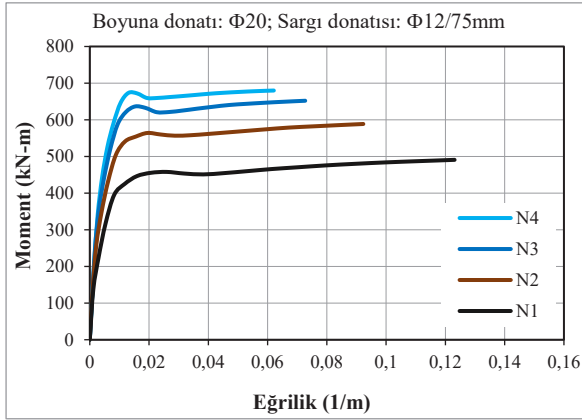
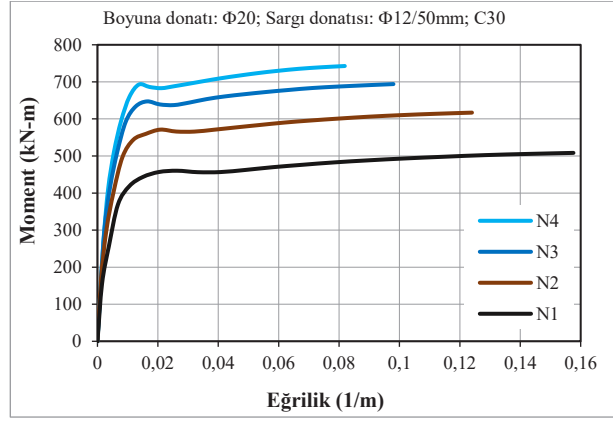
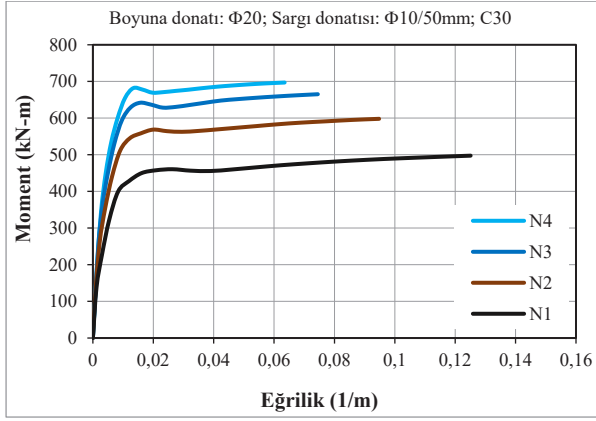
3.4.7. 600 mm dairesel enkesitli kolonun moment-eğrilik ilişkisi ve eğrilik süneklik davranışı

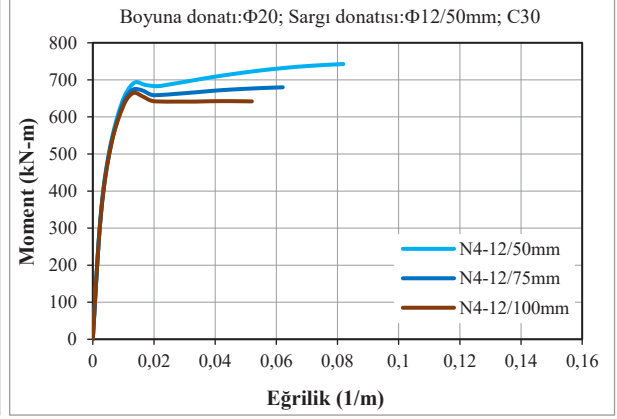
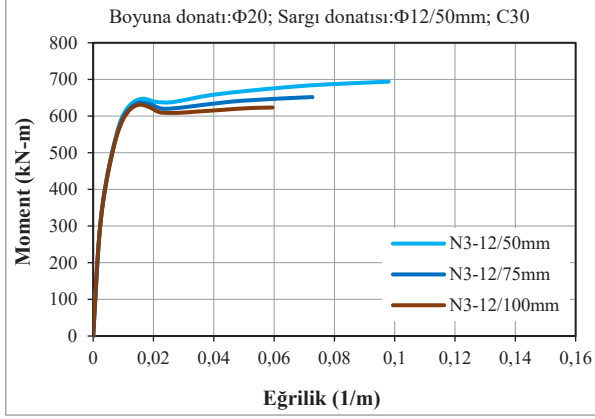
Bu alt bölümde, 600 mm çapındaki dairesel betonarme kolonların doğrusal olmayan eğilme davranışı, kesit düzeyinde gerçekleştirilen moment-eğrilik analizleri aracılığıyla ayrıntılı olarak değerlendirilmiştir. Tasarlanan kolon modellerinde (Tablo 3.7), eğilme kapasitesi ve süneklik davranışı üzerindeki boyuna donatı etkisini ortaya koymak amacıyla $\Phi 20$ mm ile $\Phi 30$ mm arasında değişen altı farklı boyuna donatı çapı dikkate alınmıştır. Sargı donatısının beton çekirdeği üzerindeki sargı etkisini değerlendirmek üzere ise iki farklı sargı donatısı çapı ($\Phi 10$ mm ve $\Phi 12$ mm) seçilmiştir; her bir donatı çapı için üç farklı sargı donatısı aralığı (50 mm, 75 mm ve 100 mm) tanımlanarak sargı etkinliğinin davranış üzerindeki etkisi sistematik biçimde değerlendirilmiştir (Foroughi, 2022). Eksenel yük-eğilme etkileşiminin kolon davranışı üzerindeki belirleyici rolünü irdelemek amacıyla, tüm kolon modelleri dört farklı eksenel yük düzeyi altında analiz edilmiştir ($N_1=850$ kN, $N_2=1700$ kN, $N_3=2550$ kN, $N_4=3400$ kN). Bu yükleme seviyeleri, yüksek eksenel basınç altında dairesel kolon kesitlerinin moment taşıma kapasitesi ve eğrilik gelişiminde meydana gelen değişimleri açık biçimde ortaya koyacak şekilde seçilmiştir.

Buna ek olarak, beton basınç dayanımının büyük çaplı dairesel kolonların doğrusal olmayan davranışı üzerindeki etkisini değerlendirmek amacıyla farklı beton sınıfları (C30, C35, C40, C45 ve C50) analizlere dahil edilmiştir. Tüm modellerde donatı çeliği olarak B420C kullanılmış; böylece değişken parametrelerin etkisi yalın biçimde izole edilmiştir. Eğrilik sünekliği, her bir kolon modeli için elde edilen moment-eğrilik eğrilerinden akma ve nihai eğrilik değerleri esas alınarak hesaplanmıştır. Analiz sonuçları, 600 mm çapındaki dairesel betonarme kolonlarda artan beton basınç dayanımı ve boyuna donatı oranının kesit dayanımını belirgin biçimde artırdığını; buna karşılık eksenel yük seviyesindeki yükselmenin eğrilik sünekliğini sınırlayıcı bir etki oluşturduğunu göstermektedir. Enine donatı oranının artırılması ve sargı donatısı aralığının azaltılması ise, özellikle yüksek eksenel yükler altında, akma sonrası davranışın daha kararlı hale gelmesine katkı sağlamıştır. Farklı tasarım parametrelerine bağlı olarak elde edilen moment-eğrilik ilişkileri, karşılaştırmalı olarak Şekil 3.16’te özetlenmiş; bu ilişkilerden hesaplanan eğrilik süneklik değerlerinin değişimi ise Şekil 3.17’de grafiksel olarak sunulmuştur.

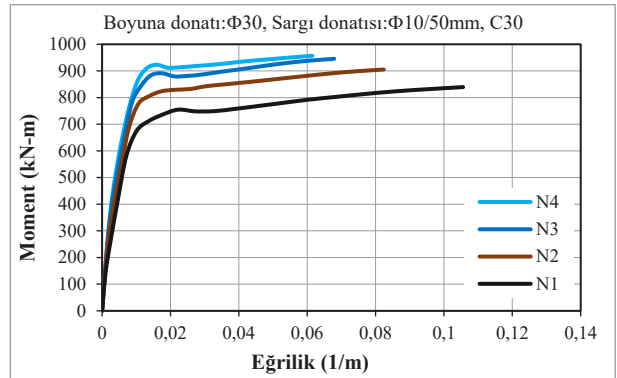
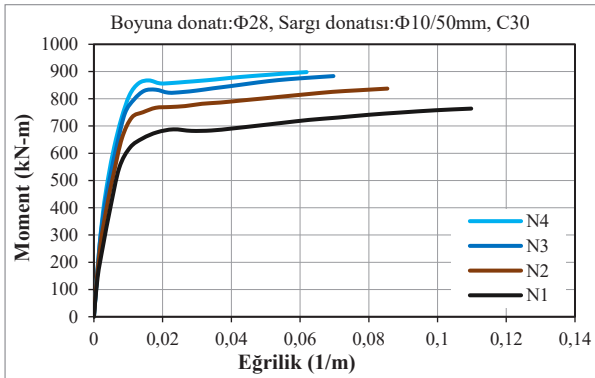
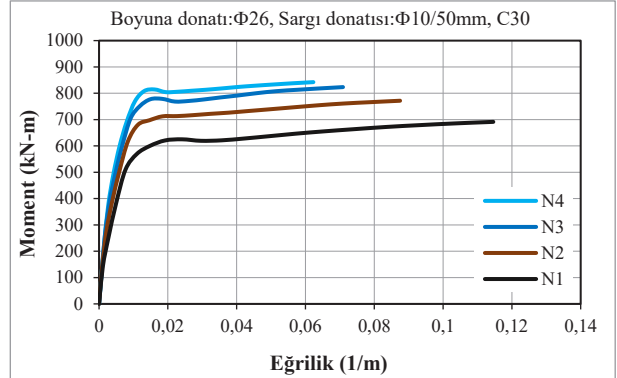
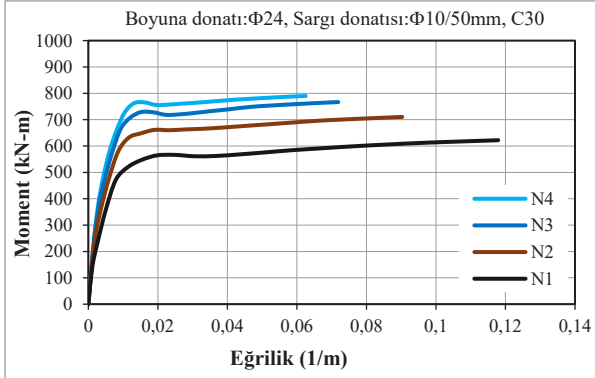
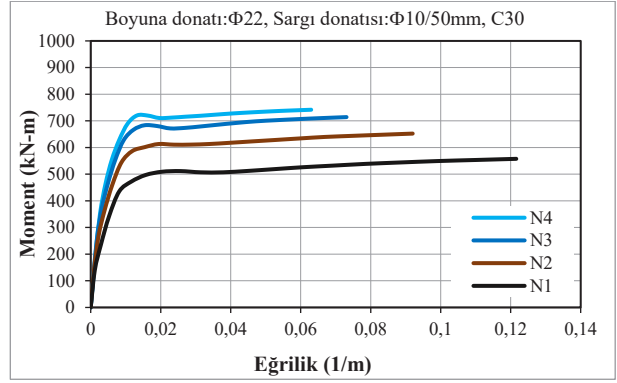
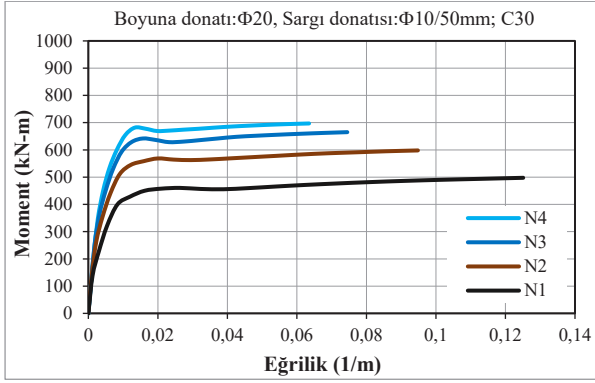
Tablo 3.7. Tasarlanan 600 mm dairesel enkesitli kolon modellerine ait parametreler

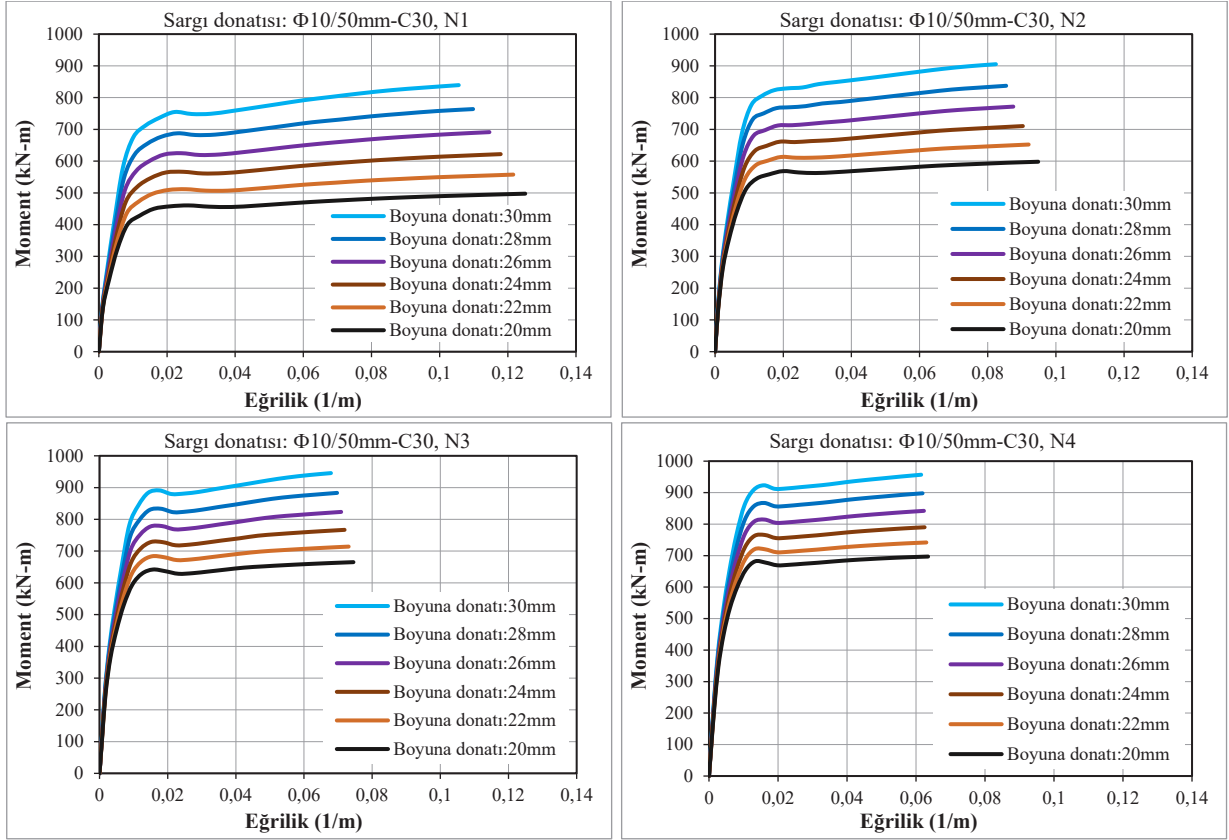
No	Kesit Boyutu	Malzeme	Boyuna Donatı	Sargı donatısı		N/N_{max}			
				Çap	Aralık				
CR1		C30	10 $\Phi 20$ mm	$\Phi 8$ mm	50 mm	0.10			
CR2			10 $\Phi 22$ mm						
CR3			10 $\Phi 24$ mm				$\Phi 10$ mm	75 mm	0.20
CR4			10 $\Phi 26$ mm						
CR5			10 $\Phi 28$ mm				$\Phi 12$ mm	100 mm	0.40
CR6			10 $\Phi 30$ mm						



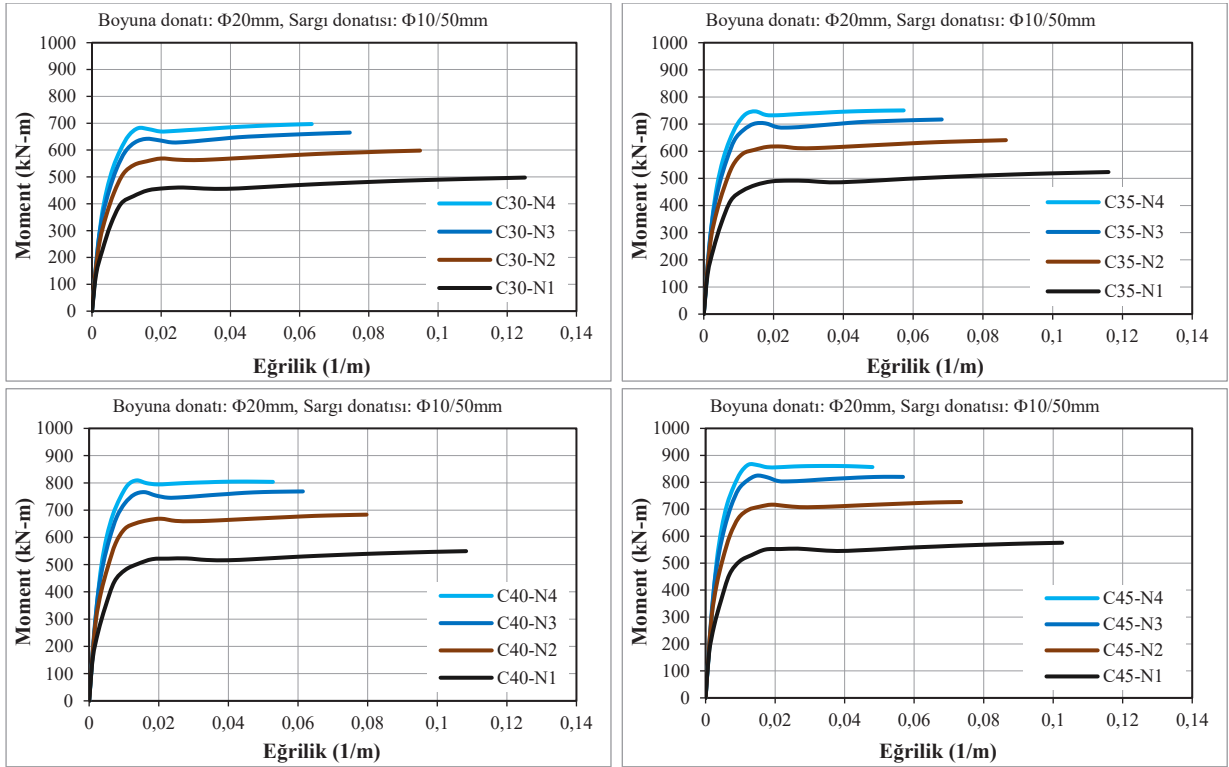


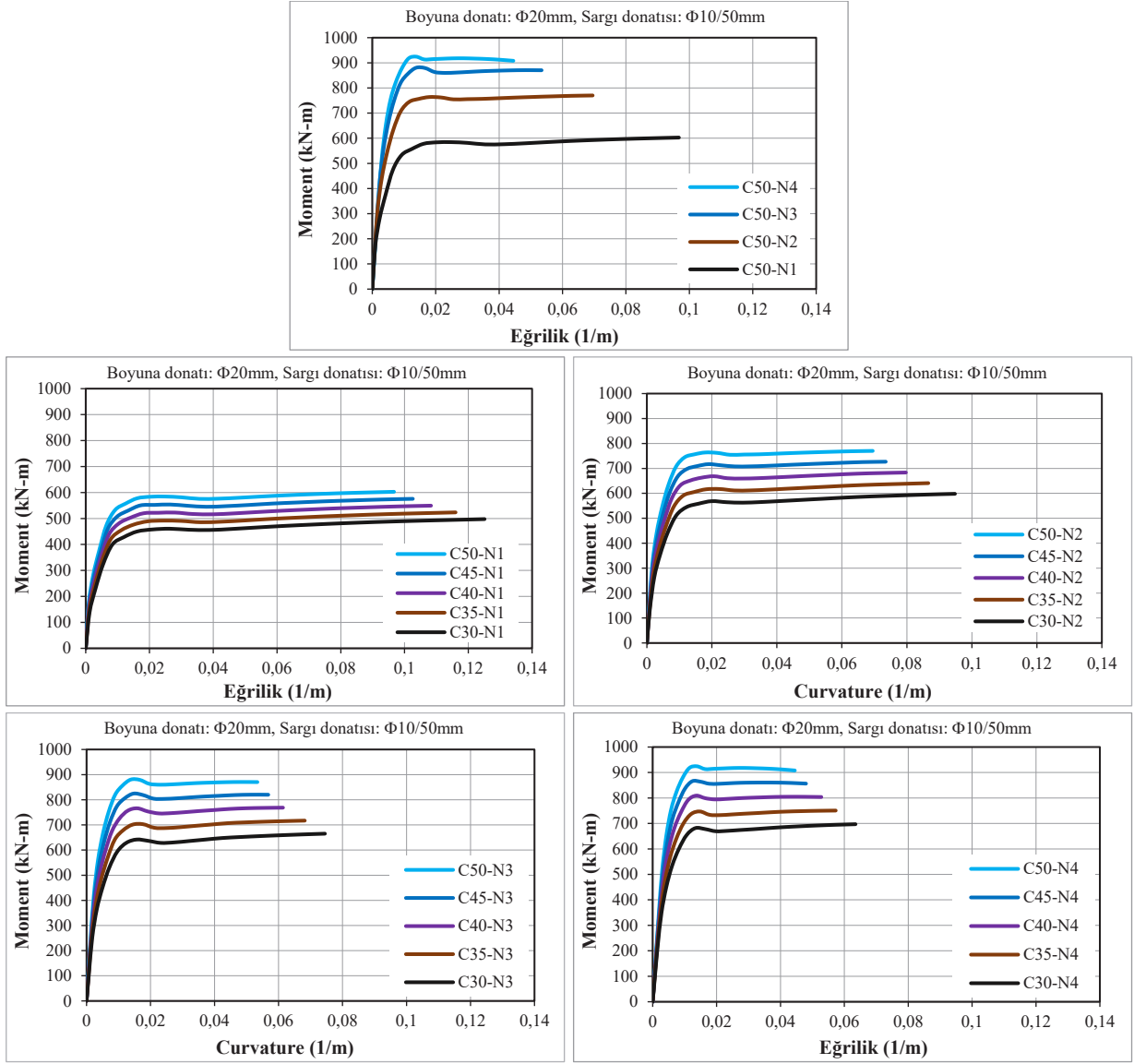
a) Farklı sargı donatısı oranı (boyuna donatı; $\Phi 20$ mm)





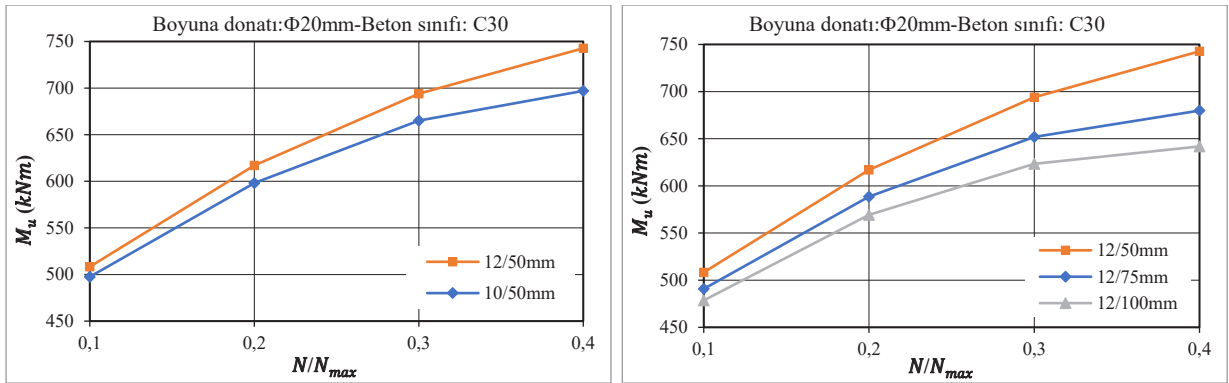
b) Farklı boyuna donatı oranı (sargı donatısı; $\Phi 10/50$ mm)

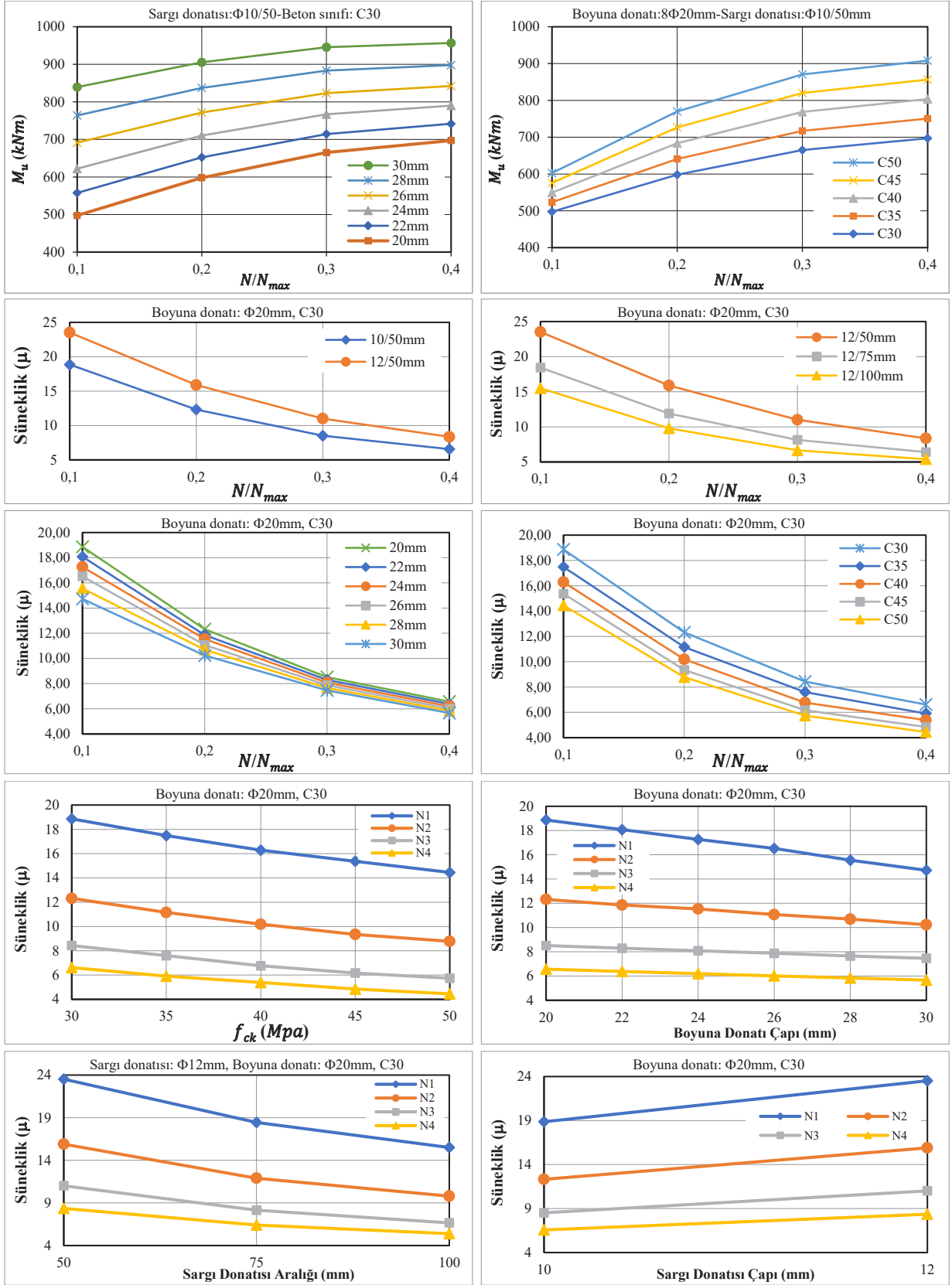




c) Farklı beton basınç dayanımı

Şekil 3.15. 600 mm dairesel enkesitli kolon modellerinin farklı parametrelere göre karşılaştırmalı moment-eğrilik ilişkileri





Şekil 3.16. 600 mm dairesel enkesitli kolonların farklı parametrelerin moment ve süneklığe etkisi

450 mm, 565 mm ve 600 mm çaplı dairesel betonarme kolon kesitleri için gerçekleştirilen moment-eğrilik analizlerinin bütüncül değerlendirilmesi, kesit davranışının temel olarak aksel yük düzeyi, boyuna donatı oranı ve sargı donatısının sağladığı yanal sargı etkisinin ortak etkileşimi ile belirlendiğini göstermektedir. Dairesel kesit geometrisi, köşesiz ve süreklilik gösteren yapısı sayesinde beton çekirdeği boyunca daha homojen gerilme ve şekildeğiştirme dağılımı oluşturmaktadır; bu durum özellikle akma sonrasında kesitin stabil bir plastik davranış geliştirmesine olanak tanımaktadır. Bu nedenle moment-eğrilik eğrilerinin gelişimi, kesit geometrisinin sağladığı bu düzenli iç kuvvet aktarım mekanizmasıyla doğrudan ilişkilidir.

Analiz sonuçları, aksel yük düzeyinin kolon davranışını kontrol eden başlıca parametrelerden biri olduğunu açık biçimde ortaya koymaktadır. Aksel yük oranındaki artış, beton basınç bölgesinde oluşan basınç gerilmelerini yükselterek maksimum moment kapasitesinde artışa neden olmaktadır. Bununla birlikte aynı etki, betonun nihai basınç şekildeğiştirme sınırına daha hızlı ulaşmasına yol açtığından, eğrilik kapasitesini ve dolayısıyla eğrilik sünekliğini sınırlamaktadır. Başka bir ifadeyle aksel yük, dayanım artışı ile şekildeğiştirme kapasitesi arasında ters yönlü bir davranış üretmekte ve sünek performansın belirlenmesinde kritik bir denge parametresi oluşturmaktadır.

Boyuna donatı oranı moment taşıma kapasitesini artıran temel kesitsel parametrelerden biri olarak belirlenmiştir. Boyuna donatı oranındaki artış, çekme bölgesindeki iç kuvvet taşıma kapasitesini yükselterek moment-eğrilik eğrilerinin tepe noktasını ileri taşımaktadır. Ancak bu artışın eğrilik kapasitesine aynı ölçüde yansımadağı görülmektedir. Yüksek boyuna donatı oranlarında kesitin başlangıç eğilme rijitliği belirgin biçimde artmakta, buna karşın akma sonrası eğrilik gelişimi daha sınırlı bir aralıkta gerçekleşmektedir.

Dairesel kolon kesitlerinde sünek davranışın gelişimini belirleyen en kritik parametrenin sargı donatısı olduğu belirlenmiştir. Sargı donatısı çapının artırılması ve aralığının azaltılması, sargı donatısı tarafından beton çekirdeğinde oluşturulan çevresel basınç gerilmesini artırarak betonun ezilme sürecini geciktirmekte ve kesitin daha yüksek eğrilik seviyelerine ulaşmasına olanak sağlamaktadır. Bu mekanizma moment-eğrilik diyagramlarında akma sonrası bölgenin daha geniş bir eğrilik aralığında devam etmesiyle açık biçimde gözlemlenmektedir. Süreklilik gösteren dairesel etriyeler, beton çekirdeğini köşeli kesitlere kıyasla daha etkin biçimde sarmakta ve plastik şekildeğiştirmelerin ani dayanım kaybına dönüşmesini geciktirmektedir.

Eğrilik sünekliği açısından değerlendirildiğinde, sargı donatısının sağladığı yanal sargı etkisinin aksel yükün olumsuz etkisini önemli ölçüde dengelediği görülmektedir. Yetersiz sargı koşullarında, aksel yük seviyesindeki artış beton ezilmesini hızlandırarak sünek davranışı sınırlarken; etkin sargı düzenlemesi altında beton çekirdeği daha büyük şekildeğiştirmeler geliştirebilmekte ve plastik dönme kapasitesi korunabilmektedir. Bu durum, dairesel betonarme kolonlarda sünek tasarımın yalnızca malzeme dayanımı veya boyuna donatı miktarıyla değil, çekirdek betonun sargı donatısı tarafından etkin biçimde sargılanması ile sağlanabileceğini göstermektedir. Moment-eğrilik ilişkilerinin genel karakteri incelendiğinde, dairesel kolon kesitlerinin akma sonrasında ani dayanım kaybı göstermeyen, daha kararlı ve yayılı bir plastik davranış sergilediği belirlenmiştir. Bu davranış, kesit boyunca oluşan simetrik gerilme dağılımı ve sargı donatısının kesit çevresinde sürekli bir sargılama sağlaması ile ilişkilidir. Böylece plastik mafsallarda enerji tüketme kapasitesi artmakta ve deprem etkileri altında beklenen sünek davranış daha güvenilir biçimde sağlanabilmektedir.

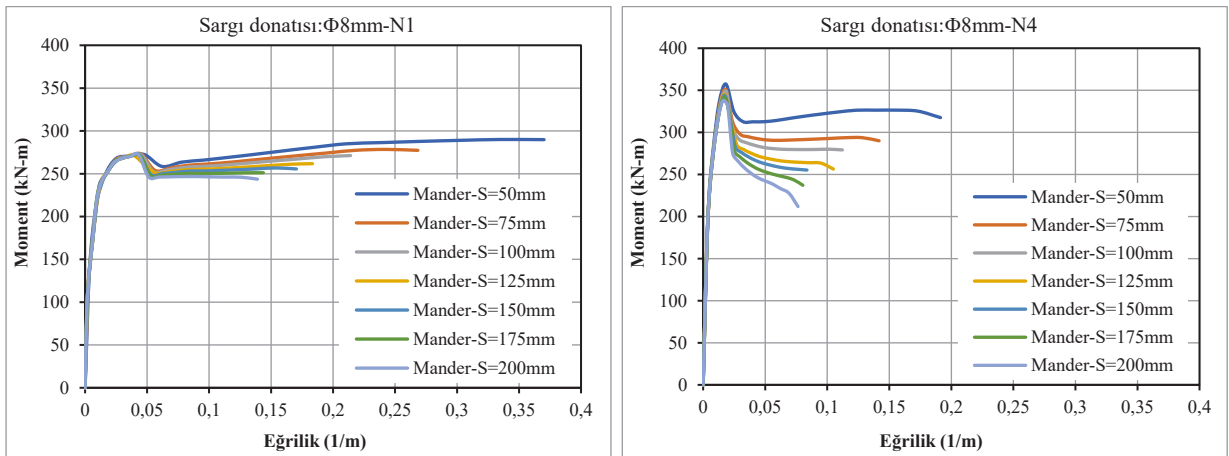
3.4.8. Farklı sargılı beton modellerine göre betonarme kolonların moment-eğrilik ilişkileri

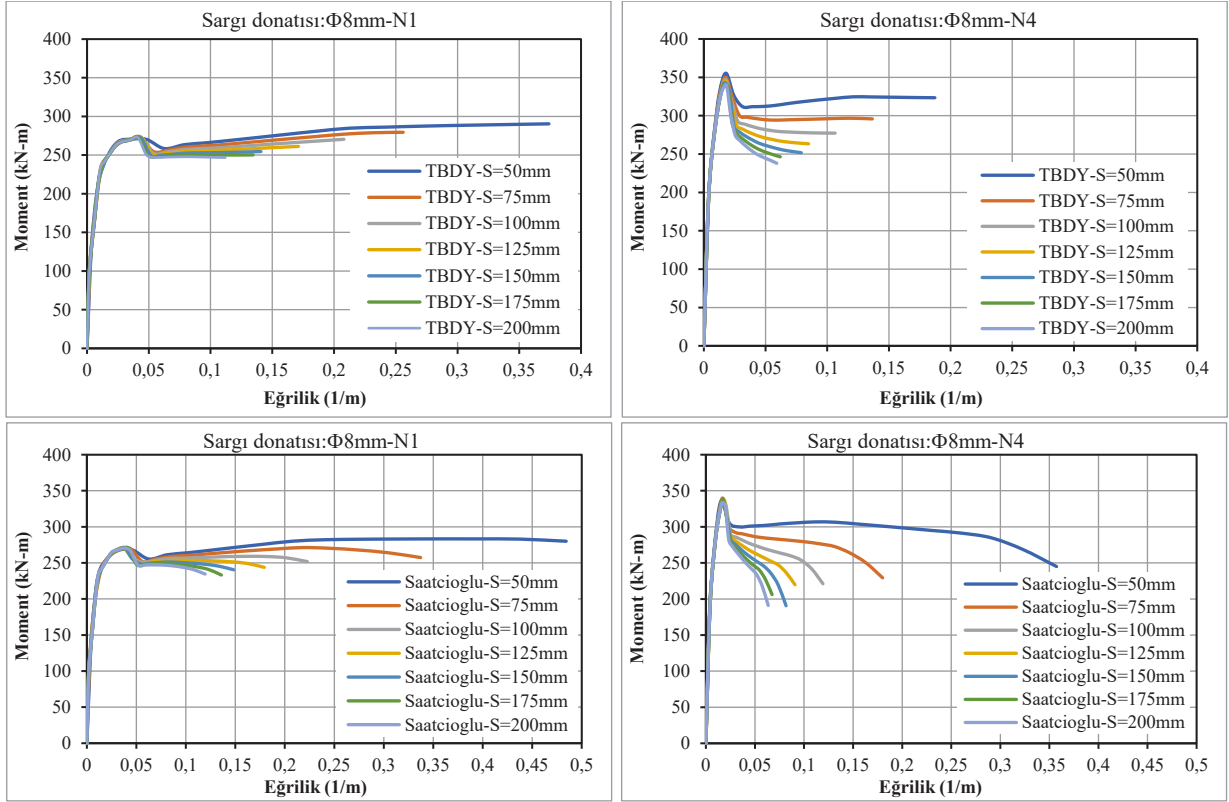
Bu bölümde, Bölüm 3.4.1’de geometrik özellikleri ve donatı detayları tanımlanan 400 mm × 400 mm kare kesitli betonarme kolonların (Tablo 3.1) doğrusal olmayan eğilme davranışı, kesit düzeyinde gerçekleştirilen moment-eğrilik analizleri esas alınarak değerlendirilmiştir. Analitik çalışmada, beton çekirdeğinde oluşan sargılama etkisinin kesitsel davranış üzerindeki rolünü ortaya koyabilmek amacıyla farklı sargılı beton modelleri dikkate alınmıştır. Bu kapsamda, TBDY (2018) yaklaşımı, Mander ve ark. (1988) ile Saatçioğlu ve Razvi (1992) tarafından önerilen sargılı beton modelleri kullanılmıştır. Böylece sargılı beton davranışını tanımlayan farklı analitik modellerin kesitsel performans üzerindeki etkileri karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

Sargı donatısının kesit davranışı üzerindeki etkisini sistematik biçimde incelemek amacıyla analizlerde üç farklı etriye çapı ($\Phi 8$, $\Phi 10$ ve $\Phi 12$ mm) ile yedi farklı etriye aralığı (50, 75, 100, 125, 150, 175 ve 200 mm) dikkate alınmıştır. Buna karşılık, boyuna donatı düzeni tüm modellerde sabit tutulmuş ve kesitlerde $8\Phi 22$ mm boyuna donatı kullanılmıştır (Foroughi ve Yüksel, 2022a). Bu yaklaşım sayesinde kesitsel davranışta ortaya çıkan farklılıkların, doğrudan sargı donatısı düzenine ve sargı etkisini tanımlayan malzeme modeline bağlı olarak değerlendirilmesi amaçlanmıştır.

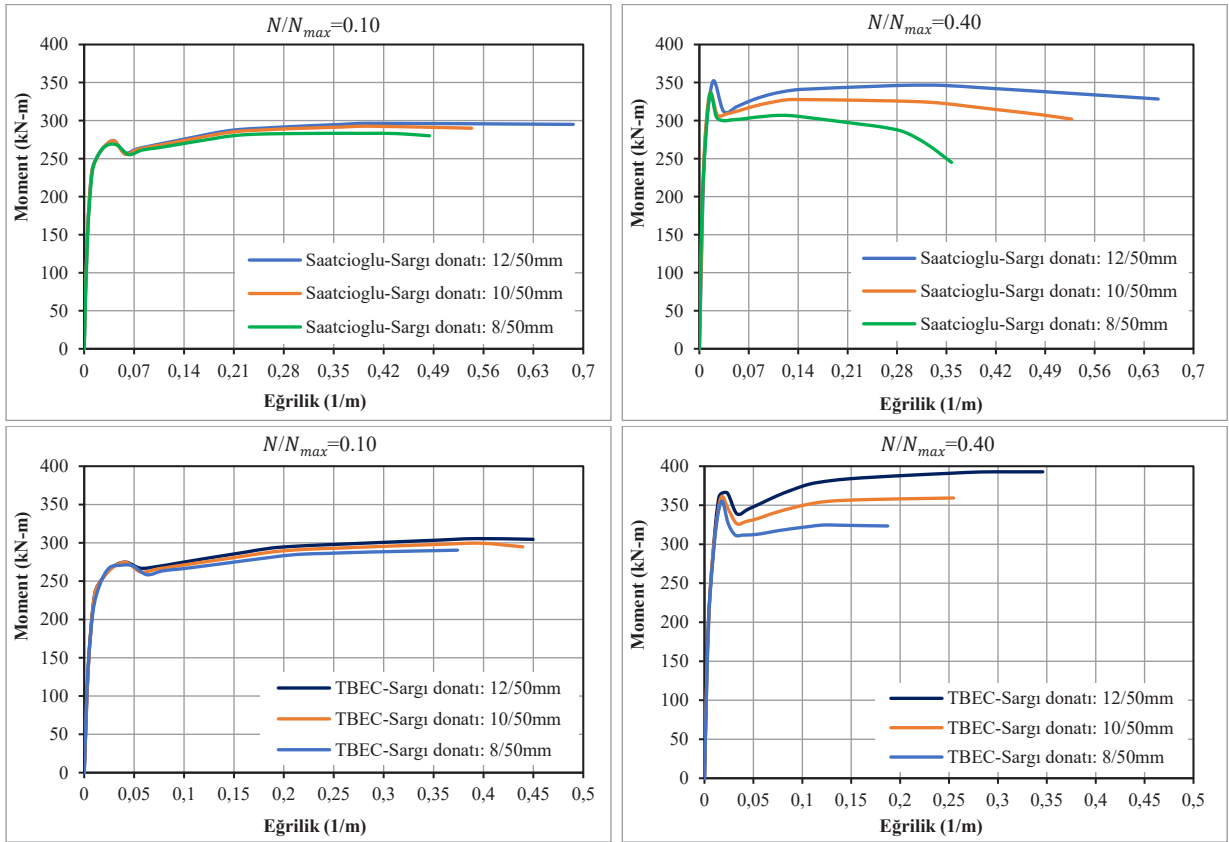
Malzeme parametrelerinin etkisini ortaya koymak amacıyla beton basınç dayanımı değişken olarak ele alınmış ve C30-C50 aralığında beş farklı beton sınıfı tanımlanmıştır. Donatı çeliği özellikleri ise tüm analizlerde B420C olarak sabit kabul edilmiştir.

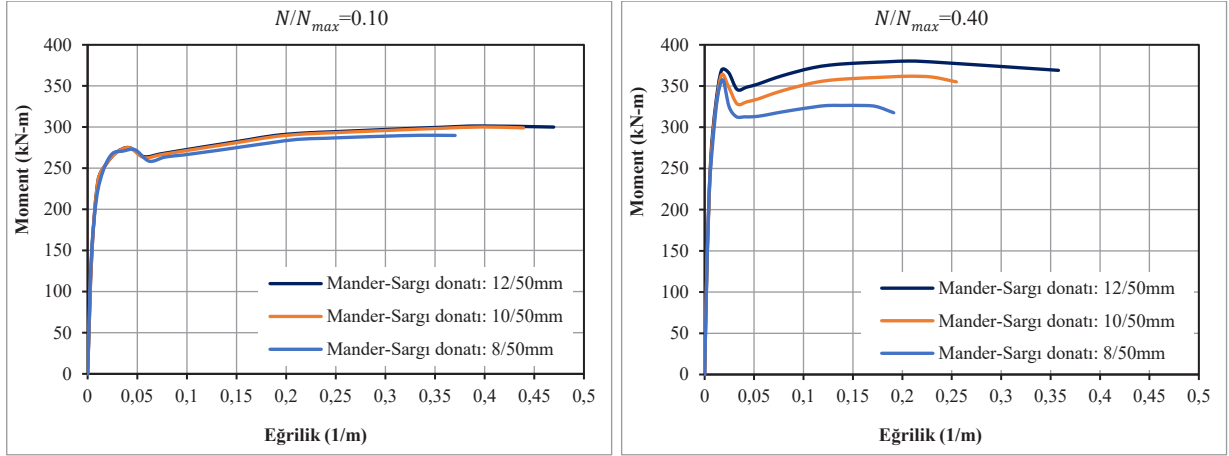
Seçilen sargılı beton modelleri kullanılarak her bir kolon kesiti için sargılı betonun etkin basınç dayanımı ve buna karşılık gelen maksimum basınç birim şekildeğiştirme değerleri belirlenmiş; bu malzeme tanımları esas alınarak doğrusal olmayan kesit analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizler sonucunda kolon kesitlerine ait moment-eğrilik ilişkileri elde edilmiştir. Elde edilen moment-eğrilik ilişkileri, farklı sargılı beton modellerinin kolonların elastik ötesi davranışı ve eğrilik sünekliği üzerindeki etkilerini ortaya koyacak şekilde karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Kare kesitli betonarme kolonlara ait moment-eğrilik ilişkileri, farklı tasarım parametreleri dikkate alınarak Şekil 3.18’de sunulmuştur.



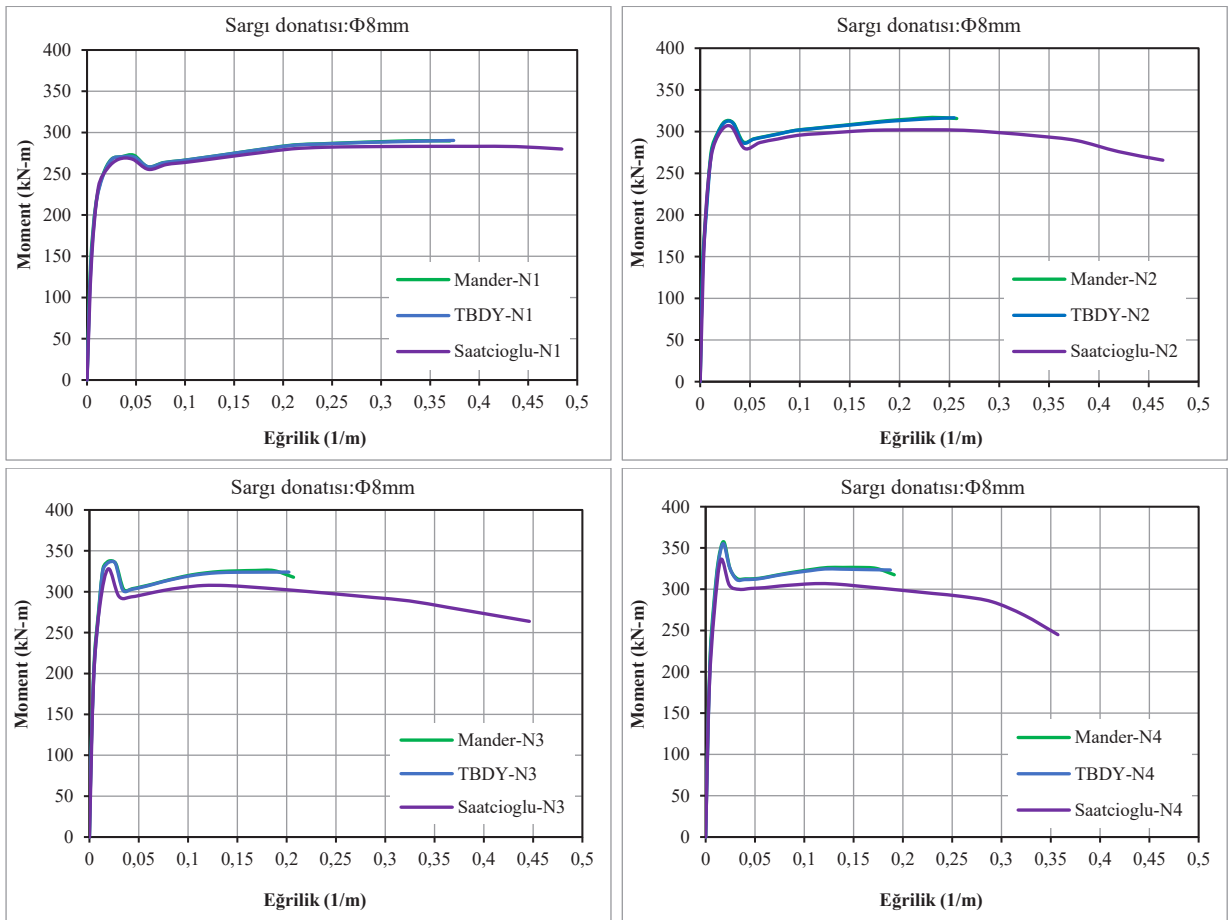


a) Farklı sargılı beton modelleri için sargı donatısı aralığına göre moment-eğrilik ilişkileri





b) Farklı sargılı beton modelleri için sargı donatısı çaplarına göre moment-eğrilik ilişkileri


 c) Farklı sargılı beton modelleri için eksenel yük seviyesine göre moment-eğrilik ilişkileri
 Şekil 3.17. Farklı sargılı beton modeller için kare kolonların moment-eğrilik ilişkileri

TBDY (2018), Mander ve ark. (1988) ile Saatçioğlu ve Ravzi (1992) tarafından önerilen sargılı beton modelleri kullanılarak elde edilen nihai moment ve eğrilik değerleri arasındaki farklılıklar, Denklem (3.1-3.4) yardımıyla belirlenmiştir. Bu yaklaşım, farklı malzeme modellerinin kesit davranışı üzerindeki etkilerinin sayısal olarak karşılaştırılmasına olanak sağlamaktadır. Söz konusu modeller arasındaki göreceli sapma oranı (%D) bu bağıntılar kullanılarak hesaplanmıştır; böylece sargılı beton model seçiminin moment taşıma kapasitesi ve eğrilik davranışı üzerindeki etkisi sistematik biçimde ortaya konulmuştur. Elde edilen sonuçlar Tablo 3.8 ve Tablo 3.9’da karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

$$D\% = \left(\frac{\text{Saatçioğlu ve Ravzi (1992)} - \text{Mander (1988)}}{\text{Saatçioğlu ve Ravzi (1992)}} \right) \quad (3.1)$$

$$D\% = \left(\frac{\text{Saatçioğlu ve Ravzi (1992)} - \text{TBDY (2018)}}{\text{Saatçioğlu ve Ravzi (1992)}} \right) \quad (3.2)$$

$$D\% = \left(\frac{\text{Mander (1988)} - \text{TBDY (2018)}}{\text{Mander (1988)}} \right) \quad (3.3)$$

$$D\% = \left(\frac{\text{Mander (1988)} - \text{Saatçioğlu ve Ravzi (1992)}}{\text{Mander (1988)}} \right) \quad (3.4)$$

Tablo 3.8. Farklı sargı donatısı çapları için sargılı beton modellerine göre moment ve eğrilik değerlerinin karşılaştırılması

Sargı donatısı: $\Phi 8/50$ mm										
N/N_{max}	Sargılı Beton Modelleri						D%			
	Mander (1988)		TBDY (2018)		Saatçioğlu ve Ravzi (1992)		Denklem (3.1)	Denklem (3.2)	Denklem (3.3)	Denklem (3.4)
	φ_u	M_u	φ_u	M_u	φ_u	M_u	φ_u		M_u	
0.10	0.374	290.4	0.370	290.0	0.464	283.3	19.40	20.26	0.14	2.44
0.40	0.191	357.5	0.187	355.4	0.357	335.8	46.50	47.62	0.59	6.07
Sargı donatısı: $\Phi 10/50$ mm										
0.10	0.445	300.1	0.439	299.5	0.5734	292.7	22.39	23.44	0.20	2.47
0.40	0.260	363.4	0.255	360.4	0.5274	333.8	50.70	51.65	0.83	8.15
Sargı donatısı: $\Phi 12/50$ mm										
0.10	0.458	305.3	0.450	301.5	0.686	296.4	33.24	34.40	1.24	2.92
0.40	0.271	392.8	0.266	382.8	0.650	351.5	58.31	59.08	2.55	10.51

Tablo 3.9. Farklı sargı donatısı aralıkları ve eksenel yük seviyeleri için farklı sargılı beton modellerine göre hesaplanan nihai moment ve eğrilik değerlerinin karşılaştırılması.

Sargı donatısı: $\Phi 8/50$ mm										
N/N_{max}	Sargılı Beton Modeli						D%			
	Mander (1988)		TBDY (2018)		Saatçioğlu ve Ravzi (1992)		Denklem (3.1)	Denklem (3.2)	Denklem (3.3)	Denklem (3.4)
	φ_u	M_u	φ_u	M_u	φ_u	M_u	φ_u		M_u	
0.10	0.374	290.4	0.37	290.0	0.464	283.3	19.40	20.26	0.14	2.44
0.20	0.258	318.0	0.255	316.6	0.449	310.1	42.54	43.21	0.44	2.48
0.30	0.207	337.5	0.202	335.8	0.380	328.1	45.53	46.84	0.50	2.79
0.40	0.191	357.5	0.187	355.4	0.357	335.8	46.50	47.62	0.59	6.07
Sargı donatısı: $\Phi 8/75$ mm										
0.10	0.275	279.5	0.27	278.4	0.337	272.9	18.40	19.88	0.39	2.36
0.20	0.187	312.2	0.183	310.9	0.260	304.7	28.08	29.62	0.42	2.40
0.30	0.167	334.7	0.163	333.1	0.244	326.5	31.56	33.20	0.48	2.45
0.40	0.142	352.9	0.138	350.2	0.211	338.9	32.70	34.60	0.77	3.97
Sargı donatısı: $\Phi 8/100$ mm										
0.10	0.224	274.0	0.219	272.4	0.253	270.4	11.46	13.44	0.58	1.31
0.20	0.152	312.0	0.148	309.8	0.183	303.0	16.94	19.13	0.71	2.88
0.30	0.138	334.4	0.134	332.1	0.167	324.4	17.37	19.76	0.69	2.99
0.40	0.112	349.2	0.1085	347.0	0.139	337.3	19.42	21.94	0.63	3.41
Sargı donatısı: $\Phi 8/125$ mm										
0.10	0.183	272.8	0.178	271.1	0.192	270.7	4.69	7.29	0.62	0.77
0.20	0.136	310.3	0.132	308.2	0.144	303.3	5.56	8.33	0.68	2.26
0.30	0.122	334.1	0.118	331.0	0.135	326.2	9.63	12.59	0.93	2.36
0.40	0.105	345.2	0.101	341.6	0.122	336.1	13.93	17.21	1.04	2.64
Sargı donatısı: $\Phi 8/150$ mm										
0.10	0.170	271.3	0.164	270.1	0.178	270.0	4.49	7.87	0.44	0.48
0.20	0.133	309.5	0.127	308.0	0.143	304.5	6.99	11.19	0.48	1.62
0.30	0.110	330.1	0.104	327.5	0.125	324.2	12.00	16.80	0.79	1.79
0.40	0.084	343.6	0.079	339.9	0.102	335.3	17.65	22.55	1.08	2.42
Sargı donatısı: $\Phi 8/175$ mm										
0.10	0.144	270.8	0.137	269.8	0.136	270.3	-5.88	-0.74	0.37	0.18
0.20	0.118	308.5	0.112	307.1	0.109	305.4	-8.26	-2.75	0.45	1.00
0.30	0.101	329.2	0.095	327.4	0.092	325.0	-9.78	-3.26	0.55	1.28
0.40	0.080	342.00	0.075	339.1	0.067	334.4	-19.40	-11.94	0.85	2.22
Sargı donatısı: $\Phi 8/200$ mm										
0.10	0.139	270.1	0.135	268.6	0.12	269.4	-15.83	-12.50	0.56	0.26
0.20	0.109	308.1	0.105	307.0	0.101	305.1	-7.92	-3.96	0.36	0.97
0.30	0.096	328.2	0.087	327.2	0.081	323.7	-18.52	-7.41	0.30	1.37
0.40	0.077	338	0.069	337.5	0.064	333.6	-20.31	-7.81	0.15	1.30

Şekil 3.18, Tablo 3.8 ve Tablo 3.9’da sunulan sonuçlar birlikte değerlendirildiğinde, kare kesitli betonarme kolonların moment-eğrilik davranışının hem sargı donatısı özelliklerine hem de kullanılan sargılı beton modeline duyarlı olduğu açık biçimde görülmektedir. Analizler kapsamında kullanılan TBDY (2018) yaklaşımı, Mander ile Saatçioğlu ve Razvi tarafından önerilen modellerin, beton çekirdeğinde oluşan sargı etkisini ve buna bağlı kesitsel kapasiteyi farklı düzeylerde temsil ettiği görülmektedir.

Sargı donatısı çapının etkisi (Tablo 3.8)

Sargı donatısı çapının 8 mm’den 12 mm’ye artırılması, tüm modeller için hem moment kapasitesinde hem de eğrilik değerlerinde artış meydana getirmiştir. Bu durum, sargı donatısı çapının artmasıyla beton çekirdeğinde oluşan etkin yanal sargı basıncının artması ile ilişkilidir.

Analiz sonuçları incelendiğinde:

- Mander modeli genel olarak daha yüksek moment değerleri öngörmektedir.
- Buna karşılık Saatçioğlu ve Razvi modeli özellikle eğrilik kapasitesi bakımından daha büyük değerler üretmektedir.
- Sargı donatısı çapının artmasıyla modeller arasındaki farkın arttığı görülmektedir.

Örneğin aksel yük oranının artmasıyla birlikte moment kapasitesi yükselirken, eğrilik değerleri sargılı beton model yaklaşımına bağlı olarak farklı oranlarda değişmektedir. Özellikle büyük çaplı sargı donatısı durumunda Saatçioğlu ve Razvi modelinde elde edilen eğrilik değerlerinin belirgin şekilde arttığı görülmektedir. Bu durum, söz konusu modelin beton çekirdeğinde etkin yanal sargılama gerilmeleri daha yüksek deformasyon kapasitesi ile temsil ettiğini göstermektedir.

Sargı donatısı aralığı ve aksel yükün etkisi (Tablo 3.9)

Sargı donatısı aralığının büyümesiyle birlikte kesitin eğrilik kapasitesinde belirgin bir azalma meydana gelmektedir. Sargı aralığının 50 mm’den 200 mm’ye kadar artırılması durumunda:

- Eğrilik değerlerinin sistematik biçimde azaldığı,
- Moment kapasitesindeki değişimin ise daha sınırlı kaldığı görülmektedir.

Bu durum, sargı etkinliğinin azalmasıyla beton çekirdeğinin erken ezilmesi ve plastik dönme kapasitesinin sınırlanmasıyla açıklanabilir.

Tablolarda verilen %D sapma değerleri, sargılı beton modelleri arasındaki farklılıkların özellikle yüksek deformasyon ve etkin sargı koşullarında belirginleştiğini açıkça göstermektedir. Mander modeli ile TBDY 2018 modeli arasında düşük ve tutarlı sapmalar elde edilirken, Saatçioğlu ve Razvi modeli ile diğer modeller arasındaki farklar yüksek eğrilik düzeylerinde %50’nin üzerine çıkmaktadır. Bu bulgu, model seçiminin özellikle yüksek süneklik taleplerinde kesit davranışının tahmininde kritik düzeyde belirleyici olduğunu ortaya koymaktadır.

Eksenel yük seviyesinin davranışa etkisi

Tabloda verilen aksel yük oranları incelendiğinde; aksel yük arttıkça moment kapasitesinin arttığı, buna karşılık eğrilik kapasitesinin azalma eğilimi gösterdiği belirlenmektedir. Bu sonuç

literatürde kabul edilen davranış ile uyumludur. Artan aksenal basınç, kesitin moment taşıma kapasitesini yükseltirken plastik deformasyon kapasitesini sınırlandırmaktadır.

Modeller arasındaki genel davranış farkı

Sonuçlar genel olarak şu eğilimi ortaya koymaktadır:

Mander modeli: dayanım artışını daha belirgin yansıttığı için daha yüksek moment kapasitesi üretmektedir.

Saatçioğlu ve Razvi modeli: beton çekirdeğinin deformasyon kapasitesini daha yüksek tahmin ettiğinden daha büyük eğrilik değerleri vermektedir.

TBDY yaklaşımı: çoğu durumda iki model arasında kalan bir davranış sergilemektedir.

Elde edilen bulgular, betonarme kolonların moment-eğrilik davranışının yalnızca beton dayanımı ile açıklanamayacağını göstermektedir. Kesitsel performans; sargı donatısı çapı, sargı donatısı aralığı, aksenal yük düzeyi, kullanılan sargılı beton modeli gibi parametrelerin birlikte etkisi altında şekillenmektedir.

4. BETONARME KİRİŞLERİN DOĞRUSAL OLMAYAN DAVRANIŞI

Betonarme kirişlerde doğrusal olmayan davranış; betonun çatlama ve ezilme mekanizmaları ile donatı çeliğinin akma ve pekleşme özelliklerinin birlikte etkisi altında gelişen karmaşık bir mekanik süreçtir. Eğilme momentinin artmasıyla birlikte çekme bölgesindeki beton kısa sürede çatlamakta ve çekme gerilmeleri büyük ölçüde boyuna donatı tarafından taşınmaktadır. Bu aşama kesit rijitliğinde belirgin bir azalmaya neden olurken, basınç bölgesindeki beton artan gerilmeler altında doğrusal elastik davranıştan doğrusal olmayan davranışa geçmektedir. Nihai aşamada beton basınç liflerinde ezilme oluşarak kesitin taşıma kapasitesini sınırlar. Bu mekanizma betonarme elemanların deprem etkileri altındaki gerçekçi davranışının anlaşılmasında temel kabul edilmektedir.

Boyuna donatının akması, kirişlerde plastik mafsal oluşumunun başlangıcını temsil eder. Akma sonrasında gelişen plastik şekildeğiştirmeler ve çeliğin pekleşme davranışı, elemanın moment kapasitesini belirli ölçüde koruyarak enerji yutma kapasitesini artırır. Bu nedenle betonarme kiriş performansı yalnızca dayanım açısından değil; eğrilik sünekliği, plastik dönme kapasitesi ve rijitlik kaybı gibi parametreler üzerinden değerlendirilir.

Doğrusal olmayan kiriş davranışının analitik olarak belirlenmesinde moment-eğrilik ilişkisi temel bir yöntemdir. Bu yaklaşım; çatlama sonrası rijitlik değişimini, donatı akmasını, nihai moment kapasitesini ve kesitin süneklik düzeyini nicel olarak ortaya koyar. Elde edilen eğriler, performans esaslı deprem mühendisliğinde plastik mafsal özelliklerinin tanımlanması ve hasar sınırlarının belirlenmesi için temel veri niteliği taşır. Bu bağlamda beton dayanımı, donatı oranı, enine donatı düzeni moment-eğrilik davranışını belirleyen başlıca parametrelerdir.

Basınç bölgesindeki beton ise doğrusal elastik davranışın ardından doğrusal olmayan bölgeye geçmekte ve yüksek eğrilik talepleri altında ezilme evresine ulaşmaktadır. Beton ezilmesinin başladığı nokta, moment-eğrilik eğrisi üzerinde nihai eğrilik kapasitesinin belirlenmesinde kritik bir sınır olarak kabul edilmektedir. Bu kapsamda, eğrilik sünekliği (μ_ϕ), kesitin akma eğriliği (ϕ_y) ile nihai eğriliği (ϕ_u) arasındaki oran olarak ($\mu_\phi = \phi_u / \phi_y$) tanımlanmakta ve plastik dönme kapasitesinin doğrudan bir göstergesi olarak kullanılmaktadır.

4.1. Betonarme Kirişlerin Moment-Eğrilik ve Eğrilik Sünekliği İlişkileri

Betonarme kirişlerin doğrusal olmayan davranışı; beton basınç dayanımı ile çekme ve basınç donatısı oranı gibi kesitsel parametrelerden önemli ölçüde etkilenmektedir. Bu bölümde, söz konusu parametrelerin betonarme kiriş kesitlerinin moment-eğrilik ilişkisi ve süneklik kapasitesi üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Bu amaçla, kesit alanı sabit tutulan ancak farklı tasarım parametrelerine sahip dikdörtgen kesitli kiriş modelleri oluşturulmuştur. Analiz kapsamında, beton basınç dayanımı ile çekme ve basınç donatısı oranlarının çift donatılı betonarme kirişlerin moment-eğrilik davranışı ve eğrilik sünekliği üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Parametrik değerlendirmeler sonucunda, farklı tasarım değişkenleri için elde edilen moment-eğrilik ilişkilerine bağlı olarak kiriş kesitlerinin eğrilik süneklik değerleri belirlenmiştir.

Foroughi ve Yüksel (2022b) tarafından “*A New Approach for Determining the Curvature Ductility of Reinforced Concrete Beams*” başlıklı çalışmada çift donatılı betonarme kirişlerin eğrilik süneklik katsayısı (k_e) için geliştirilen denklem esas alınarak betonarme kiriş kesitlerinin eğrilik

süneklik katsayıları hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar; Pam ve ark. (2001a), Kwan ve ark. (2002), Kwan ve Ho (2010) ile Lee (2013) tarafından literatürde önerilen süneklik katsayısı denklemleriyle karşılaştırılmıştır. Böylece farklı tasarım parametrelerine sahip kiriş kesitlerinin eğilme sünekliği analitik olarak değerlendirilmiş ve elde edilen bulgular karşılaştırmalı bir çerçevede ortaya konulmuştur.

Bu bölümün temel amacı, betonarme kiriş elemanlarının moment-eğrilik ilişkisini etkileyen başlıca tasarım parametrelerinin eğrilik sünekliği üzerindeki etkilerini incelemektir. Bu kapsamda beton basınç dayanımı ile çekme ve basınç donatısı oranı gibi kesitsel değişkenlerin, kirişlerin doğrusal olmayan davranışı ve moment-eğrilik karakteristiği üzerindeki etkileri analitik olarak değerlendirilmiştir. Betonarme kirişlerin eğilme davranışı ve süneklik kapasitesi birçok tasarım değişkenine bağlı olarak değişmekte olup, söz konusu parametrelerin sistematik biçimde incelenmesi yapısal davranışın daha doğru anlaşılmasına katkı sağlamaktadır.

Bu amaç doğrultusunda tasarlanan betonarme kiriş kesitlerine ait temel özellikler Tablo 4.1’de özetlenmiştir. Analize konu olan kiriş kesitleri ise Şekil 4.1’de gösterildiği üzere çift donatılı dikdörtgen enkesit olarak modellenmiştir (Foroughi ve Yüksel, 2023). Bu kesitler üzerinden gerçekleştirilen incelemelerle, farklı tasarım parametrelerinin moment-eğrilik ilişkisi ve eğrilik sünekliği üzerindeki etkileri karşılaştırmalı olarak ortaya konulmuştur.

Kiriş kesitlerinin genişliği $b_w = 300 \text{ mm}$ ve toplam derinliği $h = 600 \text{ mm}$ olarak tasarlanmıştır. Betonarme kiriş elemanlarında, basınç donatısının ağırlık merkezinden en dıştaki beton basınç lifine uzaklığı $d' = 50 \text{ mm}$ ve faydalı yükseklik; $d = 550 \text{ mm}$ olarak dikkate alınmıştır. TBDY (2018) kapsamında yapılacak tüm betonarme yapılarda C25’ten daha düşük mukavemetli beton kullanılmadığı için tüm kiriş modelleri için beton sınıfı olarak C25, C30, C35, C40, C45 ve C50, donatı çeliği için B420C donatı sınıfı seçilmiştir. Betonarme kirişler için yapılan analitik çalışmada TBDY (2018)’de beton ve donatı için verilen malzeme özellikleri kullanılmıştır. Moment-eğrilik analizlerinde betonun çekme dayanımı ihmal edilmiştir.

Betonarme kiriş kesiti tasarlanırken dikkat edilmesi gereken en önemli husus, elde edilen donatı oranının dengeli donatı oranından daha küçük olmasını sağlamaktır. Bu bölümde TS500 (2000)’de verilen sınır değerler dikkate alınmıştır. Kirişlerde çekme donatısı oranı (ρ) Denklem (4.1)’de verilen minimum değerlerden az olmamalıdır. TS500 (2000)’de, betonarme kirişlerde sünek davranış sağlamak için donatı oranı Denklem (4.2) ile sınırlandırılmıştır. Betonarme kirişlerde çekme donatısı oranı Denklem (4.2)’de verilen maksimum değerden ve %2’den fazla olmayacaktır. Kirişlerde çekme ve basınç donatısı oranları arasındaki fark, dengeli donatı oranının 0.85’ini geçmemelidir.

$$\rho = \frac{A_s}{b_w d} \geq \rho_{min} = 0.8 \frac{f_{ctd}}{f_{yd}} \quad (4.1)$$

$$(\rho - \rho') \leq \rho_{max} = 0.85 \rho_b$$

$$\rho_b = 0.85 k_1 \left(\frac{f_{cd}}{f_{yd}} \right) \left(\frac{700}{700 + f_{yd}} \right) \quad (4.2)$$

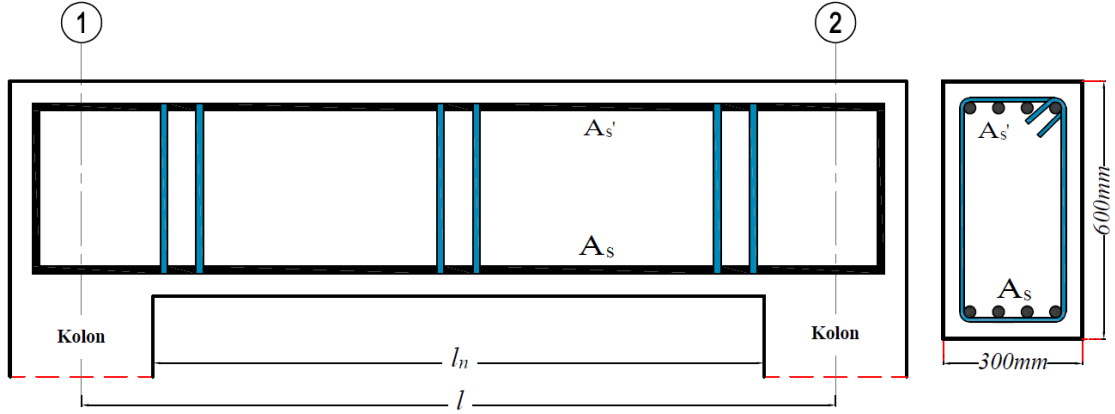
$$k_1 = 0.85 - 0.006(f_{ck} - 25) < 0.85 \quad \Leftrightarrow f_{ck} > 25 \text{ MPa}$$

$$k_1 = 0.85 \quad \Leftrightarrow f_{ck} \leq 30 \text{ MPa} \quad (4.3)$$

Farklı beton basınç dayanımı, farklı çekme ve basınç donatı oranlarına sahip toplam 66 adet betonarme kiriş modeli tasarlanmıştır. Kiriş modellerinin tasarımında TS500 (2000) ve TBDY (2018) hükümleri dikkate alınmıştır. Farklı parametrelerde tasarlanan kiriş modellerinde çekme donatısının oranı $\rho_{max} = 0.85\rho_b$ olarak her beton sınıfında sabit alınmıştır. Basınç donatı oranları $\rho'_s = 0.0, 0.1\rho_{max}, 0.2\rho_{max}, 0.3\rho_{max}, 0.4\rho_{max}, 0.5\rho_{max}, 0.6\rho_{max}, 0.7\rho_{max}, 0.8\rho_{max}, 0.9\rho_{max}$ ve ρ_{max} olarak dikkate alınmış ve bu oranlar değiştirilerek kiriş elemanlarının moment-eğrilik ilişkileri ile eğrilik süneklik kapasiteleri değerlendirilmiştir. Analitik sonuçlardan elde edilen moment-eğrilik ilişkileri grafiksel olarak sunulmuştur. Moment-eğrilik ilişkileri farklı kiriş modelleri için elde edilmiş ve eğriler karşılaştırılarak yorumlanmıştır. Betonarme kirişlerde eksenel yükün maksimum değeri $N = 0.10A_c f_c$ ile sınırlı olduğu için bu analizlerde $N = 0$ olarak dikkate alınmıştır.

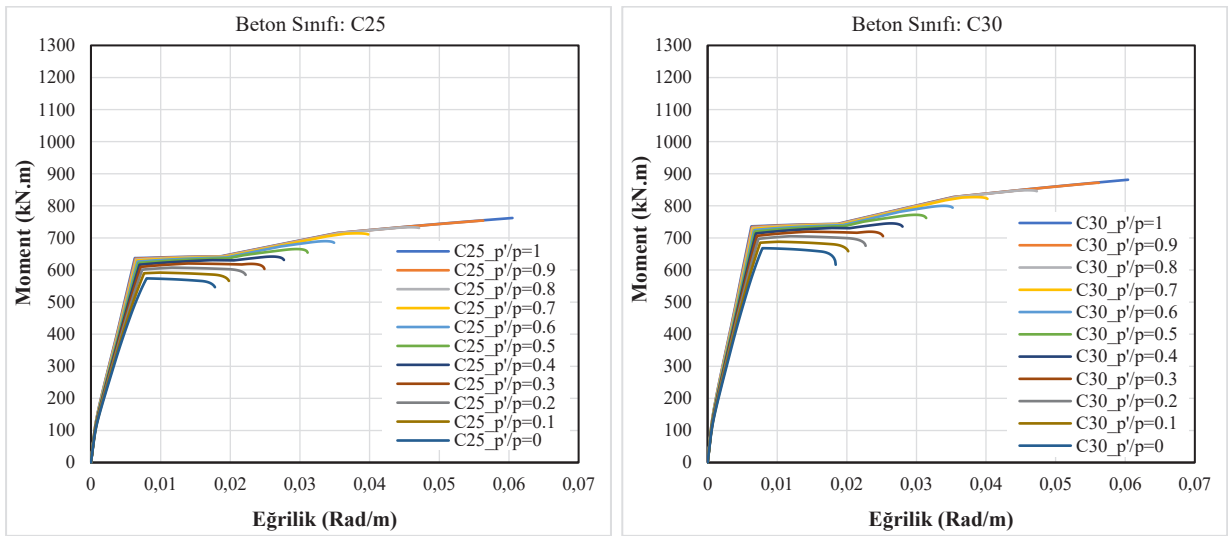
Tablo 4.1. Tasarlanan betonarme kiriş kesitleri için detaylar

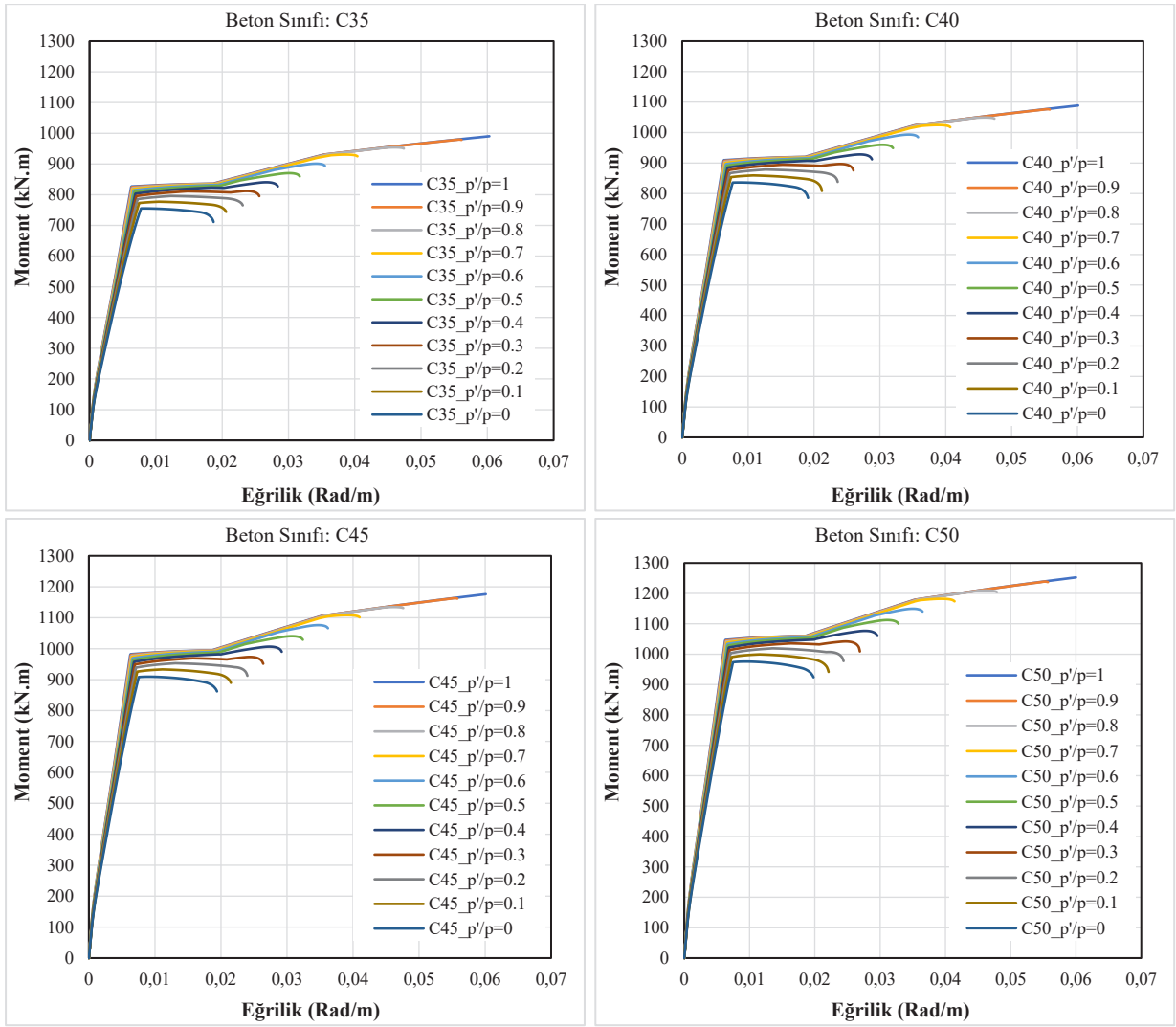
ρ'/ρ	Malzeme:C25			Malzeme: C30			Malzeme:C35			$\rho - \rho'$ ρ_b
	ρ	ρ'	ρ_b	ρ	ρ'	ρ_b	ρ	ρ'	ρ_b	
0.0		0.0			0.0			0.0		0.85
0.1		0.0018			0.0021			0.0024		0.77
0.2		0.0037			0.0043			0.0048		0.68
0.3		0.0055			0.0064			0.0072		0.60
0.4		0.0074			0.0085			0.0096		0.51
0.5	0.0184	0.0092	0.0217	0.0213	0.0107	0.0251	0.0240	0.0120	0.0282	0.43
0.6		0.0111			0.0128			0.0144		0.34
0.7		0.0129			0.0149			0.0168		0.26
0.8		0.0147			0.0171			0.0192		0.17
0.9		0.0166			0.0192			0.0216		0.09
1.0		0.0184			0.0213			0.0240		0.00
ρ'/ρ	Malzeme:C40			Malzeme: C45			Malzeme:C50			$\rho - \rho'$ ρ_b
	ρ	ρ'	ρ_b	ρ	ρ'	ρ_b	ρ	ρ'	ρ_b	
0.0		0.0			0.0			0.0		0.85
0.1		0.0026			0.0028			0.0030		0.77
0.2		0.0053			0.0057			0.0061		0.68
0.3		0.0079			0.0085			0.0091		0.60
0.4		0.0105			0.0114			0.0121		0.51
0.5	0.0263	0.0132	0.0310	0.0285	0.0142	0.0335	0.0303	0.0152	0.0357	0.43
0.6		0.0158			0.0171			0.0182		0.34
0.7		0.0184			0.0199			0.0212		0.26
0.8		0.0211			0.0228			0.0243		0.17
0.9		0.0237			0.0256			0.0273		0.09
1.0		0.0263			0.0285			0.0303		0.00



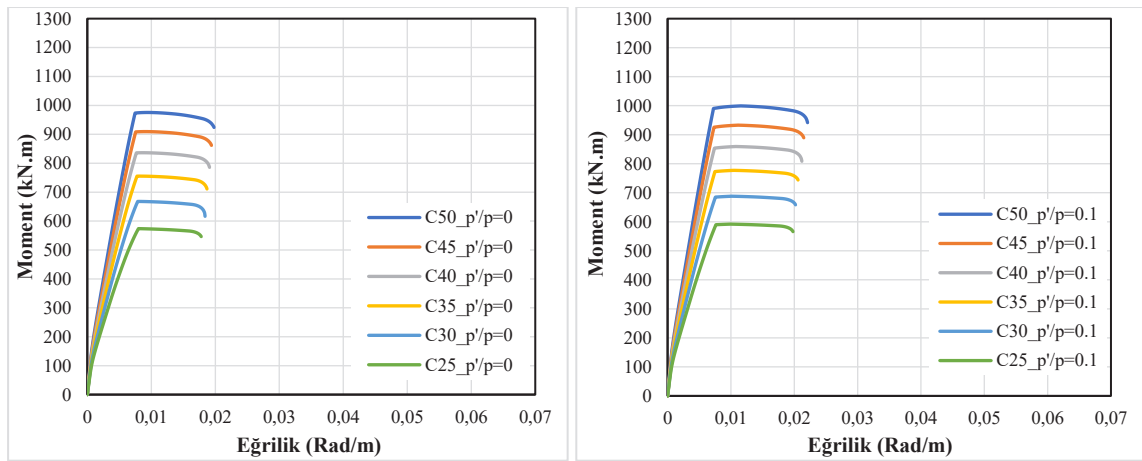
Şekil 4.1. Moment Eğrilik analizlerinde kullanılan betonarme kiriş modelinin kesit görünüşü

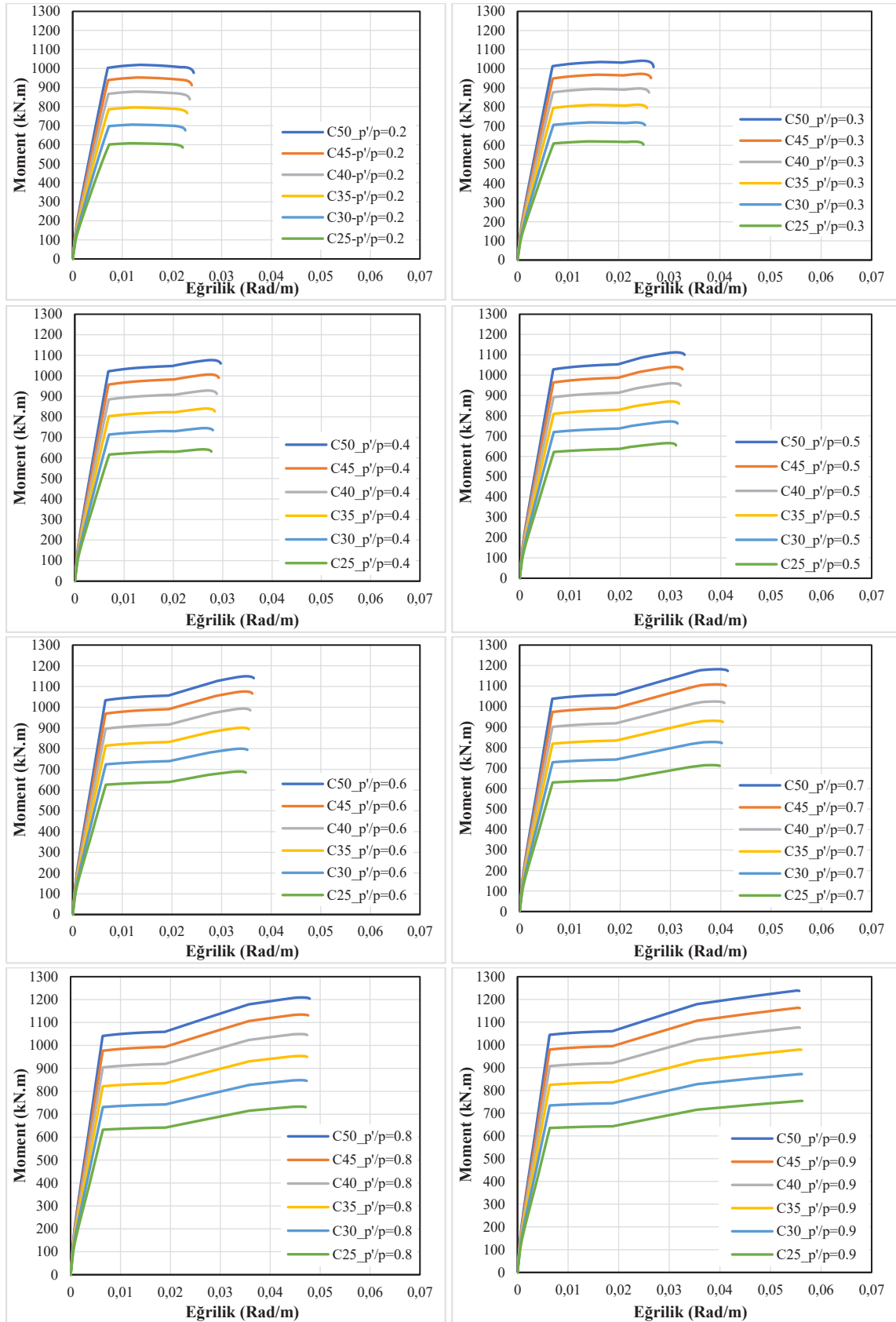
Betonarme kirişlerin eğrilik sünekliği üzerinde etkili olan başlıca parametreler; beton basınç dayanımı (f_{ck}), çekme donatısı oranı (ρ) ve basınç donatısı oranıdır (ρ') (Yüksel ve ark., 2020). Bu bölümde söz konusu değişkenlerin kiriş kesitlerinin moment-eğrilik davranışı ile eğrilik sünekliği üzerindeki etkileri karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Her bir parametrenin yapısal davranış üzerindeki rolünü ortaya koyabilmek amacıyla farklı tasarım kombinasyonlarına sahip kesitler için parametrik analizler yapılmıştır. Farklı beton basınç dayanımı değerleri ile çekme ve basınç donatısı oranlarının (ρ'/ρ) değişimi dikkate alınarak elde edilen betonarme kiriş kesitlerine ait moment-eğrilik ilişkileri karşılaştırmalı olarak Şekil 4.2'de sunulmuştur. Basınç ve çekme donatısı oranı arasındaki ilişkinin ve beton basınç dayanımının moment kapasitesi ile eğrilik üzerindeki etkileri ise Şekil 4.3'te gösterilmiştir. Betonarme kiriş kesitleri için hesaplanan eğrilik sünekliği katsayısı (μ_ϕ) değerleri, farklı beton basınç dayanımı (f_{ck}) ve donatı oranı parametreleri (basınç/çekme donatısı oranı; ρ'/ρ , donatı derecesi; $\lambda = (\rho - \rho')/\rho_b$) için Tablo 4.2'de sunulmaktadır. Ayrıca farklı basınç donatısı oranları ve beton dayanımı değerlerine sahip çift donatılı betonarme kiriş kesitleri için elde edilen eğrilik sünekliği (μ_ϕ) değişimi Şekil 4.4'te verilerek söz konusu parametrelerin süneklik üzerindeki etkisi ortaya konulmuştur.

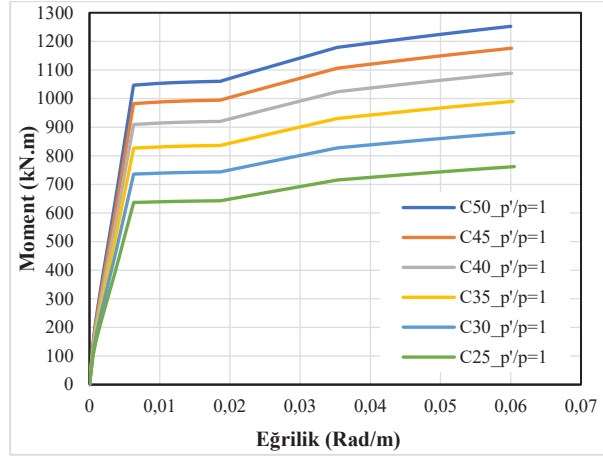




a) Farklı basınç donatı oranı etkileri

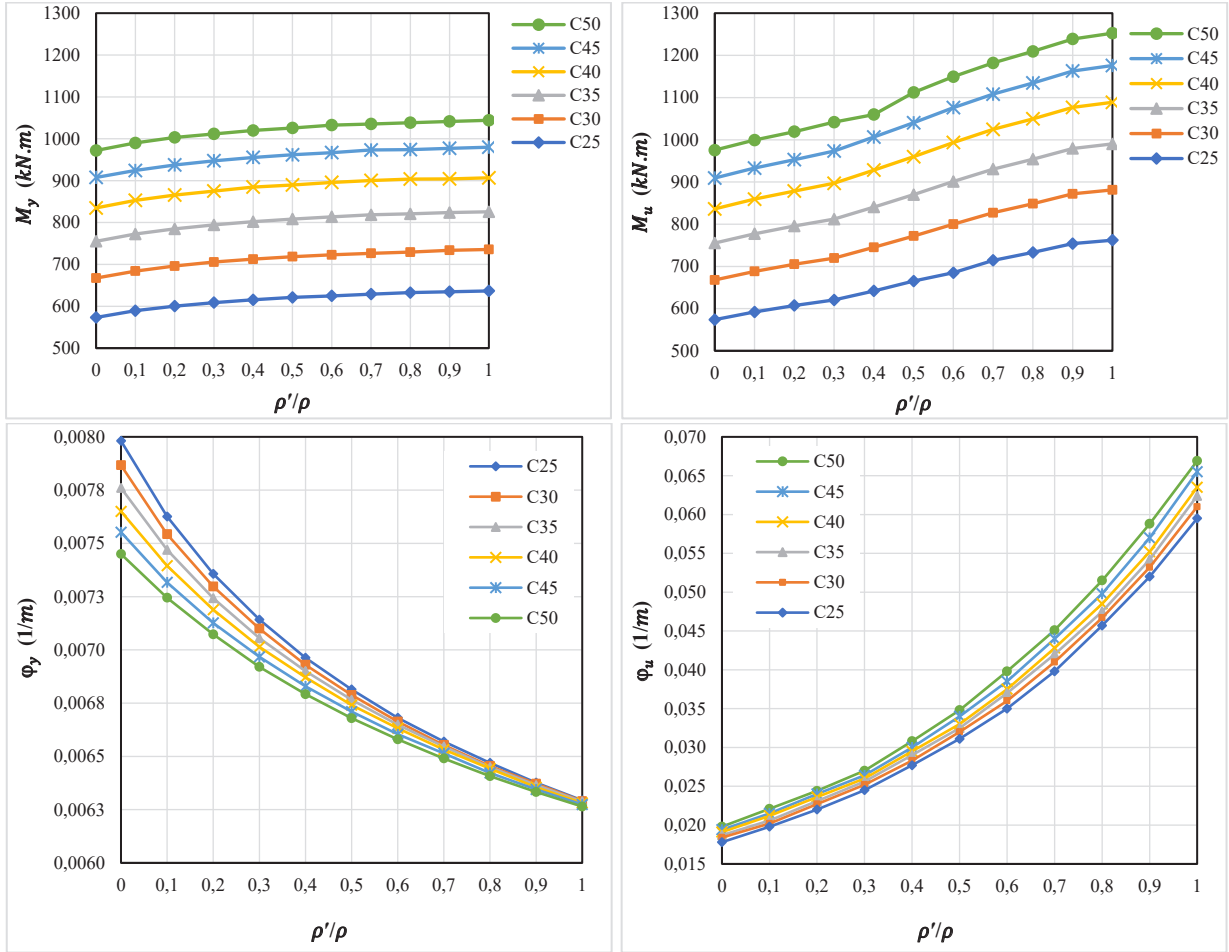






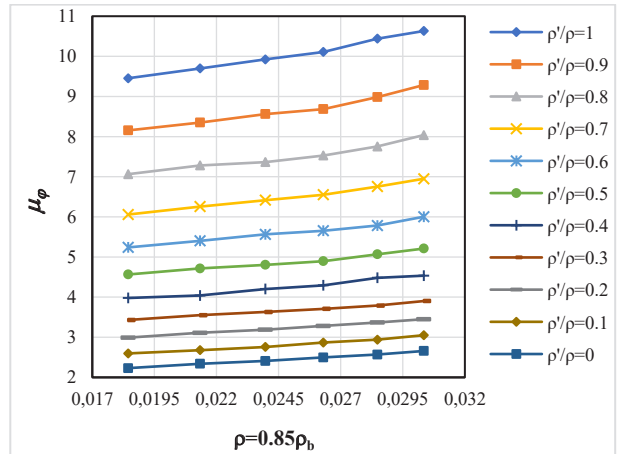
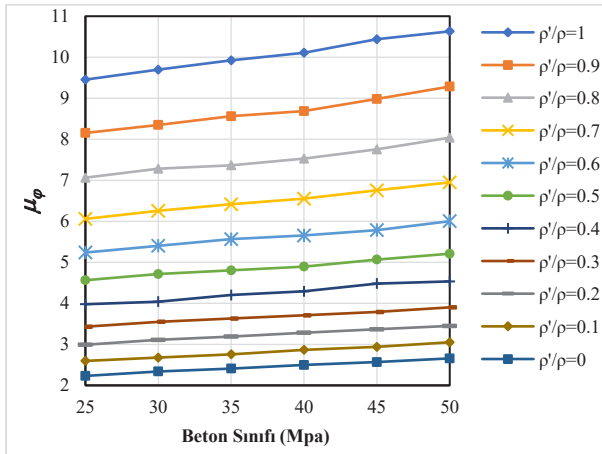
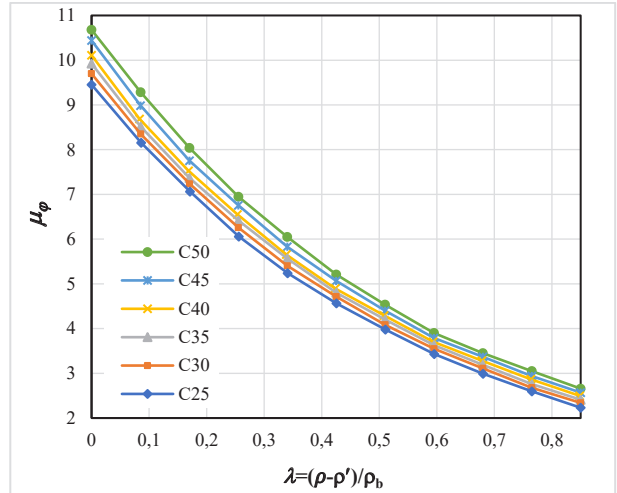
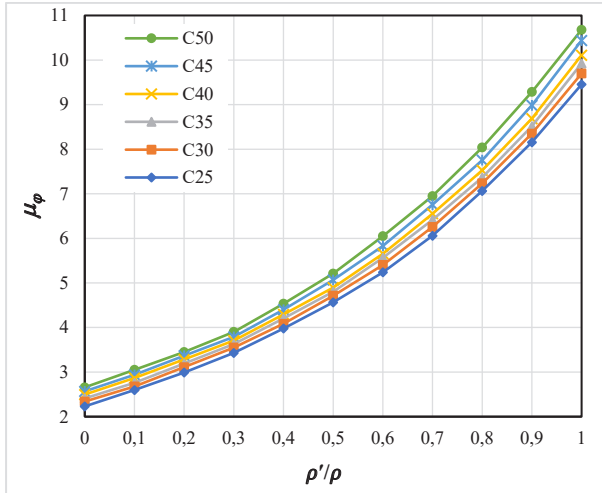
b) Farklı beton basınç dayanımı etkileri

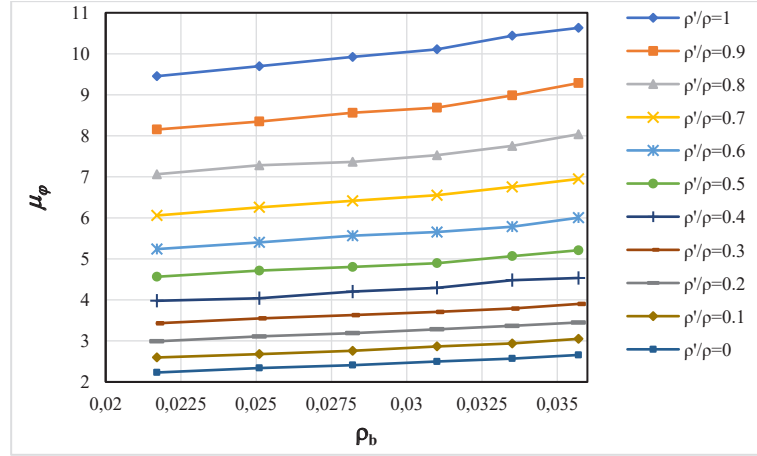
Şekil 4.2. Çift donatılı betonarme kirişlerin karşılaştırmalı moment-eğrilik ilişkileri

Şekil 4.3. ρ'/ρ ve beton basınç dayanımının moment ve eğrilik üzerindeki etkisi

Tablo 4.2. Farklı beton basınç dayanımı ve donatı oranı parametreleri için hesaplanan eğrilik süneklik değerleri

λ	ρ'/ρ	$f_{ck}=25\text{MPa}$	$f_{ck}=30\text{MPa}$	$f_{ck}=35\text{MPa}$	$f_{ck}=40\text{MPa}$	$f_{ck}=45\text{MPa}$	$f_{ck}=50\text{MPa}$
		μ_φ	μ_φ	μ_φ	μ_φ	μ_φ	μ_φ
0.85	0.0	2.23	2.34	2.41	2.50	2.57	2.66
0.77	0.1	2.60	2.68	2.76	2.87	2.94	3.05
0.68	0.2	2.99	3.11	3.19	3.28	3.37	3.45
0.60	0.3	3.43	3.55	3.63	3.71	3.79	3.90
0.51	0.4	3.98	4.04	4.20	4.29	4.48	4.53
0.43	0.5	4.56	4.71	4.80	4.90	5.07	5.21
0.34	0.6	5.24	5.40	5.56	5.65	5.83	6.00
0.26	0.7	6.06	6.26	6.42	6.55	6.75	6.95
0.17	0.8	7.06	7.28	7.36	7.53	7.75	8.04
0.09	0.9	8.15	8.35	8.56	8.69	8.98	9.29
0.00	1.0	9.45	9.70	9.92	10.11	10.44	10.63





Şekil 4.4. Farklı tasarım parametrelerinin betonarme kiriş elemanların eğrilik sünekliği üzerindeki etkisi

Betonarme kirişlerin moment-eğrilik ve süneklik davranışının değerlendirilmesi:

Bu bölümde incelenen çift donatılı betonarme kiriş modellerine ait doğrusal olmayan moment-eğrilik analizleri, kiriş davranışının kolonlardan farklı olarak ρ'/ρ oranının hakimiyetinde geliştiğini ve sünekliğin büyük ölçüde kesitin donatı derecesi ($\lambda = (\rho - \rho')/\rho_b$) ile kontrol edildiğini ortaya koymaktadır. Moment-eğrilik eğrileri incelendiğinde, kirişlerde elastik evreden akma evresine geçişin kolonlara kıyasla daha belirgin ve keskin olduğu görülmektedir. Akma sonrasında moment kapasitesinin belirli bir aralıkta korunabilmesi, özellikle basınç donatısının varlığı ve etkinliği ile doğrudan bağlantılıdır.

Beton basınç dayanımının etkisi

Farklı beton basınç dayanımı değerleri için elde edilen moment-eğrilik eğrileri (Şekil 4.2 ve Şekil 4.3) incelendiğinde, beton dayanımındaki artışın öncelikle maksimum moment kapasitesini artırdığı görülmektedir. Bunun temel nedeni, basınç bölgesinde oluşan eşdeğer beton basınç bloğunun taşıyabileceği gerilmenin artması ve dolayısıyla iç kuvvet çiftinin büyümesidir. Ancak moment kapasitesindeki bu artışa karşın, nihai eğrilik değerlerinde aynı oranda bir artış gözlenmemektedir. Yüksek dayanımlı betonların daha gevrek karakter göstermesi nedeniyle basınç bölgesinde ezilme daha sınırlı deformasyon kapasitesi ile gerçekleşmektedir. Bu durum, eğrilik sünekliği (μ_ϕ) açısından değerlendirildiğinde, beton dayanımının artmasının süneklik üzerinde sınırlayıcı bir etki oluşturabileceğini göstermektedir. Dolayısıyla analiz sonuçları, beton basınç dayanımının artırılmasının taşıma gücü açısından avantaj sağladığını; ancak eğrilik kapasitesi ve süneklik bakımından optimum bir düzeyin üzerinde artışın yapısal performansa beklenen ölçüde katkı sağlamayabileceğini ortaya koymaktadır.

Çekme donatısı oranının etkisi

Çekme donatısı oranındaki artışın moment-eğrilik ilişkisine etkisi incelendiğinde, donatı oranının yükselmesiyle birlikte hem akma momentinin hem de maksimum moment kapasitesinin arttığı görülmektedir. Bu durum, çekme bölgesindeki donatının daha büyük çekme kuvveti taşıması ve iç kuvvet çiftinin büyümesi ile açıklanabilir. Bununla birlikte, çekme donatısı oranındaki artışı

tarafsız eksen derinliğini artırarak kesiti basınca daha duyarlı hale getirmekte ve betonun ezilme sınırına daha erken ulaşmasına neden olmaktadır. Bu mekanizma, nihai eğrilik değerinin azalmasına yol açarak eğrilik sünekliğini düşürmektedir. Analiz sonuçlarında da yüksek çekme donatısı oranına sahip kesitlerde moment kapasitesi artarken eğrilik sünekliğinin azaldığı gözlenmektedir. Dolayısıyla çekme donatısı oranının yalnızca dayanım açısından değil, deformasyon kapasitesi açısından da optimize edilmesi gerektiği anlaşılmaktadır.

Basınç donatısı oranının etkisi

Basınç donatısı oranındaki değişim değerlendirildiğinde (Şekil 4.2 ve Şekil 4.4), çift donatılı kesitlerde basınç bölgesine yerleştirilen boyuna donatının moment-eğrilik ilişkisinin akma sonrası evresinde kesitin taşıma ve deformasyon kapasitesini artırdığı görülmektedir. Basınç donatısı, betonun basınç liflerinde ezilmeye yaklaşması sürecinde ilave basınç kuvveti üstlenerek iç kuvvet dengesine aktif biçimde katılmakta; bu katkı, tarafsız eksen derinliğinin daha kontrollü bir şekilde gelişmesini sağlayarak nihai eğrilik kapasitesinin artmasına olanak vermektedir. Analiz sonuçlarına göre basınç donatısı oranındaki artışı, özellikle nihai eğrilik (φ_u) değerinde artışa yol açmakta ve dolayısıyla eğrilik sünekliğini (μ_φ) belirgin biçimde yükseltmektedir. Basınç donatısının, beton ezilmesinin ani karakterini yumuşatarak daha kontrollü bir hasar mekanizması oluşturduğu söylenebilir. Bu sonuç, deprem etkisi altındaki çerçeve sistemlerde plastik mafsal bölgelerinde basınç donatısının süneklik kapasitesini artırıcı önemli bir tasarım parametresi olduğunu göstermektedir.

Parametrelerin birlikte değerlendirilmesi

Beton dayanımı ve çekme donatısı oranındaki artış genellikle moment kapasitesini artırırken, süneklik üzerinde aynı yönde ve oranda bir artış sağlamamaktadır. Buna karşılık, basınç donatısı oranındaki artış hem moment kapasitesine katkı sağlamakta hem de sünekliği iyileştirmektedir. Bu durum, tasarım sürecinde yalnızca dayanım temelli bir yaklaşımın yeterli olmadığını; performans esaslı tasarım ilkeleri çerçevesinde deformasyon kapasitesinin de dikkate alınması gerektiğini göstermektedir. Özellikle plastik mafsal oluşumu beklenen bölgelerde, yeterli basınç donatısının sağlanması ve çekme donatısı oranının dengeli düzeyde tutulması, hedeflenen sünek davranışın elde edilmesi açısından kritik öneme sahiptir.

Genel değerlendirme

Gerçekleştirilen analizler, betonarme kirişlerin moment-eğrilik davranışının çok parametrelili ve etkileşimli bir mekanizmaya dayandığını göstermektedir. Beton basınç dayanımı moment kapasitesini artırmakta ancak süneklik üzerinde sınırlı ya da olumsuz etki oluşturabilmektedir. Çekme donatısı oranının artışı dayanımı artırmaktadır. Basınç donatısı oranı ise hem dayanımı hem de eğrilik sünekliğini artıran en etkili parametrelerden biri olarak öne çıkmaktadır. Bu bulgular, betonarme kiriş tasarımında optimum parametre kombinasyonunun belirlenmesinin, yalnızca taşıma gücünü değil, aynı zamanda deformasyon kapasitesi ve enerji yutma potansiyeli açısından da değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Özellikle deprem etkilerine maruz yapı elemanlarında, eğrilik sünekliği performans kriterlerinin sağlanmasında temel belirleyici parametre olarak dikkate alınmalıdır.

4.2. Betonarme Kirişlerde Eğrilik Sünekliğinin Hesaplanması

Literatürde yaygın olarak kullanılan geleneksel yaklaşımlar, eğrilik sünekliğini akma ve göçme durumlarına karşılık gelen eğrilik değerlerinin oranı ($\mu_\varphi = \varphi_u/\varphi_y$) şeklinde tanımlamaktadır. Bu bölümde, farklı parametrelere sahip çift donatılı betonarme kirişlerin moment-eğrilik davranışı ile eğrilik süneklik faktörü üzerine parametrik bir çalışmanın sonuçları sunulmaktadır. Çalışmada beton basınç dayanımı (f_{ck}) ile çekme (ρ) ve basınç donatısı (ρ') oranlarının moment-eğrilik eğrisi ve eğrilik süneklik faktörü (μ_φ) üzerindeki etkileri kapsamlı olarak değerlendirilmiştir. Söz konusu parametreler, çift donatılı kirişlerin süneklik davranışını belirleyen temel tasarım değişkenleri olarak ele alınmıştır.

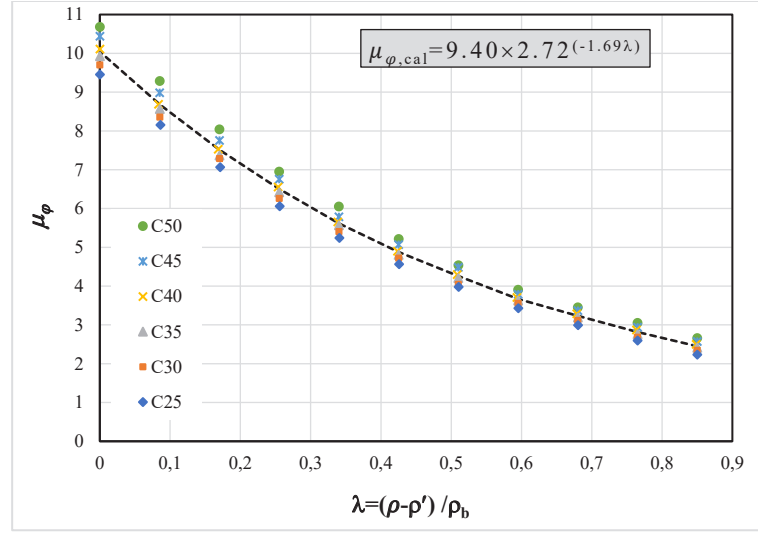
Çift donatılı betonarme kirişlerde, f_{ck} 'nin etkisinin, kesitin donatı derecesini ($\lambda = (\rho - \rho')/\rho_b$) belirleyen ρ ve ρ' miktarlarına bağlı olduğu bulunmuştur. Bu nedenle, sayısal analiz sonuçlarına dayanarak, çift donatılı kiriş kesitlerinin eğrilik sünekliği için alternatif bir denklem geliştirmek için iki önemli değişken olan λ ve f_{ck} 'nin kullanılmasının gerektiği gözlemlenebilir.

Bu çerçevede, eğrilik süneklik faktörünü tanımlamak için alternatif bir öngörü denklemine ihtiyaç duyulmaktadır. Foroughi ve Yüksel (2022b) tarafından geliştirilen modelde, eğrilik süneklik faktörünün fonksiyonel yapısı λ ve f_{ck} değişkenlerine bağlı olarak tanımlanmış; gerçekleştirilen kapsamlı sayısal analizlerden elde edilen veriler regresyon analizi yöntemiyle değerlendirilerek eğrilik sünekliğinin tahminine yönelik ampirik bir denklem önerilmiştir. Çift donatılı betonarme kirişler için eğrilik süneklik faktörünün matematiksel ifadesinin temel formu Denklem (4.4)'te sunulmakta olup, bu bağıntı Foroughi ve Yüksel (2022b) tarafından önerilen modelin genel fonksiyonel yapısını temsil etmektedir.

$$\mu_\varphi = f \left\{ \left(\lambda = \frac{(\rho - \rho')}{\rho_b} \right), f_{ck} \right\} \quad (4.4)$$

$f_{yk} = 420$ MPa akma dayanımına sahip donatı çeliği ile $f_{ck} = 25$ MPa ila 50 MPa aralığında değişen beton basınç dayanımları için analiz edilen çift donatılı betonarme kiriş kesitlerinde, basınç ve çekme donatısı oranlarının oranı olarak tanımlanan ρ'/ρ parametresinin artmasıyla birlikte eğrilik sünekliğinde belirgin bir artış gözlemlenmiştir. Bu bulgu, basınç donatısının kesit davranışı üzerindeki etkin rolünü ve akma sonrası deformasyon kapasitesine olan katkısını açık biçimde ortaya koymaktadır. Ayrıca, kesit davranışını tanımlayan temel parametrelerden biri olan λ değerinin, eğrilik sünekliği üzerinde belirleyici bir etkiye sahip olduğu belirlenmiştir. Çift donatılı kiriş kesitlerinde λ değerinin artması, eğrilik sünekliğinde azalma eğilimi yaratmaktadır. Sayısal analiz sonuçları, bu azalmanın doğrusal bir ilişki göstermediğini; ancak λ parametresindeki artışla birlikte eğrilik sünekliğinin sistematik olarak düştüğünü ortaya koymaktadır.

λ parametresinin eğrilik sünekliği üzerindeki etkisini niceliksel olarak tanımlayabilmek amacıyla, elde edilen sayısal analiz sonuçları kullanılarak regresyon analizi gerçekleştirilmiştir. Bu analiz sonucunda, eğrilik sünekliği faktörü ile λ parametresi arasındaki bağıntı ampirik bir ifade ile tanımlanmış ve önerilen regresyon denkleminin, sayısal analizlerden elde edilen eğrilik sünekliği değerleri ile yüksek düzeyde uyum gösterdiği belirlenmiştir. Söz konusu ilişkinin grafiksel gösterimi Şekil 4.5'te sunulmuştur.



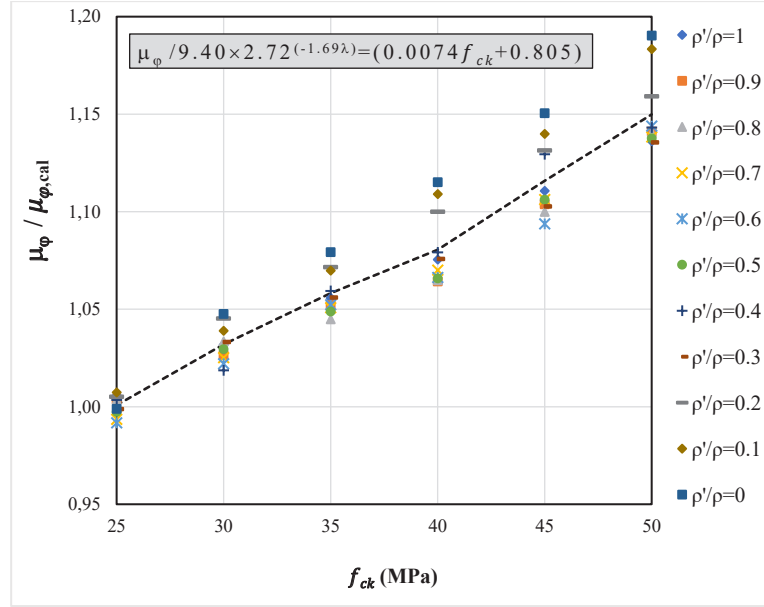
Şekil 4.5. Betonarme kirişlerde donatı derecesinin eğrilik sünekliği üzerindeki etkisi

Elde edilen bulgular, çift donatılı betonarme kiriş kesitlerinde eğrilik sünekliğinin yalnızca donatı oranları ile değil, aynı zamanda kesit davranışını temsil eden parametreler tarafından da kontrol edildiğini göstermektedir. Bu bağlamda, özellikle sünek davranışın hedeflendiği tasarım uygulamalarında λ (donatı derecesi) parametresinin etkisinin dikkate alınması, performansa dayalı betonarme kiriş tasarımının temel gerekliliklerinden biri olarak değerlendirilmektedir. Foroughi ve Yüksel (2022b) tarafından gerçekleştirilen sayısal analiz sonuçlarına dayanılarak, eğrilik sünekliği faktörü ile λ parametresi arasındaki ilişki regresyon analizi yöntemiyle türetilmiş olup, elde edilen bağıntı Denklem (4.5)'te sunulmuştur.

$$\mu_{\varphi,cal} = 9.40 \times 2.72^{(-1.69\lambda)} \quad (4.5)$$

Denklem (4.5), çift donatılı kiriş kesitlerinin eğrilik süneklik faktörünün $9.40 \times 2.72^{-1.69\lambda}$ 'nin bir fonksiyonu olarak ifade edilebileceğini açıkça göstermektedir. Betonun basınç dayanımının eğrilik süneklik faktörünün (μ_{φ}), $9.40 \times 2.72^{-1.69\lambda}$ 'ye oranı üzerindeki etkisi Şekil 4.6'da gösterilmektedir. Sayısal analiz sonuçları, betonun basınç dayanımının artmasıyla eğrilik süneklik faktörünün arttığını göstermektedir. Foroughi ve Yüksel (2022) tarafından gerçekleştirilen regresyon analizi sonucunda, eğrilik süneklik faktörünün $9.40 \times 2.72^{-1.69\lambda}$ ifadesine oranı ile beton ve donatı basınç dayanımları arasındaki ilişki Denklem (4.6)'da sunulmuştur.

$$\frac{\mu_{\varphi}}{\mu_{\varphi,cal}} = (0.0074f_{ck} + 0.80) \quad (4.6)$$



Şekil 4.6. Tasarım parametrelerinin eğrilik süneklik faktörünün $9.40 \times 2.72^{(-1.69\lambda)}$ oranı üzerindeki etkisi

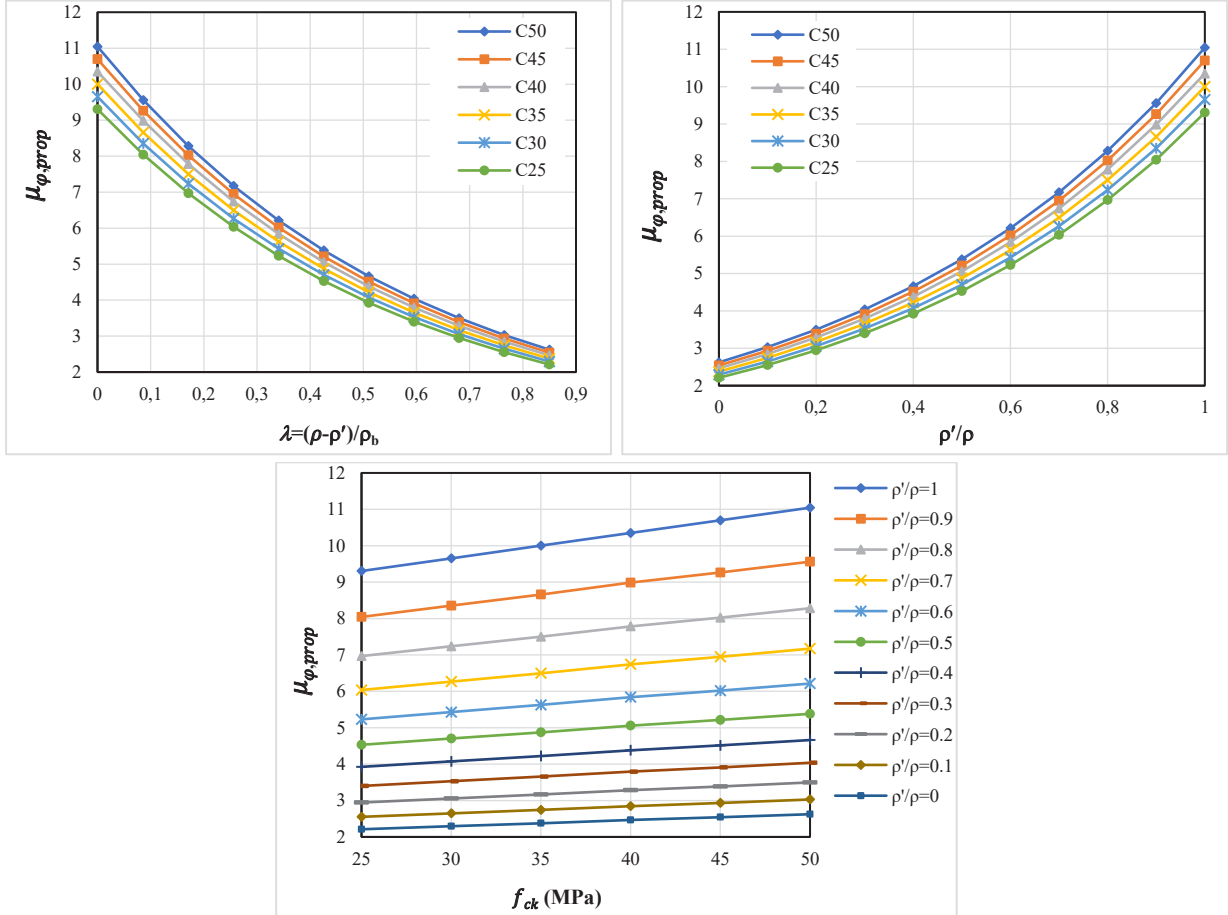
Foroughi ve Yüksel (2022b) tarafından malzeme dayanımı ve donatı oranı gibi temel tasarım parametrelerinin etkisi dikkate alınarak gerçekleştirilen parametrik çalışma sonucunda, çift donatılı betonarme kiriş kesitleri için eğrilik süneklik faktörüne yönelik bir tahmin denklemi önerilmiştir. Önerilen eğrilik sünekliği ifadesi $\mu_{\phi,prop}$ Denklem (4.7)'de sunulmuş olup, f_{ck} , ρ'/ρ ve λ parametrelerinin $\mu_{\phi,prop}$ üzerindeki etkileri Şekil 4.7'de gösterilmiştir.

$$\mu_{\phi,prop} = \left[9.40 \times 2.72^{(-1.69\lambda)} \times (0.0074 f_{ck} + 0.80) \right] \quad (4.7)$$

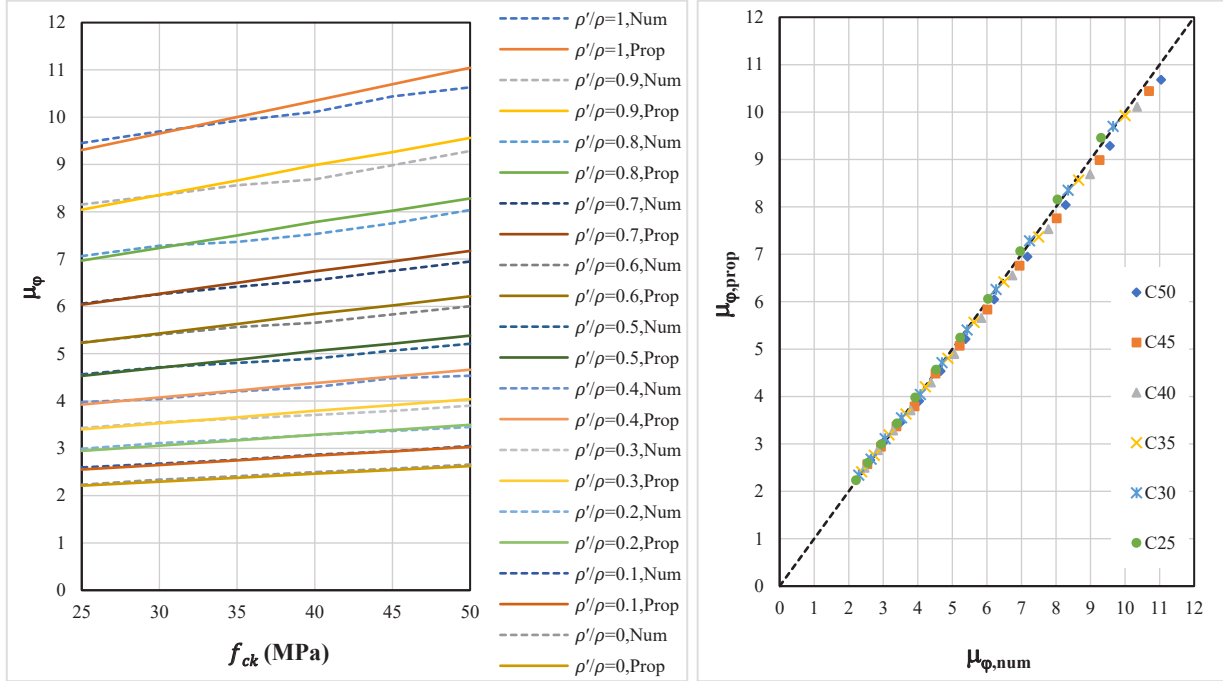
Bu bölümde, betonarme kirişlerin farklı tasarım parametrelerine bağlı olarak eğrilik süneklik katsayıları önerilen bağıntı (Denklem 4.7) kullanılarak analitik olarak hesaplanmıştır. Bu kapsamda, çift donatılı betonarme kiriş kesitleri için moment-eğrilik ilişkilerinden elde edilen μ_ϕ değerleri ile önerilen eğrilik süneklik denklemi yardımıyla hesaplanan değerler karşılaştırılmıştır. Farklı f_{ck} ve ρ'/ρ parametreleri için elde edilen eğrilik süneklik katsayılarının analitik çözüm (moment-eğrilik ilişkilerinden) sonuçları ile Denklem (4.7) kullanılarak hesaplanan değerlerinin karşılaştırılması Tablo 4.3'te sunulmuştur. Ayrıca, farklı tasarım parametrelerinin Denklem (4.7)'ye göre tanımlanan $\mu_{\phi,prop}$ üzerindeki etkileri Şekil 4.7'de grafiksel olarak gösterilmiştir.

Tablo 4.3. Farklı f_{ck} ve ρ'/ρ oranları için eğrilik süneklik katsayısının analitik hesap sonuçları ile Denklem (4.7) kullanılarak elde edilen değerlerin karşılaştırılması

ρ'/ρ	$f_{ck}=25$ MPa		$f_{ck}=30$ MPa		$f_{ck}=35$ MPa		$f_{ck}=40$ MPa		$f_{ck}=45$ MPa		$f_{ck}=50$ MPa	
	μ_ϕ	Denklem (4.7)	μ_ϕ	Denklem (4.7)	μ_ϕ	Denklem (4.7)	μ_ϕ	Denklem (4.7)	μ_ϕ	Denklem (4.7)	μ_ϕ	Denklem (4.7)
0.0	2.23	2.21	2.34	2.29	2.41	2.38	2.50	2.47	2.57	2.54	2.66	2.62
0.1	2.60	2.55	2.68	2.65	2.76	2.74	2.87	2.85	2.94	2.93	3.05	3.03
0.2	2.99	2.95	3.11	3.06	3.19	3.17	3.28	3.29	3.37	3.39	3.45	3.50
0.3	3.43	3.40	3.55	3.53	3.63	3.66	3.71	3.79	3.79	3.91	3.90	4.04
0.4	3.98	3.92	4.04	4.07	4.20	4.22	4.29	4.38	4.48	4.52	4.53	4.66
0.5	4.56	4.53	4.71	4.70	4.80	4.87	4.90	5.06	5.07	5.21	5.21	5.38
0.6	5.24	5.23	5.40	5.43	5.56	5.63	5.65	5.84	5.83	6.02	6.05	6.21
0.7	6.06	6.04	6.26	6.27	6.42	6.50	6.55	6.74	6.75	6.95	6.95	7.17
0.8	7.06	6.97	7.28	7.24	7.36	7.50	7.53	7.78	7.75	8.02	8.04	8.28
0.9	8.15	8.04	8.35	8.35	8.56	8.66	8.69	8.99	8.98	9.26	9.29	9.56
1.0	9.45	9.31	9.70	9.65	9.92	10.00	10.11	10.35	10.44	10.70	10.68	11.05

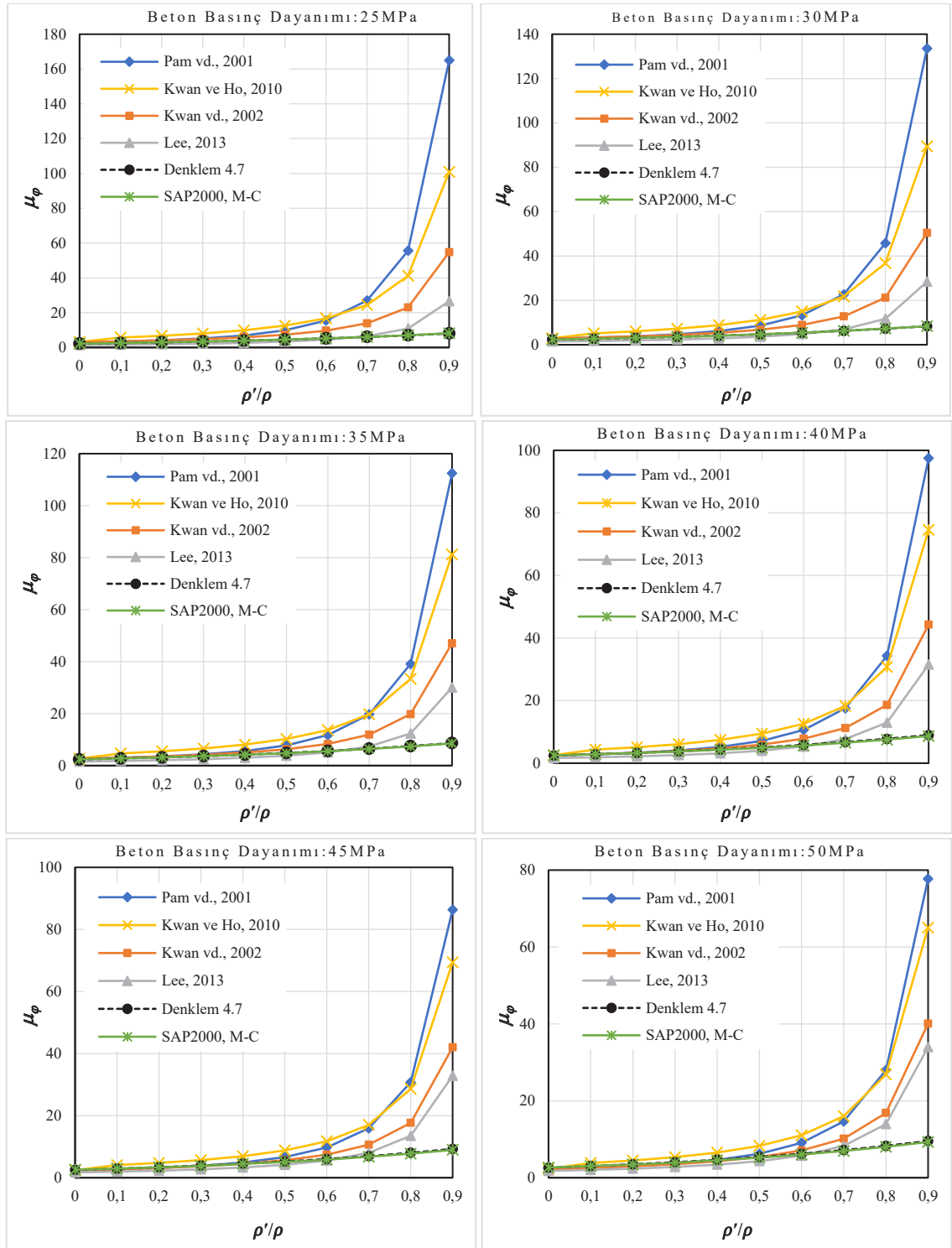

Şekil 4.7. Farklı tasarım parametrelerinin önerilen eğrilik süneklik faktörü oranı üzerindeki etkisi

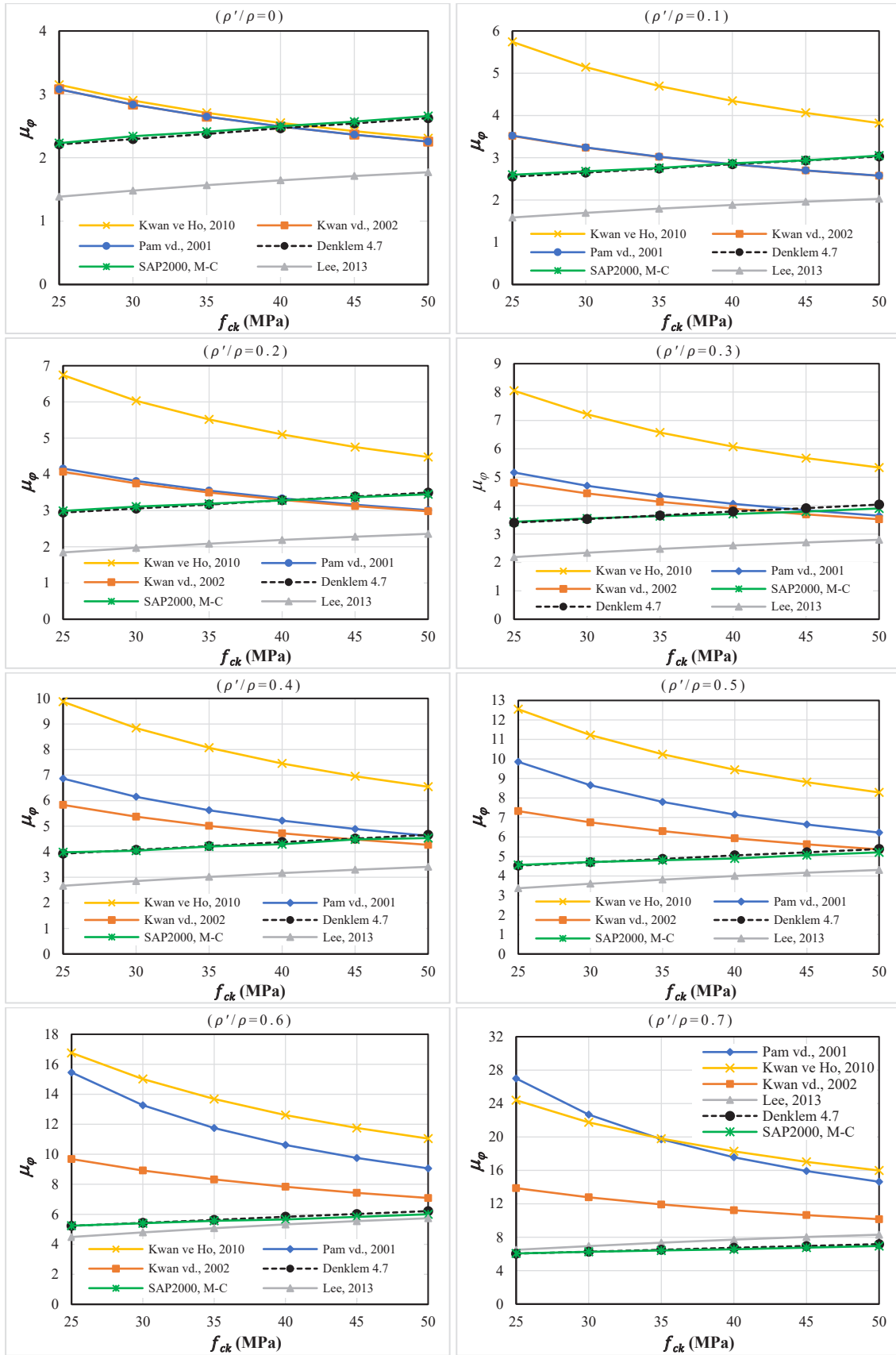
Denklem (4.7) ile hesaplanan eğrilik süneklik katsayısının, farklı f_{ck} , ρ'/ρ ve λ parametreleri için elde edilen sayısal analiz sonuçlarıyla karşılaştırılması Şekil 4.8'de sunulmuştur. Denklem (4.7), 0.99'un oldukça üzerinde olan bağıntı katsayısı R^2 'den de anlaşılacağı gibi mükemmel bir uyum göstermektedir. Ayrıca Denklem (4.7) ile elde edilen önerilen eğrilik süneklik faktörünün sayısal sonuçlara oranı için maksimum ortalama değer ve standart sapma sırasıyla %1.02 ve %2.139'dur.

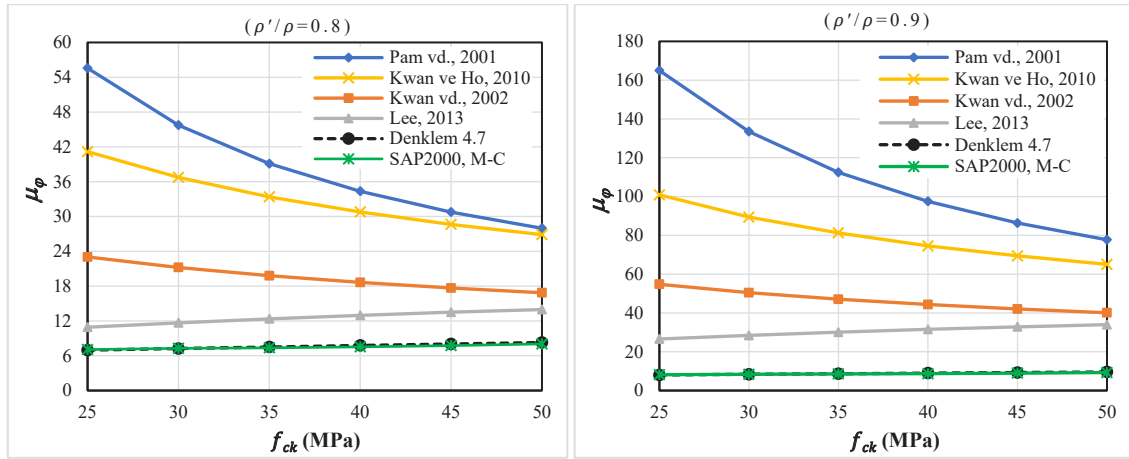


Şekil 4.8. Farklı tasarım parametrelere göre önerilen denklemden ve sayısal analizlerden elde edilen eğrilik süneklik faktörlerinin karşılaştırılması

Denklem (4.7) kullanılarak elde edilen sonuçların, f_{ck} , ρ'/ρ ve λ parametrelerine bağlı olarak değişen sayısal analiz sonuçlarına oranı incelendiğinde, önerilen denklemin tüm parametre aralıkları boyunca sayısal sonuçlarla yüksek düzeyde uyum sağladığı görülmektedir. Sayısal sonuçlar ile Denklem (4.7)'den elde edilen sonuçlar arasındaki fark, artan f_{ck} ve ρ'/ρ oranları ile artmakta ve artan λ oranları ile azalmaktadır. Moment-eğrilik ilişkilerinden elde edilen eğrilik sünekliği, Kwan ve ark. (2002), Lee (2013), Pam ve ark. (2001a), Kwan ve Ho (2010) taraflarından eğrilik sünekliği için önerilen bağıntılardan elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Sayısal analizlerin sonuçlarından, çift donatılı betonarme kirişlerde farklı beton basınç dayanımına göre $\mu_\phi - \rho'/\rho$ ilişkileri Şekil 4.9-a'da ve farklı ρ'/ρ oranları için $\mu_\phi - f_{ck}$ ilişkileri Şekil 4.9-b'de verilmiştir.


 a) Farklı beton basınç dayanımına göre $\mu_\phi - \rho'/\rho$ ilişkileri



b) Farklı ρ'/ρ oranları için $\mu_\phi - f_{ck}$ ilişkileri

Şekil 4.9. Çift donatılı betonarme kirişlerde farklı tasarım parametrelerine göre elde edilen analiz sonuçlarının karşılaştırmalı ilişkileri

Literatürde, çift donatılı betonarme kirişlerin süneklik faktörünün belirlenmesine yönelik çeşitli ampirik ve analitik bağıntılar önerilmiş olup, bu bağıntılardan elde edilen sonuçların birbirinden farklılık gösterdiği görülmektedir. Söz konusu farklılıkların temel nedeni, araştırmacıların modelleme yaklaşımlarında benimsedikleri varsayımlar ile dikkate aldıkları tasarım parametreleri, malzeme modelleri ve sınır değerlerinin değişkenlik göstermesidir.

Pam ve ark. (2001a), Kwan ve ark. (2002) taraflarından eğrilik faktörü için önerilen ilişkilerden elde edilen sonuçlardan; belirli bir beton basınç dayanımında süneklik faktörünün çekme donatısı oranı ile azaldığı, ancak basınç donatısı oranı ile arttığı görülmektedir. Sabit ρ'/ρ için beton basınç dayanımı arttıkça süneklik azalmaktadır.

Kwan ve ark. (2002) tarafından önerilen minimum süneklik faktörüne göre hesaplanan süneklik değerleri, Pam ve ark. (2001a) denklemine göre küçük değerler vermektedir. Bunun nedeni, Pam ve ark. (2001a) tarafından önerilen denklemin ikinci teriminin 1.0 olarak alınmasıdır.

Kwan ve Ho (2010) tarafından eğrilik faktörü için önerilen ilişkilerden elde edilen sonuçların incelenmesinden; beton basınç dayanımının etkisinin, betonarme kirişlerin donatı derecesini (λ) belirleyen çekme ve basınç donatısı oranlarına bağlı olduğu bulunmuştur. Beton dayanımı veya çekme donatısı oranı arttıkça sünekliğin, kesit aşırı donatılı hale geldiğinde nispeten düşük ve sabit bir değere ulaşana kadar azaldığı görülmektedir. Aynı donatı derecesinde ($\lambda=0$), süneklik faktörünün daha yüksek bir beton basınç dayanımında daha düşük olduğu da görülebilir. Bunun nedeni, beton basınç dayanımı arttıkça malzeme sünekliğinin kademeli olarak azalmasıdır. Bununla birlikte, aynı çekme donatısı oranında süneklik faktörü, beton basınç dayanımının artması ile azalmaktadır. Beton basınç dayanımı arttıkça, dengeli donatı oranları da artarak donatı derecesinde bir azalmaya ve süneklik faktöründe bir artışa neden olur.

Lee (2013) tarafından eğrilik faktörü için önerilen ilişkilerden elde edilen sonuçlardan; çift donatılı betonarme kiriş kesitlerinde eğrilik süneklik faktörü, çekme donatısı oranı, basınç donatı oranı, beton basınç dayanımı gibi faktörlerden etkilenmiştir. Çift donatılı betonarme kiriş kesitlerinde basınç donatısı oranının artmasıyla süneklik değeri artmaktadır. Aynı çekme donatısı oranı altında

süneklik faktörü beton basınç dayanımındaki artışla neredeyse doğrusal olarak azalır. Eğrilik süneklik faktörü, artan λ oranları ile azalır.

Basınç donatısı oranının en etkili faktör olduğu görülmüştür. Analiz sonuçları, çift donatılı betonarme kiriş kesitlerinde λ arttıkça eğrilik sünekliğinin azaldığını göstermektedir. Çift donatılı betonarme kiriş kesitleri için ρ'/ρ arttıkça eğrilik sünekliği artar. Farklı araştırmacılar tarafından önerilen ilişkilerin ana faktörleri olarak f_{ck} , ρ , ρ' ve ρ_b parametreleri dikkate alınmaktadır. Bu parametrelere ek olarak, bazı araştırmacılar, basınç donatısı gerilmesi, donatı akma dayanımı ve sargı etkinlik katsayısı gibi parametreleri hesaba katmışlardır.

Araştırmacılar tarafından önerilen ilişkilerde parametreler için dikkate alınan sınır değerler farklıdır. Pam ve ark. (2001a) ile Kwan ve ark. (2002) tarafından önerilen bağıntılarda dikkate alınan temel tasarım parametreleri benzer olmakla birlikte, Kwan ve ark. (2002), Pam ve ark. (2001a) tarafından önerilen süneklik faktörü ilişkisini revize ederek hedeflenen süneklik düzeyinin daha rasyonel ve tasarım açısından optimize edilmiş bir ifade ile elde edilmesini amaçlamıştır. Bu nedenle, her iki modelden elde edilen süneklik katsayısı değerlerinin farklılık göstermesi beklenen ve yöntemsel olarak tutarlı bir sonuçtur. Analiz sonuçları incelendiğinde, Pam ve ark. (2001a) tarafından önerilen bağıntı kullanılarak hesaplanan süneklik katsayısı değerlerinin, Kwan ve ark. (2002) tarafından önerilen bağıntıdan elde edilen değerlere kıyasla sistematik olarak daha yüksek olduğu görülmektedir.

Farklı araştırmacılar tarafından önerilen bağıntılar, normalize boyuna donatı oranının $\rho'/\rho = 0.9$ 'a kadar olan değerleri için uygulanabilir niteliktedir. Foroughi ve Yüksel (2022b) tarafından önerilen denklemde ise parametre aralığı genişletilerek $\rho'/\rho = 0$ ile $\rho'/\rho = 1.0$ aralığı dikkate alınmıştır. Buna karşılık, diğer araştırmacılar kendi önerdikleri ilişkilerde üst sınır değeri $\rho'/\rho = 0.75$ olarak kabul etmişlerdir. Foroughi ve Yüksel (2022b) tarafından önerilen denklem betonun dayanımı (f_{ck}) 25 MPa ile 50 MPa, çeliğin akma dayanımı $f_y=420$ MPa, çekme donatı oranı $\rho = 0.85\rho_b$ ve $\rho' = 0$ ile $\rho' = \rho$ arasındaki basınç donatısının oranına sahip kesitlerin analiz sonuçlarına dayalı olarak elde edilmiştir. Önerilen denklem, 0.99'un oldukça üzerinde olan bağıntılı R^2 katsayılarından da anlaşılacağı gibi mükemmel bir uyum göstermektedir.

5. BETONARME PERDE DUVARLARIN DOĞRUSAL OLMAYAN DAVRANIŞI

Betonarme perde duvarlar, deprem etkisi altındaki yapı sistemlerinde yatay yüklerin karşılanmasında temel taşıyıcı elemanlar olarak kabul edilmektedir. Yüksek eğilme ve kesme rijitliği sağlayan bu elemanlar, özellikle çok katlı yapı sistemlerinde yatay yer değiştirmelerin sınırlandırılmasına, görelî kat ötelemelerinin azaltılmasına ve stabilitenin artırılmasına önemli katkı sunmaktadır. Bu nedenle güncel deprem yönetmeliklerinde perde duvarlar, sünek ve güvenli taşıyıcı sistem tasarımının temel bileşenlerinden biri olarak tanımlanmakta ve yüksek deprem tehlikesine sahip bölgelerde yapı sisteminin ayrılmaz bir parçası olarak öngörülmektedir.

Perde duvarların doğrusal olmayan davranışı, geometrik özellikler ile malzeme parametrelerinin karşılıklı etkileşimi sonucunda belirlenmektedir. Kesit geometrisine ilişkin temel parametreler; perde kalınlığı, perde uzunluğu, yükseklik/uzunluk oranı, uç bölgelerinin boyutları ve bu bölgelerin detaylandırma düzeyidir. Bu parametreler, elemanın eğilme ve kesme rijitliğini, moment taşıma kapasitesini ve deformasyon karakterini doğrudan etkilemektedir. Malzeme parametreleri açısından ise beton basınç dayanımı, boyuna donatı oranı, enine donatı oranı, donatı dağılımı ve enine donatının sargı etkinliği belirleyici rol oynamaktadır.

Betonarme perde duvarların doğrusal olmayan analizinde ilk aşama, kesiti oluşturan malzemelere ait gerilme-şekildeğiştirme ilişkilerinin tanımlanmasıdır. Sargılı ve sargısız beton için farklı gerilme-şekildeğiştirme modelleri tanımlanmakta; böylece sargı etkisiyle artan basınç dayanımı ve yükselen nihai basınç birim şekildeğiştirme kapasitesi kesit analizine yansıtılmaktadır. Donatı çeliği için ise elastik bölge, akma noktası ve akma sonrası pekleşme davranışını içeren uygun malzeme modelleri kullanılmaktadır. Bu malzeme kabulleri, plastik mafsal oluşumu, rijitlik azalımı ve enerji tüketim kapasitesinin belirlenmesinde doğrudan etkili olmaktadır.

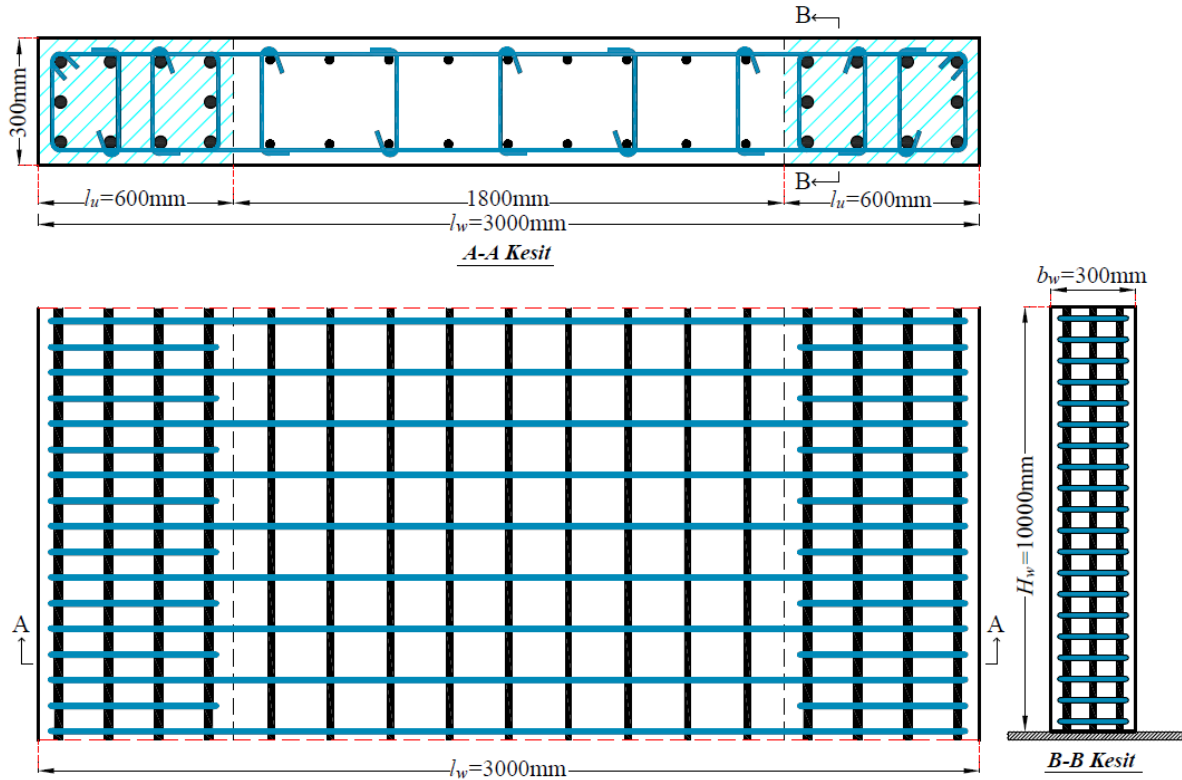
Gerilme-şekildeğiştirme modelleri esas alınarak gerçekleştirilen kesit analizi sonucunda, farklı aksenal yük seviyeleri ve tasarım parametreleri için moment-eğrilik ($M-\phi$) ilişkileri elde edilmektedir. Bu ilişkiler; kesitin çatlama anını, boyuna donatının akma durumunu ve betonun ezilme sınırını temsil eden kritik performans noktalarını açık biçimde ortaya koymaktadır. Moment-eğrilik eğrileri, kesitin etkin eğilme rijitliğinin yük artışıyla birlikte azalmasını ve doğrusal olmayan deformasyon kapasitesini ortaya koymaktadır. Perde duvarların doğrusal olmayan performansının nicel olarak değerlendirilmesinde eğrilik sünekliği temel bir parametre olarak kullanılmaktadır. Eğrilik sünekliği genellikle nihai eğriliğin akma eğriliğine oranı olarak tanımlanmakta ($\mu_\phi = \phi_u/\phi_y$) ve kesitin plastik deformasyon kapasitesini ifade etmektedir.

Bu bölümde betonarme perde duvarların doğrusal olmayan davranışı; öncelikle malzeme düzeyinde gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri tanımlanarak, ardından kesit düzeyinde moment-eğrilik bağıntıları elde edilmek suretiyle analiz edilmiştir. Farklı tasarım parametrelerine bağlı olarak eğrilik süneklikleri hesaplanmış ve sünek davranışı belirleyen temel mekanizmalar analitik çerçevede değerlendirilmiştir.

5.1. Betonarme Perde Duvarların Gerilme-Şekildeğiştirme İlişkileri

5.1.1. 300mm×3000mm enkesitli perde duvarın gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi

Bu bölümde, süneklik düzeyi yüksek betonarme perde duvarların mekanik davranışı, gerçekçi malzeme modelleri esas alınarak analitik yöntemlerle analiz edilmiştir. Çalışma kapsamında, perde duvar kesitlerinde sargılı betonun basınç altındaki gerilme-şekildeğiştirme davranışı Mander ve ark. (1988) ile Saatçioğlu ve Razvi (1992) modelleri temel alınarak modellenmiştir; betonarme perde duvarların doğrusal olmayan kesit tepkisi belirlenmiştir. Perde duvar geometrisi ve donatı düzenlemeleri TBDY (2018) hükümleri esas alınarak belirlenmiştir. Perde duvarların plandaki uzun kenarının (l_w), kalınlığına (b_w) oranı 6'dan büyük seçilerek, eğilme davranışının baskın olduğu ve sünek mekanizmaların gelişmesine olanak tanıyan bir kesit oranı sağlanmıştır. Bu kapsamda perde duvar kalınlığı 300 mm, plandaki toplam uzunluğu ise 3000 mm olarak tanımlanmıştır. Sünek perde duvar tasarımında kritik öneme sahip olan uç bölgelerinin boyutları, TBDY (2018)'de tanımlanan sınır koşulları dikkate alınarak belirlenmiştir. Her bir uç bölgesinin plandaki uzunluğu (l_u), perdenin toplam plandaki uzunluğunun %20'sinden ve perde kalınlığının iki katından az olmayacak şekilde hesaplanmış ve 600 mm olarak alınmıştır ($l_u=600$ mm). Bu düzenleme ile, plastik şekildeğiştirmelerin uç bölgelerde kontrollü biçimde gelişmesi ve sünek davranışın güvence altına alınması hedeflenmiştir. Perde duvarlarda kullanılan yatay ve düşey donatı çeliğinin akma dayanımı 420MPa olarak kabul edilmiş; beton basınç dayanımı ise 30 MPa olarak tanımlanmıştır. Tasarlanan 300 mm × 3000 mm enkesitli betonarme perde duvar modellerinin tipik görünüşü Şekil 5.1'de, geometrik özellikleri ve donatı detayları ise Tablo 5.1'de verilmiştir (Foroughi ve Yüksel, 2020c).



Şekil 5.1. Hesaplarda kullanılan 300 mm×3000 mm enkesitli perde duvar modellerinin görünüşü

Tablo 5.1. Tasarlanan 300 mm × 3000 mm enkesitli perde duvar modellerine ait detaylar

No	Perde Uç Bölgesi Boyutu (mm)	Uç Bölgesi Düşey Donatı	Uç Bölgesi Yatay Donatı	Gövde Bölgesi Düşey Donatı	Gövde Bölgesi Yatay Donatı
P1	600 × 300	10Φ16 mm	Φ8/150 mm	18Φ12 mm	Φ8/150 mm
P2			Φ8/100 mm		Φ8/100 mm
P3			Φ8/50 mm		Φ8/50 mm
P4	600 × 300	10Φ16 mm	Φ10/100 mm	18Φ12 mm	Φ10/100 mm
P5			Φ12/100 mm		Φ12/100 mm
P6			Φ14/100 mm		Φ14/100 mm
P7	600 × 300	10Φ18 mm	Φ12/100 mm	18Φ12 mm	Φ12/100 mm
P8		10Φ20 mm			
P9	600 × 300	10Φ20 mm	Φ12/100 mm	18Φ14 mm	Φ12/100 mm
P10				18Φ16 mm	

Donatı oranları ve yerleşim düzenleri, TS500 (2000) ve TBDY (2018) yönetmeliklerinde belirtilen minimum ve maksimum sınır değerler dikkate alınarak belirlenmiştir. Bu kapsamda kullanılan boyuna ve enine donatı oranları Tablo 5.2’de sunulmuştur.

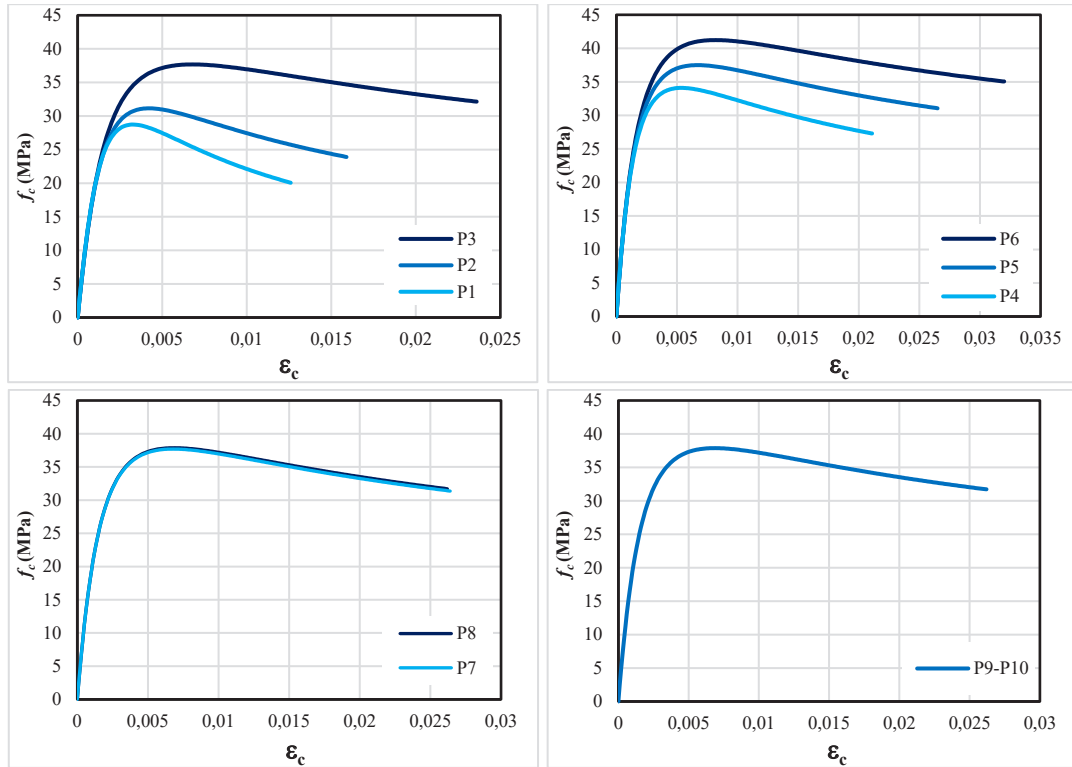
Tablo 5.2. Tasarlanan 300 mm × 3000 mm enkesitli perde duvarlar için gövde ve uç bölgelerinde düşey donatı sınırlamaları

Perde Gövde Bölgelerinde Düşey Donatı Kontrolü			
Seçilen düşey gövde donatısı	18Φ12 mm	18Φ14 mm	18Φ16 mm
$\frac{A_s}{(l_w - 2l_u) \times b_w} \geq 0.0025$	$0.0038 \geq 0.0025$	$0.0051 \geq 0.0025$	$0.0067 \geq 0.0025$
Perde Uç Bölgelerinde Düşey Donatı Kontrolü			
Seçilen uç bölge düşey donatısı	10Φ16 mm	10Φ18 mm	10Φ20 mm
$\frac{A_s}{l_w \times b_w} \geq 0.002$	$0.0022 \geq 0.002$	$0.0028 \geq 0.002$	$0.0035 \geq 0.002$

Mander modeli kullanılarak, farklı tasarım parametrelerinin sargılı beton davranışı üzerindeki etkileri sistematik bir biçimde incelenmiş ve karşılaştırmalı sonuçlar Tablo 5.3’te sunulmuştur. Hesaplanan sargılı beton basınç dayanımları ve bunlara karşılık gelen gerilme-birim şekildeğiştirme eğrileri Şekil 5.2’de gösterilmiştir. Bu bölümde gerçekleştirilen analitik incelemeler, sünek betonarme perde duvarların tasarımında sargılı beton davranışının doğru biçimde modellenmesinin önemini vurgulamakta ve gerilme-şekildeğiştirme ilişkilerinin, perde duvarların doğrusal olmayan davranışının güvenilir biçimde değerlendirilmesinde temel bir araç olduğunu göstermektedir.

Tablo 5.3. Mander modeline göre 300 mm × 3000 mm enkesit boyutlarına sahip betonarme perde duvarların uç bölgelerine ilişkin hesap sonuçları

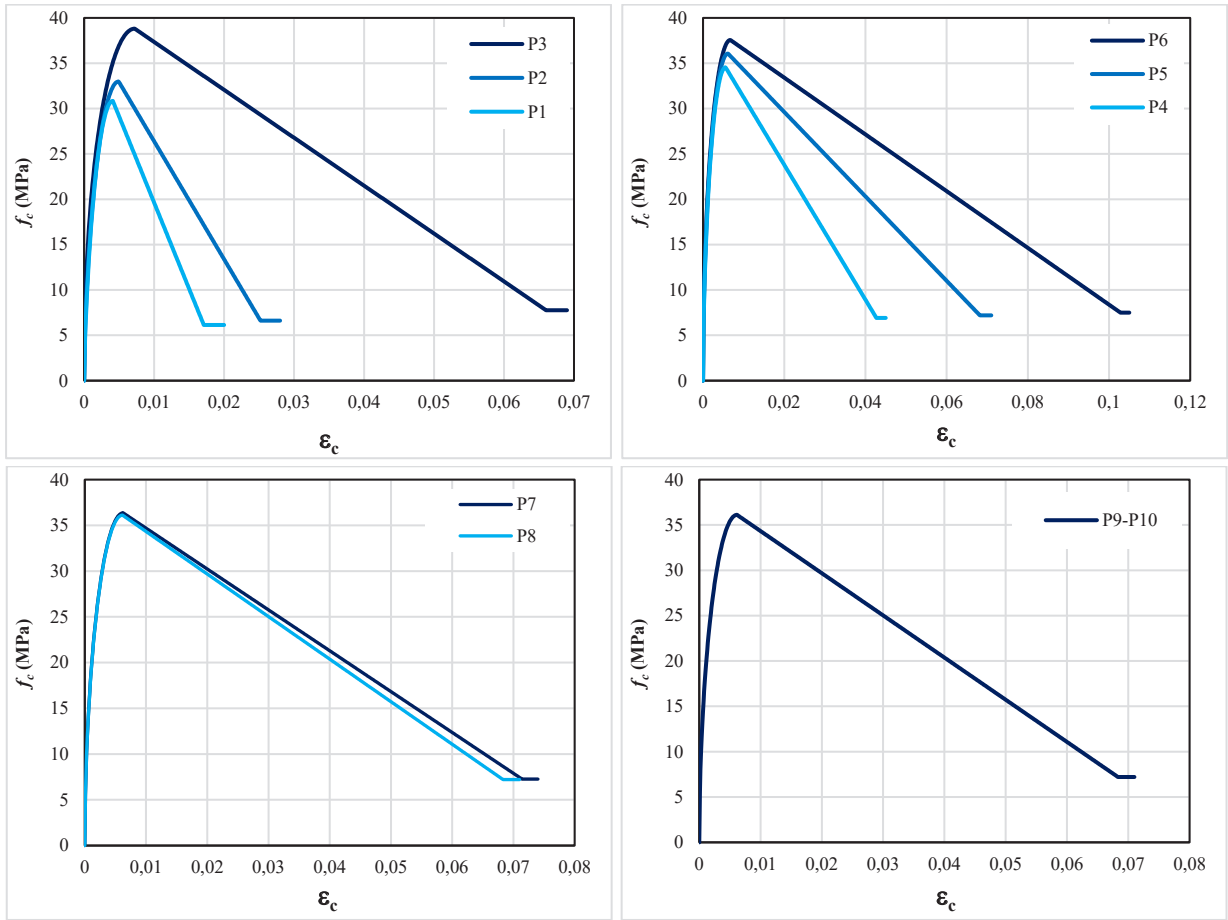
No	k_e	f_l (MPa)	f_l' (MPa)	f'_{cc} (MPa)	ϵ_{cc}	ϵ_{cu}
P1	0.442	1.10	0.49	28.7	0.0033	0.0126
P2	0.534	1.65	0.88	31.1	0.0042	0.0159
P3	0.632	3.30	2.09	37.7	0.0068	0.0236
P4	0.539	2.60	1.40	34.1	0.0054	0.0211
P5	0.545	3.76	2.05	37.5	0.0067	0.0265
P6	0.551	5.15	2.84	41.2	0.0082	0.0320
P7	0.555	3.70	2.09	37.7	0.0068	0.0264
P8-9-10	0.566	3.76	2.13	37.9	0.0069	0.0262

**Şekil 5.2.** Mander modeline göre 300 mm × 3000 mm enkesitli betonarme perde duvarların uç bölgelerine ait gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri

Farklı tasarım parametrelerine göre modellenen betonarme perde duvarların uç bölgeleri için, Saatçioğlu ve Razvi (1992) sargılı beton modeli esas alınarak gerilme-şekildeğiştirme davranışına ilişkin sayısal veriler, parametre farklılıkları dikkate alınarak Tablo 5.4'te karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Söz konusu modele ilişkin gerilme-şekildeğiştirme eğrileri ise Şekil 5.3'te verilmiştir. Ayrıca, betonarme perde duvarların Mander ve ark. (1988) ile Saatçioğlu ve Razvi (1992) sargılı beton modellerine göre elde edilen gerilme-şekildeğiştirme ilişkilerinin sayısal karşılaştırmaları Tablo 5.5'te, bu modellere ait eğrilerin grafiksel gösterimleri ise Şekil 5.4'te sunulmaktadır.

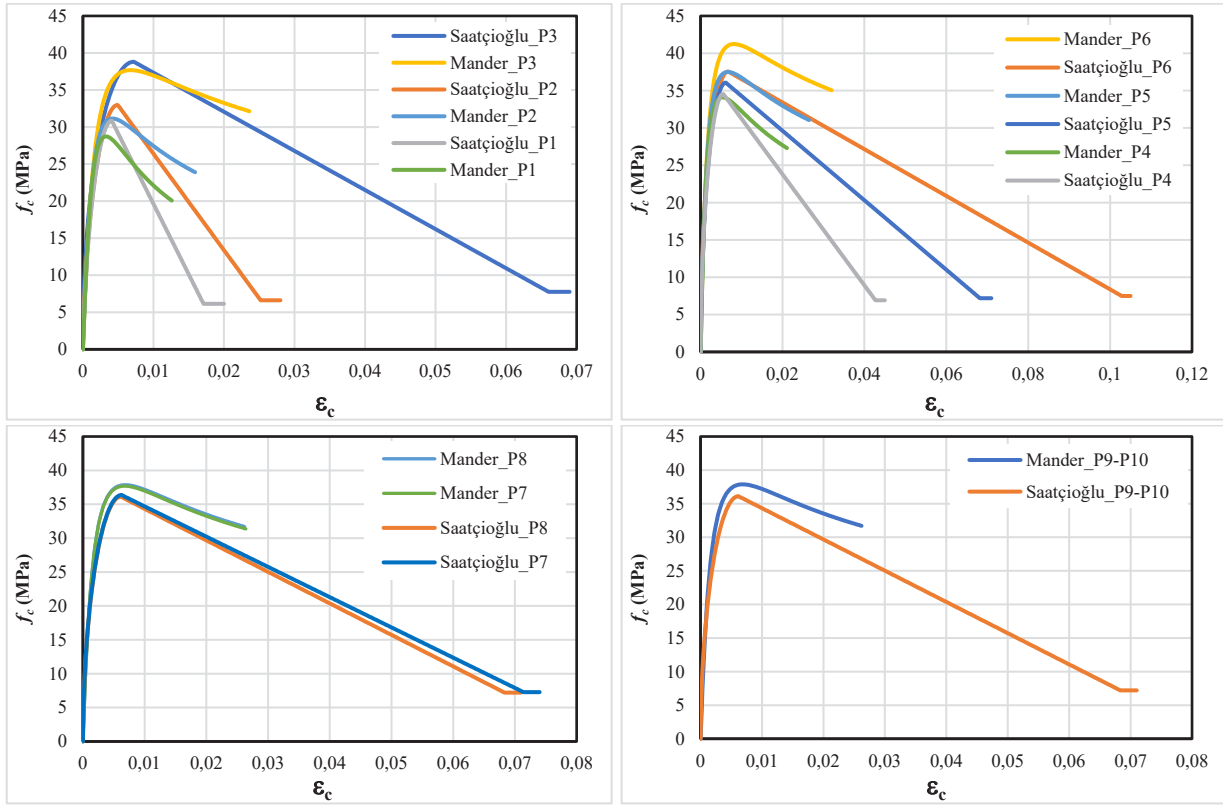
Tablo 5.4. Saatçioğlu ve Ravzi modeline göre 300 mm × 3000 mm enkesit boyutlarına sahip betonarme perde duvarların uç bölgelerine ilişkin hesap sonuçları

No	σ_{2x} (MPa)	σ_{2y} (MPa)	σ_{2ex} (MPa)	σ_{2ey} (MPa)	σ_{2e} (MPa)	f_{cc} (MPa)	ε_{coc}	ε_{c85}	ε_{c20}
P1	1.2	1.0	0.9	0.4	0.8	30.8	0.0041	0.0065	0.0171
P2	1.7	1.6	1.4	0.5	1.1	33.0	0.0049	0.0087	0.0252
P3	3.5	3.1	2.8	1.1	2.3	38.8	0.0072	0.0182	0.0660
P4	2.7	2.4	1.8	0.7	1.4	34.5	0.0055	0.0125	0.0427
P5	4.0	3.5	2.1	0.8	1.7	36.1	0.0061	0.0178	0.0682
P6	5.5	4.8	2.5	0.9	2.0	37.6	0.0067	0.0247	0.1028
P7	4.0	3.5	2.1	0.8	1.7	36.1	0.0062	0.0178	0.0682
P8-9-10	4.1	3.6	2.2	0.9	1.8	36.2	0.0063	0.0179	0.0683

**Şekil 5.3.** Saatçioğlu ve Ravzi modeline göre 300 mm × 3000 mm enkesitli betonarme perde duvarların uç bölgelerine ait gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri

Tablo 5.5. Farklı sargılı beton modellerine göre 300 mm × 3000 mm enkesitli betonarme perde duvarların uç bölgelerinde elde edilen hesap sonuçlarının karşılaştırılması

No	Mander Modeli		Saatçioğlu-Razvi Modeli	
	f'_{cc} (MPa)	ϵ_{cc}	f_{cc} (MPa)	ϵ_{coc}
P1	28.7	0.0033	30.8	0.0041
P2	31.1	0.0042	33.0	0.0049
P3	37.7	0.0068	38.8	0.0072
P4	34.1	0.0054	34.5	0.0055
P5	37.5	0.0067	36.1	0.0061
P6	41.2	0.0082	37.6	0.0067
P7	37.7	0.0068	36.1	0.0062
P8-9-10	37.9	0.0069	36.2	0.0063

**Şekil 5.4.** Farklı sargılı beton modellerine göre 300 mm × 3000 mm enkesitli betonarme perde duvarların uç bölgelerinde elde edilen karşılaştırmalı gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri

Doğrusal olmayan analizler, 300 mm × 3000 mm enkesit boyutlarına sahip sünek betonarme perde duvar modelleri üzerinde gerçekleştirilmiş olup, perde duvar davranışının büyük ölçüde uç bölgelerde sağlanan sargı donatısı etkinliği ve bu bölgelerde kullanılan sargılı beton modelinin analitik varsayımları tarafından belirlendiği gözlemlenmiştir. Sayısal tablolar ve gerilme-şekildeğiştirme eğrilerinin birlikte değerlendirilmesi, sünek perde duvar tasarımında plastik şekildeğiştirme kapasitesinin, çekirdek betonun yanal yönde ne ölçüde sargılandığına doğrudan bağlı olduğunu göstermektedir (Tablo 5.3-5.5, Şekil 5.2-5.4).

Enine donatı parametrelerinin etkisi

Uç bölgelerde sargı donatısı aralığının azaltılması ve sargı donatısı çapının artırılması, sargılı betonun etkin yanal basıncını belirgin biçimde yükseltmektedir. Bu artış, betonun tepe basınç dayanımında sınırlı bir yükseliş sağlarken, birim şekildeğiştirme kapasitesinde önemli ölçüde artış yaratmaktadır. Özellikle P3, P5 ve P6 modellerinde gözlenen yüksek nihai birim şekildeğiştirme değerleri, sık sargılı uç bölgelerin sünek davranış üzerindeki kritik rolünü açıkça ortaya koymaktadır (Tablo 5.3-5.4, Şekil 5.2-5.3). Gerilme-şekildeğiştirme eğrileri, sargı donatısı etkinliği arttıkça eğrilerin tepe noktasından sonra daha yatay bir seyir izlediğini ve beton dayanım kaybının daha kontrollü gerçekleştiğini göstermektedir. Bu durum, ani gevrek göçme riskinin azaltılması açısından önemlidir ve sünek perde duvar tasarımının temel hedefleriyle doğrudan ilişkilidir.

Sargılı beton modelinin davranışa etkisi

Mander (1988) ve Saatçioğlu ve Razvi (1992) modellerine göre elde edilen sonuçların karşılaştırılması, sargılı betonun analitik temsil biçiminin perde duvar davranışını niteliksel olarak etkilediğini göstermektedir. Mander modeli, genellikle daha yüksek sargılı beton basınç dayanımları öngörürken, Saatçioğlu ve Razvi modeli özellikle yüksek sargı oranlarında daha büyük nihai birim şekildeğiştirme değerleri sunmaktadır. Düşük ve orta düzeyde sargı etkinliğine sahip modellerde iki yaklaşım arasındaki fark sınırlı kalmakla birlikte, yüksek sargı donatısı kullanılan modellerde Saatçioğlu ve Razvi modelinin daha sünek bir beton davranışı tanımladığı görülmektedir (Tablo 5.5, Şekil 5.4). Bu bulgu, uç bölgelerde plastik şekildeğiştirme kapasitesinin değerlendirilmesinde seçilen beton modelinin performans tahminleri üzerinde belirleyici olduğunu doğrulamaktadır.

Uç bölge tasarımının belirleyici rolü

Uç bölgelerde sağlanan yeterli sargı donatısı, çekirdek betonun erken ezilmesini geciktirerek, eğilmenin hakim olduğu bölgelerde sünek davranışın gelişmesine olanak tanımaktadır. Bu bağlamda, TBDY (2018)'de tanımlanan uç bölge boyutlandırma ve donatı koşullarının, yalnızca yönetmelik gerekliliği değil; perde duvarın gerçek davranışını belirleyen temel tasarım unsurları olduğu görülmektedir. Tablo ve grafiklerden elde edilen bulguların bütüncül değerlendirilmesi, süneklik düzeyi yüksek betonarme perde duvarların performansının, uç bölgelerdeki sargı donatısı etkinliği ve sargılı betonun doğru şekilde modellenmesi ile kontrol edildiğini göstermektedir. Yüksek sargı donatısı oranları ile desteklenen uç bölgelerde, betonun yüksek şekildeğiştirme kapasitesine ulaşabildiği ve dayanım kaybının daha kontrollü gerçekleştiği gözlemlenmiştir.

Performansa dayalı deprem tasarımı perspektifinden, perde duvarların yalnızca taşıma gücü ile değil; akma sonrası davranış, plastik şekildeğiştirme kapasitesi ve hasar yayılımı kriterleri üzerinden değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Özellikle yüksek süneklik düzeyi hedeflenen betonarme perde duvar tasarımlarında, sargılı beton davranışını gerçekçi biçimde yansıtan modellerin kullanılması, güvenli ve öngörülebilir bir yapısal performansın sağlanması açısından kritik öneme sahiptir.

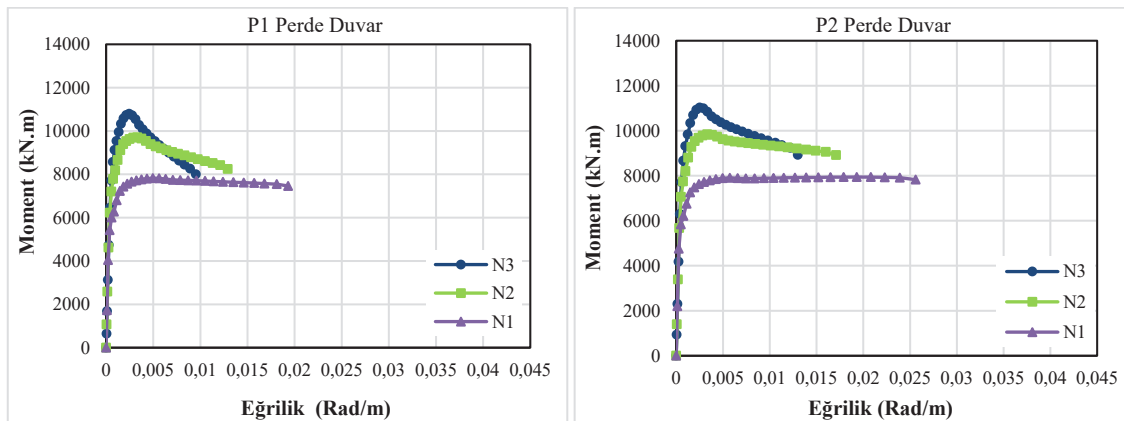
5.2. Betonarme Perde Duvarların Moment-Eğrilik ile Eğrilik Süneklik İlişkileri

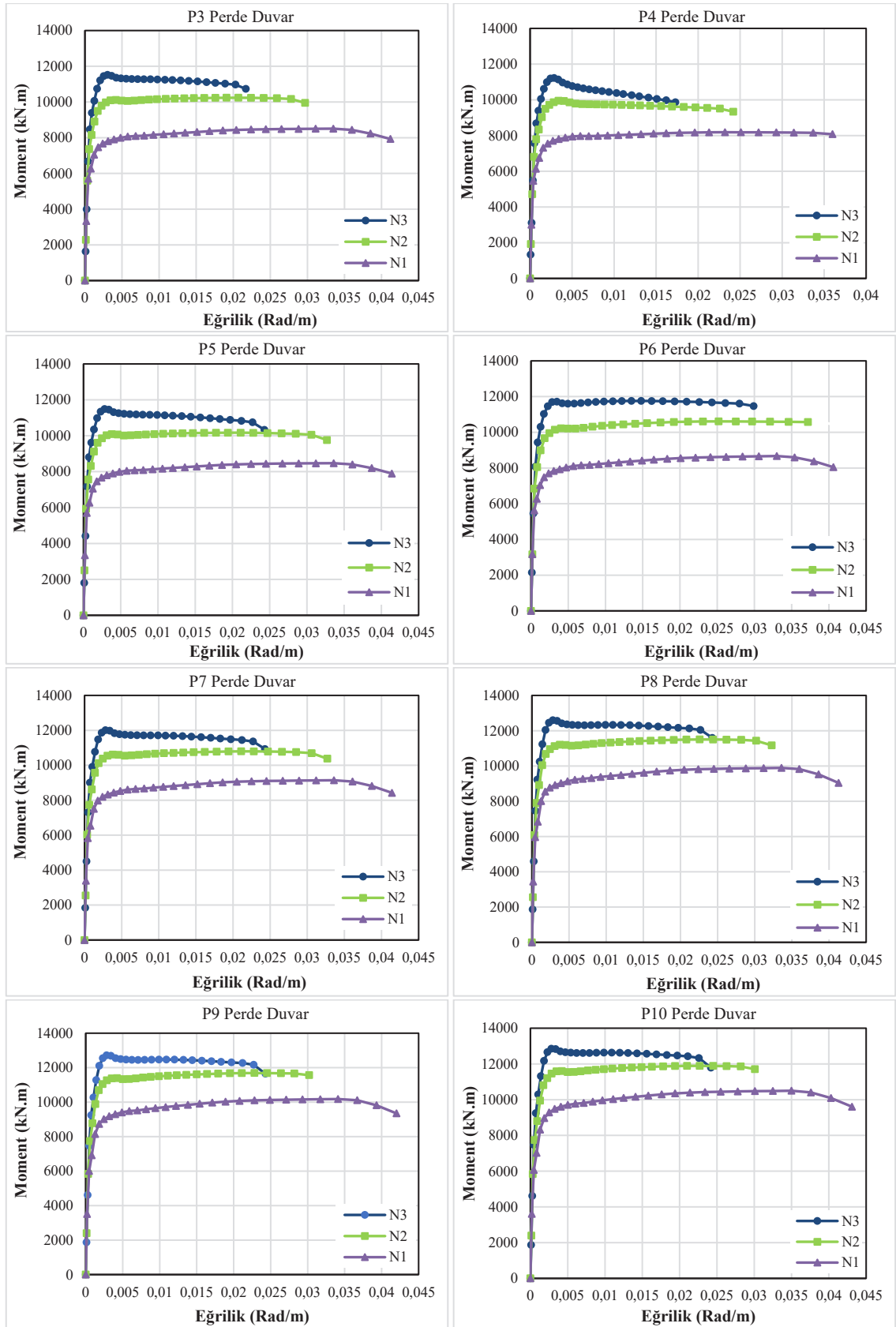
Moment-eğrilik ilişkileri, betonarme perde duvar kesitlerinin çatlama, donatı akması, beton ezilmesi ve nihai taşıma kapasitesine ulaşma aşamalarındaki mekanik davranışını detaylı bir biçimde ortaya koymaktadır. Bu analizler, perde duvarların süneklik düzeyini ve enerji tüketme kapasitesini nicel olarak belirlemek için temel bir araç olarak kullanılmaktadır.

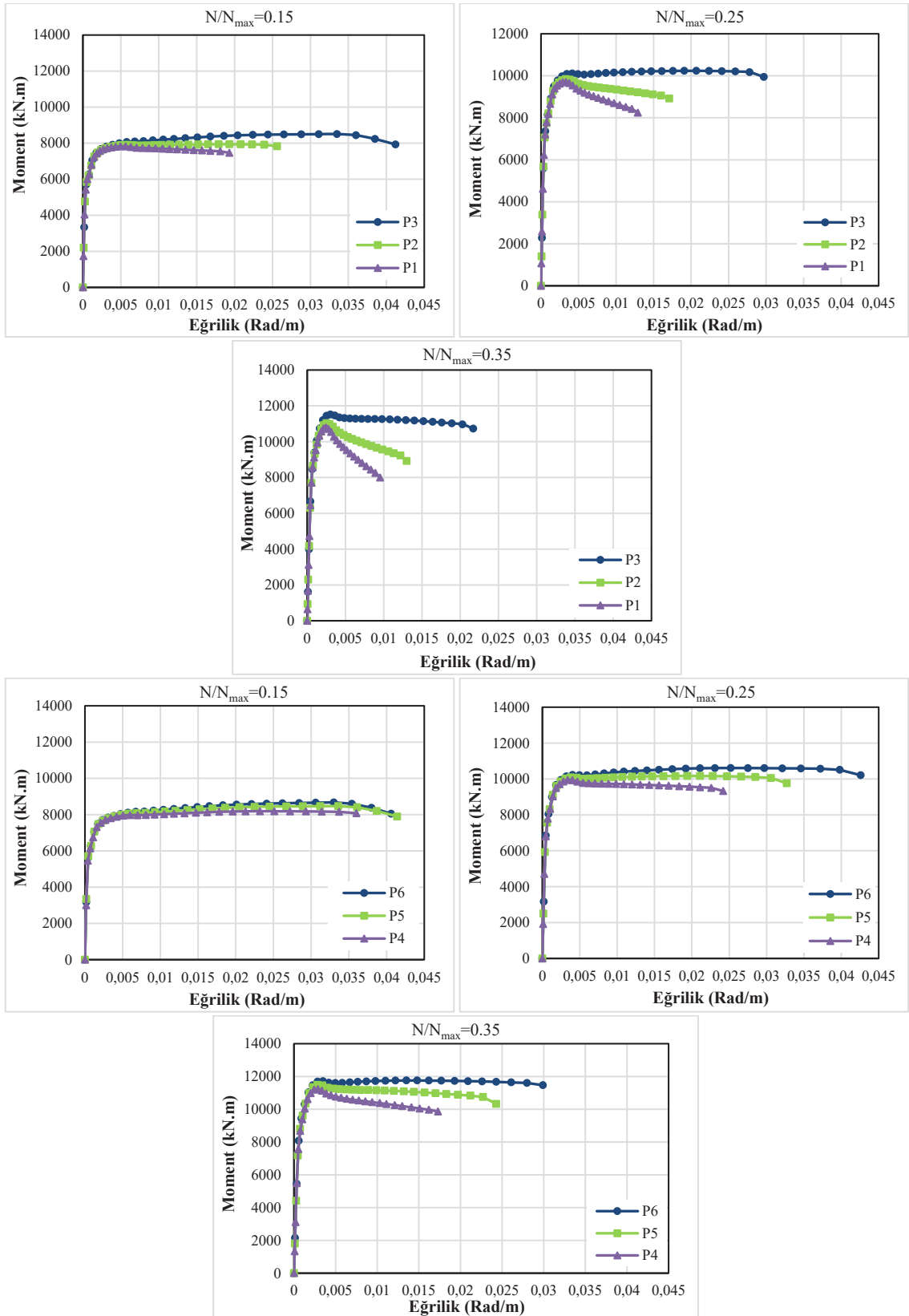
Bu bölümde ele alınan perde duvar kesit modellerine ait geometrik özellikler (kesit boyutları, uç ve gövde bölgeleri) ile donatı düzenine ilişkin parametreler (boyuna donatı oranı ve sargı donatısının yerleşim esasları), Bölüm 5.1’de sunulan veriler temel alınarak tanımlanmıştır (Tablo 5.1 ve Şekil 5.1). Analizlerde kullanılan tüm kesit özellikleri, ilgili bölümde verilen geometrik ve mekanik varsayımlarla uyumlu olacak şekilde modele entegre edilmiş, böylece elde edilen moment-eğrilik sonuçlarının metodolojik tutarlılığı ve karşılaştırılabilirliği sağlanmıştır (Foroughi ve Yüksel, 2020c).

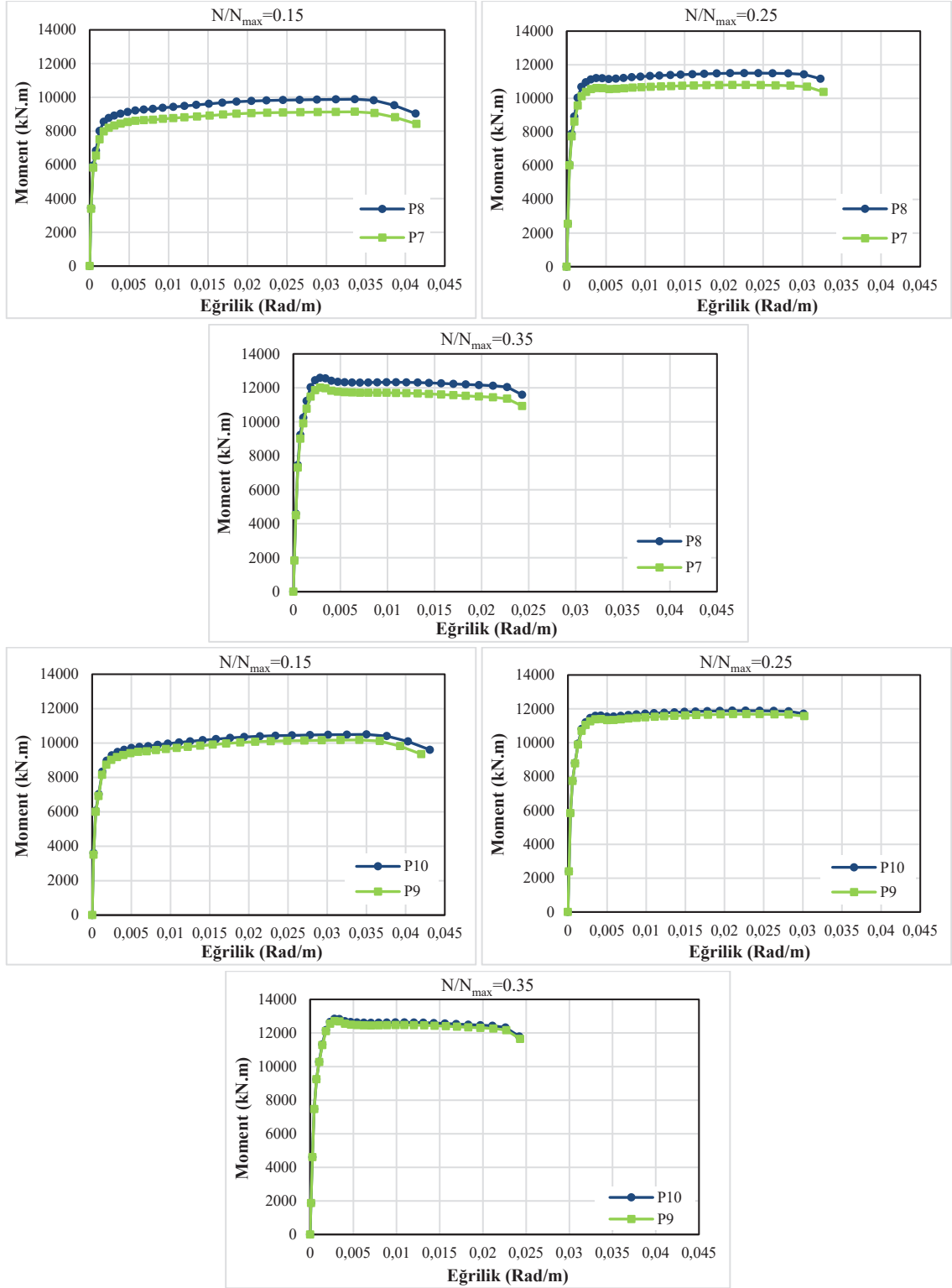
Betonarme perde duvarların doğrusal olmayan kesit davranışını incelemek amacıyla, farklı eksenel yük seviyeleri altında moment-eğrilik analizleri gerçekleştirilmiştir. Eksenel yük düzeyi, kesitin taşıyabileceği maksimum eksenel kuvvetin bir oranı olarak tanımlanmış ve $N_{max} = A_c f_{ck}$ bağıntısı esas alınmıştır. Bu kapsamda, N/N_{max} eksenel yük oranı için 0.15, 0.25 ve 0.35 olmak üzere üç farklı seviye dikkate alınmıştır. Söz konusu oranlara karşılık gelen eksenel yük değerleri sırasıyla $N_1 = 4050$ kN, $N_2 = 6750$ kN ve $N_3 = 9450$ kN olarak belirlenmiştir. Böylece düşük, orta ve yüksek eksenel yük düzeylerinin perde duvar kesitinin moment taşıma kapasitesi ve süneklik özellikleri üzerindeki etkileri karşılaştırmalı olarak ortaya konulmaktadır.

Moment-eğrilik analizleri sonucunda elde edilen eğrilik değerleri kullanılarak perde duvar kesitlerine ait eğrilik süneklik katsayıları hesaplanmıştır. Eğrilik sünekliği, kesitin plastik şekil değiştirme kapasitesini yansıtan temel bir performans göstergesi olup, özellikle deprem etkileri altında perde duvarların hasar düzeylerinin değerlendirilmesinde önemli bir parametre olarak kabul edilmektedir. Analizler sonucunda, 300 mm × 3000 mm enkesitli betonarme perde duvarların farklı eksenel yük seviyeleri ve tasarım parametreleri için elde edilen moment-eğrilik ve eğrilik süneklik ilişkileri karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Elde edilen analitik sonuçlar, farklı eksenel yük oranlarının kesit davranışı üzerindeki etkilerini açık biçimde ortaya koyacak şekilde sırasıyla Şekil 5.5 ve Şekil 5.6’te sunulmuştur.

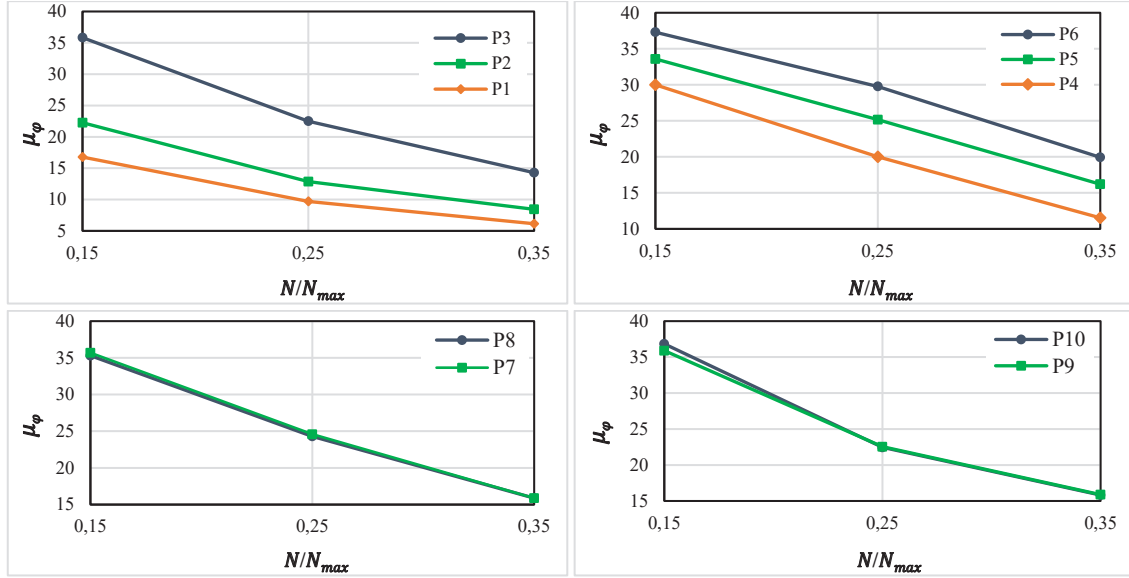








Şekil 5.5. 300 mm × 3000 mm enkesitli betonarme perde duvarların farklı tasarım parametrelerine göre moment-eğrilik ilişkileri



Şekil 5.6. 300 mm × 3000 mm enkesitli betonarme perde duvarların farklı eksenel yük seviyeleri için farklı parametrelerin eğrilik sünekliği üzerindeki etkisi

Eksenel yük oranının kesitsel davranış üzerindeki etkisi

$N/N_{max} = 0.15, 0.25$ ve 0.35 eksenel yük oranları altında elde edilen moment-eğrilik eğrileri karşılaştırıldığında aşağıda verilen eğilimler belirlenmiştir:

- Eksenel yük oranı arttıkça başlangıç eğilme rijitliği artmaktadır.
- Maksimum moment kapasitesi yükselmektedir.
- Nihai eğrilik kapasitesi ve dolayısıyla eğrilik sünekliği azalmaktadır.
- Moment kapasitesindeki artış, süneklik artışı ile paralel değildir; yüksek eksenel yük altında dayanım artarken deformasyon kapasitesi azalmaktadır.

Uç bölgesi sargı donatısı aralığının etkisi

P1-P3 modellerinde sargı donatısı aralığının 150 mm'den 100 mm ve 50 mm'ye düşürülmesiyle sargı etkinliği artırılmıştır. Bu değişimin sonuçları şu şekilde özetlenebilir:

- Sargı donatısı sıklaştıkça betonun ezilme eğriliği artmıştır.
- Post-pik bölgede moment-eğrilik eğrisi daha kararlı ve daha yatay bir seyir izlemiştir.
- Eğrilik sünekliği katsayısında belirgin artış gözlenmiştir.

Özellikle düşük ve orta eksenel yük seviyelerinde ($N/N_{max} = 0.15-0.25$), sıklaştırılmış sargı donatısının sünekliğe katkısı daha belirgin hale gelmiştir. Yüksek eksenel yük seviyesinde ise sargı donatısı sünekliği artırmakla birlikte, eksenel yükün olumsuz etkisini tamamen ortadan kaldıramamıştır. Bu sonuç, süneklik düzeyi yüksek perde tasarımında uç bölgelerde etkin sargı detaylandırmasının zorunlu olduğunu göstermektedir.

Uç bölgesi düşey donatı oranı artışının etkisi

P4-P6 ve P7-P9 perde duvar modellerinde uç bölgede kullanılan düşey donatı çapı ve miktarının artırılması ile moment kapasitesinde anlamlı artış elde edilmiştir. Ancak: donatı oranı arttıkça akma momenti yükselmiş ve akma eğriliği artmıştır. Yüksek boyuna donatı oranı, kesitin taşıma gücünü

artırmakla birlikte, beton basınç bölgesindeki gerilme yoğunlaşmasını artırarak beton ezilmesini hızlandırabilmektedir. Bu durum özellikle yüksek eksenel yük altında sünekliği sınırlayıcı bir etki yaratmıştır. Dolayısıyla aşırı boyuna donatı oranı, süneklik düzeyi yüksek tasarım hedefi açısından her zaman avantajlı değildir. Dayanım ile plastik deformasyon kapasitesi arasında optimum bir oran bulunmaktadır.

Gövde bölgesi donatı düzeninin etkisi

Gövde bölgesindeki yatay ve düşey donatı oranının artırılması, kesitin genel rijitliğini artırmakla birlikte süneklik üzerindeki etkisi uç bölgesi donatısına kıyasla daha sınırlı kalmıştır. Plastik mafsal oluşumunun ağırlıklı olarak uç bölgede yoğunlaşması nedeniyle, süneklik performansının esas belirleyicisi uç bölgesi detaylandırmasıdır.

Eğrilik süneklik katsayısının parametrik değerlendirmesi

Eğrilik sünekliği (μ_φ) bakımından:

- En yüksek süneklik değerleri düşük eksenel yük ve sık sargı kombinasyonunda elde edilmiştir.
- Eksenel yük oranı arttıkça tüm modellerde süneklik katsayısı sistematik olarak azalmıştır.
- Büyük çaplı boyuna donatı ile sıklaştırılmış sargı donatısının birlikte kullanımı, farklı eksenel yük seviyeleri altında süneklik kapasitesinin korunmasını sağlayarak daha kararlı ve kontrollü bir plastik mafsal davranışı ortaya koymuştur.

Bu durum, plastik mafsal bölgesinde betonun ezilme sınırına ulaşmadan önce daha yüksek birim şekildeğiştirmeye izin verilmesi ile doğrudan ilişkilidir.

Genel değerlendirme ve mühendislik açısından sonuçlar:

Eksenel yük oranı süneklik performansının temel belirleyicisidir. $N/N_{max} \geq 0.35$ seviyelerinde kesit davranışı belirgin biçimde daha gevrek hale gelmektedir. Sargı donatısının sıklaştırılması sünekliği artırmada en etkili parametredir. Özellikle uç bölgede sargı donatısı aralığının azaltılması, eğrilik sünekliği üzerinde doğrudan ve güçlü etki göstermektedir.

Perde duvar uç bölgesinde boyuna donatı oranındaki artış, kesitin taşıma kapasitesini yükseltmekle birlikte süneklik kapasitesini sınırlayabilmektedir. Bu bağlamda, yüksek donatı oranının her koşulda üstün bir performans sağlamadığı; aksine, gevrek davranış eğilimini artırarak plastik mafsal gelişimini olumsuz yönde etkileyebildiği değerlendirilmektedir. Moment kapasitesi ile süneklik arasında doğrusal bir ilişki yoktur. Performansa dayalı tasarım yaklaşımında deformasyon kapasitesi mutlaka ayrı bir kriter olarak değerlendirilmelidir. Plastik davranışın kontrolü uç bölge detaylandırması ile sağlanmaktadır.

Gövde bölgesindeki donatı oranındaki artışın süneklik üzerindeki etkisi ikincil düzeyde kalmaktadır. Moment-eğrilik analizleri, yüksek süneklik talebine sahip betonarme perde duvar kesitlerinde optimum performansın; düşük-orta eksenel yük oranı, uç bölgede denge durumuna karşılık gelen boyuna donatı düzeyi ve etkin sargı donatısı detaylandırmasının birlikte sağlanmasıyla elde edildiğini göstermektedir. Buna karşılık, yüksek eksenel yük seviyelerinde eğrilik sünekliğinde meydana gelen kapasite kaybının sınırlandırılabilmesi için uç bölgedeki sargı etkinliğinin artırılması kritik bir tasarım gerekliliği olarak öne çıkmaktadır. Bu bulgular, performansa dayalı deprem tasarımında perde duvar kesitlerinin yalnızca dayanım kriterleriyle değil, aynı zamanda eğrilik sünekliği ve plastik deformasyon kapasitesi temelinde değerlendirilmesi gerektiğini açıkça ortaya koymaktadır.

6. GENEL DEĞERLENDİRME VE UYGULAMA ÖNERİLERİ

6.1. Temel Çıkarımlar

Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen kuramsal incelemeler, parametrik sayısal modellemeler ve kapsamlı doğrusal olmayan analizler, betonarme yapı elemanlarının deprem etkisi altındaki davranışlarının güvenilir biçimde temsil edilebilmesi için doğrusal olmayan mekanik özelliklerin dikkate alınmasının zorunlu olduğunu açıkça ortaya koymaktadır. Beton ve donatı çeliğinin doğrusal olmayan davranışları, kesit düzeyinde moment-eğrilik ilişkileri ve eleman düzeyinde süneklik özellikleri birlikte değerlendirildiğinde, yapı performansı yalnızca taşıma kapasitesi açısından değil, akma sonrası davranış ve hasar mekanizmaları bakımından da gerçekçi biçimde belirlenebilmektedir.

Yapılan parametrik değerlendirmeler, betonarme eleman davranışının tek bir değişkene indirgenemeyecek ölçüde çok parametrelili ve karmaşık bir yapıya sahip olduğunu göstermektedir. Özellikle aksel yük seviyesi, sargı donatısının etkinliği ve kesit geometrisi arasındaki etkileşim, sünek davranışın belirlenmesinde kritik rol oynamaktadır. Kolon elemanlarında aksel yük seviyesindeki artışın moment kapasitesini yükselttiği, buna karşılık nihai eğrilik ve süneklik kapasitesini belirgin şekilde sınırladığı tespit edilmiştir. Bununla birlikte, etkin sargı donatısı kullanılan kesitlerde, yüksek aksel yükler altında dahi sünek davranışın tamamen ortadan kalkmadığı ve rijitlik kaybının daha kontrollü geliştiği anlaşılmaktadır.

Kiriş elemanlarına ilişkin değerlendirmeler, eğrilik sünekliğinin yalnızca boyuna donatı oranı ile açıklanamayacağını; beton basınç dayanımı ve diğer kesit parametreleri ile birlikte ele alınması gerektiğini göstermektedir. Bu kapsamda geliştirilen eğrilik süneklik yaklaşımı, farklı tasarım değişkenlerinin etkilerini daha tutarlı biçimde yansıtarak geleneksel yöntemlere kıyasla daha genellenebilir sonuçlar sunmaktadır.

Perde duvar davranışında ise doğrusal olmayan mekanizmaların büyük ölçüde uç bölgelerde yoğunlaştığı belirlenmiştir. Uç bölgelerdeki sargı donatısının etkinliği ve kullanılan sargılı beton modelinin doğruluğu, nihai şekil değiştirme kapasitesi ve sünekliğin belirlenmesinde doğrudan etkili olmaktadır. Bu durum, betonarme sistemlerin deprem performansının güvenilir biçimde değerlendirilebilmesi için malzeme modellemesi, kesit analizleri ve eleman düzeyindeki davranışın birlikte ele alınmasının gerekliliğini ortaya koymaktadır.

Genel olarak değerlendirildiğinde, aksel yük artışının sünekliği sınırlayıcı etkisi, sargı donatısının deformasyon kapasitesini artırıcı rolü, beton dayanımının moment kapasitesini artırmasına karşın süneklik üzerindeki etkisinin sınırlı kalması ve kesit geometrisinin yanal basınç mekanizması üzerinden davranışı etkilemesi, öne çıkan temel teknik sonuçlar olarak dikkat çekmektedir. Bu bağlamda doğrusal olmayan moment-eğrilik analizleri, performans değerlendirmesinin temel araçlarından biri olarak ön plana çıkmaktadır.

6.2. Uygulama Önerileri

Elde edilen sonuçlar, betonarme yapıların deprem performansının değerlendirilmesinde doğrusal elastik analizlerin tek başına yeterli olmadığını açık biçimde göstermektedir. Özellikle can güvenliği ve göçmenin önlenmesi gibi performans hedeflerinin söz konusu olduğu durumlarda, doğrusal olmayan kesit ve eleman davranışını esas alan analiz yöntemlerinin kullanılması gereklidir. Bu kapsamda moment-eğrilik analizleri, plastik mafsal tanımlamaları ve doğrusal olmayan statik veya dinamik analiz yöntemleri, performansa dayalı tasarım sürecinin temel bileşenleri olarak değerlendirilmelidir.

Malzeme modellemesinde beton ve donatı çeliği için tanımlanan gerilme-şekildeğiştirme ilişkilerinin, hedeflenen hasar düzeyi ve ilgili yönetmelik hükümleri ile uyumlu olması kritik önem taşımaktadır. Özellikle kolon ve perde uç bölgelerinde sargılı beton davranışının gerçekçi biçimde modellenmesi, süneklik kapasitesinin doğru tahmini açısından belirleyici bir unsurdur. Bu nedenle sargı donatısı düzenlemeleri yalnızca minimum yönetmelik şartlarını karşılamak amacıyla değil, hedeflenen performans düzeyini sağlayacak şekilde optimize edilmelidir.

Eksenel yük düzeylerinin süneklik üzerindeki olumsuz etkileri dikkate alınarak, tasarım aşamasında özellikle kolon ve perde elemanlarda aşırı eksenel yüklerden kaçınılması önerilmektedir. Mevcut yapıların değerlendirilmesinde ise eksenel yük-eğilme etkileşiminin doğrusal olmayan analiz yöntemleri ile incelenmesi gereklidir.

Perde duvar tasarımında uç bölge detaylandırmaları ve sargı donatısı, sünek davranışın sağlanmasında temel belirleyicilerdir. Bu bölgelerin, yüksek eksenel yükler altında dahi kontrollü hasar gelişimine olanak tanıyacak şekilde tasarlanması gerekmektedir. Kiriş elemanları için önerilen eğrilik süneklik yaklaşımı ise hem tasarım hem de performans değerlendirmesi süreçlerinde pratik ve güvenilir bir araç olarak kullanılabilir. Bu yaklaşım, şekildeğiştirme temelli hasar sınırlarının daha anlamlı yorumlanmasına katkı sağlayarak mevcut yönetmeliklerle bütünlük bir kullanım imkanı sunmaktadır.

6.3. Genel Değerlendirme

Bu kitapta, betonarme elemanların deprem etkisi altındaki davranışlarının değerlendirilmesinde doğrusal olmayan malzeme ve kesit modellerinin kritik önemini açık biçimde ortaya koymaktadır. Yapılan parametrik analizler, eksenel yük ve sargı donatısının süneklik, akma sonrası davranış ve hasar mekanizmalarının belirlenmesinde temel tasarım değişkenleri olduğunu göstermektedir.

Elde edilen sonuçlar, performansa dayalı deprem mühendisliği yaklaşımı çerçevesinde doğrusal olmayan analizlerin vazgeçilmez olduğunu ve yalnızca dayanım temelli yaklaşımların yapı davranışını yeterli düzeyde temsil edemediğini doğrulamaktadır. Bu bağlamda, deformasyon kapasitesinin güvenilir biçimde belirlenebilmesi için sargı etkinliği, eksenel yük düzeyi ve kesit geometrisi gibi parametrelerin birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir.

Sonuç olarak, betonarme elemanların doğrusal olmayan davranışı, mühendislik tasarım kararlarını doğrudan etkileyen çok boyutlu bir parametreler bütünü olarak karşımıza çıkmaktadır. Performansa dayalı tasarım yaklaşımı ise ancak kesit düzeyinde doğrulanmış analitik modeller ve gerçekçi malzeme tanımları ile desteklendiğinde hem bilimsel açıdan tutarlı hem de uygulama açısından güvenilir sonuçlar üretebilmektedir.

KAYNAKLAR

- Arslan, G., & Cihanli, E. (2010). Curvature ductility prediction of reinforced high-strength concrete beam sections. *Journal of Civil Engineering and Management*, 16(4), 462-470. <https://doi.org/10.3846/jcem.2010.52>
- Au, F., Leung, C. C. Y., & Kwan, A. K. H. (2011). Flexural ductility and deformability of reinforced and prestressed concrete sections. *Computers and Concrete*, 8(4), 473-489.
- Bai, B. Z. Z., & Au, F. (2013). Flexural ductility design of high-strength concrete beams. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 22(6), 521-542. <https://doi.org/10.1002/tal.704>
- Chopra, A. K. (2017). *Dynamics of structures: Theory and applications to earthquake engineering* (5th ed.). Pearson Education.
- Foroughi, S. (2022). *Betonarme yapısal elemanlarının lineer olmayan yöntemler ile deprem performanslarının belirlenmesi* [Determination of the seismic performance of the reinforced concrete structural members using non-linear methods] (Doktora tezi). Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü. YÖK Ulusal Tez Merkezi.
- Foroughi, S., & Yüksel, B. (2020c). Investigation of nonlinear behavior of high ductility reinforced concrete shear walls. *International Advanced Researches and Engineering Journal*, 4(2), 116-128. <https://doi.org/10.35860/iarej.693724>
- Foroughi, S., & Yüksel, B. (2022a). Investigation of nonlinear behavior of reinforced concrete columns for different confined concrete models. *Politeknik Dergisi*, 25(4), 1447-1462. <https://doi.org/10.2339/politeknik.930774>
- Foroughi, S., & Yüksel, B. (2023). Moment-curvature and effective section stiffness of reinforced concrete beams. *Politeknik Dergisi*, 26(1), 169-177. <https://doi.org/10.2339/politeknik.945426>
- Foroughi, S., & Yüksel, S. (2021). Investigation of moment-curvature and effective section stiffness of reinforced concrete columns. *Challenge Journal of Structural Mechanics*, 7(3), 135-150. <https://doi.org/10.20528/cjsmec.2021.03.003>
- Foroughi, S., & Yüksel, S. B. (2020a). Investigation of the moment-curvature relationship for reinforced concrete square columns. *Turkish Journal of Engineering*, 4(1), 36-46. <https://doi.org/10.31127/tuje.571598>
- Foroughi, S., & Yüksel, S. B. (2020b). Analytical investigation of curvature ductility of reinforced concrete columns. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 25(1), 27-38. <https://doi.org/10.17482/uumfd.510862>
- Foroughi, S., & Yüksel, S. B. (2022b). A new approach for determining the curvature ductility of reinforced concrete beams. *Slovak Journal of Civil Engineering*, 30(1), 8-20. <https://doi.org/10.2478/sjce-2022-0002>
- Foroughi, S., Jamal, R., & Yüksel, B. (2020). Sargı donatısı ve eksenel yük seviyesinin betonarme kolonların eğrilik sünekliği ile etkin kesit rijitliğine etkisi. *El-Cezeri Journal of Science and Engineering*, 7(3), 1309-1319. <https://doi.org/10.31202/ecjse.750775>
- Foroughi, S., Jamal, R., & Yüksel, B. (2021). TBDY 2018 ve Mander modeline göre sargılı betonun gerilme-şekildeğiştirilmesinin araştırılması. *El-Cezeri Journal of Science and Engineering*, 8(1), 363-375. <https://doi.org/10.31202/ecjse.788121>
- Ho, J. C. M., Kwan, A. K. H., & Pam, H. J. (2004). Minimum flexural ductility design of high-strength concrete beams. *Magazine of Concrete Research*, 56, 13-22.
- Hognestad, E. (1951). *A study of combined bending and axial load in reinforced concrete members* (Engineering Experiment Station Bulletin). University of Illinois.
- Jang, I. Y., Park, H. G., & Kim, S. S. (2008). On the ductility of high-strength concrete beams. *International Journal of Computing Science and Mathematics*, 2, 115-122.
- Kent, D. C., & Park, R. (1971). Flexural members with confined concrete. *Journal of the Structural Division (ASCE)*, 97(ST7), 1969-1990.
- Kwan, A. K. H., & Ho, J. C. M. (2010). Ductility design of high-strength concrete beams and columns. *Advances in Structural Engineering*, 13(4), 651-664.
- Kwan, A. K. H., Ho, J. C. M., & Pam, H. J. (2002). Flexural strength and ductility of reinforced concrete beams. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Structures and Buildings*, 152(4), 361-369.

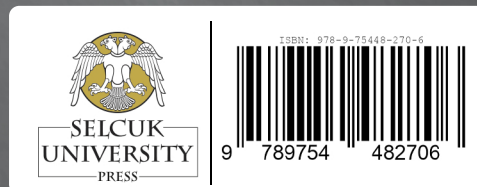
- Lam, J. Y. K., Ho, J. C. M., & Kwan, A. K. H. (2009a). Maximum axial load level and minimum confinement for limited ductility design of concrete columns. *Computers and Concrete*, 6(5), 357-376.
- Lam, J. Y. K., Ho, J. C. M., & Kwan, A. K. H. (2009b). Flexural ductility of high-strength concrete columns with minimal confinement. *Materials and Structures*, 42(7), 909-921.
- Lee, H. (2013). Predictions of curvature ductility factor of doubly reinforced concrete beams with high-strength materials. *Computers and Concrete*, 12(6), 831-850.
- MacGregor, J. G., & Wight, J. K. (2012). *Reinforced concrete: Mechanics and design* (6th ed.). Pearson Education.
- Mander, J. B., Priestley, M. J. N., & Park, R. (1988). Theoretical stress-strain model for confined concrete. *Journal of Structural Engineering*, 114(8), 1804-1826.
- Pam, H. J., Kwan, A. K. H., & Ho, J. C. M. (2001a). Post-peak behavior and flexural ductility of doubly reinforced normal and high-strength concrete beams. *Structural Engineering and Mechanics*, 12(5), 459-474.
- Pam, H. J., Kwan, A. K. H., & Ho, J. C. M. (2001b). Flexural strength and ductility of reinforced normal and high-strength concrete beams. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Structures and Buildings*, 146(4), 381-389.
- Park, R., & Paulay, T. (1975). *Reinforced concrete structures*. John Wiley & Sons.
- Paulay, T., & Priestley, M. J. N. (1992). *Seismic design of reinforced concrete and masonry buildings* (1st ed.). Wiley-Interscience.
- Priestley, M. J. N., Calvi, G. M., & Kowalsky, M. J. (2007). *Displacement-based seismic design of structures*. IUSS Press.
- Rashid, M. A., & Mansur, M. A. (2005). Reinforced high-strength concrete beams in flexure. *ACI Structural Journal*, 102(3), 462-471.
- Saatçioğlu, M., & Razvi, S. R. (1992). Strength and ductility of confined concrete. *Journal of Structural Engineering*, 118(6), 1590-1607. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1992\)118:6\(1590\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1992)118:6(1590))
- SAP2000. (2000). *Structural software for analysis and design* [Computer software]. Computers and Structures, Inc.
- Sheppard, D. A. (2021). *Structural analysis* (9th ed.). Cengage Learning.
- TBDY. (2018). *Türkiye bina deprem yönetmeliği*. T.C. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı.
- TS 500. (2000). *Betonarme yapıların tasarım ve yapım kuralları*. Türk Standartları Enstitüsü.
- Yüksel, B., & Foroughi, S. (2020). Analysis of bending moment-curvature and the damage limits of reinforced concrete circular columns. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 19, 891-903. <https://doi.org/10.31590/ejosat.696116>
- Yüksel, S., Jamal, R., & Foroughi, S. (2020). Kirişlerde basınç donatısı oranının moment-eğrilik ilişkisine etkisi. *Konya Journal of Engineering Sciences*, 8(1), 1-17. <https://doi.org/10.36306/konjes.571642>
- Yüksel, S. B., & Foroughi, S. (2019). Betonarme kolonların sargısız ve sargılı beton dayanımının analitik olarak araştırılması. *Konya Journal of Engineering Sciences*, 7(3), 612-631. <https://doi.org/10.36306/konjes.613880>
- Zameeruddin, M., & Sangle, K. K. (2021). Performance-based seismic assessment of reinforced concrete moment resisting frame. *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, 33(3), 153-165. <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2020.04.005>

Betonarme yapılar, deprem etkileri altında doğrusal olmayan davranış sergileyen ve bu nedenle klasik elastik yaklaşımların ötesinde değerlendirilmesi gereken karmaşık sistemlerdir. Bu eser, beton ve donatı çeliğinin gerilme-şekildeğiştirme ilişkilerinden başlayarak kesit düzeyinde moment-eğrilik davranışına ve eğrilik sünekliliği kavramına uzanan bütüncül bir analitik çerçeve sunmaktadır.

Sargılı ve sargısız beton modellerinin karşılaştırmalı incelendiği çalışmada; model seçiminin dayanım, rijitlik ve süneklilik üzerindeki etkileri sayısal bulgularla ortaya konulmaktadır. Kolon, kiriş ve perde elemanlar üzerinde gerçekleştirilen parametrik analizler aracılığıyla aksel yük, beton dayanımı ve donatı düzeninin yapısal performansa etkileri sistematik biçimde değerlendirilmektedir.

Kitap, özellikle betonarme kirişler için geliştirilen özgün eğrilik sünekliliği yaklaşımıyla literatüre katkı sağlamakta; performansa dayalı deprem mühendisliği uygulamaları için tutarlı ve uygulanabilir bir değerlendirme altyapısı önermektedir.

Kuramsal derinliği analitik yöntemlerle bütünleştiren bu çalışma, doğrusal olmayan davranış fiziksel hasar mekanizmaları ve mühendislik performans ölçütleri çerçevesinde ele alarak, araştırmacılar ve uygulayıcılar için kapsamlı bir başvuru kaynağı niteliği taşımaktadır.

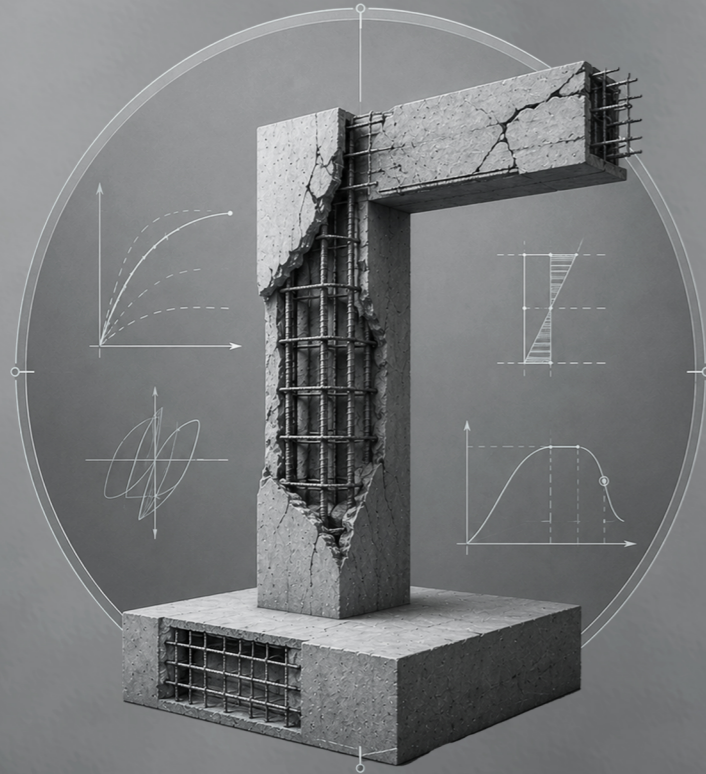


Betonarme yapılar, deprem etkileri altında doğrusal olmayan davranış sergileyen ve bu nedenle klasik elastik yaklaşımların ötesinde değerlendirilmesi gereken karmaşık sistemlerdir. Bu eser, beton ve donatı çeliğinin gerilme-şekildeğiştirme ilişkilerinden başlayarak kesit düzeyinde moment-eğrilik davranışına ve eğrilik süneklığı kavramına uzanan bütüncül bir analitik çerçeve sunmaktadır.

Sargılı ve sargısız beton modellerinin karşılaştırmalı incelendiği çalışmada; model seçiminin dayanım, rijitlik ve süneklilik üzerindeki etkileri sayısal bulgularla ortaya konulmaktadır. Kolon, kiriş ve perde elemanlar üzerinde gerçekleştirilen parametrik analizler aracılığıyla aksenal yük, beton dayanımı ve donatı düzeninin yapısal performansa etkileri sistematik biçimde değerlendirilmektedir.

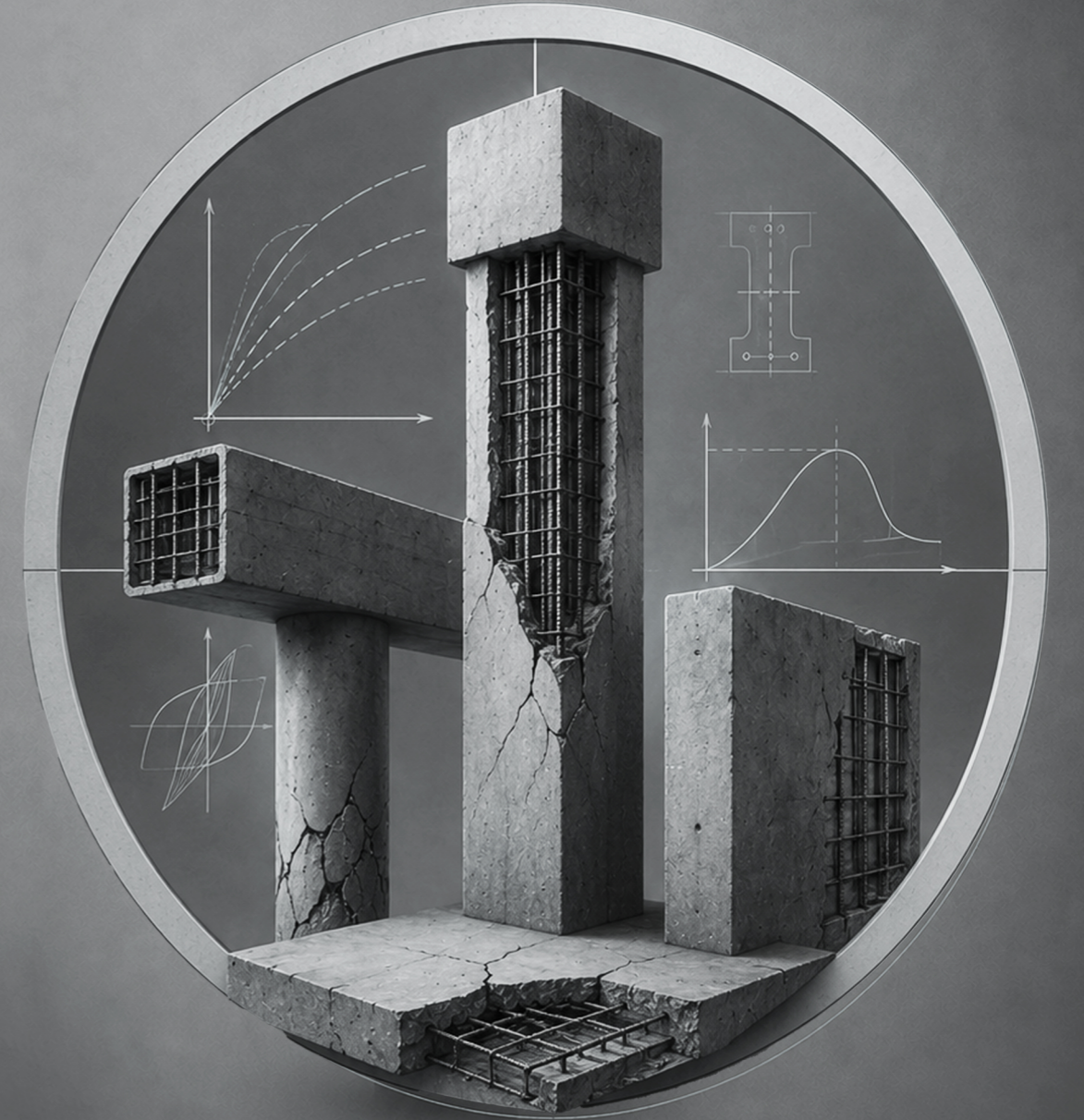
Kitap, özellikle betonarme kirişler için geliştirilen özgün eğrilik süneklığı yaklaşımıyla literatüre katkı sağlamakta; performansa dayalı deprem mühendisliği uygulamaları için tutarlı ve uygulanabilir bir değerlendirme altyapısı önermektedir.

Kuramsal derinliği analitik yöntemlerle bütünleştiren bu çalışma, doğrusal olmayan davranış fiziksel hasar mekanizmaları ve mühendislik performans ölçütleri çerçevesinde ele alarak, araştırmacılar ve uygulayıcılar için kapsamlı bir başvuru kaynağı niteliği taşımaktadır.



BETONARME YAPISAL ELEMANLARIN DOĞRUSAL OLMAYAN MEKANİK DAVRANIŞI

Dr. Saeid Foroughi
Prof. Dr. S. Bahadır Yüksel



BETONARME YAPISAL ELEMANLARIN DOĞRUSAL OLMAYAN MEKANİK DAVRANIŞI



2026

