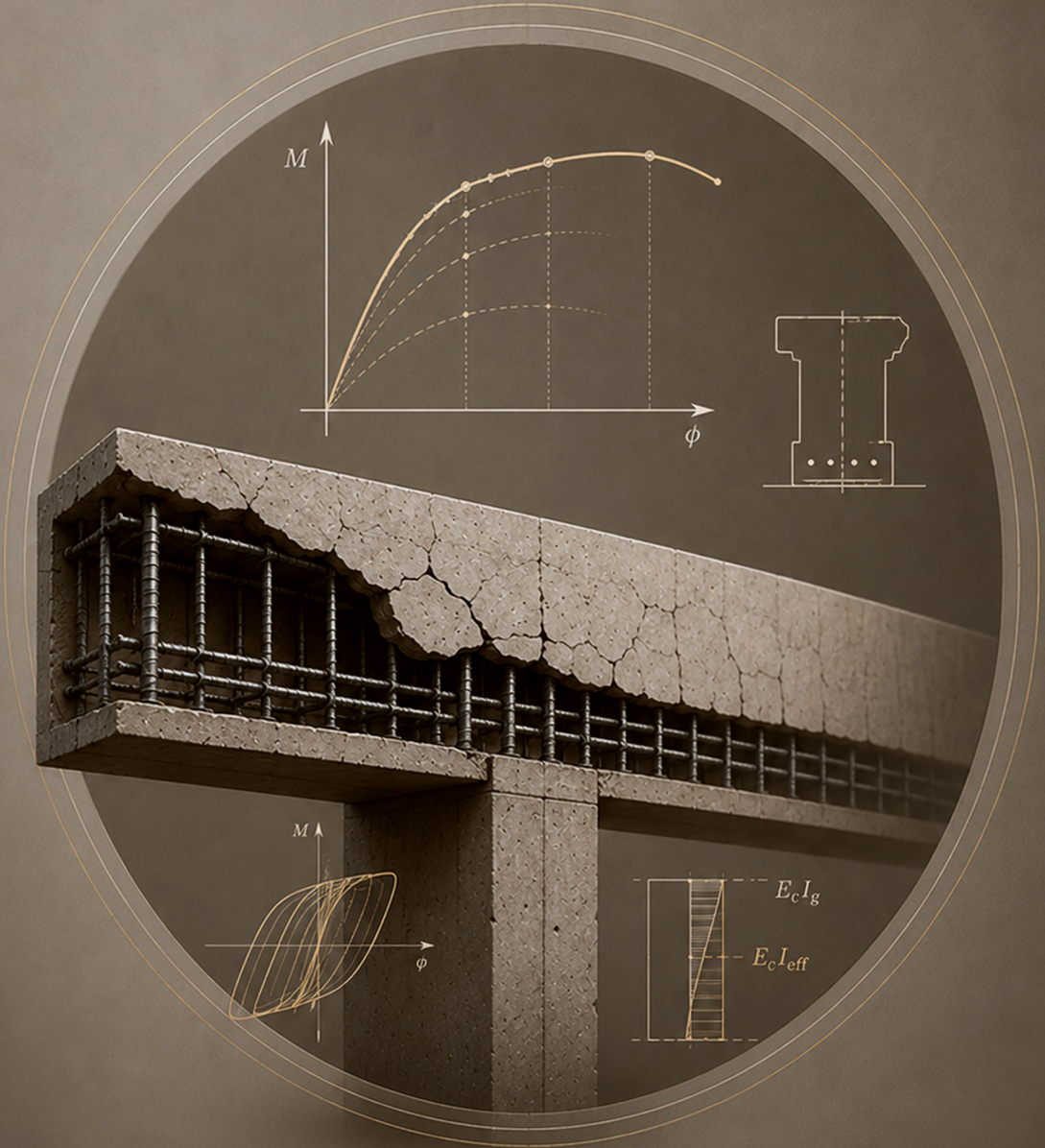


BETONARME TAŞIYICI SİSTEMLERDE DOĞRUSAL OLMAYAN DAURANIŞ: MOMENT-EĞRİLİK İLİŞKİSİ, SÜNEKLİK VE ETKİN KESİT RİJİTLİĞİ

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



SELÇUK
UNIVERSITY
PRESS

**BETONARME TAŞIYICI SİSTEMLERDE
DOĞRUSAL OLMAYAN DAVRANIŞ:
MOMENT–EĞRİLİK İLİŞKİSİ,
SÜNEKLİK VE ETKİN KESİT RİJİTLİĞİ**

YAZARLAR

DR. SAEİD FOROUGHİ

PROF. DR. S. BAHADIR YÜKSEL



**SELÇUK
ÜNİVERSİTESİ**
YAYINLARI

BETONARME TAŞIYICI SİSTEMLERDE DOĞRUSAL OLMAYAN DAVRANIŞ: MOMENT-EĞRİLİK İLİŞKİSİ, SÜNEKLİK VE ETKİN KESİT RİJİTLİĞİ

Yazarlar: Dr. Saeid Foughi, 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: 978-975-448-269-0

DOI: <https://doi.org/10.59726/SUPress/9789754482690>

Anahtar Kavramlar: 1. Moment-Eğrilik ilişkisi, 2. Etkin Kesit Rijitliği, 3. Süneklilik Kapasitesi, 4. Doğrusal Olmayan Davranış, 5. Betonarme Taşıyıcı Sistemler.

Atf için: Foughi, S., Yüksel, S.B., , (2026), Betonarme Taşıyıcı Sistemlerde Doğrusal Olmayan Davranış: Moment-Eğrilik ilişkisi, Süneklilik ve Etkin Kesit Rijitliği, Selçuk Üniversitesi Yayınları.



Selçuk Üniversitesi Yayınları, Bilimsel Yayınlar Koordinatörlüğü bünyesinde yer almaktadır.

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 BEHAVIOR IN REINFORCED
CONCRETE STRUCTURAL SYSTEMS:
MOMENT–CURVATURE RELATIONSHIP, DUCTILITY AND
EFFECTIVE SECTION STIFFNESS**

AUTHORS

DR. SAEID FOROUGHI

PROF. DR. S. BAHADIR YÜKSEL



Nonlinear Behavior in Reinforced Concrete Structural Systems: Moment–Curvature Relationship, Ductility, and Effective Section Stiffness

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: 978-975-448-269-0

DOI: <https://doi.org/10.59726/SUPress/978-9754482690>

Keywords: 1. Moment-Curvature Relationship, 2. Effective Section Stiffness, 3. Ductility Capacity, 4. Non-linear Behavior, 5. Reinforced Concrete Structural Systems.

Cite This: Foroughi, S., Yüksel, S.B., (2026), Nonlinear Behavior in Reinforced Concrete Structural Systems: Moment–Curvature Relationship, Ductility, and Effective Section Stiffness, Selcuk University Press.



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

Publisher: Selcuk University Press

Publisher Certification Number: 43463

Scientific Publications Coordinator: 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

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

İÇİNDEKİLER	ii
ŞEKİLLER LİSTESİ	v
TABLolar LİSTESİ	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR	xi
ÖNSÖZ	xiv
GİRİŞ	1
1. BETONARME TAŞIYICI ELEMANLARDA MOMENT-EĞRİLİK, SÜNEKLİK VE ETKİN KESİT RİJİTLİĞİ	4
1.1. Betonarme Taşıyıcı Elemanların Moment-Eğrilik Analizi ve Süneklik Değerlendirmesi	4
1.1.1. Betonarme kesitlerde moment-eğrilik ilişkisi	5
1.1.2. Beton ve donatı çeliğinin doğrusal olmayan modellenmesi.....	7
1.1.3. Süneklik tanımı ve hesaplanması	7
1.2. Betonarme Taşıyıcı Elemanların Etkin Kesit Rijitlikleri	9
1.2.1. Betonarmede rijitlik kavramı.....	10
1.2.2. Etkin kesit rijitliğinin kuramsal temelleri.....	11
1.2.3. Betonarme elemanlarda çatlama öncesi ve sonrası rijitlik davranışı	12
1.2.4. Etkin kesit rijitliğini belirleyen parametreler	13
1.2.5. Betonarme kesitlerde moment-eğrilik temelli rijitlik değerlendirme si	14
1.2.6. Betonarme elemanlarda eğrilik sünekliliği ve etkin kesit rijitliliği ilişkisi.....	16
1.3. Yönetmeliklere Göre Etkin Rijitlik Katsayıları.....	17
1.3.1. TBDY (2018)'de betonarme taşıyıcı elemanlar için önerilen etkin rijitlik katsayısı.....	18
1.3.2. Eurocode 2 (2004)'te betonarme taşıyıcı elemanlar için önerilen etkin rijitlik katsayısı.....	20
1.3.3. Eurocode 8 (2004)'te betonarme taşıyıcı elemanlar için önerilen etkin rijitlik katsayısı.....	22
1.3.4. Eurocode 8 (2005)'te betonarme taşıyıcı elemanlar için önerilen etkin rijitlik katsayısı.....	22
1.3.5. ACI 318 (2014)'te betonarme taşıyıcı elemanlar için önerilen etkin rijitlik katsayısı.....	24

1.3.6. ASCE/SEI 41’de betonarme taşıyıcı elemanlar için önerilen etkin rijitlik katsayısı.....	25
1.3.7. Yönetmeliklere göre etkin rijitlik katsayılarının karşılaştırılması.....	27
1.4. Betonarme Elemanlar İçin Literatürde Önerilen Etkin Kesit Rijitliği Modelleri	28
1.4.1. Fenwick ve Bull (2000) tarafından önerilen etkin kesit rijitlik katsayısı.....	29
1.4.2. Biskinis ve Fardis (2004) tarafından önerilen etkin kesit rijitlik katsayısı...	30
1.4.3. Biskinis (2007) tarafından önerilen etkin kesit rijitlik katsayısı	31
1.4.4. Avşar vd. (2014) tarafından önerilen etkin kesit rijitlik katsayısı.....	32
1.4.5. Foroughi ve Yüksel tarafından önerilen etkin kesit rijitlik katsayısı	33
2. BETONARME KİRİŞ ELEMANLARININ ETKİN KESİT RİJİTLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI	37
2.1. Betonarme Kirişlerin Moment-Eğrilik İlişkileri.....	40
2.2. Betonarme Kirişlerin Etkin Eğilme Rijitlik Değerlerinin Hesaplanması	46
2.2.1. Moment-eğrilik ilişkilerinden hesaplanan etkin kesit rijitlik değerleri.....	47
2.2.2. Yönetmelikler ve araştırmacılara göre hesaplanan etkin eğilme rijitliği katsayısı.....	48
2.3. Foroughi ve Yüksel (2026a) yaklaşımına göre çift donatılı betonarme kiriş İçin Alternatif Etkin Rijitlik Denklemi.....	53
2.4. Çift Donatılı Betonarme Kirişler İçin Önerilen Etkin Rijitlik İlişkilerinin Karşılaştırmalı Analizi	59
2.5. Bölüm Sonu: Araştırma Bulgularının Değerlendirilmesi, Yorumlanması ve Sonuçları.....	63
3. BETONARME KOLON ELEMANLARININ ETKİN KESİT RİJİTLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI	68
3.1. Betonarme Kolonların Moment-Eğrilik İlişkileri.....	71
3.1.1. Betonarme kare enkesitli kolon.....	71
3.1.2. Betonarme dikdörtgen enkesitli kolon	79
3.1.3. Betonarme dairesel enkesitli kolon	87
3.2. Betonarme Kolonların Etkin Eğilme Rijitlik Değerlerinin Hesaplanması	96
3.2.1. Moment-eğrilik ilişkilerinden hesaplanan etkin kesit rijitlik değerleri.....	97
3.2.2. Yönetmelikler ve araştırmacılara göre hesaplanan etkin kesit rijitlik değerleri	103
3.3. Foroughi ve Yüksel (2026b) Tarafından Betonarme Kolonlar İçin Önerilen Alternatif Etkin Rijitlik Denklemi.....	118

3.3.1. Kare enkesitli betonarme kolon için etkin rijitlik denklemi.....	118
3.3.2. Dikdörtgen enkesitli betonarme kolon için etkin rijitlik denklemi	119
3.3.3. Dairesel enkesitli betonarme kolon için etkin rijitlik denklemi	119
3.4. Betonarme Kolonlar İçin Önerilen Etkin Rijitlik Bağlıntılarının Karşılaştırılması	129
3.5. Bölüm Sonu: Araştırma Bulgularının Değerlendirilmesi, Yorumlanması ve Sonuçları.....	137
4. BETONARME PERDE DUVAR ELEMANLARININ ETKİN KESİT RİJİTLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI.....	139
4.1. Betonarme Perde Duvarların Moment-Eğrilik İlişkileri.....	142
4.2. Betonarme Perde Duvarların Etkin Eğilme Rijitlik Değerlerinin Hesaplanması....	149
4.2.1. Moment-eğrilik ilişkilerinden hesaplanan etkin kesit rijitlik değerleri	150
4.2.2. Betonarme perde duvarların yönetmelikler ve araştırmacılara göre hesaplanan etkin kesit rijitlik değerleri	152
4.2.3. TBDY (2018) kapsamında yığılı plastik davranış modeline göre hesaplanan etkin rijitlik değerleri.....	154
4.2.4. Foroughi ve Yüksel (2025)'e göre betonarme perde duvarlar için alternatif etkin rijitlik denkleminin geliştirilmesi	157
4.3. Betonarme Perde Duvarlar İçin Önerilen Etkin Rijitlik Bağlıntılarının Karşılaştırılması	163
4.4. Bölüm Sonu: Araştırma Bulgularının Değerlendirilmesi, Yorumlanması ve Sonuçları.....	166
5. GENEL DEĞERLENDİRME VE UYGULAMA ÖNERİLERİ	169
5.1. Temel Çıkarımlar.....	169
5.2. Uygulama Önerileri.....	170
5.3. Genel Değerlendirme.....	170
6. KAYNAKLAR.....	172

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. Tipik bir betonarme elemanın moment-eğrilik eğrisi.	5
Şekil 1.2. Betonarme bir kesitin yük artışı altındaki tipik moment-eğrilik (M-φ) davranışı ve buna karşılık gelen eğilme rijitliğinin değişimi.	16
Şekil 1.3. Betonarme kesitlerde moment-eğrilik ilişkisinin idealize edilmiş gösterimi ile eğrilik sünekliği ve etkin kesit rijitliği kavramlarının şematik tanımı.	17
Şekil 2.1. Çift donatılı betonarme kirişin kesitsel görünümü ve A-A kesit detayları	39
Şekil 2.2. Beton ve donatı çeliği için gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri (TBDY, 2018)	40
Şekil 2.3. Basınç/çekme donatısı oranının ve beton basınç dayanımının moment ve eğrilik davranışı üzerindeki etkisi.	43
Şekil 2.4. Farklı tasarım parametrelerinin betonarme kiriş elemanların eğrilik sünekliği üzerindeki etkisi.	44
Şekil 2.5. Betonarme kirişlerde moment-eğrilik ilişkilerinden elde edilen etkin eğilme rijitliği katsayılarına ρ'/ρ oranı ve f_{ck} parametrelerinin etkisi.	48
Şekil 2.6. Betonarme kirişlerde basınç/çekme donatısı oranının (ρ'/ρ) etkin eğilme rijitliği katsayısı (ke) üzerindeki etkisinin farklı yaklaşımlarına göre karşılaştırılması.	49
Şekil 2.7. Betonarme kirişlerde TBDY (2018)'e göre yığılı plastik davranış yaklaşımı kapsamında elde edilen etkin eğilme rijitliği katsayısının ρ'/ρ oranı ve f_{ck} parametrelerine bağlı değişimi.	50
Şekil 2.8. Betonarme kirişlerde Eurocode 8 (2005)'e göre elde edilen etkin eğilme rijitliği katsayısının ρ'/ρ oranı ve f_{ck} parametrelerine bağlı değişimi.	51
Şekil 2.9. Betonarme kirişlerde Biskinis ve Fardis (2004) yaklaşımından elde edilen etkin eğilme rijitliği katsayısının ρ'/ρ oranı ve f_{ck} parametrelerine bağlı değişimi.	52
Şekil 2.10. Betonarme kirişlerde Avşar vd. (2014) yaklaşımından elde edilen etkin eğilme rijitliği katsayısının ρ'/ρ oranı ve f_{ck} parametrelerine bağlı değişimi.	52
Şekil 2.11. ρ'/ρ parametresinin etkin rijitlik katsayısı üzerindeki etkisi.	54
Şekil 2.12. Etkin rijitlik faktörünün $-0.14\rho'/\rho^2 + 0.344\rho'/\rho + 0.534$ bağıntısına oranı üzerindeki beton dayanımının etkisi.	55
Şekil 2.13. ρ'/ρ ve f_{ck} oranlarının $ke, prop$ oranı üzerinde etkisi.	56
Şekil 2.14. $ke, prop$ ve ke, num değerlerinin karşılaştırması.	58
Şekil 2.15. Betonarme kirişlerin farklı tasarım parametrelerine göre elde edilen etkin rijitlik katsayı ilişkilerinin karşılaştırması.	62
Şekil 3.1. Betonarme kolon modellerinin kesit görünümü.	70

Şekil 3.2. Farklı tasarım parametreleri için 500 mm×500 mm kare kesitli kolonların moment-eğrilik ilişkilerinin karşılaştırılması.	73
Şekil 3.3. 500 mm × 500 mm kare kesitli kolonlar için farklı tasarım parametrelerinin moment ve eğrilik değerleri üzerindeki etkisi.....	77
Şekil 3.4. 500 mm × 500 mm kare enkesitli kolonlar için farklı tasarım parametrelerinin eğrilik sünekliği üzerindeki etkisi	78
Şekil 3.5. Farklı tasarım parametreleri için 400 mm×600 mm dikdörtgen en-kesitli kolonların moment-eğrilik ilişkilerinin karşılaştırılması.....	81
Şekil 3.6. 400 mm × 600 mm dikdörtgen enkesitli kolonlar için farklı tasarım parametrelerinin moment ve eğrilik üzerindeki etkisi.....	84
Şekil 3.7. 400 mm × 600 mm dikdörtgen en-kesitli kolonlar için farklı tasarım parametrelerinin eğrilik sünekliği üzerindeki etkisi.....	86
Şekil 3.8. Farklı tasarım parametreleri için 600 mm dairesel enkesitli kolonların moment-eğrilik ilişkilerinin karşılaştırılması.	89
Şekil 3.9. 600 mm dairesel enkesitli kolonlar için farklı tasarım parametrelerinin moment ve eğrilik değerleri üzerindeki etkisi	92
Şekil 3.10. 600 mm dairesel enkesitli kolonlar için farklı tasarım parametrelerinin eğrilik sünekliği üzerindeki etkisi.....	94
Şekil 3.11. 500 mm×500 mm kare enkesitli kolonun farklı parametrelerine göre moment-eğrilik ilişkilerinden elde edilen <i>ke</i> ilişkileri.	99
Şekil 3.12. 400 mm×600 mm dikdörtgen enkesitli kolonun farklı parametrelerine göre moment-eğrilik ilişkilerinden elde edilen <i>ke</i> ilişkileri.....	100
Şekil 3.13. 600 mm dairesel enkesitli kolonun farklı parametrelerine göre moment-eğrilik ilişkilerinden elde edilen <i>ke</i> ilişkileri.....	101
Şekil 3.14. Betonarme kolonların farklı yönetmeliklere ve standartlara göre elde edilen <i>ke</i> değerleri.	105
Şekil 3.15. 500 mm×500 mm kare enkesitli kolonun TBDY (2018)'e göre yığılı plastik davranış yaklaşımı kapsamında elde edilen <i>ke</i> ilişkileri.....	106
Şekil 3.16. 400 mm×600 mm dikdörtgen enkesitli kolonun TBDY (2018)'e göre yığılı plastik davranış yaklaşımı kapsamında elde edilen <i>ke</i> ilişkileri.....	107
Şekil 3.17. 600 mm dairesel enkesitli kolonun TBDY (2018)'e göre yığılı plastik davranış yaklaşımı kapsamında elde edilen <i>ke</i> ilişkileri	108
Şekil 3.18. 500 mm × 500 mm kare enkesitli kolonun Eurocode 8 (2005)'e göre elde edilen <i>ke</i> ilişkileri	110

Şekil 3.19. 400 mm × 600 mm dikdörtgen enkesitli kolonun Eurocode 8 (2005)'e göre elde edilen <i>ke</i> ilişkileri.....	111
Şekil 3.20. 600 mm dairesel enkesitli kolonun Eurocode 8 (2005)'e göre elde edilen <i>ke</i> ilişkileri.....	111
Şekil 3.21. 500 mm × 500 mm kare enkesitli kolonun Bisikis ve Fardis (2004) yaklaşımından elde edilen etkin eğilme rijitliği katsayısının farklı parametrelere bağlı değişimi.....	113
Şekil 3.22. 500 mm × 500 mm kare enkesitli kolonun Bisikis (2007) yaklaşımından elde edilen etkin eğilme rijitliği katsayısının farklı parametrelere bağlı değişimi.....	114
Şekil 3.23. 500 mm × 500 mm kare enkesitli kolonun Avşar vd. (2004) yaklaşımından elde edilen etkin eğilme rijitliği katsayısının farklı parametrelere bağlı değişimi.....	114
Şekil 3.24. 500 mm × 500 mm dikdörtgen enkesitli kolonun Bisikis ve Fardis (2004) yaklaşımından elde edilen etkin eğilme rijitliği katsayısının farklı parametrelere bağlı değişimi.....	115
Şekil 3.25. 400 mm × 600 mm dikdörtgen enkesitli kolonun Bisikis (2007) yaklaşımından elde edilen etkin eğilme rijitliği katsayısının farklı parametrelere bağlı değişimi.....	115
Şekil 3.26. 400 mm × 600 mm dikdörtgen enkesitli kolonun Avşar vd. (2014) yaklaşımından elde edilen etkin eğilme rijitliği katsayısının farklı parametrelere bağlı değişimi.....	116
Şekil 3.27. 600 mm dairesel enkesitli kolonun Bisikis (2007) yaklaşımından elde edilen etkin eğilme rijitliği katsayısının farklı parametrelere bağlı değişimi.....	116
Şekil 3.28. 600 mm dairesel enkesitli kolonun Avşar vd. (2014) yaklaşımından elde edilen etkin eğilme rijitliği katsayısının farklı parametrelere bağlı değişimi.....	117
Şekil 3.29. Kare enkesitli kolonun Foroughi ve Yüksel (2026b) yaklaşımından elde edilen etkin eğilme rijitliği katsayısının farklı parametrelere bağlı değişimi.....	120
Şekil 3.30. Dikdörtgen enkesitli kolonun Foroughi ve Yüksel (2026b) yaklaşımından elde edilen etkin eğilme rijitliği katsayısının farklı parametrelere bağlı değişimi.....	121
Şekil 3.31. Dairesel enkesitli kolonun Foroughi ve Yüksel (2026b) yaklaşımından elde edilen etkin eğilme rijitliği katsayısının farklı parametrelere bağlı değişimi.....	122
Şekil 3.32. 500 mm×500 mm kare enkesitli betonarme kolonların <i>ke, prop – ke, num</i> ilişkilerinin karşılaştırılması.....	127
Şekil 3.33. 400m×600mm dikdörtgen enkesitli betonarme kolonların <i>ke, prop – ke, num</i> ilişkilerinin karşılaştırılması.....	128
Şekil 3.34. 600mm dairesel enkesitli betonarme kolonların <i>ke, prop – ke, num</i> ilişkilerinin karşılaştırılması.....	128

Şekil 3.35. 500 mm × 500 mm kare enkesitli kolonların farklı tasarım parametrelere göre $ke - N/N_{max}$ ilişkileri.....	132
Şekil 3.36. 400 mm × 600 mm dikdörtgen enkesitli kolonlarda farklı tasarım parametrelere göre $ke - N/N_{max}$ ilişkileri.....	134
Şekil 3.37. 600 mm dairesel enkesitli kolonlarda farklı tasarım parametrelerine göre $ke - N/N_{max}$ ilişkileri.....	137
Şekil 4.1. Beton ve donatı çeliğin gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri (TBDY, 2018) ...	140
Şekil 4.2. Farklı tasarım parametrelerine sahip betonarme perde duvar kesitlerine ait moment-eğrilik ilişkilerinin karşılaştırmalı gösterimi.....	146
Şekil 4.3. Betonarme perde duvar kesitleri için farklı tasarım parametrelerinin moment ve eğrilik değerleri üzerindeki etkisi	148
Şekil 4.4. Betonarme perde duvar kesitlerinde farklı tasarım parametrelerinin eğrilik sünekliliği üzerindeki etkisinin karşılaştırmalı gösterimi.....	149
Şekil 4.5. Betonarme perde duvar kesitlerinde farklı tasarım parametrelerine bağlı olarak moment-eğrilik ilişkilerinden hesaplanan etkin kesit rijitlik katsayılarının karşılaştırmalı değişimi.	152
Şekil 4.6. Betonarme perde duvar kesitleri için TBDY (2018) kapsamında yığılı plastik davranış yaklaşımına göre elde edilen etkin kesit rijitliği katsayısının parametrelerle değişimi	155
Şekil 4.7. Betonarme perde duvar kesitleri için Eurocode 8 (2005) esaslarına göre belirlenen etkin eğilme rijitliği katsayısı ilişkilerinin karşılaştırmalı gösterimi	155
Şekil 4.8. Betonarme perde duvar kesitlerin Bisikis ve Fardis (2004) modeline göre hesaplanan etkin eğilme rijitliği katsayısının farklı tasarım parametrelerine bağlı değişimi	156
Şekil 4.9. Betonarme perde duvar kesitlerin Bisikis (2007) yaklaşımından elde edilen etkin eğilme rijitliği katsayısının farklı parametrelerine bağlı değişimi	156
Şekil 4.10. Betonarme perde duvar kesitlerin Fenwick ve Bull (2000) yaklaşımından elde edilen etkin eğilme rijitliği katsayısının farklı parametrelerine bağlı değişimi	156
Şekil 4.11. Betonarme perde duvar kesitlerinde farklı tasarım parametre oranlarının etkin eğilme rijitliği katsayısı üzerindeki etkisinin karşılaştırmalı gösterimi	160
Şekil 4.12. Betonarme perde duvarların farklı tasarım parametrelerine göre $ke, prop - ke, num$ ilişkilerinin karşılaştırılması	163
Şekil 4.13. Betonarme perde duvarların farklı parametrelere göre $ke - N/N_{max}$ ilişkileri.....	166

TABLolar LİSTESİ

Tablo 1.1. Betonarme taşıyıcı elemanlar için etkin kesit rijitliği çarpanları (TBDY, 2018)	19
Tablo 1.2. Azaltma faktörleri (ACI 318, 2014).....	24
Tablo 1.3. Betonarme taşıyıcı elemanlar için rijitlik azaltma katsayı değerleri (ASCE/SEI 41, 2017).....	26
Tablo 2.1. Tasarlanan betonarme kiriş kesitleri için detaylar.....	39
Tablo 2.2. Malzeme modellerinde kullanılan parametreler (TBDY, 2018)	40
Tablo 2.3. Betonarme kirişler için moment-eğrilik analiz sonuçları.....	41
Tablo 2.4. Betonarme kirişlerde etkin eğilme rijitliğinin belirlenmesine yönelik farklı yaklaşımlar	46
Tablo 2.5. Moment-eğrilik ilişkilerinden hesaplanan ke değerleri	48
Tablo 2.6. TBDY (2018)'e göre yığılı plastik davranış yaklaşımı esas alınarak hesaplanan etkin eğilme rijitliği katsayısı (ke) değerleri.....	50
Tablo 2.7. Eurocode 8-Part 3 (2005) göre hesaplanan etkin eğilme rijitliği katsayısı ...	51
Tablo 2.8. Çift donatılı betonarme kiriş kesitleri için Denklem (2.15)'ten elde edilen etkin rijitlik katsayısı değerleri.....	56
Tablo 2.9. Çift donatılı betonarme kiriş kesitleri için hesaplanan etkin rijitlik faktörlerinin karşılaştırılması	57
Tablo 3.1. Etkin kesit rijitlik hesabında kullanılan betonarme kolon detayları.....	70
Tablo 3.2. 500 mm × 500 mm kare kesitli betonarme kolonlar için moment-eğrilik analiz sonuçları	74
Tablo 3.3. 500 mm × 500 mm kare enkesitli kolonlar için moment-eğrilik ilişkilerinden hesaplanan $\mu\phi$ değerleri	77
Tablo 3.4. 400 mm × 600 mm dikdörtgen kesitli betonarme kolonların moment-eğrilik analiz sonuçları.....	81
Tablo 3.5. 400 mm × 600 mm dikdörtgen enkesitli kolonlar için moment-eğrilik ilişkilerinden hesaplanan $\mu\phi$ değerleri.....	85
Tablo 3.6. 600 mm dairesel kesitli betonarme kolonlar için moment-eğrilik analiz sonuçları	89

Tablo 3.7. 600 mm dairesel enkesitli kolonlar için moment-eğrilik ilişkilerinden hesaplanan $\mu\phi$ değerleri.....	93
Tablo 3.8. 500 mm × 500 mm kare enkesitli kolonlar için moment-eğrilik ilişkilerinden hesaplanan ke değerleri.....	98
Tablo 3.9. 400 mm × 600 mm dikdörtgen enkesitli kolonlar için moment-eğrilik ilişkilerinden hesaplanan ke değerleri.....	99
Tablo 3.10. 600 mm dairesel enkesitli kolonlar için moment-eğrilik ilişkilerinden hesaplanan ke değerleri.....	100
Tablo 3.11. Betonarme kolonlarda etkin eğilme rijitliğinin belirlenmesine yönelik farklı yaklaşımlar	103
Tablo 3.12. 500 mm × 500 mm kare enkesitli kolonlar için TBDY (2018)'e göre yığılı plastik davranış yaklaşımı kapsamında elde edilen ke değerleri	105
Tablo 3.13. 400 mm × 600 mm dikdörtgen enkesitli kolonlar için TBDY (2018)'e göre yığılı plastik davranış yaklaşımı kapsamında elde edilen ke değerleri.....	107
Tablo 3.14. 600 mm dairesel enkesitli kolonlar için TBDY (2018)'e göre yığılı plastik davranış yaklaşımı kapsamında elde edilen ke değerleri.....	108
Tablo 3.15. 500 mm×500 mm kare enkesitli kolonlar için hesaplanan etkin rijitlik faktörlerinin karşılaştırılması	123
Tablo 3.16. 400 mm × 600 mm dikdörtgen enkesitli kolonlar için hesaplanan etkin rijitlik katsayılarının karşılaştırılması.....	124
Tablo 3.17. 600 mm dairesel enkesitli kolonlar için hesaplanan etkin rijitlik katsayılarının karşılaştırılması	126
Tablo 4.1. Malzeme modellerinde kullanılan parametreler (TBDY, 2018)	140
Tablo 4.2. Betonarme perde duvarlara ait kesit ve donatı detayları	141
Tablo 4.3. Betonarme perde duvar kesitleri için moment-eğrilik ilişkilerinden hesaplanan etkin kesit rijitlik katsayı değerleri.....	151
Tablo 4.4. Betonarme perde duvarlar için etkin eğilme rijitliğinin belirlenmesine yönelik farklı yaklaşımlar.....	153
Tablo 4.5. Betonarme perde duvar kesitleri için moment-eğrilik ilişkilerinden hesaplanan etkin rijitlik katsayısı değerleri.....	159
Tablo 4.6. Perde duvar kesitleri için hesaplanan etkin rijitlik katsayılarının karşılaştırılması	161

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

A_c	: Beton kesit alanıdır [mm ²].
A_g	: Beton kesitinin brüt alanıdır [mm ²].
A_s, A_{st}	: Kesitte bulunan toplam boyuna donatı alanıdır [mm ²].
A_{st}	: Boyuna donatının toplam alanıdır [mm ²].
A_w	: Yükleme doğrultusunda etkili olan net enine beton alanıdır [mm ²].
a_{vz}	: Eğilme momenti diyagramında çekme kaymasını temsil eden parametredir.
a_v	: Kesme-moment ilişkisine bağlı bir katsayıdır.
b_w	: Çekme bölgesindeki enine kesitin en küçük genişliğidir [mm].
d ve d'	: Çekme ve basınç donatılarının etkin derinlikleridir [mm].
d_b, d_t	: Boyuna donatının çapını ifade eder [mm].
d_{tr}	: Enine donatının (etriye veya çiroz) çapıdır [mm].
E_c	: Betonun elastisite modülüdür [MPa].
E_{cd}	: Betonun tasarım elastisite modülüdür [MPa].
E_s	: Donatı çeliğinin elastisite modülüdür [MPa].
EI	: Eğilme rijitliğidir.
$(EI)_e$: Etkin eğilme rijitliğidir.
EI_{gross}	: Çatlamamış kesitin elastik eğilme rijitliğidir.
f_c, f'_c	: Betonun basınç dayanımıdır [MPa].
f_{ck}	: Betonun karakteristik basınç dayanımıdır [MPa].
f_{ce}	: Betonun ortalama (beklenen) basınç dayanımıdır [MPa].
f_y	: Donatı çeliğinin akma dayanımıdır [MPa].
f_{yk}	: Donatı çeliğinin karakteristik akma dayanımıdır [MPa].
f_{ye}	: Donatı çeliğinin ortalama (beklenen) akma dayanımıdır [MPa].
h	: Kesit yüksekliğidir [mm].
i	: Çatlamamış beton kesitine ait dönme yarıçapıdır.
I_e	: Etkin kesit atalet momentidir [mm ⁴].
I_g	: Brüt kesit atalet momentidir [mm ⁴].
K_1	: Beton basınç dayanımına bağlı rijitlik kaybını düzenleyen katsayıdır.
K_2	: Eksenel yük seviyesi ve eleman narinliğini dikkate alan katsayıdır.
K_c	: Betonun çatlama, sünme ve zamanla oluşan rijitlik kaybını temsil eden azaltma katsayısıdır.
K_s	: Donatı katkısını ifade eden azaltma katsayısıdır.
k_e	: Etkin kesit rijitlik katsayısıdır.
L	: Eleman uzunluğudur [mm].
L_s	: Kesme açıklığıdır (shear span) [mm].

l_0	: Etkin boydur [mm].
M	: Eğilme momentidir [kNm].
M_{cr}	: Çatlama momentidir [kNm].
M_u	: Nihai moment kapasitesidir [kNm].
M_y	: Akma momentidir [kNm].
N, N_{Ed}	: Kesitte yükleme veya eksenel kuvvettir [kN].
N/N_{max}	: Eksenel yük oranıdır.
n	: Normalize edilmiş eksenel yük oranıdır.
P_0	: Nominal eksenel yük kapasitesidir [kN].
P_u	: Faktörlü eksenel kuvvettir [kN].
R^2	: Determinasyon katsayısıdır (regresyon doğruluğu ifade eder).
s	: Enine donatı aralığıdır [mm].
V	: Kesme kuvvetidir [kN].
V_{Rc}	: Elemanın diyagonal çatlamaındaki kesme kuvvetidir [kN].
z	: Betonarme kesitte iç kuvvetler arasındaki moment koludur [mm].
α	: Etkin rijitlik indirgeme katsayısıdır.
Δ_y	: Akma yer değiştirmesidir [mm].
Δ_u	: Nihai yer değiştirmedir [mm].
ϵ_c	: Basınç liflerindeki birim şekildeğiştirmedir.
ϵ_t	: Çekme liflerindeki birim şekildeğiştirmedir.
ϵ_y	: Donatının akma birim şekildeğiştirmesidir.
θ	: Dönme (rotation).
θ_y	: Akma dönmesi (chord rotation).
λ	: Narinlik oranıdır.
μ_Δ	: Yer değiştirme sünekliğidir.
μ_ϕ	: Eğrilik sünekliğidir.
ρ	: Donatı oranı
ρ_b	: Betonarme kirişlerde dengeli donatı oranıdır.
ρ_l	: Boyuna donatı oranıdır.
ρ_{st}	: Çekme donatısı oranıdır.
ρ_t	: Enine donatı oranıdır.
ρ', ρ'_s	: Basınç donatısı oranıdır.
$\rho'/\rho, \rho'_s/\rho_{st}$: Basınç donatısının çekme donatısına oranıdır.
ϕ	: Eğrilik (curvature) [1/m].
ϕ_y	: Akma eğriliği [1/m].
ϕ_u	: Nihai eğrilik [1/m].
ϕ_{ef}	: Betonun uzun süreli yükler altındaki etkin sünme katsayısıdır.

Kısaltmalar

ACI 318	:	Amerikan Beton Enstitüsü - Betonarme Yapılar İçin Yapım Kuralları (American Concrete Institute - Building Code Requirements for Structural Concrete, ACI318-14)
ASCE/SEI 41	:	Mevcut Binaların Deprem Performansının Değerlendirilmesi ve Güçlendirilmesi Standardı (Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings, ASCE/SEI 41, 2017)
Eurocode 2	:	Betonarme Yapıların Tasarımı- Bölüm 1-1: Binalar için genel kurallar (Design of Concrete Structures, EN 1992-1-1:2004)
Eurocode 8	:	Depreme Dayanıklı Yapıların Tasarımı (Design of Structures for Earthquake Resistance, EN 1998-1:2004)
Eurocode 8-Part 3	:	Mevcut Binaların Değerlendirilmesi ve Güçlendirilmesi (Assessment and Retrofitting of Buildings, EN 1998-3:2005)
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

Günümüzde betonarme yapıların tasarım ve değerlendirilmesinde, yalnızca taşıma gücüne dayalı yaklaşımlar yetersiz kalmakta; yapıların gerçek davranışını yansıtan performansa dayalı mühendislik yöntemleri öncelik kazanmaktadır. Bu bağlamda, betonarme elemanların doğrusal olmayan davranışlarının doğru biçimde modellenmesi, hem güvenli hem de ekonomik tasarım için temel bir gereklilik olarak öne çıkmaktadır. Özellikle betonarme kesitlerin çatlama sonrası davranışını temsil eden etkin kesit rijitliği, hem teorik analizler hem de mühendislik uygulamaları açısından kritik bir parametre olarak kabul edilmektedir.

Bu kitap, betonarme giriş, kolon ve perde duvar elemanlarının doğrusal olmayan davranışlarını sistematik bir biçimde incelemeyi amaçlamaktadır. Çalışmada moment-eğrilik ilişkileri ve süneklik özellikleri temel alınarak, eksenel yük düzeyi, donatı oranları, beton basınç dayanımı ve kesit geometrisi gibi parametrelerin moment-eğrilik, süneklik ve etkin rijitlik üzerindeki etkileri kapsamlı biçimde analiz edilmiştir. Böylece, betonarme elemanların gerçek davranışını yansıtan, güvenilir ve uygulamaya dönük mühendislik sonuçları elde edilmiştir.

Kitabın özgün katkılarında biri, ulusal ve uluslararası yönetmeliklerde önerilen etkin rijitlik katsayılarının, literatürdeki farklı modellerle karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesidir. Analizler, sabit katsayıya dayalı yaklaşımların kesit davranışındaki değişkenliği yeterince yansıtamadığını; buna karşın güvenli tarafta kalan sonuçlar ürettiğini ortaya koymaktadır. Ayrıca, parametre duyarlılığına dayalı analitik ve yarı-ampirik modellerin daha gerçekçi ve güvenilir tahminler sunduğu belirlenmiştir.

Kitapta sunulan bir diğer önemli katkı, farklı betonarme eleman tipleri için geliştirilen ve geniş parametre aralığında doğrulanmış yeni etkin rijitlik bağıntıdır. Bu bağıntılar, detaylı doğrusal olmayan analizler gerektirmeden hızlı ve güvenilir mühendislik tahminleri yapılmasına olanak sağlamaktadır. Böylece akademik araştırmalar ile mühendislik uygulamaları arasında doğrudan bir köprü kurulmuş, teorik bilgi pratiğe etkin şekilde aktarılmıştır.

Kitap, lisansüstü öğrenciler, araştırmacılar, akademisyenler ve uygulayıcı mühendisler için hem kuramsal bir başvuru kaynağı hem de pratik bir rehber niteliği taşımaktadır. Özellikle deprem mühendisliği ve performansa dayalı tasarım alanlarında çalışan uzmanlar için, betonarme eleman davranışının daha doğru anlaşılmasına katkı sağlayacak kapsamlı bir içerik sunmaktadır.

Sonuç olarak, bu kitap betonarme elemanların etkin kesit rijitliğinin sabit bir büyüklük olarak değil, çok sayıda parametrenin etkileşimine bağlı dinamik bir özellik olarak ele alınması gerektiğini vurgulamaktadır. Geliştirilen analitik yaklaşımlar, mevcut tasarım ve değerlendirme yöntemlerinin bilimsel temellerini güçlendirmekte ve daha güvenli, ekonomik mühendislik çözümlerine zemin hazırlamaktadır.

Bu kitabın, *Betonarme Taşıyıcı Sistemlerde Doğrusal Olmayan Davranış: Moment-Eğrilik İlişkisi, Süneklik ve Etkin Kesit Rijitliği* konusunun daha iyi anlaşılmasına, deprem mühendisliği alanındaki akademik bilgi birikiminin gelişmesine ve mühendislik uygulamalarında daha güvenli ve bilinçli kararlar alınmasına katkı sağlaması en temel temennimizdir.

Dr. Saeid Foroughi

Prof. Dr. S. Bahadır Yüksel

GİRİŞ

Betonarme taşıyıcı sistemler, modern yapı mühendisliğinin en yaygın kullanılan ve en kritik yapı türlerinden biridir. Günümüzde konut yapılarından köprü sistemlerine, endüstriyel tesislerden yüksek katlı yapılara kadar çok geniş bir uygulama alanına sahip olan bu sistemler, hem ekonomik hem de yapısal açıdan yüksek verimlilik sağlamaları nedeniyle tercih edilmektedir. Bununla birlikte, betonarme sistemlerin yaygın kullanımı, bu yapıların davranışının doğru anlaşılmasını daha da önemli hale getirmektedir. Çünkü bir yapının güvenliği yalnızca taşıdığı yüklerle değil, aynı zamanda bu yükler altında nasıl davrandığıyla doğrudan ilişkilidir.

Özellikle deprem gibi dinamik, tekrarlı ve yüksek şiddetli yüklemeler altında betonarme taşıyıcı sistemlerin davranışı son derece karmaşık bir hal almaktadır. Bu tür yüklemelerde yapı elemanları yalnızca elastik sınırlar içinde çalışmaz; bunun yerine çatlama, plastikleşme, rijitlik kaybı ve enerji sönmüleme gibi birbirini takip eden doğrusal olmayan süreçler ortaya çıkar. Betonun çekme bölgesinde çatlamasıyla birlikte kesit rijitliği ani şekilde azalırken, donatı çeliğinin akmaya başlaması sistemin yük taşıma mekanizmasını köklü biçimde değiştirir. Nihai aşamada ise betonun ezilmesi veya donatının kopması gibi göçme mekanizmaları devreye girer. Bu süreçlerin tamamı, betonarmenin gerçek davranışının doğrusal elastik teorilerle tam olarak açıklanamayacağını açıkça göstermektedir.

Bu noktada yapı mühendisliğinde en önemli problemlerden biri ortaya çıkar: geleneksel doğrusal analiz yöntemleri, gerçek yapısal davranışı ne ölçüde temsil edebilir? Doğrusal elastik analizler, basitlik ve hesap kolaylığı açısından uzun yıllardır yaygın olarak kullanılmakla birlikte, özellikle betonarme gibi malzeme ve geometri açısından doğrusal olmayan sistemlerde önemli sınırlılıklara sahiptir. Bu yöntemler, çatlama sonrası rijitlik kaybını, plastik deformasyonları ve enerji sönmüleme kapasitesini yeterince dikkate almadığından, özellikle deprem mühendisliğinde güvenli tarafta kalmak için yeterli olmayabilir veya bazı durumlarda yanıltıcı sonuçlar üretebilir.

Bu nedenle günümüz yapı mühendisliğinde, betonarme sistemlerin davranışını daha gerçekçi bir şekilde temsil eden doğrusal olmayan analiz yöntemleri büyük önem kazanmıştır. Bu kapsamda üç temel kavram, betonarme davranışının anlaşılmasında merkezi bir rol oynamaktadır: **moment-eğrilik ilişkisi, süneklik ve etkin kesit rijitliği**.

Moment-eğrilik ilişkisi, betonarme bir kesitte dış moment ile oluşan eğrilik arasındaki ilişkiyi tanımlayan temel davranış modelidir. Bu ilişki sayesinde bir kesitin yük altında nasıl davrandığı, hangi aşamada çatladığı, ne zaman akma bölgesine ulaştığı ve nihai taşıma kapasitesine nasıl eriştiği detaylı olarak izlenebilir. Başka bir ifadeyle moment-eğrilik ilişkisi, bir kesitin elastik davranıştan plastik davranışa geçiş sürecini sürekli bir eğri üzerinde temsil eder. Bu yönüyle yalnızca bir hesap aracı değil, aynı zamanda betonarme davranışının fiziksel bir özeti niteliğindedir.

Süneklik kavramı ise yapıların ani ve gevrek kırılmalar yerine kontrollü deformasyonlar yapabilme kapasitesini ifade eder. Deprem mühendisliği açısından süneklik, bir yapının enerji yutma ve hasarı yayarak taşıma yeteneğini belirleyen en kritik performans göstergelerinden biridir. Yeterli sünekliğe sahip yapılar, büyük yer değiştirmelere rağmen ani göçme göstermeden ayakta kalabilirken, düşük sünekliğe sahip yapılar ise ani ve kırılmalı göçme davranışı sergileyebilir. Bu nedenle süneklik, yalnızca bir malzeme özelliği değil, aynı zamanda bir sistem performans kriteridir.

Etkin kesit rijitliği ise betonarme elemanların doğrusal olmayan davranışını mühendislik hesaplarına indirgemek için kullanılan önemli bir parametredir. Betonarme kesitlerde çatlama sonrası rijitlik sürekli olarak değiştii için, tek bir sabit rijitlik değeri ile analiz yapmak gerçeği yansıtmaz. Etkin rijitlik kavramı, bu değişken davranışı eşdeğer bir rijitlik değeri ile temsil ederek yapı analizlerinin daha gerçekçi yapılmasını sağlar. Özellikle deprem hesabında yapı periyotlarının belirlenmesi, yatay yer değiştirme taleplerinin hesaplanması ve ikinci merteye etkilerin değerlendirilmesi açısından etkin rijitlik kritik bir rol oynar.

Bu kitapta ele alınan temel problem, betonarme taşıyıcı sistemlerin doğrusal elastik analiz yöntemleri ile yeterince doğru temsil edilememesidir. Gerçekte betonarme sistemler, yükleme süreci boyunca sürekli değişen bir rijitlik yapısına ve doğrusal olmayan bir kuvvet-şekildeğiştirme davranışına sahiptir. Çatlama, donatı akması ve beton ezilmesi gibi mekanizmalar bu davranışın temel belirleyicileridir. Bu nedenle özellikle deprem etkisinin önemli olduğu bölgelerde, yapı güvenliğinin doğru değerlendirilmesi için doğrusal olmayan davranışın dikkate alınması zorunlu hale gelmektedir.

Kitabın temel amacı, betonarme kiriş, kolon ve perde duvar gibi taşıyıcı elemanların doğrusal olmayan davranışını sistematik olarak incelemek ve bu davranış üzerinde etkili olan temel tasarım parametrelerini ortaya koymaktır. Beton dayanımı, donatı oranı, aksenal yük düzeyi, kesit geometrisi ve yükleme koşulları gibi değişkenlerin moment-eğrilik ilişkisi, süneklik kapasitesi ve etkin rijitlik üzerindeki etkileri ayrıntılı şekilde analiz edilmiştir. Bu sayede, yalnızca teorik bir değerlendirme değil, aynı zamanda mühendislik uygulamalarına doğrudan katkı sağlayabilecek sonuçlar elde edilmesi hedeflenmiştir.

Analizlerde temel yöntem olarak moment-eğrilik yaklaşımı kullanılmıştır. Bu yaklaşımda, kesit boyunca birim şekildeğiştirmelerin düzlem kaldığı varsayımı (Bernoulli hipotezi) esas alınmış ve beton ile donatı çeliği için doğrusal olmayan malzeme modelleri uygulanmıştır. Lif (fiber) tabanlı sayısal modeller kullanılarak kesit davranışı küçük parçalara ayrılmış, her bir lifin gerilme-şekildeğiştirme davranışı ayrı ayrı hesaplanarak toplam kesit davranışı elde edilmiştir. Bu yöntem, betonarme kesitlerin gerçek davranışını yüksek doğrulukla temsil etme imkanı sağlamaktadır.

Çalışma kapsamında izlenen yöntem üç temel aşamadan oluşmaktadır. İlk aşamada beton ve çelik için uygun doğrusal olmayan malzeme modelleri tanımlanmış, farklı literatür yaklaşımları karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. İkinci aşamada seçilen kesitler üzerinde moment-eğrilik analizleri gerçekleştirilmiş ve kesitlerin elastik ve plastik davranış evreleri detaylı olarak incelenmiştir. Üçüncü aşamada ise farklı tasarım parametrelerinin etkileri parametrik çalışmalarla ortaya konulmuş ve elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Bu kitabın önemli özgün katkılarından biri, literatürde Foroughi ve Yüksel (2025; 2026a; 2026b) tarafından önerilen alternatif etkin kesit rijitliği denklemlerinin farklı betonarme eleman türleri için geçerliliğinin sayısal olarak test edilmesidir. Bu sayede mevcut yönetmelik yaklaşımlarının sınırlılıkları ortaya konulmuş ve daha gerçekçi rijitlik tahminleri için yeni bir değerlendirme zemini oluşturulmuştur. Elde edilen sonuçlar, özellikle deprem tasarımı ve performans dayalı analizlerde daha doğru modelleme yapılmasına katkı sağlayacak niteliktedir.

Kitap, betonarme taşıyıcı sistemlerin doğrusal olmayan davranışını sistematik, bütüncül ve mühendislik uygulamalarına yönelik bir çerçevede ele almak amacıyla beş ana bölümden oluşmaktadır. İlk bölümde, betonarme kesitlerin temel davranış prensipleri ayrıntılı olarak incelenmekte; moment-eğrilik ilişkisi, süneklik kavramı ve etkin kesit rijitliği gibi yapı davranışını belirleyen temel parametreler hem teorik hem de sayısal yönleriyle ortaya konulmaktadır. Bu

kapsamda, beton ve donatı çeliği için kullanılan doğrusal olmayan malzeme modelleri tanıtılmakta ve kesit davranışının gerçekçi biçimde temsil edilmesi için gerekli temel varsayımlar açıklanmaktadır. Ayrıca etkin kesit rijitliğinin belirlenmesine yönelik olarak ulusal ve uluslararası yönetmeliklerde yer alan farklı yaklaşımlar karşılaştırmalı bir biçimde değerlendirilmekte, bu yöntemlerin betonarme eleman davranışını temsil etme kapasiteleri tartışılmaktadır. Böylece kitabın ilerleyen bölümlerinde gerçekleştirilecek analizler için hem kuramsal hem de metodolojik açıdan tutarlı ve güçlü bir temel oluşturulmaktadır.

İkinci bölümde betonarme kiriş elemanlarının doğrusal olmayan davranışı ele alınmakta, farklı kesit ve donatı düzenleri için moment-eğrilik ilişkileri ayrıntılı şekilde incelenmektedir. Bu kapsamda kirişlerin süneklik kapasiteleri ve etkin kesit rijitlikleri değerlendirilerek, tasarım parametrelerinin davranış üzerindeki etkileri ortaya konulmaktadır. Elde edilen sonuçlar, kirişlerin deprem etkileri altındaki performansını daha doğru yorumlamaya imkân sağlayacak şekilde analiz edilmektedir.

Üçüncü bölümde, kare, dikdörtgen ve dairesel kesitli betonarme kolonların doğrusal olmayan davranışı ayrıntılı olarak ele alınmaktadır. Bu kapsamda, özellikle aksel yük düzeyi, donatı oranı, beton basınç dayanımı ve kesit geometrisi gibi temel tasarım parametrelerinin moment-eğrilik ilişkisi, süneklik kapasitesi ve etkin rijitlik üzerindeki etkileri sistematik biçimde incelenmektedir. Farklı kesit tiplerine sahip kolonların davranış karakteristikleri karşılaştırmalı olarak değerlendirilerek, yük taşıma mekanizmasındaki değişimler ve rijitlik azalım süreçleri ortaya konulmaktadır. Böylece kolonların hem yerel davranışları hem de taşıyıcı sistem içerisindeki genel yapısal katkıları daha bütüncül bir perspektifle açıklığa kavuşturulmaktadır.

Dördüncü bölümde betonarme perde duvarların davranışı incelenmekte, yüksek rijitlikli bu elemanların moment-eğrilik ilişkileri üzerinden süneklik ve etkin rijitlik özellikleri analiz edilmektedir. Perde duvarların özellikle yatay yükler altındaki davranışları, sistem rijitliği ve enerji sönmeme kapasitesi açısından değerlendirilerek, taşıyıcı sistem davranışına olan katkıları ayrıntılı biçimde ortaya konulmaktadır.

Beşinci ve son bölümde, önceki bölümlerde gerçekleştirilen tüm analizlerden elde edilen bulgular bütüncül bir bakış açısıyla değerlendirilmekte ve sistematik bir şekilde yorumlanmaktadır. Bu kapsamda, kiriş, kolon ve perde elemanlarına ilişkin sonuçlar karşılaştırmalı olarak ele alınarak, her bir taşıyıcı elemanın doğrusal olmayan davranış karakteristikleri arasındaki benzerlikler ve farklılıklar ortaya konulmaktadır. Elde edilen bulguların mühendislik tasarımı ve uygulama süreçlerine yansımaları tartışılarak, özellikle performans dayalı tasarım yaklaşımı çerçevesinde yapı güvenliği ve davranış tahminine yönelik çıkarımlar yapılmaktadır. Buna ek olarak, mevcut ulusal ve uluslararası yönetmeliklerde yer alan tasarım yaklaşımlarının yeterlilik düzeyi değerlendirilmekte; betonarme elemanların gerçek davranışını temsil etme kapasiteleri eleştirel bir bakış açısıyla incelenmektedir. Bu değerlendirmeler ışığında, daha gerçekçi ve güvenilir tasarım yaklaşımlarının geliştirilmesine yönelik öneriler sunulmaktadır. Böylece çalışma, yalnızca analiz sonuçlarını sunmakla kalmayıp, aynı zamanda tasarım felsefesine katkı sağlayan bir çerçeve ortaya koymaktadır.

Sonuç olarak kitap, betonarme taşıyıcı sistemlerin doğrusal olmayan davranışını hem teorik hem de uygulamalı yönleriyle kapsamlı bir biçimde ele alan bütüncül bir kaynak niteliği taşımaktadır. Bu yapı sayesinde çalışma, hem akademik araştırmalar için referans bir kaynak oluşturmakta hem de uygulayıcı mühendisler için betonarme sistemlerin gerçek davranışını daha doğru yorumlamaya imkân veren güçlü bir temel sunmaktadır.

1. BETONARME TAŞIYICI ELEMANLARDA MOMENT-EĞRİLİK, SÜNEKLİK VE ETKİN KESİT RİJİTLİĞİ

Betonarme taşıyıcı elemanların davranışı, doğrusal olmayan malzeme özellikleri ile kesit düzeyindeki gerilme-şekildeğiştirme ilişkilerinin bir sonucu olarak ortaya çıkmakta olup, bu davranışın en temel analitik temsillerinden birini moment-eğrilik ilişkisi oluşturmaktadır. Söz konusu ilişki, kesitin elastik sınırdan plastik davranışa geçişini tanımlayarak taşıma gücü, dönme kapasitesi ve hasar mekanizmalarının değerlendirilmesine olanak sağlamakta; eğrilik parametresi ise kesitteki birim şekildeğiştirme dağılımının bir ölçüsü olarak plastik mafsal oluşumu ve performans düzeylerinin belirlenmesinde kritik rol oynamaktadır. Bu bağlamda süneklik, betonarme elemanların göçme öncesinde önemli plastik deformasyonlar geliştirebilme kapasitesini ifade eden temel bir performans göstergesi olup, donatı oranı, beton dayanımı, eksenel yük düzeyi ve kesit geometrisi gibi parametrelere bağlı olarak değişmekte ve genellikle moment-eğrilik eğrileri üzerinden eğrilik ya da dönme sünekliği cinsinden sayısal olarak tanımlanmaktadır. Diğer yandan, etkin kesit rijitliği; çatlama, donatı akması ve malzeme doğrusal olmama etkilerini içerecek şekilde kesitin gerçek davranışını temsil eden azaltılmış bir rijitlik parametresi olup, özellikle ikinci merteye etkilerin, yer değiştirme taleplerinin ve yapısal periyotların doğru belirlenmesinde büyük önem taşımaktadır. Güncel tasarım yönetmelikleri, doğrusal olmayan davranışı doğrudan modellemek yerine kesit kapasitesi, süneklik ve etkin rijitlik için önerilen ampirik katsayılar ve sınır değerler aracılığıyla pratik ve güvenli tasarım yaklaşımları sunmaktadır. Buna karşılık, literatürde geliştirilen analitik ve sayısal modeller, beton ve donatı için doğrusal olmayan gerilme-şekildeğiştirme bağıntılarını esas alarak moment-eğrilik ilişkisini doğrudan kesit analizi ile elde etmekte; süneklik kapasitesini performans temelli ölçütlerle tanımlamakta ve etkin kesit rijitliğini yük ve hasar düzeyine bağlı değişken bir parametre olarak ele almaktadır. Bu çerçevede, yönetmelik temelli yaklaşımların sağladığı pratiklik ile literatür modellerinin sunduğu yüksek doğruluk düzeyinin birlikte değerlendirilmesi, betonarme sistemlerin hem tasarımında hem de performans analizinde daha güvenilir ve bütüncül sonuçlara ulaşılmasını mümkün kılmaktadır.

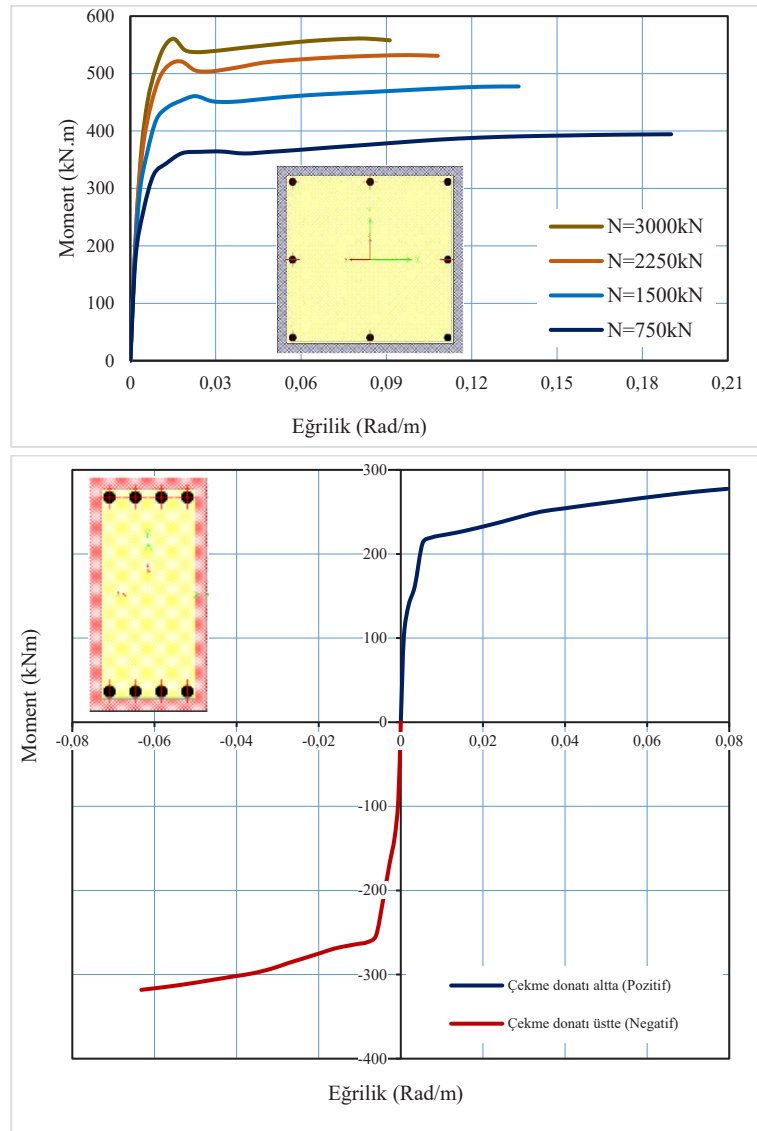
1.1. Betonarme Taşıyıcı Elemanların Moment-Eğrilik Analizi ve Süneklik Değerlendirmesi

Yapısal elemanların davranışı, özellikle deprem gibi aşırı yük ve dinamik etki altında, performansa dayalı tasarım ilkelerinin anlaşılmasında merkezi bir öneme sahiptir. Bu bağlamda, moment-eğrilik ($M-\phi$) analizleri, betonarme kesitlerin eğilme momenti altındaki mekanik tepkilerini sayısal olarak tanımlayan ve deformasyon kapasitesini ortaya koyan temel bir yöntem olarak kabul edilmektedir. Moment-eğrilik eğrileri, elastik sınırdan plastik bölgeye geçişi, donatı akmasını ve nihai göçme aşamalarını temsil ederek elemanların enerji yutma kapasitesinin ve sünekliğinin değerlendirilmesine imkan sağlar (Michael ve Christou, 2011).

Süneklik, bir yapısal elemanın kırılma meydana gelmeden önce plastik deformasyona uğrayabilme kapasitesi olarak tanımlanmakta olup, özellikle sismik yükler altında yapısal güvenliğin sağlanmasında kritik bir parametredir. Yüksek süneklik, enerji yutma kapasitesini artırmakta ve ani kırılma riskini azaltmaktadır (Pratama vd., 2022). Bu nedenle moment-eğrilik analizleri, yalnızca maksimum moment kapasitesini değil, aynı zamanda elemanın deformasyon yoluyla yük taşıma yeteneğini de değerlendirmeye olanak tanır.

1.1.1. Betonarme kesitlerde moment-eğrilik ilişkisi

Betonarme kesitlerin eğilme etkisi altındaki davranışı, moment-eğrilik ilişkisi çerçevesinde incelendiğinde, kesitin mekanik tepkisinin elastik davranıştan göçmeye kadar olan evrimini ortaya koyan ardışık hasar ve deformasyon aşamalarıyla tanımlanır. Bu aşamalar; gerilme-şekildeğiştirme dağılımındaki değişimler, rijitlikteki azalma ve malzeme düzeyindeki doğrusal olmayan etkilerin ilerleyici devreye girmesi ile karakterizedir. Şekil 1.1, tipik bir betonarme elemanın moment-eğrilik davranışını göstermektedir. Eğri, başlangıçta lineer elastik davranışı, ardından donatı akması ile başlayan plastik bölgeyi ve nihai göçme aşamasını açıkça ortaya koymaktadır. Moment-eğrilik eğrisinin dikliği kesitin etkin rijitliği hakkında bilgi verirken, eğrinin yatay uzaması sünekliliğin bir göstergesidir.



Şekil 1.1. Tipik bir betonarme elemanın moment-eğrilik eğrisi.

Moment-eğrilik ilişkisi, kesitte düzlemlerin düzlem kalmaya devam ettiği varsayımına (Bernoulli hipotezi) dayanır ve kesit yüksekliği boyunca birim şekildeğiştirme dağılımı doğrusal kabul edilir. Eğrilik (φ), bir yapısal elemanın eğilme momenti etkisi altındaki geometrik deformasyon karakterini tanımlamakta olup, kesit boyunca birim uzunluğa karşılık gelen dönme oranını ifade etmektedir. Kuramsal olarak eğrilik, basınç ve çekme liflerindeki birim şekildeğiştirmeler (ε_c ve ε_t) arasındaki farkın, bu lifler arasındaki dikey mesafeye (h) bölünmesiyle tanımlanmaktadır ($\varphi = (\varepsilon_c - \varepsilon_t)/h$).

Çatlama öncesi (elastik) aşama:

Uygulanan eğilme momenti betonun çekme dayanımının altında kaldığında, kesitte herhangi bir çatlak oluşumu gözlenmez. Beton ve donatı çeliği doğrusal elastik bölgede davranır; kesit boyunca gerilme dağılımı lineer elastik teori ile uyumludur. Moment-eğrilik eğrisi doğrusal bir seyir izler ve kesit rijitliği sabit kalır. Bu doğrusal davranış, betonun çekme dayanımına ulaşmasıyla birlikte son bulmakta; ilk çatlağın oluşumu ile kesit davranışı farklı bir mekanik evreye geçmektedir.

Çatlamış aşama:

Betonun çekme dayanımının aşılmasıyla birlikte çekme bölgesinde çatlaklar oluşmakta ve buna bağlı olarak kesitin etkin rijitliğinde belirgin bir azalma meydana gelmektedir. Çatlak oluşumunu takiben çekme gerilmeleri büyük ölçüde donatı tarafından karşılanırken, basınç gerilmeleri beton tarafından taşınmaya devam etmektedir. Bu aşamada tarafsız eksen basınç bölgesine doğru yer değiştirmekte; gerilme dağılımı doğrusal formdan saparak doğrusal olmayan bir karakter kazanmaktadır. Çatlakların ilerlemesi, rijitlikte kademeli bir azalmaya neden olmakta ve moment-eğrilik eğrisinin eğimi giderek azalmaktadır. Bu evre, elastik davranıştan plastik davranışa geçiş sürecinde kritik bir ara aşamayı temsil etmektedir.

Akma aşaması:

Çekme donatısının akma gerilmesine ulaşmasıyla birlikte kesitte belirgin plastik deformasyonlar gelişmekte; bu durum, kesitin sünek davranış kapasitesinin etkin biçimde devreye girdiği sınır durumu ifade etmektedir. Bu aşamaya karşılık gelen moment ve eğrilik değerleri sırasıyla akma momenti ve akma eğriliği olarak tanımlanmaktadır. Akma evresinde donatı, önemli düzeyde plastik şekildeğiştirme kapasitesi sergilerken kesitin etkin rijitliği belirgin biçimde azalmaktadır. Moment kapasitesi genellikle tepe değerine yakın bir seviyede seyrederken, eğrilik hızla artmakta ve buna bağlı olarak kesitin enerji yutma kapasitesi önemli ölçüde yükselmektedir.

Göçme aşaması:

Göçme aşaması, kesitin taşıma kapasitesini tamamen yitirdiği nihai sınır durumunu ifade etmektedir. Bu durum çoğunlukla basınç bölgesindeki betonun ezilmesi veya çekme donatısının kopması sonucunda ortaya çıkmaktadır. Göçme anına karşılık gelen moment ve eğrilik değerleri, kesitin nihai dayanımını ve deformasyon kapasitesini tanımlayan temel parametrelerdir. Basınç

bölgesindeki betonun ezilmesiyle gerçekleşen göçme mekanizması, genellikle daha yüksek deformasyon kapasitesi ile ilişkilendirilmekte ve sünek davranışın bir göstergesi olarak kabul edilmektedir. Buna karşılık, çekme donatısının kopmasıyla meydana gelen göçme, sınırlı deformasyon kapasitesi nedeniyle gevrek davranış karakteri sergilemektedir.

1.1.2. Beton ve donatı çeliğinin doğrusal olmayan modellenmesi

Beton ve donatı çeliğinin doğrusal olmayan modellenmesi, betonarme elemanların gerçek davranışının yüksek doğrulukla temsil edilmesi açısından temel bir gerekliliktir. Bu çerçevede, malzeme düzeyinde tanımlanan doğrusal olmayan gerilme-şekildeğiştirme bağıntıları, kesit ve eleman ölçeğinde elde edilen moment-eğrilik ilişkilerinin, süneklik kapasitesinin ve göçme mekanizmalarının yüksek doğrulukla belirlenmesine olanak sağlamaktadır.

Beton modelleri

Betonun basınç altındaki davranışı, düşük şekildeğiştirme seviyelerinde yaklaşık doğrusal olup, artan gerilmelerle birlikte doğrusal olmayan bir karaktere dönüşmekte ve tepe dayanımına ulaşıldıktan sonra yumuşama evresi ile devam etmektedir. Sargı etkisi, betonun basınç dayanımını ve nihai birim şekildeğiştirme kapasitesini artırmak suretiyle malzemenin sünek davranış karakterini belirgin biçimde iyileştirmektedir (Mander vd., 1988; Saatcioğlu ve Razvi, 1999). Buna karşılık, sargı donatısı ile etkin biçimde sınırlandırılmamış beton, tepe gerilimine ulaşıldıktan sonra ani dayanım kaybı sergileyerek gevrek bir davranış karakteri göstermektedir. Çekme bölgesinde ise çatlak oluşumunun ardından, betonun gerilme taşıma kapasitesi büyük ölçüde ortadan kalkmakta ve katkısı ihmal edilebilir seviyeye gerilemektedir.

Donatı çeliğinin modelleri

Donatı çeliğinin davranışı genellikle elastik-plastik veya elastik-pekleşmeli plastik modeller ile tanımlanmaktadır. Elastik bölgede doğrusal bir gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi izleyen çelik, akma gerilmesine ulaşıldıktan sonra önemli düzeyde plastik deformasyon kapasitesi geliştirmektedir. Pekleşme etkisinin dikkate alındığı modellerde, akma sonrasında sınırlı da olsa gerilme artışı gözlenmekte olup, bu durum kesitin taşıma kapasitesinin ve enerji yutma performansının daha gerçekçi biçimde temsil edilmesini sağlamaktadır.

1.1.3. Süneklik tanımı ve hesaplanması

Süneklik, yapısal elemanların ve sistemlerin, özellikle deprem gibi dinamik yükler altında, enerji yutma ve büyük deformasyonlara uğrama kapasitesini ifade eden temel bir performans göstergesidir. Betonarme elemanlarda süneklik, elastik sınır ötesinde şekildeğiştirme yeteneği, enerji sönmüleme kapasitesi ve göçme öncesi uyarı verme özellikleri açısından kritik öneme sahiptir.

Eğrilik sünekliği:

Eğrilik sünekliği (μ_ϕ), bir kesitin sünekliğini kesit düzeyinde sayısal olarak değerlendirmek için yaygın olarak kullanılan bir indekstir ve genellikle nihai eğriliğin (ϕ_u) akma eğriliğine (ϕ_y) oranı olarak tanımlanır ($\mu_\phi = \phi_u/\phi_y$). Akma eğriliği, çekme donatısının ilk akma noktasına karşılık gelen eğrilik değerini ifade ederken, nihai eğrilik, betonun basınç bölgesinde ezilmesi veya çekme donatısının kopması ile karakterize edilen göçme durumunu temsil etmektedir. Eğrilik sünekliği, kesitin plastik deformasyon kapasitesini doğrudan yansıtan bir parametre olarak, kesitteki donatı oranları, beton dayanımı ve betonun çevresinde oluşturulan sargı etkisi gibi malzeme ve geometrik özelliklerden önemli ölçüde etkilenmektedir. Sargı etkisi, betonun basınç ve çatlama altındaki davranışını sınırlandırarak tepe dayanım sonrası sünekliği artırmakta ve kesitin enerji yutma kapasitesini yükseltmektedir. Bu nedenle, eğrilik sünekliği, yalnızca donatı miktarı ve beton kalitesiyle değil, aynı zamanda sargı donatısının kesitteki konumu ve yoğunluğu ile de doğrudan ilişkili olup, performansa dayalı tasarım ve süneklik değerlendirmelerinde kritik bir göstergedir (Yüksel vd., 2020). Yüksek eğrilik sünekliği, kesitin önemli düzeyde plastik deformasyon kapasitesine sahip olduğunu göstermekte ve performansa dayalı tasarım yaklaşımında sünekliği ve enerji yutma kapasitesini değerlendirmek için kritik bir gösterge niteliği taşımaktadır.

Yer değiştirme sünekliği:

Yer değiştirme sünekliği (μ_Δ), bir elemanın veya sistemin genel sünekliğini ölçmek için kullanılan bir diğer önemli göstergedir. Bu parametre, nihai yer değiştirmenin (Δ_u) akma yer değiştirmesine (Δ_y) oranı olarak tanımlanır ($\mu_\Delta = \Delta_u/\Delta_y$). Akma yer değiştirmesi, eleman veya sistemin ilk akma noktasına karşılık gelen değeri ifade ederken, nihai yer değiştirme, göçme durumunu temsil etmektedir. Yer değiştirme sünekliği, özellikle sismik performans değerlendirmelerinde, yapının deprem enerjisini dağıtma ve sönmüleme kapasitesini doğrudan yansıtmaması nedeniyle kritik öneme sahiptir. Ayrıca, eğrilik sünekliği ile yer değiştirme sünekliği arasındaki ilişki, elemanın eksenli boyunca eğrilik dağılımının integrasyonu aracılığıyla kurulabilir; böylece kesit düzeyindeki sünek davranış, sistem düzeyinde de doğru biçimde temsil edilmiş olur.

Enerji temelli süneklik:

Enerji temelli süneklik tanımları, eleman veya sistemlerin plastik deformasyon yoluyla enerji yutma kapasitesine odaklanmaktadır. Bu yaklaşımda süneklik, genellikle nihai göçmeye kadar yutulan toplam enerjinin, akma noktasına kadar yutulan elastik enerjiye oranı şeklinde ifade edilir. Enerji temelli süneklik, deprem mühendisliğinde yapıların sismik enerji girişini dağıtma ve sönmüleme kapasitesini değerlendirmek açısından kritik bir parametredir. Bu yöntem kapsamında moment-eğrilik eğrisi altında kalan alan, elemanın enerji yutma kapasitesinin sayısal bir göstergesi olarak kullanılmakta ve tekrarlı yüklemeler ile deprem etkisi altındaki davranışın daha gerçekçi bir biçimde temsil edilmesini sağlamaktadır. Ayrıca, enerji temelli süneklik tanımları, yalnızca deformasyon kapasitesini değil, aynı zamanda hasar gelişimi ve dayanım kaybı ile birlikte sünek davranışı bütüncül bir biçimde değerlendirme olanağı sunmaktadır (Kristombu Baduge vd., 2019).

Süneklik, betonarme eleman ve yapısal sistemlerin performans temelli tasarım ve değerlendirmelerinde kritik bir parametre olarak kabul edilmektedir. Bu özellik, eğrilik sünekliği,

yer değiştirme sünekliği ve enerji temelli süneklik gibi farklı tanımlamalar aracılığıyla sayısal olarak değerlendirilmektedir. Eğrilik sünekliği, kesit düzeyinde plastik deformasyon kapasitesini yansıtırken; yer değiştirme sünekliği, sistemin genel deformasyon davranışını ve deprem enerjisini dağıtma kapasitesini göstermektedir. Enerji temelli süneklik ise elemanın veya sistemin yüklenme süresince yuttuğu toplam enerjiyi dikkate alarak, hem deformasyon kapasitesini hem de hasar ve dayanım kaybı ile birlikte sünek davranışı bütüncül olarak değerlendirme olanağı sunmaktadır. Bu tanımlar, sünekliğin farklı ölçeklerde ve farklı davranış boyutlarında anlaşılmasını sağlayarak, performansa dayalı tasarım yaklaşımında güvenilir ve kapsamlı bir değerlendirme çerçevesi sunmaktadır.

1.2. Betonarme Taşıyıcı Elemanların Etkin Kesit Rijitlikleri

Betonarme taşıyıcı sistemlerin yapısal analizinde kesit rijitliği, eleman davranışının tanımlanmasında ve iç kuvvet-şekildeğiştirme ilişkilerinin belirlenmesinde temel bir parametre olarak kabul edilir. Ancak betonarmenin malzeme özellikleri, bu rijitliğin yük seviyesine bağlı olarak değişken bir karakter göstermesine neden olmaktadır. Betonun düşük çekme dayanımı nedeniyle çekme bölgesinde erken çatlak oluşumu meydana gelmekte, ilerleyen yük seviyelerinde ise donatı çeliğinin akma davranışı ve betonun doğrusal olmayan gerilme-şekildeğiştirme özellikleri kesitin mekanik yanıtını önemli ölçüde değiştirmektedir. Bu nedenle betonarme elemanların rijitliği sabit bir büyüklük olarak değerlendirilemez ve yüklenme düzeyi arttıkça azalma eğilimi göstermektedir. Deneysel ve sayısal araştırmalar, özellikle tekrarlı veya tersinir yüklemeler altında kesit rijitliğinde belirgin düzeyde azalmalar meydana geldiğini ortaya koymaktadır (Avşar vd., 2014; Foroughi, 2022).

Klasik elastik analiz yaklaşımlarında kesit rijitliği genellikle betonun elastisite modülü ile brüt kesit atalet momentinin çarpımı şeklinde tanımlanan EI_g ifadesi ile temsil edilir. Bu yaklaşım, kesitin çatlama ve elastik davranış gösterdiği varsayımına dayanır. Bununla birlikte betonun çekme dayanımının sınırlı olması nedeniyle servis yükleri seviyesinde dahi çekme bölgesinde çatlak oluşumu kaçınılmazdır. Çatlakların gelişmesiyle birlikte betonun çekme bölgesinin yük taşıma katkısı azalmakta, tarafsız eksenin konumu değişmekte ve kesitin eğilme rijitliği önemli ölçüde azalmaktadır. Bu durum, brüt kesit rijitliğine dayalı analizlerin yapısal davranışı gerçekte olduğundan daha rijit bir biçimde temsil etmesine neden olmakta; buna bağlı olarak deplasmanların, iç kuvvet dağılımlarının ve doğal titreşim periyotları ile mod şekillerinin hatalı tahmin edilmesine yol açabilmektedir.

Bu bağlamda betonarme elemanların gerçek davranışını temsil etmek amacıyla etkin kesit rijitliği kavramı geliştirilmiştir. Etkin rijitlik, çatlama kesitin ortalama eğilme davranışını temsil eden indirgenmiş bir rijitlik parametresi olarak tanımlanır. Başka bir ifadeyle, kesitin yüklenme süreci boyunca çatlama ve tam çatlama durumları arasında sergilediği ortalama davranışı temsil eden eşdeğer bir rijitlik değeri olarak kabul edilir. Bu yaklaşımda etkin rijitlik, çatlak dağılımı, beton-çelik etkileşimi ve yüklenme geçmişi gibi parametrelerin dolaylı etkilerini içeren bir büyüklük olarak ele alınır. Pratik uygulamalarda etkin rijitlik genellikle çatlama kesit rijitliği ile tam çatlama kesit rijitliği arasında değişen bir değer olarak kabul edilmekte ve elemanın deformasyon kapasitesinin daha gerçekçi biçimde tahmin edilmesine olanak sağlamaktadır.

Etkin kesit rijitliği kavramı özellikle deprem etkileri altında gerçekleştirilen doğrusal olmayan analizlerde kritik bir öneme sahiptir. Yapısal sistemin doğal titreşim periyodu, kat öteleme talepleri

ve iç kuvvet dağılımı gibi parametreler doğrudan eleman rijitliklerine bağlıdır. Rijitliğin hatalı tahmin edilmesi durumunda yapı periyodu yanlış hesaplanabilir ve buna bağlı olarak deprem talepleri gerçekçi olmayan sonuçlar verebilir. Performansa dayalı tasarım yaklaşımlarında ise plastik mafsallık bölgelerinde tanımlanan moment-eğrilik ilişkilerinin doğru olarak belirlenmesi için kesit rijitliğinin uygun biçimde temsil edilmesi gerekmektedir. Bu nedenle etkin kesit rijitliği, süneklik kapasitesi ve enerji tüketim potansiyeli gibi performans göstergelerinin güvenilir şekilde değerlendirilmesinde temel parametrelerden biri olarak kabul edilir.

Betonarme elemanların servis davranışının değerlendirilmesinde de kesit rijitliği önemli bir rol oynar. Özellikle sehim kontrolü, çatlak genişliği sınırlamaları ve ikinci merteye etkilerinin belirlenmesinde rijitlik doğrudan belirleyici bir parametredir. Bununla birlikte betonarmenin heterojen yapısı ve malzemelerin doğrusal olmayan davranışı nedeniyle rijitliğin sabit bir katsayı olarak kabul edilmesi fiziksel açıdan gerçekçi değildir. Bu nedenle çağdaş analiz yaklaşımlarında etkin kesit rijitliği; yük seviyesi, donatı oranı, beton basınç dayanımı, enine donatı düzeni ile oluşan sargı etkisi ve malzemelerin gerilme-şekildeğiştirme ilişkilerini dikkate alan eşdeğer bir rijitlik parametresi olarak tanımlanmaktadır.

1.2.1. Betonarmede rijitlik kavramı

Betonarme elemanlarda rijitlik, iç ve dış yükler altında oluşan deformasyonlara karşı elemanın gösterdiği mekanik direnci ifade eder. Betonun çatlaması ve donatı çeliğinin akması gibi doğrusal olmayan davranış mekanizmaları, kesitin rijitliğinin brüt kesit değerinden önemli ölçüde farklılaşmasına neden olur. Bu nedenle betonarme yapıların servis davranışının ve deprem performansının doğru biçimde değerlendirilmesinde etkin rijitlik kavramı temel bir rol oynamaktadır.

Kesit rijitliğini etkileyen başlıca parametreler arasında kesit geometrisi, beton basınç dayanımı, eksenel yük düzeyi ve boyuna-enine donatı oranları yer almaktadır. Betonun düşük çekme dayanımı nedeniyle oluşan çatlaklar, rijitlik kaybının temel nedenini oluşturur ve çekme bölgesindeki gerilmelerin büyük ölçüde donatı çeliği tarafından taşınmasına yol açar (Lan vd., 2025). Basınç yönlü eksenel yükler betonun çatlama eğilimini azaltarak rijitliği artırabilirken, çekme yönlü eksenel yükler rijitlikte azalmaya neden olabilir. Donatı oranı ve dağılımı ise çatlakların gelişimini ve yük aktarım mekanizmasını doğrudan etkileyerek kesitin çatlama sonrası rijitliğini belirleyen önemli faktörler arasındadır.

Kesit rijitliğinin hatalı tahmin edilmesi, yapı elemanlarının gereğinden fazla veya yetersiz boyutlandırılmasına yol açabilir. Mevcut tasarım yönetmelikleri çatlamış kesit rijitliğinin belirlenmesinde genellikle ampirik yaklaşımlara dayanan indirgeme katsayıları kullanmaktadır. Bununla birlikte, ankraj kayması, kesme deformasyonları ve çatlaklar arası beton katkısı gibi mekanizmaları ihmal eden basitleştirilmiş modeller, çoğu zaman etkin kesit rijitliğini gerçekte olduğundan daha yüksek bir değerle tahmin etme eğilimindedir. Bu nedenle özellikle doğrusal olmayan analizlerde ve performans değerlendirmelerinde kesit davranışını daha doğru temsil eden gelişmiş analitik yaklaşımların kullanılması önerilmektedir.

1.2.2. Etkin kesit rijitliğinin kuramsal temelleri

Etkin kesit rijitliği, betonarme kesitlerin doğrusal olmayan davranışını temsil etmek amacıyla geliştirilen teorik bir kavram olup çatlama, donatı akması ve betonun doğrusal olmayan gerilme-şekildeğiştirme davranışının birleşik etkisini dikkate almaktadır (Avşar vd., 2014). Betonarme elemanların kesit geometrisi, beton basınç dayanımı, eksenel yük düzeyi ile boyuna ve enine donatı düzeni gibi parametreler, çatlamış kesitte yük aktarım mekanizması ile deformasyon kapasitesinin belirlenmesinde temel belirleyiciler olarak öne çıkmaktadır (Foroughi ve Yüksel, 2021a).

Yapısal analiz bağlamında rijitlik, bir elemanın uygulanan yükler altında meydana gelen şekildeğiştirmelere karşı gösterdiği direncin analitik bir göstergesi olarak tanımlanmaktadır. Elastik yaklaşım çerçevesinde eğilme rijitliği EI ile ifade edilmekte olup burada E malzemenin elastisite modülünü, I ise kesitin atalet momentini göstermektedir. Bu tanım yalnızca kesitin çatlamamış ve elastik davranış gösterdiği durumlar için geçerlidir. Betonarme elemanlarda çekme bölgesinde çatlakların oluşmasıyla birlikte kesitin gerilme dağılımı değişmekte, tarafsız eksenin konumu yer değiştirmekte ve kesitin etkin atalet momenti azalmaktadır. Buna bağlı olarak elemanın eğilme rijitliği yük seviyesine bağlı olarak değişken bir davranış göstermektedir.

Betonarme taşıyıcı elemanların eğilme davranışı, betonun sınırlı çekme dayanımı ve yükleme sürecinde gelişen çatlak oluşumu nedeniyle doğrusal elastik varsayımlardan önemli ölçüde sapmaktadır. Eğilme etkisi altında çalışan kiriş ve döşeme gibi elemanlarda çekme bölgesinde oluşan çatlaklar kesitin mekanik özelliklerini değiştirerek elemanın deformasyon davranışını doğrudan etkilemektedir. Çatlama sonrasında çekme bölgesindeki betonun yük taşıma katkısı büyük ölçüde azalmakta ve eğilme etkisinden doğan çekme gerilmeleri esas olarak boyuna donatı tarafından karşılanmaktadır. Bu durum kesitin etkin atalet momentinin azalmasına ve dolayısıyla eğilme rijitliğinin düşmesine yol açmaktadır. Bu nedenle betonarme elemanların gerçekçi deformasyon davranışının belirlenebilmesi için çatlama etkilerini dikkate alan indirgenmiş rijitlik parametrelerinin kullanılması gerekmektedir. Bu amaçla betonarme elemanların eğilme davranışı genellikle etkin eğilme rijitliği kavramı ile temsil edilmektedir. Etkin eğilme rijitliği, çatlamış kesitin ortalama davranışını temsil eden eşdeğer bir rijitlik parametresi olup $(EI)_{\text{eff}} = E_c I_e$ şeklinde ifade edilmektedir. $(EI)_{\text{eff}}$ etkin eğilme rijitliğini, E_c betonun elastisite modülünü ve I_e ise çatlama etkilerini dikkate alan etkin atalet momentini göstermektedir.

Etkin atalet momenti, kesitin çatlamamış ve tam çatlamış durumları arasında yer alan bir büyüklük olup kesitte oluşan çatlak dağılımı, moment seviyesi, donatı oranı ve beton-donatı aderans özellikleri gibi çeşitli parametrelerden etkilenmektedir. Bu yaklaşım, betonarme elemanların özellikle servis yükleri altındaki deformasyonlarının daha gerçekçi biçimde hesaplanmasına olanak sağlamaktadır.

Etkin eğilme rijitliğinin mekanik temeli, çatlama sonrasında kesitte gelişen gerilme aktarım mekanizmalarına dayanmaktadır. Betonun çekme dayanımının aşılması ile birlikte kesitte ayırık çatlaklar oluşmakta ve çekme bölgesindeki betonun yük taşıma kapasitesi önemli ölçüde azalmaktadır. Bununla birlikte beton ve donatı arasındaki aderans etkisi sayesinde çatlaklar arasında kalan beton belirli bir seviyeye kadar çekme gerilmelerini taşımaya devam edebilmektedir. Literatürde gerilme sertleşmesi (tension stiffening) olarak adlandırılan bu mekanizma, çatlaklar arasında kalan betonun kısmen yük taşımasına olanak tanıyarak kesitin rijitliğinin ani biçimde azalmasını engellemektedir. Bu etki özellikle servis yükleri altında betonarme elemanların deformasyon davranışının belirlenmesinde önemli bir rol oynamaktadır.

Geleneksel tasarım yaklaşımlarında etkin rijitlik çoğunlukla brüt kesit rijitliğinin belirli indirgeme katsayıları ile çarpılması yoluyla yaklaşık olarak belirlenmektedir. Bu yöntem pratik ve uygulaması kolay olmakla birlikte özellikle doğrusal olmayan davranışın belirgin olduğu durumlarda elemanın gerçek mekanik yanıtını yeterli doğrulukla temsil edemeyebilmektedir (Das vd., 2021). Bu nedenle kesit davranışının daha doğru biçimde değerlendirilmesi amacıyla moment-eğrilik analizleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Moment-eğrilik temelli analizler, kesitin yükleme sürecindeki gerilme dağılımını ve deformasyon gelişimini dikkate alarak çatlama sonrası rijitlik değişimini sayısal olarak ortaya koymakta ve etkin kesit rijitliğinin daha güvenilir biçimde belirlenmesine olanak sağlamaktadır.

1.2.3. Betonarme elemanlarda çatlama öncesi ve sonrası rijitlik davranışı

Betonarme taşıyıcı elemanların mekanik davranışı, betonun sınırlı çekme dayanımı ve beton-çelik kompozit sisteminin doğrusal olmayan malzeme özellikleri nedeniyle yük artışıyla birlikte belirli aşamalar halinde gelişir. Çatlama olgusu yalnızca kesit düzeyindeki gerilme durumunu etkilemekle kalmaz, aynı zamanda elemanın eğilme rijitliği ve deformasyon kapasitesi üzerinde belirleyici bir rol oynar. Çatlakların gelişmesiyle birlikte kesitin etkin atalet momenti azalmakta, buna bağlı olarak elemanın deformasyon talepleri artmakta ve sistem davranışı doğrusal olmayan bir karakter kazanmaktadır. Bu nedenle betonarme elemanların yapısal davranışı çoğu zaman çatlama öncesi davranış ve çatlama sonrası davranış olmak üzere iki temel aşamada incelenmektedir. Bu ayrım, kesit rijitliğinin değerlendirilmesi, moment-eğrilik ilişkilerinin oluşturulması ve doğrusal olmayan analizlerin güvenilir biçimde gerçekleştirilmesi açısından önemli bir kavramsal çerçeve sunmaktadır (Fields ve Bischoff, 2004; Park ve Paulay, 1975; Sturm ve Visintin, 2023).

Çatlama öncesi davranış:

Betonarme elemanların yükleme sürecinin başlangıcında sergilediği davranış, büyük ölçüde doğrusal elastik kuram ile açıklanabilmektedir. Bu aşamada beton ve donatı arasındaki aderans kuvvetleri sayesinde iki malzeme birlikte çalışmakta ve kesitin tamamı yük taşımaya katkıda bulunmaktadır. Eğilme etkisi altında kesit boyunca gerilmeler doğrusal bir dağılım gösterir ve tarafsız eksen, elastik kesit teorisine uygun biçimde kesitin geometrik özellikleri ve malzeme parametrelerine bağlı olarak konumlanır.

Betonun çekme bölgesi henüz çatlamamış olduğundan, çekme gerilmelerinin belirli bir kısmı beton tarafından taşınmakta ve donatı üzerindeki gerilme düzeyi sınırlı kalmaktadır. Bu nedenle kesitin eğilme rijitliği yüksek olup eleman deformasyonları görece küçüktür. Bu aşamada kesitin atalet özellikleri büyük ölçüde çatlamamış kesit atalet momenti ile temsil edilir ve elastik analiz yöntemleri eleman davranışını yeterli doğrulukla açıklayabilir.

Beton ve donatı arasındaki aderansın sağladığı gerilme uyumu, betonarmenin kompozit davranışının temelini oluşturur. Donatı, beton ile birlikte deformasyon yaparak gerilmelerin kesit boyunca uyumlu biçimde aktarılmasını sağlar. Bu durum, betonarmenin başlangıç rijitliğinin yüksek olmasına ve yük altında stabil bir elastik davranış sergilemesine olanak tanımaktadır (MacGregor ve Wight, 2012).

Çatlama sonrası davranış ve rijitlik azalma mekanizmaları:

Betonarme kesitlerde çekme gerilmeleri betonun çekme dayanımını aştığında, kesitin çekme bölgesinde ilk eğilme çatlakları oluşur. Çatlaklar genellikle eğilme momentinin yüksek olduğu bölgelerde ortaya çıkmakta ve yük artışıyla birlikte kesit boyunca yayılma eğilimi göstermektedir. Bu aşamada betonun çekme bölgesindeki etkinliği önemli ölçüde azalır ve kesitteki çekme gerilmeleri esas olarak boyuna donatı tarafından taşınmaya başlanır.

Çatlama sonrası davranışın en önemli sonuçlarından biri, kesitin iç gerilme dağılımının değişmesidir. Betonun çekme bölgesinin etkinliğinin azalmasıyla birlikte tarafsız eksen basınç bölgesine doğru kayar ve donatı üzerindeki çekme gerilmeleri hızla artar. Bu durum kesitin iç kuvvet dengesi üzerinde doğrudan etkili olmakta ve donatının moment taşıma mekanizmasındaki rolünü belirgin biçimde artırmaktadır. Aynı zamanda kesitin etkin atalet momenti önemli ölçüde azalmakta ve buna bağlı olarak elemanın eğilme rijitliği belirgin şekilde azalmaktadır (Bischoff ve Scanlon, 2007).

Çatlama sonrası davranış ayrıca kesitin moment-eğrilik ilişkisi üzerinde de belirgin değişimlere yol açmaktadır. Çatlama öncesinde moment ile eğrilik arasındaki ilişki doğrusal bir karakter gösterirken, ilk çatlak oluşumundan sonra eğrinin eğimi azalmakta ve kesit davranışı doğrusal olmayan bir karakter kazanmaktadır. Yük seviyesinin artmasıyla birlikte donatı gerilmeleri akma sınırına yaklaşmakta, beton basınç bölgesinde ise doğrusal olmayan deformasyonlar gelişmektedir. Bu süreç, moment-eğrilik eğrisinin eğiminin kademeli olarak değişmesine neden olmaktadır. Bu doğrusal olmayan davranışın doğru biçimde modellenmesi, özellikle performans temelli deprem tasarımı ve gelişmiş yapısal analizlerde büyük önem taşımaktadır (Park ve Paulay, 1975; Sturm ve Visintin, 2023).

Kesit rijitliğinde meydana gelen azalma yalnızca eleman düzeyinde değil, yapı sisteminin genel davranışında da önemli etkiler yaratmaktadır. Rijitlikteki azalma yapı sisteminin global rijitliğini düşürmekte, buna bağlı olarak yapı periyodu uzamakta ve iç kuvvet dağılımı değişebilmektedir. Bu nedenle çatlama sonrası davranışın analitik modellerde dikkate alınmaması durumunda deplasman talepleri ve iç kuvvetler hatalı biçimde tahmin edilebilir.

Bu bağlamda betonarme elemanların gerçekçi yapısal davranışının temsil edilebilmesi için çatlama sürecinin ve buna bağlı rijitlik değişimlerinin analitik modellerde dikkate alınması gerekmektedir. Etkin kesit rijitliği kavramı, çatlama sonrası rijitlik azalmasının temsil edilmesinde kullanılan temel yaklaşımlardan biri olup betonarme yapıların servis ve deprem davranışının daha güvenilir biçimde değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır.

1.2.4. Etkin kesit rijitliğini belirleyen parametreler

Betonarme taşıyıcı elemanlarda etkin kesit rijitliği sabit bir büyüklük olmayıp, kesit geometrisi, malzeme özellikleri ve yüklenme koşullarının birlikte etkilediği değişken bir parametredir. Çatlama, gerilme aktarım mekanizmaları ve donatı-beton etkileşimi gibi süreçler, kesitin yük altındaki deformasyon davranışını doğrudan etkileyerek rijitlikte kademeli bir değişime yol açmaktadır. Bu nedenle etkin kesit rijitliği, kesit özelliklerinin yanı sıra elemanın yüklenme geçmişi ve hasar seviyesi ile de ilişkilidir.

Etkin kesit rijitliğini belirleyen başlıca parametreler aşağıda özetlenmektedir:

Kesit geometrisi, kesitin eğilme rijitliğini belirleyen temel faktörlerden biridir. Kesit boyutları ve geometrik şekil, atalet momentinin büyüklüğünü ve tarafsız eksenin konumunu doğrudan etkiler. Özellikle yüksekliğin artması kesit rijitliğini önemli ölçüde artırırken, karmaşık kesit geometrilerinde çatlak oluşumu ve gerilme dağılımının analitik olarak temsil edilmesi daha güç hale gelebilmektedir.

Eksenel yük düzeyi, betonarme kolon ve perde elemanlarının yapısal davranışını belirleyen temel bir parametredir. Moment-eğrilik ilişkisi açısından, eksenel yük artışı eğrilik kapasitesinin düşmesine ve plastik mafsal oluşumunun daha düşük dönme taleplerinde gerçekleşmesine yol açmaktadır. Bu durum, elemanın enerji yutma kapasitesini ve performans dayalı tasarım kriterlerini olumsuz etkileyerek, yüksek eksenel yüklerin rijitlik artışına karşın süneklik açısından kritik bir sınırlayıcı olduğunu ortaya koymaktadır.

Beton basınç dayanımı, kesitin basınç bölgesinde taşınabilecek gerilme seviyesini belirleyen önemli bir malzeme parametresidir. Yüksek dayanımlı beton kullanımı, basınç bölgesindeki gerilme-şekildeğiştirme davranışını değiştirerek kesitin eğilme kapasitesini ve çatlama sonrası rijitliğini etkileyebilmektedir.

Boyuna donatı oranı, betonarme kesitlerin eğilme kapasitesi ve deformasyon gelişimi üzerinde belirleyici bir rol oynar. Donatı miktarının artması, kesitin çekme bölgesinde taşınabilecek kuvveti artırarak moment kapasitesini yükseltmekte ve çatlama sonrası yük aktarım mekanizmasının daha etkin şekilde gerçekleşmesine katkı sağlamaktadır.

Enine donatı ve sargılama, özellikle plastik deformasyonların geliştiği bölgelerde betonun davranışını önemli ölçüde iyileştirmektedir. Enine donatı tarafından sağlanan sargılama etkisi, çekirdek betonun dayanımını ve deformasyon kapasitesini artırarak elemanın artık rijitliğinin korunmasına katkıda bulunur.

Bu parametrelerin birlikte etkisi, betonarme kesitlerde rijitliğin yük seviyesine ve hasar gelişimine bağlı olarak değişken bir karakter sergilemesine neden olmaktadır. Bu nedenle etkin kesit rijitliği, elemanın gerçek davranışını temsil eden indirgenmiş fakat fiziksel temelli bir mühendislik parametresi olarak kullanılmaktadır.

1.2.5. Betonarme kesitlerde moment-eğrilik temelli rijitlik değerlendirilmesi

Betonarme taşıyıcı sistemlerin deprem etkileri altındaki davranışının güvenilir biçimde modellenmesi, kesit rijitliğinin yük seviyesine bağlı değişiminin doğru şekilde temsil edilmesine bağlıdır. Betonarme elemanlarda yük artışıyla birlikte çekme bölgesinde çatlak oluşumu, betonun doğrusal olmayan basınç davranışı ve donatı çeliğinin akma mekanizmaları devreye girmekte; bu durum kesit rijitliğinde önemli azalmalar meydana getirerek elemanların yük-şekildeğiştirme davranışını belirgin biçimde doğrusal olmayan bir karaktere dönüştürmektedir. Bu nedenle betonarme elemanların davranışının yalnızca çatlama kesit rijitliğine dayalı elastik modeller ile temsil edilmesi, özellikle deprem mühendisliği uygulamalarında gerçekçi sonuçlar vermemektedir. Kesit davranışının güvenilir biçimde değerlendirilebilmesi için rijitlik değişiminin hasar gelişimi ile birlikte ele alındığı davranış temelli yaklaşımların kullanılması gerekmektedir.

Betonarme kesit davranışının analitik olarak değerlendirilmesinde moment-eğrilik ($M-\phi$) ilişkisi temel yöntemlerden biri olarak kabul edilmektedir (Park ve Paulay, 1975; Priestley vd., 2007). Moment-eğrilik analizi, kesitte oluşan eğilme momenti ile buna karşılık gelişen eğrilik arasındaki ilişkiyi tanımlayarak kesitin deformasyon gelişimini, rijitlik değişimini ve doğrusal olmayan davranış özelliklerini ortaya koymaktadır. Bu yöntem sayesinde kesitte yük artışı ile birlikte meydana gelen gerilme ve şekildeğiştirme dağılımlarının gelişimi izlenebilmekte ve kesitin dayanım ile deformasyon kapasitesi güvenilir biçimde değerlendirilebilmektedir.

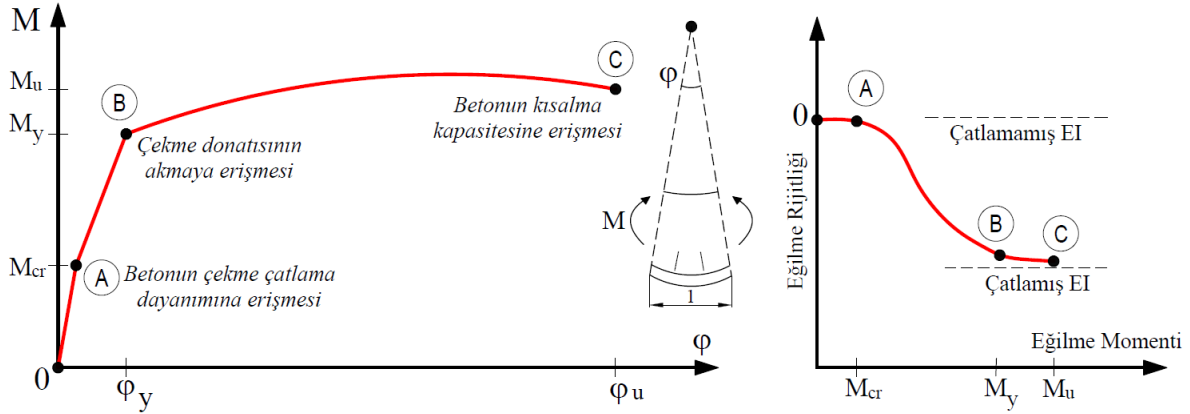
Moment-eğrilik analizleri aynı zamanda betonarme elemanların etkin kesit rijitliğinin belirlenmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yaklaşımda etkin kesit rijitliği EI_e , moment-eğrilik eğrisinin başlangıç bölgesindeki eğim ile temsil edilmekte ve çoğunlukla akma momentinin (M_y) akma eğriliğine (ϕ_y) oranı şeklinde (M_y/ϕ_y) ifade edilmektedir. Bu tanım, kesitte meydana gelen çatlama etkisi ile birlikte kesitin teorik akma davranışını dikkate alarak betonarme elemanların gerçek rijitlik seviyesinin temsil edilmesine olanak sağlamaktadır.

Betonarme taşıyıcı elemanlara ait çatlamamış kesit rijitliği (EI), betonun elastisite modülü (E_c) ile kesitin brüt atalet momentinin (I) çarpımı olarak hesaplanmaktadır. TS500 (2000)'de verilen beton karakteristik basınç dayanımlarına (f_{ck}) bağlı olarak beton elastisite modülü $E_c = 3250\sqrt{f_{ck}} + 14000$ bağıntısı ile belirlenmektedir. Betonarme elemanların etkin rijitlik katsayısı ise, etkin kesit rijitliğinin çatlamamış kesit rijitliğine oranı olarak tanımlanmakta ve $k_e = EI_e/EI$ ifadesiyle hesaplanmaktadır.

Betonarme kesitlerde yük artışı ile birlikte kesit davranışı doğrusal elastik bölgeden çatlaklı davranış bölgesine ve nihayetinde plastik davranış evresine geçmektedir. Bu süreçte betonun çekme bölgesinde çatlak oluşumu ile betonun çekme katkısı hızla azalmakta ve kesitin etkin eğilme rijitliğinde önemli bir düşüş meydana gelmektedir. Yük artmaya devam ettikçe çatlak sayısı ve çatlak açıklıkları artmakta, kesit davranışı çatlaklı kesit özellikleri tarafından kontrol edilmeye başlamaktadır. Donatı akmasının başlaması ile birlikte plastik deformasyonlar gelişmekte ve eğrilik artışı moment artışına göre daha hızlı gerçekleşmektedir. Nihai aşamada betonun basınç bölgesinde ezilmesi ile kesit nihai moment kapasitesine ulaşmaktadır.

Betonarme kesitlerde rijitliğin moment seviyesine bağlı değişimi ve kesit davranışının farklı evreleri Şekil 1.2'de şematik olarak gösterilmektedir. Şekil, yük artışı ile birlikte kesitin çatlamamış elastik davranıştan çatlaklı davranışa ve nihayetinde plastik deformasyon evresine geçişini ortaya koyarak eğilme rijitliğinde meydana gelen kademeli azalmayı göstermektedir.

Moment-eğrilik ilişkisi, betonarme kesitlerin dayanım kapasitesi, deformasyon gelişimi, rijitlik değişimi ve süneklik özelliklerinin değerlendirilmesinde temel bir analiz aracı niteliğindedir. Kesit rijitliğindeki azalma eğiliminin doğru şekilde temsil edilmesi, özellikle doğrusal olmayan yapısal analizler, performans dayalı tasarım yaklaşımları ve deprem mühendisliği uygulamaları açısından kritik önem taşımaktadır.



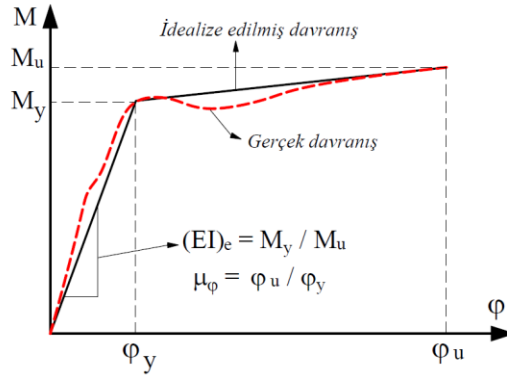
Şekil 1.2. Betonarme bir kesitin yük artışı altındaki tipik moment-eğrilik ($M-\phi$) davranışı ve buna karşılık gelen eğilme rijitliğinin değişimi.

Şekil 1.2’de, eğrinin başlangıç bölümünde kesit çatlamamış durumda olup yüksek bir başlangıç eğilme rijitliği söz konusudur (A noktası). Betonun çekme dayanımına ulaşmasıyla birlikte ilk çatlak oluşmakta (M_{cr}) ve bu aşamadan sonra kesitin etkin rijitliği belirgin biçimde azalmaktadır. Çatlaklı kesit davranışının gelişmesi ve donatı akmasının başlaması ile rijitlikte ilave azalmalar meydana gelmektedir (B noktası). Nihai aşamada betonun basınç bölgesinde ezilmesi ile kesit nihai moment kapasitesine ulaşmaktadır (C noktası).

1.2.6. Betonarme elemanlarda eğrilik sünekliği ve etkin kesit rijitliği ilişkisi

Betonarme yapı elemanlarının deprem performansının değerlendirilmesinde yalnızca taşıma kapasitesinin belirlenmesi yeterli değildir. Yapısal elemanların deprem etkileri altında güvenli bir biçimde davranabilmesi, aynı zamanda yeterli deformasyon kapasitesine sahip olmalarına bağlıdır. Özellikle doğrusal olmayan davranışın hakim olduğu deprem yüklemelerinde elemanların enerji yutma yeteneği, plastik deformasyon geliştirme kapasitesi ve sünek davranış gösterebilme potansiyeli, yapı güvenliğinin temel belirleyicileri arasında yer almaktadır. Bu bağlamda, betonarme kesitlerin davranışının değerlendirilmesinde eğrilik sünekliği ve etkin kesit rijitliği parametreleri kritik öneme sahiptir.

Moment-eğrilik ilişkisi, kesitte oluşan eğilme momenti ile buna karşılık gelişen eğrilik arasındaki bağıntıyı ifade ederek kesitin hem dayanım hem de deformasyon özelliklerinin birlikte değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır. Gerçek moment-eğrilik eğrisi genellikle doğrusal olmayan ve karmaşık bir formda olduğundan, mühendislik uygulamalarında çoğu zaman idealize edilmiş bir davranış modeli ile temsil edilmektedir. Bu idealizasyon, kesit davranışının karakteristik noktalarının belirgin bir biçimde tanımlanmasına ve deformasyon kapasitesinin değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır (Şekil 1.3).



Şekil 1.3. Betonarme kesitlerde moment-eğrilik ilişkisinin idealize edilmiş gösterimi ile eğrilik sünekliliği ve etkin kesit rijitliği kavramlarının şematik tanımı.

Eğrilik sünekliliği (μ_ϕ), betonarme kesitin elastik sınırın ötesinde geliştirebildiği plastik deformasyon kapasitesini sayısal olarak tanımlayan kritik bir parametredir ve kesitin akma eğriliği (ϕ_y) ile nihai eğriliği (ϕ_u) arasındaki oran ile ifade edilir ($\mu_\phi = \phi_u / \phi_y$). Yüksek eğrilik sünekliliğine sahip elemanlar, elastik sınırın ötesinde önemli plastik deformasyonlar geliştirebilmekte ve böylece deprem enerjisinin büyük bir kısmını tüketerek yapısal hasarın kontrollü biçimde oluşmasına katkı sağlamaktadır.

Etkin kesit rijitliği (EI_e) ise, çatlama sonrası betonarme kesitlerin değişen eğilme davranışını temsil eden indirgenmiş bir rijitlik parametresidir. Kesitteki çatlakların yayılması ve malzemenin doğrusal olmayan davranışı nedeniyle EI_e , yük seviyesine bağlı olarak değişmekte olup, belirli bir moment seviyesinde moment ile eğrilik oranı olarak tanımlanabilir ($EI_e = M/\phi$). Bu parametre, kesitin belirli bir yük düzeyinde gösterdiği ortalama eğilme rijitliğini yansıtmaktadır.

Eğrilik sünekliliği ile etkin kesit rijitliği, betonarme elemanların elastik ve plastik davranışlarını birlikte değerlendiren tamamlayıcı performans göstergeleridir. Artan aksenal yük, çatlak gelişimini sınırlayarak etkin kesit rijitliğini artırmakta, ancak betonun sınır deformasyonlarına daha erken ulaşmasına yol açarak eğrilik sünekliliğini azaltmaktadır.

1.3. Yönetmeliklere Göre Etkin Rijitlik Katsayıları

Betonarme yapıların deprem performansının değerlendirilmesinde etkin rijitlik katsayılarının önemi, ulusal ve uluslararası yapı ve deprem yönetmeliklerinde açık biçimde vurgulanmaktadır. Bununla birlikte farklı yönetmeliklerin etkin rijitlik katsayılarının belirlenmesine ilişkin yaklaşımları; tasarım felsefesi, kullanılan analiz yöntemleri, hedeflenen performans düzeyleri ve güvenlik anlayışları bakımından farklılık gösterebilmektedir. Bu nedenle yönetmeliklerde önerilen etkin rijitlik katsayıları, yapıların güvenli ve ekonomik tasarımında kritik bir mühendislik parametresi olarak kabul edilmektedir (Dalyan ve Şahin, 2019).

Deprem mühendisliği uygulamalarında elastik kesit özelliklerine dayalı rijitlik kabullerinin betonarme elemanların gerçek davranışını yeterli düzeyde temsil edememesi nedeniyle, birçok yönetmelikte çatlaklı kesit davranışını dikkate alan indirgenmiş rijitlik katsayılarının kullanılması önerilmektedir. Bu katsayılar, elemanlarda meydana gelen çatlama, malzeme doğrusal

olmayanlıkları ve hasar gelişiminin analizlere dolaylı olarak dahil edilmesine olanak tanımakta ve deprem performansına ilişkin tahminlerin daha güvenilir biçimde yapılmasını sağlamaktadır.

Bu bölümde betonarme taşıyıcı elemanlar için önerilen etkin rijitlik katsayıları; Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY, 2018), Amerikan Beton Enstitüsü tarafından yayımlanan Betonarme Yapılar için Yapısal Beton Tasarım Gereklilikleri Yönetmeliği (ACI 318, 2014), Mevcut Binaların Deprem Performansının Değerlendirilmesi ve Güçlendirilmesi Standardı (ASCE/SEI 41, 2017), Betonarme Yapıların Tasarımı (Eurocode 2, 2004), Depreme Dayanıklı Yapıların Tasarımı (Eurocode 8, 2004) ve Eurocode 8-Part 3: Binaların Değerlendirilmesi ve Güçlendirilmesi (Eurocode 8, 2005) yönetmelikleri kapsamında incelenmektedir. Her bir yönetmeliğin etkin rijitlik kavramına yaklaşımı, önerilen katsayılar ve uygulama esasları ilgili alt başlıklar altında sistematik olarak ele alınmakta; böylece yönetmelikler arasındaki temel benzerlikler ve farklılıklar karşılaştırmalı bir çerçevede değerlendirilmektedir. Bu inceleme, betonarme yapıların deprem analizlerinde kullanılan etkin rijitlik kabullerinin kuramsal temellerinin ve mühendislik uygulamalarındaki etkilerinin bütüncül biçimde anlaşılmasına katkı sağlamayı amaçlamaktadır.

1.3.1. TBDY (2018)'de betonarme taşıyıcı elemanlar için önerilen etkin rijitlik katsayısı

Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY, 2018), betonarme taşıyıcı elemanların deprem etkisi altındaki davranışlarını değerlendirirken, etkin rijitlik kavramını hasar düzeyine bağlı bir çerçevede tanımlamaktadır. Yönetmelik, kolon ve kirişlerde çatlama ve plastikleşmeye kadar farklı deformasyon evrelerini dikkate alarak, eleman rijitliğinin yüklemeye ve hasar durumuna bağlı olarak azalmasını öngörmektedir. Bu yaklaşım, yalnızca elastik kesit rijitliğinin değerlendirilmesinin deprem performansını doğru biçimde yansıtamayacağı varsayımına dayanmaktadır.

TBDY (2018), etkin rijitlik katsayılarını performans dayalı analizlerde kullanmayı zorunlu kılmaktadır. Bu yaklaşım, elemanların elastik davranıştan doğrusal olmayan davranışa geçişini ve rijitlik kayıplarını modelleme sürecine doğrudan yansıtarak, sistem düzeyinde iç kuvvet dağılımı, deplasman kapasitesi ve süneklik özelliklerinin daha gerçekçi biçimde tahmin edilmesini sağlamaktadır. Böylece, doğrusal elastik analizlerle elde edilecek sonuçların yetersiz kaldığı durumlarda, yapı performansı güvenilir bir şekilde değerlendirilebilmektedir.

Doğrusal analizlerde TBDY (2018), betonarme elemanların elastik kesit rijitliklerini belirli katsayılarla indirgemeyi önerirken, doğrusal olmayan analizlerde etkin rijitlik, sabit bir katsayı ile temsil edilmemektedir. Bunun yerine, elemanların moment-eğrilik ve kuvvet-şekildeğiştirme ilişkileri doğrudan tanımlanmaktadır. Bu kapsamda rijitlik, yük-şekildeğiştirme eğrisinin eğimi ile belirlenmekte; elastik aşamada yüksek, çatlama ve plastikleşme sonrasında ise azalan bir karakter göstermektedir. Beton ve donatı malzemelerinin doğrusal olmayan gerilme-şekildeğiştirme davranışlarına dayandırılan bu tanım, rijitliğin yüklemeye ve hasar gelişimine bağlı olarak değişimini açık biçimde ortaya koymaktadır (Öztaş ve Torunbalcı, 2023; Foroughi vd., 2020; TBDY, 2018). TBDY (2018) kapsamında önerilen etkin rijitlik katsayıları, doğrusal ve doğrusal olmayan analizlerde betonarme elemanların deprem davranışını güvenilir biçimde temsil etmek için geliştirilmiştir. Katsayılar, eleman bazında hasar düzeyini, donatı düzenini ve malzeme özelliklerini doğrudan içermemekle birlikte, pratik ve uygulanabilir bir mühendislik yaklaşımı sunmaktadır. Dayanımaya göre tasarım kapsamında, bu katsayılar yalnızca deprem etkili yük kombinasyonlarında uygulanmakta ve yapıların sismik performansının doğru tahmin edilmesini sağlamaktadır (Tablo 1.1).

Tablo 1.1. Betonarme taşıyıcı elemanlar için etkin kesit rijitliği çarpanları (TBDY, 2018)

Betonarme Taşıyıcı Sistem Elemanları	Etkin Kesit Rijitlik Katsayıları	
	<i>Eksenel</i>	<i>Kayma</i>
<i>Perde-Döşeme (Düzlem İçi)</i>		
Perde	0.50	0.50
Bodrum Perdesi	0.80	0.50
Döşeme	0.25	0.25
<i>Perde-Döşeme (Düzlem Dışı)</i>		
Perde	0.25	1.0
Bodrum Perdesi	0.50	1.0
Döşeme	0.25	1.0
<i>Çubuk Elemanı</i>		
Bağ Kirişi	0.15	1.0
Çerçeve Kirişi	0.35	1.0
Çerçeve Kolonu	0.70	1.0
Perde (Eşdeğer Çubuk)	0.50	0.50

Yığılı plastik davranışa göre modellenen betonarme elemanların (kolon, kiriş, bağ kirişi ve perde) etkin kesit rijitlikleri $(EI)_e$, Denklem (1.1)'de tanımlanmaktadır. Denklemde M_y ve θ_y , çubuk elemanın uçlarındaki plastik mafsalların etkin akma momentleri ve akma dönmelerinin ortalamalarını göstermektedir. L_s ise kesme açıklığıdır (M/V); kolon ve kirişlerde yaklaşık olarak açıklığın yarısı, betonarme perde duvarlarda ise her katın tabanından perde tepesine olan yüksekliğin yarısı olarak alınmaktadır (TBDY, 2018).

$$(EI)_e = \frac{M_y L_s}{\theta_y 3} \quad (1.1)$$

Doğrusal olmayan analizlerde, deprem etkisi altındaki yapıların şekildeğiştirmeye göre performans değerlendirmesi ve tasarımında, Sınırlı Hasar (SH) performans düzeyine ulaşan taşıyıcı sistemlerde plastik mafsall oluşumuna izin verilmemektedir. Bu kapsamda, taşıyıcı elemanların akma durumuna karşılık gelen yer değiştirmiş plastik mafsall akma dönmesi Denklem (1.2) ile hesaplanmaktadır. Yeni yapılacak binaların şekildeğiştirmeye göre değerlendirilme ve tasarımında beton ve donatı çeliği için TBDY (2018)'de tanımlanan beklenen dayanımları esas alınacaktır ($f_{ce}=1.3f_{ck}$, $f_{ye}=1.2f_{yk}$). f_{ce} ve f_{ck} sırasıyla betonun ortalama ve karakteristik basınç dayanımlarıdır. Betonarme kiriş ve kolonlarda $\eta=1$, perdelerde ise $\eta=0.5$ alınacaktır. θ_y değeri, elemanın elastik davranış sınırını aşmadan önce oluşabilecek maksimum dönmeyi temsil eder ve SH performans düzeyinde taşıyıcı sistemin güvenli ve hasarsız kalmasını sağlayacak şekilde tanımlanmıştır

$$\theta_y = \frac{\varphi_y L_s}{3} + 0.0015\eta \left(1 + 1.5 \frac{h}{L_s} \right) + \frac{\varphi_y d_b f_{ye}}{8\sqrt{f_{ce}}} \quad (1.2)$$

TBDY (2018), betonarme taşıyıcı elemanlar için etkin rijitlik katsayılarını doğrusal analizlerde pratik ve güvenli bir modelleme aracı, doğrusal olmayan analizlerde ise hasar gelişimine bağlı değişken bir parametre olarak ele alan bütüncül bir yaklaşım sunmaktadır. Bu yöntem, betonarme yapıların deprem performansını daha gerçekçi, tutarlı ve mühendislik açısından güvenilir bir biçimde değerlendirmeyi mümkün kılmaktadır (Dalyan ve Şahin, 2019; Çoşut vd., 2023).

1.3.2. Eurocode 2 (2004)'te betonarme taşıyıcı elemanlar için önerilen etkin rijitlik katsayısı

Eurocode 2 (EN 1992-1-1:2004), betonarme basınç elemanlarının ikinci mertebeye etkiler altındaki davranışını, çatlama, sünme ve donatı katkısı gibi doğrusal olmayan etkiler dikkate alınarak tanımlamaktadır. Bu yaklaşım, betonarme kolon ve benzeri basınç elemanlarının gerçekçi rijitlik seviyelerinin belirlenmesine imkan tanımaktadır. Buna göre, nominal eğilme rijitliği (EI), beton ve donatı katkıları ayrı ayrı dikkate alınarak Denklem (1.3) ile ifade edilmektedir. Bu denklem, betonarme basınç elemanlarının zaman ve yükleme etkileriyle değişen rijitliğinin hesaplanmasında standartlaştırılmış ve mühendislik uygulamaları açısından güvenilir bir yöntem sunmaktadır.

$$EI = K_c E_{cd} I_c + K_s E_s I_s \quad (1.3)$$

Denklem (1.3)'te; E_{cd} , betonun tasarım elastisite modülünü; I_c , beton kesitine ait atalet momentini; E_s , donatı çeliğinin tasarım elastisite modülünü; I_s , donatı alanlarının beton kesit ağırlık merkezine göre ikinci alan momentini; K_c , betonun çatlama, sünme ve zamanla rijitlik kaybını temsil eden azaltma katsayısını; K_s ise donatı katkısını ifade etmektedir. Bu yaklaşım, betonarme kesitin rijitliğini oluşturan beton ve donatı katkılarını ayrı ayrı ele almaktadır. Beton için rijitliği azaltan çatlama ve zaman bağımlı etkiler tanımlanırken, donatı çeliğinin elastik katkısı doğrudan hesaba katılmaktadır. Bu sayede, Eurocode 2 (2004) betonarme eleman rijitliğini yalnızca elastik bir parametre olarak değil, etkili (nominal) bir büyüklük olarak değerlendirmektedir (Elwood ve Eberhard, 2009).

Çatlama ve sünme etkilerinin temsili:

Eurocode 2 (2004)'e göre, geometrik donatı oranı $\rho = A_s/A_c \geq 0.002$ olduğunda, donatı katkısı tamamen dikkate alınmakta ve ilgili katsayılar Denklem (1.4) ile tanımlanmaktadır.

$$K_s = 1.0K_c = \frac{K_1 K_2}{1 + \varphi_{ef}} \quad (1.4)$$

Denklemde; φ_{ef} , betonun uzun süreli yükler altındaki etkin sünme katsayısını temsil eder; K_1 , beton basınç dayanım sınıfına bağlı olarak rijitlik kaybını düzenlerken, K_2 eksenel yük seviyesi ve eleman narinliğini dikkate alır. İlgili katsayılar Denklem (1.5) ile belirlenmektedir.

$$K_1 = \sqrt{\frac{f_{ck}}{20}} \quad K_2 = \frac{n\lambda}{170} \leq 0.20 \quad (1.5)$$

Denklemden; $n = N_{Ed}/(A_c f_{cd})$ normalleştirilmiş aksel kuvvet oranını, $\lambda = l_0/i$ ise eleman narinlik oranını ifade etmektedir. l_0 etkin boy, i ise çatlama beton kesitine ait dönme yarıçapıdır. Dikdörtgen kesitlerde dönme yarıçapı eğilme doğrultusundaki kesit boyutunun yaklaşık %30'u, dairesel kesitlerde ise çapın %25'i olarak kabul edilebilmektedir. Narinlik oranının açık biçimde tanımlanamadığı durumlarda $K_2 = 0.30n \leq 0.20$ ifadesi kullanılabilir. Bu yaklaşım, aksel yük seviyesinin artmasıyla betonun basınç bölgesindeki çatlama düzeyinin azalacağı ve buna bağlı olarak etkin kesit rijitliğinin artacağı varsayımına dayanmaktadır; ancak söz konusu artış, belirli bir üst sınırla sınırlandırılarak aşırı rijitlik tahminlerinin önüne geçilmektedir.

Yüksek donatı oranları için alternatif yaklaşım:

Eurocode 2 (2004), geometrik donatı oranının $\rho \geq 0.01$ olduğu durumlarda, rijitlik ve kapasiteyi güvenlik odaklı bir şekilde, yani yapısal kapasiteyi daha düşük tahmin eden ve olası aşırı deformasyon veya hasar risklerini minimize eden bir yaklaşım ile basitleştirmektedir. Bu durumda, donatı katkısı ihmal edilmekte ve betonarme elemanın etkin rijitliği yalnızca betonun etkili elastisite modülü $E_{cd,eff}$ üzerinden tanımlanmaktadır (Denklemler 1.6). Buna bağlı olarak betonun etkili elastisite modülü Denklem (1.7)'de tanımlanmaktadır. Bu yaklaşım, özellikle yüksek donatı oranına sahip kolon ve kirişlerde basitleştirilmiş ve güvenli bir tasarım varsayımı sunarak mühendislik uygulamalarında pratik bir yöntem sağlamaktadır.

$$K_s = 0 \quad , \quad K_c = \frac{0.3}{1 + 0.5\varphi_{ef}} \quad (1.6)$$

$$E_{cd,eff} = \frac{E_{cd}}{1 + \varphi_{ef}} \quad (1.7)$$

Bu yaklaşım, betonun uzun süreli yükler altındaki sünme etkilerini elastisite modülüne doğrudan yansıtarak rijitlik hesaplarını basitleştirmekte ve özellikle servis yükleri altında yüksek donatı oranına sahip elemanlar için güvenli ve uygulanabilir sonuçlar sağlamaktadır (Koosha vd., 2023). Eurocode 2 (2004) tarafından önerilen etkin rijitlik yöntemi, betonarme eleman davranışını yarı-deneysel ve yarı-ampirik katsayılarla temsil etmekte olup, çatlama, sünme ve aksel yük etkilerini analize doğrudan dahil etmesi bakımından sabit rijitlik kabullerine kıyasla önemli avantajlar sunmaktadır. Ancak, moment-eğrilik temelli yaklaşımlarla karşılaştırıldığında, kesit bazındaki davranış farklılıklarını sınırlı düzeyde yansıttığı gözlemlenmektedir (Haselton vd., 2016; Elwood ve Eberhard, 2009). Son çalışmalar, Eurocode 2'de verilen nominal rijitlik değerlerinin yüksek süneklilik talebine sahip deprem bölgelerinde güvenli tarafta kaldığını, ancak plastikleşme potansiyeli ve enerji yutma kapasitesi gibi kritik performans parametrelerini doğrudan temsil edemediğini göstermektedir (Biskinis ve Fardis, 2004; Foroughi ve Yüksel, 2023). Bu nedenle, Eurocode 2 yaklaşımı doğrusal analizler ve ön boyutlandırma için uygun olmakla birlikte, performans dayalı tasarım ve doğrusal olmayan analizlerde moment-eğrilik temelli yöntemlerle desteklenmelidir.

1.3.3. Eurocode 8 (2004)'te betonarme taşıyıcı elemanlar için önerilen etkin rijitlik katsayısı

Eurocode 8 (EN 1998-1:2004), betonarme taşıyıcı elemanların doğrusal elastik analizlerinde çatlak oluşumu ve donatı akmasının rijitlik üzerindeki etkilerini dikkate almayı amaçlamaktadır. Bu yaklaşım, betonarme elemanların gerçek davranışını daha iyi yansıtarak, özellikle sismik ve titreşim etkilerini içeren dinamik sistem analizlerinde yapı periyotlarının doğru tahmin edilmesini sağlamaktadır (Wong vd., 2017; Fardis vd., 2005). Eurocode 8, çatlaklı kesitlerin elastik eğilme ve kayma rijitliklerini, çatlamamış kesitlerin elastik rijitlik değerlerinin yaklaşık %50'si olarak kabul etmeyi önermektedir; bu öneri, betonun düşük çekme dayanımına bağlı çatlak oluşumunun kesitin etkin moment ataletini önemli ölçüde azaltmasıyla uyumludur. Böylece çatlak sonrası eleman rijitliği, brüt kesit varsayımının öngördüğü değerden daha gerçekçi bir biçimde temsil edilmektedir. Doğrusal analizlerde etkin eğilme rijitliği EI_{eff} , çatlamamış kesitin elastik moment ataletinin yaklaşık yarısı olarak ifade edilmektedir ($EI_{\text{eff}} \approx 0.5 EI_{\text{gross}}$), burada EI_{gross} çatlamamış kesitin elastik rijitliğini temsil etmektedir. Bu yaklaşım, doğrusal analizlerde güvenli ve mühendislik açısından uygulanabilir bir yöntem sunmaktadır.

1.3.4. Eurocode 8 (2005)'te betonarme taşıyıcı elemanlar için önerilen etkin rijitlik katsayısı

Eurocode 8 (EN 1998-3:2005), betonarme taşıyıcı elemanların etkin rijitlik katsayısının belirlenmesinde, yalnızca sabit oranlara dayalı basit bir indirgeme yerine parametrik bir yaklaşım önermektedir. Bu yöntem, moment-kayma oranı ve akma dönmesi (θ_y , yield rotation) ilişkilerini kullanarak, elemanın plastik mafsallarda davranışını doğrusal analizlerde daha gerçekçi biçimde temsil etmeyi amaçlamaktadır. Etkin elastik eğilme rijitliği (EI_{eff}), her bir elemanın uçlarında oluşan plastik mafsallarda tanımlanan akma momenti (M_y) ile akma durumundaki uç dönmesi (θ_y) arasındaki ilişki üzerinden hesaplanmaktadır (Denklem 1.8).

$$(EI)_{\text{eff}} = \frac{M_y L_V}{3 \theta_y} \quad (1.8)$$

Denklemde:

- M_y : Plastik mafsallarda uçlarındaki akma momenti değeridir,
- L_V : Kesme açıklığı (moment/kayma kuvveti oranına karşılık gelen uzunluk) olup, genellikle eleman uzunluğunun yarısına eşit olarak alınabilir,
- θ_y : Plastik mafsalda akma durumuna karşılık gelen eleman uç dönmesini (chord rotation) ifade etmektedir.

Bu tanım, doğrusal olmayan davranış modelleri kullanılmaksızın, doğrusal analizlerde sekant rijitliği olarak uygulanabilecek bir yaklaşım sunmakta; böylece elastik varsayım yerine, çatlama ve akma sınırına yaklaşmış eleman davranışını daha doğru temsil eden bir rijitlik elde edilmektedir. θ_y , elemanın geometrik ve malzeme özelliklerine bağlı olarak belirlenmekte ve eleman tipine göre değişkenlik göstermektedir. Bu parametrik değerler, Eurocode 8 (2005) tarafından önerilen yaklaşımı yansıtmaktadır ve her eleman tipi için uygun formülasyonlar aşağıda sunulmuştur:

Betonarme kolon ve kiriş için:

$$\theta_y = \varphi_y \frac{L_V + a_V z}{3} + 0.0014 \left(1 + 1.5 \frac{h}{L_V} \right) + \frac{\varepsilon_y}{d - d'} \frac{d_{bL} f_y}{6\sqrt{f_c}} \quad (1.9a)$$

veya kolon ve kirişler için alternatif denklem:

$$\theta_y = \varphi_y \frac{L_V + a_V z}{3} + 0.0014 \left(1 + 1.5 \frac{h}{L_V} \right) + \varphi_y \frac{d_{bL} f_y}{8\sqrt{f_c}} \quad (1.9b)$$

Betonarme perde duvarlar için:

$$\theta_y = \varphi_y \frac{L_V + a_V z}{3} + 0.0013 + \frac{\varepsilon_y}{d - d'} \frac{d_{bL} f_y}{6\sqrt{f_c}} \quad (1.10a)$$

Betonarme perde duvarlar için alternatif denklem:

$$\theta_y = \varphi_y \frac{L_V + a_V z}{3} + 0.0013 + \varphi_y \frac{d_{bL} f_y}{8\sqrt{f_c}} \quad (1.10b)$$

Denklemlerde φ_y kesitteki akma eğriliği, $a_V z$ eğilme momenti diyagramının çekme kayması, a_V ise kesme-moment ilişkisine bağlı bir katsayıyı göstermektedir; bu katsayı duruma bağlı olarak 0 veya 1 değerini alabilir ($a_V = 0$ eğer $V_{RC} > M_y/L_s$ ve $a_V = 1$ eğer $V_{RC} \leq M_y/L_s$). z betonarme kesitte basınç ve çekme kuvvetleri arasındaki iç moment kolu uzunluğunu temsil etmektedir; bu uzunluk, kesitin etkin derinliği ve donatı yerleşimine bağlı olarak belirlenir ve moment kapasitesinin hesaplanmasında kritik bir parametredir. Kirişlerde, kolonlarda veya T kesitli perde duvarlarda $z = d - d'$ ve dikdörtgen kesitli perde duvarlarda $z = 0.8$ olarak dikkate alınır. h kesit yüksekliği, çekme ve basınç donatılarının derinlikleri sırasıyla d ve d' ile belirtilirken, d_{bL} ortalama çekme donatı çapını temsil eder. Donatının akma birim deformasyonu $\varepsilon_y = f_y/E_s$ ile ifade edilir. Beton silindir basınç dayanımı f_c ve donatı akma dayanımı f_y ise malzeme özelliklerini yansıtmaktadır. A_{sL} çekme donatı alanı, b_w çekme alanındaki enine kesitin en küçük genişliğidir (mm), N_{Ed} enine kesitte yükleme veya aksel kuvvettir ve A_c beton kesit alanıdır (mm²). $C_{Rd,c}$, V_{min} ve K_1 değerleri ulusal standartlardan elde edilir. $C_{Rd,c}$ için tavsiye edilen değer $0.18/\gamma_c$ 'dir, V_{min} için Denklem (1.14) ile elde edilir ve K_1 değeri 0.15'tir.

$$V_{Rd,c} = [C_{Rd,c} K(100\rho_1 f_{ck})^{1/3} + K_1 \sigma_{cp}] b_w d \quad (N) \quad (1.11)$$

Minimum:

$$V_{Rd,c} = (V_{min} + K_1 \sigma_{cp}) b_w d \quad (1.12)$$

$$K = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2 \quad , \quad \rho_1 = \frac{A_{sl}}{b_w d} \leq 0.02 \quad , \quad \sigma_{cp} = \frac{N_{Ed}}{A_c} < 0.2 f_{cd} \quad (1.13)$$

$$V_{min} = 0.035 K^{3/2} f_{ck}^{1/2} \quad (1.14)$$

Bu parametrik yaklaşım, akma dönmesini yalnızca elemanın geometrik ve malzeme parametrelerine bağlı olarak belirlemekle kalmayıp, akma evresindeki deformasyon talebini daha doğru biçimde tahmin etmeye olanak tanımaktadır. Bu bağlamda etkin rijitlik, sabit katsayı ile indirgenmiş elastik rijitlik yerine, elemanın plastik davranışıyla uyumlu parametreler üzerinden tanımlanmakta ve moment-kayma oranı ile akma durumundaki eleman uç dönmesi (θ_y) arasındaki ilişkiye dayalı olarak hesaplanmaktadır.

1.3.5. ACI 318 (2014)'te betonarme taşıyıcı elemanlar için önerilen etkin rijitlik katsayısı

ACI 318 (2014), betonarme yapı elemanlarının doğrusal elastik analizlerinde beton çatlaklarının rijitlik üzerindeki etkisini dikkate almak amacıyla belirli etkin rijitlik faktörleri önermektedir. Bu faktörler, çatlama sonrası elemanın elastik atalet momenti (I) değerinin, çatlamamış (brüt) atalet momenti (I_g) değerine oranı olarak tanımlanır, hem statik hem de sismik analizlerde etkin rijitlik değerlerinin belirlenmesine imkan sağlar. ACI 318 (2014)'e göre etkin eğilme rijitliği, elemanın çatlamış veya çatlamamış durumuna göre farklılaştırılmaktadır. Kirişler ve çatlamış perde duvarlar için etkin atalet momenti $0.35I_g$, kolonlar ve çatlamamış perde duvarlar için ise $0.70I_g$ olarak dikkate alınmaktadır. Tablo 1.2'de, ACI 318 (2014)'te önerilen bu azaltma katsayıları özetlenmektedir.

Tablo 1.2. Azaltma faktörleri (ACI 318, 2014)

Taşıyıcı eleman	Etkin eğilme rijitliği
Kiriş	$0.35I_g$
Kolon	$0.70I_g$
Çatlamamış perde duvar	$0.70I_g$
Çatlamış perde duvar	$0.35I_g$

ACI 318 (2014) kapsamında önerilen etkin rijitlik katsayıları, betonun çatlama sonrası rijitlik kaybını yansıtmakta ve özellikle çatlak oluşumu ile plastik davranışın başladığı durumlarda elemanın rijitlik özelliklerini daha gerçekçi bir biçimde temsil etmektedir. Bu katsayılar, öncelikli olarak deprem etkisi altındaki doğrusal ve doğrusal olmayan analizlerde kullanılmak üzere önerilmektedir; diğer yük kombinasyonlarında ise brüt kesit rijitlik değerleri tercih edilebilir.

ACI 318 (2014) ayrıca, betonarme elemanların etkin kesit atalet momentinin belirlenmesinde klasik sabit katsayı yaklaşımına ek olarak, kolon ve perde gibi düşey taşıyıcı elemanlar için parametrik hesap yöntemlerinin kullanımına da imkan tanımaktadır. Bu yöntemde, elemanın faktörlü eğilme momenti (M_u), faktörlü eksenel kuvveti (P_u) ve kesit geometrik özellikleri arasındaki ilişki temel alınarak etkin rijitlik tahmin edilir. Betonarme perde duvarlarda etkin rijitlik, eğilme ve kesme etkisi altında oluşan çatlakların rijitlik azaltıcı etkisini temsil eden indirgeme katsayıları ile belirlenir; böylece doğrusal elastik analizlerde, perde elemanlarının gerçekçi deformasyon davranışı güvenilir biçimde temsil edilir. Basınç elemanları için etkin atalet momenti, kesit donatı oranı ve yükleme durumunu dikkate alan parametrik bir formülasyon ile belirlenir:

$$I = \left(0.80 + 25 \frac{A_{st}}{A_g} \right) \left(1 - \frac{M_u}{P_u h} - 0.5 \frac{P_u}{P_o} \right) I_g \leq 0.875 I_g \quad (1.15)$$

Denklemden, A_{st} boyuna donatının toplam alanını, A_g beton kesitin brüt alanını, h kesit yüksekliğini, P_o nominal eksenel yük kapasitesini, M_u nihai momenti ve P_u faktörlü eksenel kuvveti göstermektedir. Bu yaklaşım, klasik sabit katsayıların ötesine geçerek, basınç elemanlarının gerçek donatı ve yükleme durumunu yansıtan bir etkin atalet değeri üretir. ACI 318 (2014)'e göre, basınç elemanları için hesaplanan etkin atalet momenti $0.35I_g$ 'den, eğilme elemanları için ise $0.25I_g$ 'den küçük olmamalıdır. Eğilme elemanları, özellikle kirişler için alternatif bir formülasyon da beton ve donatı oranını dikkate alacak şekilde Denklem (1.16)'da ifade edilmiştir. Denklemden ρ düşey donatı oranını, b_w kesit genişliğini ve d faydalı yükseklik değerini göstermektedir. Bu formülasyon, kirişlerde etkin rijitliğin hem betonarme davranışına hem de donatı oranına bağlı olduğunu açıkça ortaya koymaktadır.

$$I = (0.10 + 25\rho) \left(1.2 - 0.2 \frac{b_w}{d} \right) I_g \leq 0.5 I_g \quad (1.16)$$

ACI 318 (2014) kapsamında önerilen katsayılar (Örn. 0.35, 0.70) mühendislik kabulüne dayalı ortalama değerler olup, güvenli bir yaklaşım sunmaktadır. Bununla birlikte parametrik formülasyonlar, donatı oranı, kesit geometrisi, moment ve eksenel kuvvet gibi parametreleri dikkate alarak etkin rijitlik hesaplamasına olanak sağlamaktadır.

1.3.6. ASCE/SEI 41'de betonarme taşıyıcı elemanlar için önerilen etkin rijitlik katsayısı

ASCE/SEI 41 (2017) standardı, mevcut betonarme yapıların sismik değerlendirilmesi ve güçlendirilmesi süreçlerinde, taşıyıcı elemanların çatlama ve hasar durumlarını dikkate alarak etkin rijitliklerin belirlenmesini sağlayan esasları ortaya koymaktadır. Bu standart, mevcut yapıların doğrusal elastik analizleri ile gerçek sismik davranışı arasındaki uyumu artırmayı hedeflemekte ve betonarme elemanların çatlama ile elastik olmayan davranışlarını yansıtan özel rijitlik katsayıları önermektedir. Etkin rijitlik değerleri, elemanın davranışı ve üzerindeki düşey yük oranına bağlı olarak değişmekte ve üç temel bileşende tanımlanmaktadır: eğilme rijitliği, kayma rijitliği ve

eksenel rijitlik. Her bileşen, eleman tipi ve maruz kaldığı yükler dikkate alınarak farklılaştırılmakta ve böylece sismik performans analizleri ile güçlendirme tasarımlarında daha gerçekçi ve güvenilir hesaplamalar yapılmasına olanak sağlamaktadır (Han vd., 2019).

ASCE/SEI 41 (2017) standardında, mevcut betonarme taşıyıcı elemanlar için önerilen rijitlik azaltma katsayıları, eleman tipi ve üzerindeki düşey yük durumuna göre belirlenmiş olup, Tablo 1.3'te sunulmuştur. Bu katsayılar, yapıların çatlama sonrası davranışını ve elastik olmayan deformasyonlarını dikkate alarak, doğrusal elastik analizlerin gerçek sismik performansla uyumlu olmasını mümkün kılmaktadır. Tabloda yer alan parametreler aşağıdaki şekilde tanımlanmaktadır: E_{CE} , betonun elastisite modülü esas alınarak düzenlenmiş etkin elastisite modülünü ifade etmektedir. I_g , kesitin brüt atalet momentini temsil etmekte olup, elemanın eğilme rijitliğinin belirlenmesinde temel bir geometrik büyüklük niteliğindedir. A_w , yükleme doğrultusunda etkili olan net enine beton alanını göstermekte ve özellikle kesme davranışının değerlendirilmesinde belirleyici bir rol oynamaktadır. A_g , kesitin brüt beton alanını tanımlarken; A_s , kesitte bulunan toplam boyuna donatı alanını ifade etmektedir.

Tablo 1.3. Betonarme taşıyıcı elemanlar için rijitlik azaltma katsayı değerleri (ASCE/SEI 41, 2017)

Betonarme Eleman Tipi	Eğilme Rijitliği	Kayma Rijitliği	Eksenel Rijitliği
Kirişler: Ön Gerilmemiş	$0.3E_{CE}I_g$	$0.4E_{CE}A_w$	--
Kirişler: Ön Gerilmli	$E_{CE}I_g$	$0.4E_{CE}A_w$	--
Tasarım Düşey Yüklerinden dolayı kolonda oluşan eksenel kuvvet $\geq 0.5A_gf'_{CE}$	$0.7E_{CE}I_g$	$0.4E_{CE}A_w$	$E_{CE}A_g$
Tasarım Düşey Yüklerinden dolayı kolonda oluşan eksenel kuvvet $\leq 0.1A_gf'_{CE}$ veya kolonda çekme kuvveti olması.	$0.3E_{CE}I_g$	$0.4E_{CE}A_w$	$E_{CE}A_g$ (Basınç) $E_{CE}A_s$ (Çekme)
Perde duvarlar: Çatlamış	$0.35E_{CE}A_g$	$0.4E_{CE}A_w$	$E_{CE}A_g$ (Basınç) $E_{CE}A_s$ (Çekme)

ASCE/SEI 41 (2017) standardı kapsamında tanımlanan etkin rijitlik katsayıları, betonarme elemanların sismik yükler altındaki davranışını, çatlamış ve çatlamamış durumlar ile eksenel yük seviyelerindeki farklılıkları dikkate alan parametrik bir yaklaşım çerçevesinde ele almaktadır. Özellikle kolon elemanlarında, eksenel yük yüksek olduğunda ($N \geq 0.5A_gf'_{CE}$) eğilme rijitliği için önerilen katsayı $0.7E_{CE}I_g$ 'ye kadar yükselirken; eksenel yük düşük veya elemanda çekme oluşması durumunda, bu katsayı $0.3E_{CE}I_g$ değerine kadar düşmektedir. Bu parametre bağımlılığı, mevcut yapıların sismik performans analizlerinde doğrusal elastik modellemeler ile gerçek davranış arasındaki uyumu artırmakta ve deformasyon taleplerinin daha tutarlı şekilde hesaplanmasına imkan tanımaktadır.

1.3.7. Yönetmeliklere göre etkin rijitlik katsayılarının karşılaştırılması

Betonarme taşıyıcı sistemlerin deprem etkisi altındaki davranışlarının güvenilir biçimde tahmin edilebilmesi, çatlama sonrası rijitlik kaybının ve doğrusal olmayan malzeme davranışının analitik modellere uygun biçimde yansıtılmasına bağlıdır. Bu amaçla çağdaş deprem ve betonarme tasarım yönetmelikleri, elastik kesit rijitliklerinin belirli katsayılarla indirgenmesini öngören etkin kesit rijitliği kavramını geliştirmiştir. Ancak, bu katsayıların tanımı, kapsamı ve analize entegrasyon biçimi yönetmelikler arasında önemli farklılıklar göstermektedir.

TBDY (2018), etkin rijitliği performans dayalı bir çerçevede ele alarak, doğrusal analizlerde eleman türüne bağlı indirgeme katsayıları sunmakta, doğrusal olmayan analizlerde ise moment-eğrilik ilişkilerinden türetilen plastik mafsal modelleri aracılığıyla hasar düzeyine duyarlı rijitlik kaybını doğrudan hesaba katmaktadır. Bu yaklaşım, çatlama, donatı akması ve beton ezilmesi gibi ardışık davranış evrelerini bütüncül biçimde temsil ederek, yüksek süneklik talebi olan sistemlerde gerçekçi performans analizlerine olanak tanımaktadır.

Eurocode 2 (2004), etkin rijitliği ağırlıklı olarak servis durumu ve ikinci mertebe etkiler çerçevesinde parametrik bir yaklaşımla tanımlar. Beton ve donatının katkıları ayrı ayrı ele alınmakta, betonun çatlama davranışı ve uzun süreli yük etkileri indirgeme katsayıları aracılığıyla dolaylı biçimde modellenmektedir. Bu yaklaşım, rijitliğin eksenel yük seviyesi, eleman narınlığı ve beton dayanımı gibi temel parametrelerle ilişkilendirilmesini sağlayarak, kolon ve perdelerde ikinci mertebe etkilerinin daha gerçekçi biçimde hesaplanmasını mümkün kılmaktadır.

Eurocode 8 (2004), çatlama elemanlarda rijitliği sabit bir oran (%50) üzerinden indirgerken, Eurocode 8 (2005) moment-eğrilik ilişkileri ve plastik mafsal temelli parametrik bir tanımlamayı benimsemektedir. Bu mekanik temelli yaklaşım, kesit geometrisi, donatı düzeni ve malzeme özelliklerini dikkate alarak etkin rijitliğin daha doğru ve fiziksel temellere dayalı olarak belirlenmesini sağlamaktadır.

ACI 318 (2014), pratik tasarım odaklı hibrit bir yaklaşım sunar; sabit indirgeme katsayıları ile çatlama sonrası rijitlik kaybını temsil etmenin yanı sıra, donatı oranı, eksenel yük ve moment büyüklüğüne bağlı parametrik hesaplara da olanak tanır. Böylece rijitlik, elemanın gerçek kesit özellikleri ve yükleme koşulları ile uyumlu biçimde modellenmektedir.

ASCE/SEI 41 (2017) ise mevcut yapıların sismik değerlendirmesine odaklanır ve eğilme, kayma ile eksenel rijitlikler için parametre duyarlı katsayılar tanımlar. Bu yöntem, elemanların farklı iç kuvvet bileşenleri altındaki davranışlarını, sabit katsayı yerine mekanizma temelli ve yüklemeye duyarlı bir biçimde modele yansıtarak, doğrusal elastik analizlerden elde edilen deformasyon ve iç kuvvet taleplerinin gerçek hasar mekanizmalarına daha yakın olmasını sağlar.

Genel olarak, yönetmeliklerde etkin rijitlik tanımları, sabit katsayı temelli basit modellerden, parametrik ve mekanik temelli hasar duyarlı modellere doğru evrilmiştir. Sabit indirgeme katsayıları, hızlı ve pratik tasarım için uygundur; ancak yüksek süneklik talepleri, ileri performans hedefleri ve mevcut yapı değerlendirmelerinde moment-eğrilik ilişkilerine dayalı mekanik temelli yaklaşımlar daha güvenilir ve gerçekçi sonuçlar sunmaktadır. Bununla birlikte, yüksek donatı oranlı kolonlar, yüksek dayanımlı beton kesitleri ve karmaşık perde sistemleri gibi durumlarda rijitlik tahminlerinde halen belirsizlikler mevcuttur. Bu nedenle, çevrimsel davranışı ve hasar gelişimini açık biçimde modelleyen yeni parametrik ve mekanik temelli etkin rijitlik modellerinin geliştirilmesi, güncel araştırmalar ve yönetmelik uygulamaları için öncelikli bir gereklilik olarak öne çıkmaktadır.

1.4. Betonarme Elemanlar İçin Literatürde Önerilen Etkin Kesit Rijitliği Modelleri

Betonarme taşıyıcı elemanların etkin kesit rijitliği, özellikle çatlama sonrasında ortaya çıkan doğrusal olmayan davranışların doğrusal analiz çerçevesinde temsil edilmesinin gerekli olduğu sismik ve servis yükleme koşullarında, taşıyıcı sistem davranışını belirleyen kritik parametrelerden biri olarak öne çıkmaktadır. Betonun çekme bölgesinde çatlama meydana gelmesiyle birlikte eleman rijitliği önemli ölçüde azalmakta; bu durum, elastik rijitliğin doğrudan kullanıldığı analizlerin, yer değiştirme ve iç kuvvet taleplerini olduğundan farklı tahmin etmesine neden olabilmektedir. Bu nedenle literatürde etkin rijitlik kavramı, çatlamış kesit davranışını esas alan ve doğrusal olmayan mekanizmaları dolaylı biçimde dikkate alan modeller aracılığıyla tanımlanmaktadır.

Mevcut çalışmalarda etkin kesit rijitliği, ağırlıklı olarak parametrik bağıntılar, moment-eğrilik ($M-\phi$) analizleri ve deneysel gözlemler temelinde ele alınmaktadır. Bu yaklaşımlar, eleman geometrisi, beton basınç dayanımı, boyuna ve enine donatı oranları ile eksenel yük seviyesi gibi temel tasarım parametrelerinin rijitlik üzerindeki etkilerini bütüncül bir çerçevede değerlendirmekte ve sabit indirgeme katsayılarına dayalı yaklaşımlara kıyasla daha gerçekçi ve güvenilir etkin rijitlik tahminleri sunmaktadır. Böylece, özellikle performansa dayalı tasarım ve değerlendirme çalışmalarında, taşıyıcı eleman davranışının daha doğru biçimde temsil edilmesi mümkün hale gelmektedir.

Bu bağlamda Foroughi ve Yüksel (2025; 2026a; 2026b), Avşar vd. (2014), Biskinis (2007), Biskinis ve Fardis (2004) ile Fenwick ve Bull (2000) tarafından geliştirilen modeller, betonarme kiriş, kolon ve perde duvar elemanlarının etkin kesit rijitliğinin belirlenmesinde literatürde sıkça başvurulan temel referanslar arasında yer almaktadır. Söz konusu çalışmalar, analitik ve parametrik yöntemler aracılığıyla çatlamış kesit davranışının modellenmesine, moment-eğrilik ilişkilerinin ayrıntılı olarak incelenmesine ve deneysel verilerin analitik sonuçlarla ilişkilendirilmesine odaklanmaktadır. Bu sayede etkin rijitlik katsayıları, eleman tipine, yükleme durumuna ve malzeme özelliklerine duyarlı bir biçimde tanımlanabilmektedir.

Literatürde yer alan araştırmalar, etkin rijitliğin sabit bir katsayı ile temsil edilmesinin, özellikle yüksek eksenel yük seviyeleri ve ileri hasar durumlarında yetersiz kaldığını açıkça ortaya koymaktadır. Bunun yerine, etkin rijitliğin moment-eğrilik ilişkilerinden ve kesit düzeyindeki mekanik davranıştan türetilmesinin, taşıyıcı sistem davranışının daha gerçekçi biçimde tahmin edilmesini sağladığı vurgulanmaktadır. Bu yaklaşım, hem sismik performans analizlerinde hem de servis sınır durumlarına yönelik tasarım süreçlerinde etkin rijitliğin belirleyici rolünü ön plana çıkarmaktadır (Wong vd., 2017).

Parametrik modellerin ortak özelliği, etkin rijitliği belirleyen temel faktörleri sistematik bir biçimde tanımlamalarıdır. Eksenel yük seviyesi, beton basınç dayanımı, boyuna ve enine donatı oranları ile eleman geometrisi, rijitlik üzerinde etkili olan başlıca değişkenler olarak öne çıkmaktadır (Foroughi ve Yüksel, 2021a). Bu parametreler dikkate alınarak geliştirilen modeller, sabit katsayı yaklaşımının ötesine geçerek, hem teorik temellere hem de deneysel bulgulara dayalı bir etkin rijitlik tanımı sunmaktadır.

Fenwick ve Bull (2000) tarafından önerilen yaklaşımda, özellikle konsol ve perde duvar elemanları için eksenel yük seviyesi, donatı düzeni ve beton dayanımının etkileri çok parametrelili bir çerçevede ele alınmış ve etkin rijitlik, parametrik bağıntılar aracılığıyla ifade edilmiştir. Biskinis ve Fardis

(2004) ile Biskinis (2007) ise plastik mafsalda akma durumuna karşılık gelen eleman uç dönme (chord rotation) esaslı modeller önererek plastikleşme sürecini dikkate alan fiziksel temelli etkin rijitlik tanımları geliştirmiştir. Avşar vd. (2014), moment-eğrilik ilişkilerine dayalı parametrik bir model geliştirerek kiriş ve kolon elemanlarında etkin kesit rijitliğinin beton ve donatı özelliklerine bağlı olarak tanımlanabileceğini göstermiştir. Foroughi ve Yüksel (2025; 2026a; 2026b) betonarme kolon, kiriş ve perde duvar elemanlarının çatlama kesit davranışını temsil eden moment-eğrilik analizlerine dayalı kapsamlı bir parametrik inceleme gerçekleştirerek; beton dayanımı, donatı oranı ve eksenel yük düzeyi gibi temel tasarım parametrelerini içeren bir etkin kesit eğilme rijitliği bağıntısı önermiştir. Bu çalışmalar, etkin kesit rijitliğinin taşıyıcı sistem analizlerindeki kritik rolünü ortaya koymakta ve betonarme yapıların gerçekçi davranışının analitik olarak daha doğru temsil edilmesine katkı sağlamaktadır.

1.4.1. Fenwick ve Bull (2000) tarafından önerilen etkin kesit rijitlik katsayısı

Fenwick ve Bull (2000) tarafından yürütülen çalışma, betonarme perde duvarların etkin kesit rijitliği üzerinde üç temel parametrenin etkisini sistematik olarak incelemiştir: eksenel yük, boyuna donatı akma dayanımı ve beton basınç dayanımı. Bu çalışma, betonarme elemanların doğrusal olmayan davranışlarını daha doğru bir şekilde modelleyebilmek amacıyla parametrik bir yaklaşım benimsemiştir.

Araştırmanın sonuçları, düşey donatı akma dayanımı ve eksenel yük oranının, perde elemanlarının etkin rijitliği üzerinde belirleyici bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Bunun yanında beton basınç dayanımı (f'_c) da etkin rijitlik üzerinde etkili bir parametre olarak tanımlanmıştır. Özellikle eğilme deformasyonlarına maruz kalan konsol betonarme perde duvarlar için, etkin atalet momenti (I_e) ile çatlama kesitinin eylemsizlik momenti (I_g) arasındaki ilişki deneysel veriler ve parametrik analizler temelinde analitik olarak formüle edilmiştir. Fenwick ve Bull (2000) tarafından önerilen etkin rijitlik bağıntısı aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir:

$$\frac{I_e}{I_g} = 0.267 \left(1 + 4.4 \frac{P_u}{f'_c A_g} \right) \left(0.62 + \frac{190}{f_y} \right) (0.76 + 0.005 f'_c) \quad (1.17)$$

Denklemden; I_e , elemanın etkin atalet momentini, I_g ise çatlama kesitinin atalet momentini temsil etmektedir. P_u , eleman üzerindeki faktörlü eksenel yükü; f_y , boyuna donatının akma dayanımını; f'_c ise beton basınç dayanımını (MPa) göstermektedir. Denklem, eksenel yük ve donatı özelliklerinin etkilerini parametrik olarak açıkça yansıtırken, beton dayanımının etkin rijitliğe olan katkısını da modellemektedir.

Bu parametrik model, özellikle konsol ve perde duvar elemanlarının sismik performans analizlerinde güvenilir bir çerçeve sağlamaktadır. Elde edilen bağıntı, geleneksel sabit katsayı temelli yöntemlerin ötesine geçerek, perde duvar davranışını daha gerçekçi bir şekilde temsil eder. Sismik değerlendirme, güçlendirme ve performans tabanlı tasarım çalışmalarında, etkin rijitlik değerlerinin daha doğru ve güvenilir bir biçimde belirlenmesine olanak tanımaktadır.

1.4.2. Biskinis ve Fardis (2004) tarafından önerilen etkin kesit rijitlik katsayısı

Biskinis ve Fardis (2004) tarafından geliştirilen model, betonarme kiriş ve kolonların etkin kesit rijitliğinin belirlenmesinde, elemanların plastik mafsallarda ortaya çıkan doğrusal olmayan davranışları doğrudan dikkate almayı amaçlamaktadır. Bu yaklaşım, geleneksel yönetmeliklerde yer alan sabit katsayıların ötesine geçerek, elemanın uç noktalarındaki açısız dönmesi (chord rotation) üzerinden etkin rijitliğin fiziksel olarak temellendirilmesini sağlar. Özellikle uç noktalar çevresinde oluşan moment ve eğrilik ilişkileri dikkate alınarak, akma noktasına kadar olan etkin davranış matematiksel olarak tanımlanmakta ve böylece betonarme elemanların gerçek davranışı daha doğru bir şekilde yansıtılabilmektedir.

Modelin temelini moment-eğrilik ($M-\phi$) analizleri oluşturmaktadır. Betonarme elemanların plastik mafsallarda belirlenmiş ve doğrusal ile doğrusal olmayan bölgeler moment-eğrilik eğrileri aracılığıyla ayrıştırılmıştır. Bu ayrım, çatlama ve donatı akması sonrası oluşan rijitlik kaybının analitik olarak modellenmesine olanak tanımaktadır. Etkin rijitlik, elemanın uç noktalarında meydana gelen açısız dönüşler ile ilişkilendirilmekte ve sabit katsayılar yerine eleman davranışına dayalı parametrik bir yaklaşım sunmaktadır. Bu yöntem, özellikle plastik mafsallarda rijitlik azalmasının doğru şekilde temsil edilmesini sağlamaktadır; böylece elastik davranışın ötesinde, gerçek deformasyon taleplerine dayalı etkin rijitlik değerlendirilmesi yapılabilmektedir.

Monotonik yükleme altındaki betonarme elemanlarda çift doğrusal kuvvet-deformasyon modelinde, kesme açıklığının etkili elastik rijitliği, elemanın akma noktasındaki sekant rijitlik üzerinden belirlenmektedir. Bu yaklaşım, kesme açıklığı $L_s = M/V$ ile ifade edilmekte ve etkin rijitlik EI_{eff} aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır:

$$EI_{eff} = \frac{M_y L_s}{3 \theta_y} \quad (1.18)$$

Denklemden M_y , akma momentini, θ_y ise akma durumuna karşılık gelen yer değiştirmiş eksen dönmesini temsil etmektedir. Dikdörtgen kesitli kiriş ve kolonlar için yaklaşık 1560 test sonucu temel alınarak, θ_y aşağıdaki şekilde tanımlanmıştır:

$$\theta_y = \varphi_y \frac{L_s + a_v z}{3} + 0.0014 \left(1 + 1.5 \frac{h}{L_s} \right) + a_{sl} \frac{\varphi_y d_b L f_y}{8 \sqrt{f_c}} \quad (1.19a)$$

Perde duvarlar (dikdörtgen veya değil) ve içi boş dikdörtgen elemanlar (yaklaşık 250 test) için:

$$\theta_y = \varphi_y \frac{L_s + a_v z}{3} + 0.0013 + a_{sl} \frac{\varphi_y d_b L f_y}{8 \sqrt{f_c}} \quad (1.19b)$$

Denklemlerde: a_v sıfır-bir değişkendir; $a_v = 0$, eğer $V_{RC} > V_{My} = M_y/L_s$ ve $a_v = 1$, eğer $V_{RC} \leq V_{My} = M_y/L_s$. z , kirişlerde, kolonlarda veya T-, H-, U- veya içi boş dikdörtgen kesitli elemanlarda $z = d - d'$ ve dikdörtgen kesitli perde duvarlarda $z = 0.8h$ olarak dikkate alınır. a_{sl} , sıfır-bir

değişkendir; $a_{sl} = 1$ eğer boyuna donatıların uç bölümün ötesine ankraj bölgesinden kayması mümkünse veya kayma mümkün değilse $a_{sl} = 0$ (son terimde f_y ve f_c MPa cinsindedir). Elemanın diyagonal çatlamaındaki kesme kuvveti (V_{RC}), burada Denklem (1.20)'de verilen kesme donatısı olmayan elemanların kayma direncine eşit alınır. ρ_1 çekme donatı oranıdır. Eksenel yük (N) basınç durumu için pozitif alınır (ancak N çekme ise $V_{RC} = 0$).

$$V_{RC} = \left\{ \max \left[180(100\rho_1)^{1/3} \quad 35 \sqrt{1 + \sqrt{\frac{0.2}{d}} f_c^{1/6}} \right] \left(1 + \sqrt{\frac{0.2}{d}} \right) f_c^{1/3} + 0.15 \frac{N}{A_c} \right\} b_w d \quad (1.20)$$

1.4.3. Biskinis (2007) tarafından önerilen etkin kesit rijitlik katsayısı

Biskinis (2007) tarafından yürütülen çalışma, betonarme elemanların etkin rijitliğini belirlerken deneysel verilerden elde edilen akma davranışına dayalı parametrik bir model geliştirmiştir. Bu model, özellikle kolon, kiriş ve perde duvar gibi farklı eleman tipleri için akma anındaki etkin rijitlik değerlerinin tahmin edilmesine olanak tanır ve elastik davranışın ötesinde, elemanın gerçek davranışını yansıtan bir yaklaşım sunar. Biskinis'in önerdiği model, elemanın kesit tipi ve eksenel yük etkilerini dikkate alarak etkin rijitliği normalize edilmiş biçimde ifade etmektedir. Önerilen bağıntı Denklem (1.21)'de verilmiştir:

$$\frac{EI_{eff}}{E_c I_c} = a \left(0.8 + \ln \left[\max \left(\frac{L_s}{h}; 0.6 \right) \right] \right) \left(1 + 0.048 \min \left(50 \text{MPa}; \frac{N}{A_c} \right) \right) \quad (1.21)$$

Bu denklemde EI_{eff} , elemanın etkin eğilme rijitliğini, $E_c I_c$ ise betonarme elemanın elastik atalet momentini temsil etmektedir. L_s , elemanın akma bölgesindeki etkili uzunluğunu, h ise kesit yüksekliğini göstermektedir. N/A_c terimi, eksenel yük etkisinin normalize edilmiş formunu ifade etmekte olup beton basınç dayanımı birimi (MPa) cinsindedir.

Denklemde kullanılan katsayı a , eleman tipine bağlı olarak değişmektedir ve farklı eleman tiplerinin rijitlik davranışındaki farklılıkları yansıtacak şekilde deneysel verilerden türetilmiştir. Katsayı değerleri betonarme kolonlar için $a = 0.081$, betonarme kirişler için $a = 0.10$, dikdörtgen en kesitli betonarme perde duvarlar için $a = 0.115$ ve T-, U-, H- veya içi boş dikdörtgen kesitli perde duvarlar için $a = 0.09$ olarak alınmıştır.

Model, özellikle deneysel olarak belirlenmiş akma rijitliği ile teorik hesaplamalar arasında doğrudan bir bağlantı kurmaktadır. Böylece betonarme elemanların akma durumundaki gerçek rijitliği tahmin edilebilir ve tasarım ile performans değerlendirmelerinde daha güvenilir sonuçlar elde edilir. Eksenel yükün rijitlik üzerindeki etkisi, denklemdeki $\min(50 \text{MPa}; N/A_c)$ terimi ile sınırlanmış, böylece aşırı yükleme koşullarında rijitlik tahminlerinin gerçekçi ve güvenilir kalması sağlanmıştır.

1.4.4. Avşar vd. (2014) tarafından önerilen etlin kesit rijitlik katsayısı

Avşar vd. (2014) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, betonarme kiriş ve kolon elemanlarının etkin kesit rijitliği üzerinde etkili olan tasarım parametreleri detaylı bir şekilde incelenmiştir. Araştırmada özellikle çekme donatısı oranı (ρ_{st}), basınç donatısının çekme donatısına oranı (ρ'_s/ρ_{st}) ve beton dayanımı (f_c) gibi parametrelerin etkin rijitlik üzerindeki etkisi analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, çekme donatısı oranı ve basınç donatısının çekme donatısına oranının kiriş elemanlarının etkin rijitliğini artırıcı bir etkisi olduğunu, buna karşılık beton dayanımının ise azaltıcı bir etkisinin bulunduğunu göstermektedir.

Dikdörtgen en kesitli betonarme kirişler için yapılan doğrusal regresyon analizleri sonucunda, etkin rijitlik katsayısı α_{eff} Denklem (1.22)'de tanımlanmıştır. Denklemde f_c beton dayanımını (MPa), ρ_{st} çekme donatısı oranını ve ρ'_s/ρ_{st} basınç donatısının çekme donatısına oranını temsil etmektedir. Bu bağıntı, kiriş elemanlarının etkin rijitliğini belirlerken hem donatı oranlarının hem de beton dayanımının etkilerini kapsayan parametrik bir yaklaşım sunmaktadır.

$$\alpha_{eff} = 0.271 + 0.0064 \times f_c + 0.120 \times \frac{\rho'_s}{\rho_{st}} + 37.895 \times \rho_{st} \quad (1.22)$$

Kolon elemanlarının davranışının modellenmesinde ise, etkin rijitlik katsayısı α_{eff} , eksenel yük seviyesi ($N/(f_c A_g)$) ve boyuna donatı oranı (ρ_s) ile doğrudan ilişkilidir. Beton basınç dayanımı, kolon kesitinin davranış moduna bağlı olarak rijitliği artırıcı veya sünekliği sınırlayıcı etki göstermektedir. Bu nedenle, farklı beton dayanımları ve kesit tipleri için iki ayrı formülasyon geliştirilmiştir.

Dikdörtgen en kesitli kolonlar için etkin rijitlik katsayısı aşağıdaki gibi belirlenmiştir:

$$\alpha_{eff} = 0.062 + 0.0022 \times f_c + 0.854 \times \frac{N}{f_c A_g} + 10.802 \times \rho_s \leftrightarrow \frac{N}{f_c A_g} > 0.30 - 1.91\rho_s \quad (1.23a)$$

$$\alpha_{eff} = 0.257 + 0.0033 \times f_c + 0.602 \times \frac{N}{f_c A_g} + 13.874 \times \rho_s \leftrightarrow \frac{N}{f_c A_g} \leq 0.30 - 1.91\rho_s \quad (1.23b)$$

Dairesel en kesitli kolonlar için ise α_{eff} aşağıdaki şekilde tanımlanmıştır:

$$\alpha_{eff} = 0.069 + 0.0032 \times f_c + 0.876 \times \frac{N}{f_c A_g} + 9.512 \times \rho_s \leftrightarrow \frac{N}{f_c A_g} > 0.26 - 1.75\rho_s \quad (1.24a)$$

$$\alpha_{eff} = 0.239 + 0.0029 \times f_c + 0.709 \times \frac{N}{f_c A_g} + 12.809 \times \rho_s \leftrightarrow \frac{N}{f_c A_g} \leq 0.26 - 1.75\rho_s \quad (1.24b)$$

Bu denklemler, kolon kesitinin davranış modunu ve eksenel yük seviyesini dikkate alarak etkin rijitliğin daha doğru ve güvenilir bir biçimde tahmin edilmesini sağlamaktadır. Beton dayanımı (f_c), eksenel yük ($N/(f_c A_g)$) ve boyuna donatı oranı (ρ_s) arasındaki ilişkiler doğrusal regresyon analizleriyle optimize edilmiş ve farklı kolon tipleri için uygulanabilir hale getirilmiştir. Bu sayede, hem dikdörtgen hem de dairesel kolonlar için tasarım ve analizlerde kullanılacak, kesit ve yükleme koşullarına duyarlı parametrik bir etkin rijitlik modeli geliştirilmiştir.

1.4.5. Foroughi ve Yüksel tarafından önerilen etkin kesit rijitlik katsayısı

Mevcut deprem yönetmeliklerinde betonarme perde duvar, kolon ve kiriş elemanlarının etkin eğilme rijitliği çoğunlukla brüt kesit rijitliğinin sabit bir katsayısı olarak tanımlanmaktadır. Bununla birlikte, bu yaklaşım kesit geometrisi, beton basınç dayanımı, donatı düzeni ve eksenel yük seviyesi gibi tasarım parametrelerinin rijitlik üzerindeki etkilerini yeterli doğrulukta temsil edememektedir. Gerçekte betonarme taşıyıcı elemanların çatlama sonrası eğilme rijitliği, söz konusu parametrelerin birbirleriyle etkileşimi sonucu değişken bir davranış göstermektedir. Bu nedenle tek bir sabit katsayıya dayalı yaklaşımlar, bazı durumlarda kesit rijitliğinin belirlenmesinde önemli sapmalara neden olabilmektedir.

Bu sınırlamaların giderilmesi amacıyla Foroughi ve Yüksel (2025; 2026a; 2026b) tarafından süneklik düzeyi yüksek betonarme perde duvar kesitleri ile birlikte betonarme kiriş ve farklı kesit geometrilerine sahip betonarme kolon elemanlarının etkin eğilme rijitliğinin belirlenmesine yönelik kapsamlı bir analitik çalışma gerçekleştirilmiştir. Söz konusu çalışmada bu elemanların davranışları çeşitli tasarım parametreleri dikkate alınarak sistematik bir biçimde değerlendirilmiştir. Analiz sürecinde kesit davranışının gerçekçi şekilde temsil edilebilmesi amacıyla doğrusal olmayan moment-eğrilik ilişkileri kullanılmış ve farklı parametre kombinasyonları için ayrıntılı parametrik analizler gerçekleştirilmiştir. Bu yaklaşım sayesinde beton dayanımı, donatı oranları, kesit geometrisi ve eksenel yük düzeyi gibi değişkenlerin etkin eğilme rijitliği üzerindeki etkileri bütüncül bir çerçevede değerlendirilmiştir. Elde edilen analiz sonuçlarına dayanarak, söz konusu taşıyıcı elemanların doğrusal olmayan davranışını dikkate alan bir etkin kesit rijitliği denklemi önerilmiştir. Bu denklem, kesitte çatlak oluşumu, malzeme doğrusal olmayanlığı ve eksenel yük etkilerinin rijitlik üzerindeki birleşik etkilerini temsil edecek şekilde geliştirilmiş olup, eleman davranışının analitik olarak daha gerçekçi biçimde modellenmesine olanak sağlamaktadır.

Süneklik düzeyi yüksek betonarme perde duvar:

Çalışma kapsamında, Foroughi ve Yüksel (2025) tarafından betonarme perde duvar kesitlerinin eğilme rijitliğini etkileyen başlıca tasarım değişkenlerinin etkisini ortaya koymak amacıyla kapsamlı bir parametrik inceleme gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda; beton basınç dayanımı (f_c), eksenel yük düzeyi ($N/(A_c f_{ck})$), boyuna donatı oranı (ρ_l) ve enine donatı oranı (ρ_t) temel değişkenler olarak ele alınmıştır. Her bir parametre için oluşturulan kesit modelleri üzerinde doğrusal olmayan kesit analizleri gerçekleştirilmiş ve bu analizler sonucunda kesitlere ait moment-eğrilik ($M-\phi$) ilişkileri elde edilmiştir.

Elde edilen moment-eğrilik diyagramları kullanılarak çatlama sonrası kesit davranışını temsil eden etkin eğilme rijitliği ile birlikte akma momenti ve akma eğriliği gibi karakteristik davranış parametreleri belirlenmiştir. Daha sonra analiz sonuçları istatistiksel yöntemler yardımıyla değerlendirilmiş ve çok değişkenli regresyon analizi uygulanarak etkin kesit rijitliğini temsil eden ampirik bir bağıntı türetilmiştir. Bu kapsamda etkin rijitlik katsayısı, seçilen tasarım değişkenlerinin etkisini içeren fonksiyonel bir ifade olarak tanımlanmış ve genel bağıntı formu Denklem (1.25)'de sunulmuştur. Modele dahil edilen parametreler, betonarme perde duvar kesitlerinde çatlama sonrasında gelişen eğilme davranışını doğrudan etkileyen başlıca mekanik ve geometrik değişkenleri temsil etmeleri nedeniyle seçilmiştir. Bu yaklaşım, kesit rijitliğinin yalnızca

sabit katsayılar ile değil, aynı zamanda malzeme özellikleri ve yükleme koşullarını yansıtan tasarım parametreleri aracılığıyla daha gerçekçi biçimde ifade edilmesine olanak sağlamaktadır.

$$\alpha_{\text{eff}} = f\left(\frac{N}{A_c f_{ck}}, f_{ck}, \rho_l, \rho_t\right) \quad (1.25)$$

Çok değişkenli regresyon analizi sonucunda elde edilen istatistiksel katsayılar kullanılarak, süneklik düzeyi yüksek dikdörtgen kesitli betonarme perde duvarlar için etkin kesit rijitlik katsayısını tanımlayan ampirik bir bağıntı geliştirilmiştir. Söz konusu bağıntı, parametrik analiz kapsamında ele alınan tasarım değişkenlerinin kesit rijitliği üzerindeki ortak etkisini temsil edecek şekilde oluşturulmuştur. Regresyon modelinin oluşturulmasında doğrusal olmayan kesit analizlerinden elde edilen moment-eğrilik verileri temel alınmış ve farklı parametre kombinasyonları için hesaplanan etkin eğilme rijitliği değerleri istatistiksel yöntemlerle değerlendirilmiştir. Bu süreç sonucunda, çatlama sonrası kesit davranışını temsil eden etkin rijitlik katsayısını yeterli doğruluk düzeyinde öngörebilen analitik bir ifade elde edilmiştir.

Geliştirilen modelde beton basınç dayanımı, eksenel yük düzeyi, boyuna donatı oranı ve enine donatı oranı gibi kesit davranışını doğrudan etkileyen başlıca tasarım değişkenleri bağımsız parametreler olarak tanımlanmıştır. Bu değişkenler, betonarme perde duvar kesitlerinde çatlama sonrasında oluşan eğilme davranışını belirleyen temel mekanizmaları temsil etmektedir.

Foroughi ve Yüksel (2025) tarafından gerçekleştirilen analizler sonucunda, süneklik düzeyi yüksek dikdörtgen kesitli betonarme perde duvarlar için önerilen etkin kesit rijitlik katsayısı $k_{e,prop}$, Denklem (1.26)'da verilen bağıntı ile tanımlanmaktadır. Önerilen model, geleneksel tasarım yönetmeliklerinde kullanılan sabit rijitlik katsayılarına kıyasla kesit davranışını daha gerçekçi ve ayrıntılı biçimde temsil etmekte; özellikle doğrusal olmayan yapısal analizlerde uygulanabilir, pratik ve güvenilir bir yaklaşım sunmaktadır.

$$k_{e,prop} = \left(0.0012f_{ck} + 0.28\right) \times \left(0.029d_l + 0.48\right) \times \left(-0.006d_{tr} + 1.06\right) \times \left(-0.0005s + 1.2\right) \times \left(1.04 \frac{N}{A_c f_{ck}} + 0.7\right) \quad (1.26)$$

Denklem (1.26)'da; f_{ck} betonun karakteristik basınç dayanımını; d_l , boyuna donatı çapını; d_{tr} enine donatı (etriye veya çiroz) çapını ifade etmektedir. s enine donatı aralığını gösterirken, N perde duvar kesitine etkiyen eksenel yükü ve A_c beton kesit alanını temsil etmektedir.

Çift donatılı betonarme kiriş:

Betonarme kirişlerin davranışı, betonun düşük çekme dayanımı nedeniyle kesitte meydana gelen çatlak oluşumu ve donatı çeliğinin akma sonrasında gösterdiği plastisite etkileri sebebiyle doğrusal elastik varsayımlardan önemli ölçüde sapmaktadır. Bu doğrusal olmayan davranış, kirişlerin eğilme rijitliğini belirleyen temel tasarım değişkenleri olan çekme donatısı oranı (ρ), basınç donatısı oranı (ρ') ve beton basınç dayanımı (f_{ck}) tarafından büyük ölçüde kontrol edilmektedir. Bununla birlikte, mevcut tasarım yönetmeliklerinde kiriş rijitliği çoğunlukla sabit katsayılar aracılığıyla temsil edilmekte olup, bu yaklaşım çatlak oluşumu, malzeme doğrusal olmayanlığı ve donatı oranının kesit davranışı üzerindeki etkilerini yeterli düzeyde yansıtamamaktadır. Bu durum,

özellikle doğrusal olmayan analizlerde kiriş davranışının gerçekçi biçimde temsil edilmesini güçleştirmektedir.

Bu sınırlamaların giderilmesi amacıyla Foroughi ve Yüksel (2026a) tarafından çift donatılı betonarme kirişlerin çatlamış kesit davranışını temsil eden etkin kesit rijitlik katsayısının (k_e) tahmin edilmesine yönelik yeni bir model önerilmiştir. Geliştirilen yaklaşım, kesitlerin doğrusal olmayan moment-eğrilik ilişkilerini esas almakta ve kiriş rijitliğini etkileyen başlıca parametreleri içeren pratik bir analitik ifade sunmaktadır. Modelin oluşturulması sürecinde, farklı tasarım parametrelerine sahip dikdörtgen kesitli çift donatılı kirişler için kapsamlı bir parametrik analiz programı uygulanmıştır. Bu analizlerde ρ , ρ' ve f_{ck} değerleri sistematik biçimde değiştirilmiş; doğrusal olmayan kesit analizleri kullanılarak elde edilen moment-eğrilik sonuçları aracılığıyla söz konusu parametrelerin kesit rijitliği üzerindeki etkileri sayısal olarak değerlendirilmiştir.

Parametrik incelemeler, beton basınç dayanımının $f_{ck} = 25-50$ MPa aralığında, donatı çeliği akma dayanımının $f_{yk} = 420$ MPa olduğu koşullar altında gerçekleştirilmiştir. Analizlerde çekme donatısı oranı $\rho = 0.85\rho_b$ olarak alınmış, basınç donatısı oranı ise $\rho' = 0-\rho_{max}$ aralığında değiştirilmiştir. Elde edilen sayısal sonuçlar, kiriş kesitlerinin eğilme rijitliğini belirleyen en etkili parametrelerin beton basınç dayanımı ile basınç ve çekme donatısı oranları arasındaki oran (ρ'/ρ) olduğunu ortaya koymuştur. Bu bulgular doğrultusunda etkin kesit rijitlik katsayısının, beton dayanımı ile donatı oranlarının görece etkilerini birlikte temsil eden bir fonksiyon şeklinde ifade edilmesi önerilmiştir ($\alpha_{eff} = f(\rho'/\rho, f_{ck})$).

Bu değerlendirmeler sonucunda, Foroughi ve Yüksel (2026a) tarafından çift donatılı betonarme kirişler için etkin rijitlik katsayısı k_e , ρ'/ρ oranı ile beton basınç dayanımının birlikte etkisini içeren ampirik bir bağıntı aracılığıyla tanımlanmıştır (Denklem 1.27). Önerilen bu bağıntı, çatlama sonrası kesit davranışını daha gerçekçi biçimde temsil etmeyi amaçlamakta; özellikle doğrusal olmayan yapısal analizlerde kullanılabilen pratik bir rijitlik tahmin modeli sunmaktadır.

$$k_{e,prop} = \left[-0.14 \left(\frac{\rho'}{\rho} \right)^2 + 0.344 \left(\frac{\rho'}{\rho} \right) + 0.534 \right] \times [-0.0002(f_{ck})^2 + 0.026(f_{ck}) + 0.455] \quad (1.27)$$

Farklı kesit geometrilerine sahip betonarme kolon:

Betonarme kolonların yapısal davranışı, betonun sınırlı çekme dayanımı nedeniyle oluşan çatlaklar, donatı çeliğinin akma sonrası plastisite özellikleri ve kesitte meydana gelen karmaşık gerilme dağılımları nedeniyle doğrusal elastik varsayımlardan önemli ölçüde sapmaktadır. Bu doğrusal olmayan davranış, kolonların eğilme rijitliğini belirleyen başlıca tasarım parametreleri olan eksenel yük oranı (N/N_{max}), boyuna donatı oranı (ρ_s), enine donatı oranı (ρ_{st}) ve beton basınç dayanımı (f_{ck}) ile yakından ilişkilidir. Bazı yönetmeliklerde kolon rijitliği genellikle basitleştirilmiş katsayılarla tanımlanmakta ve çatlama sonrası kesit davranışı ile beton-donatı etkileşimini yeterince yansıtmamaktadır; bu durum doğrusal olmayan analizlerde rijitlik tahminlerinin doğruluğunu sınırlamaktadır.

Bu sınırlamaları gidermek amacıyla Foroughi ve Yüksel (2026b) tarafından kare, dairesel ve dikdörtgen kesitli betonarme kolonlar için çatlamış kesitlerde etkin rijitlik katsayısının ($k_{e,prop}$) belirlenmesine yönelik yeni bir model önerilmiştir. Önerilen yaklaşım, kolon kesitlerinin moment-eğrilik ilişkilerini temel almakta ve kesit davranışını etkileyen başlıca parametreleri içeren basit ve

uygulanabilir bir analitik ifade sunmaktadır. Modelin geliştirilmesi sürecinde, farklı N/N_{max} , ρ_s , ρ_{st} ve f_{ck} için geniş kapsamlı parametrik analizler gerçekleştirilmiş; doğrusal olmayan kesit analizlerinden elde edilen sayısal sonuçlar kullanılarak bu parametrelerin kesit rijitliği üzerindeki etkileri sistematik biçimde değerlendirilmiştir. Gerçekleştirilen analizler, her bir tasarım parametresinin $k_{e,prop}$ üzerindeki etkisini açık biçimde ortaya koymuştur. Bu bulgular doğrultusunda kare, dairesel ve dikdörtgen kesitli betonarme kolonlar için etkin kesit rijitlik katsayısı aşağıdaki genel fonksiyonel ifade ile tanımlanmıştır:

$$\alpha_{eff} = f\left(\frac{N}{A_c f_{ck}}, \rho_s, \rho_{st}, f_{ck}\right) \quad (1.28)$$

Her bir kesit geometrisi için önerilen bağıntılar, doğrusal olmayan sayısal analiz sonuçları ve çok değişkenli regresyon değerlendirmeleri dikkate alınarak ayrı ayrı kalibre edilmiştir. Böylece, tasarım parametrelerinin etkin rijitlik üzerindeki etkisi doğrusal olmayan kesit davranışıyla uyumlu biçimde modellenmiştir. Önerilen katsayı, çatlama sonrası rijitlik azalmasını ve beton-donatı etkileşimini dikkate alarak kolon rijitliğinin daha güvenilir biçimde tahmin edilmesini sağlamaktadır.

Kare kesit kolonlar için $k_{e,prop}$:

Kare kesitli kolonlar için etkin rijitlik katsayısı aşağıdaki biçimde ifade edilmiştir:

$$k_{e,prop} = \left[-1.31 \left(\frac{N}{A_c f_{ck}} \right)^2 + 0.942 \left(\frac{N}{A_c f_{ck}} \right) + 0.2014 \right] \times [38.2(\rho_s) + 0.616] \times [1.82(\rho_{st}) + 0.967] \times [0.0012(f_{ck}) + 0.951] \quad (1.29)$$

Dairesel kesit kolonlar için $k_{e,prop}$:

Dairesel kesitli kolonlar için etkin kesit rijitlik katsayısı $k_{e,prop}$, kesit geometrisi ile tasarım parametrelerinin birleşik etkisi dikkate alınarak aşağıdaki şekilde tanımlanmıştır:

$$k_{e,prop} = \left[-1.14 \left(\frac{N}{A_c f_{ck}} \right)^2 + 0.796 \left(\frac{N}{A_c f_{ck}} \right) + 0.239 \right] \times [26(\rho_s) + 0.71] \times [6.45(\rho_{st}) + 0.92] \times [0.002(f_{ck}) + 0.95] \quad (1.30)$$

Dikdörtgen kesit kolonlar için $k_{e,prop}$:

Dikdörtgen kesitli betonarme kolonlar için etkin kesit rijitlik katsayısı aşağıdaki bağıntı ile ifade edilmiştir:

$$k_{e,prop} = \left[-1.34 \left(\frac{N}{A_c f_{ck}} \right)^2 + 0.928 \left(\frac{N}{A_c f_{ck}} \right) + 0.233 \right] \times [32.97(\rho_s) + 0.567] \times [0.987(\rho_{st}) + 0.964] \times [0.001(f_{ck}) + 0.978] \quad (1.31)$$

2. BETONARME KİRİŞ ELEMANLARININ ETKİN KESİT RİJİTLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Kitap kapsamında, betonarme kirişlerin doğrusal olmayan eğilme davranışı, eğrilik sünekliliği ve etkin kesit rijitliği katsayılarını incelemek amacıyla farklı beton dayanımlarına ve farklı çekme-basınç donatısı oranlarına sahip çift donatılı betonarme kiriş kesitleri tasarlanmıştır. Çift donatılı kirişler, çekme ve basınç bölgelerinde yer alan boyuna donatıların birlikte çalışması sayesinde eğilme kapasitesini ve sünekliliği artıran önemli taşıyıcı elemanlar olup, özellikle yüksek eğilme momentlerine maruz kalan kirişlerde moment kapasitesini ve enerji yutma potansiyelini artırmaları nedeniyle sismik tasarımda yaygın olarak tercih edilmektedir. Tasarlanan kesit modelleri üzerinde gerçekleştirilen doğrusal olmayan kesit analizleri ile çatlak oluşumu sonrasında davranışı belirleyen temel parametrelerin etkileri sistematik olarak incelenmiştir. Bu kapsamda beton basınç dayanımı ile çekme ve basınç donatısı oranlarının kesitin eğrilik kapasitesi ve etkin eğilme rijitliği üzerindeki etkileri karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiş ve elde edilen bulgular betonarme kirişlerin çatlaklı kesit davranışının daha gerçekçi biçimde temsil edilmesine yönelik önemli çıkarımlar ortaya koymuştur.

Çift donatılı betonarme kirişlerin etkin kesit rijitlikleri; moment-eğrilik ilişkileri, ulusal ve uluslararası yönetmeliklerde önerilen yaklaşımlar ile literatürde yer alan bağıntılar kullanılarak belirlenmiş ve elde edilen rijitlik değerleri karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Söz konusu yaklaşımlar, betonarme kiriş kesitlerinin etkin eğilme rijitliğinin belirlenmesi açısından analitik bir çerçevede incelenmiştir. Doğrusal olmayan kesit davranışını esas alan kapsamlı analitik çalışmalar sonucunda Foroughi ve Yüksel (2026a) tarafından çift donatılı betonarme kirişler için geliştirilen etkin kesit rijitliği bağıntısı kuramsal temelleri ve mühendislik uygulamalarındaki kullanılabilirliği açısından sistematik olarak ele alınmıştır. Önerilen bağıntının geçerliliği ve doğruluğu, elde edilen sayısal analiz sonuçlarının literatürde yaygın olarak kullanılan etkin rijitlik bağıntıları ile karşılaştırılması yoluyla değerlendirilmiştir.

Analitik çalışmalarda, beton ve donatı malzemelerinin doğrusal olmayan davranışlarını dikkate alabilen SAP2000 yazılımı kullanılarak moment-eğrilik ilişkileri elde edilmiş ve söz konusu ilişkiler grafiksel olarak değerlendirilmiştir. Kesitsel doğrusal olmayan analizlerde, beton davranışı için Mander vd. (1988) tarafından önerilen sargılı beton modeli benimsenmiştir. Bu model, betonun basınç altındaki doğrusal olmayan gerilme-şekildeğiştirme ilişkilerini gerçekçi biçimde temsil ederek, sargılı ve sargısız beton davranışlarının güvenilir bir şekilde simülasyonuna olanak tanımaktadır. Donatı çeliğinin davranışı ise TBDY (2018)'de tanımlanan malzeme parametreleri esas alınarak modellenmiş; donatının akma dayanımı, elastisite modülü ve pekleşme özellikleri doğrusal olmayan analizlere dahil edilmiştir. Bu yaklaşım, beton ve donatının etkileşimli doğrusal olmayan davranışını analitik modele yansıtarak, moment-eğrilik ilişkilerinin yüksek doğrulukla elde edilmesini sağlamaktadır.

Analiz edilen tüm kiriş kesitleri dikdörtgen geometriye sahip olup, tipik bir kesit için gövde genişliği $b_w = 300$ mm ve toplam kesit yüksekliği $h = 600$ mm olarak belirlenmiştir (Şekil 2.1). Basınç donatısı kesitin üst yüzeyinden; $d' = 50$ mm, çekme donatısı ise $d = 550$ mm ($d = h - d'$) derinliğinde yerleştirilmiştir. Bu geometrik düzenleme, basınç donatısının moment kapasitesi, eğrilik gelişimi ve etkin rijitlik üzerindeki etkilerinin ayrıştırılmasına olanak sağlayacak biçimde tanımlanmıştır.

Betonarme kiriş kesitlerinin hesap ve tasarımında dikkate alınması gereken en önemli hususlardan biri, elde edilen donatı oranının, dengeli donatı oranından daha küçük olmasının sağlanmasıdır. Bu bölümde, TS500 (2000) standardında verilen sınır değerler esas alınmıştır. Kirişlerde çekme

donatısı oranı (ρ), Denklem (2.1)'de verilen minimum değerden daha küçük olmamalıdır. TS500 (2000)'e göre, betonarme kirişlerde sünek davranışın sağlanabilmesi amacıyla donatı oranı Denklem (2.2) ile sınırlandırılmıştır.

$$\rho = \frac{A_s}{b_w d} \geq \rho_{\min} = 0.8 \frac{f_{ctd}}{f_{yd}} \quad (2.1)$$

Betonarme kirişlerde çekme donatısı oranı, Denklem (2.2)'de verilen maksimum değeri ve %2 sınırını aşmamalıdır. Ayrıca, kirişlerde çekme ve basınç donatısı oranları arasındaki fark, dengeli donatı oranının %85'ini geçmemelidir:

$$\begin{cases} (\rho - \rho') \leq \rho_{\max} = 0.85\rho_b \\ \rho_b = 0.85k_1 \left(\frac{f_{cd}}{f_{yd}} \right) \left(\frac{700}{700 + f_{yd}} \right) \end{cases} \quad (2.2)$$

TS500 (2000)'e göre, k_1 katsayısı 0.70'den küçük ve 0.85'ten büyük olmayacak şekilde tanımlanmıştır. Beton basınç dayanımına bağlı olarak k_1 katsayısı Denklem (2.3) ile ifade edilmektedir:

$$\begin{cases} k_1 = 0.85 - 0.006(f_{ck} - 25) < 0.85 & \Leftrightarrow f_{ck} \geq 30 \text{ MPa} \\ k_1 = 0.85 & \Leftrightarrow f_{ck} \leq 25 \text{ MPa} \end{cases} \quad (2.3)$$

Çift donatılı betonarme kirişlerin etkin kesit rijitliğini araştırmak için farklı beton basınç dayanımı, çekme ve basınç donatısı oranlarına sahip kesit modelleri tasarlanmıştır. Farklı parametrelere sahip olarak tasarlanan betonarme kiriş kesitlerine ilişkin detaylar Tablo 2.1'de sunulmuştur. Analizlerde kullanılan çift donatılı betonarme kirişin kesitsel görünümü ve A-A kesit detayları Şekil 2.1'de sunulmuştur. Bu kapsamda, farklı beton basınç dayanımları ile farklı çekme ve basınç donatısı oranlarına sahip toplam 66 adet betonarme kiriş modeli tasarlanmıştır. Betonarme kiriş modellerinin tasarımında, TBDY (2018) ve TS500 (2000) hükümleri esas alınmıştır.

Farklı parametrelere sahip kiriş modellerinde, çekme donatısı oranı olarak $\rho_{\max} = 0.85\rho_b$ sabit tutulmuş; basınç donatısı oranı için ise $\rho'_s = 0.0, 0.1\rho_{\max}, 0.2\rho_{\max}, 0.3\rho_{\max}, 0.4\rho_{\max}, 0.5\rho_{\max}, 0.6\rho_{\max}, 0.7\rho_{\max}, 0.8\rho_{\max}, 0.9\rho_{\max}$ ve ρ_{\max} değerleri dikkate alınmıştır.

TBDY (2018) kapsamında inşa edilecek tüm betonarme yapılarda C25 sınıfından daha düşük dayanımlı betonların kullanımına izin verilmemektedir. Betonarme kiriş modellerinde C25, C30, C35, C40, C45 ve C50 olarak beş farklı beton sınıfı dikkate alınmıştır. Donatı çeliği davranış modeli için ise B420C sınıfı donatı çeliği kullanılmıştır.

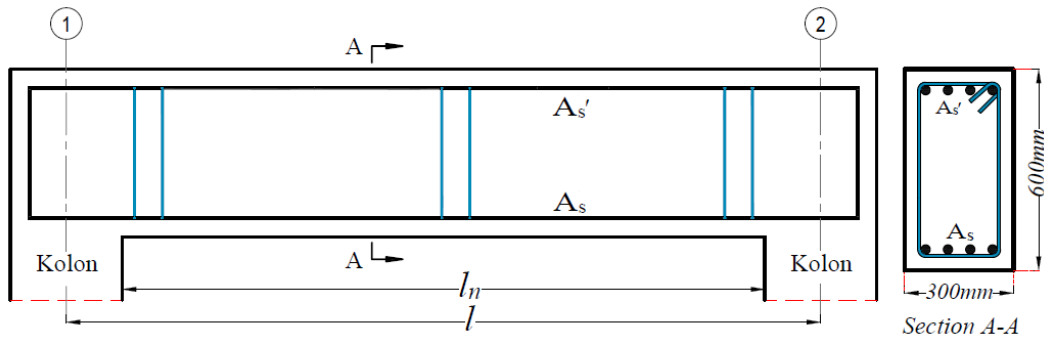
Kiriş modellerinde, her beton dayanımı için çekme donatısı oranı $\rho_{\max} = 0.85\rho_b$ ile sabit tutulmuş, basınç donatısı oranları değiştirilerek betonarme kirişlerin moment-eğrilik ilişkileri, eğrilik süneklik ile etkin kesit rijitlikleri elde edilmiştir. Moment-eğrilik analizlerinde, sargısız

beton ve donatı çeliği için Şekil 2.1 ve Tablo 2.2’de verilen malzeme modelleri esas alınmıştır. Betonun çekme dayanımının moment-eğrilik davranışı üzerindeki etkisinin ihmal edilebilir düzeyde olması nedeniyle, analizlerde betonun çekme dayanımı dikkate alınmamıştır. Betonarme kirişlerde eksenel yükün maksimum değeri $N = 0.10A_c f_c$ ile sınırlı olduğu için bu analizlerde $N = 0$ olarak dikkate alınmıştır.

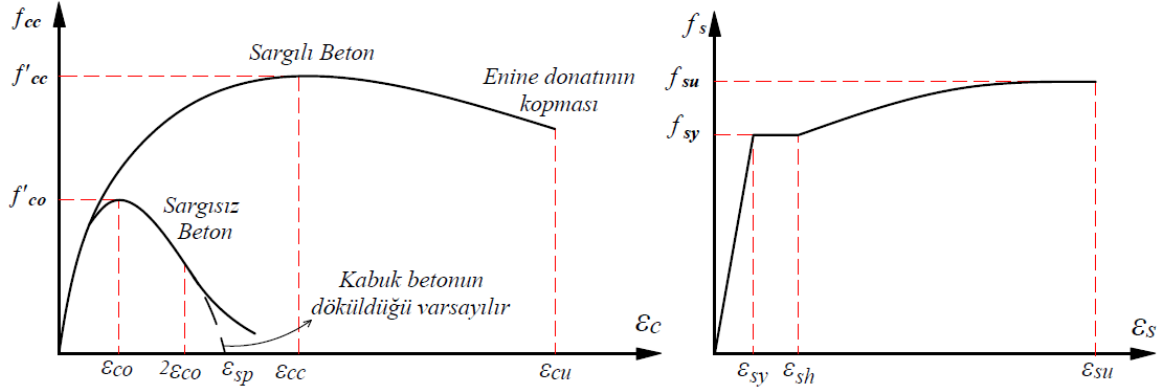
Tablo 2.1. Tasarlanan betonarme kiriş kesitleri için detaylar

ρ'/ρ	Malzeme:C25			Malzeme: C30			Malzeme:C35			$\frac{\rho - \rho'}{\rho_b}$
	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			$\frac{\rho - \rho'}{\rho_b}$
	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 2.1. Çift donatılı betonarme kirişin kesitsel görünümü ve A-A kesit detayları



Şekil 2.2. Beton ve donatı çeliği için gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri (TBDY, 2018)

Tablo 2.2. Malzeme modellerinde kullanılan parametreler (TBDY, 2018)

Malzeme	Parametre	Değer
Beton Sınıfı: C25-C50	Sargısız betonun maksimum gerilmeye ulaştığı birim şekildeğiştirme değeri (ϵ_{co})	0.002
	Sargısız betonun nihai birim şekil-değiştirme (ϵ_{cu})	0.0035
	Karakteristik beton basınç dayanımı (f_{ck})	25-50MPa
Donatı Çeliği: B420C	Donatı çeliğinin akma birim şekildeğiştirme (ϵ_{sy})	0.0021
	Donatı çeliğinin pekleşme birim şekildeğiştirme (ϵ_{sp})	0.008
	Donatı çeliğinin kopma birim şekildeğiştirme (ϵ_{su})	0.08
	Donatı çeliğinin karakteristik akma dayanımı (f_{yk})	420MPa
	Donatı çeliğinin karakteristik kopma dayanımı (f_{su})	550MPa

2.1. Betonarme Kirişlerin Moment-Eğrilik İlişkileri

Tasarlanan betonarme kiriş modellerinde, farklı tasarım parametrelerinin kesitsel doğrusal olmayan davranış üzerindeki etkilerini belirlemek amacıyla moment-eğrilik analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu analizler sonucunda akma momenti (M_y), nihai moment (M_u), akma eğriliği (φ_y), nihai eğrilik (φ_u) ve eğrilik sünekliği (μ_φ) değerleri hesaplanmıştır. Betonarme kiriş kesitlerine ait moment-eğrilik analizlerinden elde edilen temel sonuçlar Tablo 2.3'te sunulmaktadır. Söz konusu tabloda, farklı beton basınç dayanımı, donatı oranı ve donatı düzenine sahip kesitlerin eğilme davranışına ilişkin parametreler karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Beton basınç dayanımı (f_{ck}) ile basınç/çekme donatısı oranlarının (ρ'/ρ) moment-eğrilik davranışı üzerindeki etkisi, farklı parametre kombinasyonları için elde edilen analiz sonuçları çerçevesinde ayrıntılı biçimde incelenmiştir. Şekil 2.3'te, beton basınç dayanımı (f_{ck}) ile basınç/çekme donatısı oranındaki (ρ'/ρ) değişimin betonarme kiriş kesitlerinin moment-eğrilik ilişkisine olan etkisi grafiksel olarak sunulmaktadır. Elde edilen moment-eğrilik eğrileri, özellikle çatlama sonrası kesit davranışının ve buna bağlı olarak gelişen etkin eğilme rijitliğinin değerlendirilmesi açısından temel veri setini oluşturmaktadır. Betonarme kiriş elemanlarının doğrusal olmayan kesitsel davranışını etkileyen başlıca tasarım parametrelerinin eğrilik sünekliği üzerindeki görece etkileri de karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Bu kapsamda elde edilen sonuçlar Şekil 2.4'te grafiksel olarak sunulmaktadır.

Tablo 2.3. Betonarme kirişler için moment-eğrilik analiz sonuçları

a) Beton sınıfı 25 MPa

f_{ck}	ρ'/ρ	M_y	φ_y	M_u	φ_u	μ_φ
25	0.0	573.3	0.00798	573.9	0.01780	2.23
	0.1	589.5	0.00763	591.9	0.01980	2.60
	0.2	600.4	0.00736	607.5	0.02200	2.99
	0.3	608.8	0.00714	620.4	0.02450	3.43
	0.4	615.4	0.00696	641.9	0.02770	3.98
	0.5	621.1	0.00681	665.3	0.03110	4.56
	0.6	624.8	0.00668	684.9	0.03500	5.24
	0.7	629.0	0.00657	714.3	0.03980	6.06
	0.8	632.6	0.00647	733.1	0.04570	7.06
	0.9	634.7	0.00638	753.9	0.05200	8.15
	1.0	636.6	0.00629	762.1	0.05950	9.45

b) Beton sınıfı 30 MPa

f_{ck}	ρ'/ρ	M_y	φ_y	M_u	φ_u	μ_φ
30	0.0	667.4	0.00787	667.9	0.01840	2.34
	0.1	684.1	0.00754	688.1	0.02020	2.68
	0.2	696.2	0.00730	705.3	0.02270	3.11
	0.3	705.7	0.00710	719.6	0.02520	3.55
	0.4	712.5	0.00693	745.3	0.02800	4.04
	0.5	718.5	0.00679	772.0	0.03200	4.71
	0.6	722.9	0.00666	800.0	0.03600	5.40
	0.7	726.5	0.00655	827.2	0.04100	6.26
	0.8	729.3	0.00645	848.5	0.04700	7.28
	0.9	733.7	0.00637	871.9	0.05320	8.35
	1.0	735.7	0.00629	881.3	0.06100	9.70

c) Beton sınıfı 35 MPa

f_{ck}	ρ'/ρ	M_y	φ_y	M_u	φ_u	μ_φ
35	0.0	755.1	0.00776	755.4	0.01870	2.41
	0.1	772.6	0.00747	777.2	0.02060	2.76
	0.2	784.9	0.00724	795.8	0.02310	3.19
	0.3	794.3	0.00706	812.0	0.02560	3.63
	0.4	802.1	0.00690	840.6	0.02900	4.20
	0.5	808.2	0.00677	870.1	0.03250	4.80
	0.6	813.6	0.00665	901.1	0.03700	5.56
	0.7	818.4	0.00655	930.6	0.04200	6.42
	0.8	820.7	0.00645	954.0	0.04750	7.36
	0.9	823.7	0.00637	979.5	0.05450	8.56
	1.0	825.6	0.00629	990.3	0.06240	9.92

d) Beton sınıfı 40 MPa

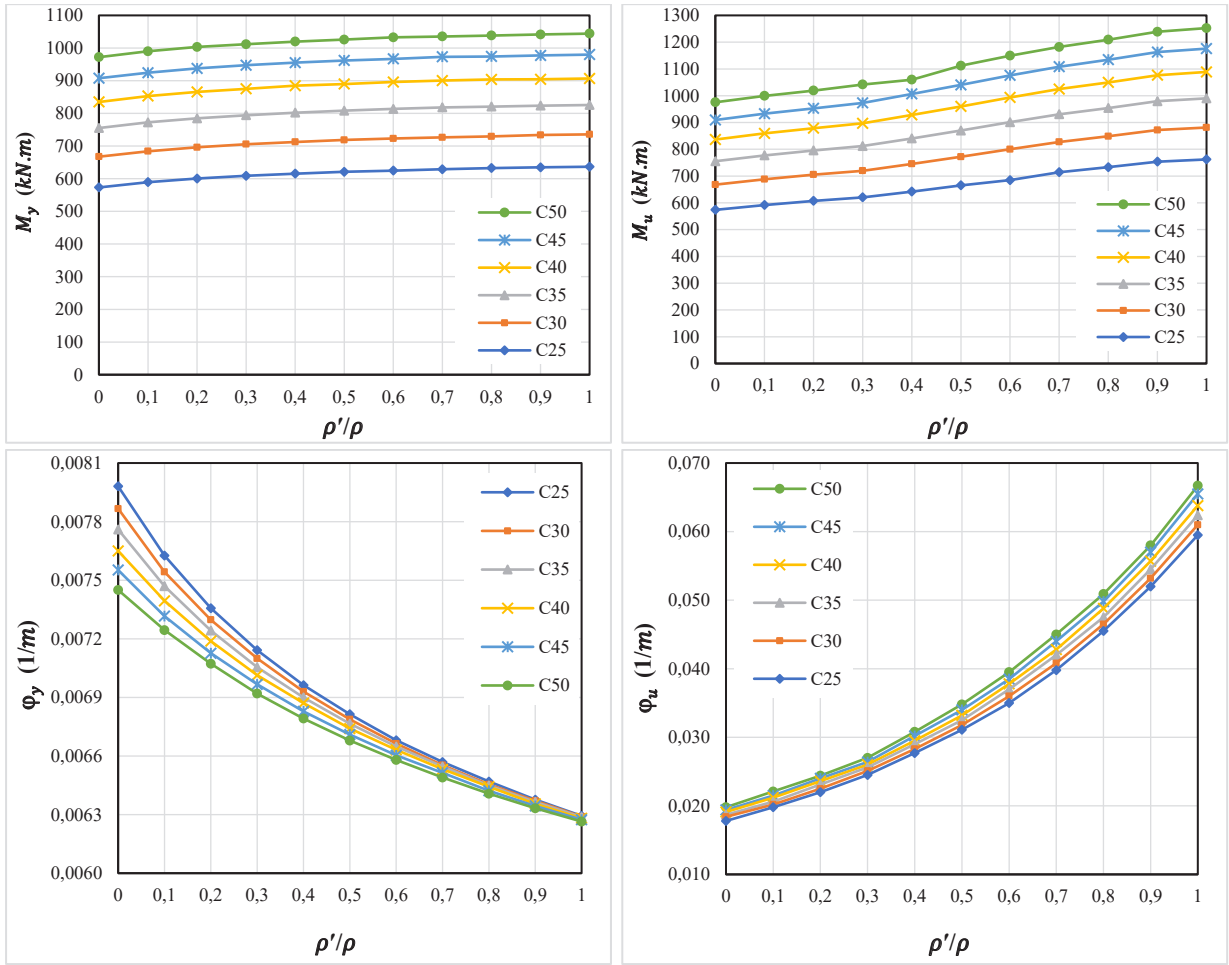
f_{ck}	ρ'/ρ	M_y	φ_y	M_u	φ_u	μ_φ
40	0.0	834.9	0.00765	836.3	0.01910	2.50
	0.1	853.1	0.00739	859.4	0.02120	2.87
	0.2	865.6	0.00719	878.6	0.02360	3.28
	0.3	875.3	0.00701	897.0	0.02600	3.71
	0.4	884.8	0.00687	928.2	0.02950	4.29
	0.5	889.8	0.00674	959.9	0.03300	4.90
	0.6	895.9	0.00663	993.4	0.03750	5.65
	0.7	900.5	0.00653	1024.7	0.04280	6.55
	0.8	903.8	0.00644	1049.5	0.04850	7.53
	0.9	904.3	0.00636	1076.7	0.05520	8.69
1.0	906.8	0.00628	1088.8	0.06350	10.11	

e) Beton sınıfı 45 MPa

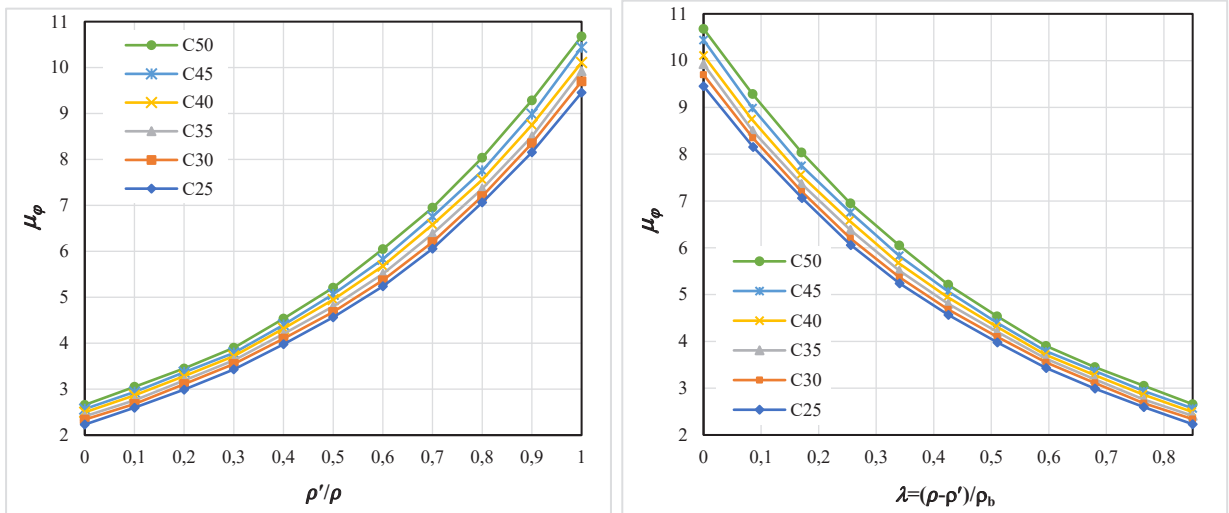
f_{ck}	ρ'/ρ	M_y	φ_y	M_u	φ_u	μ_φ
45	0.0	907.6	0.00755	909.4	0.01940	2.57
	0.1	924.4	0.00732	933.0	0.02150	2.94
	0.2	937.6	0.00713	952.8	0.02400	3.37
	0.3	947.5	0.00697	973.3	0.02640	3.79
	0.4	955.4	0.00683	1006.6	0.03060	4.48
	0.5	961.8	0.00671	1040.4	0.03400	5.07
	0.6	966.9	0.00660	1076.1	0.03850	5.83
	0.7	973.3	0.00651	1108.2	0.04400	6.75
	0.8	974.2	0.00642	1134.6	0.04980	7.75
	0.9	977.2	0.00634	1163.1	0.05700	8.98
1.0	979.9	0.00627	1176.0	0.06550	10.44	

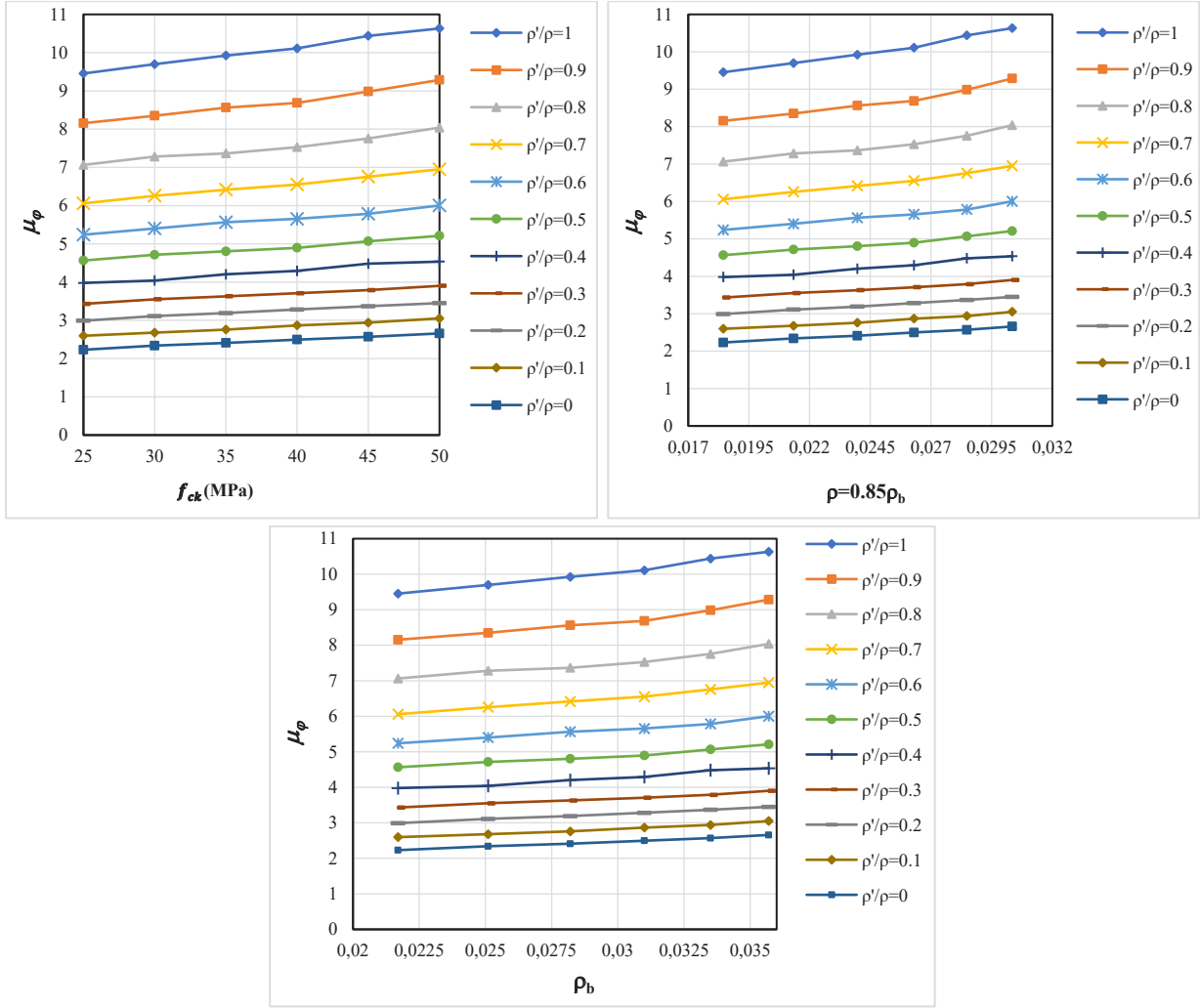
f) Beton sınıfı 50 MPa

f_{ck}	ρ'/ρ	M_y	φ_y	M_u	φ_u	μ_φ
50	0.0	972.1	0.00745	975.5	0.01980	2.66
	0.1	990.0	0.00724	999.3	0.02210	3.05
	0.2	1003.3	0.00707	1019.2	0.02440	3.45
	0.3	1011.6	0.00692	1041.8	0.02700	3.90
	0.4	1019.8	0.00679	1059.9	0.03080	4.53
	0.5	1025.8	0.00668	1112.3	0.03480	5.21
	0.6	1032.6	0.00658	1149.5	0.03980	6.05
	0.7	1035.4	0.00649	1182.2	0.04510	6.95
	0.8	1038.4	0.00641	1209.4	0.05150	8.04
	0.9	1041.6	0.00633	1238.9	0.05880	9.29
1.0	1044.2	0.00626	1252.6	0.06690	10.68	



Şekil 2.3. Basınç/çekme donatısı oranının ve beton basınç dayanımının moment ve eğrilik davranışı üzerindeki etkisi





Şekil 2.4. Farklı tasarım parametrelerinin betonarme kiriş elemanların eğrilik sünekliği üzerindeki etkisi

Analiz sonuçları, betonarme kiriş kesitlerinin moment-eğrilik davranışının, beton basınç dayanımı ile donatı oranının ortak etkisi altında sistematik bir biçimde değiştiğini açıkça ortaya koymaktadır. Elde edilen veriler, akma momenti (M_y) ve nihai moment (M_u) değerlerinin her iki parametredeki (f_{ck} ve ρ'/ρ) artışla birlikte monotonik olarak yükseldiğini göstermektedir.

Beton basınç dayanımının 25 MPa'dan 50 MPa'a artırılması, tüm donatı oranları için kesit moment kapasitesinde belirgin bir artışa yol açmıştır. Bu durum, basınç bölgesindeki betonun daha yüksek gerilme seviyelerinde çalışabilmesi sonucu kesitin iç kuvvet dengesinin daha büyük momentler altında sağlanabilmesi ile açıklanabilir. Bununla birlikte, donatı oranındaki artışın özellikle nihai moment kapasitesi üzerinde daha belirgin bir etkisi olduğu görülmektedir.

Düşük ρ'/ρ oranlarında M_y ve M_u değerleri birbirine oldukça yakın seyrederken, yüksek ρ'/ρ oranlarında M_u değerinin M_y 'e kıyasla daha hızlı arttığı belirlenmiştir. Bu eğilim, kesitin akma sonrası moment taşıma kapasitesindeki artışın ρ'/ρ oranına bağlı olarak geliştiğini ve plastik mafsallı oluşumu sonrasında moment kapasitesinin daha geniş bir aralıkta sürdürülebildiğini göstermektedir.

Eğrilik parametreleri açısından değerlendirildiğinde, akma eğriliği (φ_y) değerlerinin artan ρ'/ρ oranı ile birlikte azalma eğiliminde olduğu tespit edilmiştir. Bu durum, ρ'/ρ oranındaki artışın kesit rijitliğini artırarak akma davranışının daha düşük eğrilik seviyelerinde başlamasına neden olduğunu göstermektedir. f_{ck} değerindeki artışın ise φ_y üzerindeki etkisinin daha sınırlı olduğu, ancak genel olarak azalma yönünde bir eğilim sergilediği görülmektedir. Buna karşılık, nihai eğrilik (φ_u) değerlerinin hem f_{ck} değeri hem de ρ'/ρ oranındaki artışla birlikte belirgin şekilde yükseldiği belirlenmiştir. f_{ck} değerindeki artış, basınç bölgesinde ezilme sınırına ulaşılmasını geciktirerek kesitin ulaşabileceği maksimum eğrilik değerini artırırken; ρ'/ρ artış, çekme bölgesinde daha yüksek plastik deformasyonların gelişmesine olanak tanımaktadır. Bununla birlikte, beton dayanımının deformasyon kapasitesi üzerindeki etkisinin sınırlı olduğu ve özellikle yüksek dayanım seviyelerinde malzeme gevrekliğinin artmasına bağlı olarak bu etkinin kısmen sınırlandığı dikkate alınmalıdır.

Eğrilik sünekliği ($\mu_\varphi = \varphi_u/\varphi_y$) açısından sonuçlar incelendiğinde, donatı oranının belirleyici bir parametre olduğu açıkça görülmektedir. ρ'/ρ oranındaki artış ile süneklik kapasitesinin önemli ölçüde yükseldiği; örneğin düşük ρ'/ρ oranlarında μ_φ değerlerinin yaklaşık 2.2-2.6 aralığında olduğu, yüksek ρ'/ρ oranlarında ise bu değerlerin 9-10.5 seviyelerine ulaştığı belirlenmiştir. f_{ck} değerindeki artış da süneklik üzerinde olumlu bir etki yaratmakla birlikte, bu etkinin ρ'/ρ oranına kıyasla ikincil düzeyde kaldığı anlaşılmaktadır. Yüksek f_{ck} ile ρ'/ρ oranının birlikte kullanıldığı kesitlerde oldukça yüksek süneklik seviyelerine ulaşılması mümkün olmakla birlikte, bu durumun betonun gevrekleşme eğilimi çerçevesinde dikkatle değerlendirilmesi gerekmektedir.

Genel davranış bütüncül olarak ele alındığında, düşük ρ'/ρ oranına sahip kesitlerin daha sınırlı plastik deformasyon kapasitesi sergilediği ve akma sonrası moment kapasitesinin kısıtlı olduğu; buna karşılık yüksek ρ'/ρ oranına sahip kesitlerde belirgin bir plastikleşme bölgesinin oluştuğu ve moment-eğrilik eğrisi altında kalan alanın artmasıyla enerji tüketme kapasitesinin önemli ölçüde yükseldiği görülmektedir. f_{ck} değerindeki artış ise kesitin taşıma gücünü artırmanın yanı sıra nihai eğrilik kapasitesini sınırlı ölçüde iyileştirerek daha elverişli bir performans düzeyine katkı sağlamaktadır.

Sonuç olarak, betonarme kirişlerin moment-eğrilik davranışının çok parametreliliği bir etkileşim sonucu oluştuğu ve bu etkileşimde moment kapasitesinin (M_y, M_u) hem f_{ck} değeri hem de ρ'/ρ oranı tarafından kontrol edildiği, buna karşılık şekil değiştirme kapasitesi (φ_u) ve eğrilik sünekliğinin (μ_φ) esas olarak ρ'/ρ oranına duyarlı olduğu belirlenmiştir. Bu bulgular, performansa dayalı tasarım yaklaşımı ile uyumlu olup, optimum kesit davranışının sağlanabilmesi için dayanım ve süneklik gereksinimlerinin birlikte ele alındığı dengeli bir tasarım yaklaşımının benimsenmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

2.2. Betonarme Kirişlerin Etkin Eğilme Rijitlik Değerlerinin Hesaplanması

Bu bölüm kapsamında, çift donatılı betonarme kirişler için etkin eğilme rijitliğinin belirlenmesine yönelik analizler gerçekleştirilmiştir. Beton basınç dayanımı (f_{ck}), çekme donatısı oranı (ρ) ve basınç donatısı oranı (ρ') gibi temel tasarım parametrelerinin çatlama sonrası rijitlik üzerindeki etkileri sistematik olarak incelenmiştir. Kesit düzeyinde gerçekleştirilen doğrusal olmayan moment-eğrilik analizlerinden elde edilen etkin kesit rijitlik katsayıları, ilgili parametreler temel alınarak literatürde önerilen yöntemler ile güncel yönetmeliklere göre karşılaştırılmıştır. Tablo 2.4'te, betonarme kirişler için literatürde ve farklı tasarım yönetmeliklerinde önerilen etkin rijitlik bağıntıları karşılaştırmalı olarak sunulmaktadır.

Tablo 2.4. Betonarme kirişlerde etkin eğilme rijitliğinin belirlenmesine yönelik farklı yaklaşımlar

Literatür ve Yönetmelikler	Etkin Kesit Rijitliği
Moment-eğrilik ilişkisi	$k_e = EI_e/EI$, $EI_e = M_y/\Phi_y$, $E_c = 3250\sqrt{f_{ck}} + 14000 \text{ MPa}$
TBDY (2018) Yığılı plastik davranış kapsamı	$EI_e = \frac{M_y L_s}{\theta_y} \frac{1}{3}$, $\theta_y = \frac{M_y L_s}{3EI}$ (Doğrusal yöntem) , $\varepsilon_y = f_y/E_s$ $\theta_y = \frac{\Phi_y L_s}{3} + 0.0015 \eta \left(1 + 1.5 \frac{h}{L_s}\right) + \frac{\Phi_y d_b f_{ye}}{8\sqrt{f_{ce}}}$ (Doğrusal olmayan yöntem)
Eurocode 8-Part 3 (2005)	$EI_e = \frac{M_y L_v}{3\theta_y}$, $\theta_y = \Phi_y \frac{L_v + a_v z}{3} + 0.0014 \left(1 + 1.5 \frac{h}{L_v}\right) + \Phi_y \frac{d_b L f_y}{8\sqrt{f_c}}$ $V_{Rd,c} = \left[C_{Rd,c} K (100\rho_1 f_{ck})^{\frac{1}{3}} + K_1 \sigma_{cp} \right] b_w d$ $K = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2$, $\rho_1 = \frac{A_{sl}}{b_w d} \leq 0.02$, $\sigma_{cp} = \frac{N_{Ed}}{A_c} < 0.2 f_{cd}$
Eurocode 2 (2004)	$EI = K_c E_{cd} I_c + K_s E_s I_s$, $E_{cd,eff} = \frac{E_{cd}}{(1 + \varphi_{ef})}$, $K_1 = \sqrt{\frac{f_{ck}}{20}}$, $K_2 = n \frac{\lambda}{170} \leq 0.2$ $\rho \geq 0.002$: $K_s = 1$, $K_c = \frac{K_1 K_2}{(1 + \varphi_{ef})}$, $\rho \geq 0.01$: $K_s = 0$, $K_c = \frac{0.3}{(1 + 0.5\varphi_{ef})}$
Biskinis ve Fardis (2004)	$EI_{eff} = M_y L_s / 3 \theta_y$, $\theta_y = \Phi_y \frac{L_s + a_v z}{3} + 0.0013 + a_{sl} \frac{\Phi_y d_b L f_y}{8\sqrt{f_c}}$, $L_s = M/V$ $V_{Rc} = \left\{ \max \left[180(100\rho_1)^{1/3} 35 \sqrt{1 + \sqrt{\frac{0.2}{d}} f_c^{1/6}} \right] \left(1 + \sqrt{\frac{0.2}{d}} f_c^{1/3} + 0.15 \frac{N}{A_c} \right) \right\} b_w d$
Biskinis (2007)	$\frac{EI_{eff}}{E_c I_c} = a \left(0.8 + \ln \left[\max \left(\frac{L_s}{h}; 0.6 \right) \right] \right) \left(1 + 0.048 \min \left(50 \text{ MPa}; \frac{N}{A_c} \right) \right)$, $a = 0.10$: beam
Avşar vd. (2014)	$\alpha_{eff} = 0.271 + 0.0064 \times f_c + 0.120 \times \frac{\rho'_s}{\rho_{st}} + 37.895 \times \rho_{st}$
Foroughi ve Yüksel (2026a)	$k_{e,prop} = \left[-0.14 \left(\frac{\rho'}{\rho} \right)^2 + 0.344 \left(\frac{\rho'}{\rho} \right) + 0.534 \right] \times [-0.0002(f_{ck})^2 + 0.026(f_{ck}) + 0.455]$

Betonarme kirişler için literatürde ve çeşitli standartlarda önerilen etkin rijitlik yaklaşımları incelendiğinde, önemli farklılıklar dikkat çekmektedir. ACI 318 (2014), betonarme kirişlerde çatlaklı kesit rijitliğinin brüt kesit rijitliğine oranını 0.35 olarak önermektedir.

Benzer biçimde ASCE/SEI 41 (2017) standardında önerilmeli olmayan kirişler için etkin rijitlik katsayısı 0,30 olarak tanımlanmıştır.

Eurocode 8 (2004) kapsamında ise bu oran 0.50 olarak kabul edilmektedir.

TBDY (2018)'de betonarme kirişler için etkin rijitlik katsayısı 0.35 olarak öngörülmüş olup, bu yaklaşım genel olarak sabit katsayı varsayımına dayanmaktadır. Bununla birlikte, TBDY (2018)'de tanımlanan yığılı plastik davranış modeline göre tasarlanan elemanlarda rijitlik; kesme açıklığı, akma momenti ve akma dönme kapasitesi gibi parametrelere bağlı olarak belirlenebilmektedir.

Eurocode 8 (2005)'te ise, betonarme eleman rijitliğinin daha gerçekçi temsil edilebilmesi amacıyla akma dönmesi ve moment-kesme oranını esas alan daha ayrıntılı bir bağıntı önerilmektedir. Ayrıca Eurocode 2 (2004)'te, betonun sünme etkileri, çatlama davranışının doğrusal olmayan karakteri ve malzeme özelliklerinin taşıyıcı sistem üzerindeki etkileri dikkate alınarak ikinci merteye etkilerine dayalı nominal rijitlik yaklaşımı benimsenmiştir. Bu düzenlemeler, rijitliğin yalnızca sabit bir katsayı ile tanımlanmasının yeterli olmadığını; kesitsel ve malzeme parametrelerine bağlı olarak değerlendirilmesi gerektiğini açık biçimde ortaya koymaktadır.

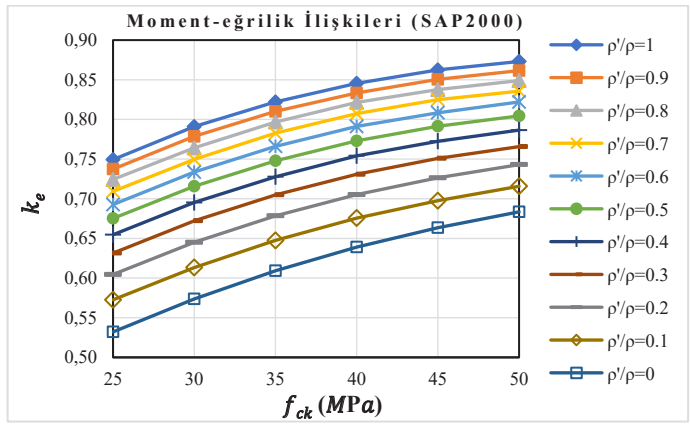
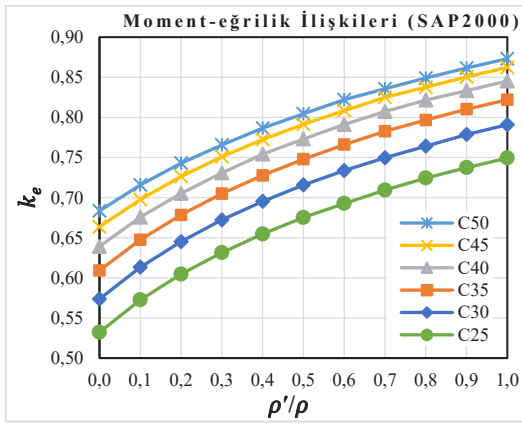
2.2.1. Moment-eğrilik ilişkilerinden hesaplanan etkin kesit rijitlik değerleri

Betonarme kirişlerin etkin eğilme rijitliği (EI_{eff}), moment-eğrilik ($M-\phi$) ilişkisinin başlangıç doğrusal segmentinin eğimi esas alınarak belirlenmiştir. Bu yaklaşım, kesitin elastik davranıştan çatlaklı davranışa geçiş sürecini temsil eden kritik bir aralığı kapsamakta ve betonun çekme bölgesinde çatlak oluşumu ile birlikte gelişen rijitlik kaybını dolaylı biçimde içermektedir. Dolayısıyla tanımlanan EI_{eff} , yalnızca geometrik kesit özelliklerini değil, aynı zamanda beton ve donatı arasındaki kompozit etkileşimin erken doğrusal olmayan davranış üzerindeki etkilerini de temsil eden bütüncül bir parametre olarak değerlendirilebilir.

Doğrusal olmayan kesit analizleri sonucunda elde edilen etkin rijitlik katsayısı (k_e) değerleri, farklı beton basınç dayanımı (f_{ck}) ve basınç/çekme donatısı oranı (ρ'/ρ) kombinasyonları dikkate alınarak hesaplanmış ve sonuçlar Tablo 2.5'te sistematik biçimde sunulmuştur. Ayrıca Şekil 2.5'te, moment-eğrilik analizlerinden elde edilen k_e katsayısının söz konusu tasarım parametrelerine bağlı değişimi grafiksel olarak gösterilmektedir. Böylece betonarme kiriş kesitlerinde malzeme özellikleri ve donatı düzeninin çatlaklı kesit rijitliği üzerindeki etkisi bütüncül bir çerçevede değerlendirilebilmektedir.

Tablo 2.5. Moment-eğrilik ilişkilerinden hesaplanan k_e değerleri

ρ'/ρ	Etkin Kesit Rijitlik Katsayıları (k_e)					
	$f_{ck}=25$ MPa	$f_{ck}=30$ MPa	$f_{ck}=35$ MPa	$f_{ck}=40$ MPa	$f_{ck}=45$ MPa	$f_{ck}=50$ MPa
0.0	0.5321	0.5737	0.6092	0.6391	0.6635	0.6834
0.1	0.5726	0.6133	0.6475	0.6756	0.6975	0.7158
0.2	0.6045	0.6451	0.6784	0.7052	0.7264	0.7430
0.3	0.6314	0.6722	0.7049	0.7308	0.7509	0.7657
0.4	0.6546	0.6952	0.7277	0.7541	0.7724	0.7865
0.5	0.6752	0.7158	0.7479	0.7730	0.7914	0.8044
0.6	0.6927	0.7336	0.7660	0.7911	0.8084	0.8220
0.7	0.7093	0.7496	0.7826	0.8072	0.8249	0.8356
0.8	0.7243	0.7641	0.7966	0.8215	0.8375	0.8489
0.9	0.7373	0.7787	0.8101	0.8333	0.8504	0.8615
1.0	0.7493	0.7909	0.8220	0.8454	0.8624	0.8731

**Şekil 2.5.** Betonarme kirişlerde moment-eğrilik ilişkilerinden elde edilen etkin eğilme rijitliği katsayılarına ρ'/ρ oranı ve f_{ck} parametrelerinin etkisi

Moment-eğrilik analizlerinden elde edilen bulgular, etkin eğilme rijitliği katsayısının hem beton basınç dayanımı hem de basınç donatısı oranıyla sistematik bir şekilde arttığını ortaya koymaktadır. Tablo 2.5'te sunulan değerler incelendiğinde, düşük dayanımlı beton ve düşük ρ'/ρ oranına sahip kesitlerde rijitlik katsayısının sınırlı kaldığı; buna karşılık, beton dayanımı ve basınç donatısı oranının artışıyla kesitin çatlama sonrası rijitlik kaybının daha kontrollü bir biçimde gerçekleştiği gözlenmektedir. Bu davranış, basınç bölgesinde konumlanan donatının kesit performansına etkin katkı sağlaması ve çatlak oluşumunu takiben gerilme dağılımının daha dengeli hale gelmesi ile açıklanabilir.

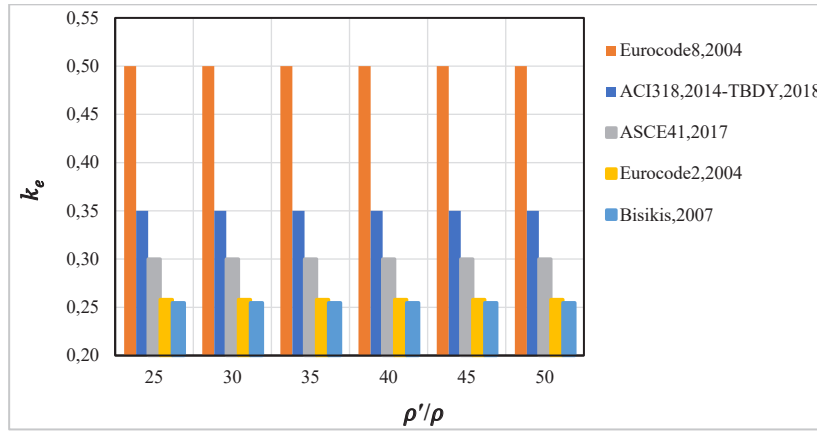
2.2.2. Yönetmelikler ve araştırmacılara göre hesaplanan etkin eğilme rijitliği katsayısı

Bu bölümde betonarme kirişler için etkin eğilme rijitliği katsayısı (k_e) değerleri, farklı uluslararası deprem yönetmelikleri ile literatürde önerilen araştırmacı yaklaşımları esas alınarak karşılaştırmalı biçimde incelenmiştir. Etkin kesit rijitliğinin belirlenmesinde kullanılan kabuller, özellikle çatlama kesit davranışının temsili açısından yapısal analiz sonuçlarını doğrudan etkilemektedir. Bu kapsamda, ilgili yönetmeliklerde tanımlanan rijitlik azaltma katsayıları ile araştırmacılar tarafından

önerilen ampirik ve analitik bağıntılardan (Tablo 2.4) elde edilen k_e değerleri birlikte değerlendirilmiştir.

Ulusal yönetmeliklerden TBDY (2018) ile uluslararası standartlardan Eurocode 8 (2004), ACI 318 (2014) ve ASCE-41 (2017)'de tanımlanan etkin rijitlik kabulleri karşılaştırmaya dahil edilmiştir. Ayrıca Eurocode 2 (2004) yönetmelikleri ile Bisikis (2007) tarafından önerilen yaklaşımlar da incelemeye katılmıştır. Basınç/çekme donatısı oranının (ρ'/ρ) etkin eğilme rijitliği katsayısı üzerindeki etkisinin farklı yaklaşımlara göre karşılaştırılması ise Şekil 2.6'da sunulmaktadır. Bu karşılaştırma, çatlamış kesit rijitliğinin farklı düzenleyici çerçevelerde hangi düzeyde azaltıldığını ortaya koymakta; özellikle rijitlik kabulünün yapısal çözüm sonuçlarına olan etkisini irdelemektedir.

Doğrusal olmayan analizlerde ise başlangıç rijitliğinin tanımlanma biçimi; plastikleşme sınırlarının belirlenmesi, kesit dönme kapasitelerinin hesaplanması ve performans düzeylerinin tayini açısından kritik öneme sahiptir. Bu nedenle k_e katsayısının seçimi yalnızca bir rijitlik azaltma işlemi olmayıp, aynı zamanda yapısal davranış modelinin temel parametrelerinden biri olarak değerlendirilmelidir.



Şekil 2.6. Betonarme kirişlerde basınç/çekme donatısı oranının (ρ'/ρ) etkin eğilme rijitliği katsayısı (k_e) üzerindeki etkisinin farklı yaklaşımlarına göre karşılaştırılması

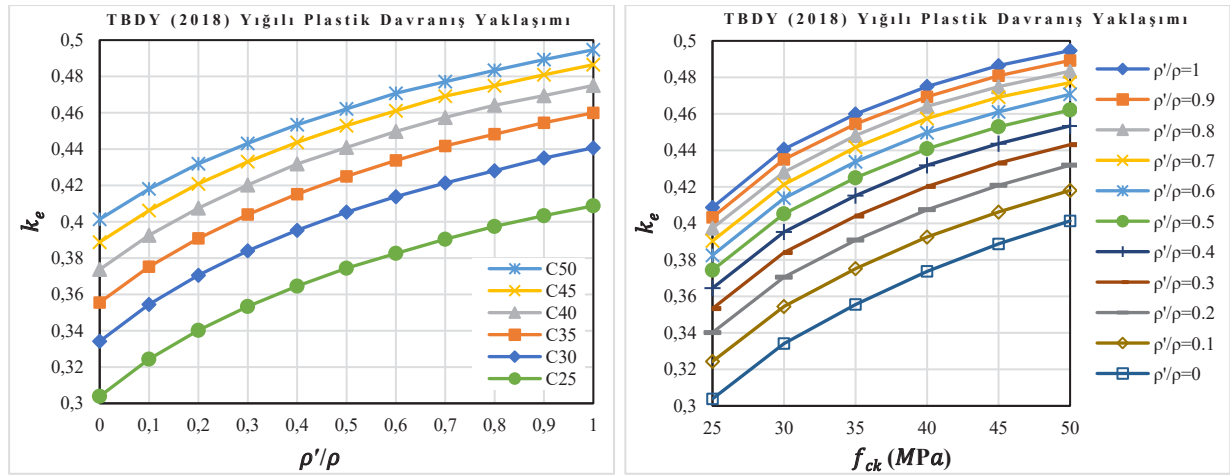
Farklı yönetmelik ve standartlara göre hesaplanan etkin rijitlik katsayıları, çatlamış kesit davranışının temsiline ilişkin kabullerin önemli ölçüde farklılaştığını ortaya koymaktadır. Özellikle sabit katsayı yaklaşımına dayanan yönetmeliklerde, rijitlik değerlerinin parametrik değişkenleri yeterince yansıtamadığı; buna karşılık moment-eğrilik temelli analizlerin daha gerçekçi ve sürekli değişken bir rijitlik tanımı sunduğu anlaşılmaktadır. Şekil 2.6'da verilen karşılaştırmalar, basınç donatısı oranının artmasıyla birlikte bazı yönetmeliklerin rijitlik artışını sınırlı düzeyde yansıttığını, bazılarının ise daha duyarlı sonuçlar verdiğini göstermektedir. Bu durum, performans esaslı analizlerde kullanılan rijitlik kabullerinin, yapı davranışının tahmininde önemli belirsizlikler oluşturabileceğine işaret etmektedir. Özellikle doğrusal olmayan analizlerde rijitlik parametresinin seçimi, yalnızca bir katsayı ataması değil, modelin fiziksel doğruluğunu doğrudan etkileyen kritik bir karar değişkenidir.

TBDY (2018) kapsamında yığılı plastik davranış modeline göre hesaplanan etkin rijitlik değerleri:

TBDY (2018) kapsamında yığılı plastik davranış yaklaşımı esas alınarak (TBDY 2018 Bölüm 13 hükümleri) hesaplanan k_e değerleri Tablo 2.6'da sunulmaktadır. Söz konusu yaklaşıma göre elde edilen etkin eğilme rijitliği katsayılarının basınç/çekme donatısı oranı (ρ'/ρ) ve beton basınç dayanımı (f_{ck}) parametrelerine bağlı değişimi ise Şekil 2.7'de gösterilmektedir. TBDY (2018) kapsamında yığılı plastik davranış modeli esas alınarak elde edilen sonuçlar (Tablo 2.6 ve Şekil 2.7), etkin rijitlik katsayılarının moment-eğrilik analizlerine kıyasla belirgin şekilde daha düşük değerler aldığını göstermektedir. Bu durum, yönetmeliğin güvenli tarafta kalmayı amaçlayan yaklaşımından kaynaklanmaktadır. Parametrik eğilimler incelendiğinde, beton dayanımı ve basınç donatısı oranındaki artışın TBDY (2018) sonuçlarında da rijitliği artırdığı görülmektedir.

Tablo 2.6. TBDY (2018)'e göre yığılı plastik davranış yaklaşımı esas alınarak hesaplanan etkin eğilme rijitliği katsayısı (k_e) değerleri

ρ'/ρ	Etkin Kesit Rijitlik Katsayıları (k_e)					
	$f_{ck}=25$ MPa	$f_{ck}=30$ MPa	$f_{ck}=35$ MPa	$f_{ck}=40$ MPa	$f_{ck}=45$ MPa	$f_{ck}=50$ MPa
0.0	0.3039	0.3342	0.3556	0.3737	0.3888	0.4014
0.1	0.3244	0.3545	0.3752	0.3925	0.4062	0.4181
0.2	0.3402	0.3705	0.3908	0.4075	0.4208	0.4319
0.3	0.3534	0.3840	0.4040	0.4202	0.4331	0.4431
0.4	0.3645	0.3953	0.4152	0.4318	0.4437	0.4534
0.5	0.3744	0.4053	0.4250	0.4409	0.4529	0.4621
0.6	0.3826	0.4138	0.4338	0.4497	0.4611	0.4707
0.7	0.3904	0.4213	0.4417	0.4574	0.4691	0.4771
0.8	0.3974	0.4281	0.4482	0.4642	0.4749	0.4834
0.9	0.4033	0.4351	0.4545	0.4694	0.4809	0.4893
1.0	0.4087	0.4407	0.4600	0.4750	0.4865	0.4947



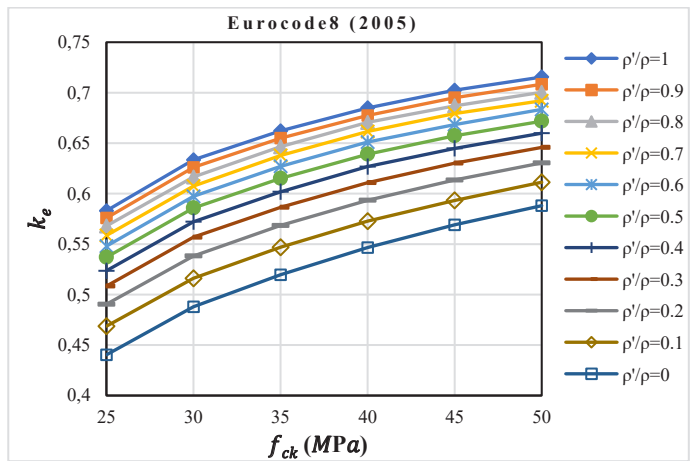
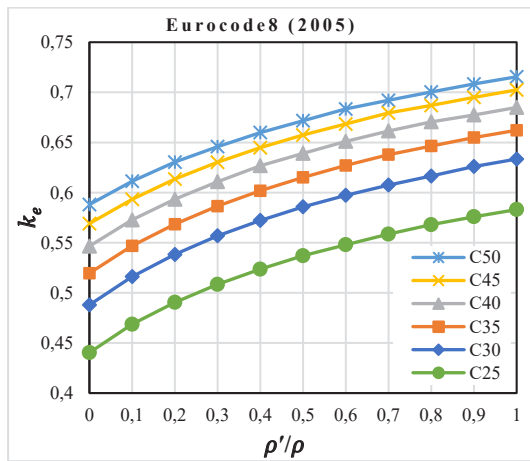
Şekil 2.7. Betonarme kirişlerde TBDY (2018)'e göre yığılı plastik davranış yaklaşımı kapsamında elde edilen etkin eğilme rijitliği katsayısının ρ'/ρ oranı ve f_{ck} parametrelerine bağlı değişimi

Eurocode 8 (2005)'e göre hesaplanan etkin eğilme rijitliği katsayısı:

Eurocode 8 (2005) hükümleri esas alınarak yapılan değerlendirmelerde, betonarme kirişlerin doğrusal olmayan davranışını temsil etmek üzere etkin eğilme rijitliği katsayısı (k_e) belirlenmiştir. Bu kapsamda, kesit rijitliğinin çatlama sonrası azalan karakteri dikkate alınmış ve hesaplamalar yönetmelikte tanımlanan performans temelli yaklaşım çerçevesinde gerçekleştirilmiştir. Elde edilen k_e değerleri Tablo 2.7'de sunulmaktadır. ρ'/ρ oranı ile f_{ck} parametrelerinin etkin eğilme rijitliği üzerindeki etkisini ortaya koymak amacıyla yapılan parametrik inceleme sonuçları ise Şekil 2.8'de gösterilmektedir. Eurocode 8 (2005)'e göre elde edilen etkin rijitlik katsayıları (Tablo 2.7 ve Şekil 2.8), TBDY (2018)'e kıyasla daha yüksek, ancak doğrudan moment-eğrilik analizlerine göre daha düşük bir aralıkta yer almaktadır. Bu durum, Eurocode 8 (2005) yaklaşımının kısmen kalibre edilmiş ve orta düzeyde konservatif bir karakter taşıdığını göstermektedir. Parametrik değişim eğilimleri, beton dayanımı ve donatı oranı arttıkça rijitlik katsayısının düzenli biçimde yükseldiğini ortaya koymaktadır.

Tablo 2.7. Eurocode 8-Part 3 (2005) göre hesaplanan etkin eğilme rijitliği katsayısı

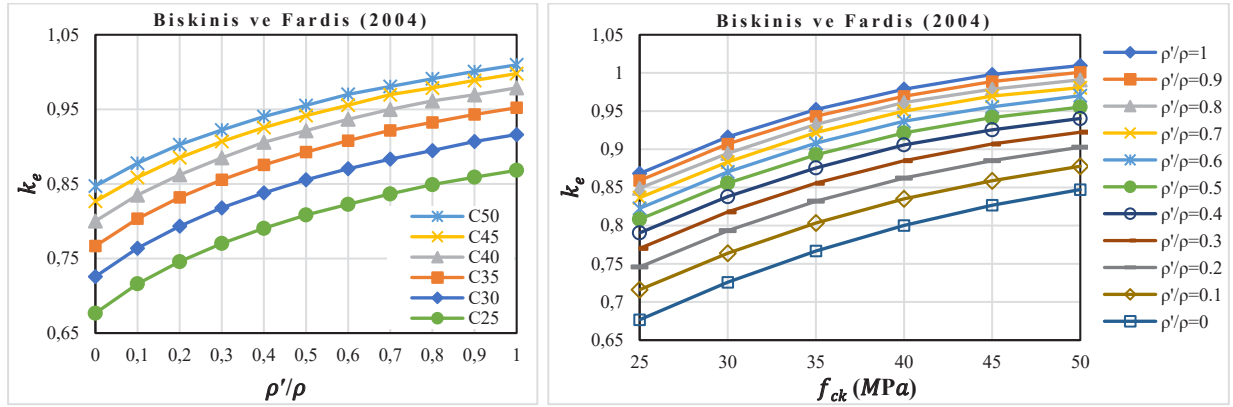
ρ'/ρ	Etkin Kesit Rijitlik Katsayıları (k_e)					
	$f_{ck}=25$ MPa	$f_{ck}=30$ MPa	$f_{ck}=35$ MPa	$f_{ck}=40$ MPa	$f_{ck}=45$ MPa	$f_{ck}=50$ MPa
0.0	0.4403	0.4879	0.5196	0.5466	0.5691	0.5881
0.1	0.4687	0.5161	0.5469	0.5728	0.5933	0.6113
0.2	0.4904	0.5383	0.5684	0.5934	0.6135	0.6304
0.3	0.5084	0.5568	0.5865	0.6109	0.6302	0.6458
0.4	0.5236	0.5722	0.6018	0.6268	0.6448	0.6599
0.5	0.5370	0.5858	0.6152	0.6391	0.6574	0.6717
0.6	0.5480	0.5973	0.6270	0.6511	0.6684	0.6834
0.7	0.5585	0.6075	0.6378	0.6615	0.6794	0.6920
0.8	0.5680	0.6165	0.6465	0.6705	0.6870	0.7004
0.9	0.5758	0.6260	0.6549	0.6774	0.6950	0.7083
1.0	0.5831	0.6334	0.6622	0.6849	0.7025	0.7155



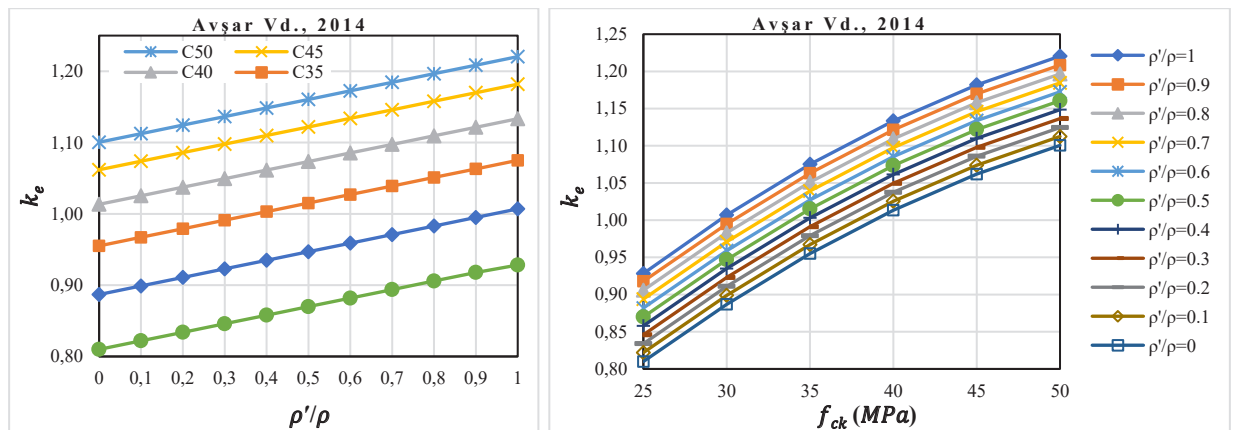
Şekil 2.8. Betonarme kirişlerde Eurocode 8 (2005)'e göre elde edilen etkin eğilme rijitliği katsayısının ρ'/ρ oranı ve f_{ck} parametrelerine bağlı değişimi

Araştırmacılara göre hesaplanan etkin eğilme rijitliği katsayısı:

Etkin eğilme rijitliği üzerine yapılan literatür taraması, birçok çalışmada bu parametrenin sabit bir indirgeme katsayısı olarak tanımlanmasının çatlama kesit davranışını yeterli hassasiyetle temsil etmediğini ortaya koymaktadır. Bu bağlamda, moment-eğrilik analizlerine dayalı analitik modeller, deneysel verilerden türetilmiş ampirik bağıntılar ve enerji temelli yöntemler geliştirilmiştir. Söz konusu yaklaşımların temel amacı, kesit geometrisi, donatı düzeni, malzeme dayanımı ve eksenel yük düzeyi gibi değişkenlerin etkin rijitlik üzerindeki etkilerini doğrudan modele entegre etmektir. Bu bölümde, çift donatılı betonarme kiriş modelleri esas alınmış ve basınç donatısının çatlama kesit rijitliğine katkısı parametrik olarak incelenmiştir. Biskinis ve Fardis (2004) tarafından önerilen yaklaşıma göre elde edilen k_e değerlerinin basınç/çekme donatısı oranı (ρ'/ρ) ve beton basınç dayanımı (f_{ck}) parametrelerine bağlı değişimi Şekil 2.9'da sunulmuştur. Benzer şekilde, Avşar vd. (2014) tarafından önerilen yaklaşıma göre hesaplanan k_e değerlerinin aynı parametrelere bağlı değişimi Şekil 2.10'da gösterilmektedir. Söz konusu grafikler, etkin eğilme rijitliği katsayısı k_e 'nin basınç donatısı oranı ve beton dayanımına bağlı olarak değişim eğilimini ortaya koymaktadır.



Şekil 2.9. Betonarme kirişlerde Biskinis ve Fardis (2004) yaklaşımından elde edilen etkin eğilme rijitliği katsayısının ρ'/ρ oranı ve f_{ck} parametrelerine bağlı değişimi



Şekil 2.10. Betonarme kirişlerde Avşar vd. (2014) yaklaşımından elde edilen etkin eğilme rijitliği katsayısının ρ'/ρ oranı ve f_{ck} parametrelerine bağlı değişimi

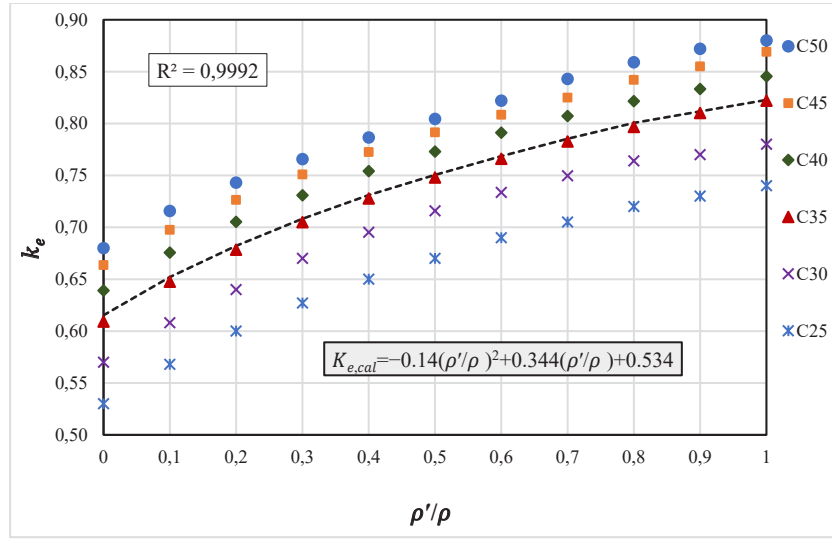
Literatürde önerilen modeller (Şekil 2.9 ve 2.10), etkin eğilme rijitliği katsayısının sabit bir değer olarak alınmasının uygun olmadığını açık biçimde desteklemektedir. Biskinis ve Fardis (2004) ile Avşar vd. (2014) yaklaşımlarında, rijitlik katsayısının hem beton dayanımı hem de donatı oranına bağlı olarak sürekli değiştiği görülmektedir. Bu modellerin en önemli katkısı, kesit davranışını etkileyen parametreleri doğrudan bağıntılara dahil ederek daha fiziksel temelli bir rijitlik tanımı sunmalarıdır. Özellikle basınç donatısının katkısının açık biçimde modellenmesi, çift donatılı kesitlerde rijitlik tahmininin doğruluğunu artırmaktadır. Grafikselleştirilmiş sonuçlar, bu yaklaşımların parametrik duyarlılığı yüksek ve gerçek davranışa daha yakın tahminler ürettiğini göstermektedir.

Gerçekleştirilen parametrik incelemeler ve karşılaştırmalı analizler, betonarme kirişlerde etkin eğilme rijitliğinin tek bir indirgeme katsayısı ile ifade edilmesinin yapısal davranışı yeterli doğrulukla temsil etmediğini açık bir şekilde ortaya koymaktadır. Elde edilen bulgular, söz konusu rijitlik parametresinin beton basınç dayanımı, basınç donatısı oranı ve kesit çatlama düzeyi gibi değişkenlere bağlı olarak sürekli değişen bir karakter sergilediğini göstermektedir. Bu bağlamda, etkin eğilme rijitliğinin tanımlanması yalnızca bir indirgeme katsayısının seçimi olarak değil, yapısal modelin doğruluğunu belirleyen temel bir unsur olarak ele alınmalıdır. Dolayısıyla, ileri düzey analizlerde sabit kabullere dayalı yaklaşımlar yerine, kesit davranışını doğrudan temsil eden ve değişken parametreleri modelleyen yöntemlerin kullanılması, daha güvenilir ve tutarlı sonuçların elde edilmesi açısından kritik öneme sahiptir.

2.3. Foroughi ve Yüksel (2026a) yaklaşımına göre çift donatılı betonarme kiriş için Alternatif Etkin Rijitlik Denklemi

Foroughi ve Yüksel (2026a) tarafından önerilen yaklaşım esas alınarak, çift donatılı betonarme kirişlerin çatlama kesitine ait etkin eğilme rijitliğinin ayrıntılı ve zaman alıcı doğrusal olmayan analiz süreçlerine ihtiyaç duyulmaksızın tahmin edilebilmesine olanak sağlayan alternatif bir denklem elde edilmiştir. Çalışma, geniş bir kesit ve malzeme parametresi aralığını kapsayan parametrik moment-eğrilik analizlerine dayanmaktadır. Sayısal analizlerden elde edilen etkin rijitlik katsayıları, çoklu doğrusal regresyon yöntemi ile değerlendirilmiş ve rijitlik üzerinde en etkili tasarım değişkenleri belirlenmiştir. Çift donatılı kirişlerde etkin rijitliği belirleyen temel parametrelerin beton basınç dayanımı (f_{ck}) ile basınç/çekme donatısı oranları (ρ'/ρ) olduğunu göstermiştir. Özellikle ρ'/ρ oranının, kesitin çatlama sonrası rijitlik evrimi üzerinde belirleyici rol oynadığı saptanmıştır. Basınç donatısının varlığı, yalnızca taşıma kapasitesini artırmakla kalmayıp, aynı zamanda çatlama sonrası rijitlik kaybını sınırlayarak moment-eğrilik eğrisinin eğimini etkilemektedir. Bu doğrultuda, çift donatılı betonarme kirişler için önerilen alternatif etkin rijitlik katsayısı ($k_{e,prop}$), ρ'/ρ ile f_{ck} oranlarını birlikte dikkate alan bir fonksiyon biçiminde tanımlanmıştır. Geliştirilen denklemin temel formu, parametrik analizlerden elde edilen sonuçların istatistiksel değerlendirilmesi sonucunda belirlenmiş; literatürde ve farklı yönetmeliklerde önerilen etkin rijitlik katsayıları ile karşılaştırılarak doğrulanmıştır. Çift donatılı betonarme kiriş kesitlerine ait etkin rijitlik katsayısı ($k_{e,prop}$) denkleminin temel formu Denklem (2.12)'de ifade edilmiştir. ρ'/ρ oranının etkin rijitlik katsayısı üzerindeki değişimi Şekil 2.11'de gösterilmektedir. Çift donatılı kesitlerde ρ'/ρ parametresinin etkin rijitlik katsayısına olan katkısı, Şekil 2.12'de sunulan sonuçlar üzerinden değerlendirilebilir.

$$k_{e,prop} = f\{(\rho'/\rho), f_{ck}\} \quad (2.12)$$



Şekil 2.11. ρ'/ρ parametresinin etkin rijitlik katsayısı üzerindeki etkisi

$f_{yk}=420$ MPa, $f_{ck}=25$ MPa ile 50 MPa ve $\rho'/\rho =0$ ila 1 aralığı için gerçekleştirilen sayısal analiz sonuçları, çift donatılı betonarme kiriş kesitlerinde etkin rijitlik katsayısının, ρ'/ρ oranının artmasıyla birlikte arttığını göstermektedir. Sayısal analizlerden elde edilen sonuçlar kullanılarak, ρ'/ρ oranının etkin rijitlik katsayısı üzerindeki etkisini belirlemek amacıyla regresyon analizi gerçekleştirilmiştir.

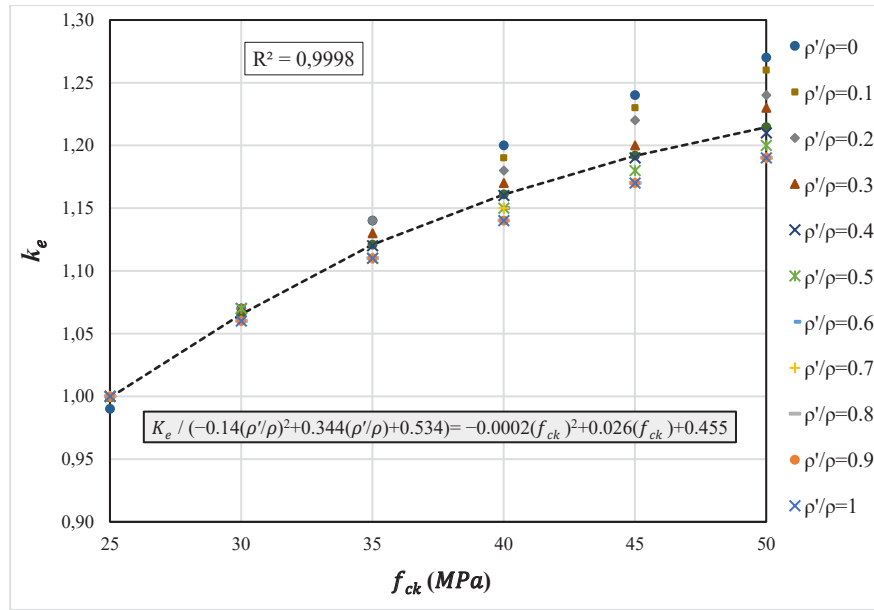
basınç/çekme donatısı oranının (ρ'/ρ) etkin rijitlik katsayısı üzerindeki etkisi Şekil 2.12'de sunulmuş olup, önerilen bağıntının sayısal analizler sonucunda elde edilen etkin rijitlik değerleriyle yüksek düzeyde uyum gösterdiği görülmektedir. Analiz sonuçları, ρ'/ρ oranının etkin rijitlik katsayısı üzerinde belirgin bir etkiye sahip olduğunu açıkça ortaya koymaktadır.

Sayısal analiz bulguları esas alınarak, etkin rijitlik katsayısı ile ρ'/ρ parametresi arasındaki ilişkiler regresyon analizi yoluyla elde edilmiş ve aşağıda ifade edilmiştir:

$$K_{e,cal_1} = -0.14(\rho'/\rho)^2 + 0.344(\rho'/\rho) + 0.534 \quad (2.13)$$

Denklem (2.13), çift donatılı betonarme kiriş kesitlerinin etkin rijitlik katsayısının ($-0.14(\rho'/\rho)^2 + 0.344(\rho'/\rho) + 0.534$) bağıntısının bir fonksiyonu olarak ifade edilebileceğini açıkça göstermektedir. Etkin rijitlik katsayısının $-0.14(\rho'/\rho)^2 + 0.344(\rho'/\rho) + 0.534$ bağıntısına oranı üzerindeki beton basınç dayanımının (f_{ck}) etkisi Şekil 2.12'de gösterilmektedir. Beton basınç dayanımının, $-0.14(\rho'/\rho)^2 + 0.344(\rho'/\rho) + 0.534$ bağıntısıyla hesaplanan etkin rijitlik tahmini üzerindeki sapma etkisi Şekil 2.12 üzerinden değerlendirilebilir. Sayısal analiz sonuçları, beton basınç dayanımının artmasıyla etkin rijitlik katsayısının arttığını göstermektedir. Regresyon analizi ile etkin rijitlik katsayısının ($-0.14(\rho'/\rho)^2 + 0.344(\rho'/\rho) + 0.534$) bağıntısı oranı ile donatının ve beton basınç dayanımı arasındaki ilişki Denklem (2.14) ile elde edilebilir.

$$k_{e,cal_2} = \frac{k_e}{-0.14 \left(\frac{\rho'}{\rho}\right)^2 + 0.344 \left(\frac{\rho'}{\rho}\right) + 0.534} = -0.0002(f_{ck})^2 + 0.026(f_{ck}) + 0.455 \quad (2.14)$$



Şekil 2.12. Etkin rijitlik faktörünün $-0.14(\rho'/\rho)^2 + 0.344(\rho'/\rho) + 0.534$ bağıntısına oranı üzerindeki beton dayanımının etkisi.

Çift donatılı betonarme kiriş kesitlerinde, malzeme dayanımı ve donatı oranı gibi parametrelerin etkisi dikkate alınarak yürütülen parametrik çalışmalar sonucunda, etkin eğilme rijitliği için $k_{e,prop}$ bağıntısı Denklem (2.15)'de sunulmuştur.

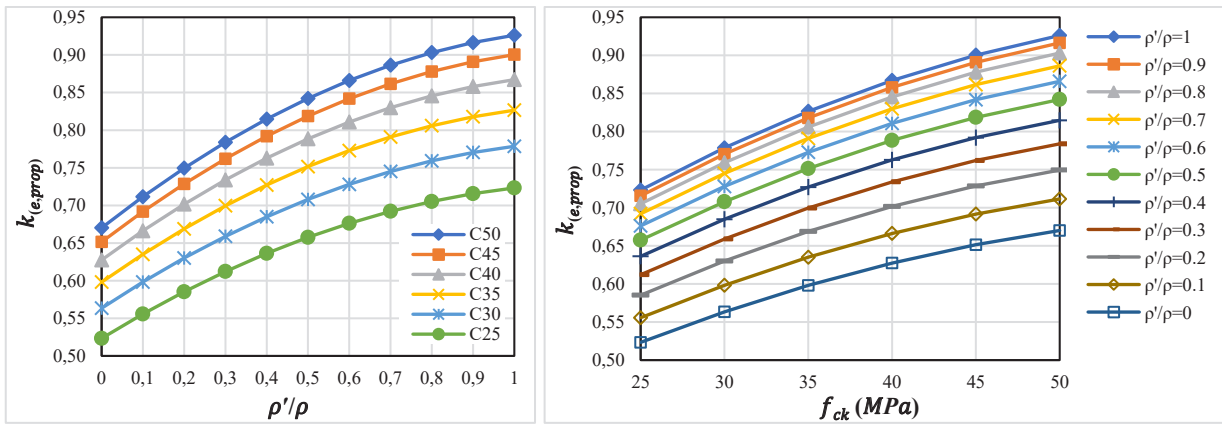
$$k_{e,prop} = \left[-0.14 \left(\frac{\rho'}{\rho} \right)^2 + 0.344 \left(\frac{\rho'}{\rho} \right) + 0.534 \right] \times [-0.0002(f_{ck})^2 + 0.026(f_{ck}) + 0.455] \quad (2.15)$$

Çift donatılı betonarme kiriş kesitleri için önerilen etkin rijitlik katsayısı denklemi ($k_{e,prop}$) kullanılarak elde edilen değerler, farklı f_{ck} ve ρ'/ρ oranları dikkate alınarak hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar, önerilen bağıntının f_{ck} ve ρ'/ρ oranlarındaki değişimlere duyarlılığını açık biçimde ortaya koymakta; bu parametrelerin etkin rijitlik katsayısı üzerindeki etkisinin sayısal olarak değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır.

Çift donatılı betonarme kiriş kesitleri için önerilen denklemden ($k_{e,prop}$) elde edilen değerler Tablo 2.8'de verilmiştir. Çift donatılı betonarme kiriş elemanları için önerilen etkin rijitlik katsayısı denkleminde, ρ'/ρ oranı ve f_{ck} parametrelerine bağlı olarak hesaplanan analiz sonuçları, karşılaştırmalı olarak Şekil 2.13'te sunulmuştur. Şekil 2.13'ün incelenmesi, önerilen tahminlerin tüm parametre aralıklarında sayısal analiz sonuçlarıyla yüksek düzeyde uyum gösterdiğini ortaya koymaktadır.

Tablo 2.8. Çift donatılı betonarme kiriş kesitleri için Denklem (2.15)'ten elde edilen etkin rijitlik katsayısı değerleri

ρ'/ρ	Etkin Rijitlik Katsayısı (k_e) Değerleri					
	$f_{ck}=25$ MPa	$f_{ck}=30$ MPa	$f_{ck}=35$ MPa	$f_{ck}=40$ MPa	$f_{ck}=45$ MPa	$f_{ck}=50$ MPa
0.0	0.5233	0.5634	0.5981	0.6275	0.6515	0.6702
0.1	0.5557	0.5982	0.6350	0.6662	0.6917	0.7116
0.2	0.5853	0.6300	0.6689	0.7017	0.7286	0.7495
0.3	0.6121	0.6590	0.6996	0.7339	0.7620	0.7839
0.4	0.6362	0.6849	0.7271	0.7628	0.7920	0.8147
0.5	0.6576	0.7079	0.7515	0.7884	0.8186	0.8421
0.6	0.6762	0.7280	0.7728	0.8108	0.8418	0.8660
0.7	0.6921	0.7450	0.7909	0.8298	0.8616	0.8863
0.8	0.7052	0.7592	0.8060	0.8455	0.8779	0.9031
0.9	0.7156	0.7704	0.8178	0.8580	0.8908	0.9164
1.0	0.7232	0.7786	0.8266	0.8672	0.9004	0.9262

**Şekil 2.13.** ρ'/ρ ve f_{ck} oranlarının $k_{e,prop}$ oranı üzerinde etkisi

Foroughi ve Yüksel (2026a) tarafından geliştirilen etkin eğilme rijitliği katsayısı bağıntıları ($k_{e,prop}$), çift donatılı betonarme kiriş kesitler üzerinde gerçekleştirilen kapsamlı parametrik analizler temel alınarak türetilmiştir. Söz konusu bağıntılar, kesit davranışını belirleyen başlıca tasarım değişkenlerini içerecek şekilde formüle edilmiştir.

Bu bölüm kapsamında, önerilen bağıntı ile elde edilen etkin eğilme rijitliği katsayıları, moment-eğrilik analizlerine dayalı olarak hesaplanan sayısal etkin rijitlik katsayıları ($k_{e,num}$) ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sürecinde, modelin öngörü doğruluğu ve temsil kabiliyeti, doğrusal olmayan kesit analizlerinden elde edilen referans veriler esas alınarak değerlendirilmiştir. Parametrik incelemelerde, etkin eğilme rijitliği katsayısının başta ρ'/ρ oranı ve beton basınç dayanımı (f_{ck}) olmak üzere temel tasarım değişkenlerine bağlı değişimi sistematik olarak analiz edilmiştir. Bu amaçla, farklı parametre kombinasyonları altında gerçekleştirilen moment-eğrilik analizlerinden elde edilen $k_{e,num}$ değerleri ile önerilen bağıntıdan hesaplanan $k_{e,prop}$ değerleri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Elde edilen bulgular Tablo 2.9'da sunulmuş olup, önerilen modelin farklı tasarım değişkenleri altındaki performansı, istatistiksel değerlendirmeler aracılığıyla ortaya konulmuştur. Bu değerlendirmeler, bağıntının geniş bir parametre aralığında tutarlı ve güvenilir tahminler ürettiğini göstermektedir.

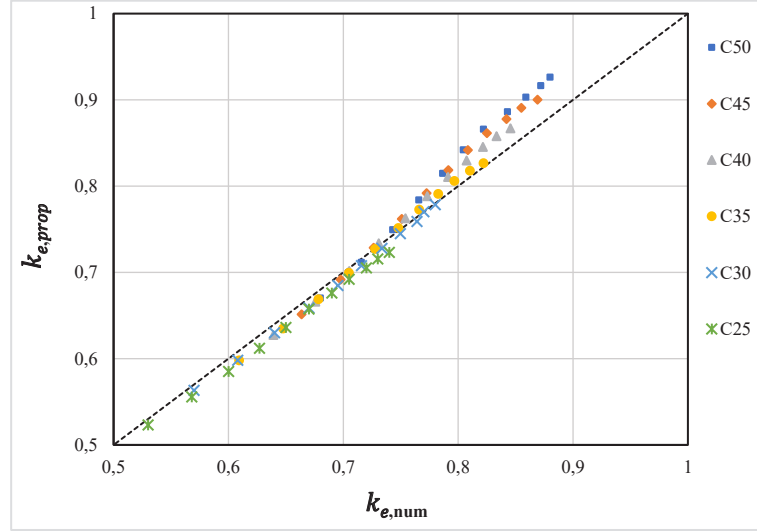
Tablo 2.9. Çift donatılı betonarme kiriş kesitleri için hesaplanan etkin rijitlik faktörlerinin karşılaştırılması

ρ' / ρ	$f_{ck}=25$ MPa			$f_{ck}=30$ MPa		
	$k_{e,num}$ (M- φ)	$k_{e,prop}$ (Denklem 2.15)	$k_{e,prop} / k_{e,num}$	$k_{e,num}$ (M- φ)	$k_{e,prop}$ (Denklem 2.15)	$k_{e,prop} / k_{e,num}$
0.0	0.5321	0.5233	0.98	0.5737	0.5634	0.98
0.1	0.5726	0.5557	0.97	0.6133	0.5982	0.98
0.2	0.6045	0.5853	0.97	0.6451	0.6300	0.98
0.3	0.6314	0.6121	0.97	0.6722	0.6590	0.98
0.4	0.6546	0.6362	0.97	0.6952	0.6849	0.99
0.5	0.6752	0.6576	0.97	0.7158	0.7079	0.99
0.6	0.6927	0.6762	0.98	0.7336	0.7280	0.99
0.7	0.7093	0.6921	0.98	0.7496	0.7450	0.99
0.8	0.7243	0.7052	0.97	0.7641	0.7592	0.99
0.9	0.7373	0.7156	0.97	0.7787	0.7704	0.99
1.0	0.7493	0.7232	0.97	0.7909	0.7786	0.98

ρ' / ρ	$f_{ck}=35$ MPa			$f_{ck}=40$ MPa		
	$k_{e,num}$ (M- φ)	$k_{e,prop}$ (Denklem 2.15)	$k_{e,prop} / k_{e,num}$	$k_{e,num}$ (M- φ)	$k_{e,prop}$ (Denklem 2.15)	$k_{e,prop} / k_{e,num}$
0.0	0.6092	0.5981	0.98	0.6391	0.6275	0.98
0.1	0.6475	0.6350	0.98	0.6756	0.6662	0.99
0.2	0.6784	0.6689	0.99	0.7052	0.7017	1.00
0.3	0.7049	0.6996	0.99	0.7308	0.7339	1.00
0.4	0.7277	0.7271	1.00	0.7541	0.7628	1.01
0.5	0.7479	0.7515	1.00	0.7730	0.7884	1.02
0.6	0.7660	0.7728	1.01	0.7911	0.8108	1.02
0.7	0.7826	0.7909	1.01	0.8072	0.8298	1.03
0.8	0.7966	0.8060	1.01	0.8215	0.8455	1.03
0.9	0.8101	0.8178	1.01	0.8333	0.8580	1.03
1.0	0.8220	0.8266	1.01	0.8454	0.8672	1.03

ρ' / ρ	$f_{ck}=45$ MPa			$f_{ck}=50$ MPa		
	$k_{e,num}$ (M- φ)	$k_{e,prop}$ (Denklem 2.15)	$k_{e,prop} / k_{e,num}$	$k_{e,num}$ (M- φ)	$k_{e,prop}$ (Denklem 2.15)	$k_{e,prop} / k_{e,num}$
0.0	0.6635	0.6515	0.98	0.6834	0.6702	0.98
0.1	0.6975	0.6917	0.99	0.7158	0.7116	0.99
0.2	0.7264	0.7286	1.00	0.7430	0.7495	1.01
0.3	0.7509	0.7620	1.01	0.7657	0.7839	1.02
0.4	0.7724	0.7920	1.03	0.7865	0.8147	1.04
0.5	0.7914	0.8186	1.03	0.8044	0.8421	1.05
0.6	0.8084	0.8418	1.04	0.8220	0.8660	1.05
0.7	0.8249	0.8616	1.04	0.8356	0.8863	1.06
0.8	0.8375	0.8779	1.05	0.8489	0.9031	1.06
0.9	0.8504	0.8908	1.05	0.8615	0.9164	1.06
1.0	0.8624	0.9004	1.04	0.8731	0.9262	1.06

Sayısal analizlerden elde edilen değerler ile Denklem (2.15) kullanılarak hesaplanan sonuçlar arasındaki farkın, ρ'/ρ oranı ve f_{ck} değerlerinin artmasıyla birlikte sınırlı ölçüde arttığı gözlemlenmektedir. $k_{e,prop}$ denklem ile sayısal analizler sonucunda elde edilen etkin rijitlik katsayılarının doğrudan karşılaştırması ise Şekil 2.14'te sunulmuştur. Bu karşılaştırma, geliştirilen bağıntının çift donatılı betonarme kiriş kesitlerinin etkin rijitliğinin tahmininde güvenilir ve uygulanabilir bir yaklaşım sunduğunu destekler niteliktedir.



Şekil 2.14. $k_{e,prop}$ ve $k_{e,num}$ değerlerinin karşılaştırması

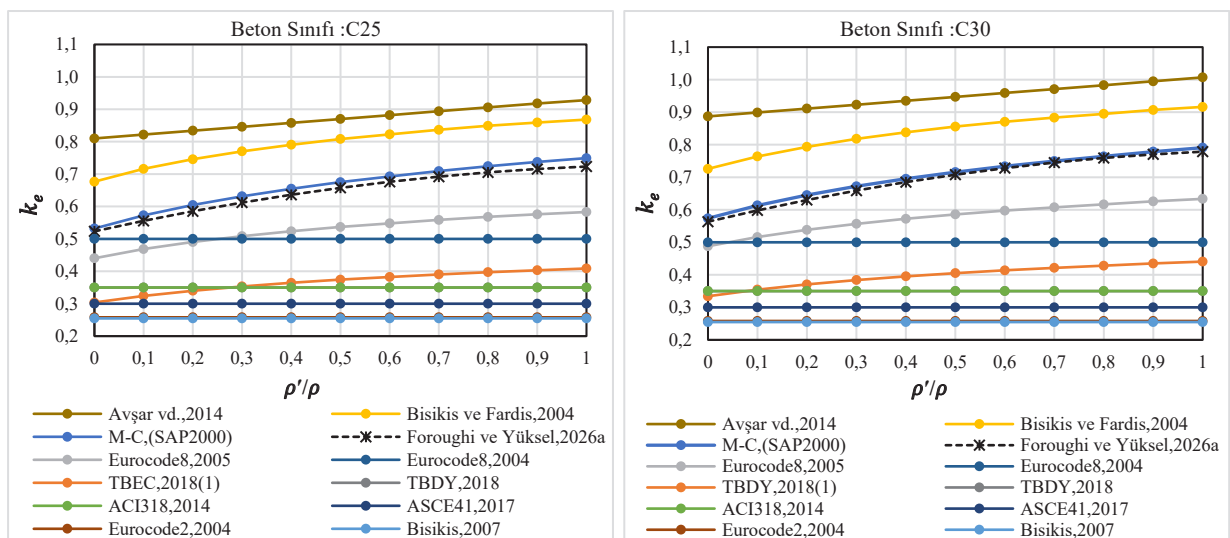
Analizler, basınç donatısı oranındaki artışın çatlama sonrası rijitlik kaybını sınırladığını ve etkin rijitlik katsayısında monoton bir artışa yol açtığını göstermektedir. Buna karşılık, beton basınç dayanımındaki artış tüm parametre aralığında rijitliği artırmakla birlikte, bu etkinin donatı oranına kıyasla daha sınırlı ve ikincil düzeyde olduğu belirlenmiştir. Bu bulgular, çift donatılı kesitlerde rijitlik davranışının temel olarak donatı düzeni tarafından kontrol edildiğini ortaya koymaktadır. Regresyon analizleriyle geliştirilen model, etkin rijitlik katsayısının ρ'/ρ oranı ile doğrusal olmayan bir ilişki sergilediğini ve beton basınç dayanımını da (f_{ck}) içerecek şekilde kalibre edildiğinde yüksek doğrulukla tahmin edilebildiğini göstermektedir. Önerilen denklemin sayısal analiz sonuçları ile karşılaştırılmasında elde edilen yüksek korelasyon katsayısı ($R^2 > 0.99$), modelin açıklayıcılık gücünü doğrulamaktadır. Ayrıca, ortalama tahmin oranının 1.03 ve standart sapmanın yaklaşık %3.07 olması, modelin mühendislik uygulamaları açısından yeterli doğrulukta olduğunu ortaya koymaktadır.

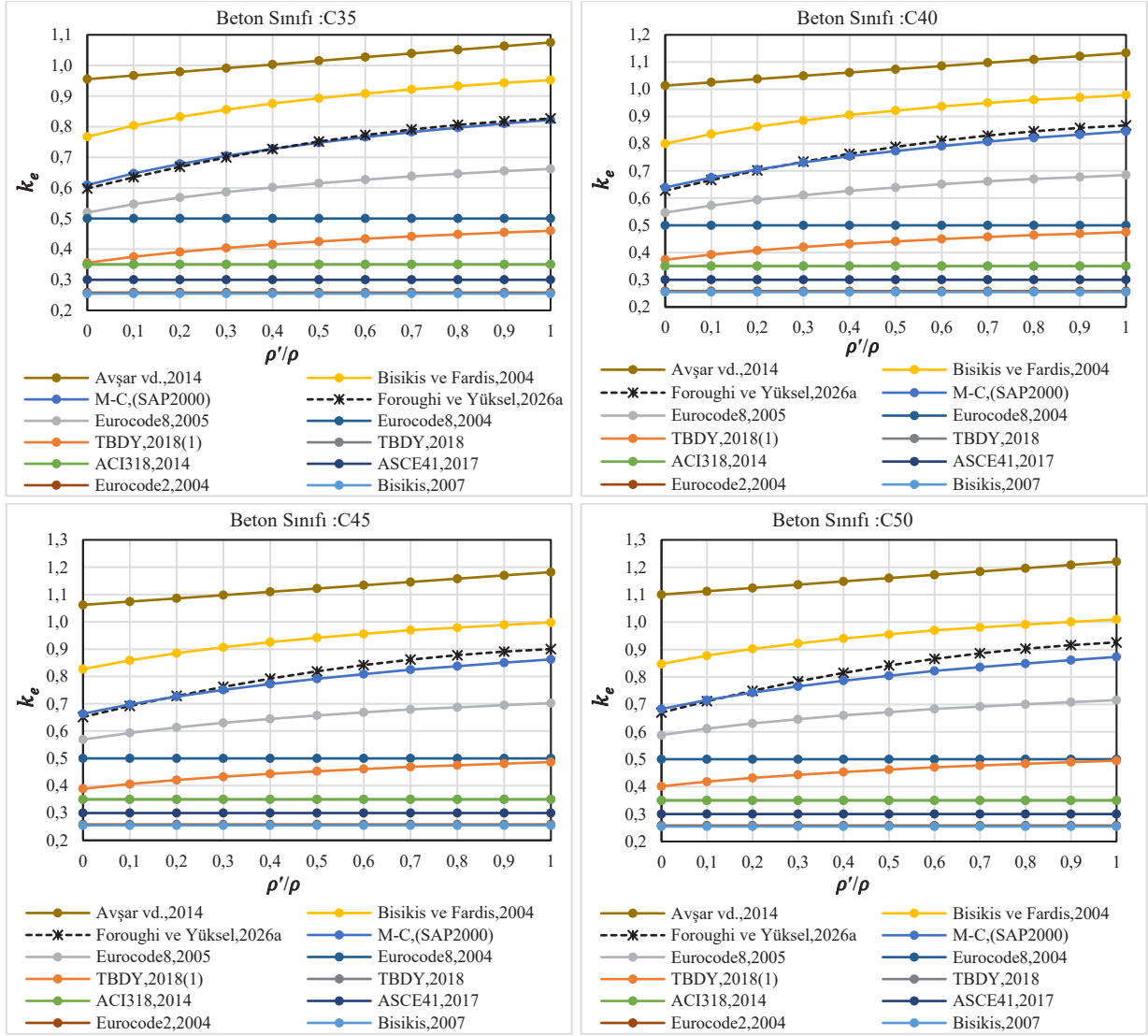
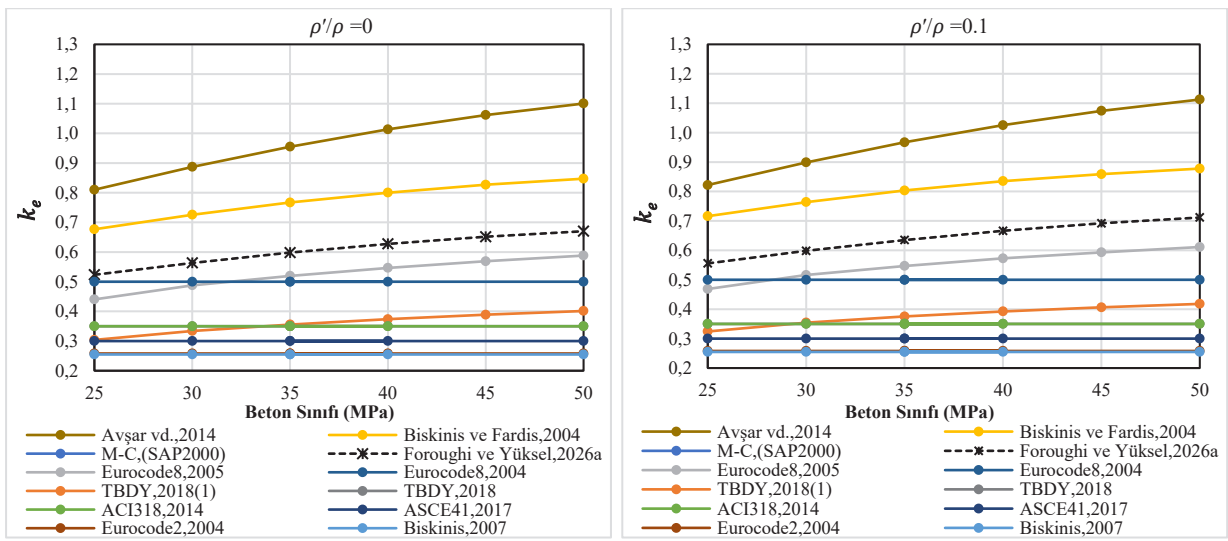
2.4. Çift Donatılı Betonarme Kirişler İçin Önerilen Etkin Rijitlik İlişkilerinin Karşılaştırmalı Analizi

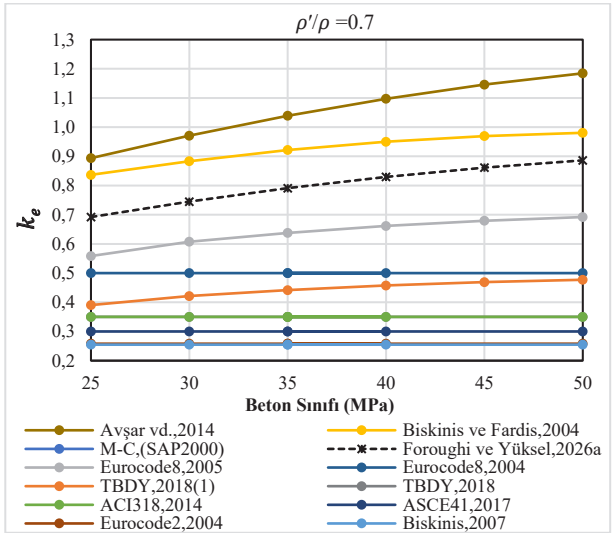
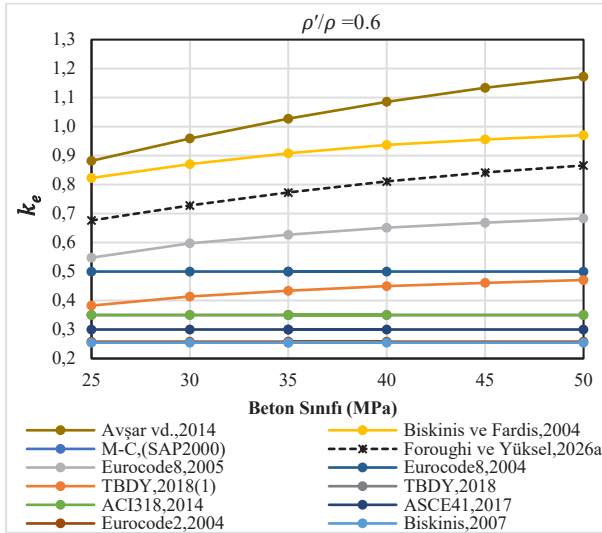
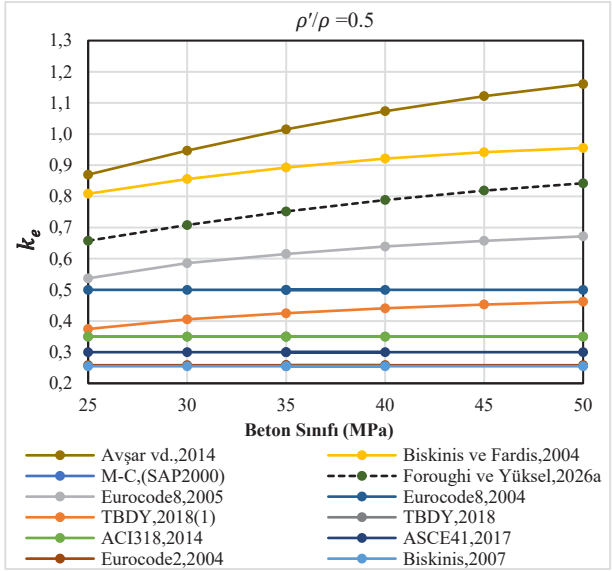
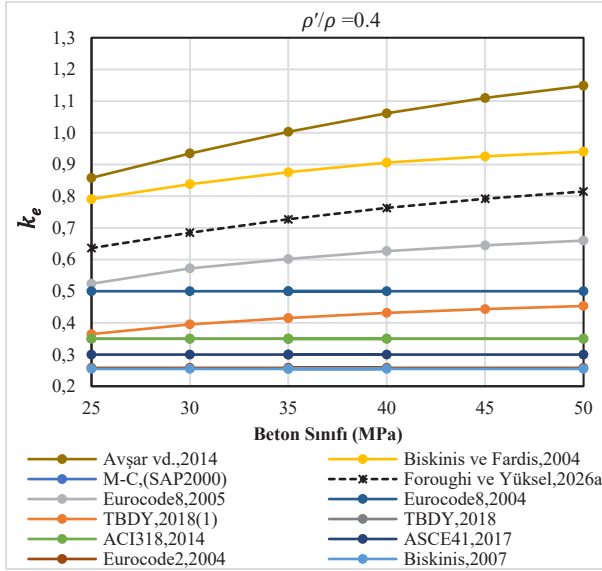
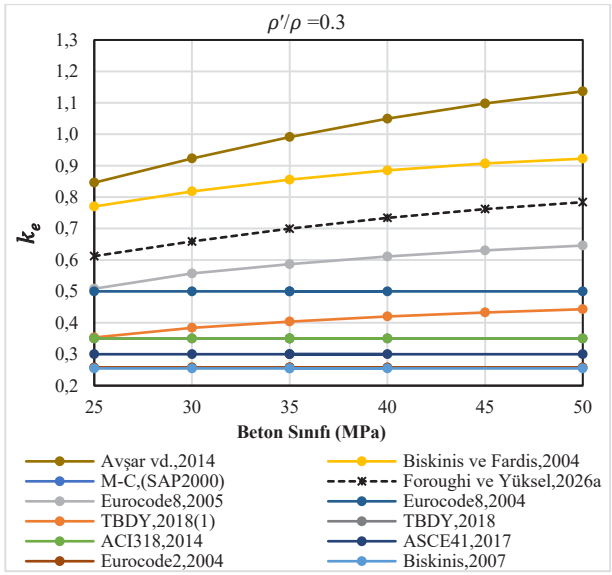
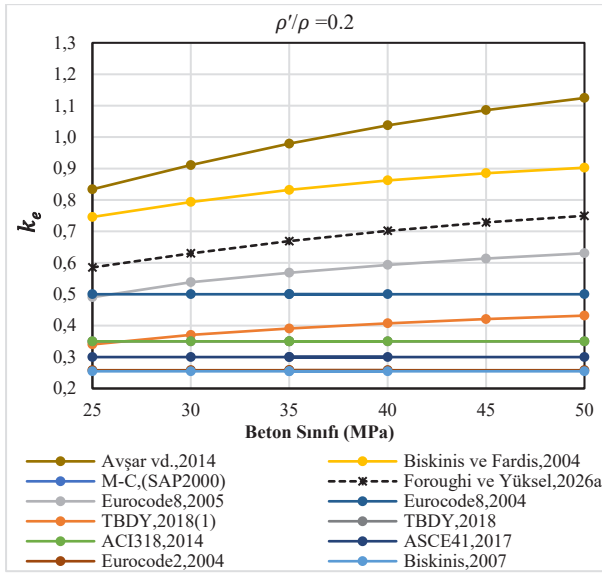
Bölüm kapsamında, farklı betonarme kiriş modellerine ait analiz sonuçları tablo ve grafikler aracılığıyla sistematik biçimde sunulmuş ve ayrıntılı olarak incelenmiştir. Elde edilen bulgular, farklı parametreler ve model yaklaşımları dikkate alınarak karşılaştırmalı bir çerçevede değerlendirilmiştir. Analizler sonucunda belirlenen etkin kesit rijitliği katsayıları, moment-eğrilik ilişkilerine dayalı olarak hesaplanan etkin rijitlik değerleri ile çeşitli tasarım yönetmelikleri ve literatürde önerilen yaklaşımlar ışığında karşılaştırılmıştır. Bu kapsamda, TBDY (2018), ACI 318 (2014), ASCE/SEI 41 (2017), Eurocode 2 (2004), Eurocode 8 (2004) ve Eurocode 8 (2005) yönetmeliklerinde tanımlanan rijitlik kabulleri ile literatürde Avşar vd. (2014), Biskinis (2007) ve Biskinis ve Fardis (2004) tarafından önerilen bağıntılar dikkate alınmıştır. Ayrıca, Foroughi ve Yüksel (2026a) tarafından geliştirilen etkin rijitlik katsayısı denklemi de değerlendirmeye dahil edilmiştir. Gerçekleştirilen karşılaştırmalar, Foroughi ve Yüksel (2026a) tarafından önerilen denklemin farklı yönetmelik yaklaşımları ve literatürde yer alan modeller karşısındaki temsil yeteneğini ve hesaplanan etkin rijitlik değerleri üzerindeki göreceli performansını ortaya koymak amacıyla yapılmıştır.

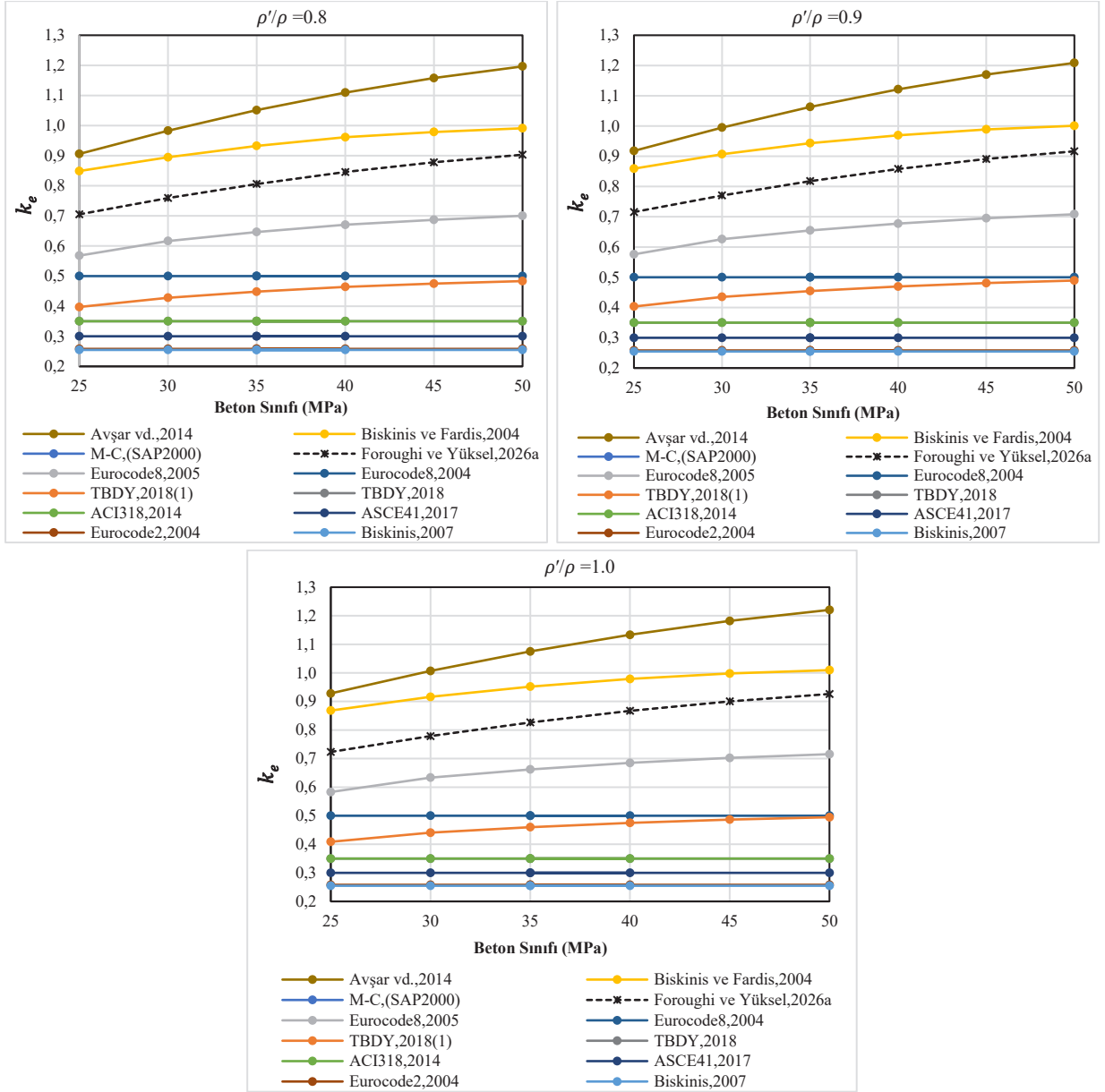
Yapılan değerlendirmeler sonucunda, betonarme kirişlerin etkin rijitlik katsayısını belirleyen başlıca parametrelerin beton basınç dayanımı ile basınç/çekme donatısı oranları (ρ'/ρ) olduğu belirlenmiştir. Söz konusu parametrelerin betonarme kiriş kesitlerinin etkin eğilme rijitliği üzerindeki etkileri izleyen bölümlerde ayrıntılı olarak incelenmiştir.

Bu kapsamda, farklı beton basınç dayanımlarına ve çekme-basınç donatısı oranlarına sahip olacak şekilde tasarlanan çift donatılı betonarme kiriş modelleri için etkin rijitlik katsayıları, önerilen bağıntı kullanılarak analitik olarak hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar, beton basınç dayanımı ile çekme ve basınç donatısı oranlarının etkin rijitlik üzerindeki etkilerini ortaya koymak amacıyla karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Farklı tasarım yönetmelikleri, literatürde önerilen bağıntılar ve bu bölüm kapsamında geliştirilen etkin rijitlik katsayısı denklemi kullanılarak elde edilen $k_e-\rho'/\rho$ ilişkileri Şekil 2.15'te sunulmaktadır. Şekilde yer alan TBDY (2018a) sonuçları, yönetmelikte tanımlanan yığılmış plastik davranış yaklaşımı esas alınarak hesaplanan etkin rijitlik katsayılarını temsil etmektedir.



a) Farklı beton basınç dayanımına göre karşılaştırmalı $k_e - \rho'/\rho$ ilişkileri




 b) Farklı ρ'/ρ oranlarına göre karşılaştırmalı $k_e - f_{ck}$ ilişkileri

Şekil 2.15. Betonarme kirişlerin farklı tasarım parametrelerine göre elde edilen etkin rijitlik katsayısı ilişkilerinin karşılaştırması

2.5. Bölüm Sonu: Araştırma Bulgularının Değerlendirilmesi, Yorumlanması ve Sonuçları

Bu bölüm kapsamında, çift donatılı betonarme kiriş elemanlarının etkin kesit rijitliklerinin belirlenmesine yönelik gerçekleştirilen kapsamlı doğrusal olmayan kesit analizlerinden elde edilen bulgular bütüncül bir yaklaşımla değerlendirilmiş, farklı parametrelerin etkileri sistematik biçimde yorumlanmış ve ulaşılan sonuçlar mühendislik uygulamaları açısından tartışılmıştır. Çalışma kapsamında farklı f_{ck} ve ρ'/ρ oranları dikkate alınarak toplam 66 adet kesit modeli üzerinde gerçekleştirilen analizler, betonarme kiriş davranışının hem mekanik hem de modelleme düzeyinde anlaşılmasına önemli katkılar sağlamaktadır.

Moment-eğrilik davranışına ilişkin bulguların değerlendirilmesi

Moment-eğrilik analizlerinden elde edilen sonuçlar, betonarme kirişlerin doğrusal olmayan davranışının temel karakteristiklerini açık biçimde ortaya koymaktadır. Analiz sonuçları incelendiğinde aşağıdaki temel eğilimler belirlenmiştir:

Beton dayanımının etkisi: Beton basınç dayanımının artmasıyla birlikte:

- Akma momenti ve nihai moment değerlerinde belirgin artış gözlenmiştir.
- Aynı zamanda nihai eğrilik değerlerinin de arttığı, dolayısıyla kesitin deformasyon kapasitesinin arttığı belirlenmiştir.
- Eğrilik sünekliği değerlerinin beton dayanımı ile birlikte arttığı görülmektedir (25 MPa-50 MPa beton dayanımı için).

Bu durum, yüksek dayanımlı betonların yalnızca taşıma kapasitesini değil, aynı zamanda kesitin enerji yutma kapasitesini de artırdığını göstermektedir.

Basınç donatısı oranının etkisi: Basınç donatısı oranının artmasıyla birlikte:

- Nihai moment kapasitesinde sürekli bir artış gözlenmiştir.
- Akma eğriliği değerlerinin azaldığı, buna karşılık nihai eğriliğin önemli ölçüde arttığı belirlenmiştir.
- Eğrilik sünekliğinde etkileyici artışlar meydana gelmiştir (yaklaşık 2.2'den 10.5 seviyelerine kadar).

Bu bulgu, basınç donatısının yalnızca kapasite artırıcı değil, aynı zamanda sünekliği belirleyici bir parametre olduğunu açık biçimde ortaya koymaktadır.

Etkin eğilme rijitliği üzerine bulgular

Moment-eğrilik ilişkilerinden elde edilen etkin rijitlik katsayıları, kesitin gerçek davranışını temsil etme açısından önemli sonuçlar ortaya koymaktadır.

Analiz sonuçlarına göre:

- Beton dayanımı arttıkça etkin rijitlik katsayısı sistematik olarak artmaktadır.
- Basınç donatısı oranındaki artış, etkin rijitlik üzerinde güçlü ve doğrusal olmayan bir artışa neden olmaktadır.

Örneğin;

- C25 beton için $\approx 0.53-0.75$ aralığında,
- C50 beton için $\approx 0.68-0.87$ aralığında değişmektedir.

Bu değerler, çatlaklı kesit rijitliğinin sabit bir katsayı ile temsil edilemeyecek kadar parametreye duyarlı olduğunu açıkça göstermektedir. Elde edilen bulgular, etkin rijitliğin; malzeme dayanımı, donatı dağılımı ve kesit davranışının evrimi gibi faktörlerin birleşik etkisi altında oluştuğunu ortaya koymaktadır. Dolayısıyla etkin rijitlik, yalnızca geometrik değil aynı zamanda mekanik bir parametre olarak değerlendirilmelidir.

Yönetmelik yaklaşımlarının değerlendirilmesi

Betonarme kiriş elemanlarında etkin eğilme rijitliğinin belirlenmesine yönelik olarak farklı tasarım yönetmelikleri tarafından önerilen sabit rijitlik katsayılarının, bu bölüm kapsamında gerçekleştirilen doğrusal olmayan moment-eğrilik analizlerinden elde edilen sonuçlarla karşılaştırılması, önemli farklılıkların ortaya çıktığını göstermektedir. İlgili yönetmeliklerde betonarme kirişler için önerilen etkin rijitlik katsayıları genel olarak sabit değerler şeklinde tanımlanmaktadır. Bu kapsamda, TBDY (2018) ve ACI 318 (2014) için ≈ 0.35 , ASCE/SEI 41 (2017) için ≈ 0.30 ve Eurocode 8 (2005) için ≈ 0.50 düzeyinde etkin eğilme rijitliği katsayılarının önerildiği görülmektedir. Bu katsayıların temel özelliği, parametre bağımsız olmalarıdır. Başka bir ifadeyle, bu yönetmelik yaklaşımlarında etkin eğilme rijitliği; beton basınç dayanımı, çekme ve basınç donatısı oranları, donatı yerleşimi ve kesitsel doğrusal olmayan davranış gibi kritik tasarım değişkenlerinden bağımsız olarak sabit bir değer şeklinde kabul edilmektedir.

Bu bölüm kapsamında moment-eğrilik analizlerine dayalı olarak elde edilen etkin rijitlik katsayıları incelendiğinde, söz konusu değerlerin yönetmeliklerde önerilen sabit katsayılara kıyasla genel olarak daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Özellikle basınç donatısı oranının arttığı kesitlerde, etkin rijitlik katsayısında belirgin artışlar gözlenmiş ve bu durum yönetmelik kabulleri ile analitik sonuçlar arasındaki farkın daha da büyümesine neden olmuştur. Bu bulgu, basınç donatısının çatlaklı kesit rijitliğine olan katkısının sabit katsayı yaklaşımlarında yeterince temsil edilemediğini ortaya koymaktadır. Diğer yandan, sabit katsayı yaklaşımına dayalı yönetmelik kabulleri, tasarımın güvenli yönde gerçekleştirilmesini sağlayan belirli bir emniyet payı içerir. Bu yaklaşım, özellikle deprem etkileri altında güvenli tarafta kalmayı hedefleyen bir tasarım felsefesine dayanmaktadır. Ancak elde edilen bulgular, bu tür sabit kabullerin birçok durumda kesitin gerçek rijitliğini olduğundan daha düşük tahmin ettiğini ve dolayısıyla yapısal analizlerde yer değiştirme taleplerinin gereğinden fazla büyütülmesine neden olabileceğini göstermektedir.

Sabit etkin rijitlik katsayısına dayalı yönetmelik yaklaşımlarının pratiklik ve güvenlik açısından önemli avantajlar sağlamakla birlikte, parametre duyarlılığının ihmal edilmesi nedeniyle betonarme kirişlerin gerçek davranışını tam olarak temsil edemediği anlaşılmaktadır. Bu nedenle, özellikle performans dayalı tasarım ve doğrusal olmayan analiz uygulamalarında, moment-eğrilik ilişkisine dayalı veya kesit parametrelerini doğrudan dikkate alan daha gelişmiş rijitlik tanımlamalarının kullanılması, yapısal davranışın daha gerçekçi biçimde modellenmesine önemli katkı sağlayacaktır.

TBDY (2018) Yığılı Plastik Modelinin Değerlendirilmesi

Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY, 2018) kapsamında tanımlanan yığılı plastik davranış modeline göre betonarme kiriş elemanları için belirlenen etkin eğilme rijitliği katsayılarının, bu bölüm kapsamında gerçekleştirilen doğrusal olmayan kesit analizleri ile karşılaştırılması, söz konusu yaklaşımın davranış temsili açısından belirli sınırlılıklar içerdiğini ortaya koymaktadır. Analiz sonuçları incelendiğinde, TBDY (2018) hükümleri esas alınarak hesaplanan etkin eğilme rijitliği katsayısı değerlerinin yaklaşık olarak 0.30 ile 0.49 aralığında değiştiği görülmektedir. Bu aralık, çatlama kesit davranışını temsil etmek üzere brüt kesit rijitliğinin önemli ölçüde azaltıldığını ve yönetmeliğin güvenli tarafta kalmayı hedefleyen bir yaklaşım benimsediğini göstermektedir. Parametrik incelemeler, basınç donatısı oranı ve beton basınç dayanımı arttıkça etkin eğilme rijitliği katsayısının da sistematik olarak arttığını ortaya koymaktadır. Bu durum, TBDY (2018) yaklaşımının belirli ölçüde parametre duyarlılığı içerdiğini ve kesit davranışındaki temel mekanik eğilimleri kısmen yansıtabildiğini göstermektedir. Özellikle basınç donatısının varlığı, çatlama sonrası rijitlik kaybını sınırlayarak etkin rijitlik üzerinde artırıcı bir etki oluşturmakta; benzer şekilde beton dayanımındaki artış da kesitin genel rijitlik seviyesini yükseltmektedir.

Bununla birlikte, TBDY (2018) kapsamında elde edilen etkin rijitlik katsayılarının, moment-eğrilik ilişkilerine dayalı doğrusal olmayan kesit analizlerinden elde edilen değerlere kıyasla sistematik olarak daha düşük kaldığı belirlenmiştir. Bu fark, özellikle yüksek basınç donatısı oranlarına ve yüksek beton dayanımlarına sahip kesitlerde daha belirgin hale gelmektedir. Söz konusu durum, yönetmelikte tanımlanan yaklaşımın kesitin gerçek rijitlik kapasitesini tam olarak temsil edemediğini ve belirli bir düzeyde konservatif kaldığını göstermektedir. Bu bağlamda TBDY (2018) yığılı plastik davranış modeli, deprem mühendisliği açısından güvenli bir rijitlik tanımı sunmakla birlikte, kesitin doğrusal olmayan davranışını tüm parametreleriyle birlikte temsil eden bir üst sınır yaklaşımı yerine, daha çok alt sınır karakteri taşıyan bir model olarak değerlendirilebilir. Bu yaklaşım, özellikle performans dayalı analizlerde yer değiştirme taleplerinin güvenli tarafta kalacak şekilde büyütülmesine neden olmakta; ancak bazı durumlarda yapısal sistemin gerçek rijitliğinin olduğundan daha düşük tahmin edilmesine yol açabilmektedir. TBDY (2018) kapsamında önerilen etkin rijitlik tanımının, tasarım güvenliği açısından uygun olmakla birlikte, ileri düzey doğrusal olmayan analizler ve performans değerlendirmelerinde daha gerçekçi sonuçlar elde edebilmek için moment-eğrilik temelli veya parametre duyarlı alternatif yaklaşımlarla desteklenmesinin gerekli olduğu değerlendirilmektedir.

Eurocode 8 (2005) Yaklaşımının Değerlendirilmesi

Eurocode 8 (2005) esaslarına göre hesaplanan etkin eğilme rijitliği katsayılarının $\approx 0.44-0.71$ aralığında değiştiği belirlenmiştir. Bu değerler, TBDY (2018) kapsamında elde edilen katsayılara kıyasla daha yüksek olup, çatlama kesit rijitliğinin daha az indirgenmiş bir şekilde temsil edildiğini göstermektedir. Eurocode 8 (2005) yaklaşımı, kesit davranışını daha gerçekçi yansıtmakta ve özellikle doğrusal olmayan analizlerden elde edilen moment-eğrilik temelli sonuçlara daha yakın değerler üretmektedir.

Araştırmacı Modellerinin Değerlendirilmesi

Literatürde önerilen etkin eğilme rijitliği modelleri incelendiğinde, Biskinis ve Fardis (2004) ve Avşar vd. (2014) gibi araştırmacı yaklaşımlarının, kesit davranışını etkileyen bazı temel

parametreleri dikkate aldığı görülmektedir. Özellikle donatı oranı ve belirli malzeme özelliklerinin modele dahil edilmesi, bu yaklaşımların sabit katsayıya dayalı yönetmelik kabullerine kıyasla daha gelişmiş olduğunu ortaya koymaktadır. Bununla birlikte, söz konusu modellerin tüm tasarım değişkenlerini kapsayan bütüncül bir çerçeve sunmadığı ve parametreler arası etkileşimi sınırlı düzeyde temsil ettiği anlaşılmaktadır. Ayrıca bu yaklaşımların büyük ölçüde deneysel verilere ve ampirik bağıntılara dayanması, geçerliliklerinin belirli veri aralıkları ile sınırlı kalmasına neden olmaktadır. Bu durum, farklı kesit ve malzeme kombinasyonlarında model doğruluğunun değişkenlik gösterebileceğini işaret etmektedir.

Foroughi ve Yüksel (2026a) tarafından önerilen denklem üzerine değerlendirme

Geliştirilen etkin eğilme rijitliği bağıntısı, çift donatılı betonarme kirişlerin çatlamış kesit davranışını temsil etme açısından önemli bir katkı sunmaktadır. Önerilen model, beton basınç dayanımı ile çekme ve basınç donatısı oranlarını birlikte dikkate alarak, kesit rijitliğini belirleyen temel parametreleri bütüncül bir yaklaşımla ele almaktadır. Modelin performansı değerlendirildiğinde, sayısal analizlerden elde edilen moment-eğrilik temelli sonuçlarla yüksek düzeyde uyum sağladığı görülmektedir. Geniş parametre aralığında gerçekleştirilen karşılaştırmalar, önerilen bağıntının güvenilir sonuçlar ürettiğini ve hata oranının sınırlı olduğunu göstermektedir. Ayrıca, modelin sistematik bir sapma eğilimi göstermemesi, farklı tasarım koşulları altında tutarlı bir tahmin yeteneğine sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Mühendislik uygulamaları açısından değerlendirildiğinde ise önerilen denklem, ayrıntılı doğrusal olmayan analizlere ihtiyaç duyulmaksızın etkin rijitliğin hızlı ve pratik bir şekilde belirlenmesine olanak sağlamaktadır. Bu yönüyle model, hem tasarım sürecinde hem de performans değerlendirmelerinde kullanılabilecek güvenilir ve uygulanabilir bir alternatif olarak öne çıkmaktadır.

Karşılaştırmalı Genel Değerlendirme

Bu bölüm kapsamında ele alınan tüm yaklaşım ve modeller birlikte değerlendirildiğinde, betonarme kirişlerin etkin eğilme rijitliğinin belirlenmesine yönelik yöntemlerin doğruluk düzeyi, parametre duyarlılığı ve mühendislik uygulamalarındaki kullanılabilirliği bakımından önemli farklılıklar gösterdiği anlaşılmaktadır. Sabit katsayıya dayalı yönetmelik yaklaşımları, hesap kolaylığı ve pratik uygulanabilirlik açısından önemli avantajlar sunmakla birlikte, kesit davranışını etkileyen temel parametreleri dikkate almamaları nedeniyle doğruluk açısından sınırlı kalmaktadır. Bu yaklaşımlar, özellikle ön tasarım aşamalarında tercih edilmekte olup, detaylı analiz gerektiren durumlarda yetersiz kalabilmektedir.

TBDY (2018) kapsamında önerilen yığılı plastik model, sabit katsayı yaklaşımına kıyasla daha gelişmiş bir çerçeve sunmakta ve belirli parametrelerin etkisini dolaylı olarak içermektedir. Bununla birlikte, elde edilen sonuçların genel olarak konservatif kalması, modelin güvenli tarafta kalmayı esas aldığını göstermektedir.

Eurocode 8 (2005) yaklaşımı ise, rijitlik tanımında daha gerçekçi kabuller içermesi nedeniyle doğruluk bakımından TBDY (2018)'e göre daha üst düzey bir performans sergilemektedir. Ancak bu yöntemin de parametre duyarlılığı sınırlı olup, kesit özelliklerindeki değişimleri tam anlamıyla yansıtmadığı görülmektedir.

Literatürde önerilen araştırmacı modelleri, parametre etkilerini daha fazla dikkate almaları nedeniyle orta düzeyde bir doğruluk ve duyarlılık sunmaktadır. Bununla birlikte, bu modellerin

belirli deneysel veri aralıklarına bağlı olması ve genelleştirme kabiliyetlerinin sınırlı kalması, uygulama açısından bazı kısıtlar doğurmaktadır. Foroughi ve Yüksel (2026a) tarafından önerilen model ise, hem beton dayanımı hem de donatı oranlarını doğrudan dikkate alarak yüksek düzeyde parametre duyarlılığı sağlamaktadır. Sayısal analiz sonuçlarıyla gösterdiği yüksek uyum, modelin doğruluk açısından üstün performans sergilediğini ortaya koymaktadır. Ayrıca, pratik kullanım kolaylığı ile birlikte değerlendirildiğinde, önerilen yaklaşımın mühendislik uygulamalarında güvenilir ve etkin bir alternatif sunduğu sonucuna ulaşılmaktadır.

Genel sonuçlar

Bu bölüm kapsamında gerçekleştirilen kapsamlı doğrusal olmayan kesit analizleri sonucunda elde edilen bulgular, betonarme kiriş elemanlarının etkin eğilme rijitliğinin davranışsal açıdan değişken ve çok parametreliliği bir özellik sergilediğini açık biçimde ortaya koymaktadır. Elde edilen sonuçlara göre, betonarme kirişlerin etkin eğilme rijitliği sabit bir büyüklük olmayıp; beton basınç dayanımı ve donatı oranlarına bağlı olarak önemli ölçüde değişmektedir. Özellikle basınç donatısı oranının, hem kesitin süneklik kapasitesi hem de çatlama sonrası rijitlik davranışı üzerinde belirleyici bir parametre olduğu tespit edilmiştir. Bunun yanı sıra, beton dayanımındaki artışın yalnızca taşıma kapasitesini değil, aynı zamanda kesit rijitliğini de artırdığı görülmüştür.

Sabit katsayıya dayalı yönetmelik yaklaşımlarının, betonarme kirişlerin gerçek kesit davranışını temsil etmede yetersiz kalabildiğini göstermektedir. Buna karşılık, moment-eğrilik ilişkisine dayalı doğrusal olmayan analizlerin, etkin eğilme rijitliğinin belirlenmesinde en güvenilir yöntem olduğu ortaya konmuştur. TBDY (2018) gibi yönetmelik yaklaşımlarının güvenli tarafta kalan, ancak çoğu durumda konservatif sonuçlar üreten kabuller içerdiği; Eurocode 8 (2005) yaklaşımının ise daha gerçekçi olmakla birlikte parametre duyarlılığı açısından sınırlı kaldığı belirlenmiştir. Bu bağlamda, çalışma kapsamında Foroughi ve Yüksel (2026a) tarafından önerilen etkin rijitlik bağıntısının, doğrusal olmayan analiz sonuçlarıyla yüksek uyum gösterdiği ve geniş parametre aralığında güvenilir tahminler sunduğu sonucuna ulaşılmıştır. Bu durum, önerilen modelin hem doğruluk hem de uygulanabilirlik açısından önemli bir mühendislik aracı olduğunu ortaya koymaktadır.

Elde edilen bulgular, betonarme yapıların tasarım ve analiz süreçlerine yönelik önemli çıkarımlar sunmaktadır. Öncelikle, performans dayalı tasarım yaklaşımlarında sabit rijitlik katsayıları yerine, kesit parametrelerini doğrudan dikkate alan modellerin kullanılması gerektiği anlaşılmaktadır. Özellikle deprem mühendisliği uygulamalarında etkin rijitlik katsayısının doğru seçimi, yapı sisteminin yer değiştirme talepleri, iç kuvvet dağılımı ve genel performans düzeyi üzerinde doğrudan etkili olmaktadır. Çift donatılı betonarme kirişlerde basınç donatısının ihmal edilmemesi, hem süneklik hem de rijitlik açısından kritik bir gereklilik olarak öne çıkmaktadır. Bu bölüm kapsamında önerilen model ise, ayrıntılı doğrusal olmayan analizlere ihtiyaç duyulmaksızın etkin rijitliğin hızlı ve güvenilir biçimde tahmin edilmesine olanak sağlayarak, hem akademik çalışmalarda hem de mühendislik uygulamalarında pratik bir çözüm sunmaktadır. Sonuç olarak, bu bölüm betonarme kiriş elemanlarının çatlama kesit davranışının daha iyi anlaşılmasına ve etkin eğilme rijitliğinin daha doğru temsil edilmesine yönelik önemli bilimsel katkılar sağlamaktadır. Elde edilen bulgular, mevcut yönetmelik yaklaşımlarının geliştirilmesi gerektiğini açıkça ortaya koymakta ve parametre duyarlılığını esas alan yeni nesil tasarım ve analiz yöntemleri için güçlü bir kuramsal ve uygulamalı altyapı oluşturmaktadır.

3. BETONARME KOLON ELEMANLARININ ETKİN KESİT RİJİTLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Taşıyıcı sistemin düşey elemanları arasında yer alan betonarme kolonlar, hem düşey yüklerin güvenli biçimde zemine aktarılmasında hem de yatay deprem yükleri altında yapının genel stabilitesinin sağlanmasında belirleyici bir role sahiptir. Bu nedenle kolon elemanlarının etkin kesit rijitliğinin doğru biçimde tanımlanması; yapıların doğal titreşim periyotlarının belirlenmesi, yatay yüklerin elemanlara dağılımı, iç kuvvetlerin hesaplanması ve görelî kat ötelenmelerinin tahmini açısından kritik bir tasarım parametresi olarak öne çıkmaktadır (Foroughi ve Yüksel, 2021).

Özellikle doğrusal elastik ve doğrusal olmayan analiz yaklaşımlarında, kolon rijitliğinin hatalı veya aşırı basitleştirilmiş kabullerle tanımlanması, yapıların sismik performansının gerçeğinden sapmasına neden olabilmekte; bu durum hem güvenli olmayan tasarım sonuçlarına hem de gereğinden fazla konservatif çözümlere yol açabilmektedir. Bu bağlamda betonarme kolon elemanlarının çatlamış kesit durumundaki etkin rijitliğinin doğru biçimde modellenmesi, performans dayalı deprem tasarımının temel gerekliliklerinden biri olarak değerlendirilmektedir.

Ulusal ve uluslararası tasarım ve deprem yönetmeliklerinde (TBDY, 2018; ACI 318, 2014; Eurocode 2, 2004; Eurocode 8, 2004, 2005; ASCE/SEI 41, 2017), betonarme kolonların eğilme rijitliğinin belirlenmesinde genellikle brüt kesit rijitliğinin, betonun çatlama etkilerini dikkate alacak şekilde indirgenmesi esasına dayanan yaklaşımlar benimsenmektedir. Bu kapsamda etkin kesit rijitliği çoğunlukla $EI_e = k_e EI_g$ ifadesi ile tanımlanmakta olup, burada EI_g brüt kesit eğilme rijitliğini, k_e ise çatlama ve doğrusal olmayan davranış etkilerini temsil eden indirgeme katsayısını ifade etmektedir. Ancak literatürde yer alan deneysel ve analitik çalışmalar, bu indirgeme katsayısının sabit bir değer olarak kabul edilmesinin, betonarme kolon davranışının gerçekçi biçimde temsil edilmesi açısından yetersiz olduğunu açık biçimde ortaya koymaktadır. Etkin rijitlik katsayısının; beton dayanımı, donatı düzeni, eksenel yük seviyesi ve kesit geometrisi gibi çok sayıda parametreye bağlı olarak önemli ölçüde değişkenlik gösterdiği bilinmektedir.

Özellikle eksenel yük oranının, kolonların çatlamış kesit rijitliği üzerinde baskın bir etkiye sahip olduğu literatürde yaygın biçimde vurgulanmaktadır. Eksenel yükün belirli bir seviyeye kadar artması, betonun basınç bölgesinin etkinliğini artırarak eğilme rijitliğinde görelî bir artışa neden olabilmektedir. Buna karşılık, eksenel yük oranının yüksek değerlere ulaşması durumunda kolon elemanının şekildeğiştirme kapasitesi azalmakta, süneklik kaybı ortaya çıkmakta ve gevrek göçme riski belirgin hale gelmektedir. Bu nedenle etkin kesit rijitliğinin değerlendirilmesi yalnızca rijitlik büyüklüğü açısından değil, aynı zamanda süneklik, hasar düzeyleri ve performans hedefleri bağlamında da ele alınmalıdır.

Bu bölümde, betonarme kolon elemanlarının çatlamış kesit durumundaki etkin eğilme rijitliği analitik yaklaşımlar kullanılarak kapsamlı biçimde incelenmiştir. Çalışma kapsamında, mühendislik uygulamalarında yaygın olarak kullanılan kare, dikdörtgen ve dairesel kesit geometrilerine sahip kolon modelleri dikkate alınmıştır. Bu yaklaşım sayesinde, malzeme özellikleri ve donatı düzeninin yanı sıra kesit geometrisinin etkin rijitlik üzerindeki etkilerinin sistematik ve karşılaştırmalı biçimde değerlendirilmesi amaçlanmıştır.

Betonarme kolon kesitlerinin çatlama sonrası eğilme rijitliği; moment-eğrilik ilişkilerine dayalı doğrusal olmayan kesit analizleri, güncel tasarım ve deprem yönetmeliklerinde önerilen yaklaşımlar ile literatürde yer alan çeşitli bağıntılar kullanılarak belirlenmiştir. Elde edilen rijitlik değerleri, farklı yöntemlerin temsil yeteneğini ortaya koymak amacıyla karşılaştırmalı olarak

değerlendirilmiştir. Bu kapsamda söz konusu yaklaşımlar, betonarme kolon kesitlerinin etkin eğilme rijitliğinin belirlenmesine yönelik analitik bir çerçeve içinde ele alınmıştır.

Doğrusal olmayan kesit davranışına dayalı kapsamlı analitik çalışmalar sonucunda Foroughi ve Yüksel (2026b) tarafından farklı kesit geometrilerine sahip betonarme kolonlar için geliştirilen etkin kesit rijitliği bağıntısı da bu bölümde ayrıntılı olarak incelenmiştir. Önerilen bağıntının kuramsal temelleri ve mühendislik uygulamalarındaki kullanılabilirliği sistematik biçimde değerlendirilmiş; bağıntıdan elde edilen sonuçlar literatürde yaygın olarak kullanılan etkin rijitlik modelleri ile karşılaştırılarak doğruluğu ve temsil kabiliyeti analiz edilmiştir.

Moment-eğrilik ilişkileri, betonarme kolon kesitlerinde beton ve donatı malzemelerinin doğrusal olmayan davranışlarını esas alan kesitsel analizler yoluyla elde edilmiştir. Betonun basınç altındaki gerilme-şekildeğiştirme davranışının modellenmesinde Mander vd. (1988) tarafından geliştirilen sargılı ve sargısız beton modelleri kullanılmıştır. Donatı çeliğinin elastik, akma ve akma sonrası pekleşme davranışları analitik modele dahil edilerek beton-çelik etkileşimi kesit düzeyinde ayrıntılı biçimde temsil edilmiştir. Moment-eğrilik analizleri, doğrusal olmayan kesit davranışını dikkate alabilen SAP2000 yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiş; elde edilen eğriler kolon elemanlarının çatlama sonrası eğilme rijitliği, süneklik kapasitesi ve yükleme seviyesine bağlı rijitlik değişimlerinin değerlendirilmesinde temel gösterge olarak kullanılmıştır. Karşılaştırmalı değerlendirmeler, kare, dikdörtgen ve dairesel kesit geometrisine sahip betonarme kolonlar için ayrı ayrı gerçekleştirilmiş; kesit geometrisine bağlı rijitlik farklılıkları açık biçimde ortaya konulmuştur.

Bu kitap kapsamında, betonarme kolonların doğrusal olmayan davranışı ve etkin eğilme rijitliği; betonun çatlaması, beton ve donatı çeliğinin sargı etkisi, aksel yük seviyesi, kesit boyutları ve malzeme özellikleri gibi birden fazla parametrenin etkileşimi sonucunda ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle, farklı tasarım parametrelerinin etkin rijitlik katsayısı üzerindeki etkilerinin ayrıntılı biçimde incelenebilmesi amacıyla, kare (500 mm × 500 mm), dikdörtgen (400 mm × 600 mm) ve dairesel (600 mm) kesitli kolon modelleri için geniş bir parametre kombinasyonu oluşturulmuştur.

Tasarlanan dairesel, kare ve dikdörtgen kolonlara ait geometrik özellikler ile boyuna ve enine donatı düzenlemeleri Tablo 3.1’de özetlenmiş, donatı detayları ise Şekil 3.1’de şematik olarak sunulmuştur. Kolon modellerinin tasarımında kullanılan tüm parametreler, TBDY (2018)’de belirtilen sınırlar ve tasarım esasları dikkate alınarak belirlenmiştir. Her bir betonarme kolon modeli için, doğrusal olmayan davranışı ve etkin rijitliği etkileyen başlıca tasarım parametreleri sistematik olarak çeşitlendirilmiştir.

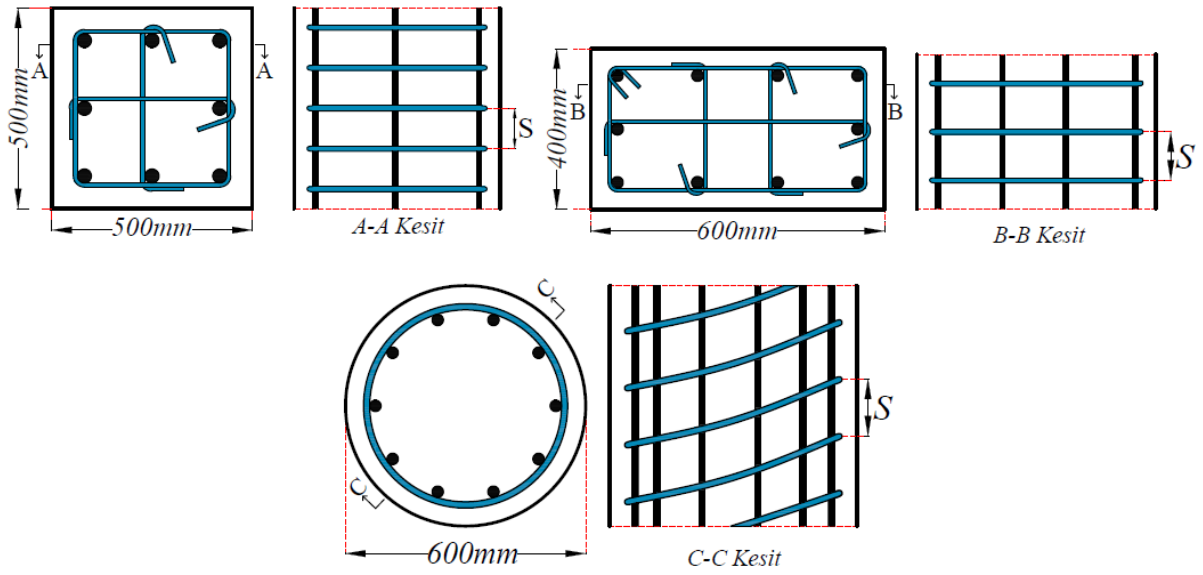
Bu kapsamda, altı farklı boyuna donatı oranını temsil edecek şekilde $\Phi 20$ - $\Phi 30$ mm aralığında boyuna donatı çapları seçilmiştir. Enine donatı etkisinin değerlendirilmesi amacıyla iki farklı enine donatı çapı ($\Phi 10$ ve $\Phi 12$ mm) ile üç farklı etriye aralığı (50, 75 ve 100 mm) dikkate alınmıştır. Beton dayanımının etkin rijitlik üzerindeki etkisini incelemek üzere, analizlerde beş farklı beton sınıfı (C30-C50) kullanılmıştır. Ayrıca kolon davranışında belirleyici bir parametre olan aksel yük seviyesi, $N/N_{max} = 0.10$ - 0.40 aralığında dört farklı aksel yük oranı için değerlendirilmiştir.

Kolon modellerinde kullanılan beton ve donatı çeliğine ait malzeme özellikleri, ilgili yönetmelik esaslarına uygun olarak tanımlanmıştır. Tüm kolon elemanlarında boyuna ve enine donatı çeliği olarak B420C sınıfı çelik kullanılmıştır. Beton ve donatı malzemelerine ait gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri, Bölüm 2’de yer alan Şekil 2.2’de sunulmuş; malzeme modellerinde kullanılan parametreler ise Tablo 2.2’de verilen değerler esas alınarak değerlendirilmiştir. Betonarme kolonların tasarımında, düşey ve deprem yüklerinin birlikte etkisi altında brüt kesit alanının TBDY

(2018)'de verilen $A_c \geq N_{dmax}/0.40f_{ck}$ koşulunu sağlaması zorunluluğu esas alınmış ve tüm kolon modellerinin bu şartı sağladığı doğrulanmıştır. Moment-eğrilik analizlerinde, betonun çekme dayanımının etkin rijitlik üzerindeki etkisinin sınırlı olması nedeniyle betonun çekme dayanımı ihmal edilmiş; analizler betonun basınç altındaki ve donatı çeliğinin çekme-basınç altındaki doğrusal olmayan davranışlarını esas alacak şekilde gerçekleştirilmiştir.

Tablo 3.1. Etkin kesit rijitlik hesabında kullanılan betonarme kolon detayları

f_{ck} (MPa)	Boyuna Donatı (ρ_s)	Sargı Donatısı (ρ_{st})		Eksenel Yük Seviyesi (N/N_{max})
		Çap	Aralık	
C30 C35 C40 C45 C50	Φ20 mm	Φ10 mm Φ12 mm	50 mm 75 mm 100 mm	0.10 0.20 0.30 0.40
	Φ22 mm			
	Φ24 mm			
	Φ26 mm			
	Φ28 mm			
	Φ30 mm			



Şekil 3.1. Betonarme kolon modellerinin kesit görünümü

3.1. Betonarme Kolonların Moment-Eğrilik İlişkileri

Bu bölümde, farklı tasarım parametrelerinin betonarme kolon kesitlerinin doğrusal olmayan davranışı üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla moment-eğrilik analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizler, kare, dikdörtgen ve dairesel kesit geometrisine sahip kolon modelleri üzerinde uygulanmış; kesite etkiyen eğilme momenti ile buna karşılık gelen eğrilik arasındaki ilişki sistematik biçimde değerlendirilmiştir. Elde edilen moment-eğrilik eğrileri, kolon kesitlerinin elastik, çatlama, akma ve göçme aşamalarını temsil eden temel davranış diyagramları olarak kullanılmıştır. Bu eğriler, kesitin doğrusal olmayan tepkisinin ve yükleme süreci boyunca rijitlikte meydana gelen değişimlerin anlaşılmasında anahtar rol oynamaktadır.

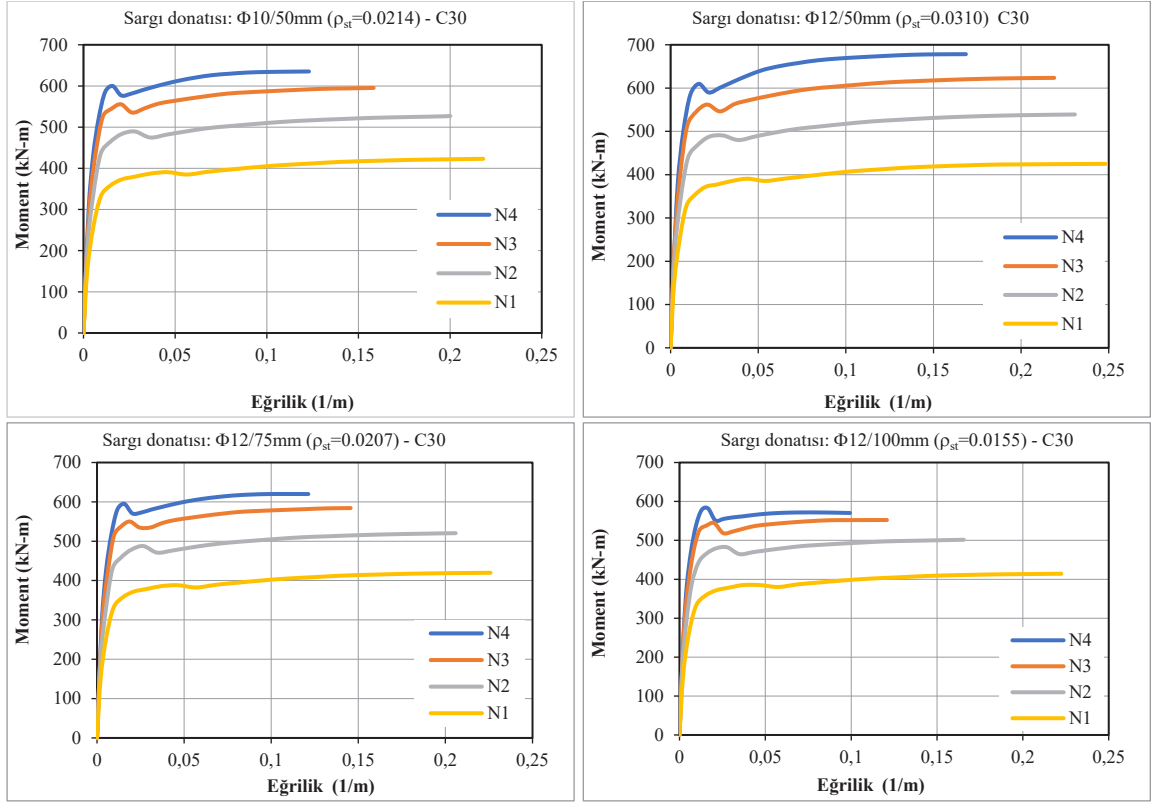
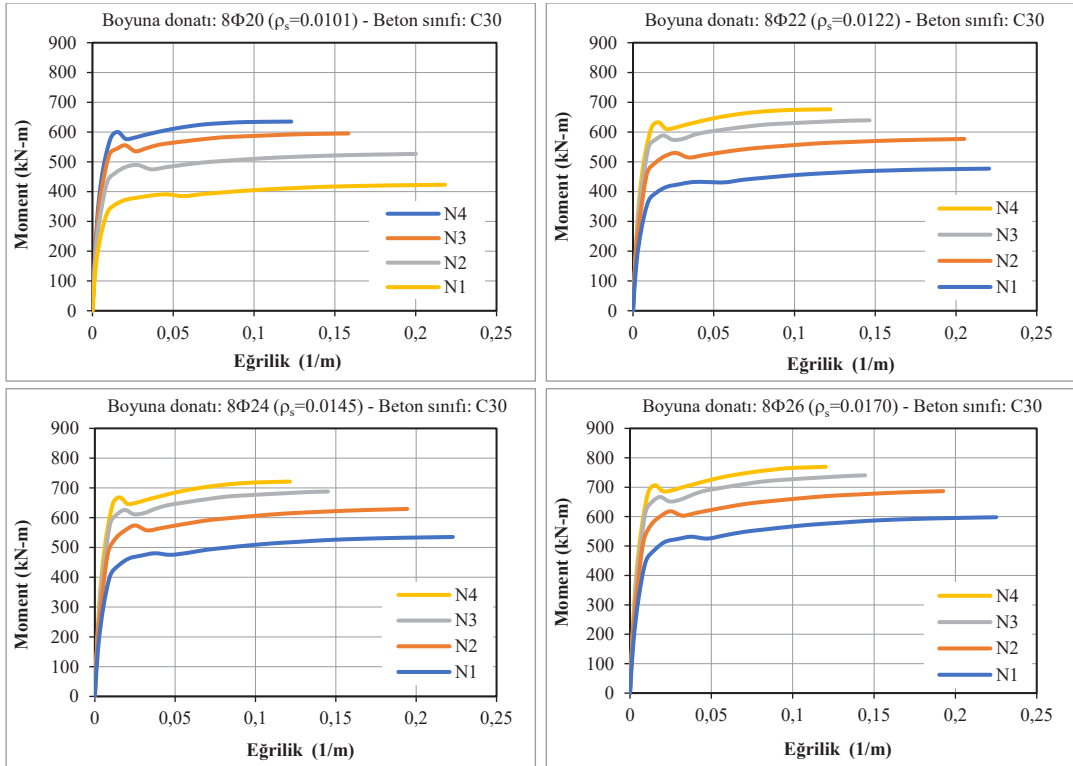
Tasarlanan kolon modellerinde, farklı beton basınç dayanımları (f_{ck}), boyuna donatı oranları (ρ_s), enine donatı oranları (ρ_{st}) ve eksenel yük oranları (N/N_{max}) dikkate alınarak moment-eğrilik ilişkileri ile akma ve göçme aşamalarına karşılık gelen moment (M_y, M_u) ve eğrilik (φ_y, φ_u) değerleri elde edilmiştir. Bu temel büyüklükler kullanılarak kesit sünekliği (μ_φ) ve etkin kesit rijitlik katsayısı (k_e) hesaplanmıştır; böylece kolon kesitlerinin doğrusal olmayan davranış özellikleri ve performans düzeyleri sayısal olarak ortaya konmuştur. Elde edilen parametreler, farklı kesit geometrileri ve tasarım koşulları altında betonarme kolonların rijitlik ve süneklik davranışlarının karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesine imkan tanımakta ve doğrusal olmayan analizlerin performans temelli tasarım ve yapı değerlendirmelerindeki uygulanabilirliğini desteklemektedir.

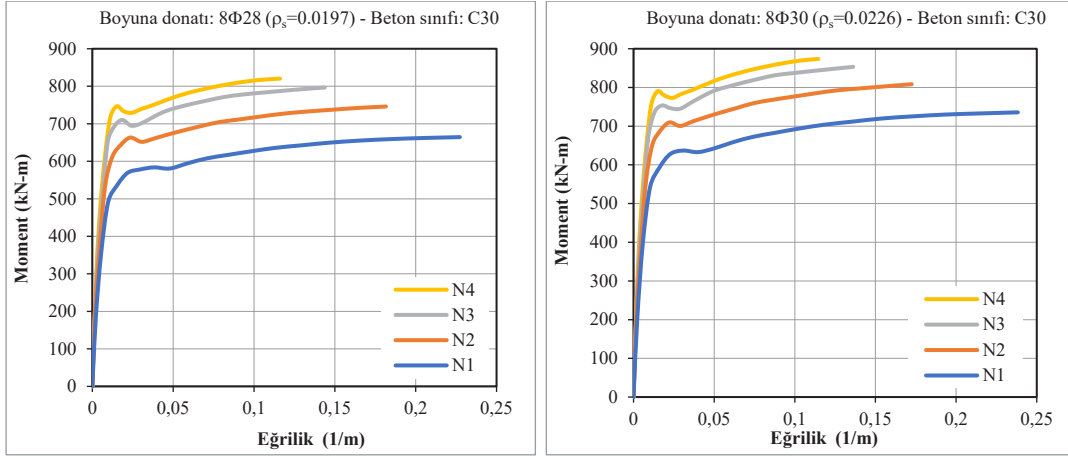
3.1.1. Betonarme kare enkesitli kolon

Kare en kesitli betonarme kolonların doğrusal olmayan davranış özelliklerini ayrıntılı biçimde ortaya koymak amacıyla kapsamlı bir analitik inceleme gerçekleştirilmiştir. Analizler kapsamında; altı farklı boyuna donatı çapı ($\Phi 20$ mm - $\Phi 30$ mm), iki farklı sargı donatısı çapı ($\Phi 10$ mm ve $\Phi 12$ mm), üç farklı sargı donatısı aralığı (50 mm, 75 mm ve 100 mm), beş farklı beton basınç dayanımı (C30 - C50) ve dört farklı eksenel yük seviyesi ($N_1=750$ kN, $N_2=1500$ kN, $N_3=2250$ kN ve $N_4=3000$ kN) dikkate alınarak moment-eğrilik analizleri yapılmıştır.

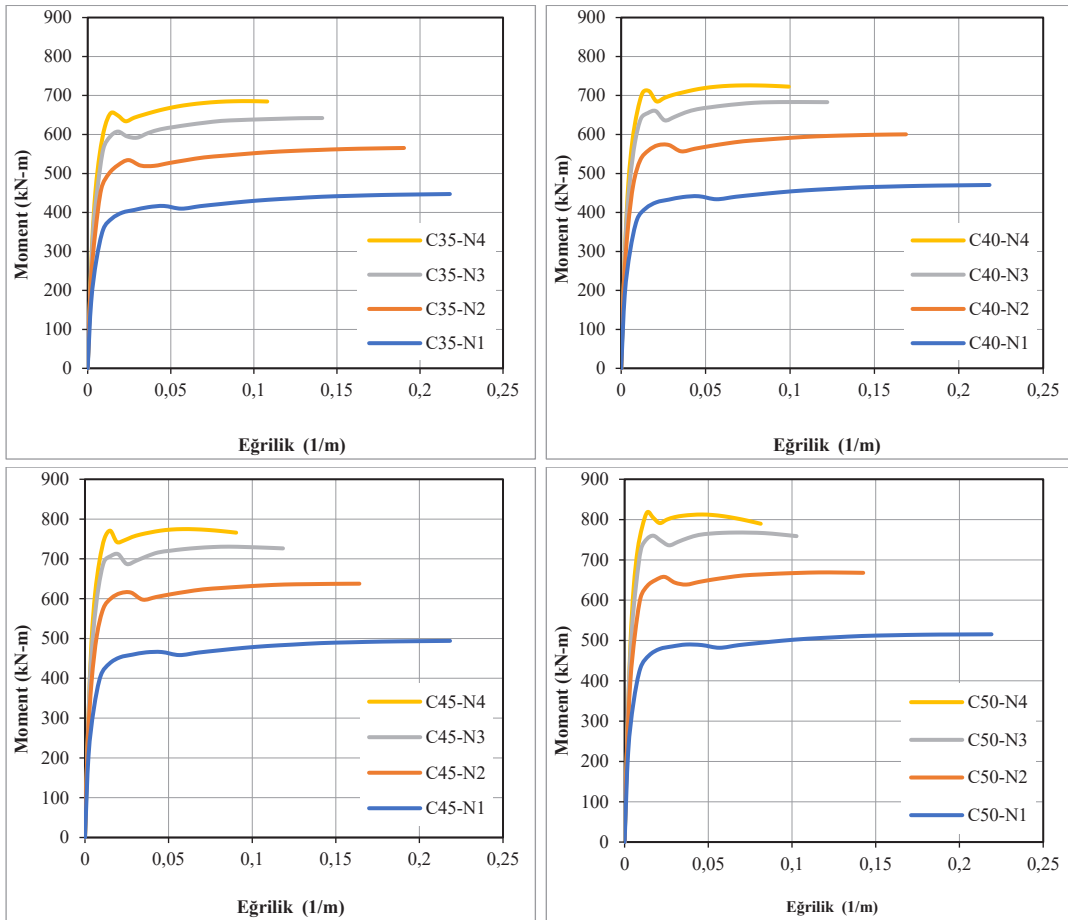
Betonarme kolonların doğrusal olmayan eğilme davranışı; boyuna ve sargı donatısı düzeni, beton basınç dayanımı ve eksenel yük oranı gibi temel tasarım parametreleri dikkate alınarak sistematik biçimde analiz edilmiştir. Bu kapsamda, moment-eğrilik gelişimi, süneklik ilişkisi, sayısal analiz sonuçları ve parametrik incelemeler aracılığıyla kapsamlı olarak ortaya konulmuştur. Elde edilen bulgular, kolonların performansa dayalı tasarım ve değerlendirme yaklaşımlarında kullanılabilecek analitik bir çerçeve sunmaktadır.

500 mm× 500 mm kare kesitli betonarme kolonların moment-eğrilik davranışları, farklı tasarım parametreleri dikkate alınarak karşılaştırmalı olarak incelenmiş (Şekil 3.2) ve analiz sonucunda elde edilen moment ile eğrilik (M_y, φ_y, M_u ve φ_u) değerleri Tablo 3.2’de özetlenmiştir. Söz konusu parametrelerin moment ve eğrilik değerleri üzerindeki etkileri grafiksel olarak Şekil 3.3’te sunulmuştur. Moment-eğrilik ilişkilerinden elde edilen eğrilik sünekliği katsayıları (μ_φ) Tablo 3.3’te verilmiş olup, farklı tasarım parametrelerinin eğrilik sünekliği üzerindeki etkileri ise grafiksel olarak Şekil 3.4 kapsamında değerlendirilmiştir.

a) Farklı sargı donatısı oranı (boyuna donatı: $8\Phi 20$ mm- beton sınıfı: C30)



b) Farklı boyuna donatı oranı (sargı donatısı: Φ10/50 mm - beton sınıfı: C30)



c) Farklı beton basınç dayanımı (boyuna donatı: 8Φ20 mm - sargı donatısı: Φ10/50 mm)

Şekil 3.2. Farklı tasarım parametreleri için 500 mm×500 mm kare kesitli kolonların moment-eğrilik ilişkilerinin karşılaştırılması.

Tablo 3.2. 500 mm × 500 mm kare kesitli betonarme kolonlar için moment-eğrilik analiz sonuçları

a) Farklı sargı donatısı oranı

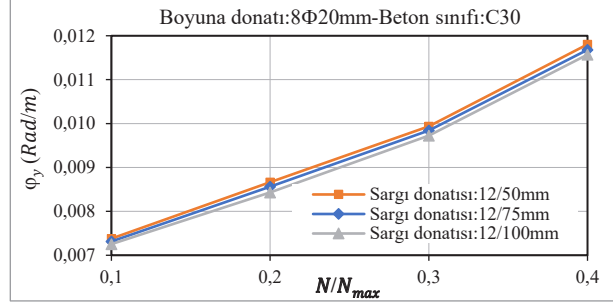
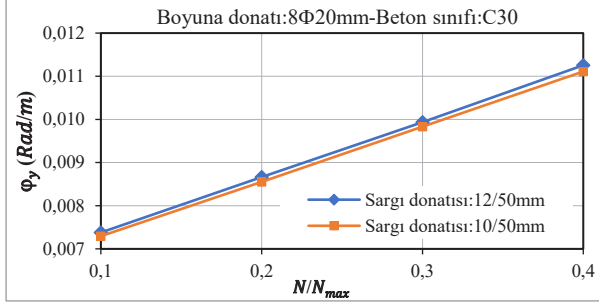
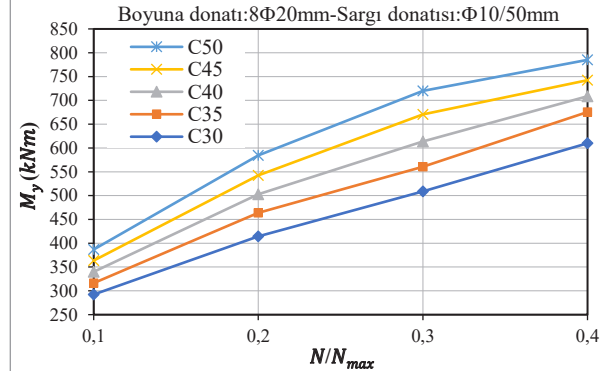
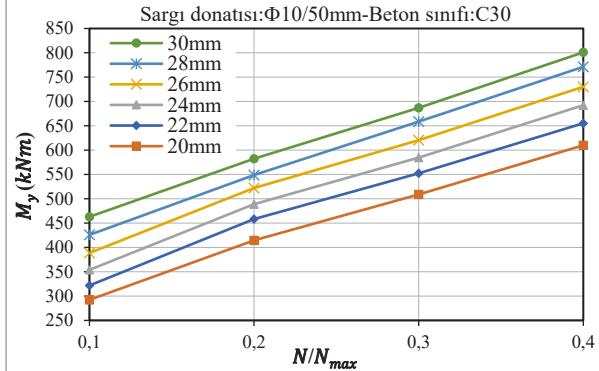
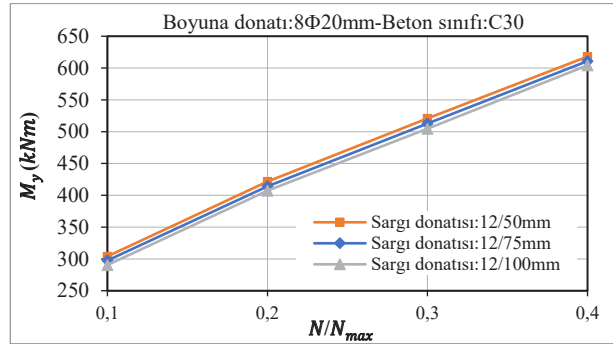
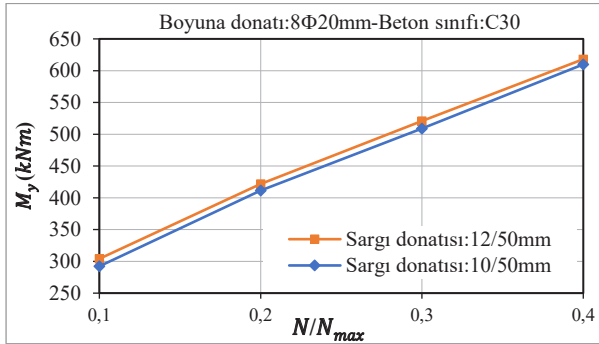
f_{ck}	Boyuna Donatı	Sargı Donatısı	N/N_{max}	M_y	φ_y	M_u	φ_u
C30	8Φ20 mm	Φ10/50 mm	0.10	292.3	0.00729	423.0	0.2215
			0.20	411.5	0.00855	527.1	0.2052
			0.30	508.9	0.00983	595.2	0.1623
			0.40	609.9	0.01081	635.2	0.1335
		Φ12/50 mm	0.10	304.0	0.00738	424.9	0.2482
			0.20	421.8	0.00866	539.0	0.2307
			0.30	520.7	0.00994	623.6	0.2019
			0.40	618.0	0.01180	678.3	0.1685
		Φ12/75 mm	0.10	297.5	0.00731	419.8	0.2259
			0.20	414.2	0.00856	520.5	0.2059
			0.30	512.7	0.00984	584.2	0.1556
			0.40	610.9	0.01168	619.9	0.1213
		Φ12/100 mm	0.10	290.4	0.00725	414.3	0.2024
			0.20	407.4	0.00843	501.5	0.1656
			0.30	504.7	0.00973	552.2	0.1208
			0.40	604.2	0.01157	570.3	0.0993

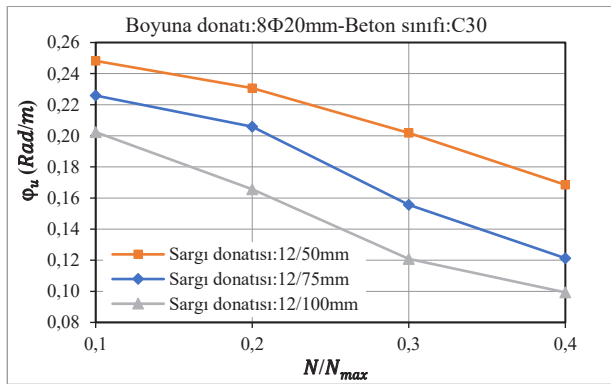
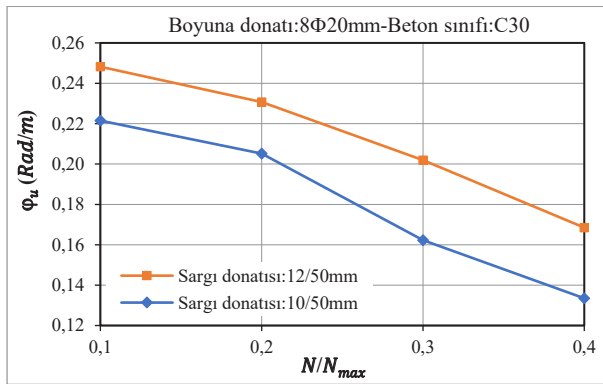
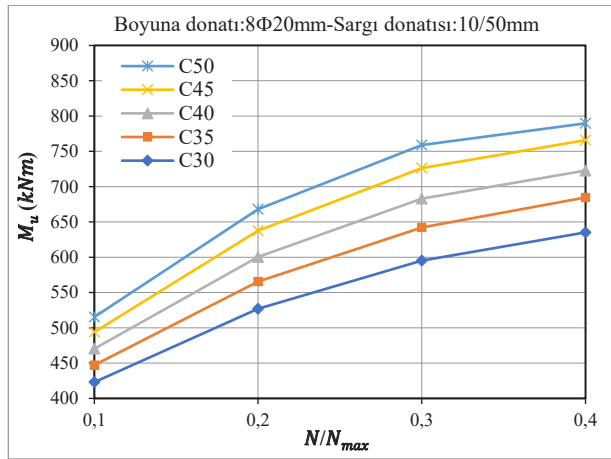
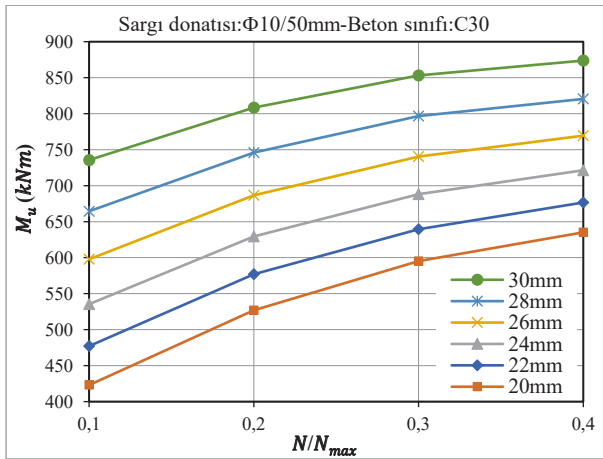
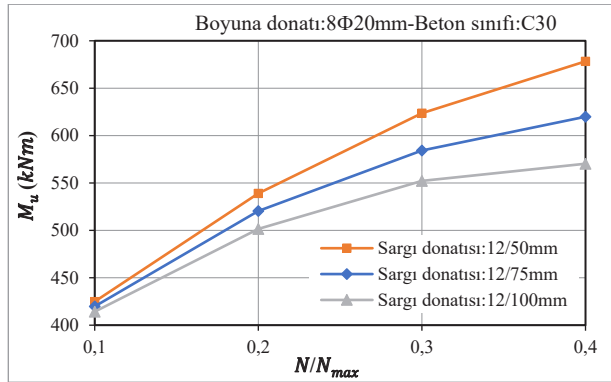
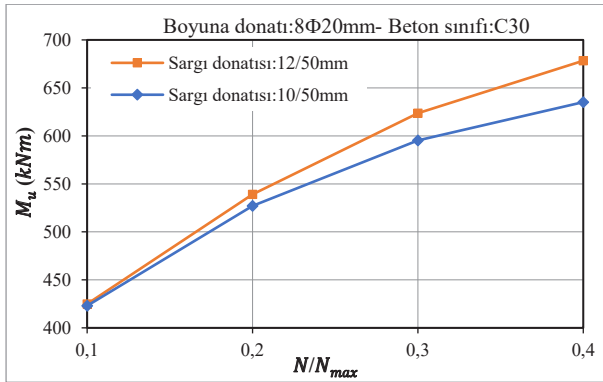
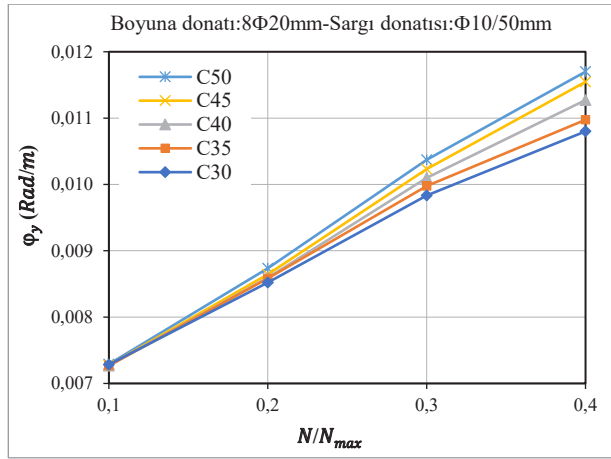
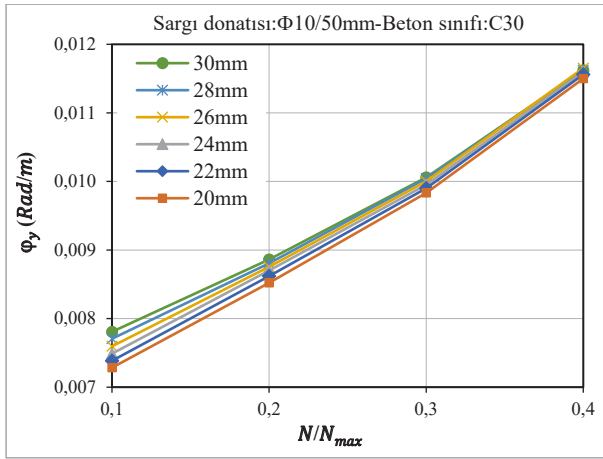
b) Farklı boyun donatı oranı

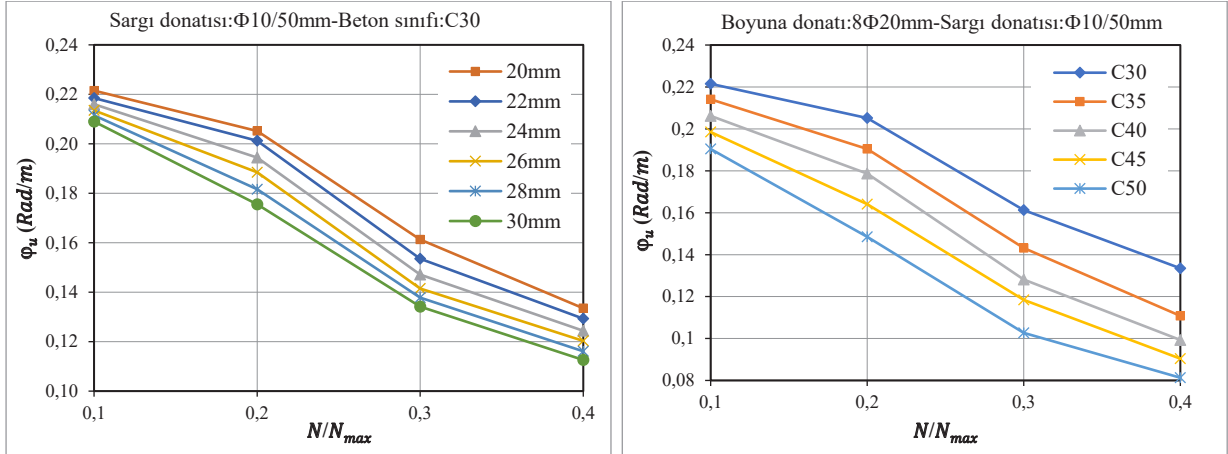
f_{ck}	Boyuna Donatı	Sargı Donatısı	N/N_{max}	M_y	φ_y	M_u	φ_u
C30	Φ10/50 mm	8Φ22 mm	0.10	321.8	0.00738	477.1	0.2185
			0.20	458.2	0.00865	577.0	0.2012
			0.30	552.2	0.00992	639.5	0.1515
			0.40	655.2	0.01159	676.6	0.1293
		8Φ24 mm	0.10	353.9	0.00749	535.4	0.2160
			0.20	488.9	0.00871	629.4	0.1944
			0.30	584.6	0.00996	688.2	0.1471
			0.40	692.3	0.01164	721.4	0.1244
		8Φ26 mm	0.10	388.5	0.00760	597.8	0.2135
			0.20	522.0	0.00877	686.6	0.1885
			0.30	620.5	0.01000	740.5	0.1415
			0.40	730.1	0.01165	769.5	0.1203
		8Φ28 mm	0.10	425.9	0.00771	664.5	0.2115
			0.2	548.7	0.00881	746.0	0.1816
			0.30	658.6	0.01004	796.6	0.1378
			0.40	771.2	0.01162	820.5	0.1161
		8Φ30 mm	0.10	463.0	0.00781	735.6	0.2090
			0.20	582.2	0.00886	808.4	0.1755
			0.30	687.1	0.01006	853.2	0.1342
			0.40	801.0	0.01162	873.8	0.1126

c) Farklı beton basınç dayanımı

Boyuna Donatı	Sargı Donatısı	f_{ck}	N/N_{max}	M_y	φ_y	M_u	φ_u
8 Φ 20 mm	Φ 10/50 mm	C35	0.10	316.2	0.00727	447.2	0.2141
			0.20	463.8	0.00858	565.4	0.1904
			0.30	560.6	0.00998	642.2	0.1432
			0.40	675.5	0.01097	684.6	0.1108
		C40	0.10	339.9	0.00727	470.4	0.2062
			0.20	502.8	0.00859	600.4	0.1787
			0.30	613.6	0.01010	682.9	0.1281
			0.40	708.6	0.01127	722.7	0.0993
		C45	0.10	363.5	0.00728	494.0	0.1985
			0.20	542.6	0.00865	637.6	0.1641
			0.30	670.5	0.01023	726.3	0.1184
			0.40	742.3	0.01155	765.9	0.0904
C50	0.10	386.8	0.00729	515.4	0.1904		
	0.20	584.4	0.00873	667.9	0.1485		
	0.30	727.9	0.01037	758.9	0.1027		
	0.40	780.0	0.01170	789.7	0.0813		







Şekil 3.3. 500 mm × 500 mm kare kesitli kolonlar için farklı tasarım parametrelerinin moment ve eğrilik değerleri üzerindeki etkisi

Tablo 3.3. 500 mm × 500 mm kare enkesitli kolonlar için moment-eğrilik ilişkilerinden hesaplanan μ_φ değerleri

a) Farklı sargı donatısı oranı

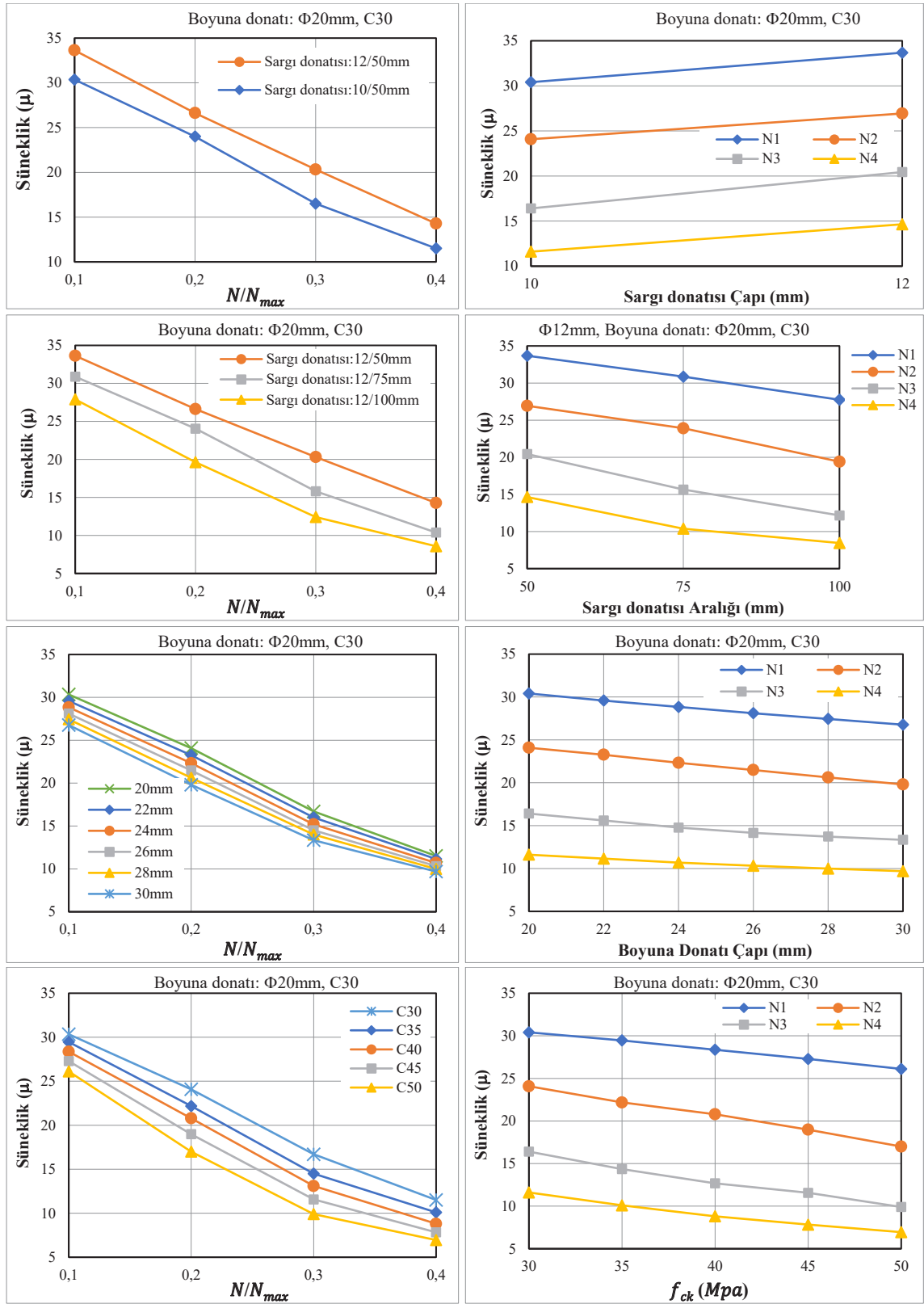
Eğrilik Süneklilik Katsayıları (μ_φ)						
Boyuna Donatı	f_{ck}	N/N_{max}	Sargı Donatısı			
			Φ10/50 mm	Φ12/50 mm	Φ12/75 mm	Φ12/100 mm
8Φ20 mm	C30	0.10	30.37	33.64	30.88	27.90
		0.20	24.00	26.63	24.05	19.64
		0.30	16.51	20.32	15.81	12.42
		0.40	12.35	14.27	10.38	8.58

b) Farklı boyun donatı oranı

Eğrilik Süneklilik Katsayıları (μ_φ)							
Sargı Donatısı	f_{ck}	N/N_{max}	Boyuna Donatı				
			8Φ22 mm	8Φ24 mm	8Φ26 mm	8Φ28 mm	8Φ30 mm
Φ10/50 mm	C30	0.10	29.59	28.84	28.11	27.45	26.77
		0.20	23.26	22.32	21.48	20.62	19.80
		0.30	15.60	14.77	14.15	13.72	13.34
		0.40	11.15	10.69	10.32	9.99	9.69

c) Farklı beton basınç dayanımı

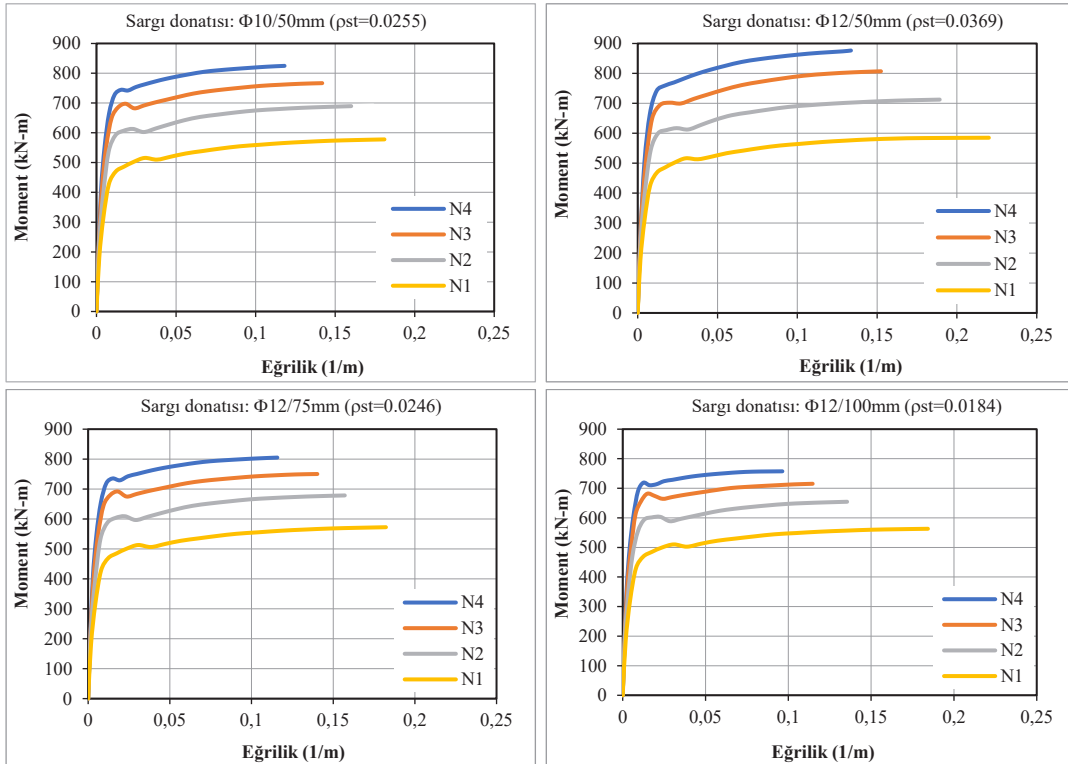
Eğrilik Süneklilik Katsayıları (μ_φ)						
Boyuna Donatı	Sargı Donatısı	N/N_{max}	Betona Basınç Dayanımı			
			$f_{ck}=35$ MPa	$f_{ck}=40$ MPa	$f_{ck}=45$ MPa	$f_{ck}=50$ MPa
8Φ20 mm	Φ10/50 mm	0.10	29.46	28.36	27.28	26.11
		0.20	22.18	20.79	18.98	17.00
		0.30	14.35	12.68	11.57	9.90
		0.40	10.10	8.81	7.83	6.95



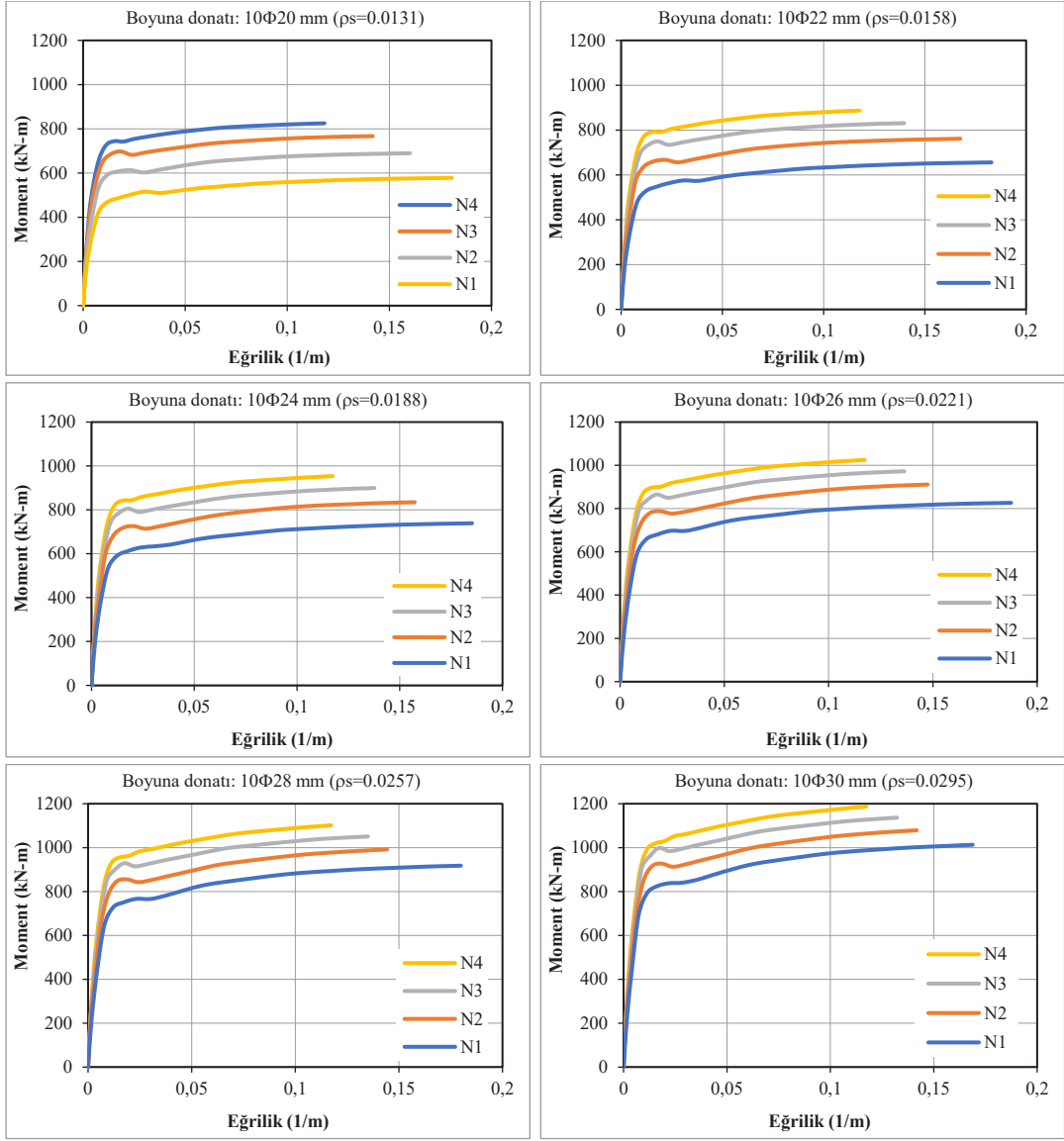
Şekil 3.4. 500 mm × 500 mm kare enkesitli kolonlar için farklı tasarım parametrelerinin eğrilik sünekliği üzerindeki etkisi

3.1.2. Betonarme dikdörtgen enkesitli kolon

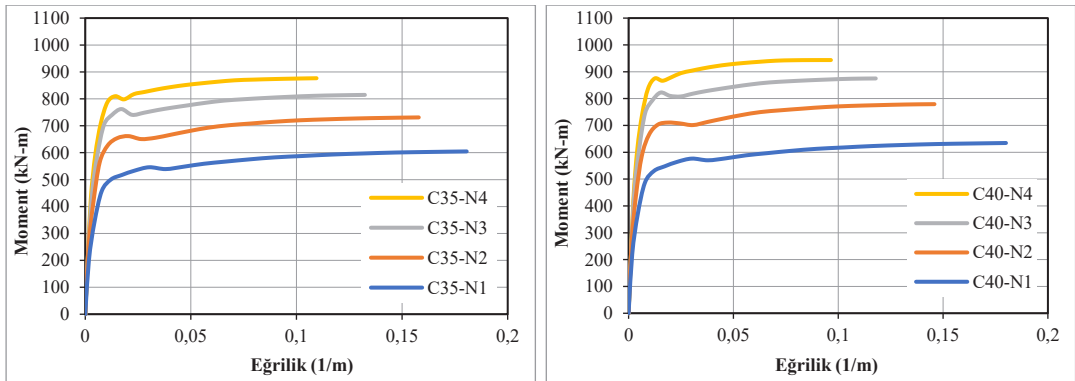
Dikdörtgen enkesitli betonarme kolonların (400 mm × 600 mm) doğrusal olmayan eğilme davranışı kesit düzeyinde gerçekleştirilen moment-eğrilik analizleri aracılığıyla incelenmiştir. Analizler kapsamında; altı farklı boyuna donatı çapı (10Φ20 mm - 10Φ30 mm), iki farklı sargı donatısı çapı (Φ10 mm ve Φ 12 mm), üç farklı sargı donatısı aralığı (50 mm, 75 mm ve 100 mm), beş farklı beton basınç dayanımı (C30 - C50) ve dört farklı eksenel yük seviyesi ($N_1=720$ kN, $N_2=1440$ kN, $N_3=2160$ kN ve $N_4=2880$ kN) dikkate alınarak moment-eğrilik analizleri yapılmıştır. Gerçekleştirilen analizler sonucunda, kolon kesitlerine ait moment-eğrilik ilişkileri elde edilmiş ve bu ilişkiler esas alınarak etkin kesit rijitlik katsayıları belirlenmiştir. Bu çerçevede, moment taşıma kapasitesi, eğrilik gelişimi ve süneklilik düzeyi arasındaki karşılıklı etkileşim, sayısal analiz sonuçları ve parametrik değerlendirmeler aracılığıyla ayrıntılı olarak ortaya konulmuştur. Analitik incelemeler sonucunda elde edilen moment-eğrilik ilişkileri, tasarım parametrelerinin kesitsel davranış üzerindeki etkilerinin sistematik biçimde ortaya konulabilmesi amacıyla grafiksel olarak değerlendirilmiştir. 400 mm × 600 mm dikdörtgen enkesitli betonarme kolonlar için farklı tasarım parametreler için elde edilen moment-eğrilik ilişkileri Şekil 3.5'te karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

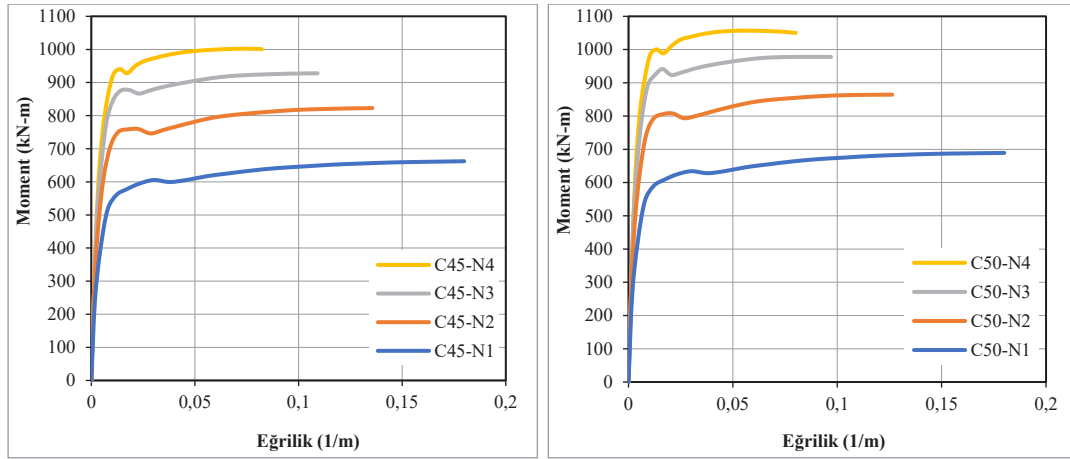


a) Farklı sargı donatısı oranı (boyuna donatı: 10Φ20 mm - beton sınıfı: C30)



b) Farklı boyuna donatı oranı (sargı donatısı: $\Phi 10/50$ mm - beton: C30)





c) Farklı beton basınç dayanımı (boyuna donatı: $10\Phi 20$ mm - sargı donatısı: $\Phi 10/50$ mm)

Şekil 3.5. Farklı tasarım parametreleri için 400 mm×600 mm dikdörtgen en-kesitli kolonların moment-eğrilik ilişkilerinin karşılaştırılması.

Farklı tasarım parametrelerine göre moment-eğrilik ilişkilerinden hesaplanan moment ile eğrilik (M_y , φ_y , M_u ve φ_u) değerleri Tablo 3.4'te özetlenmiş, moment ve eğrilik değerleri üzerindeki etkileri grafiksel olarak Şekil 3.6'da sunulmuştur. Moment-eğrilik ilişkilerinden elde edilen eğrilik sünekliliği katsayıları (μ_φ) Tablo 3.5'te verilmiş olup, farklı tasarım parametrelerinin eğrilik sünekliliği üzerindeki etkileri ise grafiksel olarak Şekil 3.7'de verilmiştir.

Tablo 3.4. 400 mm × 600 mm dikdörtgen kesitli betonarme kolonların moment-eğrilik analiz sonuçları

a) Farklı sargı donatısı oranları

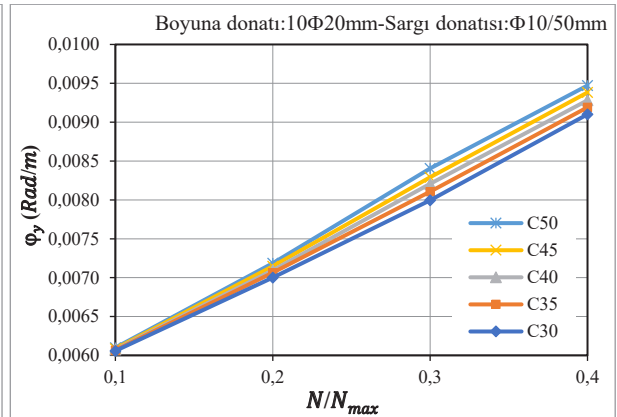
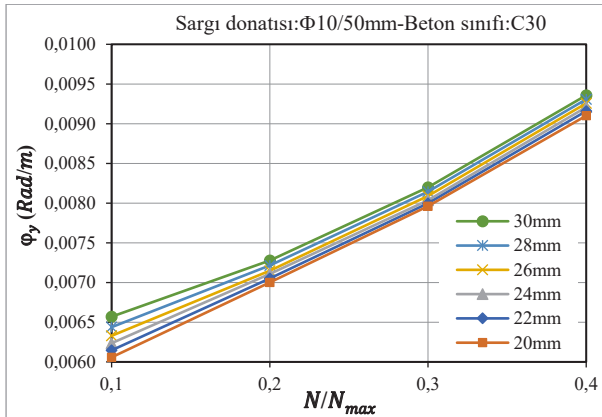
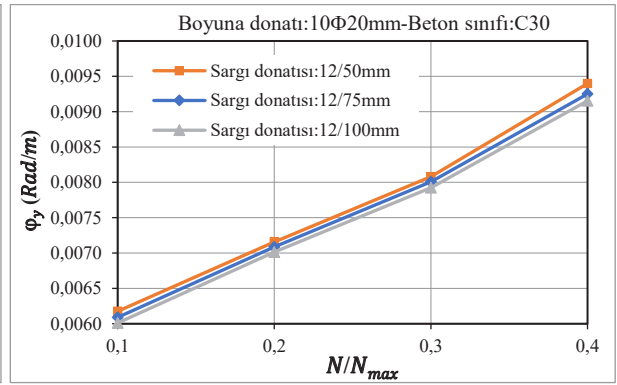
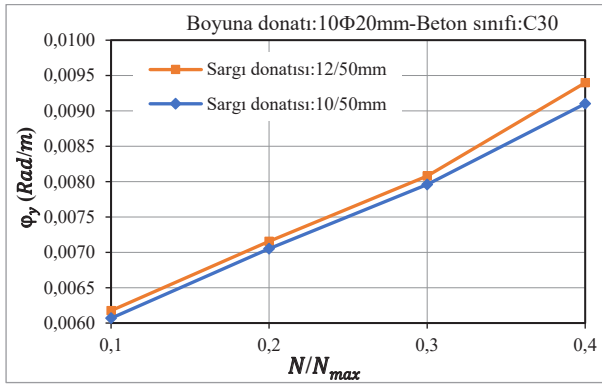
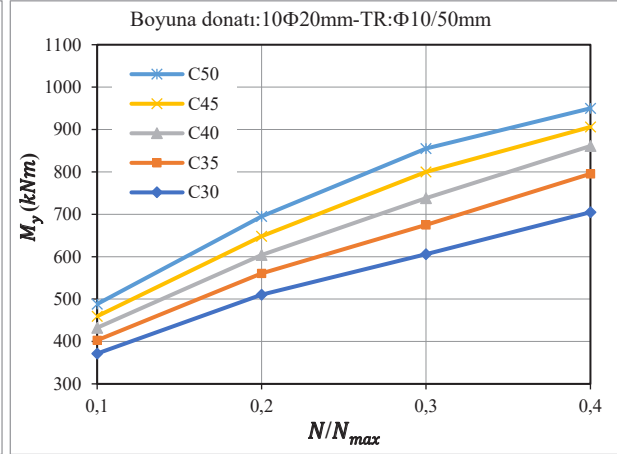
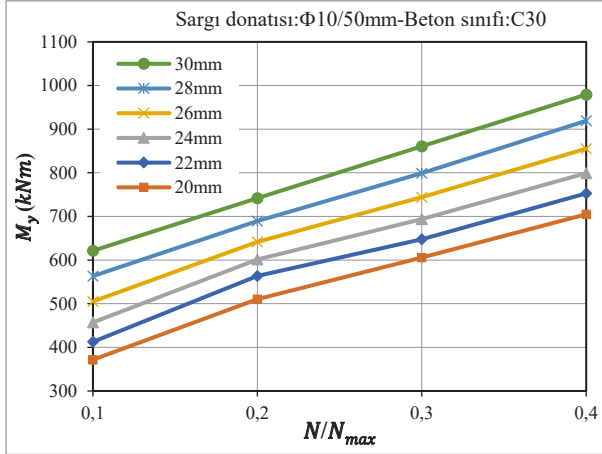
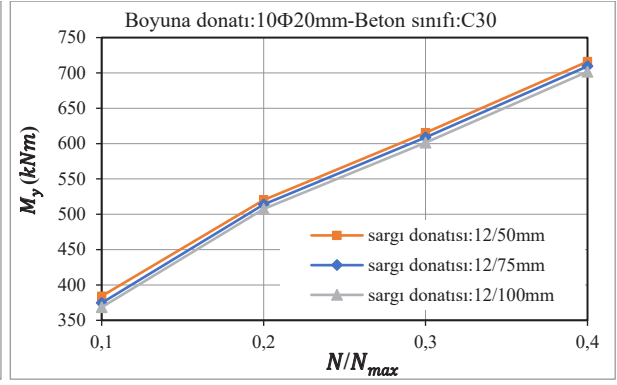
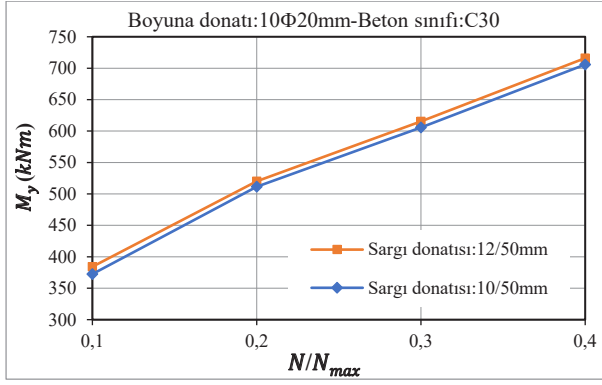
f_{ck}	Boyuna Donatı	Sargı Donatısı	N/N_{max}	M_y	φ_y	M_u	φ_u
C30	10Φ20 mm	Φ10/50 mm	0.10	372.5	0.00607	577.9	0.1910
			0.20	511.5	0.00705	691.2	0.1752
			0.30	605.7	0.00796	766.8	0.1519
			0.40	705.8	0.00910	824.8	0.1282
		Φ12/50 mm	0.10	384.2	0.00618	585.1	0.2065
			0.20	520.2	0.00716	712.5	0.1965
			0.30	615.2	0.00808	811.0	0.1795
			0.40	716.0	0.00940	879.1	0.1565
		Φ12/75 mm	0.10	374.5	0.00609	572.5	0.1843
			0.20	513.9	0.00709	680.3	0.1737
			0.30	608.8	0.00801	760.2	0.1483
			0.40	709.4	0.00925	815.0	0.1158
		Φ12/100 mm	0.10	368.5	0.00601	563.1	0.1623
			0.20	507.6	0.00701	654.4	0.1385
			0.30	601.2	0.00793	715.3	0.1147
			0.40	701.7	0.00915	757.4	0.0964

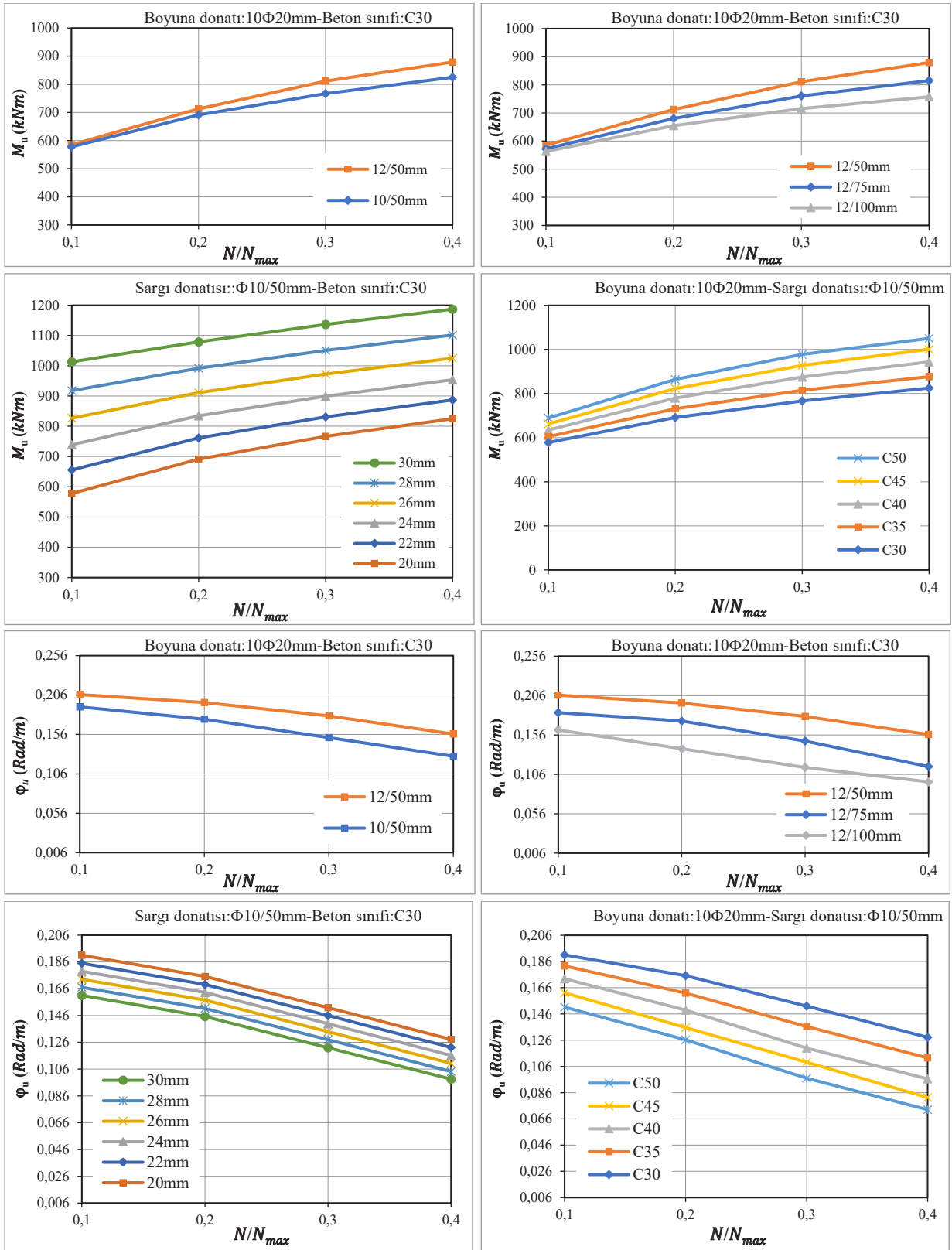
b) Farklı boyun donatı oranları

f_{ck}	Boyuna Donatı	Sargı Donatısı	N/N_{max}	M_y	φ_y	M_u	φ_u
C30	$\Phi 10/50$ mm	10 $\Phi 22$ mm	0.10	412.6	0.00615	655.7	0.1850
			0.20	563.4	0.00705	761.4	0.1692
			0.30	647.4	0.00800	830.7	0.1460
			0.40	752.8	0.00916	886.9	0.1222
		10 $\Phi 24$ mm	0.10	457.1	0.00624	738.8	0.1790
			0.20	601.3	0.00711	834.6	0.1632
			0.30	693.7	0.00804	899.4	0.1399
			0.40	799.2	0.00921	953.8	0.11620
		10 $\Phi 26$ mm	0.10	505.1	0.00633	826.6	0.1730
			0.20	641.7	0.00715	911.1	0.1575
			0.30	744.0	0.00809	972.4	0.1339
			0.40	855.3	0.00926	1025.1	0.1103
		10 $\Phi 28$ mm	0.10	563.3	0.00644	917.6	0.1670
			0.20	689.5	0.00721	991.6	0.15120
			0.30	799.0	0.00814	1050.8	0.1279
			0.40	919.2	0.00931	1101.5	0.1042
		10 $\Phi 30$ mm	0.10	621.4	0.00657	1012.9	0.1610
			0.20	741.9	0.00728	1078.9	0.1452
			0.30	860.6	0.00820	1136.6	0.1219
			0.40	979.3	0.00936	1186.9	0.0985

c) Farklı beton basınç dayanımı

Boyuna Donatı	Sargı Donatısı	f_{ck}	N/N_{max}	M_y	φ_y	M_u	φ_u
10 $\Phi 20$ mm	$\Phi 10/50$ mm	C35	0.10	402.9	0.00607	604.7	0.1826
			0.20	560.6	0.00706	731.1	0.1619
			0.30	674.9	0.00811	814.7	0.1364
			0.40	795.5	0.00919	876.7	0.1125
		C40	0.10	432.4	0.00608	634.5	0.1728
			0.20	603.8	0.00710	779.3	0.1489
			0.30	738.1	0.00821	875.0	0.1199
			0.40	861.1	0.00928	943.6	0.0965
		C45	0.10	459.4	0.00609	662.2	0.1621
			0.20	648.3	0.00715	822.9	0.1356
			0.30	800.0	0.00829	928.0	0.1092
			0.40	906.0	0.00938	1000.8	0.0823
		C50	0.10	488.2	0.00610	689.1	0.1512
			0.20	695.2	0.00719	864.4	0.1263
			0.30	865.8	0.00840	977.8	0.0970
			0.40	944.8	0.00947	1050.2	0.0730





Şekil 3.6. 400 mm x 600 mm dikdörtgen enkesitli kolonlar için farklı tasarım parametrelerinin moment ve eğrilik üzerindeki etkisi

Tablo 3.5. 400 mm × 600 mm dikdörtgen enkesitli kolonlar için moment-eğrilik ilişkilerinden hesaplanan μ_φ değerleri

a) Farklı sargı donatısı oranı

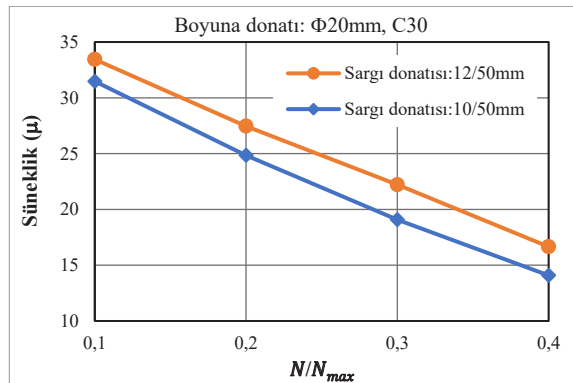
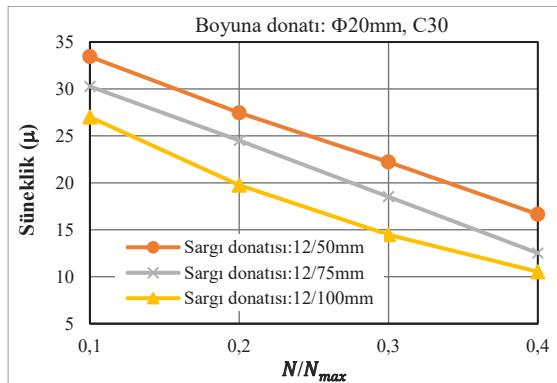
Eğrilik Süneklik Katsayıları (μ_φ)						
Boyuna Donatı	f_{ck}	N/N_{max}	Sargı Donatısı			
			$\Phi 10/50$ mm	$\Phi 12/50$ mm	$\Phi 12/75$ mm	$\Phi 12/100$ mm
10 $\Phi 20$ mm	C30	0.10	31.53	33.71	30.26	26.83
		0.20	25.03	27.89	24.61	19.76
		0.30	19.08	22.22	18.44	14.32
		0.40	14.09	16.65	12.52	10.53

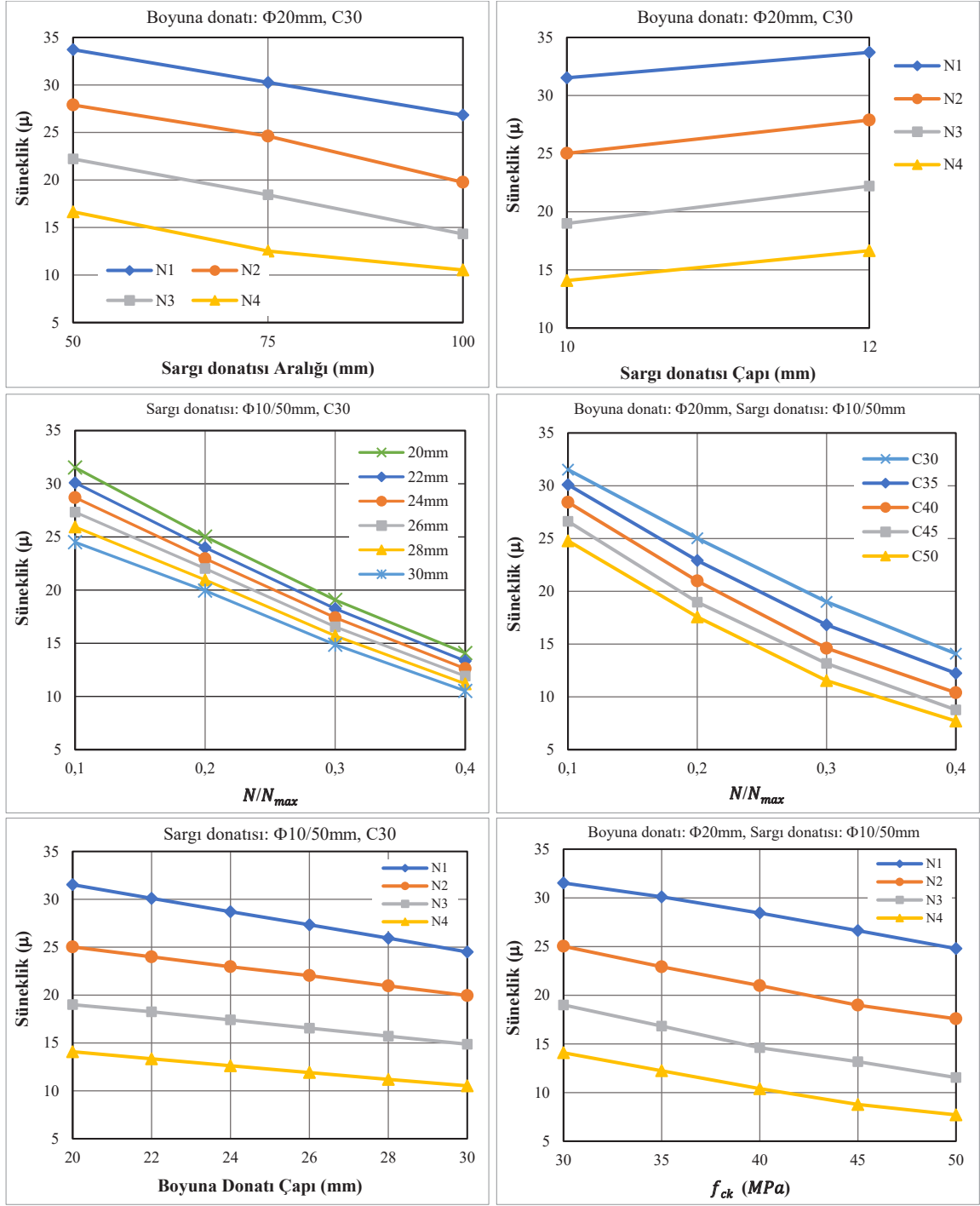
b) Farklı boyun donatı oranı

Eğrilik Süneklik Katsayıları (μ_φ)							
Sargı Donatısı	f_{ck}	N/N_{max}	Boyuna Donatı				
			10 $\Phi 22$ mm	10 $\Phi 24$ mm	10 $\Phi 26$ mm	10 $\Phi 28$ mm	10 $\Phi 30$ mm
$\Phi 10/50$ mm	C30	0.10	30.10	28.70	27.33	25.94	24.51
		0.20	23.99	22.96	22.03	20.96	19.95
		0.30	18.26	17.41	16.55	15.71	14.87
		0.40	13.34	12.62	11.92	11.19	10.53

c) Farklı beton basınç dayanımı

Eğrilik Süneklik Katsayıları (μ_φ)						
Boyuna Donatı	Sargı Donatısı	N/N_{max}	Beton Basınç Dayanımı			
			$f_{ck}=35$ MPa	$f_{ck}=40$ MPa	$f_{ck}=45$ MPa	$f_{ck}=50$ MPa
10 $\Phi 20$ mm	$\Phi 10/50$ mm	0.10	30.10	28.44	26.63	24.79
		0.20	22.92	20.99	18.97	17.58
		0.30	16.83	14.61	13.17	11.54
		0.40	12.24	10.40	8.77	7.71





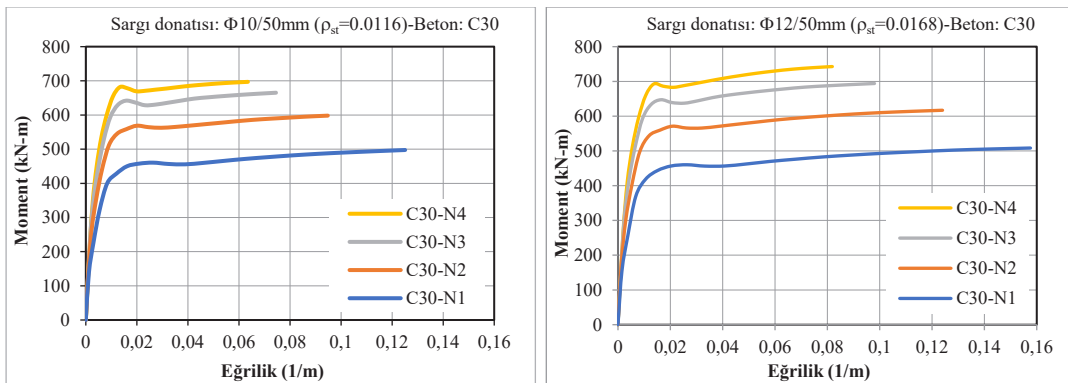
Şekil 3.7. 400 mm × 600 mm dikdörtgen en-kesitli kolonlar için farklı tasarım parametrelerinin eğrilik sünekliği üzerindeki etkisi

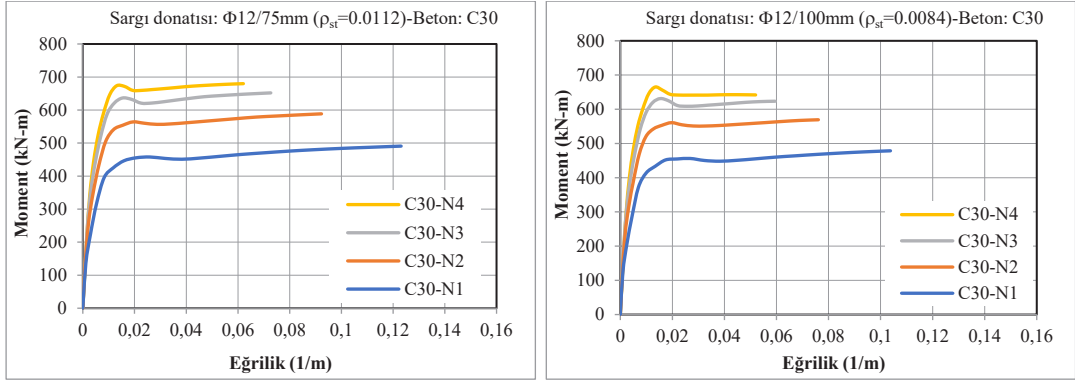
3.1.3. Betonarme dairesel enkesitli kolon

Dairesel kesitli betonarme kolonların doğrusal olmayan eğilme davranışı, moment-eğrilik analizleri temelinde değerlendirilmiştir. Analizlerde beton ve donatı çeliği için elastik ötesi malzeme modelleri kullanılarak kesitlerin akma öncesi ve sonrası davranış evreleri tanımlanmıştır. Boyuna donatı oranı, sargı etkisi, beton basınç dayanımı ve eksenel yük düzeyi gibi temel tasarım parametrelerinin moment kapasitesi, eğrilik gelişimi ve süneklilik üzerindeki etkileri parametrik olarak incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, dairesel betonarme kolonların doğrusal olmayan davranışının güvenilir biçimde modellenmesine ve kritik tasarım değişkenlerinin belirlenmesine yönelik analitik bir temel sunmaktadır.

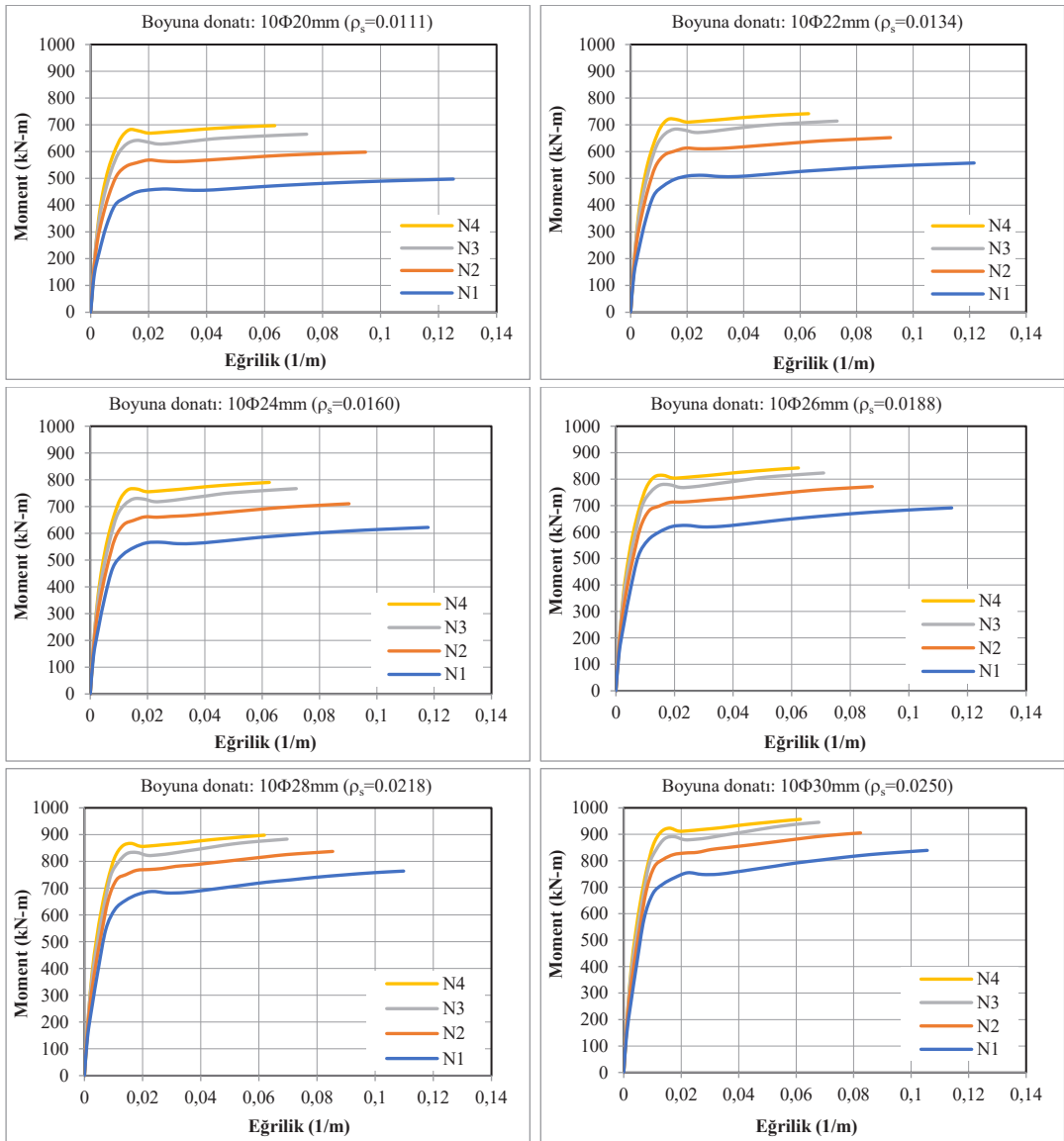
Modelleme kapsamında, eğilme kapasitesi ve süneklilik özellikleri üzerindeki boyuna donatı etkisini ortaya koymak amacıyla $\Phi 20$ mm ile $\Phi 30$ mm arasında değişen altı farklı boyuna donatı düzeni dikkate alınmıştır. Beton çekirdeğinin etkin sargı düzeyinin belirlenmesi amacıyla, $\Phi 10$ mm ve $\Phi 12$ mm çaplarında iki farklı sargı donatısı kullanılmış; her bir donatı çapı için 50 mm, 75 mm ve 100 mm olmak üzere üç farklı etriye aralığı tanımlanmıştır. Bu kapsamda, sargı donatısının çekirdek beton üzerindeki kısıtlama etkisi ile bu etkinin moment-eğrilik davranışına yansımaları sistematik ve karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Eksenel yük-eğilme etkileşiminin kesit tepkisi üzerindeki etkisini belirlemek amacıyla tüm kolon modelleri dört farklı eksenel yük seviyesi ($N_1=850$ kN, $N_2=1700$ kN, $N_3=2550$ kN ve $N_4=3400$ kN) altında analiz edilmiştir. Seçilen yük düzeyleri, artan eksenel basıncın moment taşıma kapasitesi, rijitlik kaybı ve eğrilik gelişimi üzerindeki etkilerini açık biçimde ortaya koyacak aralıklarda belirlenmiştir. Ayrıca beton basınç dayanımının doğrusal olmayan kesit davranışına katkısını değerlendirmek amacıyla C30, C35, C40, C45 ve C50 dayanım sınıfları dikkate alınmış; tüm modellerde donatı çeliği olarak B420C kullanılarak değişken parametrelerin etkisi izole edilmiştir.

600 mm dairesel kesitli betonarme kolonların moment-eğrilik ilişkileri, farklı tasarım parametreleri göz önünde bulundurularak karşılaştırmalı biçimde incelenmiş (Şekil 3.8) ve analiz sonucunda elde edilen moment ile eğrilik değerleri (M_y , φ_y , M_u ve φ_u) Tablo 3.6'da özetlenmiştir. Tasarım parametrelerinin moment ve eğrilik üzerindeki etkileri grafiksel olarak Şekil 3.9'da gösterilmiştir. Moment-eğrilik ilişkilerinden hesaplanan eğrilik sünekliliği katsayıları (μ_φ) Tablo 3.7'de sunulmuş olup, farklı tasarım parametrelerinin eğrilik sünekliliği üzerindeki etkileri Şekil 3.10'da karşılaştırmalı biçimde değerlendirilmiştir.

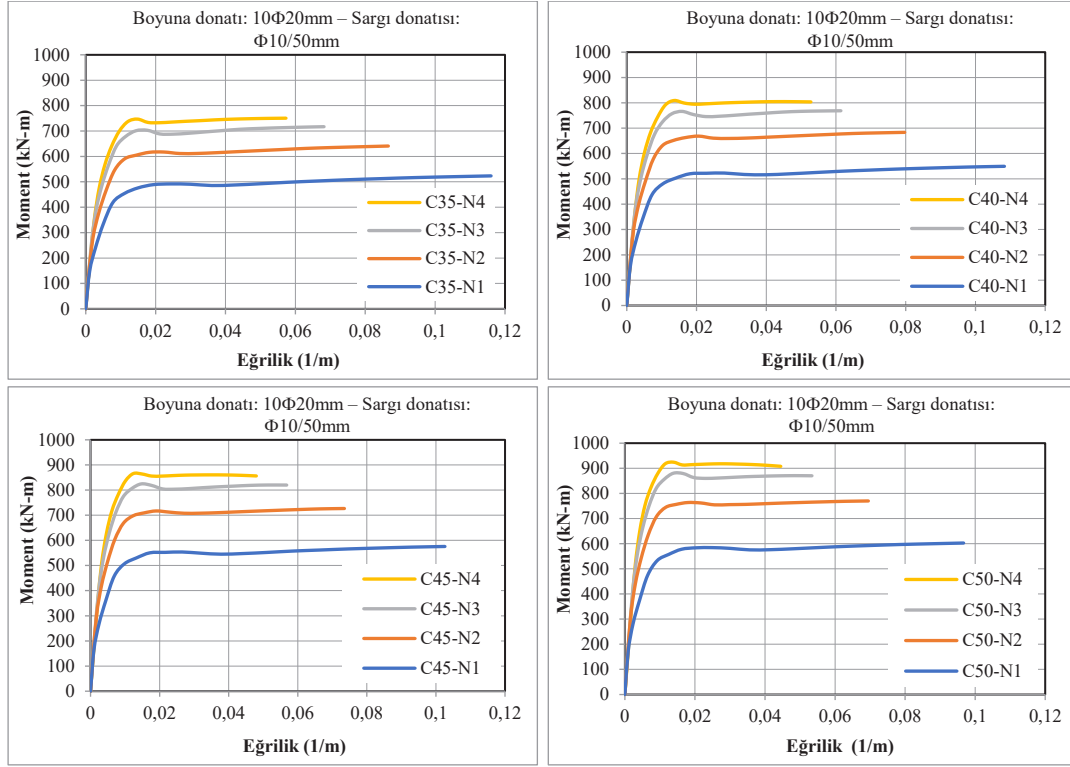




a) Farklı sargı donatısı oranı (boyuna donatı: $8\Phi 20$ - beton: C30)



b) Farklı boyuna donatı oranı (sargı donatısı: $\Phi 10/50\text{mm}$ - beton: C30)



c) Farklı beton basınç dayanımı (boyuna donatı: 10Φ20 mm - sargı donatısı: Φ10/50 mm)
 Şekil 3.8. Farklı tasarım parametreleri için 600 mm dairesel enkesitli kolonların moment-eğrilik ilişkilerinin karşılaştırılması.

Tablo 3.6. 600 mm dairesel kesitli betonarme kolonlar için moment-eğrilik analiz sonuçları

a) Farklı sargı donatısı oranları

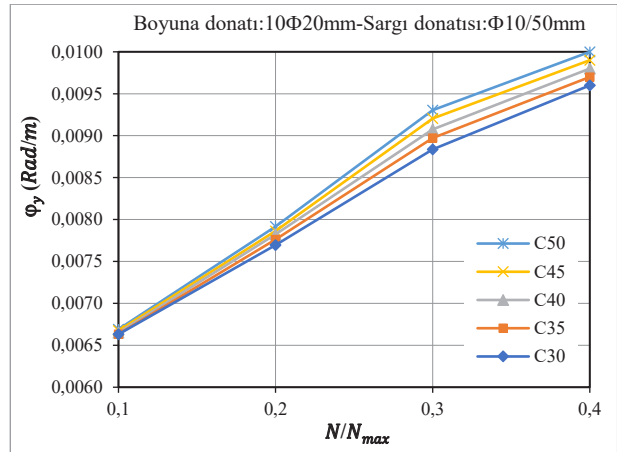
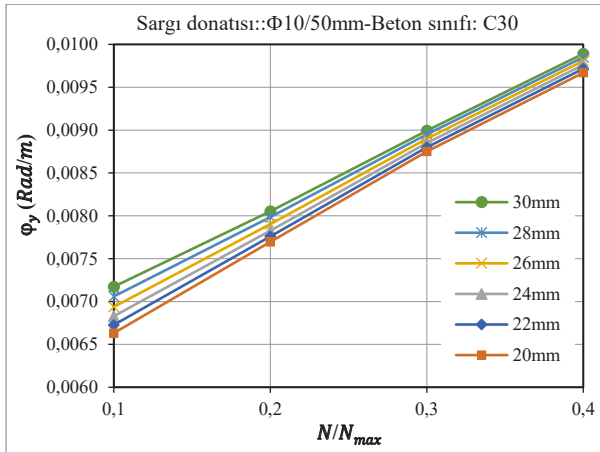
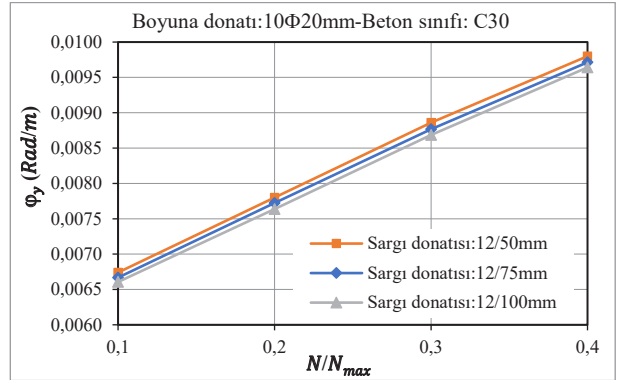
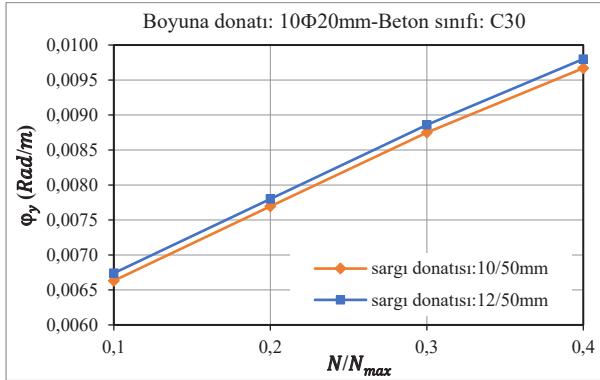
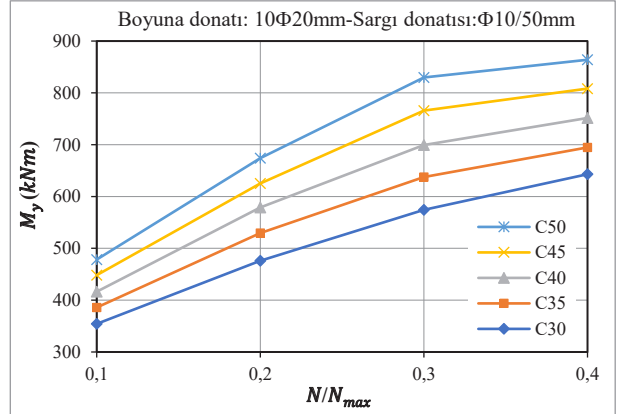
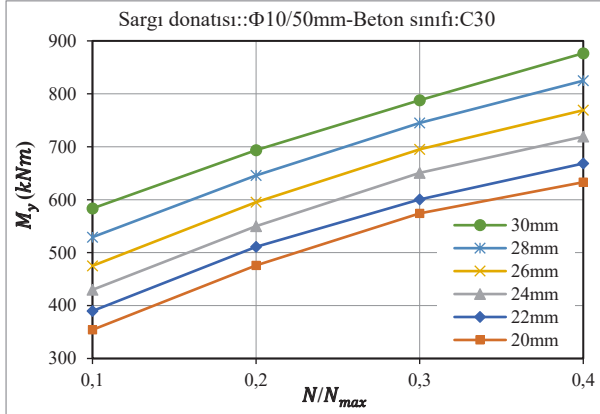
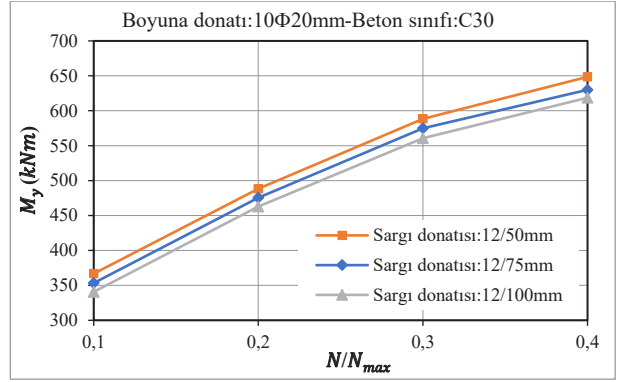
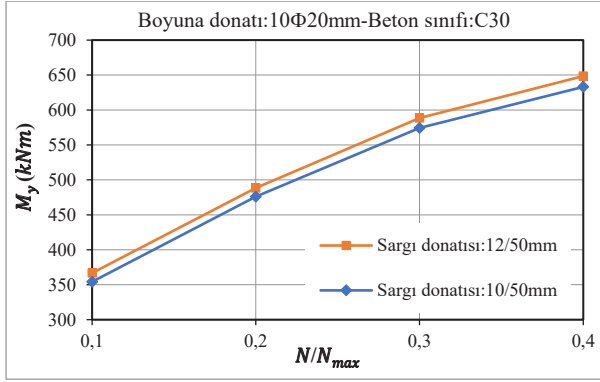
f_{ck}	Boyuna Donatı	Sargı Donatısı	N/N_{max}	M_y	φ_y	M_u	φ_u
C30	10Φ20 mm	Φ10/50 mm	0.10	354.2	0.00663	497.6	0.1251
			0.20	475.9	0.00770	598.1	0.0948
			0.30	574.3	0.00875	665.1	0.0745
			0.40	633.1	0.00967	697.0	0.0635
		Φ12/50 mm	0.10	366.8	0.00674	508.3	0.1576
			0.20	488.3	0.00780	617.0	0.1240
			0.30	588.4	0.00886	694.0	0.0980
			0.40	648.5	0.00980	742.7	0.0819
		Φ12/75 mm	0.10	353.3	0.00667	490.8	0.1231
			0.20	475.4	0.00772	588.6	0.0923
			0.30	574.9	0.00877	651.9	0.0727
			0.40	630.0	0.00971	679.9	0.0621
		Φ12/100 mm	0.10	340.7	0.00661	478.6	0.1038
			0.20	462.8	0.00764	569.3	0.0761
			0.30	560.7	0.00869	623.4	0.0595
			0.40	353.3	0.00667	490.8	0.1231

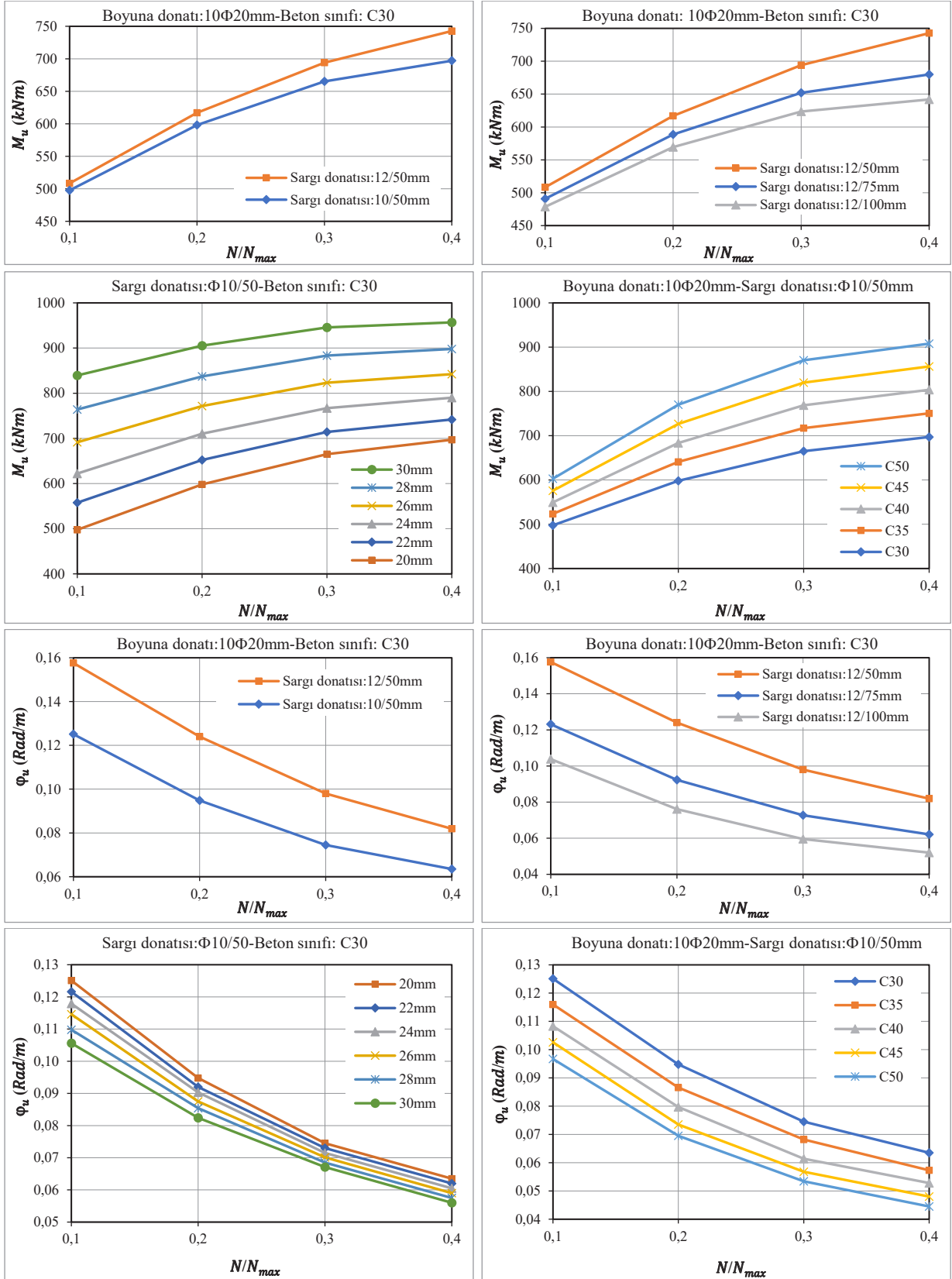
b) Farklı boyuna donatı oranları

f_{ck}	Boyuna Donatı	Sargı Donatısı	N/N_{max}	M_y	φ_y	M_u	φ_u
C30	$\Phi 10/50$ mm	10 $\Phi 22$ mm	0.10	389.7	0.00673	557.6	0.1216
			0.20	511.1	0.00776	652.3	0.0920
			0.30	600.5	0.00880	714.1	0.0730
			0.40	668.4	0.00972	741.7	0.0620
		10 $\Phi 24$ mm	0.10	429.8	0.00683	622.1	0.1179
			0.20	550.1	0.00783	710.4	0.0903
			0.30	650.8	0.00885	766.9	0.0715
			0.40	719.2	0.00976	790.0	0.0605
		10 $\Phi 26$ mm	0.10	475.1	0.00694	691.3	0.1146
			0.20	595.4	0.00790	771.6	0.0875
			0.30	695.0	0.00890	823.3	0.0701
			0.40	769.1	0.00981	842.2	0.0590
		10 $\Phi 28$ mm	0.10	529.3	0.00706	763.9	0.1098
			0.20	645.8	0.00798	837.3	0.0854
			0.30	744.9	0.00895	883.3	0.0685
			0.40	824.8	0.00985	897.9	0.0575
		10 $\Phi 30$ mm	0.10	583.5	0.00717	839.4	0.1056
			0.20	693.7	0.00805	905.3	0.0824
			0.30	788.1	0.00899	945.6	0.0671
			0.40	876.7	0.00989	956.8	0.0560

c) Farklı beton basınç dayanımı

Boyuna Donatı	Sargı Donatısı	f_{ck}	N/N_{max}	M_y	φ_y	M_u	φ_u
10 $\Phi 20$ mm	$\Phi 10/50$ mm	C35	0.10	385.8	0.00663	523.4	0.1160
			0.20	529.6	0.00776	640.9	0.0866
			0.30	637.7	0.00897	717.1	0.0682
			0.40	694.8	0.00970	750.5	0.0573
		C40	0.10	416.3	0.00665	549.4	0.1083
			0.20	578.8	0.00782	683.5	0.0797
			0.30	699.5	0.00907	768.7	0.0614
			0.40	751.6	0.00980	803.7	0.0528
		C45	0.10	448.3	0.00668	575.7	0.1026
			0.20	625.3	0.00786	726.7	0.0735
			0.30	765.7	0.00921	820.0	0.0568
			0.40	808.3	0.00990	856.4	0.0480
		C50	0.10	478.4	0.00669	602.7	0.0967
			0.20	674.0	0.00792	770.1	0.0695
			0.30	829.9	0.00930	870.3	0.0534
			0.40	863.9	0.01000	907.9	0.0445





Şekil 3.9. 600 mm dairesel enkesitli kolonlar için farklı tasarım parametrelerinin moment ve eğrilik değerleri üzerindeki etkisi

Tablo 3.7. 600 mm dairesel enkesitli kolonlar için moment-eğrilik ilişkilerinden hesaplanan μ_φ değerleri

a) Farklı sargı donatısı oranı

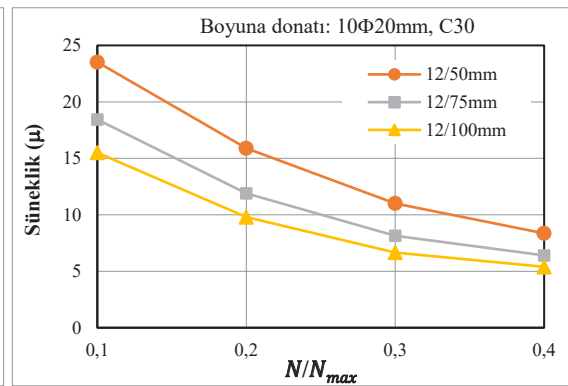
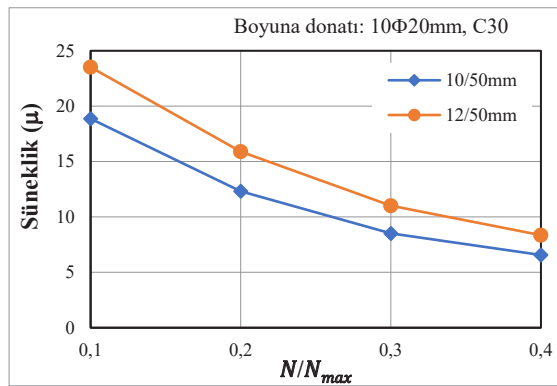
Eğrilik Süneklilik Katsayıları (μ_φ)						
Boyuna Donatı	f_{ck}	N/N_{max}	Sargı Donatısı			
			$\Phi 10/50$ mm	$\Phi 12/50$ mm	$\Phi 12/75$ mm	$\Phi 12/100$ mm
10 Φ 20 mm	C30	0.10	18.86	23.38	18.46	15.71
		0.20	12.32	15.90	11.95	9.96
		0.30	8.51	11.06	8.29	6.85
		0.40	6.57	8.36	6.39	5.39

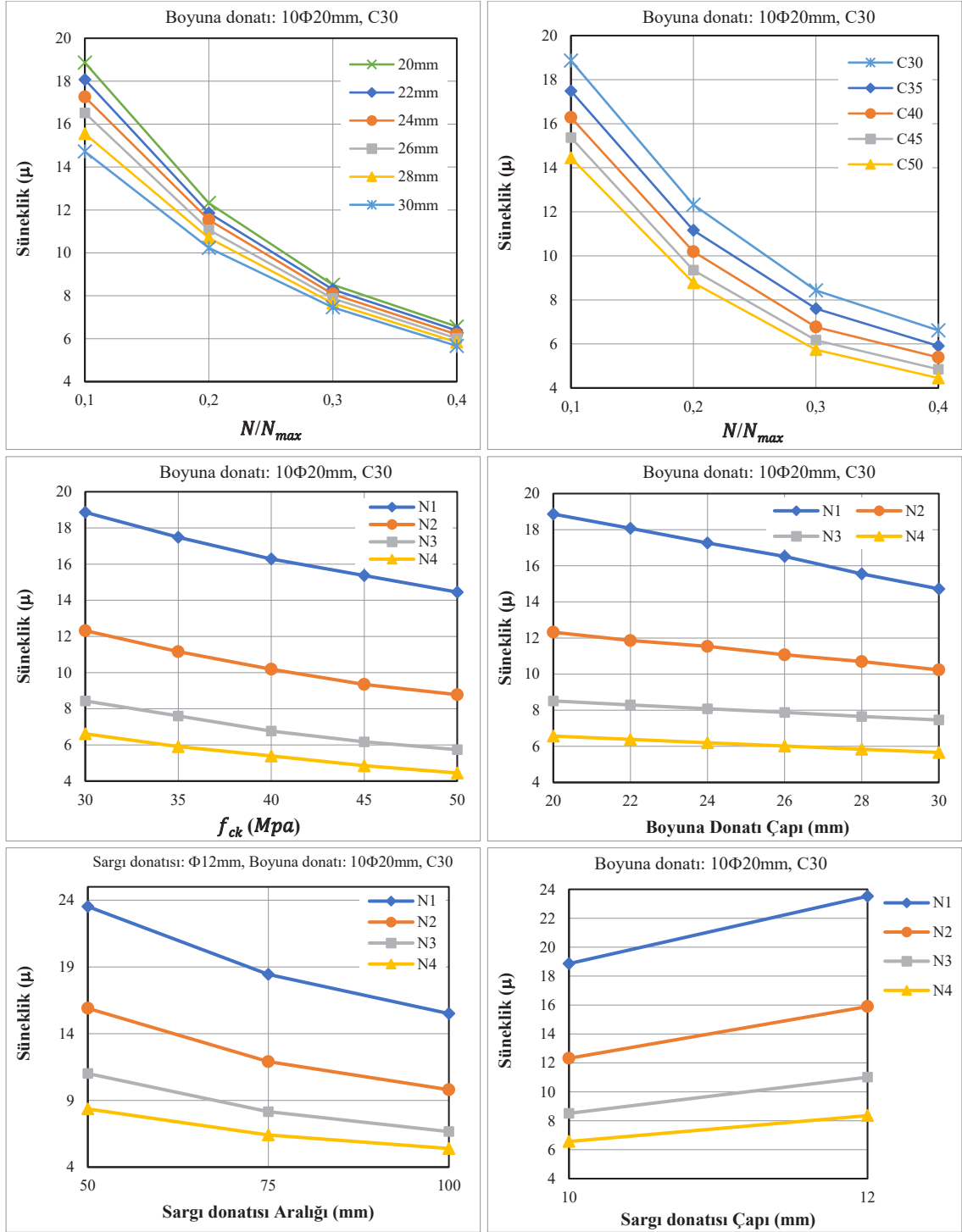
b) Farklı boyuna donatı oranı

Eğrilik Süneklilik Katsayıları (μ_φ)							
Sargı Donatısı	f_{ck}	N/N_{max}	Boyuna Donatı				
			10 Φ 22 mm	10 Φ 24 mm	10 Φ 26 mm	10 Φ 28 mm	10 Φ 30 mm
$\Phi 10/50$ mm	C30	0.10	18.08	17.26	16.52	15.55	14.72
		0.20	11.86	11.54	11.07	10.70	10.23
		0.30	8.30	8.08	7.88	7.65	7.46
		0.40	6.38	6.20	6.02	5.84	5.66

c) Farklı beton basınç dayanımı

Eğrilik Süneklilik Katsayıları (μ_φ)						
Boyuna Donatı	Sargı Donatısı	N/N_{max}	Beton Basınç Dayanımı			
			$f_{ck}=35$ MPa	$f_{ck}=40$ MPa	$f_{ck}=45$ MPa	$f_{ck}=50$ MPa
10 Φ 20 mm	$\Phi 10/50$ mm	0.10	17.48	16.28	15.37	14.45
		0.20	11.16	10.19	9.35	8.78
		0.30	7.60	6.77	6.17	5.74
		0.40	5.91	5.39	4.85	4.45





Şekil 3.10. 600 mm dairesel enkesitli kolonlar için farklı tasarım parametrelerinin eğrilik sünekliği üzerindeki etkisi

Betonarme kolonlara ait moment-eğrilik ilişkilerinden elde edilen analiz bulguları, kesitlerin doğrusal olmayan eğilme davranışının; donatı düzeni, beton basınç dayanımı ve eksenel yük düzeyi gibi temel tasarım parametrelerinin eşzamanlı ve etkileşimli etkisi altında geliştiğini açık biçimde ortaya koymaktadır. Elde edilen sayısal bulgular, yalnızca tekil parametre etkilerinin değil, aynı zamanda bu parametreler arasındaki etkileşimin de kesit performansını belirleyici olduğunu göstermektedir.

Kare, dikdörtgen ve dairesel kesit tiplerinde, boyuna donatı oranındaki artışın moment taşıma kapasitesini belirgin biçimde yükselttiği görülmektedir. Tablo verileri incelendiğinde hem akma momenti hem de maksimum moment değerlerinin boyuna donatı oranı ile monoton biçimde arttığı anlaşılmaktadır. Buna karşılık, aynı artış eğrilik sünekliği üzerinde ters yönlü bir etki yaratmakta; artan boyuna donatı oranı ile birlikte kesitlerin daha rijit ancak daha az sünek davrandığı belirlenmektedir. Bu durum, kesitin erken aşamada daha yüksek moment kapasitesine ulaşmasına karşın, plastik şekil değiştirme kapasitesinin sınırlanması ile açıklanabilir.

Sargı donatısının etkisi tüm kesit tiplerinde son derece belirgindir. Daha sık sargı donatısı aralığı ve/veya daha büyük çaplı sargı donatısı kullanılması, maksimum moment kapasitesinde sınırlı bir artış sağlarken, özellikle maksimum eğrilik ve buna bağlı eğrilik sünekliği üzerinde önemli artışa yol açmaktadır. Bu bulgu, sargı donatısının temel katkısının dayanım artışından ziyade çekirdek betonun ötelenme kapasitesini artırarak göçme öncesi deformasyon kabiliyetini geliştirmesi olduğunu göstermektedir. Nitekim tüm tablolarda, 50 mm etriye aralığına sahip düzenlerin 75 mm ve 100 mm aralıklara kıyasla daha yüksek süneklik değerleri ürettiği sistematik olarak gözlenmektedir.

Beton basınç dayanımındaki artışın etkisi incelendiğinde, tüm kesitlerde moment kapasitesinin anlamlı ölçüde yükseldiği; buna karşılık eğrilik kapasitesi ve sünekliğin azaldığı belirlenmiştir. Yüksek dayanımlı betonların daha gevrek davranış sergilemesi nedeniyle, maksimum eğrilik değerlerinde azalma meydana gelmekte ve bu durum süneklik katsayılarının azalmasına doğrudan yansımaktadır. Dolayısıyla, beton basınç dayanımı artışı ile süneklik arasında belirgin bir ters orantı bulunduğu bu bölüm kapsamında açık biçimde doğrulanmaktadır.

Eksenel yük düzeyinin etkisi de benzer şekilde kritik bir parametre olarak öne çıkmaktadır. Artan eksenel yük ile birlikte akma ve maksimum moment değerlerinde artış gözlenirken, eğrilik kapasitesinde ve dolayısıyla süneklikte önemli azalmalar meydana gelmektedir. Bu durum, yüksek eksenel basınç altında betonun daha erken ezilmesi ve plastik dönme kapasitesinin sınırlanması ile ilişkilidir. Analiz sonuçları, özellikle yüksek eksenel yük seviyelerinde kesit davranışının daha gevrek karakter kazandığını göstermektedir.

Moment-eğrilik eğrilerinin genel karakteri incelendiğinde, tüm modellerde başlangıçta doğrusal elastik bir davranışın hakim olduğu, çatlama sonrasında rijitliğin azaldığı ve akma noktasından sonra belirgin doğrusal olmayan bir davranışın geliştiği görülmektedir. Bu bölüm kapsamında elde edilen bulgular; betonarme kolonların performansının yalnızca moment kapasitesi ile değil, aynı zamanda eğrilik kapasitesi ve süneklik düzeyi ile birlikte değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir. Tasarım parametreleri arasında özellikle sargı donatısı düzeninin süneklik açısından kritik olduğu, buna karşılık boyuna donatı oranı ve beton dayanımının dayanım-süneklik dengesi üzerinde belirleyici rol oynadığı anlaşılmaktadır. Bu bağlamda, optimum tasarımın yüksek dayanım ile yeterli sünekliğin birlikte sağlandığı dengeli bir parametre seçimi ile mümkün olduğu sonucuna ulaşılmaktadır.

3.2. Betonarme Kolonların Etkin Eğilme Rijitlik Değerlerinin Hesaplanması

Betonarme kolonlarda eğilme momentinin artışıyla birlikte çekme bölgesinde çatlak oluşumu başlamakta, buna bağlı olarak boyuna donatıdaki gerilme-şekildeğiştirme düzeyi artarken kesit rijitliği kademeli olarak azalmaktadır. Kolon elemanlarda bu süreç, kirişlerden farklı olarak eksenel basınç kuvveti ile etkileşimli biçimde gerçekleştiğinden, eğilme rijitliği yalnızca moment seviyesine değil; eksenel yük oranına, kesitsel hasar düzeyine ve ikinci merteye etkilerine bağlı olarak değişkenlik göstermektedir.

Kolon boyunca moment dağılımının doğrusal olmaması ve maksimum momentlerin genellikle uç bölgelerde yoğunlaşması, bu bölgelerde çatlak gelişimi ve plastikleşme olasılığını artırırken, diğer kesitlerde kısmi veya çatlama davranışının sürmesine neden olmaktadır. Bu nedenle kolonlarda eğilme rijitliği sabit bir büyüklük olarak kabul edilememekte; yükleme geçmişi ve hasar düzeyine bağlı değişken bir parametre olarak ele alınmaktadır. Etkin eğilme rijitliğinin doğru tanımlanması, kolon tasarımı ve performans değerlendirmesinde kritik öneme sahiptir. Analitik modellerde kullanılan rijitlik kabulleri; iç kuvvet dağılımı, yatay ötelenmeler, ikinci merteye etkileri ve dinamik davranış üzerinde belirleyici olmaktadır. Bu kapsamda, doğrusal analizlerde tekil rijitlik değeri yerine alt ve üst sınırlara dayalı duyarlılık analizlerinin yapılması, rijitlik varsayımlarının yapısal davranış üzerindeki etkisini güvenilir biçimde ortaya koyan rasyonel bir yaklaşım olarak öne çıkmaktadır.

Bu bölümde betonarme kolonlar için etkin eğilme rijitliğinin belirlenmesi amacıyla kesit düzeyinde doğrusal olmayan moment-eğrilik analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizlerde düzlem kesitlerin düzlem kalma varsayımı esas alınmış; beton için doğrusal olmayan basınç davranışını temsil eden gerilme-şekildeğiştirme modeli, donatı çeliği için elastik-plastik malzeme modeli kullanılmıştır. Her bir kolon kesiti için akma momenti ve göçme momentine karşılık gelen eğrilik değerleri belirlenmiş; başlangıç eğimi ile akma noktasına karşılık gelen sekant rijitlikler esas alınarak etkin eğilme rijitliği hesaplanmıştır. Elde edilen $M-\phi$ eğrileri, çatlama sonrası rijitlik azalmasını ve akma sonrasındaki plastikleşme etkilerini açık biçimde ortaya koymuştur. Böylece kesitin farklı performans seviyelerindeki rijitlik davranışı sayısal olarak karakterize edilmiş ve hesaplanan etkin kesit rijitlikleri karşılaştırmalı değerlendirmeler için temel veri seti olarak kullanılmıştır.

Çalışmanın ikinci aşamasında etkin rijitlik katsayısı (k_e), yürürlükteki ulusal ve uluslararası deprem yönetmeliklerinde önerilen kabuller çerçevesinde belirlenmiştir. Brüt kesit rijitliği ($E_c I_g$) çatlama sonrası davranışı temsil etmediğinden, analizlerde indirgenmiş rijitlik katsayıları esas alınmıştır. Bu kapsamda yönetmeliklerde kolonlar için önerilen sabit veya eksenel yük oranına bağlı katsayılar kullanılarak $E I_e = k_e E_c I_g$ bağıntısı üzerinden etkin rijitlik değerleri hesaplanmıştır.

Üçüncü aşamada, literatürde önerilen parametre-duyarlı mekanik modeller esas alınmıştır. Bu modeller kapsamında etkin eğilme rijitliği; boyuna donatı oranı, beton basınç dayanımı, eksenel yük düzeyi, moment seviyesi ve süneklik talebi gibi temel değişkenlerin bir fonksiyonu olarak tanımlanmıştır. Özellikle çatlama momenti oranına dayalı geçiş fonksiyonları ile etkin atalet momenti yaklaşımları kullanılarak her bir kesit için rijitlik azaltma katsayıları (k_e) belirlenmiştir. Bu çerçevede, farklı kesit geometrilerinin (kare, dikdörtgen ve dairesel) ve değişen eksenel yük oranlarının rijitlik azalımı üzerindeki etkileri sayısal olarak analiz edilmiştir.

Farklı kesit geometrilerine ve tasarım parametrelerine sahip betonarme kolonların etkin kesit rijitlikleri; moment-eğrilik ilişkileri temelinde, TBDY (2018), ACI 318 (2014), ASCE/SEI 41

(2017), Eurocode 2 (2004) ve Eurocode 8 (2004, 2005) kapsamında önerilen yaklaşımlar ile literatürde yer alan bağıntılar kullanılarak hesaplanmıştır. Söz konusu yaklaşımlar, betonarme kesitlerin etkin eğilme rijitliğinin belirlenmesine yönelik analitik bir çerçevede ele alınmış ve doğrusal olmayan kesit davranışını temsil etme kapasiteleri açısından incelenmiştir. Bu kapsamda, doğrusal olmayan kesit analizine dayanan kapsamlı çalışmalar sonucunda Foroughi ve Yüksel (2026b) tarafından kare, dikdörtgen ve dairesel betonarme kolon kesitleri için önerilen etkin kesit rijitliği bağıntısı; kuramsal temelleri ve mühendislik uygulamalarındaki uygulanabilirliği bakımından ayrıntılı olarak değerlendirilmiştir. Elde edilen etkin rijitlik değerleri, karşılaştırmalı analizler aracılığıyla sistematik bir değerlendirmeye tabi tutulmuştur. Bölüm sonunda, doğrusal olmayan moment-eğrilik analizlerinden elde edilen etkin eğilme rijitliği değerleri; yönetmelik kabullerine ve literatürde önerilen modellere dayalı sonuçlar ile karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Bu karşılaştırmalarda, yöntemlerin güvenli tarafta kalma eğilimi, kesit geometrisine bağlı farklılıklar ve eksenel yük etkisi dikkate alınarak kapsamlı bir analiz gerçekleştirilmiştir.

3.2.1. Moment-eğrilik ilişkilerinden hesaplanan etkin kesit rijitlik değerleri

Betonarme kolon modellerinde etkin eğilme rijitliğinin belirlenmesinde en güvenilir yaklaşım, kesit düzeyinde gerçekleştirilen doğrusal olmayan moment-eğrilik ($M-\varphi$) analizlerine dayanmaktadır. Bu analizler, çatlama sonrası beton davranışını, donatı çeliğinin akma sürecini ve eksenel yük etkisini eşzamanlı olarak içermesi nedeniyle, brüt kesit rijitliğine dayalı elastik kabullere kıyasla gerçek davranışı daha doğru temsil etmektedir. Kolon modellerinde kullanılan etkin rijitlik, $M-\varphi$ eğrisinin belirli bir performans noktasına karşılık gelen sekant eğimi üzerinden tanımlanmakta ve $EI_e = M/\varphi$ bağıntısı ile hesaplanmaktadır. Moment-eğrilik analizlerinden elde edilen etkin kesit rijitlik değerleri, betonarme kolon modellerinde kullanılacak referans nitelikli büyüklüklerdir. Bu değerler, ikinci mertebe etkilerin değerlendirilmesi, ötelenme taleplerinin hesaplanması ve yönetmeliklerde önerilen rijitlik azaltma katsayılarının doğrulanması açısından temel veri sağlamaktadır. Kolon davranışının gerçekçi biçimde temsil edilebilmesi için etkin eğilme rijitliğinin, seçilen performans düzeyine ve eksenel yük oranına bağlı olarak tanımlanması zorunludur.

Etkin kesit rijitlik katsayılarının moment-eğrilik analizleri yoluyla belirlenmesi amacıyla oluşturulan betonarme kolon modellerine ait detaylar Tablo 3.1'de, kesit görünüşleri ise Şekil 3.1'de sunulmuştur. Kolon modellerinde beton basınç dayanımı (f_{ck}) C30 ile C50 aralığında seçilmiş; böylece malzeme dayanımındaki artışın çatlama momenti, akma momenti ve eğrilik kapasitesi üzerindeki etkisi sistematik olarak incelenmiştir. Boyuna donatı çapı, $\Phi 20$ mm ile $\Phi 30$ mm aralığında değiştirilmiş ve bu değişimin kesit rijitliği üzerindeki etkisi sistematik olarak incelenmiştir. Bu yaklaşım, moment-eğrilik eğrisinin özellikle akma öncesi ve akma anındaki sekant eğimini belirleyen temel parametrelerden biri olan donatı oranının etkisini doğrudan ortaya koymayı amaçlamaktadır. Sargı donatısı parametreleri de etkin rijitlik davranışının değerlendirilmesinde dikkate alınmıştır. $\Phi 10$ mm ve $\Phi 12$ mm çaplı enine donatılar ile 50 mm, 75 mm ve 100 mm aralık değerleri kullanılarak farklı sargı etkinlik düzeyleri modellenmiştir. Eksenel yük seviyesi N/N_{max} oranı 0.10, 0.20, 0.30 ve 0.40 değerleri için tanımlanmış olup, kolonların moment-eğrilik ilişkilerinde eksenel basıncın rijitlik üzerindeki belirleyici rolü analiz edilmiştir. Etkin kesit rijitlik katsayısı (k_e), yalnızca malzeme ve donatı oranına değil, eksenel yük düzeyine de duyarlı olarak hesaplanmıştır.

Bu kapsamda kare (500 mm × 500 mm), dikdörtgen (600 mm × 400 mm) ve dairesel (600 mm) kolon kesitleri seçilmiştir. Söz konusu kolon modelleri için elde edilen moment-eğrilik eğrileri kullanılarak her bir kesite ait akma noktası ve karşılık gelen eğrilik değerleri belirlenmiştir. Akma momentine karşılık gelen sekant eğim esas alınarak etkin eğilme rijitliği $(EI)_e$ hesaplanmış ve buna bağlı olarak etkin rijitlik katsayısı (k_e) tanımlanmıştır. Hesaplanan k_e oranları; kesit tipi, beton basınç dayanımı, boyuna donatı oranı, sargı donatısı oranı ve eksenel yük düzeyi parametrelerine bağlı olarak karşılaştırmalı biçimde değerlendirilmiştir.

Farklı kesit geometrilerine sahip betonarme kolon modelleri için gerçekleştirilen doğrusal olmayan moment-eğrilik analizleri sonucunda elde edilen etkin kesit rijitlik katsayıları (k_e), hem sayısal veriler halinde hem de grafiksel olarak sunulmuştur. 500 mm × 500 mm kare enkesitli kolonlar için moment-eğrilik ilişkilerinden elde edilen k_e değerleri Tablo 3.8’de sunulmuş; bu katsayıların farklı tasarım parametrelerine bağlı değişimi ise Şekil 3.11’de grafiksel olarak gösterilmiştir. Benzer şekilde, 400 mm × 600 mm dikdörtgen enkesitli kolonlara ait k_e değerleri Tablo 3.9’da verilmiş olup, ilgili parametrelerin etkileri Şekil 3.12’de karşılaştırmalı olarak ortaya konulmuştur. Ayrıca, 600 mm dairesel enkesitli kolonlar için hesaplanan k_e değerleri Tablo 3.10’da sunulmuş; bu değerlerin parametrelere bağlı değişimi Şekil 3.13’te grafiksel olarak değerlendirilmiştir.

Tablo 3.8. 500 mm × 500 mm kare enkesitli kolonlar için moment-eğrilik ilişkilerinden hesaplanan k_e değerleri

a) Farklı sargı donatısı oranı

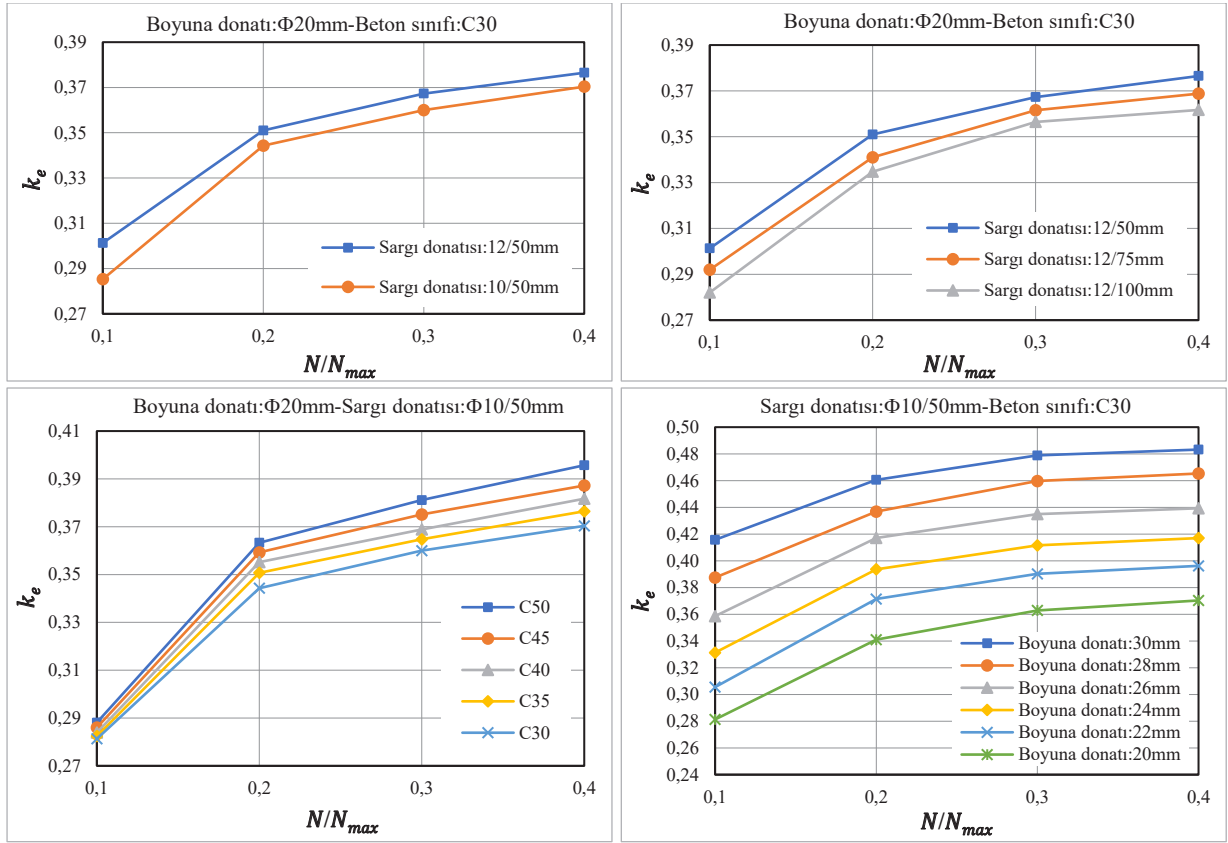
Etkin Kesit Rijitlik Katsayıları (k_e)						
Beton Basınç Dayanımı	Boyuna Donatı	N/N_{max}	Farklı Sargı Donatısı			
			Φ10/50 mm	Φ12/50 mm	Φ12/75 mm	Φ12/100 mm
$f_{ck}=30$ MPa	8Φ20 mm	0.10	0.2853	0.3013	0.2920	0.2820
		0.20	0.3443	0.3510	0.3410	0.3348
		0.30	0.3600	0.3673	0.3615	0.3565
		0.40	0.3704	0.3765	0.3688	0.3617

b) Farklı boyuna donatı oranı

Etkin Kesit Rijitlik Katsayıları (k_e)							
Beton Basınç Dayanımı	Sargı Donatısı	N/N_{max}	Farklı Boyuna Donatı				
			8Φ22 mm	8Φ24 mm	8Φ26 mm	8Φ28 mm	8Φ30 mm
$f_{ck}=30$ MPa	Φ10/50 mm	0.10	0.3055	0.3313	0.3586	0.3874	0.4157
		0.20	0.3714	0.3937	0.4171	0.4369	0.4606
		0.30	0.3902	0.4115	0.4350	0.4597	0.4789
		0.40	0.3962	0.4170	0.4393	0.4653	0.4832

c) Farklı beton basınç dayanımı

Etkin Kesit Rijitlik Katsayıları (k_e)						
Boyuna Donatı	Sargı Donatısı	N/N_{max}	Farklı Beton Basınç Dayanımı			
			$f_{ck}=35$ MPa	$f_{ck}=40$ MPa	$f_{ck}=45$ MPa	$f_{ck}=50$ MPa
8Φ20 mm	Φ10/50 mm	0.10	0.2824	0.2839	0.2860	0.2881
		0.20	0.3507	0.3552	0.3593	0.3633
		0.30	0.3647	0.3689	0.3751	0.3812
		0.40	0.3765	0.3817	0.3872	0.3957



Şekil 3.11. 500 mm x 500 mm kare enkesitli kolonun farklı parametrelerine göre moment-eğrilik ilişkilerinden elde edilen k_e ilişkileri.

Tablo 3.9. 400 mm x 600 mm dikdörtgen enkesitli kolonlar için moment-eğrilik ilişkilerinden hesaplanan k_e değerleri

a) Farklı sargı donatısı oranı

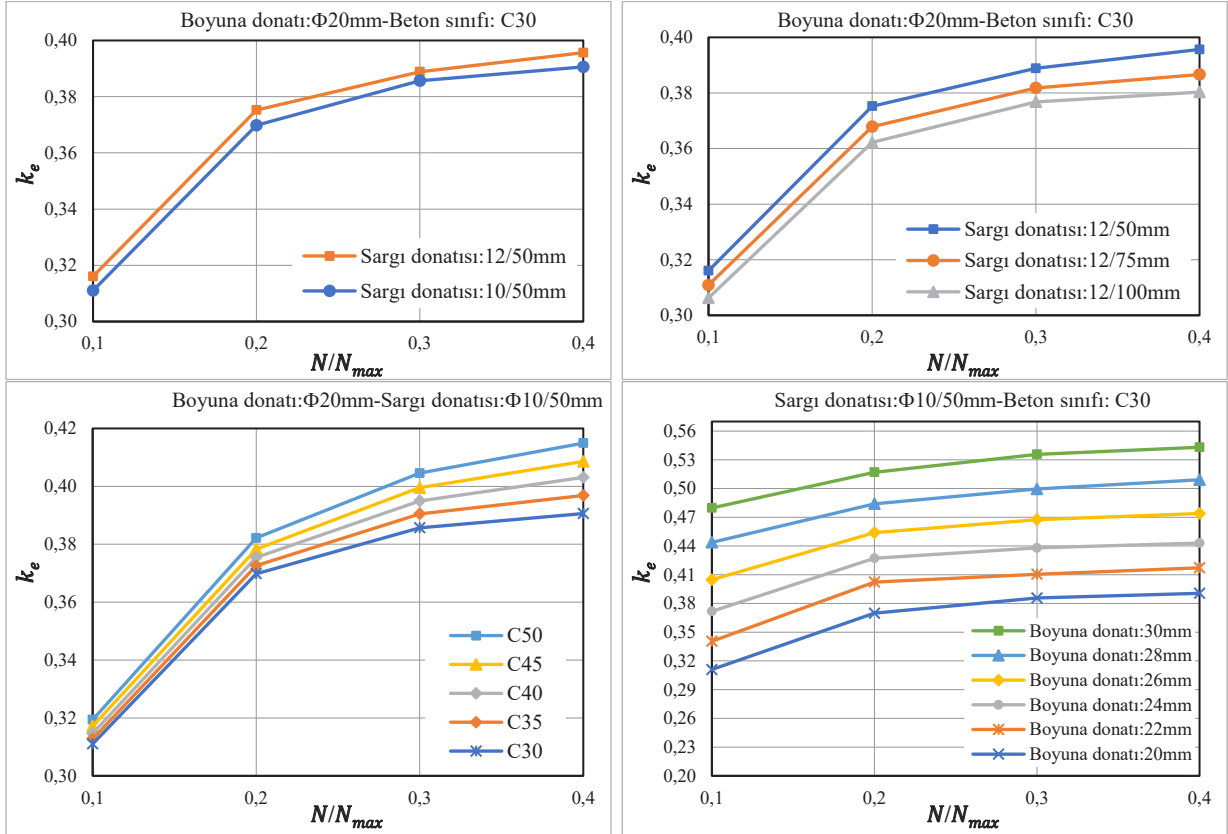
Etkin Kesit Rijitlik Katsayıları (k_e)						
Beton Basınç Dayanımı	Boyuna Donatı	N/N_{max}	Farklı Sargı Donatısı			
			$\Phi 10/50$ mm	$\Phi 12/50$ mm	$\Phi 12/75$ mm	$\Phi 12/100$ mm
$f_{ck}=30$ MPa	10 $\Phi 20$ mm	0.10	0.3110	0.3161	0.3109	0.3063
		0.20	0.3698	0.3752	0.3679	0.3622
		0.30	0.3857	0.3888	0.3818	0.3768
		0.40	0.3906	0.3957	0.3866	0.3803

b) Farklı boyuna donatı oranı

Etkin Kesit Rijitlik Katsayıları (k_e)							
Beton Basınç Dayanımı	Sargı Donatısı	N/N_{max}	Farklı Boyuna Donatı				
			10 $\Phi 22$ mm	10 $\Phi 24$ mm	10 $\Phi 26$ mm	10 $\Phi 28$ mm	10 $\Phi 30$ mm
$f_{ck}=30$ MPa	$\Phi 10/50$ mm	0.10	0.3405	0.3718	0.4047	0.4438	0.4797
		0.20	0.4024	0.4272	0.4540	0.4841	0.5170
		0.30	0.4106	0.4380	0.4675	0.4995	0.5357
		0.40	0.4172	0.4431	0.4739	0.5091	0.5431

c) Farklı beton basınç dayanımı

Etkin Kesit Rijitlik Katsayıları (k_e)						
Boyuna Donatı	Sargı Donatısı	N/N_{max}	Farklı Beton Basınç Dayanımı			
			$f_{ck}=35$ MPa	$f_{ck}=40$ MPa	$f_{ck}=45$ MPa	$f_{ck}=50$ MPa
10 Φ 20 mm	Φ 10/50 mm	0.10	0.3127	0.3146	0.3172	0.3194
		0.20	0.3726	0.3754	0.3783	0.3822
		0.30	0.3905	0.3950	0.3995	0.4046
		0.40	0.3968	0.4031	0.4086	0.4149



Şekil 3.12. 400 mm×600 mm dikdörtgen enkesitli kolonun farklı parametrelerine göre moment-egrilik ilişkilerinden elde edilen k_e ilişkileri.

Tablo 3.10. 600 mm dairesel enkesitli kolonlar için moment-egrilik ilişkilerinden hesaplanan k_e değerleri

a) Farklı sargı donatısı oranı

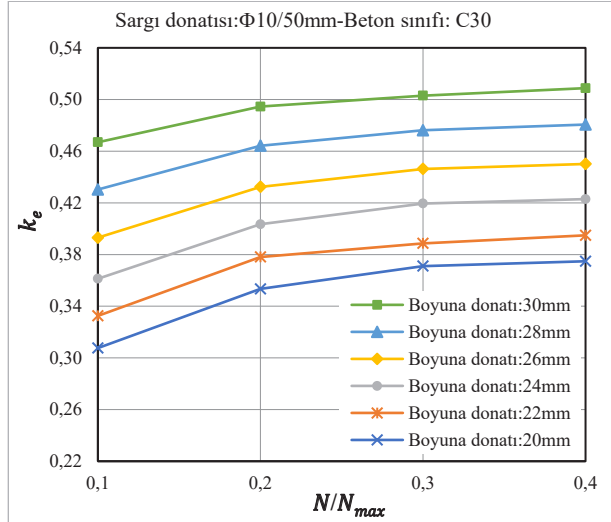
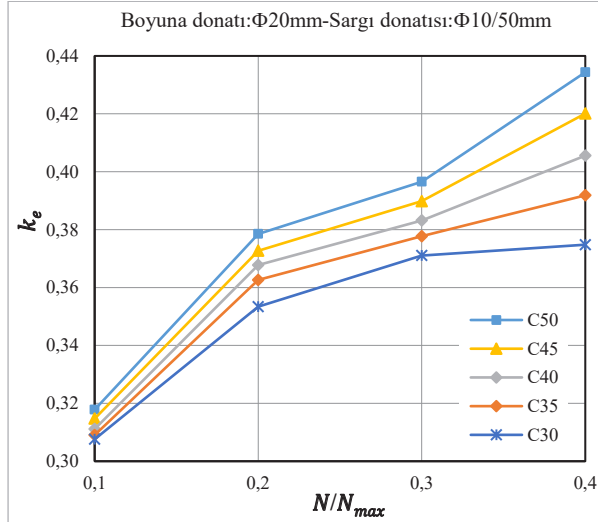
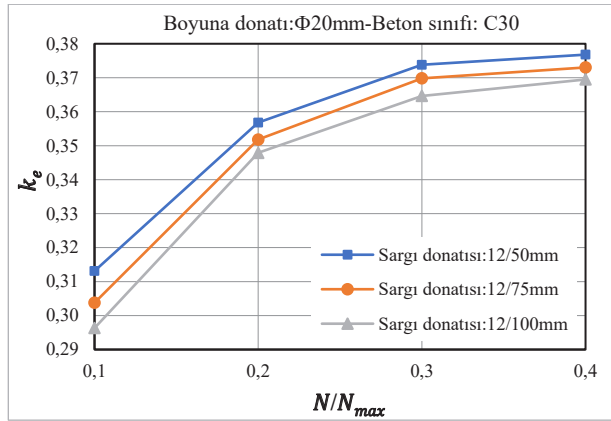
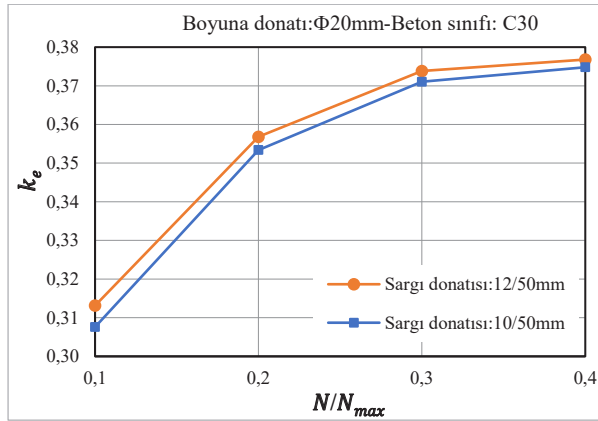
Etkin Kesit Rijitlik Katsayıları (k_e)						
Beton Basınç Dayanımı	Boyuna Donatı	N/N_{max}	Farklı Sargı Donatısı			
			Φ 10/50 mm	Φ 12/50 mm	Φ 12/75 mm	Φ 12/100 mm
$f_{ck}=30$ MPa	10 Φ 20 mm	0.10	0.3076	0.3131	0.3038	0.2963
		0.20	0.3534	0.3568	0.3518	0.3479
		0.30	0.3710	0.3738	0.3698	0.3646
		0.40	0.3748	0.3768	0.3730	0.3695

b) Farklı boyuna donatı oranı

Etkin Kesit Rijitlik Katsayıları (k_e)							
Beton Basınç Dayanımı	Sargı Donatısı	N/N_{max}	Farklı Boyuna Donatı				
			10 Φ 22 mm	10 Φ 24 mm	10 Φ 26 mm	10 Φ 28 mm	10 Φ 30 mm
$f_{ck}=30$ MPa	Φ 10/50 mm	0.10	0.3325	0.3613	0.3931	0.4303	0.4669
		0.20	0.3781	0.4034	0.4324	0.4643	0.4945
		0.30	0.3886	0.4195	0.4462	0.4762	0.5030
		0.40	0.3949	0.4229	0.4501	0.4806	0.5088

c) Farklı beton basınç dayanımı

Etkin Kesit Rijitlik Katsayıları (k_e)							
Boyuna Donatı	Sargı Donatısı	N/N_{max}	Farklı Beton Basınç Dayanımı				
			$f_{ck}=35$ MPa	$f_{ck}=40$ MPa	$f_{ck}=45$ MPa	$f_{ck}=50$ MPa	
10 Φ 20 mm	Φ 10/50 mm	0.10	0.3090	0.3111	0.3147	0.3178	
		0.20	0.3626	0.3678	0.3727	0.3785	
		0.30	0.3777	0.3832	0.3898	0.3965	
		0.40	0.3918	0.4055	0.4201	0.4344	



Şekil 3.13. 600 mm dairesel enkesitli kolonun farklı parametrelerine göre moment-eğrilik ilişkilerinden elde edilen k_e ilişkileri.

Bu bölüm kapsamında gerçekleştirilen doğrusal olmayan moment-eğrilik analizlerine dayalı incelemeler, betonarme kolonların etkin kesit rijitliğinin sabit bir büyüklük olarak tanımlanamayacağını, aksine çok sayıda tasarım parametresinin etkileşimi sonucunda şekillenen değişken bir mühendislik özelliği olduğunu açık biçimde ortaya koymuştur. Analiz bulguları, kesit geometrisinin rijitlik karakteristiği üzerindeki etkisinin ihmal edilemeyecek düzeyde olduğunu ortaya koymuştur. Kesit seçiminin yalnızca taşıma gücü açısından değil, deformasyon kontrolü ve servis performansı bakımından da kritik bir tasarım girdisi olduğunu göstermektedir.

Eksenel yük oranının moment-eğrilik davranışı üzerindeki belirleyici rolü, elde edilen verilerle açık biçimde doğrulanmıştır. Eksenel basınç seviyesindeki artışın, kesitin basınç bölgesini genişleterek etkin eğilme rijitliğini artırdığı; bu etkinin özellikle orta ve yüksek eksenel yük düzeylerinde daha belirgin hale geldiği tespit edilmiştir. Bununla birlikte, rijitlikteki bu artışın süneklik kapasitesi ile birlikte değerlendirilmesi gerektiği anlaşılmaktadır. Dolayısıyla, eksenel yükün yalnızca rijitlik artırıcı etkisi üzerinden yorumlanması yeterli olmayıp, kesit davranışının bütüncül performans çerçevesinde ele alınması zorunludur.

Boyuna donatı oranının etkin kesit rijitliği üzerindeki etkisi, incelenen tüm parametreler arasında en baskın belirleyici olarak öne çıkmaktadır. Donatı oranındaki artışın, özellikle çatlama sonrası davranışta kesitin rijitliğini önemli ölçüde koruduğu ve akma öncesi-akma anı aralığında sekant eğimin belirgin biçimde yükselmesine neden olduğu görülmüştür. Elde edilen sayısal değerler, donatı oranındaki değişimin rijitlik üzerinde diğer parametrelere kıyasla çok daha yüksek mertebede etkiler oluşturduğunu göstermektedir.

Sargı donatısının etkisi ise daha çok ikincil düzeyde kalmakla birlikte, özellikle yüksek eksenel yük koşullarında kesit davranışının sürekliliği açısından anlamlı katkılar sunmaktadır. Daha sık aralıklı ve daha büyük çaplı sargı donatısı kullanımının, betonun sargı etkisini artırarak çatlama sonrası rijitlik kaybını sınırladığı ve bu sayede etkin rijitlikte sınırlı fakat tutarlı artışlar sağladığı belirlenmiştir. Bununla birlikte, sargı donatısının rijitlikten ziyade süneklik ve enerji yutma kapasitesi üzerindeki etkisinin daha belirgin olduğu anlaşılmaktadır.

Beton basınç dayanımındaki artışın, etkin kesit rijitliği üzerinde genel olarak artırıcı yönde bir etki oluşturduğu belirlenmiştir. Bununla birlikte, dayanım artışına bağlı olarak gözlenen rijitlik artışı süreklilik arz etmekle beraber, bu artışın büyüklüğünün sınırlı kaldığı anlaşılmaktadır. Bu bulgu, çatlama sonrası davranışın baskın olduğu kesitlerde rijitlik karakteristiğinin esas olarak donatı düzeni ve eksenel yük düzeyi tarafından kontrol edildiğini açık biçimde teyit etmektedir.

Betonarme kolonların gerçekçi biçimde modellenebilmesi için etkin eğilme rijitliğinin, kesite özgü moment-eğrilik analizlerine dayalı olarak ve ilgili performans düzeyi dikkate alınarak tanımlanması gerekmektedir. Elde edilen bulgular etkin kesit rijitliğinin tek bir parametre ile temsil edilemeyecek kadar çok değişkenli bir davranış sergilediğini göstermektedir. Tasarım açısından, özellikle doğrusal olmayan analizlerde kullanılacak etkin rijitlik katsayılarının belirlenmesinde boyuna donatı ve sargı donatısı oranlarının birlikte ve etkileşimli olarak dikkate alınması gerekmektedir.

3.2.2. Yönetmelikler ve araştırmacılara göre hesaplanan etkin kesit rijitlik değerleri

Bu bölümde betonarme kolonlar için etkin eğilme rijitliği katsayısı (k_e) değerleri, farklı ulusal ve uluslararası deprem yönetmelikleri ile literatürde önerilen araştırmacı yaklaşımları esas alınarak karşılaştırmalı biçimde incelenmiştir. Etkin kesit rijitliğinin belirlenmesinde kullanılan kabuller, özellikle çatlamış kesit davranışının temsili açısından yapısal analiz sonuçlarını doğrudan etkilemektedir. Bu kapsamda, ilgili yönetmeliklerde tanımlanan rijitlik azaltma katsayıları ile araştırmacılar tarafından önerilen ampirik ve analitik bağıntılardan (Tablo 3.11) elde edilen k_e değerleri birlikte değerlendirilmiştir.

Tablo 3.11. Betonarme kolonlarda etkin eğilme rijitliğinin belirlenmesine yönelik farklı yaklaşımlar

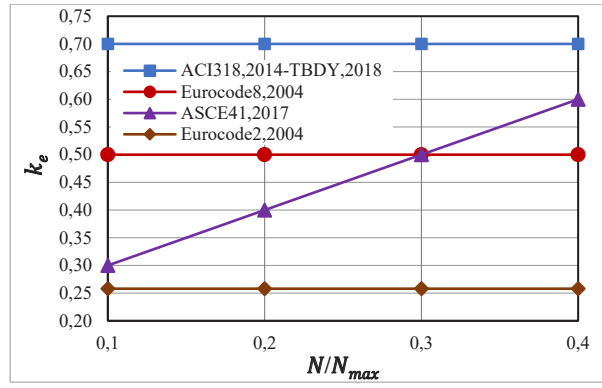
Literatür ve Yönetmelikler	Etkin Kesit Rijitliği
Moment-eğrilik	$k_e = EI_e/EI$; $EI_e = M_y/\phi_y$, $E_c = 3250\sqrt{f_{ck}} + 14000 \text{ MPa}$
TBDY (2018) yığılı plastik davranış yaklaşımı	$(EI)_e = \frac{M_y L_s}{\theta_y \cdot 3}$, $\theta_y = \frac{M_y L_s}{3EI}$ $\theta_y = \frac{\phi_y L_s}{3} + 0.0015\eta \left(1 + 1.5 \frac{h}{L_s}\right) + \frac{\phi_y d_b f_{ye}}{8\sqrt{f_{ce}}}$, $\eta = 1$
Eurocode 8 (2005)	$EI_e = \frac{M_y L_v}{3\theta_y}$, $\theta_y = \phi_y \frac{L_v + a_v z}{3} + 0.0014 \left(1 + 1.5 \frac{h}{L_v}\right) + \phi_y \frac{d_b L f_y}{8\sqrt{f_c}}$ $V_{Rd,c} = \left[C_{Rd,c} K (100\rho_1 f_{ck})^{\frac{1}{3}} + K_1 \sigma_{cp} \right] b_w d$ $K = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2$, $\rho_1 = \frac{A_{sl}}{b_w d} \leq 0.02$, $\sigma_{cp} = \frac{N_{Ed}}{A_c} < 0.2f_{cd}$
Eurocode 2 (2004)	$EI = K_c E_{cd} I_c + K_s E_s I_s$, $E_{cd,eff} = E_{cd}/(1 + \phi_{ef})$ $\rho \geq 0.01$, $K_s = 0$, $K_c = \frac{0.30}{(1 + 0.5\phi_{ef})}$
Avşar vd., (2014)	Dikdörtgen en kesitli kolon için α_{eff} : $a_{eff} = 0.062 + 0.0022f_c + 0.854 \frac{N}{f_c A_g} + 10.802\rho_s \leftrightarrow \frac{N}{f_c A_g} > 0.30 - 1.91\rho_s$ $a_{eff} = 0.257 + 0.0033f_c + 0.602 \frac{N}{f_c A_g} + 13.874\rho_s \leftrightarrow \frac{N}{f_c A_g} \leq 0.30 - 1.91\rho_s$ Dairesel en kesitli kolon için α_{eff} : $a_{eff} = 0.069 + 0.0032f_c + 0.876 \frac{N}{f_c A_g} + 9.512\rho_s \leftrightarrow \frac{N}{f_c A_g} > 0.26 - 1.75\rho_s$ $a_{eff} = 0.239 + 0.0029f_c + 0.709 \frac{N}{f_c A_g} + 12.809\rho_s \leftrightarrow \frac{N}{f_c A_g} \leq 0.26 - 1.75\rho_s$
Biskinis (2007)	$\frac{EI_{eff}}{E_c I_c} = a \left(0.8 + \ln \left[\max \left(\frac{L_s}{h}; 0.6 \right) \right] \right) \left(1 + 0.048 \min \left(50 \text{ MPa}; \frac{N}{A_c} \right) \right)$ $a = 0.081$: for columns

Biskinis ve Fardis (2004)	$EI_{eff} = M_y L_s / 3 \theta_y$ $\theta_y = \Phi_y \frac{L_s + a_v z}{3} + 0.0014 \left(1 + 1.5 \frac{h}{L_v} \right) + a_{sl} \frac{\Phi_y d_{bl} f_y}{8 \sqrt{f_c}}, \quad L_s = \frac{M}{V}, \quad a_{sl} = 1$ $V_{Rc} = \left\{ \max \left[180(100\rho_1)^{1/3} 35 \sqrt{1 + \sqrt{\frac{0.2}{d}} f_c^{1/6}} \right] \left(1 + \sqrt{\frac{0.2}{d}} \right) f_c^{1/3} + 0.15 \frac{N}{A_c} \right\} b_w d$
Foroughi ve Yüksel (2026b)	<p>Kare enkesitli kolon:</p> $k_{e,prop} = \left[-1.31 \left(\frac{N}{A_c f_{ck}} \right)^2 + 0.942 \left(\frac{N}{A_c f_{ck}} \right) + 0.2014 \right] \times [38.2(\rho_s) + 0.616]$ $\times [1.82(\rho_{st}) + 0.967] \times [0.0012(f_{ck}) + 0.951]$ <p>Dikdörtgen enkesitli kolon:</p> $k_{e,prop} = \left[-1.34 \left(\frac{N}{A_c f_{ck}} \right)^2 + 0.928 \left(\frac{N}{A_c f_{ck}} \right) + 0.233 \right] \times [32.97(\rho_s) + 0.567]$ $\times [0.987(\rho_{st}) + 0.964] \times [0.001(f_{ck}) + 0.978]$ <p>Dairesel enkesitli kolon:</p> $k_{e,prop} = \left[-1.14 \left(\frac{N}{A_c f_{ck}} \right)^2 + 0.796 \left(\frac{N}{A_c f_{ck}} \right) + 0.239 \right] \times [26(\rho_s) + 0.71] \times [6.45(\rho_{st}) + 0.92]$ $\times [0.002(f_{ck}) + 0.95]$

Şekil 3.14, yönetmelikler arasındaki yaklaşım farklılıklarını ve eksenel yük seviyesinin rijitlik kabulü üzerindeki etkisini açık biçimde ortaya koymaktadır. ACI 318 (2014) ve TBDY (2018)'de önerilen etkin rijitlik katsayısının tüm eksenel yük seviyeleri için sabit $k_e = 0.70$ olarak alındığı görülmektedir. Bu yaklaşımda eksenel yük oranına bağlı bir rijitlik değişimi öngörülmemekte, dolayısıyla tasarım sürecinde basitleştirilmiş ve sabit bir azaltma katsayısı benimsenmektedir. Bu durum, uygulama kolaylığı sağlamakla birlikte, eksenel yük düzeyine duyarlı rijitlik değişimini yansıtmamaktadır.

Eurocode 8 (2004)'te k_e değeri yaklaşık 0.50 olarak sabit kabul edilmiştir. Bu değer, ACI 318 (2014) ve TBDY (2018) ile kıyaslandığında daha düşük olup, kesit rijitliğinin azaltılmasında tasarım güvenliğini ön planda tutan bir yaklaşımı yansıtmaktadır. Buna karşılık Eurocode 2 (2004)'te etkin rijitlik katsayısının yaklaşık 0.2581 olarak hesaplandığı ve eksenel yük oranından bağımsız tutulduğu görülmektedir.

ASCE/SEI 41 (2017)'de ise k_e katsayısının eksenel yük oranına bağlı olarak değişken tanımlandığı dikkat çekmektedir. N/N_{max} oranı 0.10'dan 0.40'a yükseldikçe k_e değerinin yaklaşık 0.30'dan 0.60'a doğrusal biçimde arttığı görülmektedir. Bu yaklaşım, kolonlarda eksenel basınç etkisinin kesit rijitliğini artırıcı rolünü dikkate almakta ve çatlamış kesit davranışını eksenel yük düzeyine duyarlı şekilde modellemektedir. Yönetmeliklerin bir kısmı (ACI 318, 2014; TBDY, 2018; Eurocode 2, 2004; Eurocode 8, 2004) sabit rijitlik azaltma katsayısı yaklaşımını benimserken, ASCE/SEI 41 (2017) eksenel yük oranına bağlı değişken rijitlik modeli sunmaktadır.



Şekil 3.14. Betonarme kolonların farklı yönetmeliklere ve standartlara göre elde edilen k_e değerleri.

TBDY (2018) kapsamında yığılı plastik davranış modeline göre hesaplanan etkin rijitlik değerleri:

TBDY (2018)'de tanımlanan yığılı plastik davranış yaklaşımı esas alınarak betonarme kolon modelleri için etkin eğilme rijitliği katsayısı (k_e) değerleri belirlenmiştir. Bu kapsamda kare (500 mm×500 mm), dikdörtgen (600 mm×400 mm) ve dairesel (600 mm) enkesitli kolonlar için doğrusal olmayan moment-eğrilik analizlerinden elde edilen akma momentine karşılık gelen sekant eğimi kullanılarak etkin eğilme rijitliği tanımlanmış ve k_e oranları hesaplanmıştır.

TBDY (2018)'de tanımlanan yığılı plastik davranış esasına göre modellenen kolon elemanlarının etkin kesit rijitlikleri, açıklanan kuramsal çerçeve doğrultusunda ve Tablo 3.11'de TBDY (2018) için verilen bağıntılar kullanılarak hesaplanmıştır. Hesaplamalarda, yönetmelikte tanımlanan rijitlik azaltma katsayıları esas alınmış ve çatlamış kesit davranışını temsil eden etkin eğilme rijitliği değerleri analitik olarak belirlenmiştir.

TBDY (2018) kapsamında yığılı plastik davranış yaklaşımı kullanılarak 500 mm × 500 mm kare kesitli kolonlar için hesaplanan etkin kesit rijitlik katsayıları (k_e) Tablo 3.12'de sunulmuş olup, bu katsayıların farklı parametrelere bağlı değişimi Şekil 3.15'te grafiksel olarak verilmiştir. Benzer şekilde, 400 mm × 600 mm dikdörtgen kesitli kolonlara ait k_e değerleri Tablo 3.13'te sunulmuş ve söz konusu parametrelerin etkileri Şekil 3.16'da verilmiştir. Ayrıca, 600 mm dairesel kesitli kolonlar için elde edilen k_e değerleri Tablo 3.14'te verilmiş olup, bu değerlerin parametrelere bağlı değişimi Şekil 3.17'de grafiksel olarak değerlendirilmiştir.

Tablo 3.12. 500 mm × 500 mm kare enkesitli kolonlar için TBDY (2018)'e göre yığılı plastik davranış yaklaşımı kapsamında elde edilen k_e değerleri

a) Farklı sargı donatısı oranı

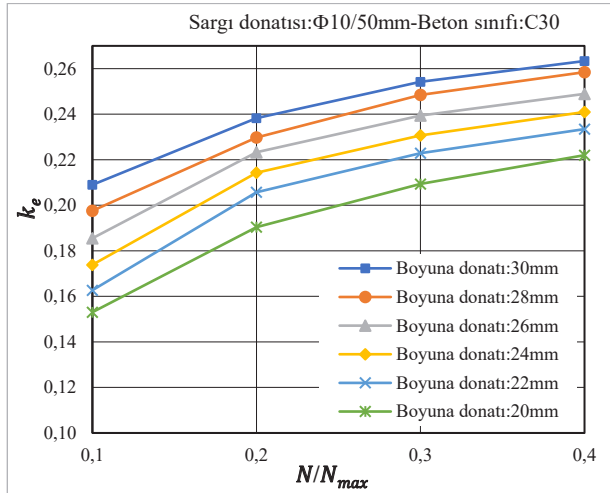
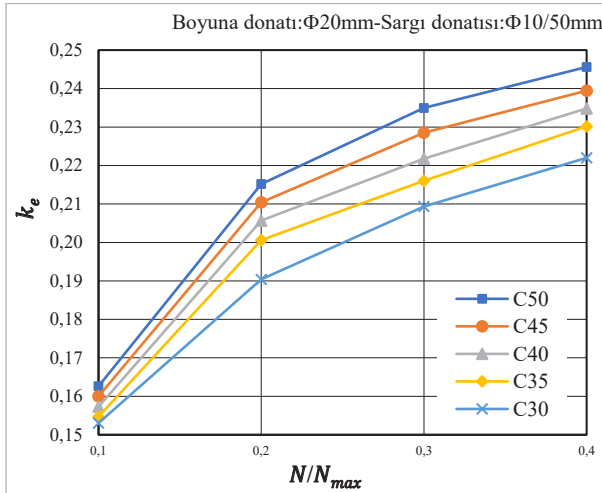
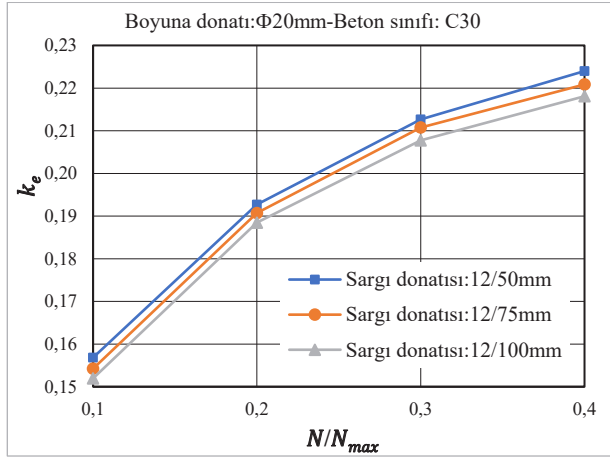
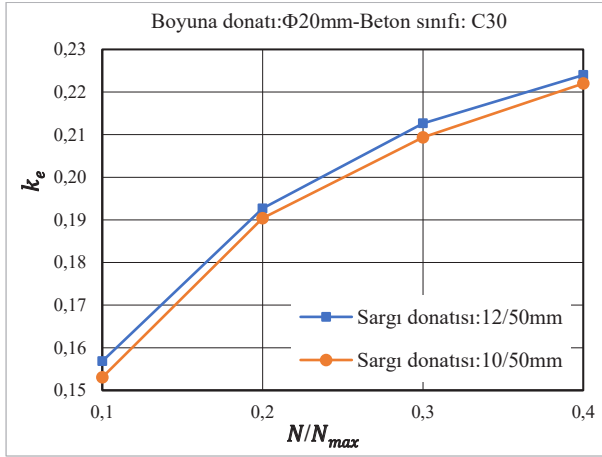
Etkin Kesit Rijitlik Katsayıları (k_e)		N/N_{max}	Farklı Sargı Donatısı			
			Φ10/50 mm	Φ12/50 mm	Φ12/75 mm	Φ12/100 mm
$f_{ck}=30$ MPa	8Φ20 mm	0.10	0.1530	0.1568	0.1542	0.1520
		0.20	0.1904	0.1927	0.1907	0.1885
		0.30	0.2094	0.2127	0.2108	0.2077
		0.40	0.2220	0.2240	0.2209	0.2181

b) Farklı boyuna donatı oranı

Beton Basınç Dayanımı	Sargı Donatısı	N/N_{max}	Farklı Boyuna Donatı				
			8Φ22 mm	8Φ24 mm	8Φ26 mm	8Φ28 mm	8Φ30 mm
$f_{ck}=30$ MPa	Φ10/50 mm	0.10	0.1627	0.1739	0.1855	0.1976	0.2090
		0.20	0.2057	0.2143	0.2233	0.2298	0.2382
		0.30	0.2229	0.2307	0.2394	0.2485	0.2542
		0.40	0.2334	0.2410	0.2489	0.2585	0.2633

c) Farklı beton basınç dayanımı

Boyuna Donatı	Sargı Donatısı	N/N_{max}	Farklı Beton Basınç Dayanımı			
			$f_{ck}=35$ MPa	$f_{ck}=40$ MPa	$f_{ck}=45$ MPa	$f_{ck}=50$ MPa
8Φ20 mm	Φ10/50 mm	0.10	0.1547	0.1573	0.1600	0.1626
		0.20	0.2006	0.2057	0.2104	0.2152
		0.30	0.2160	0.2218	0.2285	0.2350
		0.40	0.2302	0.2348	0.2395	0.2456



Şekil 3.15. 500 mm×500 mm kare enkesitli kolonun TBDY (2018)'e göre yığılı plastik davranış yaklaşımı kapsamında elde edilen k_e ilişkileri

Tablo 3.13. 400 mm × 600 mm dikdörtgen enkesitli kolonlar için TBDY (2018)'e göre yığılı plastik davranış yaklaşımı kapsamında elde edilen k_e değerleri

a) Farklı sargı donatısı oranı

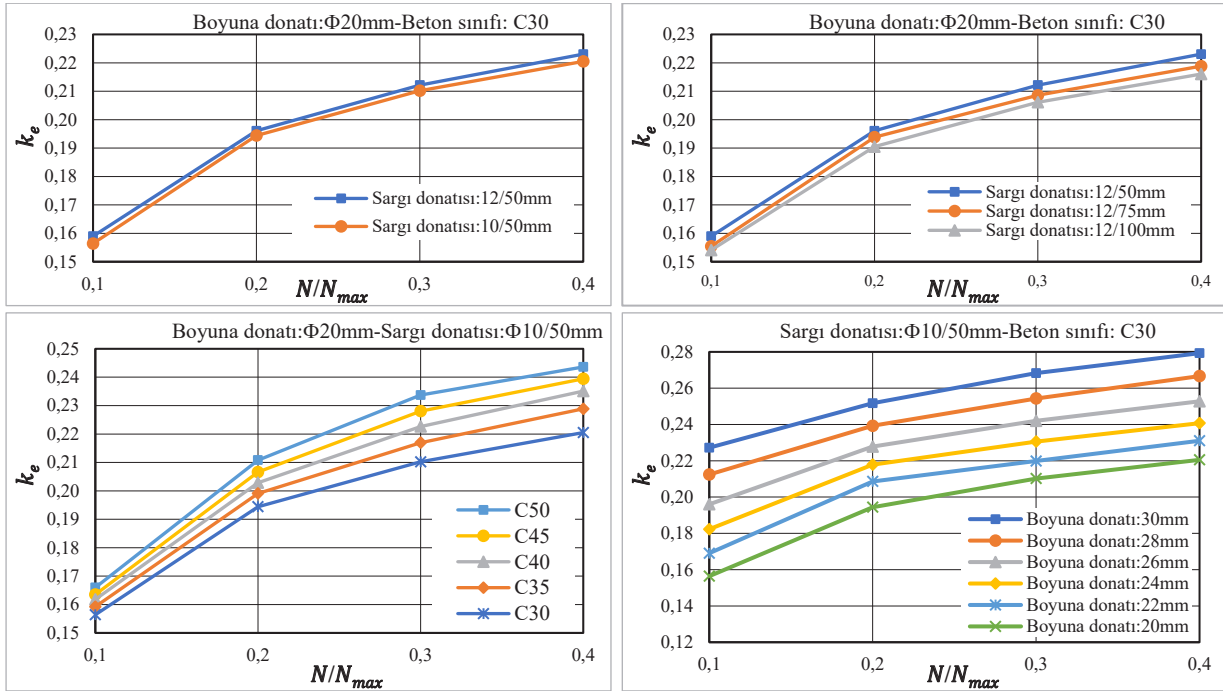
Etkin Kesit Rijitlik Katsayıları (k_e)						
Beton Basınç Dayanımı	Boyuna Donatı	N/N_{max}	Farklı Sargı Donatısı			
			Φ10/50 mm	Φ12/50 mm	Φ12/75 mm	Φ12/100 mm
$f_{ck}=30$ MPa	10Φ20 mm	0.10	0.1564	0.1590	0.1554	0.1541
		0.20	0.1944	0.1961	0.1939	0.1905
		0.30	0.2102	0.2122	0.2086	0.2061
		0.40	0.2205	0.2231	0.2188	0.2160

b) Farklı boyuna donatı oranı

Beton Basınç Dayanımı	Sargı Donatısı	N/N_{max}	Farklı Boyuna Donatı				
			10Φ22mm	10Φ24mm	10Φ26mm	10Φ28mm	10Φ30mm
$f_{ck}=30$ MPa	Φ10/50 mm	0.10	0.1691	0.1823	0.1960	0.2124	0.2272
		0.20	0.2086	0.2179	0.2278	0.2392	0.2517
		0.30	0.2199	0.2306	0.2420	0.2543	0.2683
		0.40	0.2310	0.2407	0.2528	0.2666	0.2793

c) Farklı beton basınç dayanımı

Boyuna Donatı	Sargı Donatısı	N/N_{max}	Farklı Beton Basınç Dayanımı			
			$f_{ck}=35$ MPa	$f_{ck}=40$ MPa	$f_{ck}=45$ MPa	$f_{ck}=50$ MPa
10Φ20 mm	Φ10/50 mm	0.10	0.1592	0.1618	0.1635	0.1660
		0.20	0.1991	0.2029	0.2066	0.2108
		0.30	0.2169	0.2226	0.2280	0.2337
		0.40	0.2289	0.2351	0.2394	0.2436


Şekil 3.16. 400 mm×600 mm dikdörtgen enkesitli kolonun TBDY (2018)'e göre yığılı plastik davranış yaklaşımı kapsamında elde edilen k_e ilişkileri

Tablo 3.14. 600 mm dairesel enkesitli kolonlar için TBDY (2018)'e göre yığılı plastik davranış yaklaşımı kapsamında elde edilen k_e değerleri

a) Farklı sargı donatısı oranı

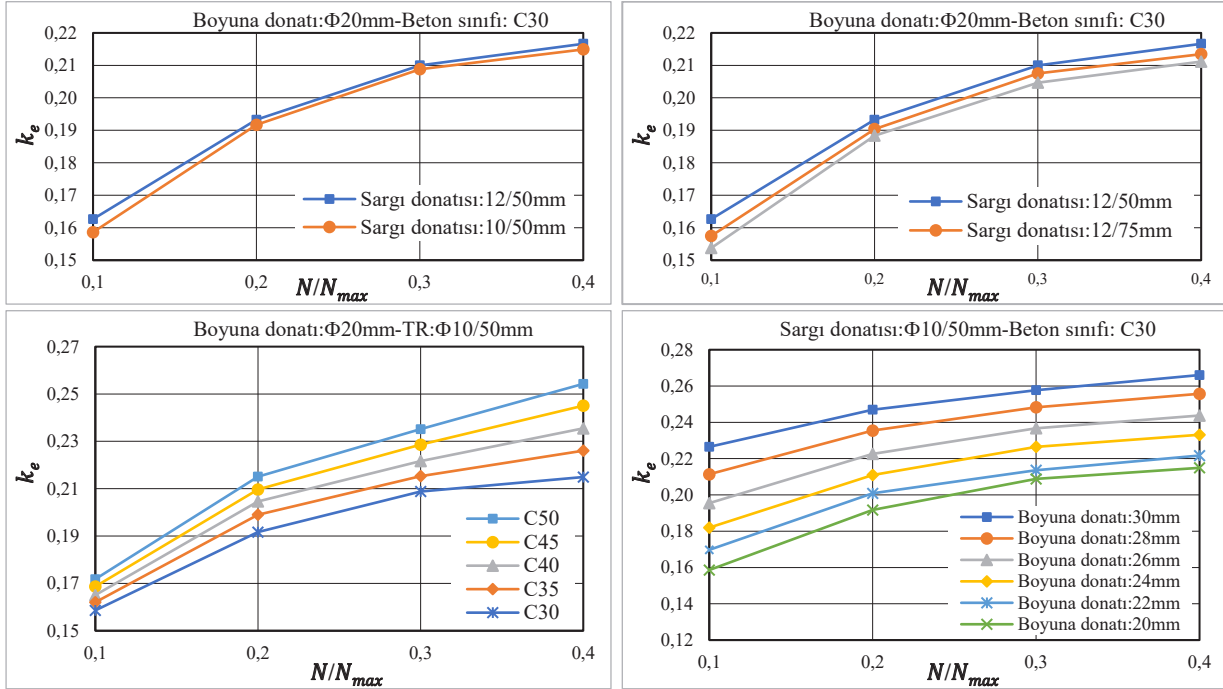
Etkin Kesit Rijitlik Katsayıları (k_e)						
Beton Basınç Dayanımı	Boyuna Donatı	N/N_{max}	Farklı Sargı Donatısı			
			$\Phi 10/50$ mm	$\Phi 12/50$ mm	$\Phi 12/75$ mm	$\Phi 12/100$ mm
$f_{ck}=30$ MPa	10 $\Phi 20$ mm	0.10	0.1586	0.1627	0.1575	0.1537
		0.20	0.1917	0.1933	0.1904	0.1883
		0.30	0.2088	0.2100	0.2075	0.2047
		0.40	0.2149	0.2166	0.2134	0.2112

b) Farklı boyuna donatı oranı

Beton Basınç Dayanımı	Sargı Donatısı	N/N_{max}	Farklı Boyuna Donatı				
			10 $\Phi 22$ mm	10 $\Phi 24$ mm	10 $\Phi 26$ mm	10 $\Phi 28$ mm	10 $\Phi 30$ mm
$f_{ck}=30$ MPa	$\Phi 10/50$ mm	0.10	0.1697	0.1820	0.1955	0.2114	0.2265
		0.20	0.2009	0.2109	0.2226	0.2354	0.2470
		0.30	0.2136	0.2265	0.2367	0.2483	0.2577
		0.40	0.2217	0.2331	0.2437	0.2557	0.2660

c) Farklı beton basınç dayanımı

Boyuna Donatı	Sargı Donatısı	N/N_{max}	Farklı Beton Basınç Dayanımı			
			$f_{ck}=35$ MPa	$f_{ck}=40$ MPa	$f_{ck}=45$ MPa	$f_{ck}=50$ MPa
10 $\Phi 20$ mm	$\Phi 10/50$ mm	0.10	0.1620	0.1651	0.1687	0.1718
		0.20	0.1990	0.2046	0.2097	0.2151
		0.30	0.2153	0.2217	0.2286	0.2351
		0.40	0.2260	0.2355	0.2451	0.2543



Şekil 3.17. 600 mm dairesel enkesitli kolonun TBDY (2018)'e göre yığılı plastik davranış yaklaşımı kapsamında elde edilen k_e ilişkileri

TBDY (2018) kapsamında yığılı plastik davranış yaklaşımı kullanılarak elde edilen etkin kesit rijitlik katsayılarının farklı tasarım parametrelerine bağlı değişimi incelendiğinde, elde edilen bulguların malzeme ve donatı özelliklerine göre sistematik ve mühendislik açısından anlamlı eğilimler ortaya koyduğu görülmektedir.

Öncelikle **sargı donatısı özelliklerinin (çap ve aralık)** etkisi incelendiğinde, tüm kesit tipleri (kare, dikdörtgen ve dairesel) için etkin rijitlik katsayısının sargı donatısı oranı arttıkça sınırlı ancak sistematik bir artış gösterdiği görülmektedir. Özellikle 12 mm çaplı ve daha sık aralıklı (50 mm) sargı donatısının kullanıldığı durumlarda rijitlik katsayılarının maksimum değerlere ulaştığı belirlenmiştir. Aynı eksenel yük seviyesi ve beton dayanımı için, sargı aralığının 50 mm'den 100 mm'ye çıkarılması durumunda rijitlik katsayısında meydana gelen azalma görece sınırlı kalmaktadır. Bu durum, eğilme rijitliğinin esas olarak boyuna donatı ve beton özellikleri tarafından kontrol edildiğini, sargının ise daha çok süneklik ve enerji tüketimi kapasitesi üzerinde belirleyici olduğunu teyit etmektedir.

Boyuna donatı oranının etkisi ise analiz sonuçlarında en belirgin parametrelerden biri olarak ortaya çıkmaktadır. Tüm kesit tiplerinde boyuna donatı çapının 20 mm'den 30 mm'ye artırılmasıyla etkin rijitlik katsayısında düzenli ve önemli bir artış gözlenmiştir. Özellikle yüksek eksenel yük seviyelerinde (örneğin $n = 0.30-0.40$ aralığında), boyuna donatı oranındaki artışın rijitlik üzerindeki etkisi daha da belirginleşmektedir. Analiz bulguları boyuna donatının yalnızca dayanım değil, aynı zamanda etkin rijitlik tanımında da kritik bir tasarım parametresi olduğunu açıkça ortaya koymaktadır.

Beton basınç dayanımının etkisi incelendiğinde, f_{ck} değerinin 30 MPa'dan 50 MPa'ya artırılmasıyla etkin kesit rijitlik katsayılarında tüm kesit tipleri için artış meydana geldiği görülmektedir. Beton dayanımındaki artış, elastisite modülünü yükselterek başlangıç rijitliğini artırsa da, çatlama sonrası davranışta rijitliğin önemli ölçüde donatı çeliğe bağlı hale gelmesi nedeniyle toplam etkin rijitlik üzerindeki etkisi sınırlı kalmaktadır. Bu bulgu, özellikle yüksek dayanımlı beton kullanımının rijitlik artışı açısından tek başına yeterli olmadığını, donatı düzenlemesi ile birlikte değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir.

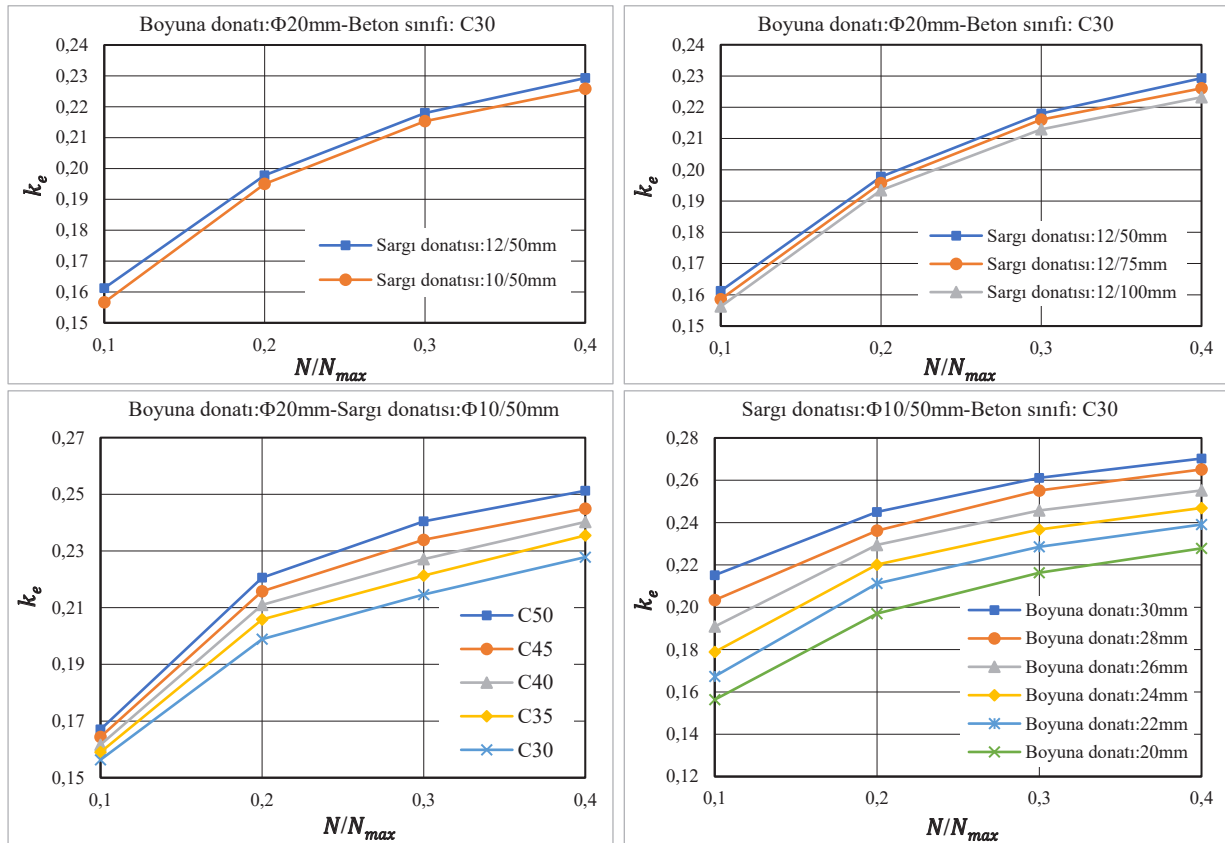
Eksenel yük seviyesinin etkisi ise tüm parametreler arasında en belirgin ve sistematik değişimi oluşturmaktadır. Eksenel yük oranının 0.10'dan 0.40'a yükselmesiyle birlikte etkin kesit rijitlik katsayılarının önemli ölçüde arttığı görülmektedir. Bu durum, eksenel basıncın kesitte çatlak oluşumunu geciktirmesi, basınç bölgesini genişletmesi ve kesitin daha rijit bir davranış sergilemesine neden olması ile açıklanabilir. Ancak bu artışın belirli bir seviyeden sonra (özellikle yüksek eksenel yük oranlarında) gevrek davranış riskini artırabileceği unutulmamalıdır. Dolayısıyla, rijitlik artışı ile süneklik kaybı arasındaki denge tasarım açısından kritik önem taşımaktadır.

TBDY (2018) kapsamında yığılı plastik davranış yaklaşımı ile elde edilen bulgular, etkin kesit rijitliğinin tek bir parametre ile değil; boyuna donatı oranı, eksenel yük seviyesi, beton dayanımı ve sargı donatısı özelliklerinin birleşik etkisiyle belirlendiğini açıkça ortaya koymaktadır. Bu parametreler içerisinde en baskın etkilerin sırasıyla eksenel yük seviyesi ve boyuna donatı oranı tarafından kontrol edildiği, beton dayanımının orta düzeyde, sargı donatısının ise daha sınırlı düzeyde etkili olduğu anlaşılmaktadır. Bu nedenle, performans dayalı tasarım yaklaşımında etkin rijitlik tanımlanırken bu parametrelerin birlikte ve etkileşimli olarak dikkate alınması gerekmektedir.

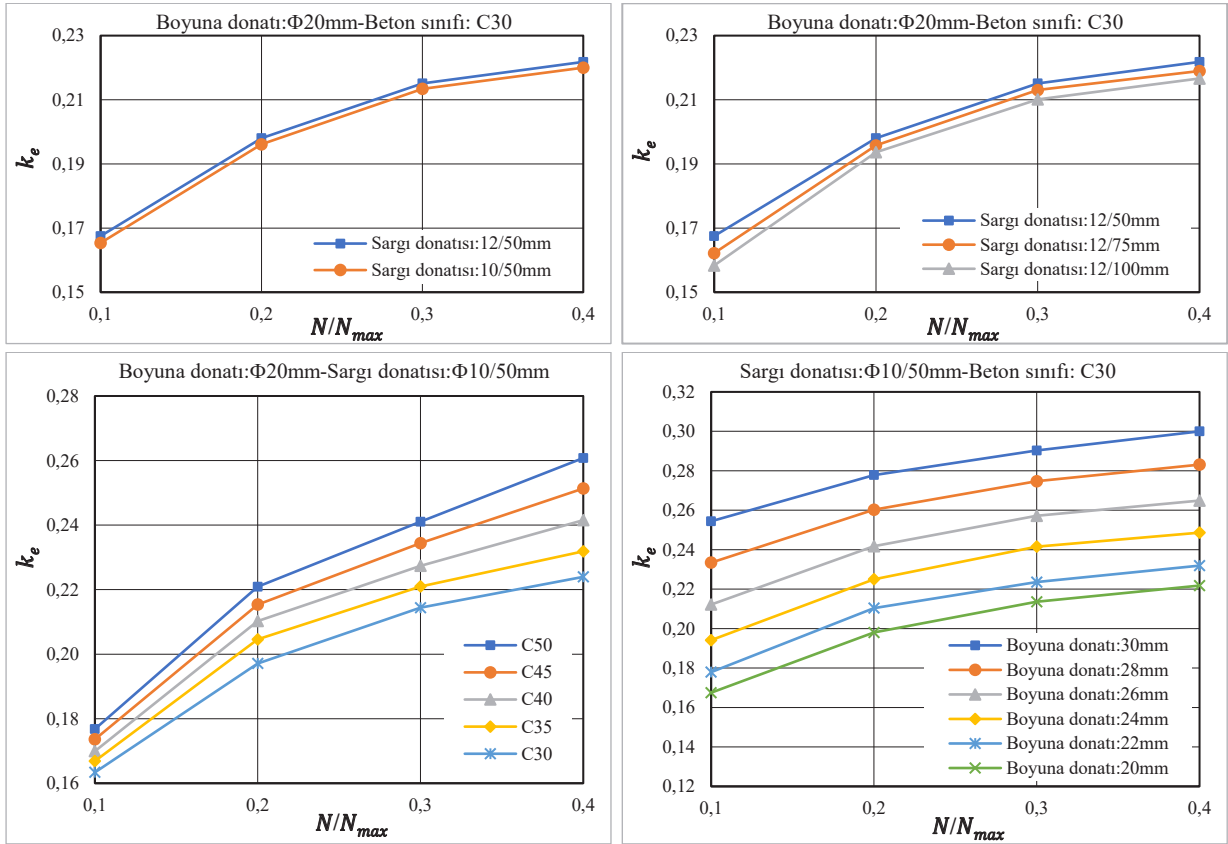
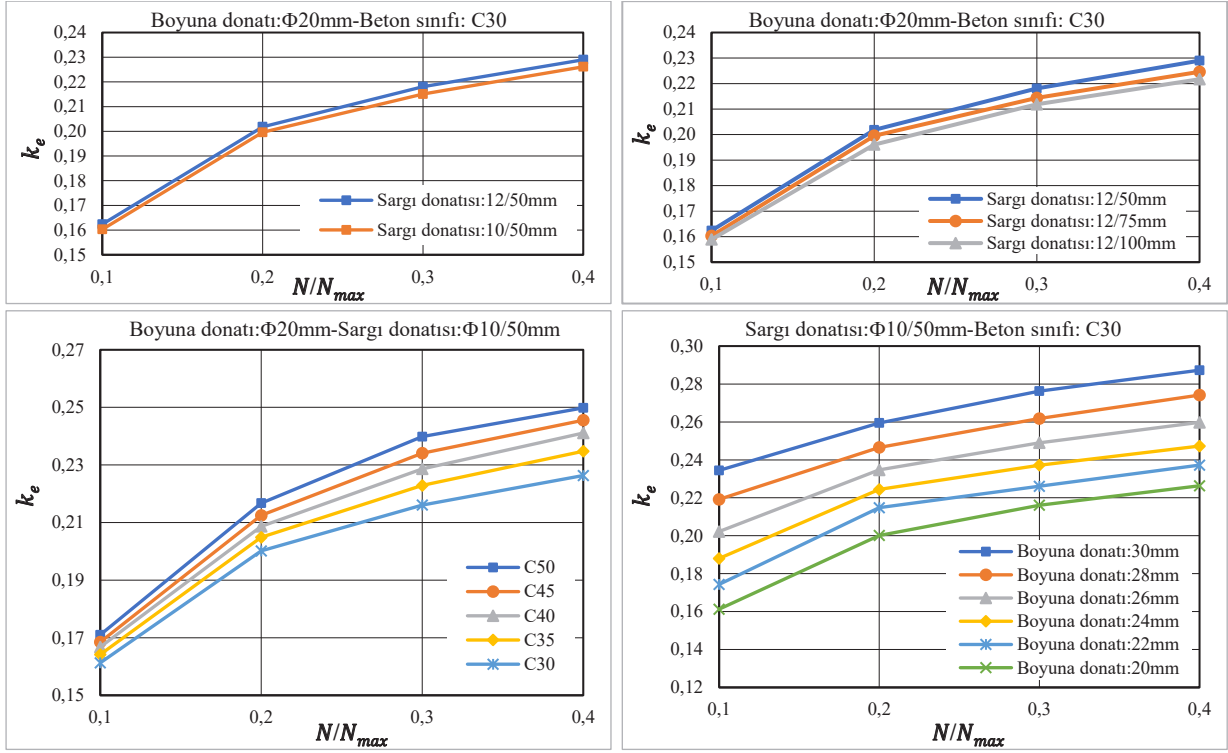
Eurocode 8 (2005)'e göre hesaplanan etkin kesit rijitlik değerleri:

Eurocode 8 (2005) hükümleri esas alınarak yapılan değerlendirmelerde, betonarme kolon elemanlarının doğrusal olmayan davranışını temsil etmek amacıyla etkin eğilme rijitliği katsayısı (k_e) belirlenmiştir. Bu kapsamda, çatlama sonrası kesit rijitliğinde meydana gelen azalma dikkate alınmış ve etkin rijitlik tanımı, yönetmeliğin performansa dayalı tasarım yaklaşımı çerçevesinde ele alınmıştır. Hesaplamalar, sunulan kuramsal esaslara dayandırılmış olup, Eurocode 8 (2005) kapsamında betonarme kolonlar için Tablo 3.11'de verilen bağıntılar esas alınarak gerçekleştirilmiş ve bu kapsamda çatlama sonrası kesit davranışını temsil eden etkin eğilme rijitliği değerleri analitik olarak belirlenmiştir. Elde edilen k_e katsayıları, kesit geometrisi, malzeme özellikleri ve eksenel yük düzeyi gibi parametrelerin etkisi çerçevesinde değerlendirilerek, diğer yönetmelik yaklaşımlarıyla karşılaştırmalı analizlere temel oluşturmuştur.

Eurocode 8 (2005) hükümleri esas alınarak, 500 mm × 500 mm kare enkesitli kolona ait etkin kesit rijitlik katsayısı (k_e) ilişkileri Şekil 3.18'de sunulmuştur. 400 mm × 600 mm dikdörtgen enkesitli kolona ilişkin k_e değişimleri Şekil 3.19'da, 600 mm çaplı dairesel enkesitli kolona ait analiz sonuçları ise Şekil 3.20'de verilmiştir. İlgili grafiklerde, Eurocode 8 (2005)'in öngördüğü rijitlik kabullerinin farklı tasarım parametreleri altındaki etkileri karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.



Şekil 3.18. 500 mm × 500 mm kare enkesitli kolonun Eurocode 8 (2005)'e göre elde edilen k_e ilişkileri



Analiz bulguları bütüncül olarak değerlendirildiğinde, boyuna donatı oranı, Eurocode 8 (2005) kapsamında da etkin rijitlik üzerinde belirleyici bir rol oynadığı görülmektedir. Boyuna donatı oranının artması, kesitin çatlama sonrası rijitliğini artırmakta ve özellikle eğilme etkisi altında donatı çeliğin katkısını daha baskın hale getirmektedir. Bu durum, tüm kesit tiplerinde (kare, dikdörtgen ve dairesel) benzer eğilimler göstermekte olup, boyuna donatı oranındaki artışa bağlı olarak etkin kesit rijitlik katsayısının sistematik biçimde yükseldiği anlaşılmaktadır.

Sargı donatısı çapı ve aralığının etkisi incelendiğinde, Eurocode 8 (2005)'in doğrudan sargı etkinliğini rijitlik hesabına açık bir parametre olarak dahil etmemesi nedeniyle, bu değişkenin etkin kesit rijitliği üzerindeki etkisinin oldukça sınırlı olduğu görülmektedir. Farklı sargı donatısı çapı (örneğin 10 mm ve 12 mm) ve aralıklarının (50 mm, 75 mm, 100 mm) değiştirilmesine rağmen, elde edilen rijitlik katsayılarında belirgin bir farklılaşma oluşmamaktadır. Bu durum, Eurocode 8 (2005) yaklaşımının sargı donatısını daha çok süneklik, enerji tüketimi ve göçme mekanizması bağlamında değerlendirdiğini; rijitlik hesabında ise ikincil planda bıraktığını göstermektedir. Dolayısıyla, analiz sonuçları sargı donatısının etkin rijitlik üzerindeki etkisinin sınırlı olduğunu doğrulamaktadır.

Beton basınç dayanımının etkisi değerlendirildiğinde, beton dayanımındaki artışın etkin kesit rijitlik katsayısını artırdığı görülmektedir. Beton dayanımı arttıkça elastisite modülü yükselmekte ve başlangıç rijitliği artmaktadır; ancak çatlama sonrası davranışta donatı çeliğin etkinliğinin artması nedeniyle betonun katkısı göreceli olarak azalmaktadır.

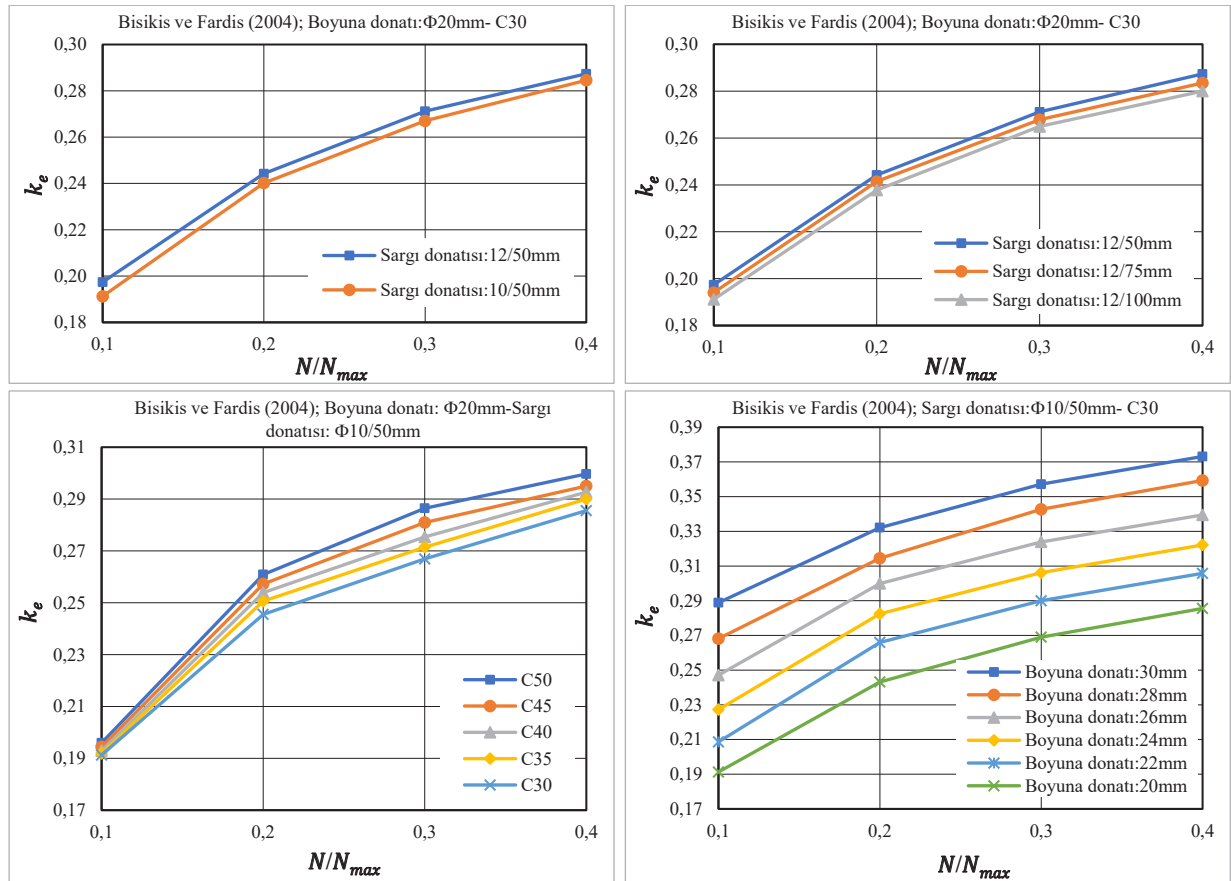
Eksenel yük seviyesinin etkisi, Eurocode 8 (2005)'e göre elde edilen sonuçlarda da en önemli parametrelerden biri olarak öne çıkmaktadır. Eksenel yük oranının artmasıyla birlikte etkin kesit rijitlik katsayısında belirgin bir artış gözlenmektedir. Bunun temel nedeni, eksenel basıncın çatlak oluşumunu geciktirmesi, kesitte basınç bölgesini genişletmesi ve böylece kesitin daha rijit bir davranış sergilemesine katkıda bulunmasıdır. Özellikle yüksek eksenel yük seviyelerinde, kesitin daha büyük bir kısmının basınç altında çalışması, eğilme rijitliğini artırıcı yönde etki etmektedir. Ancak bu durumun süneklik kapasitesi üzerinde olumsuz etkiler yaratabileceği ve gevrek davranış riskini artırabileceği göz önünde bulundurulmalıdır. Eurocode 8 (2005) yaklaşımı, bu dengeyi gözeterek eksenel yük etkisini rijitlik hesaplarına kontrollü biçimde yansıtmaktadır.

Genel olarak değerlendirildiğinde, Eurocode 8 (2005) kapsamında elde edilen etkin kesit rijitlik katsayıları; eksenel yük seviyesi ve boyuna donatı oranının baskın parametreler olduğunu, buna karşılık beton dayanımı ve sargı donatısının etkisinin ikincil düzeyde kaldığını göstermektedir. Bununla birlikte, yönetmeliğin önerdiği rijitlik kabullerinin daha güvenli ve genelleştirilmiş olduğu, parametre değişimlerine karşı duyarlılığın sınırlı tutulduğu anlaşılmaktadır. Eurocode 8 (2005) çerçevesinde elde edilen sonuçlar, indirgenmiş rijitlik yaklaşımı bakımından TBDY (2018) ile benzerlik göstermekle birlikte, bazı parametrelerin etkisinin temsilinde farklılaşmalar ortaya koymaktadır.

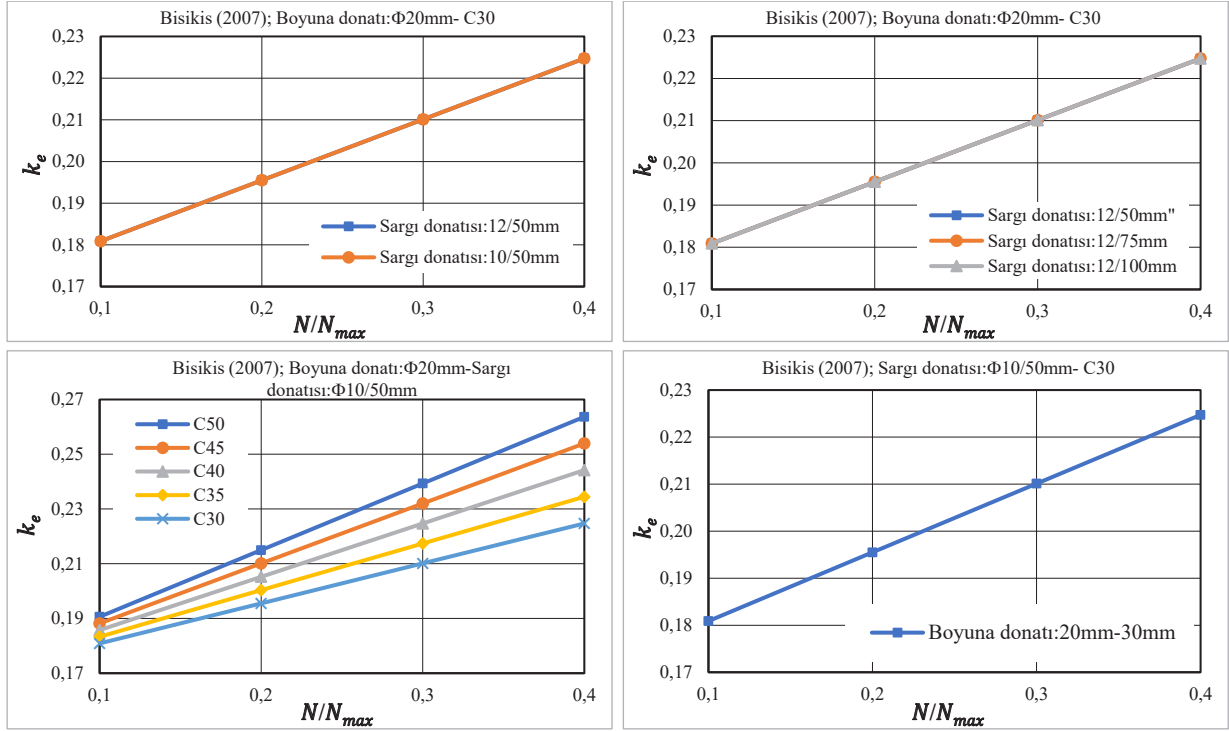
Araştırmacılara göre hesaplanan etkin kesit rijitlik değerleri:

Betonarme kolon elemanlarının etkin eğilme rijitliği katsayısının (k_e) belirlenmesinde, yönetmeliklerde tanımlanan bağıntı ve katsayıların yanı sıra literatürde araştırmacılar tarafından geliştirilen bağıntılar da yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu bölümde, farklı araştırmacılar tarafından betonarme kolonlar için önerilen bağıntılar esas alınarak kolon modellerine ait k_e değerleri hesaplanmıştır. Hesaplamalarda, Tablo 3.11’de betonarme kolonlar için sunulan bağıntılar temel alınmıştır.

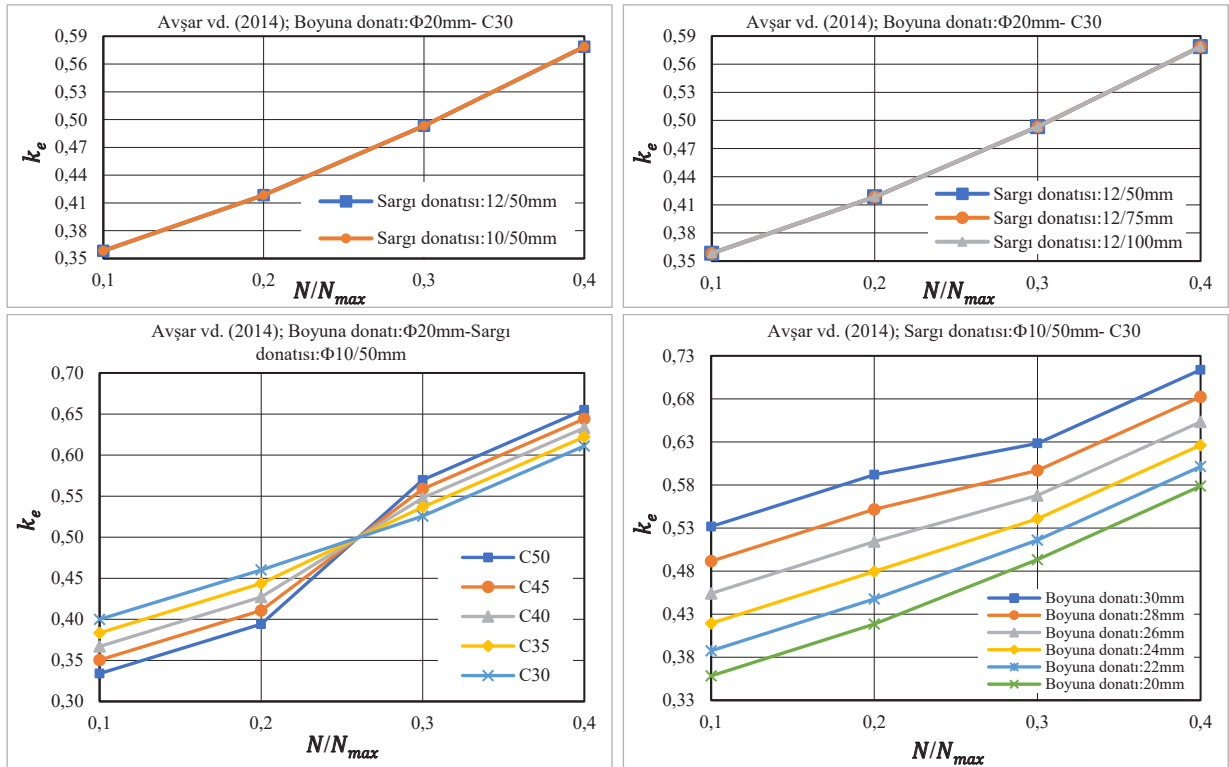
Betonarme kolonların etkin eğilme rijitliği katsayısı (k_e) farklı araştırmacılar tarafından geliştirilen bağıntılar kullanılarak hesaplanmıştır. Bu bölümde, 500 mm × 500 mm kare, 400 mm × 600 mm dikdörtgen ve 600 mm çapında dairesel enkesitli kolon modelleri için Bisikinis ve Fardis (2004), Bisikinis (2007) ve Avşar vd. (2014) yaklaşımları esas alınmıştır. Elde edilen k_e değerlerinin, farklı parametreler (eksenel yük düzeyi, kesit geometrisi, donatı oranı vb.) altındaki değişimi detaylı olarak analiz edilmiş ve sonuçlar Şekil 3.21-3.28 aralığında grafiksel olarak sunulmuştur. Bu analizler, farklı bağıntıların öngördüğü rijitlik değerleri arasındaki farklılıkların ortaya konulmasına ve söz konusu yaklaşımların karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır.



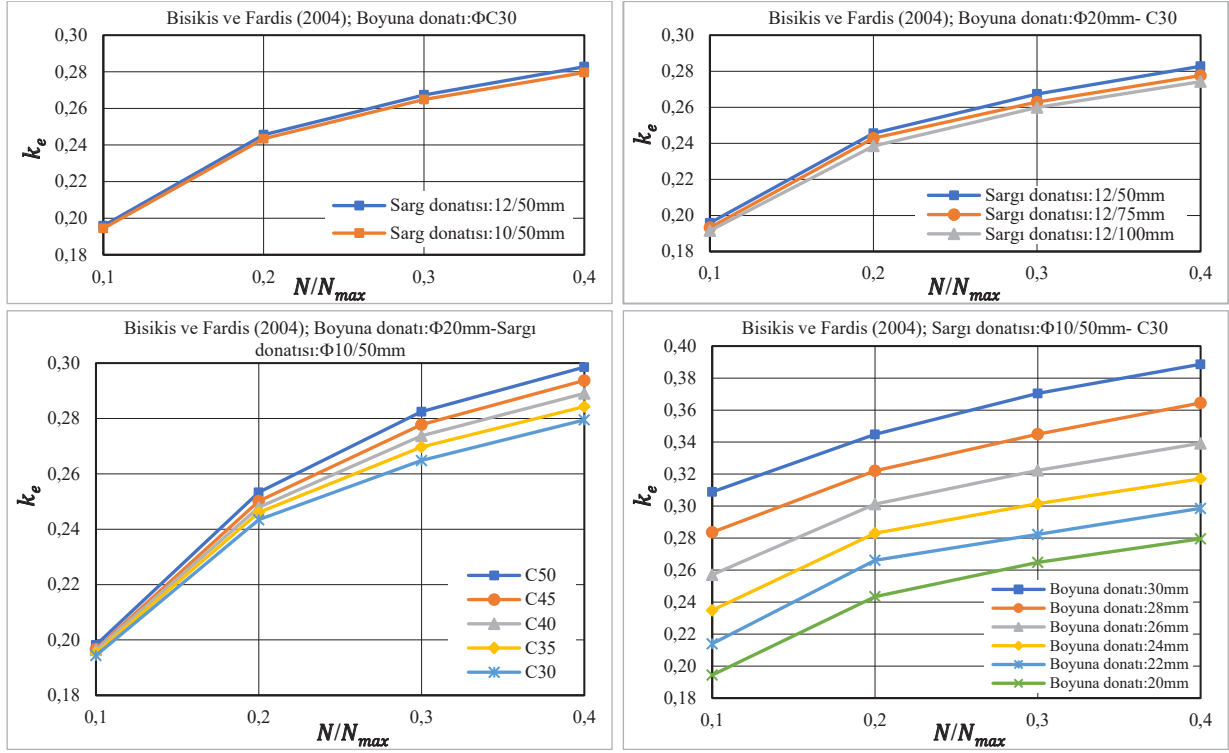
Şekil 3.21. 500 mm × 500 mm kare enkesitli kolonun Bisikinis ve Fardis (2004) yaklaşımından elde edilen etkin eğilme rijitliği katsayısının farklı parametrelere bağlı değişimi



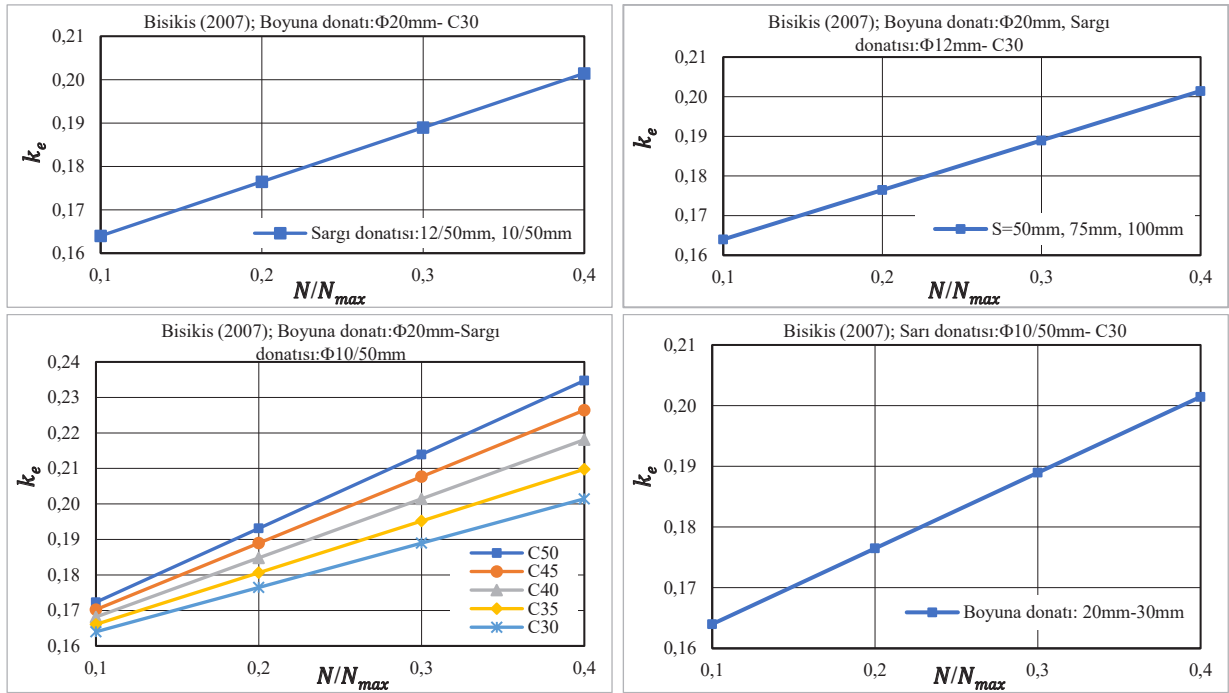
Şekil 3.22. 500 mm x 500 mm kare enkesitli kolonun Bisikis (2007) yaklaşımından elde edilen etkin eğilme rijitliği katsayısının farklı parametrelere bağlı değişimi



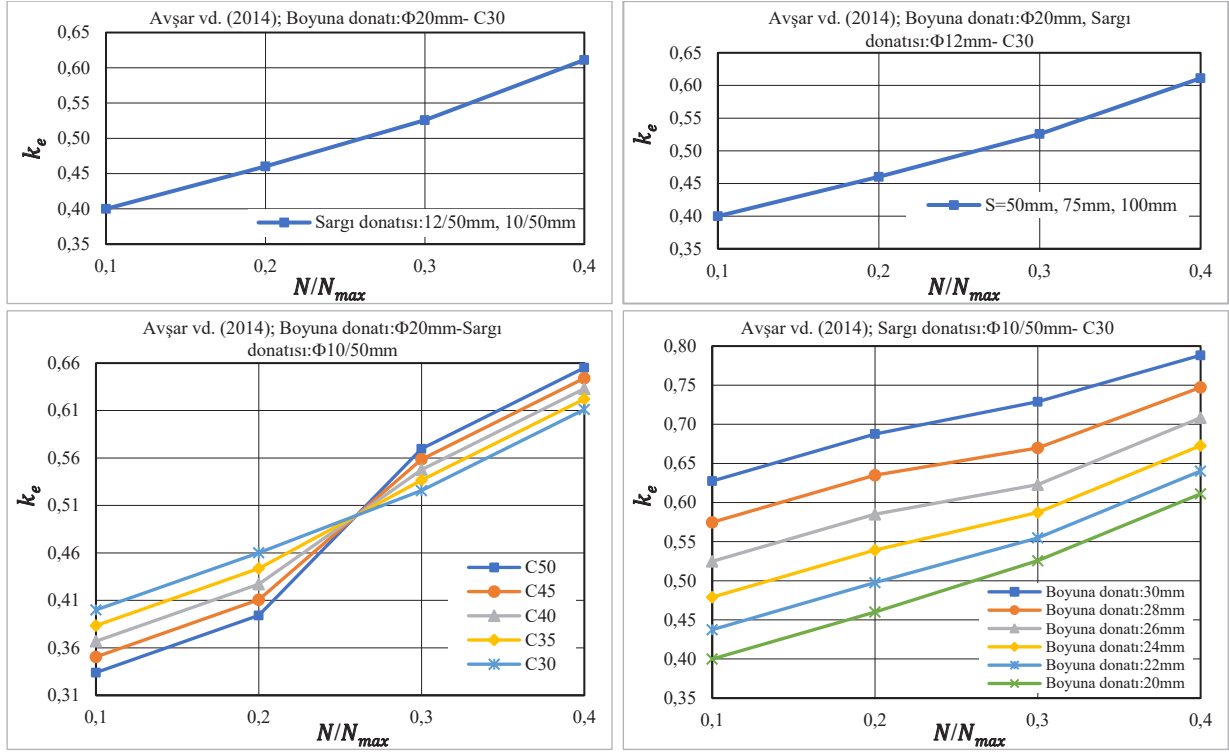
Şekil 3.23. 500 mm x 500 mm kare enkesitli kolonun Avşar vd. (2004) yaklaşımından elde edilen etkin eğilme rijitliği katsayısının farklı parametrelere bağlı değişimi



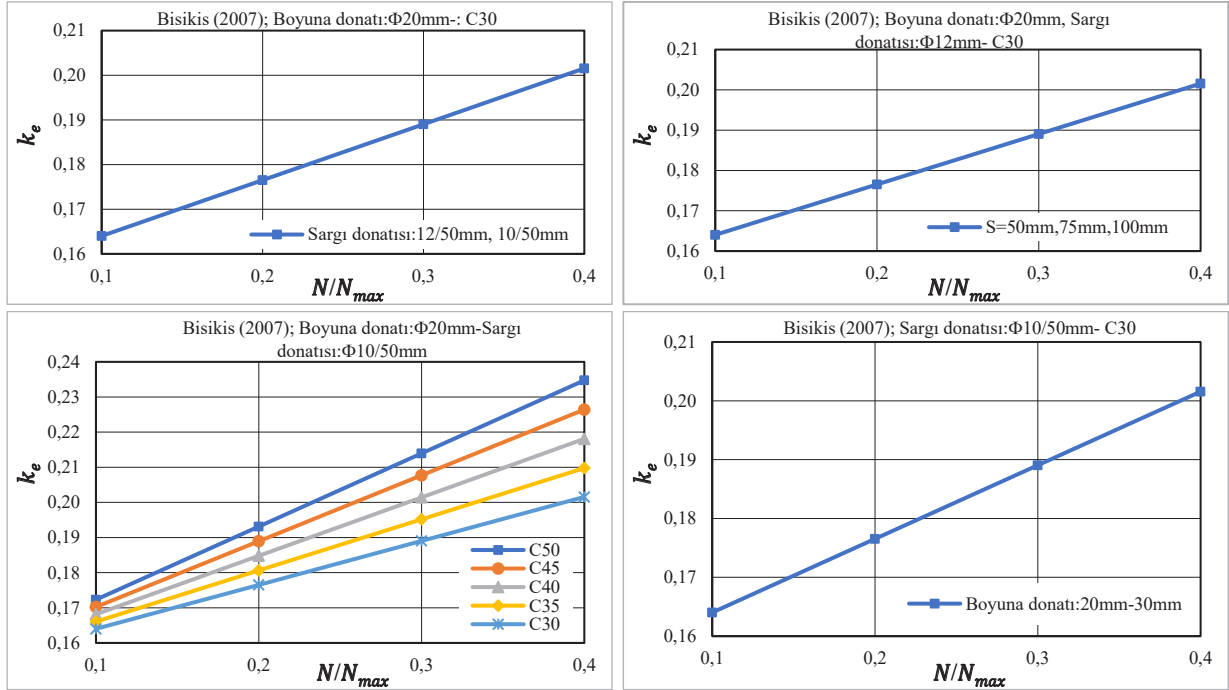
Şekil 3.24. 500 mm x 500 mm dikdörtgen enkesitli kolonun Bisikis ve Fardis (2004) yaklaşımından elde edilen etkin eğilme rijitliği katsayısının farklı parametrelere bağlı değişimi



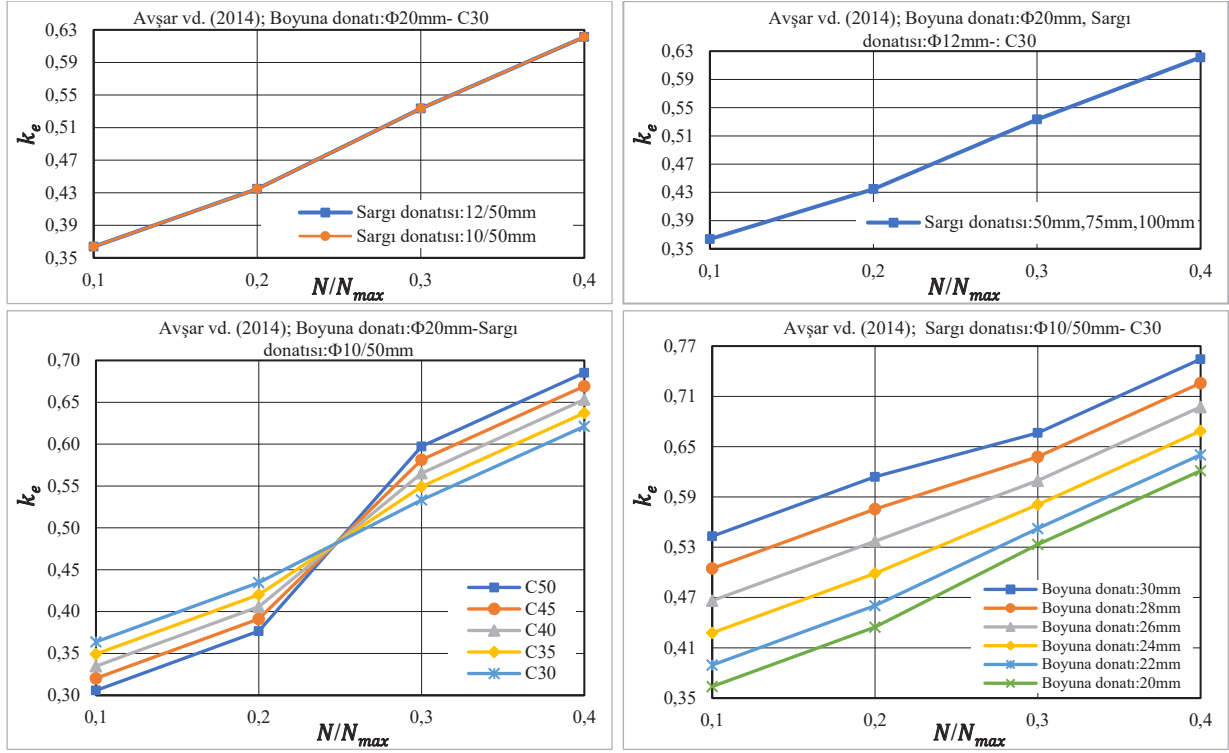
Şekil 3.25. 400 mm x 600 mm dikdörtgen enkesitli kolonun Bisikis (2007) yaklaşımından elde edilen etkin eğilme rijitliği katsayısının farklı parametrelere bağlı değişimi



Şekil 3.26. 400 mm × 600 mm dikdörtgen enkesitli kolonun Avşar vd. (2014) yaklaşımından elde edilen etkin eğilme rijitliği katsayısının farklı parametrelere bağlı değişimi



Şekil 3.27. 600 mm dairesel enkesitli kolonun Bisikis (2007) yaklaşımından elde edilen etkin eğilme rijitliği katsayısının farklı parametrelere bağlı değişimi



Şekil 3.28. 600 mm dairesel enkesitli kolonun Avşar vd. (2014) yaklaşımından elde edilen etkin eğilme rijitliği katsayısının farklı parametrelere bağlı değişimi

Araştırmacılar tarafından önerilen bağıntılara dayalı sonuçlar (Şekil 3.20-3.27), yönetmelik yaklaşımlarına kıyasla daha geniş bir değişim aralığı sunmaktadır. Biskinis ve Fardis (2004), Biskinis (2007) ve Avşar vd. (2014) tarafından önerilen modellerin, parametre değişimlerine daha duyarlı sonuçlar ürettiği ve özellikle eksenel yük ile boyuna donatı oranındaki değişimlerin rijitlik üzerindeki etkisini daha belirgin biçimde yansıttığı görülmektedir. Grafikler incelendiğinde, bu yaklaşımların bazı durumlarda yönetmeliklere kıyasla daha yüksek, bazı durumlarda ise daha düşük rijitlik değerleri öngördüğü; dolayısıyla daha esnek fakat aynı zamanda daha değişken bir tahmin çerçevesi sunduğu anlaşılmaktadır.

Genel olarak değerlendirildiğinde, tüm tablo ve şekiller birlikte ele alındığında, etkin kesit rijitliğinin tek bir sabit katsayı ile temsil edilmesinin mühendislik gerçekliğini yeterince yansıtmadığı açıkça ortaya çıkmaktadır. Yönetmelik yaklaşımları güvenli tarafta kalmayı hedefleyen sadeleştirilmiş kabuller sunarken, moment-eğrilik analizleri ve araştırmacılar tarafından önerilen bağıntıların kesit davranışının parametre duyarlılığını daha ayrıntılı biçimde yakalayabilmektedir. Bu durum, özellikle performansa dayalı tasarım ve doğrusal olmayan analizlerde, kesite özgü ve parametreye bağlı rijitlik tanımlarının kullanılmasının gerekliliğini güçlü biçimde ortaya koymaktadır.

3.3. Foroughi ve Yüksel (2026b) Tarafından Betonarme Kolonlar İçin Önerilen Alternatif Etkin Rijitlik Denklemi

Bu bölümde, Foroughi ve Yüksel (2026b) tarafından önerilen yaklaşım temel alınarak, kare, dikdörtgen ve dairesel kesitli betonarme kolonların çatlamış kesitlerine ait etkin eğilme rijitliğinin, ayrıntılı ve zaman alıcı doğrusal olmayan analizlere ihtiyaç duyulmaksızın güvenilir biçimde tahmin edilmesine imkan tanıyan alternatif bir bağıntı ele alınmaktadır. Söz konusu yaklaşım, geniş bir kesit geometrisi ve malzeme parametresi aralığını kapsayan kapsamlı parametrik moment-eğrilik analizlerine dayanmaktadır. Elde edilen sayısal sonuçlar doğrultusunda belirlenen etkin rijitlik katsayıları, çoklu doğrusal regresyon yöntemi kullanılarak değerlendirilmiştir; bu kapsamda rijitlik üzerinde belirleyici olan temel tasarım değişkenleri sistematik olarak ortaya konulmuştur. Betonarme kolon kesitlerinde etkin rijitliği belirleyen temel parametrelerin sargı etkisi, eksenel yük oranı (N/N_{max}), boyuna donatı oranı (ρ_s), enine donatı oranı (ρ_{st}) ve beton basınç dayanımı (f_{ck}) olduğunu göstermiştir. Gerçekleştirilen doğrusal olmayan analizler, söz konusu parametrelerin kolon kesit davranışını doğrudan etkilediğini ve bu etkileşimin etkin eğilme rijitliği katsayısı (k_e) üzerinde belirleyici ve artırıcı bir rol oynadığını ortaya koymuştur. Özellikle eksenel yük düzeyi ile donatı oranlarının birlikte değişimi, çatlamış kesitin rijitlik performansını önemli ölçüde yönlendirmektedir. Foroughi ve Yüksel (2026b) tarafından önerilen $k_{e,prop}$ bağıntısının kare, dikdörtgen ve dairesel kesitli betonarme kolonlar için ayrı ayrı tanımlanmasına yönelik ifadeler sırasıyla Denklem (3.21), Denklem (3.22) ve Denklem (3.23)'te sunulmuştur. Kolon kesitleri için önerilen $k_{e,prop}$ denkleminin genel formu ise Denklem (3.16) ile ifade edilmiştir.

$$k_{e,prop} = f \left\{ \left(\frac{N}{A_c f_{ck}} \right), (\rho_s), (\rho_{st}), f_{ck} \right\} \quad (3.16)$$

3.3.1. Kare enkesitli betonarme kolon için etkin rijitlik denklemi

Eksenel yük seviyesi (N/N_{max}), etkin rijitlik katsayısı (k_e) üzerinde belirgin bir etkiye sahiptir. Sayısal analiz sonuçlarına dayanarak, $k_{e,prop}$ ve N/N_{max} parametrelerinin ilişkileri regresyon analizi Denklem (3.17) ile elde edilmiştir.

$$k_{e,cal-1} = -1.31 \left(\frac{N}{A_c f_{ck}} \right)^2 + 0.942 \left(\frac{N}{A_c f_{ck}} \right) + 0.2014 \quad (3.17)$$

Sayısal analiz sonuçları, k_e değerinin boyuna donatı oranının (ρ_s) artmasıyla arttığını göstermektedir. Regresyon analizi ile k_e değerinin $k_{e,cal-1}$ 'e oranı ve ρ_s arasındaki ilişki Denklem (3.18) ile elde edilmiştir.

$$k_{e,cal-2} = 38.2(\rho_s) + 0.616 \quad (3.18)$$

Sayısal analiz sonuçları, k_e değerinin sargı donatısı oranının (ρ_{st}) artmasıyla arttığını göstermektedir. Regresyon analizi ile k_e değerinin [$k_{e,cal_1} \times k_{e,cal_2}$] ile ρ_{st} arasındaki ilişki Denklem (3.19) ile elde edilmiştir.

$$k_{e,cal-3} = 1.82(\rho_{st}) + 0.967 \quad (3.19)$$

Sayısal analiz sonuçları, f_{ck} değerinin artmasıyla k_e değerinin arttığını göstermektedir. Regresyon analizi ile k_e [$k_{e,cal_1} \times k_{e,cal_2} \times k_{e,cal_3}$] ile f_{ck} arasındaki ilişki Denklem (3.20) ile elde edilmiştir. f_{ck} tüm denklemler için MPa'dır.

$$k_{e,cal-4} = 0.0012(f_{ck}) + 0.951 \quad (3.20)$$

Kare enkesitli kolon kesitlerinde, N/N_{max} , ρ_s , ρ_{st} ve f_{ck} gibi parametrelerin etkisi dikkate alınarak, parametrik çalışmaya dayalı olarak $k_{e,prop}$ tahmin denklemi sunulabilir. Kare enkesitli kolon için önerilen $k_{e,prop}$ Denklem (3.21) olarak ifade edilmiştir.

$$k_{e,prop} = \left[-1.31 \left(\frac{N}{A_c f_{ck}} \right)^2 + 0.942 \left(\frac{N}{A_c f_{ck}} \right) + 0.2014 \right] \times [38.2(\rho_s) + 0.616] \times [1.82(\rho_{st}) + 0.967] \times [0.0012(f_{ck}) + 0.951] \quad (3.21)$$

3.3.2. Dikdörtgen enkesitli betonarme kolon için etkin rijitlik denklemi

Dikdörtgen kolon modelleri için sayısal analiz sonuçlarına dayanarak, regresyon analizi ile $k_{e,prop}$ ve N/N_{max} , ρ_s , ρ_{st} ve f_{ck} parametrelerinin ilişkileri Denklem (3.22)'den elde edilmiştir.

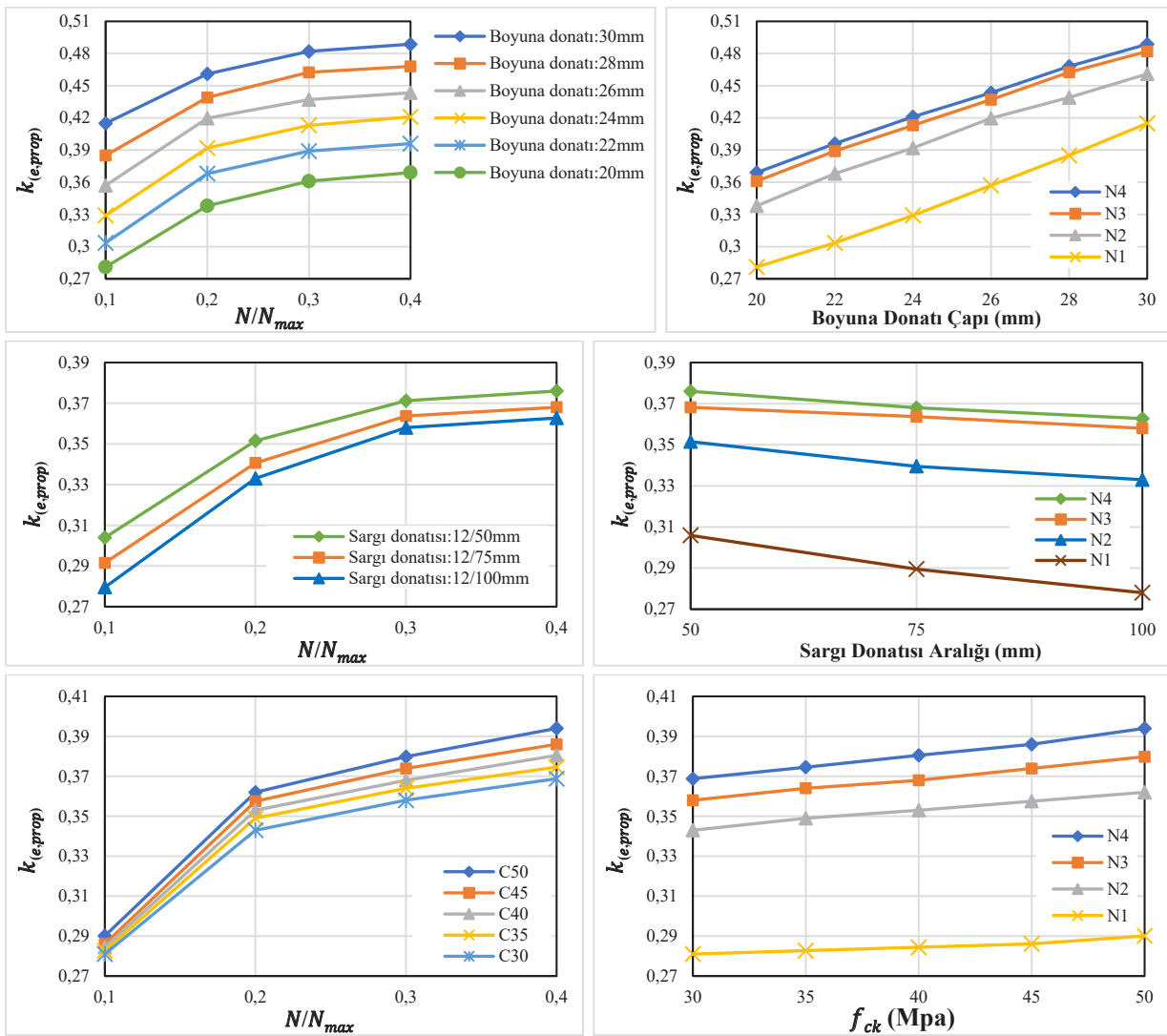
$$k_{e,prop} = \left[-1.34 \left(\frac{N}{A_c f_{ck}} \right)^2 + 0.928 \left(\frac{N}{A_c f_{ck}} \right) + 0.233 \right] \times [32.97(\rho_s) + 0.567] \times [0.987(\rho_{st}) + 0.964] \times [0.001(f_{ck}) + 0.978] \quad (3.22)$$

3.3.3. Dairesel enkesitli betonarme kolon için etkin rijitlik denklemi

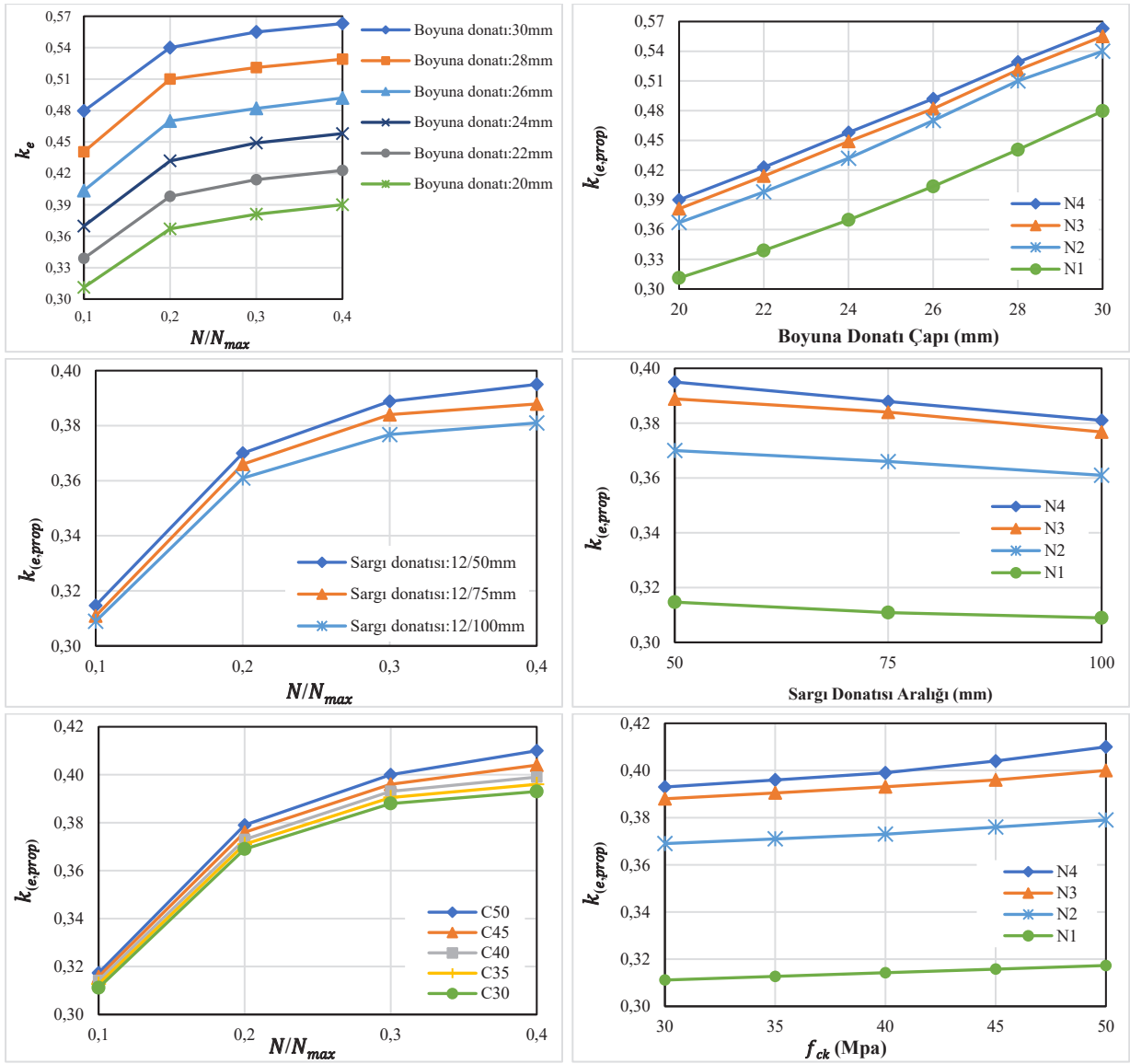
Dairesel kolonlar için sayısal analiz sonuçlarına göre $k_{e,prop}$ ve N/N_{max} , ρ_s , ρ_{st} ve f_{ck} parametrelerinin ilişkileri regresyon analizi ile elde edilmiştir (Denklem 3.23).

$$k_{e,prop} = \left[-1.14 \left(\frac{N}{A_c f_{ck}} \right)^2 + 0.796 \left(\frac{N}{A_c f_{ck}} \right) + 0.239 \right] \times [26(\rho_s) + 0.71] \times [6.45(\rho_{st}) + 0.92] \times [0.002(f_{ck}) + 0.95] \quad (3.23)$$

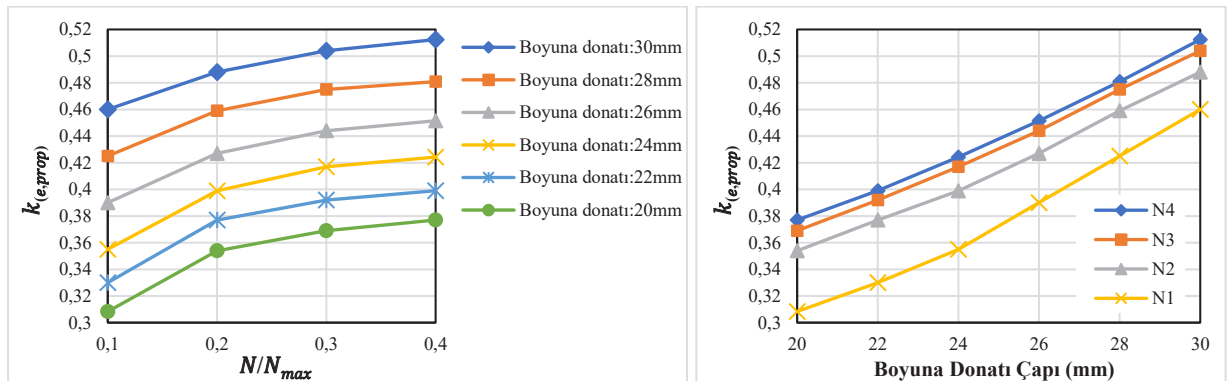
Foroughi ve Yüksel (2026b) tarafından önerilen etkin eğilme rijitliği katsayısı bağıntıları ($k_{e,prop}$), kare, dikdörtgen ve dairesel enkesitli betonarme kolonlar üzerinde gerçekleştirilen kapsamlı parametrik moment-eğrilik analizlerine dayalı olarak geliştirilmiştir (Denklem 3.21-3.23). Bu bağıntılar, kesit davranışını belirleyen eksenel yük düzeyi, donatı oranları ve beton dayanımı gibi temel tasarım değişkenlerini bütüncül bir yaklaşımla dikkate alacak şekilde formüle edilmiştir. Farklı en-kesit geometrilerine sahip betonarme kolonlar için etkin eğilme rijitliği katsayıları, değişen N/N_{max} , ρ_s , ρ_{st} ve f_{ck} parametreleri dikkate alınarak Foroughi ve Yüksel (2026b) tarafından önerilen $k_{e,prop}$ bağıntısı ile hesaplanmış ve elde edilen sonuçların söz konusu parametrelere bağlı karşılaştırmalı değişimleri grafiksel olarak ortaya konulmuştur. Tasarım parametre oranlarının $k_{e,prop}$ katsayısı üzerindeki etkisi, en-kesit geometrisi bazında sistematik olarak incelenmiş; kare, dikdörtgen ve dairesel kolon kesitlerine ait sonuçlar karşılaştırmalı biçimde sırasıyla Şekil 3.29, Şekil 3.30 ve Şekil 3.31’de sunulmuştur.

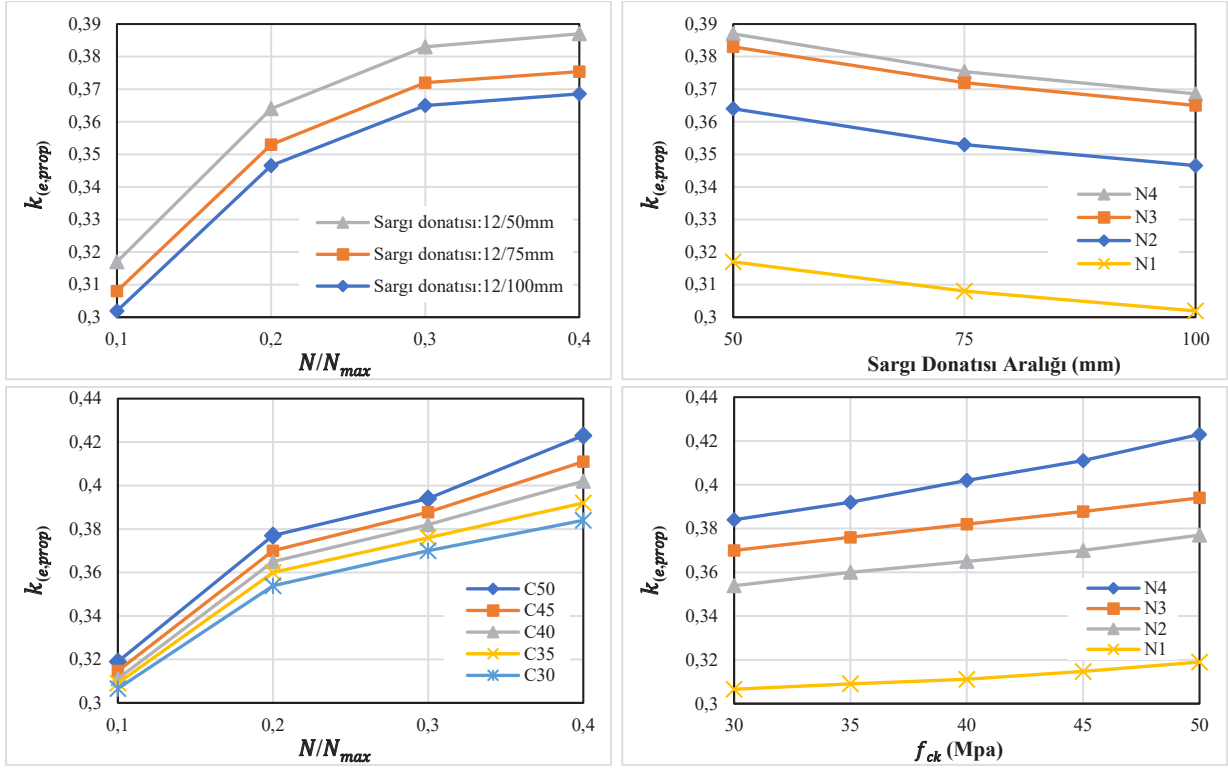


Şekil 3.29. Kare enkesitli kolonun Foroughi ve Yüksel (2026b) yaklaşımından elde edilen etkin eğilme rijitliği katsayısının farklı parametrelere bağlı değişimi



Şekil 3.30. Dikdörtgen enkesitli kolonun Foroughi ve Yüksel (2026b) yaklaşımından elde edilen etkin eğilme rijitliği katsayısının farklı parametrelere bağlı değişimi





Şekil 3.31. Dairesel enkesitli kolonun Foroughi ve Yüksel (2026b) yaklaşımından elde edilen etkin eğilme rijitliği katsayısının farklı parametrelere bağlı değişimi

Bu bölümde, betonarme kare, dikdörtgen ve dairesel enkesitli kolonlar için Foroughi ve Yüksel (2022) tarafından önerilen $k_{e,prop}$ denklemi ile hesaplanan etkin eğilme rijitliği katsayıları, moment-eğrilik ilişkilerine dayalı doğrusal olmayan kesit analizlerinden elde edilen sayısal rijitlik katsayıları ($k_{e,num}$) ile karşılaştırılmıştır. Bu kapsamda, önerilen modelin farklı kesit türleri ve tasarım parametreleri altındaki öngörü doğruluğu ile temsil yeteneği sistematik biçimde incelenmiştir. Değerlendirmelerde, kesit geometrisinin yanı sıra aksiyel yük oranı (N/N_{max}), boyuna donatı oranı (ρ_s), sargı donatısı oranı (ρ_{st}) ve beton basınç dayanımı (f_{ck}) gibi temel değişkenlerin etkin eğilme rijitliği üzerindeki etkileri çok değişkenli analiz yaklaşımı çerçevesinde ele alınmıştır.

Kare enkesitli betonarme kolonlar için gerçekleştirilen incelemelerde, farklı parametre kombinasyonları altında elde edilen $k_{e,num}$ değerleri ile önerilen bağıntıdan (Denklem 3.21) hesaplanan $k_{e,prop}$ değerleri karşılaştırılmış; parametrelerin rijitlik üzerindeki bireysel etkileri ayrıştırılarak Tablo 3.15'te sunulmuştur. Benzer şekilde, dikdörtgen enkesitli kolonlara yönelik analizlerde (Denklem 3.22), tasarım değişkenlerine bağlı olarak elde edilen sayısal ve analitik rijitlik katsayıları karşılaştırılmış ve sonuçlar Tablo 3.16'da özetlenmiştir. Dairesel enkesitli kolonlar için ise moment-eğrilik analizlerinden elde edilen sayısal veriler ile önerilen model (Denklem 3.23) aracılığıyla hesaplanan değerler karşılaştırılmış; ilgili parametrelerin etkileri ayrı ayrı değerlendirilerek bulgular Tablo 3.17'de verilmiştir. Elde edilen sonuçlar, önerilen bağıntıların geniş bir parametre aralığında tutarlı ve güvenilir tahminler sunduğunu ortaya koymakta; ayrıca modelin farklı kesit geometrileri altında etkin eğilme rijitliğinin pratik ve hesap açısından verimli biçimde belirlenmesine olanak sağladığını göstermektedir.

Tablo 3.15. 500 mm×500 mm kare enkesitli kolonlar için hesaplanan etkin rijitlik faktörlerinin karşılaştırılması
 (Farklı sargı donatısı oranı, ρ_{st})

f_{ck} (MPa)	Boyuna donatı (ρ_s)	Sargı donatısı (ρ_{st})	N/N_{max}	$k_{e,num}$ (M- ϕ)	$k_{e,prop}$ (Denklem 3.21)	$k_{e,prop} / k_{e,num}$
30 MPa	8 Φ 20 mm	Φ 10/50 mm	0.1	0.2853	0.2879	1.009
			0.2	0.3443	0.3352	0.974
			0.3	0.3600	0.3637	1.010
			0.4	0.3704	0.368	0.994
		Φ 12/50 mm	0.1	0.3013	0.3039	1.009
			0.2	0.3510	0.3515	1.001
			0.3	0.3673	0.3712	1.011
			0.4	0.3765	0.3760	0.999
		Φ 12/75 mm	0.1	0.2920	0.2915	0.998
			0.2	0.3410	0.3406	0.999
			0.3	0.3615	0.3637	1.006
			0.4	0.3688	0.3680	0.998
		Φ 12/100 mm	0.1	0.2820	0.2795	0.991
			0.2	0.3348	0.333	0.995
			0.3	0.3565	0.358	1.004
			0.4	0.3617	0.3627	1.003

 (Farklı boyuna donatı oranı, ρ_s)

f_{ck} (MPa)	Sargı donatısı (ρ_{st})	Boyuna donatı (ρ_s)	N/N_{max}	$k_{e,num}$ (M- ϕ)	$k_{e,prop}$ (Denklem 3.21)	$k_{e,prop} / k_{e,num}$
30 MPa	Φ 10/50 mm	8 Φ 22 mm	0.1	0.3055	0.3035	0.993
			0.2	0.3714	0.3680	0.991
			0.3	0.3902	0.3890	0.997
			0.4	0.3962	0.3960	0.999
		8 Φ 24 mm	0.1	0.3313	0.3290	0.993
			0.2	0.3937	0.3919	0.995
			0.3	0.4115	0.4130	1.004
			0.4	0.4170	0.4210	1.010
		8 Φ 26 mm	0.1	0.3586	0.3570	0.996
			0.2	0.4171	0.4196	1.006
			0.3	0.4350	0.4370	1.005
			0.4	0.4393	0.4434	1.009
		8 Φ 28 mm	0.1	0.3874	0.3850	0.994
			0.2	0.4369	0.4390	1.005
			0.3	0.4597	0.4625	1.006
			0.4	0.4653	0.4680	1.006
		8 Φ 30 mm	0.1	0.4157	0.4149	0.998
			0.2	0.4606	0.4610	1.001
			0.3	0.4789	0.4820	1.006
			0.4	0.4832	0.4887	1.011

(Farklı beton basınç dayanımı, f_{ck})

Boyuna donatı (ρ_s)	Sargı donatısı (ρ_{st})	f_{ck} (MPa)	N/N_{max}	$k_{e,num}$ (M- ϕ)	$k_{e,prop}$ (Denklem 3.21)	$k_{e,prop} / k_{e,num}$
8 Φ 20 mm	Φ 10/50 mm	35	0.1	0.2824	0.2827	1.001
			0.2	0.3507	0.3490	0.995
			0.3	0.3647	0.3640	0.998
			0.4	0.3765	0.3746	0.995
		40	0.1	0.2839	0.2844	1.002
			0.2	0.3552	0.3530	0.994
			0.3	0.3689	0.3680	0.998
			0.4	0.3817	0.3805	0.997
		45	0.1	0.2860	0.2861	1.000
			0.2	0.3593	0.3575	0.995
			0.3	0.3751	0.3739	0.997
			0.4	0.3872	0.3860	0.997
		50	0.1	0.2881	0.2901	1.007
			0.2	0.3633	0.3620	0.996
			0.3	0.3812	0.3798	0.996
			0.4	0.3957	0.3940	0.996

Tablo 3.16. 400 mm \times 600 mm dikdörtgen enkesitli kolonlar için hesaplanan etkin rijitlik katsayılarının karşılaştırılması(Farklı sargı donatısı oranı, ρ_{st})

f_{ck} (MPa)	Boyuna donatı (ρ_s)	Sargı donatısı (ρ_{st})	N/N_{max}	$k_{e,num}$ (M- ϕ)	$k_{e,prop}$ (Denklem 3.22)	$k_{e,prop} / k_{e,num}$
30 MPa	10 Φ 20 mm	Φ 10/50 mm	0.1	0.3110	0.3111	1.000
			0.2	0.3698	0.3690	0.998
			0.3	0.3857	0.3880	1.006
			0.4	0.3906	0.3930	1.006
		Φ 12/50 mm	0.1	0.3161	0.3147	0.996
			0.2	0.3752	0.3700	0.986
			0.3	0.3888	0.3888	1.000
			0.4	0.3957	0.3950	0.998
		Φ 12/75 mm	0.1	0.3109	0.3109	1.000
			0.2	0.3679	0.3660	0.995
			0.3	0.3818	0.3840	1.006
			0.4	0.3866	0.3879	1.003
		Φ 12/100 mm	0.1	0.3063	0.3089	1.008
			0.2	0.3622	0.3610	0.997
			0.3	0.3768	0.3768	1.000
			0.4	0.3803	0.3810	1.002

(Farklı boyuna donatı oranı, ρ_s)

f_{ck} (MPa)	Sargı donatısı (ρ_{st})	Boyuna donatı (ρ_s)	N/N_{max}	$k_{e,num}$ (M- ϕ)	$k_{e,prop}$ (Denklem 3.22)	$k_{e,prop} / k_{e,num}$
30 MPa	$\Phi 10/50$ mm	10 $\Phi 22$ mm	0.1	0.3405	0.3389	0.995
			0.2	0.4024	0.3980	0.989
			0.3	0.4106	0.4140	1.008
			0.4	0.4172	0.4228	1.013
		10 $\Phi 24$ mm	0.1	0.3718	0.3697	0.994
			0.2	0.4272	0.4319	1.011
			0.3	0.4380	0.4490	1.025
			0.4	0.4431	0.4580	1.034
		10 $\Phi 26$ mm	0.1	0.4047	0.4036	0.997
			0.2	0.4540	0.4700	1.035
			0.3	0.4675	0.4820	1.031
			0.4	0.4739	0.4920	1.038
		10 $\Phi 28$ mm	0.1	0.4438	0.4405	0.993
			0.2	0.4841	0.5100	1.054
			0.3	0.4995	0.5210	1.043
			0.4	0.5091	0.5290	1.039
		10 $\Phi 30$ mm	0.1	0.4797	0.4796	1.000
			0.2	0.5170	0.5400	1.044
			0.3	0.5357	0.5550	1.036
			0.4	0.5431	0.5630	1.037

 (Farklı beton basınç dayanımı, f_{ck})

Boyuna donatı (ρ_s)	Sargı donatısı (ρ_{st})	f_{ck} (MPa)	N/N_{max}	$k_{e,num}$ (M- ϕ)	$k_{e,prop}$ (Denklem 3.22)	$k_{e,prop} / k_{e,num}$
10 $\Phi 20$ mm	$\Phi 10/50$ mm	35	0.1	0.3127	0.3127	1.000
			0.2	0.3726	0.3710	0.996
			0.3	0.3905	0.3905	1.000
			0.4	0.3968	0.3960	0.998
		40	0.1	0.3146	0.3142	0.999
			0.2	0.3754	0.3730	0.994
			0.3	0.3950	0.3931	0.995
			0.4	0.4031	0.3990	0.990
		45	0.1	0.3172	0.3158	0.996
			0.2	0.3783	0.3760	0.994
			0.3	0.3995	0.3960	0.991
			0.4	0.4086	0.4040	0.989
		50	0.1	0.3194	0.3173	0.993
			0.2	0.3822	0.3790	0.992
			0.3	0.4046	0.4000	0.989
			0.4	0.4149	0.4100	0.988

Tablo 3.17. 600 mm dairesel enkesitli kolonlar için hesaplanan etkin rijitlik katsayılarının karşılaştırılması
(Farklı sargı donatısı oranı, ρ_{st})

f_{ck} (MPa)	Boyuna donatı (ρ_s)	Sargı donatısı (ρ_{st})	N/N_{max}	$k_{e,num}$ (M- ϕ)	$k_{e,prop}$ (Denklemler 3.23)	$k_{e,prop} / k_{e,num}$
30	10 Φ 20 mm	Φ 10/50 mm	0.1	0.3076	0.3083	1.002
			0.2	0.3534	0.3539	1.001
			0.3	0.3710	0.3690	0.995
			0.4	0.3748	0.3770	1.006
		Φ 12/50 mm	0.1	0.3131	0.3170	1.012
			0.2	0.3568	0.3640	1.020
			0.3	0.3738	0.3830	1.025
			0.4	0.3768	0.3870	1.027
		Φ 12/75 mm	0.1	0.3038	0.3080	1.014
			0.2	0.3518	0.3530	1.003
			0.3	0.3698	0.3720	1.006
			0.4	0.3730	0.3754	1.006
		Φ 12/100 mm	0.1	0.2963	0.3019	1.019
			0.2	0.3479	0.3465	0.996
			0.3	0.3646	0.3650	1.001
			0.4	0.3695	0.3686	0.998

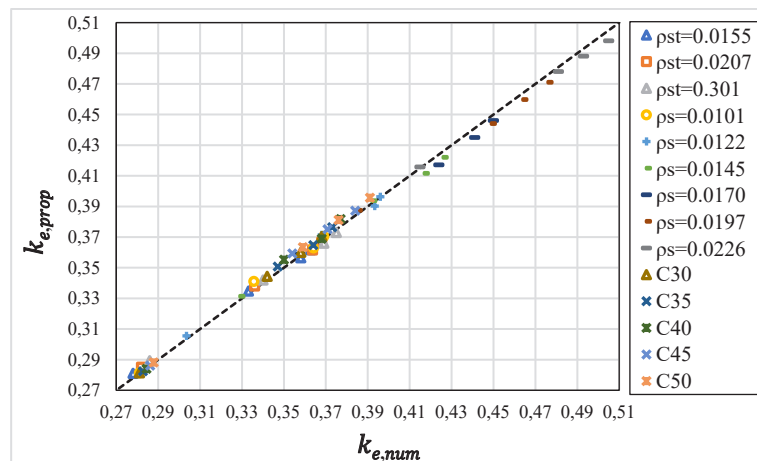
(Farklı boyuna donatı oranı, ρ_s)

f_{ck} (MPa)	Sargı donatısı (ρ_{st})	Boyuna donatı (ρ_s)	N/N_{max}	$k_{e,num}$ (M- ϕ)	$k_{e,prop}$ (Denklemler 3.23)	$k_{e,prop} / k_{e,num}$
30	Φ 10/50 mm	Φ 22 mm	0.1	0.3325	0.3300	0.992
			0.2	0.3781	0.3770	0.997
			0.3	0.3886	0.3920	1.009
			0.4	0.3949	0.3990	1.010
		Φ 24 mm	0.1	0.3613	0.3550	0.983
			0.2	0.4034	0.3989	0.989
			0.3	0.4195	0.4170	0.994
			0.4	0.4229	0.4243	1.003
		Φ 26 mm	0.1	0.3931	0.3900	0.992
			0.2	0.4324	0.4270	0.988
			0.3	0.4462	0.4440	0.995
			0.4	0.4501	0.4515	1.003
		Φ 28 mm	0.1	0.4303	0.4250	0.988
			0.2	0.4643	0.4590	0.989
			0.3	0.4762	0.4750	0.997
			0.4	0.4806	0.4809	1.001
		Φ 30 mm	0.1	0.4669	0.4600	0.985
			0.2	0.4945	0.4880	0.987
			0.3	0.5030	0.5040	1.002
			0.4	0.5088	0.5124	1.007

(Farklı beton basınç dayanımı, f_{ck})

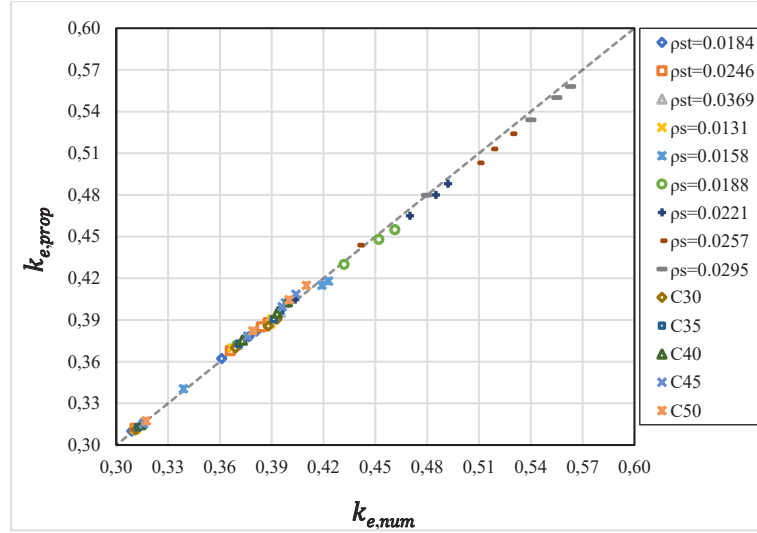
Sargı donatısı (ρ_{st})	Boyuna donatı (ρ_s)	f_{ck} (MPa)	N/N_{max}	$k_{e,num}$ (M- φ)	$k_{e,prop}$ (Denklemler 3.23)	$k_{e,prop} / k_{e,num}$
$\Phi 10/50\text{mm}$	$\Phi 20\text{mm}$	35	0.1	0.3090	0.3090	1.000
			0.2	0.3626	0.3600	0.993
			0.3	0.3777	0.3760	0.995
			0.4	0.3918	0.3920	1.001
		40	0.1	0.3111	0.3111	1.000
			0.2	0.3678	0.3650	0.992
			0.3	0.3832	0.3820	0.997
			0.4	0.4055	0.4020	0.991
		45	0.1	0.3147	0.3147	1.000
			0.2	0.3727	0.3700	0.993
			0.3	0.3898	0.3878	0.995
			0.4	0.4201	0.4110	0.978
		50	0.1	0.3178	0.3190	1.004
			0.2	0.3785	0.3770	0.996
			0.3	0.3965	0.3940	0.994
			0.4	0.4344	0.4298	0.989

Foroughi ve Yüksel (2026b) tarafından önerilen $k_{e,prop}$ denklemlerinin yeterliliği, moment-eğrilik ilişkilerinden elde edilen $k_{e,num}$ sonuçları ve elemanların parametrik analizlerinden değerlendirilmiştir. Kolonlar için önerilen denklem ile sayısal olarak elde edilen etkin rijitlik katsayılarının karşılaştırması Şekil 3.32, Şekil 3.33 ve Şekil 3.34'te verilmiştir. Önerilen denklemlerin, tüm parametre aralıklarında sayısal sonuçlarla oldukça uyumlu olduğu analiz sonuçlarından görülmektedir. N/N_{max} , ρ_s , ρ_{st} oranları ve f_{ck} değerinin artması ile hesaplanan $k_{e,prop}$ değeri artmaktadır. Kare enkesitli kolonlar için önerilen denklemler, 0.99'un oldukça üzerindeki R^2 katsayı korelasyonundan açıkça görüldüğü gibi mükemmel bir uyum göstermektedir. Ayrıca, Denklem (3.21) ile hesaplanan rijitlik katsayısının sayısal sonuca oranı için maksimum ortalama değer ve standart sapma sırasıyla 1.045 ve %5.69 olarak elde edilmiştir.



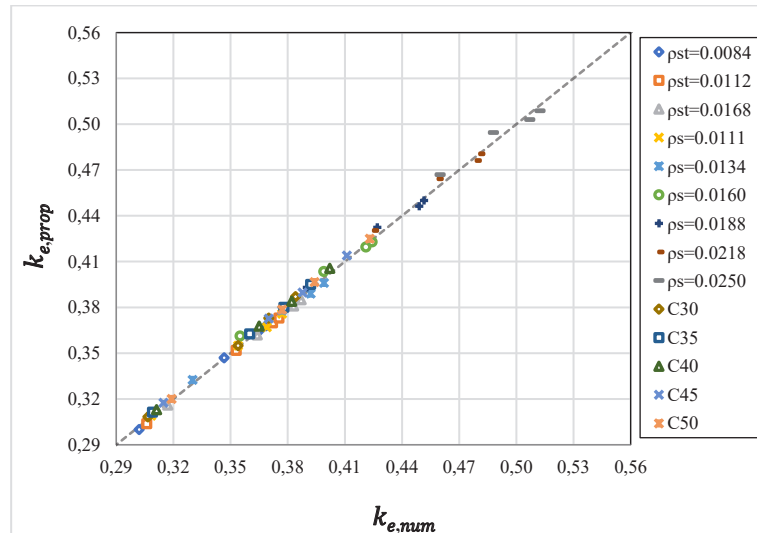
Şekil 3.32. 500 mm x 500 mm kare enkesitli betonarme kolonların $k_{e,prop} - k_{e,num}$ ilişkilerinin karşılaştırılması

Dikdörtgen enkesitli kolonlar için önerilen denklemler, 0.99'un oldukça üzerindeki R^2 katsayı korelasyonundan açıkça görüldüğü gibi mükemmel bir uyum göstermektedir. Ayrıca Denklem (3.22) ile hesaplanan etkin rijitlik katsayısının sayısal sonuca oranı için maksimum ortalama değer ve standart sapma sırasıyla 1.063 ve %5.96 olarak elde edilmiştir.



Şekil 3.33. 400m×600mm dikdörtgen enkesitli betonarme kolonların $k_{e,prop} - k_{e,num}$ ilişkilerinin karşılaştırılması

Dairesel enkesitli betonarme kolonlar için önerilen denklemler, 0.99'un oldukça üzerindeki R^2 katsayı korelasyonundan açıkça görüldüğü gibi mükemmel bir uyum göstermektedir. Ayrıca Denklem (3.23) ile hesaplanan etkin rijitlik katsayısının sayısal sonuca oranı için maksimum ortalama değer ve standart sapma sırasıyla %1.012 ve %2.282 olarak elde edilmiştir.



Şekil 3.34. 600mm dairesel enkesitli betonarme kolonların $k_{e,prop} - k_{e,num}$ ilişkilerinin karşılaştırılması

Şekil 3.32-3.34'te sunulan grafikler farklı en-kesit geometrilerine sahip betonarme kolonlarda tasarım parametre oranlarının etkin rijitlik katsayısı k_e üzerindeki etkisini kesit bazında karşılaştırmalı olarak ortaya koymaktadır.

Grafiksel bulgular, eksenel yük düzeyinin (N/N_{max}) etkin rijitlik üzerinde belirleyici bir parametre olduğunu; yük oranındaki artışa bağlı olarak k_e değerlerinde anlamlı değişimlerin meydana geldiğini göstermektedir.

Boyuna donatı oranındaki (ρ_s) artışın rijitlik katsayısını artırıcı yönde sistematik bir eğilim oluşturduğu, sargı donatısı oranının (ρ_{st}) ise özellikle sargı etkisi aracılığıyla kesit davranışını iyileştirdiği görülmektedir.

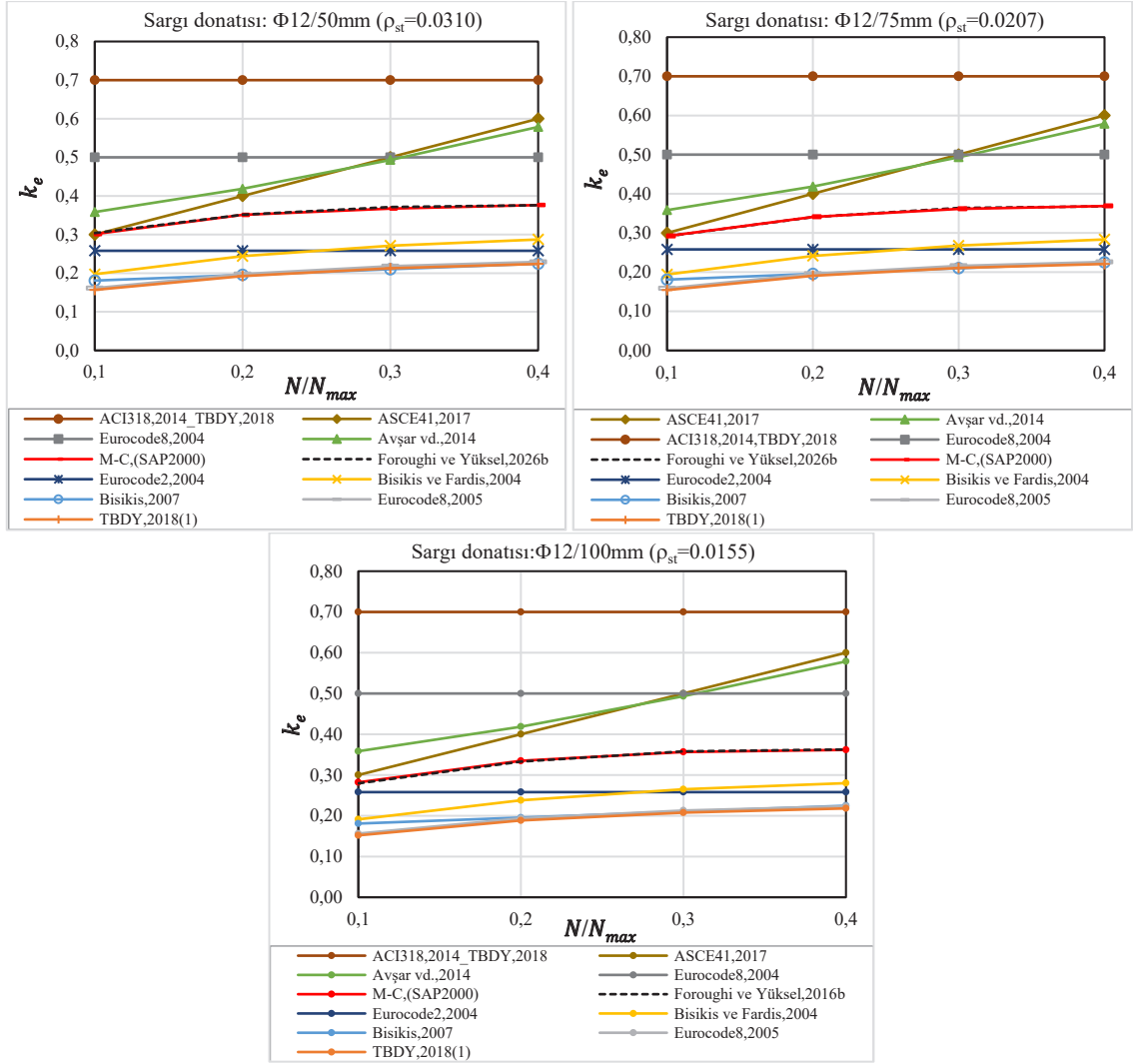
Beton basınç dayanımındaki (f_{ck}) artışın tüm kesit tiplerinde rijitlik katsayısını yükselttiği, ancak bu artışın büyüklüğünün kesit geometrisine bağlı olarak farklılaştığı anlaşılmaktadır.

Genel olarak değerlendirildiğinde, kesit geometrisinin tasarım parametrelerine verilen yapısal tepkiyi etkilediği ve bu durumun $k_{e,prop}$ bağıntısının duyarlılık düzeyine doğrudan yansıdığı görülmektedir.

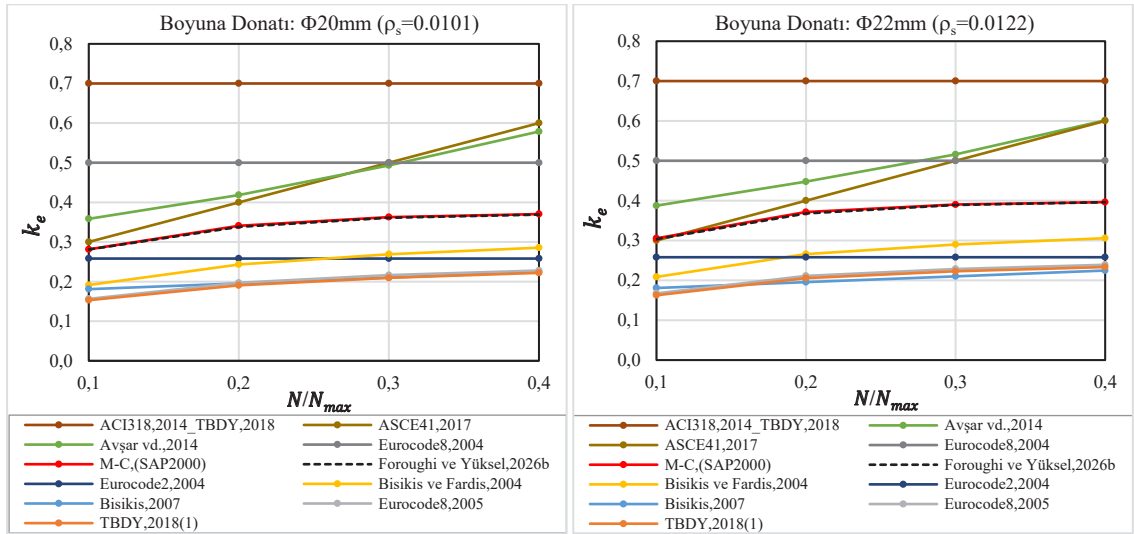
3.4. Betonarme Kolonlar İçin Önerilen Etkin Rijitlik Bağıntılarının Karşılaştırılması

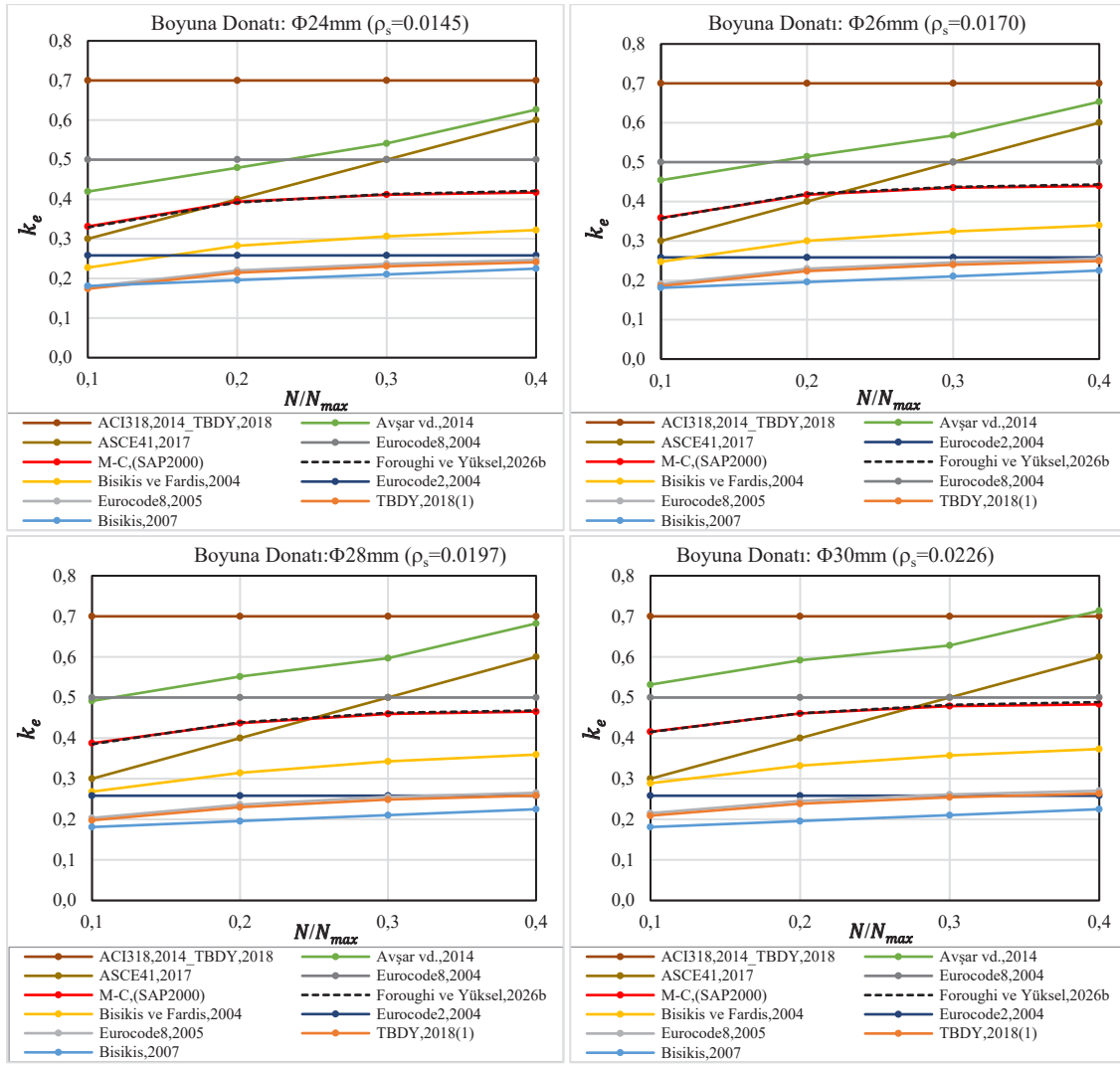
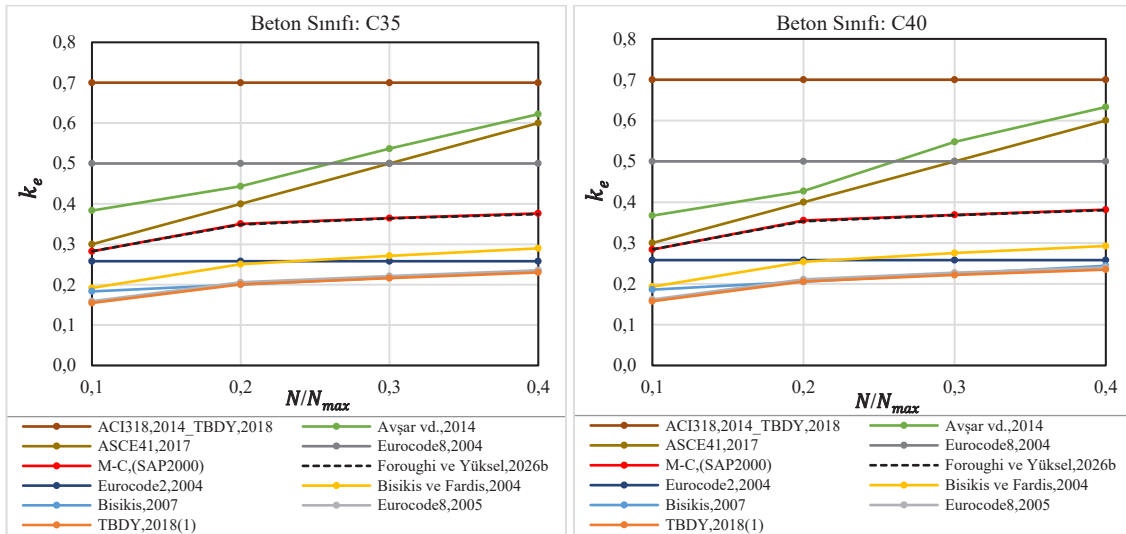
Betonarme kolon elemanlarının etkin eğilme rijitliği katsayıları, farklı tasarım değişkenleri altında bütüncül bir karşılaştırma yaklaşımıyla ele alınmıştır. Bu kapsamda, kolon modelleri için analitik olarak belirlenen rijitlik katsayıları; moment-eğrilik ilişkilerine dayalı doğrusal olmayan kesit analizlerinden elde edilen sayısal sonuçlar, yürürlükteki yönetmeliklerde yer alan yaklaşımlar ve literatürde önerilmiş ampirik bağıntılar ile birlikte değerlendirilmiştir. Karşılaştırmalar, eksenel yük oranı (N/N_{max}), boyuna donatı oranı (ρ_s), sargı donatısı oranı (ρ_{st}) ve beton basınç dayanımı (f_{ck}) gibi temel tasarım parametreleri dikkate alınarak; kare, dikdörtgen ve dairesel enkesitli kolon modelleri üzerinden gerçekleştirilmiştir.

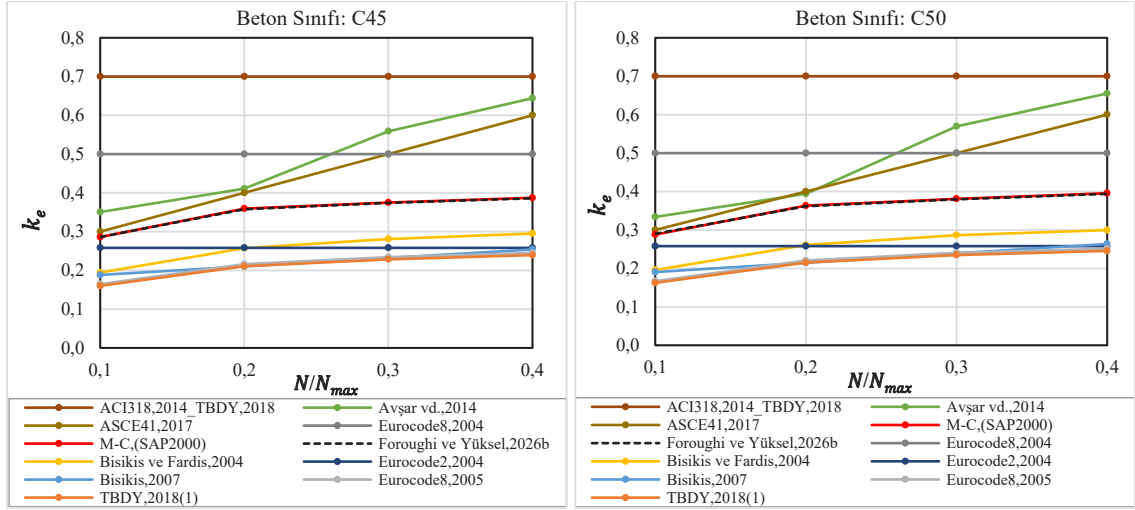
Analiz sürecinde, söz konusu parametrelerin etkin eğilme rijitliği üzerindeki etkileri ayrıştırılarak incelenmiş ve her bir değişkenin rijitlik davranışına katkısı sistematik bir çerçevede ortaya konulmuştur. Bu doğrultuda, etkin eğilme rijitliği katsayısı; önerilen tahmin bağıntıları, moment-eğrilik temelli sayısal çözümler, yönetmelik esaslı yaklaşımlar ve literatürde yer alan modeller aracılığıyla hesaplanmış; elde edilen sonuçlar tutarlılık, sapma ve eğilim açısından karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Farklı kesit geometrileri ve parametre kombinasyonları altında gözlenen davranış farklılıkları, grafiksel gösterimler aracılığıyla değerlendirilmiş olup, analiz bulguları Şekil 3.35, Şekil 3.36 ve Şekil 3.37'de sunulmaktadır. Bu sayede, önerilen bağıntıların geniş bir parametre aralığındaki performansı ve mevcut yaklaşımlar karşısındaki konumu açık biçimde ortaya konulmuştur.



a) Farklı sargı donatısı oranına göre $k_e - N/N_{max}$ grafikleri (boyuna donatı: $\Phi 20$ mm, beton sınıfı: C30)

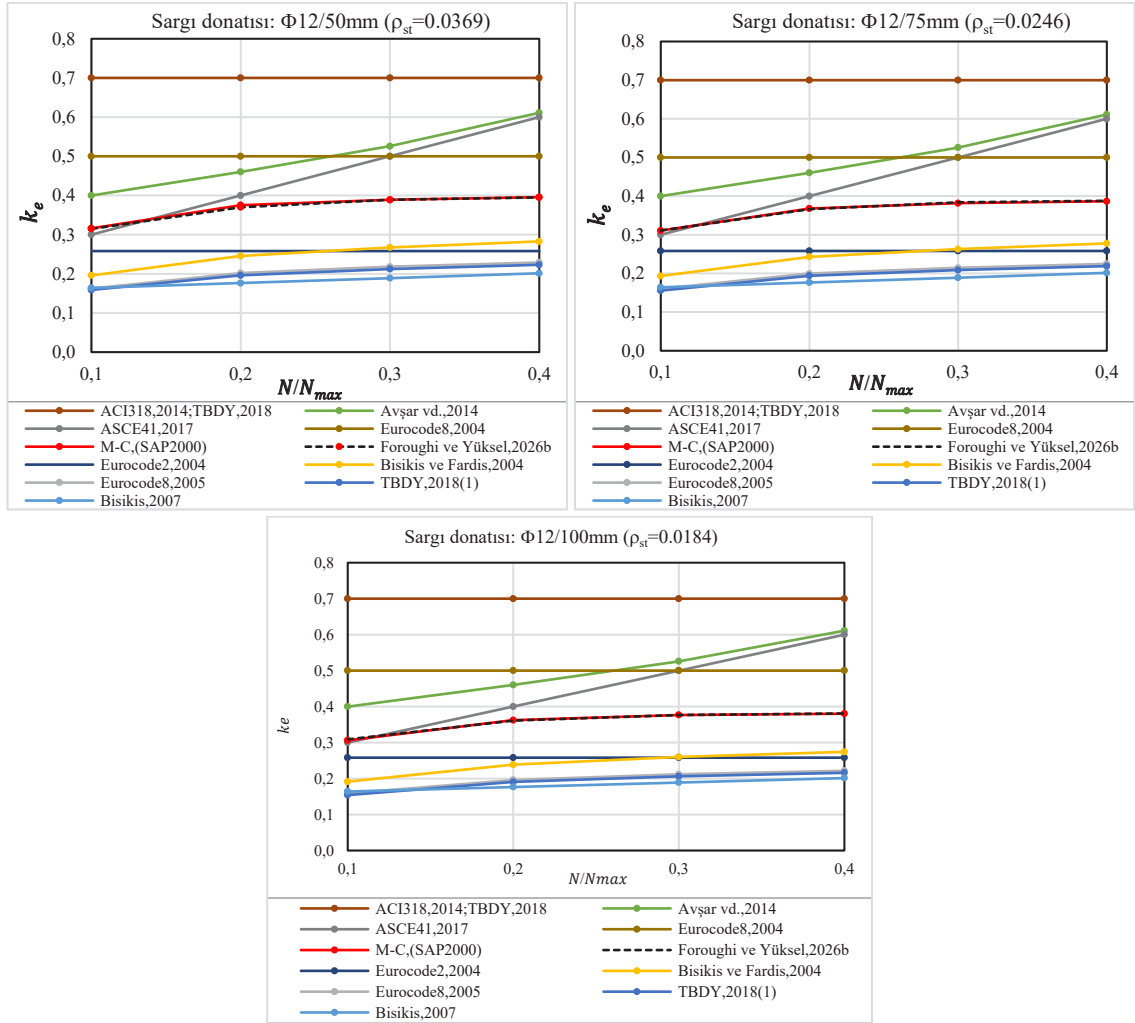



 b) Farklı boyuna donatı oranına göre $k_e - N/N_{max}$ grafikleri (sargı donatısı: $\Phi 10/50$ mm- beton sınıfı: C30)


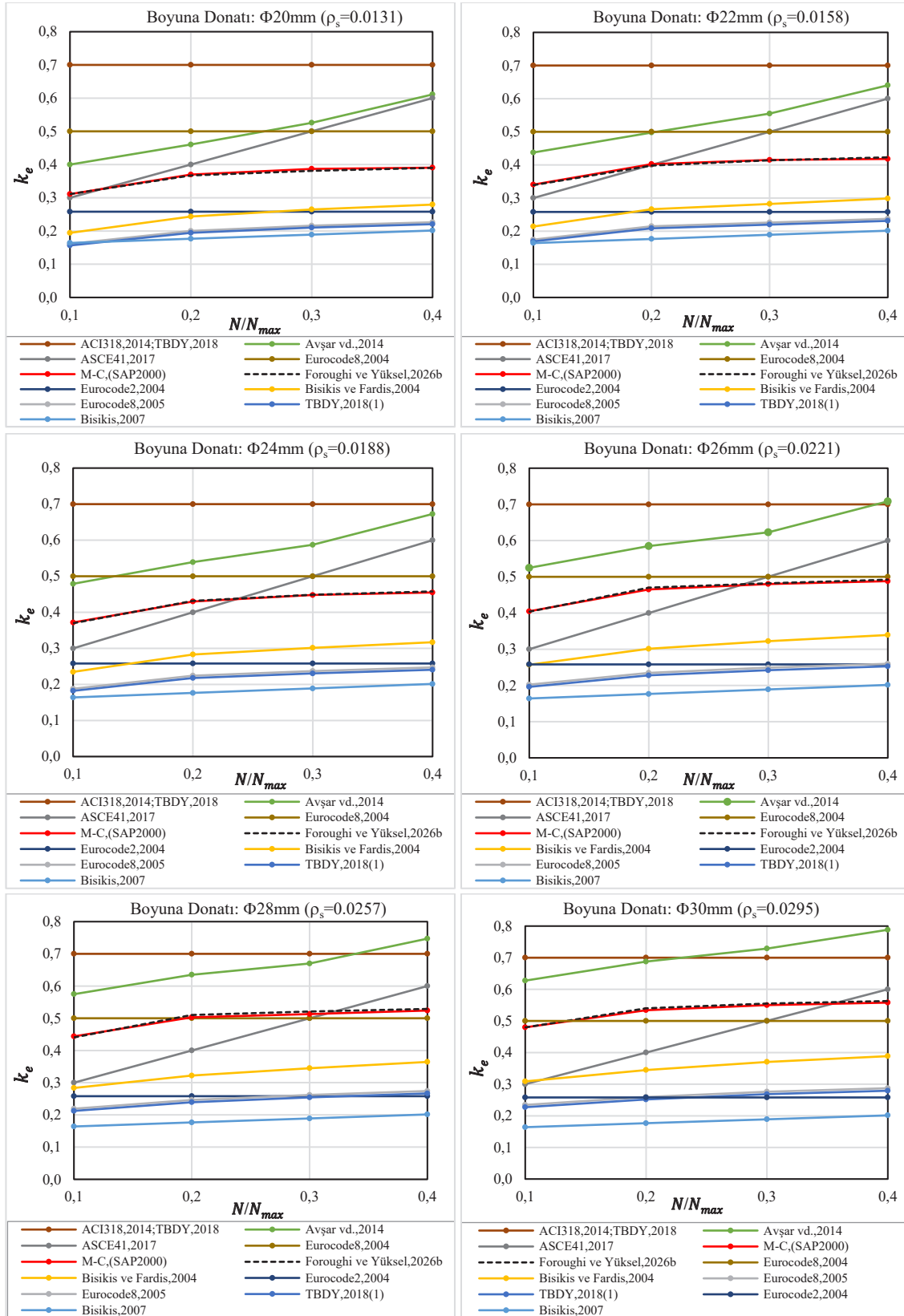


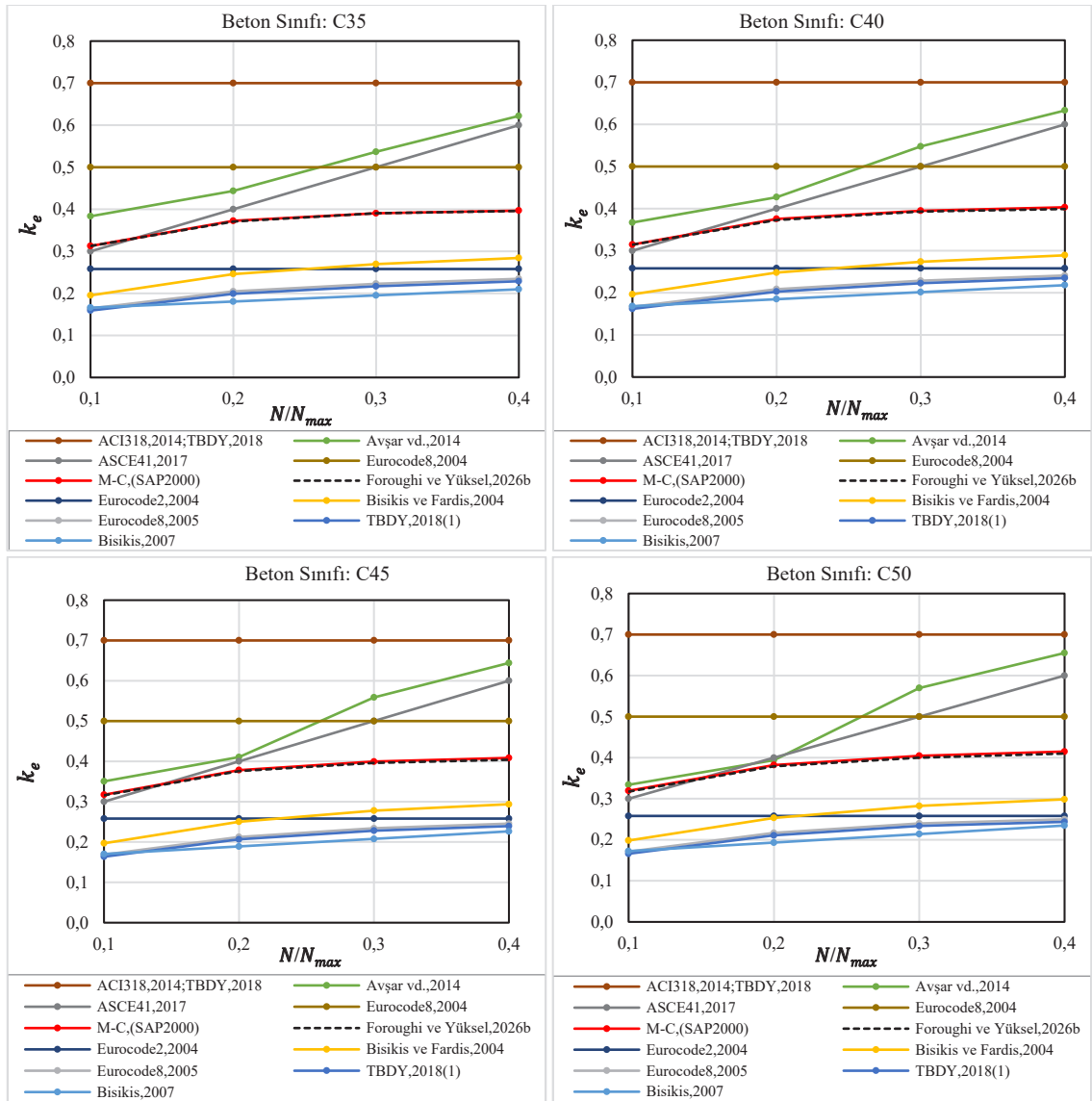
c) Farklı beton basınç dayanımına göre $k_e - N/N_{max}$ grafikleri (boyuna donatı: $\Phi 20$ mm, sargı donatısı: $\Phi 10/50$ mm)

Şekil 3.35. 500 mm \times 500 mm kare enkesitli kolonların farklı tasarım parametrelere göre $k_e - N/N_{max}$ ilişkileri



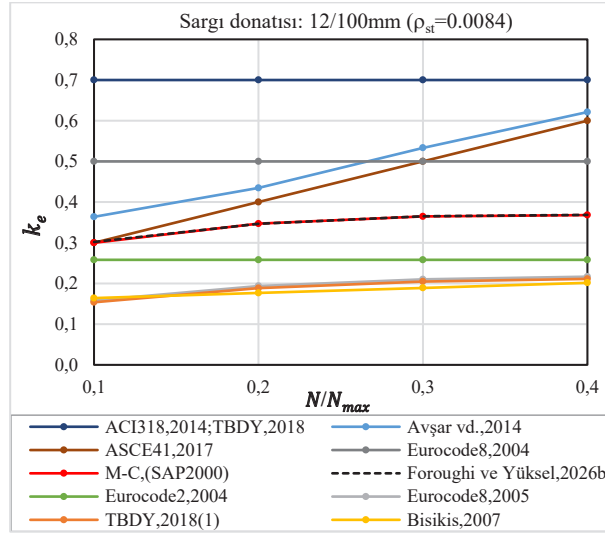
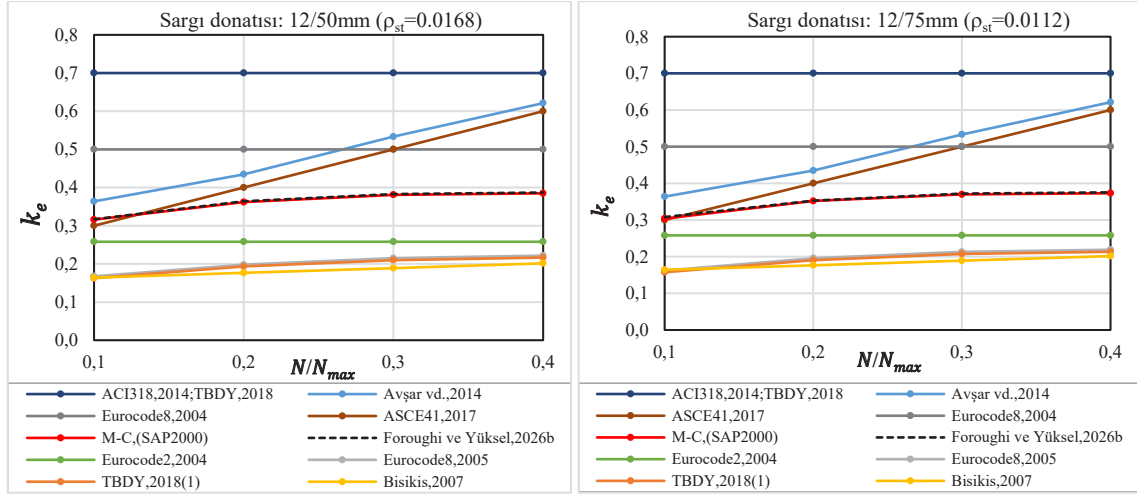
a) Farklı sargı donatısı oranına göre $k_e - N/N_{max}$ grafikleri (boyuna donatı: $\Phi 20$ mm- beton sınıfı: C30)


 b) Farklı boyuna donatı oranına göre $k_e - N/N_{max}$ grafikleri (sargı donatısı: $\Phi 10/50$ mm- beton sınıfı: C30)

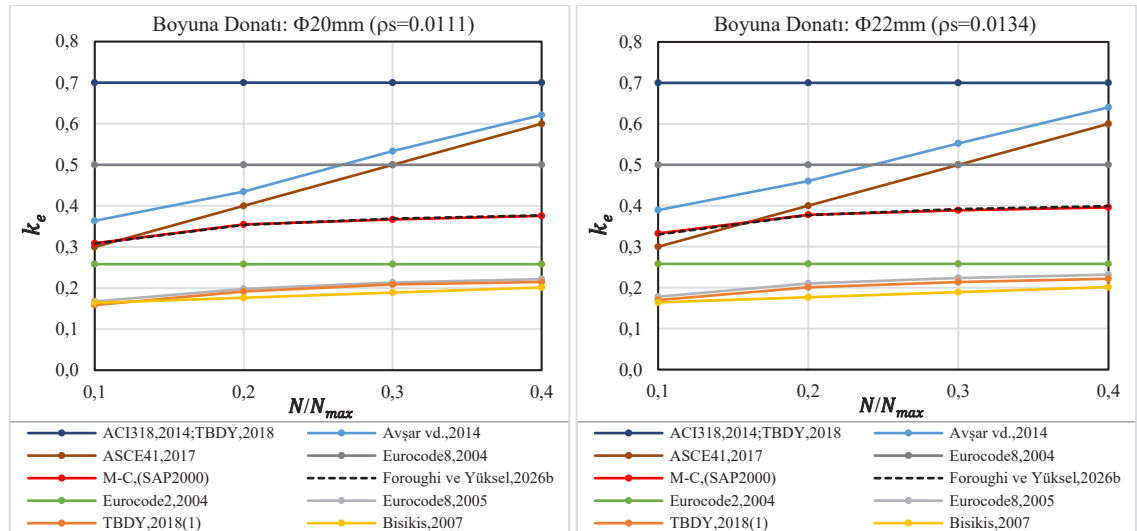


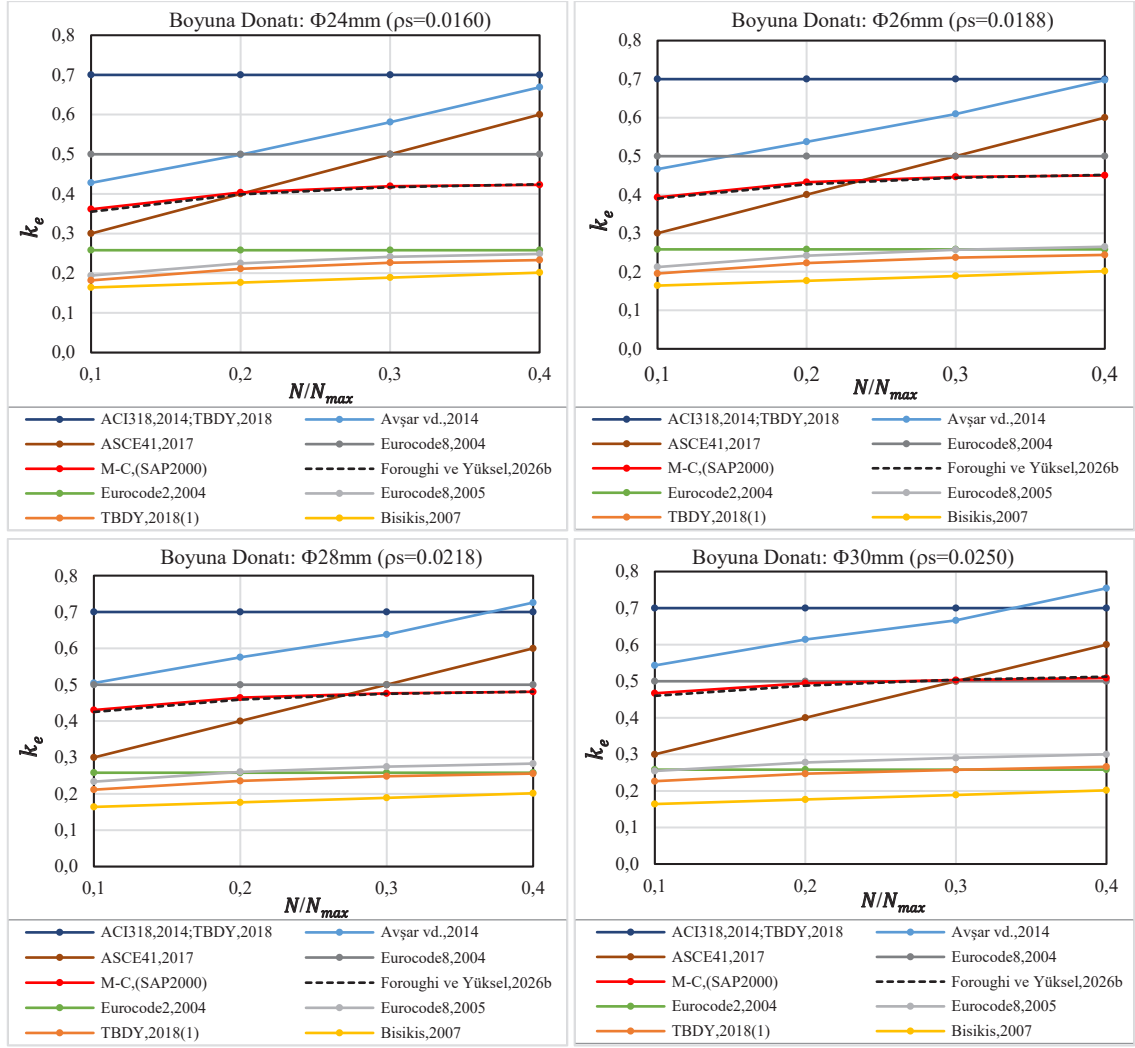
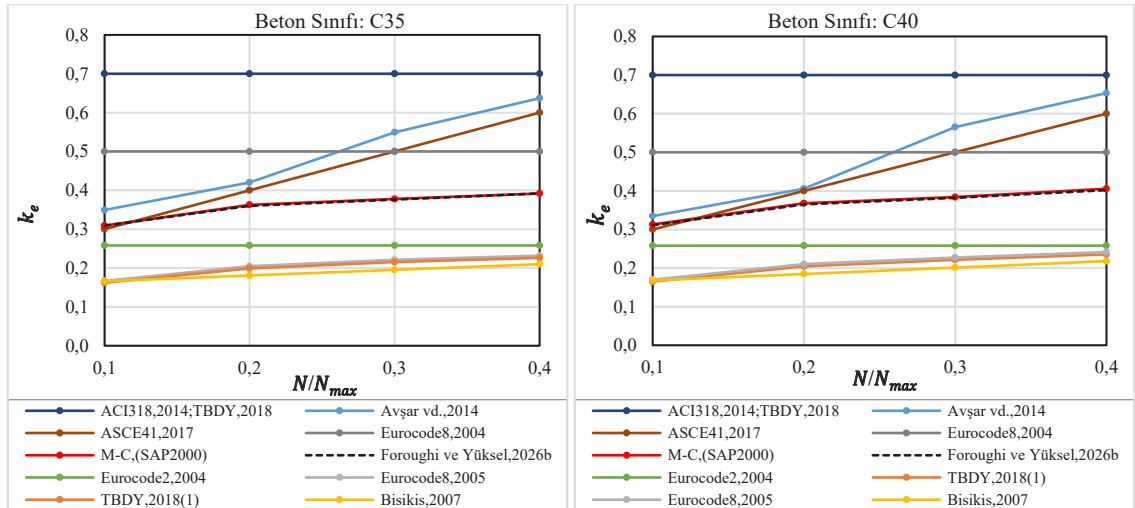
c) Farklı beton basınç dayanımına göre $k_e - N/N_{max}$ grafikleri (boyuna donatı: $\Phi 20$ mm, sargı donatısı: $\Phi 10/50$ mm)

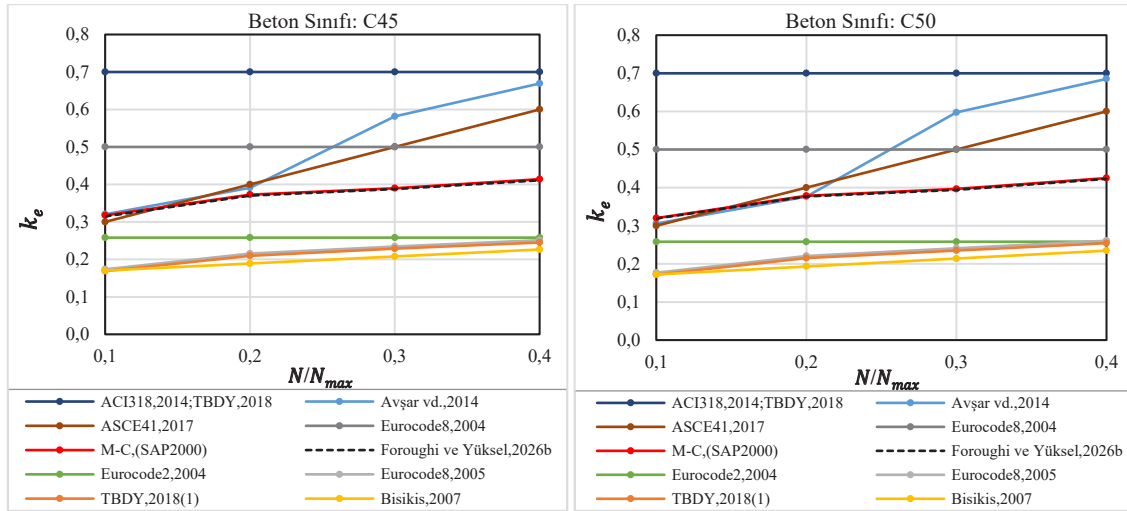
Şekil 3.36. 400 mm \times 600 mm dikdörtgen enkesitli kolonlarda farklı tasarım parametrelere göre $k_e - N/N_{max}$ ilişkileri



a) Farklı sargı donatısı oranına göre $k_e - N/N_{max}$ grafikleri (boyuna donatı: $\Phi 20$ mm- beton sınıfı: C30)



b) Farklı boyuna donatı oranına göre $k_e - N/N_{max}$ grafikleri (sargı donatısı: $\Phi 10/50$ mm- beton sınıfı: C30)



c) Farklı beton basınç dayanımına göre $k_e - N/N_{max}$ grafikleri (boyuna donatı: $\Phi 20$ mm, sargı donatısı: $\Phi 10/50$ mm)

Şekil 3.37. 600 mm dairesel enkesitli kolonlarda farklı tasarım parametrelerine göre $k_e - N/N_{max}$ ilişkileri

3.5. Bölüm Sonu: Araştırma Bulgularının Değerlendirilmesi, Yorumlanması ve Sonuçları

Bu bölüm kapsamında, betonarme kolonların çatlamış kesit durumundaki etkin eğilme rijitliği; kesit geometrisi, beton basınç dayanımı, boyuna ve enine donatı oranları ile eksenel yük düzeyinin birlikte etkisi altında bütüncül bir yaklaşımla incelenmiştir.

Elde edilen bulgular, etkin eğilme rijitliğinin sabit bir katsayı ile temsil edilmesinin gerçek davranışı yansıtmada yetersiz kaldığını göstermektedir. Rijitlik katsayısının; eksenel yük oranı, beton dayanımı ve donatı oranları gibi parametrelere bağlı olarak önemli ölçüde değiştiği belirlenmiştir. Bu durum, yönetmeliklerde yaygın olarak benimsenen sabit indirgeme katsayılarının, özellikle değişken tasarım koşulları altında sınırlı bir temsil gücüne sahip olabileceğine işaret etmektedir.

Parametrik incelemeler, eksenel yük oranındaki artışın tüm kesit tiplerinde moment taşıma kapasitesini artırırken, eğrilik kapasitesini azalttığını ve buna bağlı olarak sünekliliğin düştüğünü göstermektedir. Yüksek eksenel yük seviyelerinde kesit davranışının daha rijit ancak daha gevrek bir karakter sergilemesi, bu parametrenin yalnızca dayanım değil, aynı zamanda enerji yutma kapasitesi açısından da belirleyici olduğunu ortaya koymaktadır. Benzer şekilde, boyuna donatı oranındaki artışın moment kapasitesini yükselttiği; ancak plastik şekil değiştirme kapasitesini sınırlayarak süneklilik üzerinde olumsuz bir etki yarattığı gözlenmiştir. Bu bulgu, dayanım ve süneklilik hedefleri arasında dengeli bir tasarım yaklaşımının gerekliliğini vurgulamaktadır.

Sargı donatısının etkisi değerlendirildiğinde, daha sık aralıklı ve yüksek oranlı sargı donatısı kullanımının betonun sargı etkinliğini artırarak eğrilik kapasitesi ve sünekliliği önemli ölçüde iyileştirdiği belirlenmiştir. Özellikle düşük sargı donatısı aralıklarında elde edilen yüksek süneklilik düzeyleri, sargı donatısı detaylandırmasının göçme mekanizması üzerindeki kritik rolünü açıkça ortaya koymaktadır. Öte yandan, beton basınç dayanımındaki artışın kesit rijitliği ve moment kapasitesini yükseltmesine karşın, gevrek davranış eğilimini artırdığı ve sünekliliği sınırladığı tespit

edilmiştir. Bu nedenle yüksek dayanımlı beton kullanımının, uygun donatı düzenlemeleri ile birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir.

Etkin eğilme rijitliği katsayısının belirlenmesine yönelik üç temel yaklaşım karşılaştırmalı olarak ele alınmıştır: (i) doğrusal olmayan moment-eğrilik analizlerinden hesaplanan kesit rijitlikleri, (ii) yönetmeliklerde önerilen indirgenmiş sabit rijitlik kabulleri ve (iii) tasarım parametrelerine duyarlı analitik/ampirik bağıntılar. Grafıksel karşılaştırmalar, beton dayanımı, donatı oranları ve eksenel yük düzeyinin rijitlik üzerindeki etkilerini açık biçimde ortaya koymaktadır. Parametre-duyarlı modellerin, sabit katsayı yaklaşımına kıyasla daha gerçekçi eğilimler sunduğu belirlenmiştir.

Literatürde yer alan modeller incelendiğinde, bazı bağıntıların kesit geometrisi ve yük düzeyi gibi değişkenleri birlikte dikkate alarak daha tutarlı sonuçlar verdiği görülmektedir. Örneğin, Biskinis ve Fardis (2004) tarafından önerilen yaklaşım, özellikle dikdörtgen kesitler için eksenel yük ve donatı oranının birleşik etkisini yansıtırken; Biskinis (2007) modeli deneysel verilerle kalibre edilerek farklı yük seviyelerindeki rijitlik değişimini daha gerçekçi biçimde temsil etmektedir. Avşar vd. (2014) tarafından geliştirilen bağıntılar ise hem dikdörtgen hem dairesel kesitler için geçerli olup, beton dayanımı ve donatı oranının birlikte etkisini dikkate alarak dengeli bir öngörü sunmaktadır. Bununla birlikte, bazı modellerde kesit geometrisi veya sargı etkisinin sınırlı biçimde ele alınması, genelleştirme kabiliyetini kısıtlamaktadır.

Yönetmelik yaklaşımları incelendiğinde, ACI 318 (2014), ASCE/SEI 41 (2017), Eurocode 8 (2004) ve TBDY (2018) gibi düzenlemelerde etkin rijitliğin çoğunlukla sabit katsayılar veya sınırlı parametreler üzerinden tanımlandığı görülmektedir. Bu yaklaşımlar tasarım sürecinde pratiklik sağlamakla birlikte, kesit davranışını etkileyen çok sayıda değişkenin ihmal edilmesi nedeniyle doğrusal olmayan davranışın ayrıntılı temsilde yetersiz kalabilmektedir. Özellikle eksenel yük, donatı düzeni ve beton dayanımı gibi parametrelerin birlikte etkisinin göz ardı edilmesi, rijitlik tahminlerinde önemli sapmalara neden olabilmektedir.

Bu bölüm kapsamında elde edilen bulgular, moment-eğrilik analizlerine dayalı yöntemlerin etkin kesit rijitliğinin belirlenmesinde güvenilir ve gerçekçi sonuçlar sunduğunu ortaya koymaktadır. Bu analizlerden türetilen rijitlik değerlerinin, yönetmeliklerde önerilen indirgenmiş kabullere kıyasla daha yüksek doğruluk sağladığı belirlenmiştir. Ayrıca, Foroughi ve Yüksel (2026b) tarafından önerilen parametre-duyarlı bağıntının, geniş bir tasarım aralığında sayısal analiz sonuçları ile uyumlu olduğu ve mühendislik uygulamaları açısından pratik bir alternatif sunduğu değerlendirilmiştir.

Sonuç olarak, betonarme kolonların etkin eğilme rijitliği, çok sayıda parametrenin etkileşimine bağlı dinamik bir özellik olup, sabit katsayılarla temsil edilmesi yerine değişken tabanlı modellerle ifade edilmesi daha gerçekçi sonuçlar vermektedir. Tasarım ve analiz süreçlerinde; eksenel yük düzeyi, donatı oranları, beton dayanımı ve kesit geometrisini birlikte dikkate alan yaklaşımların benimsenmesi, performans dayalı mühendislik uygulamalarında daha güvenilir değerlendirmelerin yapılmasına katkı sağlayacaktır. Bu bölüm, etkin rijitliğin daha doğru tanımlanmasına yönelik analitik bir çerçeve sunmakta ve mevcut tasarım yaklaşımlarının geliştirilmesine yönelik bilimsel bir temel oluşturmaktadır.

4. BETONARME PERDE DUVAR ELEMANLARININ ETKİN KESİT RİJİTLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Betonarme perde duvarlar, özellikle yüksek katlı yapıların yanal yük taşıyıcı sistemlerinde temel ve kritik öneme sahip elemanlar arasında yer almaktadır. Deprem etkileri altında bu elemanların sergilediği davranış, yapının genel sismik performansını doğrudan belirlemektedir. Bu nedenle, perde duvarların yapısal davranışının gerçeğe yakın biçimde modellenmesi, güvenilir performans değerlendirmelerinin yapılabilmesi açısından büyük önem taşımaktadır. Bununla birlikte, geleneksel doğrusal elastik analizlerde kullanılan kesit rijitliklerinin, betonun çatlaması ve malzeme doğrusal olmama etkilerini yeterince yansıtamadığı bilinmektedir. Bu durum, çatlama sonrası davranışı temsil edebilen etkin eğilme rijitliği kavramının geliştirilmesini zorunlu kılmıştır.

Deprem mühendisliği uygulamalarında etkin rijitliğin doğru belirlenmesi; yapıların yer değiştirme taleplerinin, iç kuvvet dağılımlarının ve genel performans düzeylerinin güvenilir biçimde tahmin edilmesine olanak tanımaktadır. Bu bağlamda, özellikle yüksek katlı yapıların sismik tasarım ve değerlendirme süreçlerinde etkin rijitlik parametresinin doğruluğu kritik bir rol oynamaktadır.

Süneklilik düzeyi yüksek betonarme perde duvarlar, önemli deformasyon taleplerine maruz kalmalarına rağmen enerji yutma kapasiteleri sayesinde taşıyıcı sistem bütünlüğünü koruyabilmektedir. Bu nedenle, bu elemanların davranışı yalnızca dayanım açısından değil; rijitlik ve süneklilik özellikleri birlikte dikkate alınarak değerlendirilmelidir. Bu üç parametre arasında etkin kesit rijitliği, yapısal performansın belirlenmesinde kilit bir rol üstlenmektedir.

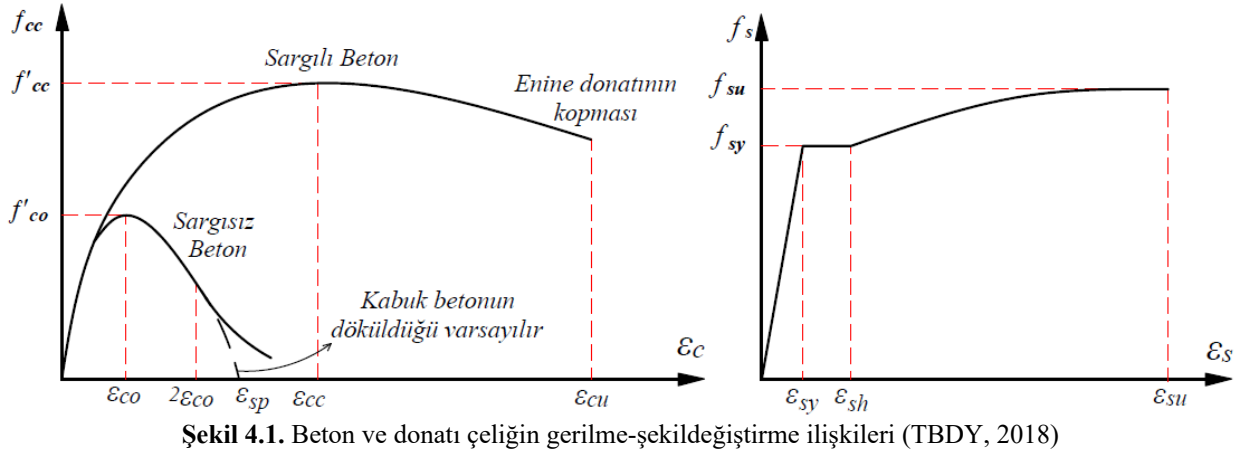
Yatay yükler altında yapı davranışını doğrudan etkileyen etkin kesit rijitliği; betonun çatlama durumu, donatı oranı ve yerleşimi, eksenel yük düzeyi ve malzeme doğrusal olmama özellikleri gibi çok sayıda değişkene bağlıdır. Bu etkiler sonucunda kesit rijitliğinde önemli azalmalar meydana gelmekte ve elastik rijitlik kabullerine dayalı analizlerin yetersiz kalmasına neden olmaktadır.

Bu bölümde, betonarme perde duvar elemanlarının çatlamış kesit durumundaki etkin eğilme rijitliği, doğrusal olmayan kesit analizlerine dayalı analitik bir çerçevede incelenmiştir. Analizlerde, farklı malzeme özellikleri ve donatı düzenlerine sahip perde duvar modelleri dikkate alınarak, söz konusu parametrelerin etkin rijitlik üzerindeki etkilerinin parametrik olarak değerlendirilmesi amaçlanmıştır.

Bu kapsamda, moment-eğrilik ilişkilerine dayalı doğrusal olmayan analizler, yönetmelik yaklaşımları ve literatürde önerilen bağıntılar birlikte ele alınmış; ayrıca Foroughi ve Yüksel (2025) tarafından geliştirilen bağıntının perde duvar elemanlarına uygulanabilirliği analiz edilmiştir.

Taşıyıcı elemanların eğilme ve eksenel yük etkisi altındaki davranışı, moment-eğrilik ilişkileri aracılığıyla ayrıntılı biçimde tanımlanabilmektedir. Bu doğrultuda, betonarme perde duvar kesitlerine ait moment-eğrilik ilişkileri; beton ve donatı çeliğinin doğrusal olmayan malzeme davranışlarını dikkate alan kesitsel analizler ile elde edilmiştir.

Analizlerde betonun basınç altındaki davranışı, sargılı ve sargısız beton modelleri (Mander vd., 1988) ile temsil edilmiş; donatı çeliği için elastik, akma ve pekleşme bölgelerini içeren malzeme modeli kullanılmıştır. Doğrusal olmayan kesit analizleri SAP2000 yazılımı ile gerçekleştirilmiş olup, malzeme parametreleri Şekil 4.1 ve Tablo 4.1’de verilen esaslara göre tanımlanmıştır.

**Tablo 4.1.** Malzeme modellerinde kullanılan parametreler (TBDY, 2018)

Malzeme	Parametre	Değer
Beton Sınıfı: C25-C50	Sargısız betonun maksimum gerilmeye ulaştığı birim şekildeğiştirme değeri (ϵ_{co})	0.002
	Sargısız betonun nihai birim şekildeğiştirmesi (ϵ_{cu})	0.0035
	Karakteristik beton basınç dayanımı (f_{ck})	25-50MPa
Donatı Çeliği: B420C	Donatı çeliğinin akma birim şekildeğiştirmesi (ϵ_{sy})	0.0021
	Donatı çeliğinin pekleşme birim şekildeğiştirmesi (ϵ_{sh})	0.008
	Donatı çeliğinin kopma birim şekildeğiştirmesi (ϵ_{su})	0.08
	Donatı çeliğinin karakteristik akma dayanımı (f_{yk})	420MPa
	Donatı çeliğinin karakteristik kopma dayanımı (f_{su})	550MPa

Analitik çalışmalarda dikkate alınan yüksek süneklik düzeyine sahip perde duvar modelleri dikdörtgen kesitli olarak tasarlanmıştır. TBDY (2018) yüksek süneklik düzeyine sahip perde duvarlar için uzun kenar uzunluğunun ($l_w = 3000$ mm) plan düzlemindeki kalınlığa ($b_w = 300$ mm) oranının altıdan büyük olması koşulu ($l_w > 6b_w$) tanımlanmıştır. Ayrıca TBDY (2018)'e göre $H_w/l_w > 2$ koşulunu sağlayan perdelerin tasarımında perde uç bölgelerinin dikkate alınması gerekmektedir. Tasarlanan perde duvarın toplam yüksekliği $H_w = 10000$ mm (10 m) ve plan uzunluğu $l_w = 3000$ mm (3 m) olduğundan, perde modellerinin her iki ucunda 300 mm × 600 mm boyutlarında sargılı uç bölgeleri öngörülmüştür.

Betonarme perde duvarların etkin eğilme rijitliği; beton çatlaması, sargı etkisi, aksenal yük seviyesi ve malzeme özellikleri gibi çok sayıda parametrenin etkileşimi sonucunda şekillenmektedir. Bu kapsamda, söz konusu parametrelerin etkilerini sistematik biçimde inceleyebilmek amacıyla geniş kapsamlı bir parametre seti oluşturulmuştur. Analizlerde; farklı boyuna donatı çapları (d_l), enine donatı çapları (d_{tr}), enine donatı aralıkları (s), beton basınç dayanımları (f_{ck}) ve aksenal yük oranları (N/N_{max}) dikkate alınarak çeşitli perde duvar kesitleri modellenmiştir. Sayısal analiz kapsamında değerlendirilen perde duvar modellerinin geometrik özellikleri ve donatı düzenlemeleri Tablo 4.2'de özetlenmiştir (Foroughi, 2022; Foroughi ve Yüksel, 2025).

Donatı düzenlemeleri, TBDY (2018)'de tanımlanan yüksek süneklik düzeyine sahip perde duvarlara ilişkin koşullar dikkate alınarak belirlenmiştir. Bu kapsamda, perde gövdesi ile sargılı uç bölgelerinde farklı donatı oranları tanımlanmış ve özellikle uç bölgelerinde kullanılan donatılar, yönetmelikte öngörülen detaylandırma kurallarına uygun şekilde düzenlenmiştir.

$$\frac{A_s}{(l_w - 2l_u) \times b_w} \geq 0.0025 \leftrightarrow \frac{A_s}{(3000 - 2 \times 600) \times 300} \geq 0.0025 \leftrightarrow A_s \geq 1350mm^2$$

$$\frac{A_s}{l_w \times b_w} \geq 0.002 \leftrightarrow \frac{A_s}{3000 \times 300} \geq 0.002 \leftrightarrow A_s \geq 1800mm^2$$

Eksenel yük düzeyinin etkin rijitlik üzerindeki etkisini incelemek amacıyla, TBDY (2018)'de tanımlanan üst sınır dikkate alınarak üç farklı eksenel yük oranı kullanılmıştır. Bu kapsamda, N/N_{max} oranları 0.15, 0.25 ve 0.35 olarak seçilmiş olup, ilgili eksenel yük seviyeleri sırasıyla $N_1 = 0.15 A_c f_{ck}$, $N_2 = 0.25 A_c f_{ck}$ ve $N_3 = 0.35 A_c f_{ck}$ olarak tanımlanmıştır. Ayrıca, perde kesitlerinin yeterli taşıma kapasitesine sahip olması için $A_c \geq N_{dmax}/0.35 f_{ck}$ koşulu sağlanmıştır.

Malzeme parametrelerinin etkisini değerlendirmek amacıyla, analizlerde beş farklı beton dayanım sınıfı (C30, C35, C40, C45 ve C50) dikkate alınmıştır. TBDY (2018) gereği, C25'den daha düşük dayanımlı beton kullanımına izin verilmediğinden, seçilen dayanım sınıfları yönetmelik sınırları içerisinde belirlenmiştir. Bu bölümde gerçekleştirilen analitik çalışmalar, betonarme perde duvar elemanlarının etkin eğilme rijitliğinin belirlenmesine yönelik kapsamlı bir değerlendirme sunmakta; elde edilen bulguların performansa dayalı tasarım yaklaşımlarının geliştirilmesine katkı sağlaması hedeflenmektedir.

Tablo 4.2. Betonarme perde duvarlara ait kesit ve donatı detayları

Beton sınıfı (MPa)	Perde duvar uç bölgesi		Perde duvar gövde bölgesi		Eksenel yük (N/N_{max})						
	Boyuna donatı	Enine donatı	Boyuna donatı	Enine donatı							
C30 C35 C40 C45 C50	10Φ18mm	Φ8/50mm	18Φ14mm	Φ8/50mm	0.15						
		Φ10/50mm		Φ10/50mm							
		Φ12/50mm		Φ12/50mm							
		Φ14/50mm		Φ14/50mm							
		Φ10/75mm		Φ10/75mm							
		Φ10/100mm		Φ10/100mm							
	10Φ14mm 10Φ16mm 10Φ18mm 10Φ20mm	Φ10/50mm		Φ10/50mm	Φ10/125mm	0.25					
							Φ10/150mm	Φ10/125mm	0.35		
										Φ10/150mm	Φ10/150mm

En-kesit Boyutları

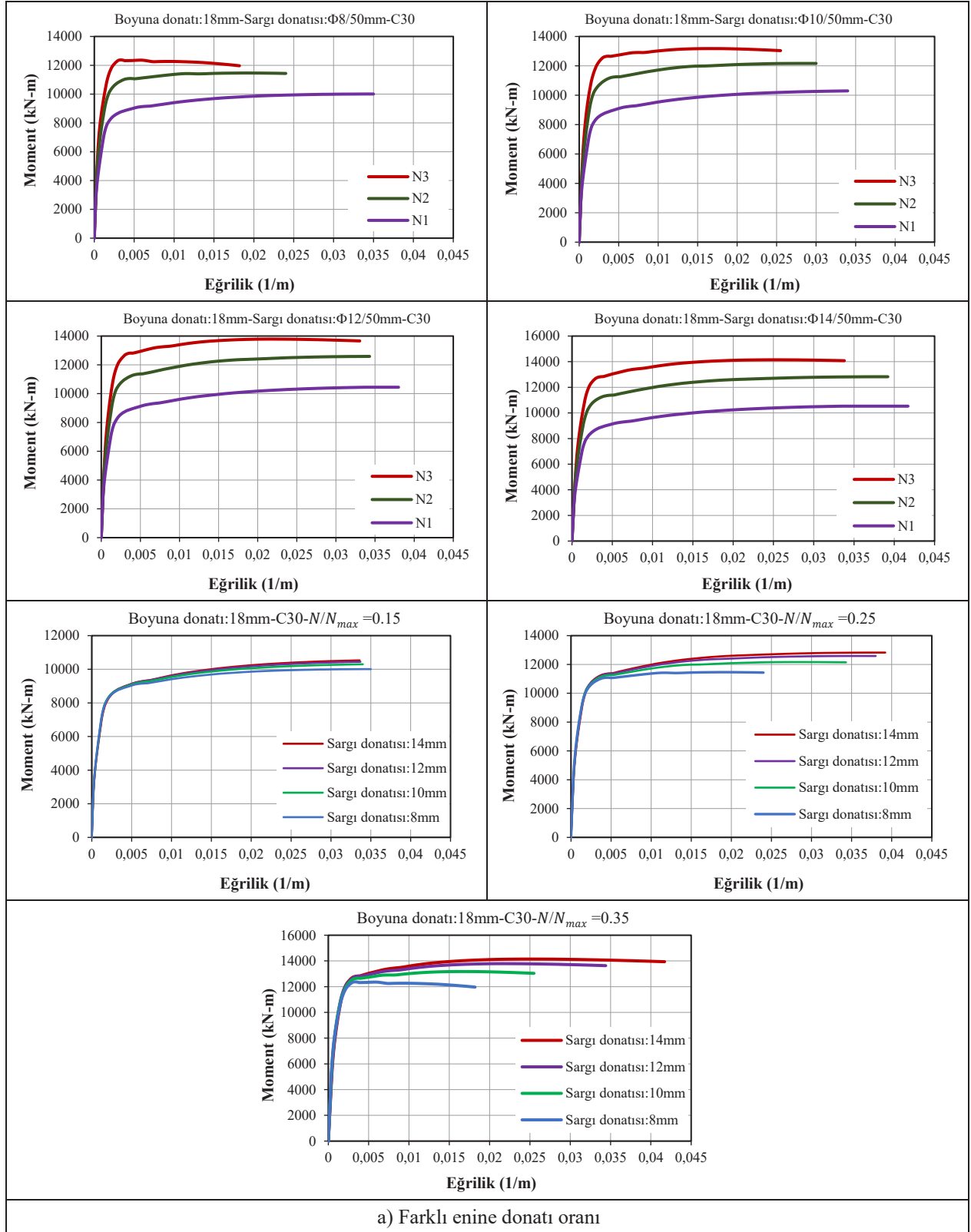
4.1. Betonarme Perde Duvarların Moment-Eğrilik İlişkileri

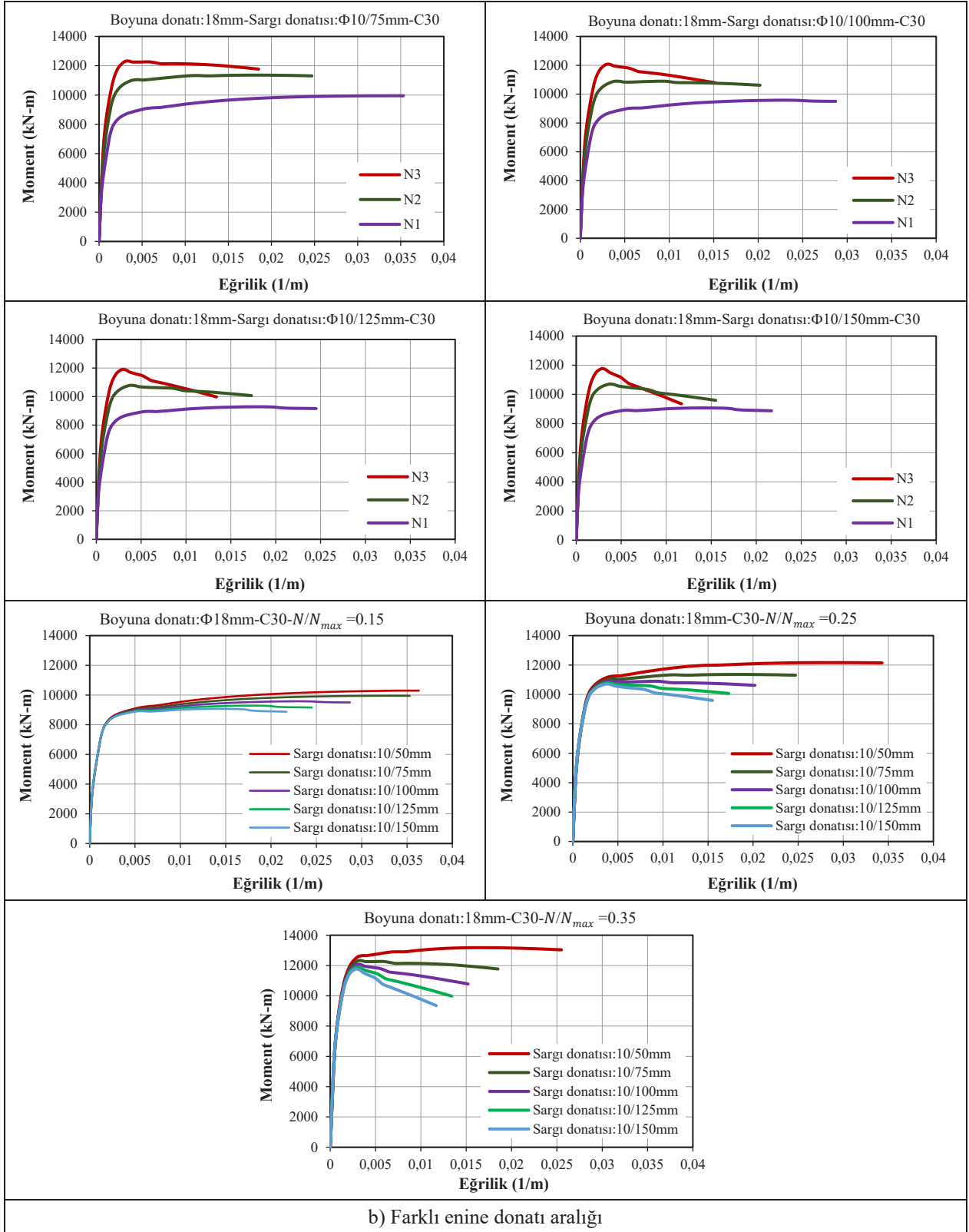
Betonarme perde duvarların doğrusal olmayan moment-eğrilik ilişkileri, taşıyıcı sistem elemanlarının elastik sınır ötesindeki davranışının tanımlanmasında temel bir analitik çerçeve sunmaktadır. Bu ilişkiler, kesit düzeyinde plastikleşme mekanizmalarının ortaya konulmasına olanak sağlayarak taşıma gücü, deformasyon kapasitesi ve süneklik düzeyinin güvenilir biçimde değerlendirilmesine katkıda bulunmaktadır. Bu bağlamda moment-eğrilik analizi, performansa dayalı tasarım yaklaşımlarının ayrılmaz bir bileşeni olarak öne çıkmakta; gelişmiş sayısal analiz teknikleri ve doğrusal olmayan malzeme modelleri ile desteklendiğinde, kesitsel davranışın gerçeğe yakın temsilini mümkün kılmaktadır. Böylece, özellikle deprem etkilerinin belirleyici olduğu bölgelerde, betonarme perde duvarların sismik performansının doğru tahmin edilmesine önemli ölçüde katkı sağlanmaktadır. Yüksek yatay yük taşıma ve enerji yutma kapasiteleri sayesinde bu elemanlar, yapı güvenliğinin sağlanmasında kritik bir rol üstlenmektedir (Foroughi ve Yüksel, 2025).

Bu bölüm kapsamında, betonarme perde duvar kesitlerinin doğrusal olmayan davranışını etkileyen temel parametrelerin belirlenmesine yönelik kapsamlı moment-eğrilik analizleri gerçekleştirilmiştir. Analiz sürecinde, farklı beton ve donatı çeliği özelliklerine sahip kesitler ile çeşitli donatı düzenleri dikkate alınmış; eğilme momenti ile eğrilik arasındaki ilişki sistematik ve karşılaştırmalı bir yaklaşımla incelenmiştir. Elde edilen moment-eğrilik eğrileri, kesit davranışını elastik aşamadan başlayarak çatlama, donatı akması ve nihai göçme aşamalarına kadar bütüncül biçimde tanımlayan temel diyagramlar olarak değerlendirilmiştir.

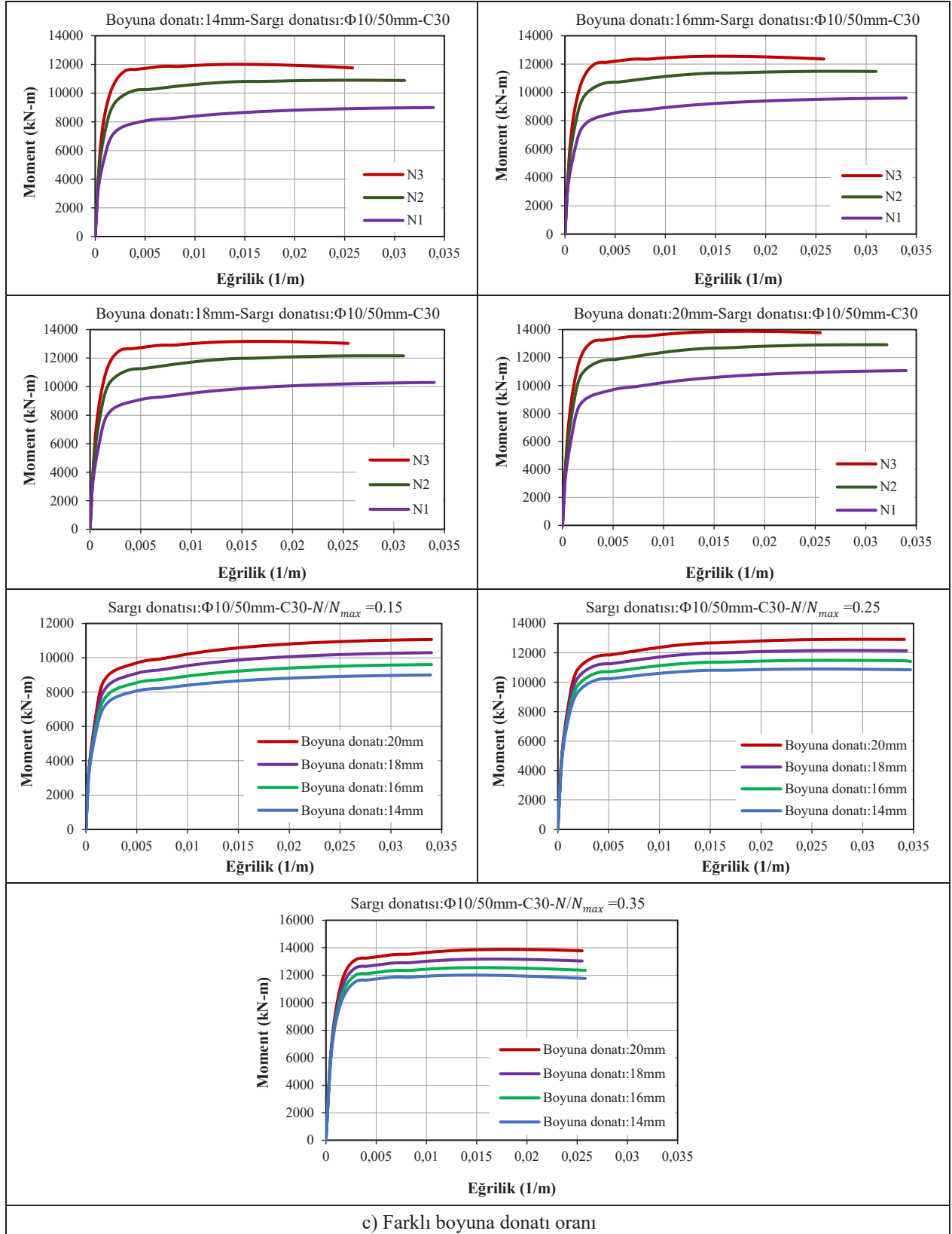
Perde duvar modellerinde; d_l , d_{tr} , s , f_{ck} ve N/N_{max} oranları gibi başlıca tasarım değişkenleri dikkate alınmıştır. Bu parametreler doğrultusunda elde edilen moment-eğrilik ilişkileri, kesit davranışının farklı tasarım koşulları altındaki değişimini ortaya koyacak şekilde analiz edilmiştir. Perde duvar kesitlerine ait moment-eğrilik eğrileri, söz konusu parametrelerin etkisini açık biçimde gösterecek şekilde Şekil 4.2’de karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

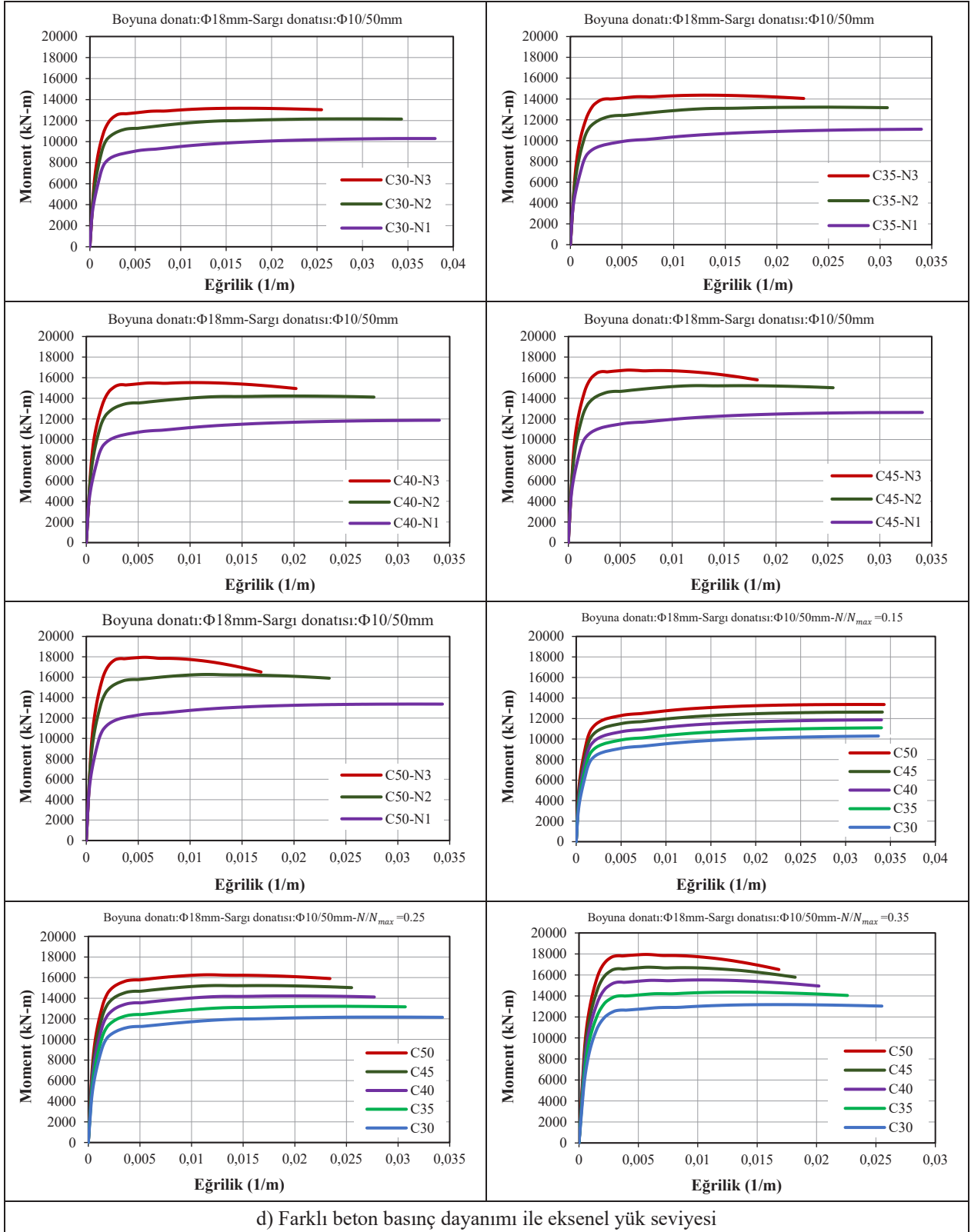
Gerçekleştirilen moment-eğrilik analizleri sonucunda, kesitlerin akma ve göçme durumlarına karşılık gelen moment (M_y, M_u) ve eğrilik (φ_y, φ_u) değerleri belirlenmiştir. Bu parametrelerin farklı tasarım değişkenlerine bağlı değişimi, karşılaştırmalı değerlendirmeye olanak sağlayacak biçimde Şekil 4.3’te sunulmuştur. Elde edilen karakteristik parametreler kullanılarak kesitlere ait eğrilik sünekliği (μ_φ) hesaplanmış ve perde duvarların doğrusal olmayan davranış özellikleri parametrik analizlerle değerlendirilmiştir. Tasarım parametrelerinin süneklik üzerindeki etkileri ise Şekil 4.4’te grafiksel olarak verilmiştir (Foroughi ve Yüksel, 2025). Elde edilen bulgular, tasarım değişkenlerinin perde duvarların hem taşıma kapasitesi hem de süneklik performansı üzerindeki belirleyici etkisini açıkça göstermekte; bu doğrultuda doğrusal olmayan analizlerin performansa dayalı tasarım yaklaşımlarındaki kritik rolünü vurgulamaktadır.



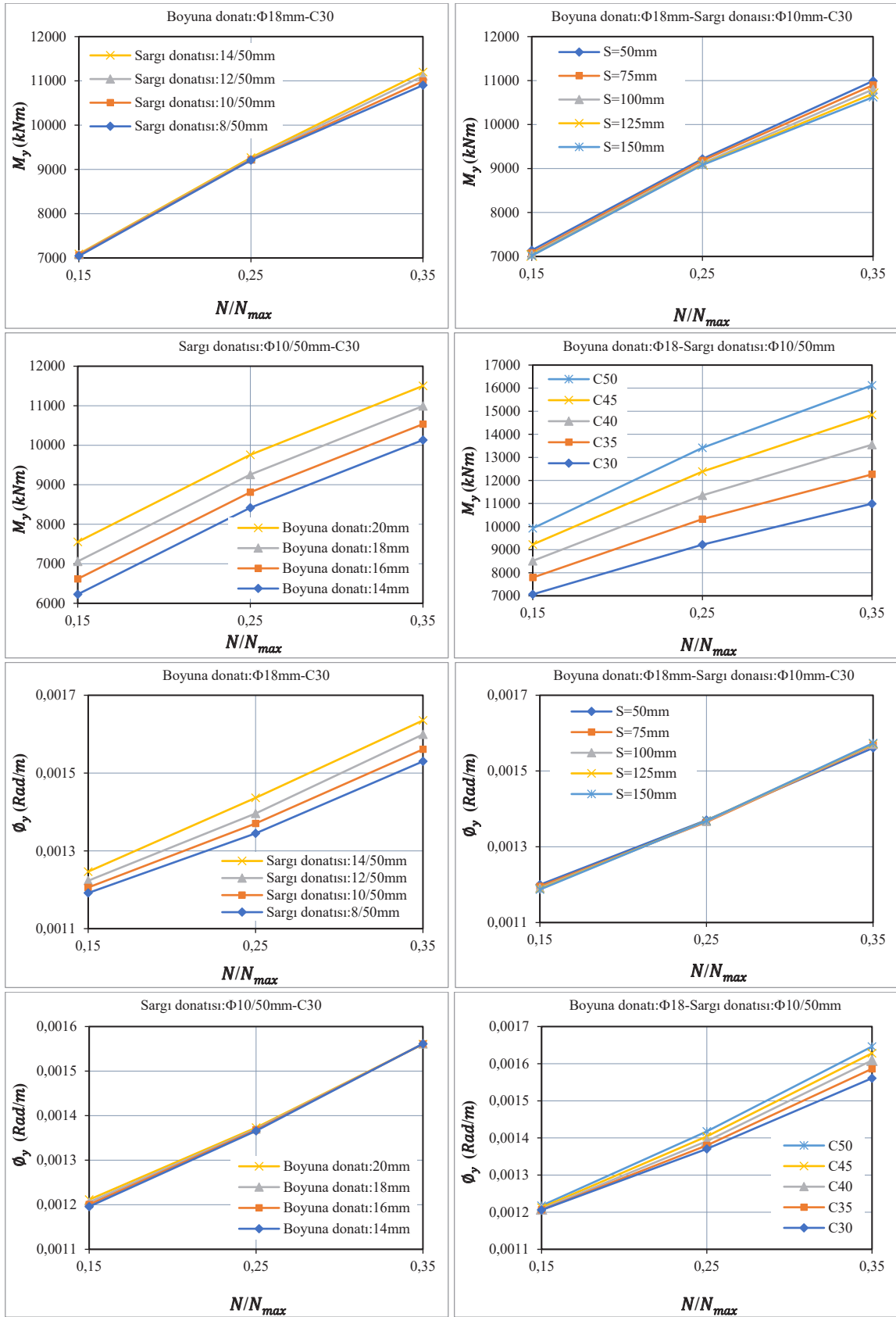


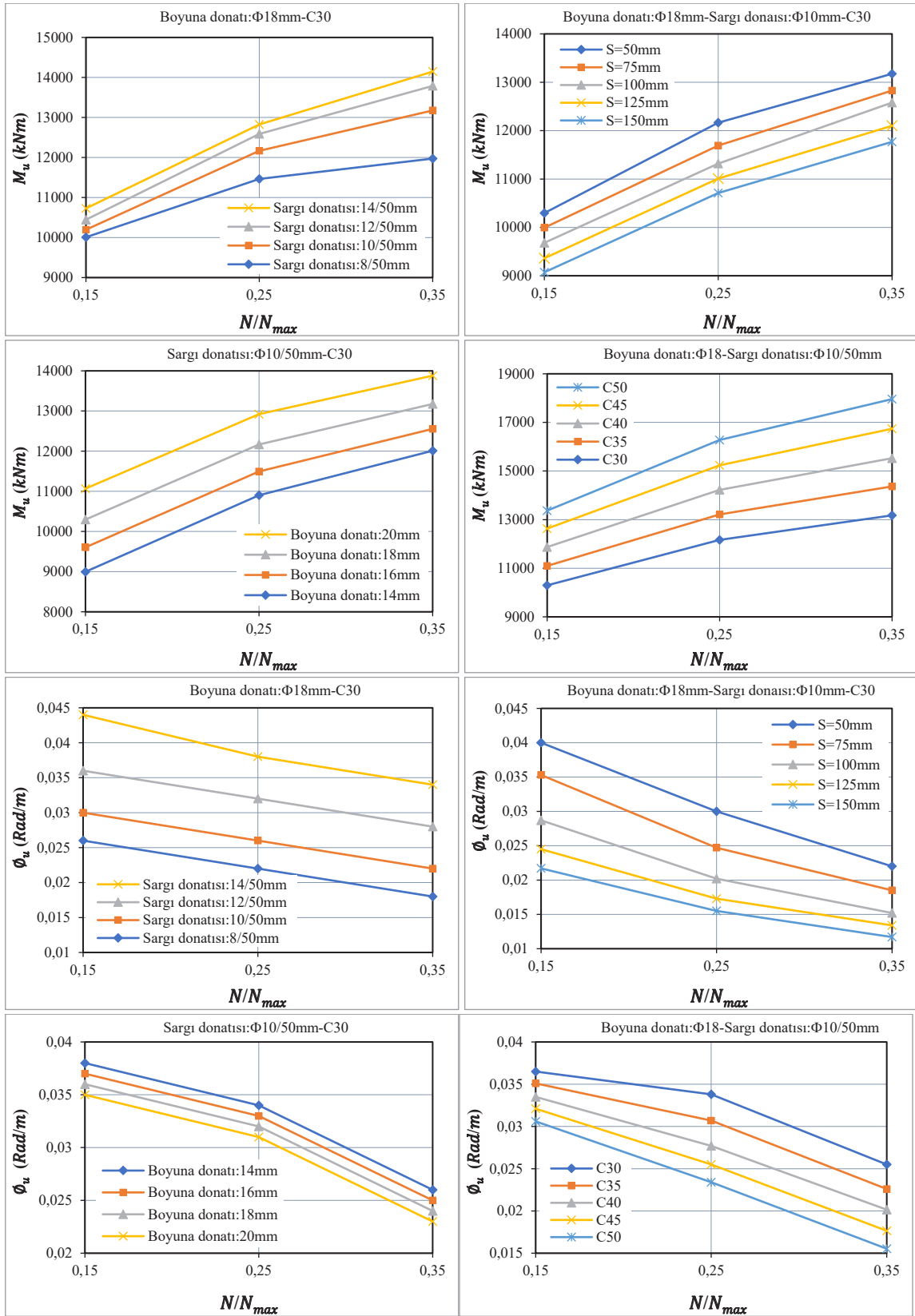
b) Farklı enine donatı aralığı



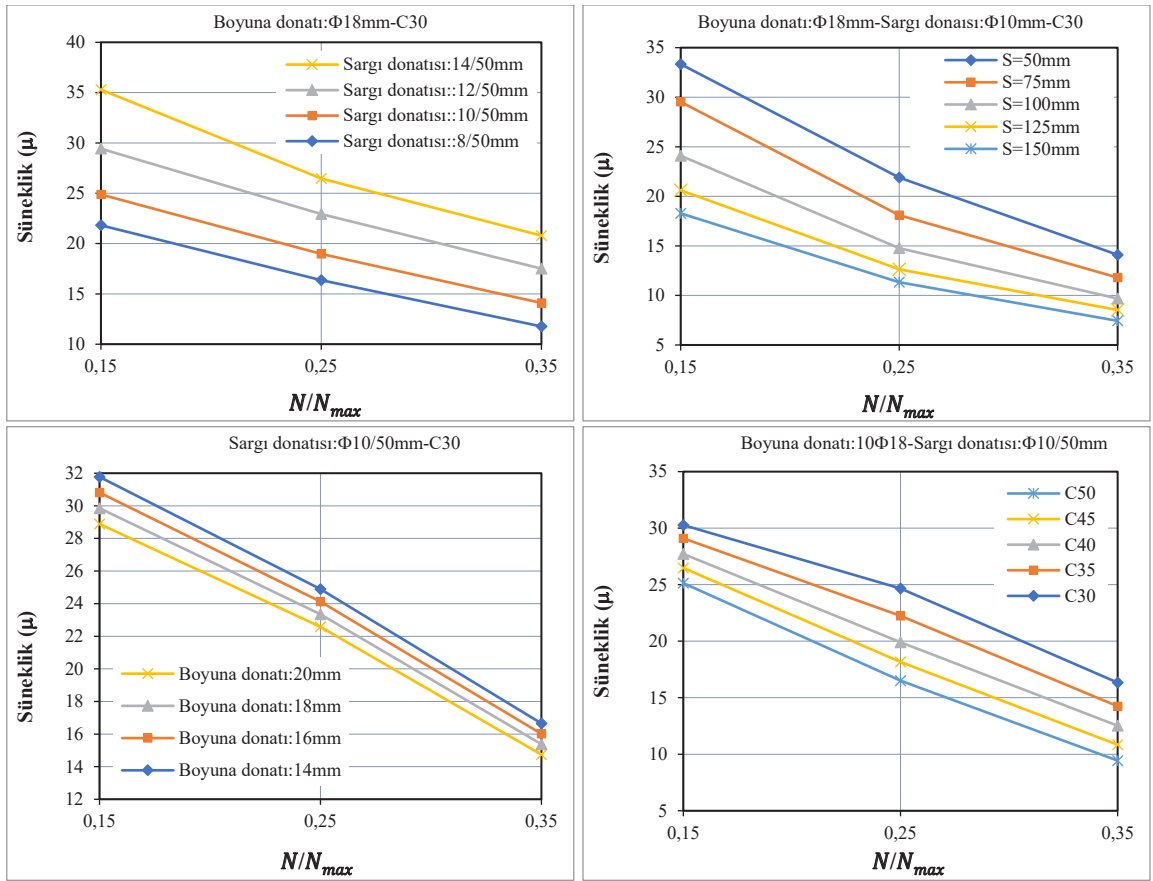


Şekil 4.2. Farklı tasarım parametrelerine sahip betonarme perde duvar kesitlerine ait moment-eğrilik ilişkilerinin karşılaştırmalı gösterimi





Şekil 4.3. Betonarme perde duvar kesitleri için farklı tasarım parametrelerinin moment ve eğrilik değerleri üzerindeki etkisi



Şekil 4.4. Betonarme perde duvar kesitlerinde farklı tasarım parametrelerinin eğrilik sünekliliği üzerindeki etkisinin karşılaştırmalı gösterimi

4.2. Betonarme Perde Duvarların Etkin Eğilme Rijitlik Değerlerinin Hesaplanması

Perde duvar kesitlerinde etkin eğilme rijitliği, moment-eğrilik ilişkisinin başlangıçtaki doğrusal kısmının eğimi olarak tanımlanmakta olup, betonun çatlama davranışı, donatı-beton aderansı ve donatı çeliğinin elastik bölgedeki tepkisini birlikte yansıtan bütüncül bir parametre niteliği taşımaktadır. Bu büyüklüğün güvenilir biçimde belirlenmesi, moment-eğrilik diyagramının yüksek doğrulukla elde edilmesine ve elastik sınırın karakteristik olarak tanımlanmasına bağlıdır. Özellikle akma durumuna karşılık gelen kritik noktanın hassas biçimde belirlenmesi, kesitin hem taşıma kapasitesinin hem de deformasyon yeteneğinin doğru değerlendirilmesi açısından belirleyici olmaktadır. Bu nedenle etkin eğilme rijitliği, performans esaslı tasarım yaklaşımlarında temel bir parametre olarak öne çıkmakta ve perde duvarların deprem etkileri altındaki davranışının gerçekçi biçimde modellenmesinde önemli bir rol üstlenmektedir.

Bu bölümde, betonarme perde duvar kesitlerinin etkin eğilme rijitliklerinin belirlenmesi amacıyla sistematik ve parametrik bir analiz yaklaşımı benimsenmiştir. Farklı kesit özelliklerine sahip modeller için gerçekleştirilen moment-eğrilik analizlerinde; boyuna donatı çapı (d_l), enine donatı çapı (d_{tr}), enine donatı aralığı (s), beton basınç dayanımı (f_{ck}) ve eksenel yük oranı (N/N_{max}) gibi temel tasarım değişkenleri dikkate alınmıştır. Elde edilen moment-eğrilik ilişkileri üzerinden etkin

eğilme rijitliği değerleri hesaplanmış ve bu değerler, söz konusu parametrelerin etkilerini ortaya koyacak şekilde parametrik olarak değerlendirilmiştir. Bu yaklaşım, malzeme ve kesit özelliklerinin rijitlik üzerindeki etkilerinin ayrıntılı biçimde incelenmesine olanak sağlamaktadır.

Analitik olarak elde edilen etkin rijitlik değerleri, ayrıca ulusal ve uluslararası deprem yönetmeliklerinde önerilen yaklaşımlar doğrultusunda da belirlenmiştir. Bu kapsamda, perde duvar elemanları için yönetmeliklerde tanımlanan sabit katsayılar veya eksenel yük düzeyine bağlı bağıntılar kullanılarak etkin eğilme rijitliği, $EI_e = k_e E_c I_g$ ifadesi aracılığıyla hesaplanmıştır. Bu yöntem, mühendislik uygulamalarında yaygın olarak tercih edilen basitleştirilmiş hesap prosedürlerini temsil etmektedir.

Bunun yanı sıra, literatürde önerilen ve tasarım parametrelerine duyarlı analitik modeller de değerlendirme kapsamına dahil edilmiştir. Farklı kesit özelliklerine sahip perde duvarların etkin eğilme rijitlikleri; moment-eğrilik analizlerinden elde edilen sonuçlar ile birlikte TBDY (2018), ACI 318 (2014), ASCE/SEI 41 (2017) ve Eurocode 8 (2004, 2005) gibi yönetmeliklerde yer alan yaklaşımlar dikkate alınarak hesaplanmıştır. Ayrıca, literatürde geliştirilen ampirik ve yarı-ampirik bağıntılar da karşılaştırmalı analizlerde kullanılmıştır. Bu kapsamlı değerlendirme, doğrusal olmayan kesit analizlerine dayalı yöntemlerin farklı tasarım parametreleri altında perde duvar davranışını temsil etme düzeyinin mühendislik bakış açısıyla incelenmesine imkan tanımaktadır.

Son aşamada, moment-eğrilik analizlerinden türetilen etkin eğilme rijitliği değerleri, yönetmelik kabulleri ve literatür temelli modellerden elde edilen sonuçlarla karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Bu karşılaştırmalarda, yöntemlerin güvenli tarafta kalma eğilimleri, eksenel yük düzeyine bağlı değişimler ve kesit davranışına ilişkin farklılıklar dikkate alınarak kapsamlı bir değerlendirme gerçekleştirilmiştir. Elde edilen bulgular, farklı hesap yaklaşımlarının doğruluk ve temsil kabiliyeti açısından karşılaştırılmasına olanak sağlamaktadır.

4.2.1. Moment-eğrilik ilişkilerinden hesaplanan etkin kesit rijitlik değerleri

Betonarme perde duvar elemanlarında etkin eğilme rijitliğinin güvenilir bir şekilde belirlenebilmesi, kesit düzeyinde gerçekleştirilen doğrusal olmayan moment-eğrilik ($M-\varphi$) analizlerinin kullanılmasını gerektirmektedir. Bu kapsamda, çalışmada ele alınan perde duvar kesitlerine ait etkin eğilme rijitlikleri, doğrusal olmayan kesit analizleri esas alınarak hesaplanmıştır. Söz konusu analizler, eksenel yük düzeyi, donatı düzeni ve beton dayanımı gibi temel tasarım değişkenlerinin kesit davranışı üzerindeki etkilerini ortaya koyacak şekilde kurgulanmıştır.

Doğrusal olmayan moment-eğrilik yaklaşımı; betonun çatlama sonrası davranışını, donatı çeliğinin akma sürecini ve eksenel yük etkisini birlikte dikkate alması bakımından, brüt kesit rijitliğine dayanan elastik kabullere kıyasla daha gerçekçi sonuçlar sunmaktadır. Bu çerçevede etkin eğilme rijitliği, moment-eğrilik eğrisinin belirli bir performans seviyesine karşılık gelen sekant eğimi üzerinden tanımlanmış ve $EI_e = M/\varphi$ bağıntısı kullanılarak elde edilmiştir.

Analiz sürecinde, perde duvar kesit davranışını belirleyen başlıca parametreler sistematik olarak dikkate alınmıştır. Bu bağlamda; d_l , d_{tr} , s , f_{ck} ve N/N_{max} değişkenleri analizlere dahil edilmiştir. Bu parametreler, kesitin moment-eğrilik karakteristiğini doğrudan etkileyerek çatlama sonrası rijitlik, akma davranışı ve süneklik düzeyi üzerinde belirleyici rol oynamaktadır. Dolayısıyla, etkin

rijitliğin doğru temsil edilebilmesi açısından bu değişkenlerin bütüncül bir yaklaşımla değerlendirilmesi kritik öneme sahiptir.

Farklı tasarım parametrelerine sahip betonarme perde duvar kesitleri için moment-eğrilik analizlerinden elde edilen etkin eğilme rijitliği katsayısı (k_e) değerleri; d_l , d_{tr} , s , f_{ck} ve N/N_{max} gibi değişkenler dikkate alınarak hesaplanmış ve karşılaştırmalı olarak Tablo 4.3'te sunulmuştur. Buna karşılık, Şekil 4.5'te söz konusu parametrelerin etkisi altında moment-eğrilik analizlerinden elde edilen k_e değerlerinin değişimi grafiksel olarak gösterilmiştir. Bu veriler, kesit parametrelerindeki değişimlerin etkin rijitlik üzerindeki etkilerinin sayısal olarak değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır.

Tablo 4.3. Betonarme perde duvar kesitleri için moment-eğrilik ilişkilerinden hesaplanan etkin kesit rijitlik katsayı değerleri

a) Farklı sargı donatısı oranı

Etkin Kesit Rijitlik Katsayıları (k_e)							
f_{ck} (MPa)	Boyuna Donatı		N/N_{max}	Sargı Donatısı Oranı			
	Uç bölgesi	Gövde Bölgesi		$\Phi 8/50$ mm	$\Phi 10/50$ mm	$\Phi 12/50$ mm	$\Phi 14/50$ mm
30	$\Phi 18$ mm	$\Phi 14$ mm	0.10	0.308	0.313	0.317	0.320
			0.20	0.349	0.355	0.360	0.365
			0.30	0.383	0.388	0.393	0.398

b) Farklı sargı donatısı aralığı

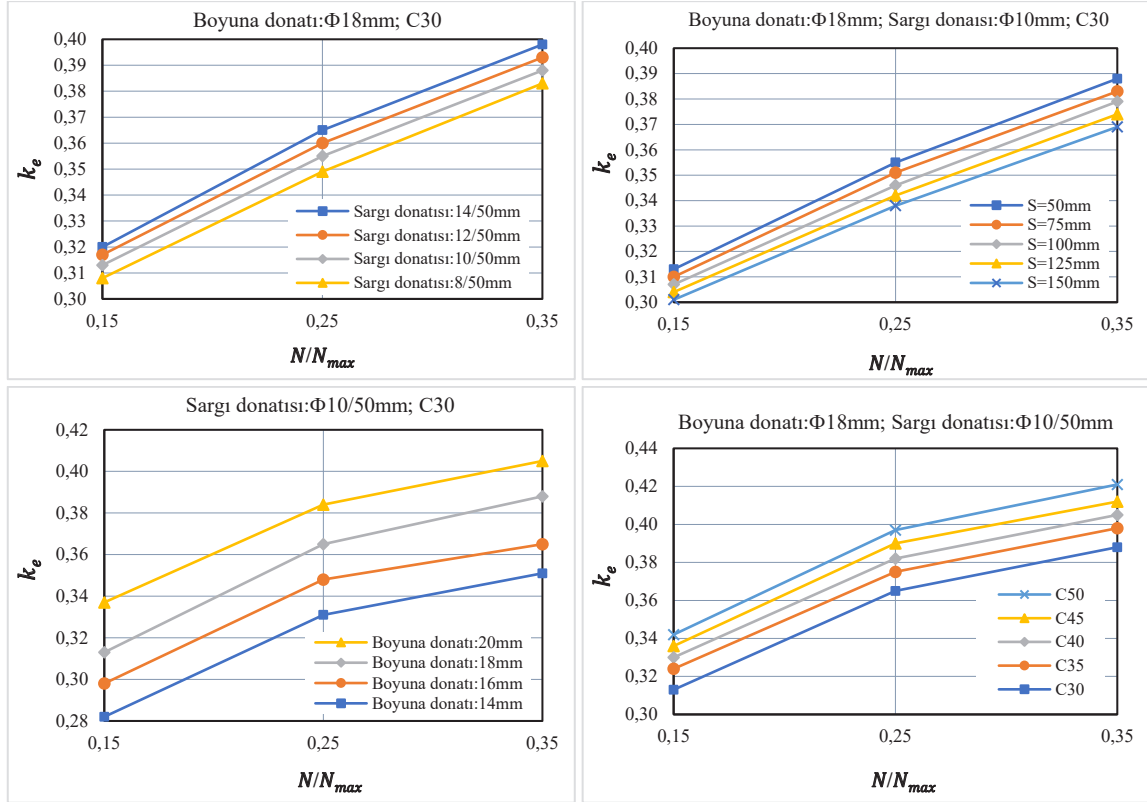
f_{ck} (MPa)	Boyuna Donatı		N/N_{max}	Sargı Donatısı Aralığı				
	Uç bölgesi	Gövde Bölgesi		$\Phi 10/50$ mm	$\Phi 10/75$ mm	$\Phi 10/100$ mm	$\Phi 10/125$ mm	$\Phi 10/150$ mm
30	$\Phi 18$ mm	$\Phi 14$ mm	0.10	0.313	0.310	0.307	0.304	0.301
			0.20	0.355	0.351	0.346	0.342	0.338
			0.30	0.388	0.383	0.379	0.374	0.369

c) Uç bölgesi farklı boyuna donatı oranı

f_{ck} (MPa)	Sargı Donatısı	Gövde Bölgesi Boyuna Donatı	N/N_{max}	Uç Bölgesi Boyuna Donatı			
				$\Phi 14$ mm	$\Phi 16$ mm	$\Phi 18$ mm	$\Phi 20$ mm
30	$\Phi 10/50$ mm	$\Phi 14$ mm	0.10	0.282	0.298	0.313	0.337
			0.20	0.331	0.348	0.355	0.384
			0.30	0.351	0.365	0.388	0.405

d) Farklı beton sınıfı

f_{ck} (MPa)	Sargı Donatısı	Boyuna Donatı		N/N_{max}	Beton Sınıfı				
		Uç bölgesi	Gövde Bölgesi		C30	C35	C40	C45	C50
30	$\Phi 10/50$ mm	$\Phi 18$ mm	$\Phi 14$ mm	0.10	0.313	0.324	0.330	0.336	0.342
				0.20	0.355	0.375	0.382	0.390	0.397
				0.30	0.388	0.398	0.405	0.412	0.421



Şekil 4.5. Betonarme perde duvar kesitlerinde farklı tasarım parametrelerine bağlı olarak moment-eğrilik ilişkilerinden hesaplanan etkin kesit rijitlik katsayılarının karşılaştırmalı değişimi.

4.2.2. Betonarme perde duvarların yönetmelikler ve araştırmacılara göre hesaplanan etkin kesit rijitlik değerleri

Bu bölümde, betonarme perde duvarlar için etkin eğilme rijitliği katsayısı (k_e) değerleri, ulusal ve uluslararası yönetmelikleri ile literatürde önerilen araştırmacı yaklaşımları temel alınarak karşılaştırmalı bir biçimde incelenmiştir. Etkin kesit rijitliğinin belirlenmesinde kullanılan kabuller, özellikle çatlamış kesit davranışının temsilinde, yapısal analiz sonuçlarının doğruluğunu doğrudan etkilemektedir.

Bu bağlamda, ilgili yönetmeliklerde belirtilen rijitlik azaltma katsayıları ile literatürde önerilen ampirik ve analitik modeller birlikte değerlendirilmiştir (Tablo 4.4). Ulusal yönetmeliklerden TBDY (2018) ve uluslararası standartlardan Eurocode 8 (2004, 2005), ACI 318 (2014) ve ASCE/SEI 41 (2017) kapsamında tanımlanan etkin rijitlik kabulleri, perde duvar elemanları için karşılaştırmalı analizlerde temel alınmıştır. Buna ek olarak, literatürde yer alan ve betonarme perde duvarların etkin rijitliğinin belirlenmesine yönelik geliştirilmiş ampirik ve analitik yaklaşımlar da çalışmaya dahil edilmiştir. Bu kapsamda, Bisikis ve Fardis (2004), Bisikis (2007), Avşar vd. (2014) ile Foroughi ve Yüksel (2025) tarafından önerilen modeller incelenmiş ve yönetmelik yaklaşımlarıyla karşılaştırılmıştır.

Tablo 4.4. Betonarme perde duvarlar için etkin eğilme rijitliğinin belirlenmesine yönelik farklı yaklaşımlar

Literatür ve Yönetmelikler	Etkin Kesit Rijitliği
Moment-eğrilik ilişkisi	$k_e = EI_e/EI; \quad EI_e = M_y/\theta_y, \quad E_c = 3250\sqrt{f_{ck}} + 14000 \text{ MPa}$
TBDY (2018)	$EI_e = 0.50E_cI_c$
TBDY (2018) Yığılı plastik davranış kapsamı	$(EI)_e = \frac{M_y L_s}{\theta_y 3}$ $\theta_y = \frac{M_y L_s}{3EI}$ $\theta_y = \frac{\phi_y L_s}{3} + 0.0015\eta \left(1 + 1.5 \frac{h}{L_s}\right) + \frac{\phi_y d_b f_{ye}}{8\sqrt{f_{ce}}}$ Perde duvar için: $\eta = 1$
Eurocode 8 (2004)	$EI_{\text{eff}} \approx 0.5 EI_{\text{gross}}$
Eurocode 8-Part 3 (2005)	$EI_e = \frac{M_y L_v}{3\theta_y}, \quad \theta_y = \phi_y \frac{L_v + a_v z}{3} + 0.0013 + \phi_y \frac{d_{bl} f_y}{6\sqrt{f_c}}, \quad \phi_y = \frac{\varepsilon_y}{d - d'}$ $V_{Rd,c} = [C_{Rd,c} K (100\rho_1 f_{ck})^{1/3} + K_1 \sigma_{cp}] b_w d \quad (N)$ $K = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2, \quad \rho_1 = \frac{A_s}{b_w d} \leq 0.02, \quad \sigma_{cp} = \frac{N_{Ed}}{A_c} < 0.2 f_{cd}$
Biskinis (2007)	$\frac{EI_{\text{eff}}}{E_c I_c} = a \left(0.8 + \ln \left[\max\left(\frac{L_s}{h}; 0.6\right)\right]\right) \left(1 + 0.048 \min\left(50 \text{ MPa}; \frac{N}{A_c}\right)\right)$ Perde duvar için: $a = 0.115$
Biskinis and Fardis (2004)	$EI_{\text{eff}} = M_y L_s / 3 \theta_y$ $\theta_y = \phi_y \frac{L_s + a_v z}{3} + 0.0013 + a_{sl} \cdot \frac{\phi_y d_{bl} f_y}{8\sqrt{f_c}}, \quad L_s = \frac{M}{V}, \quad \text{Perde duvar için: } a_{sl} = 1$ $V_{Rc} = \left\{ \max \left[180(100\rho_1)^{1/3} 35 \sqrt{1 + \sqrt{\frac{0.2}{d}} f_c^{1/6}} \right] \left(1 + \sqrt{\frac{0.2}{d}}\right) f_c^{1/3} + 0.15 \frac{N}{A_c} \right\} b_w d$
Fenwick and Bull (2000)	$\frac{I_e}{I_g} = 0.267 \left(1 + 4.4 \frac{P_u}{f'_c A_g}\right) \left(0.62 + \frac{190}{f_y}\right) (0.76 + 0.005 f'_c)$
Foroughi ve Yüksel (2025)	$k_{e,prop} = [0.0012(f_{ck}) + 0.28] \times [0.029(d_i) + 0.48] \times [-0.006(d_{tr}) + 1.06]$ $\times [-0.0005(s) + 1.2] \times \left[1.04 \left(\frac{N}{A_c f_{ck}}\right) + 0.7\right]$
ACI 318 (2014)	Çatlamış perde duvar için: $0.35E_c I_c$ Çatlamamış perde duvar için: $0.70E_c I_c$
ASCE/SEI 41 (2017)	Çatlamış perde duvar için: $0.35E_{ce} A_g$

TBDY (2018), Eurocode 8 (2004), ACI 318 (2014) ve ASCE/SEI 41 (2017) yönetmelikleri betonarme perde duvarların etkin eğilme rijitliğini farklı yaklaşım düzeylerinde tanımlamaktadır. TBDY (2018), hem sabit katsayılara dayalı ($0.50E_cI_c$) basitleştirilmiş ifadeler hem de moment-eğrilik ilişkisi, kesme deformasyonları ve donatı etkilerini içeren doğrusal olmayan modeller aracılığıyla en kapsamlı ve parametre duyarlılığı yüksek yaklaşımı sunarak gerçekçi davranışın temsilinde öne çıkmaktadır. Buna karşılık Eurocode 8 (2004), etkin rijitliği brüt kesit rijitliğinin yaklaşık %50'si olarak kabul eden pratik bir yaklaşım benimsemekte, ancak kesit ve yükleme koşullarına bağlı değişkenleri doğrudan dikkate almamaktadır. ACI 318 (2014) ve ASCE/SEI 41 (2017) ise çatlamış kesit rijitliğini genellikle $0.35E_cI$ mertebesinde sabit katsayılarla tanımlayarak mühendislik uygulamalarında güvenli tarafta kalan, ancak sınırlı parametre hassasiyetine sahip ampirik modeller sunmaktadır.

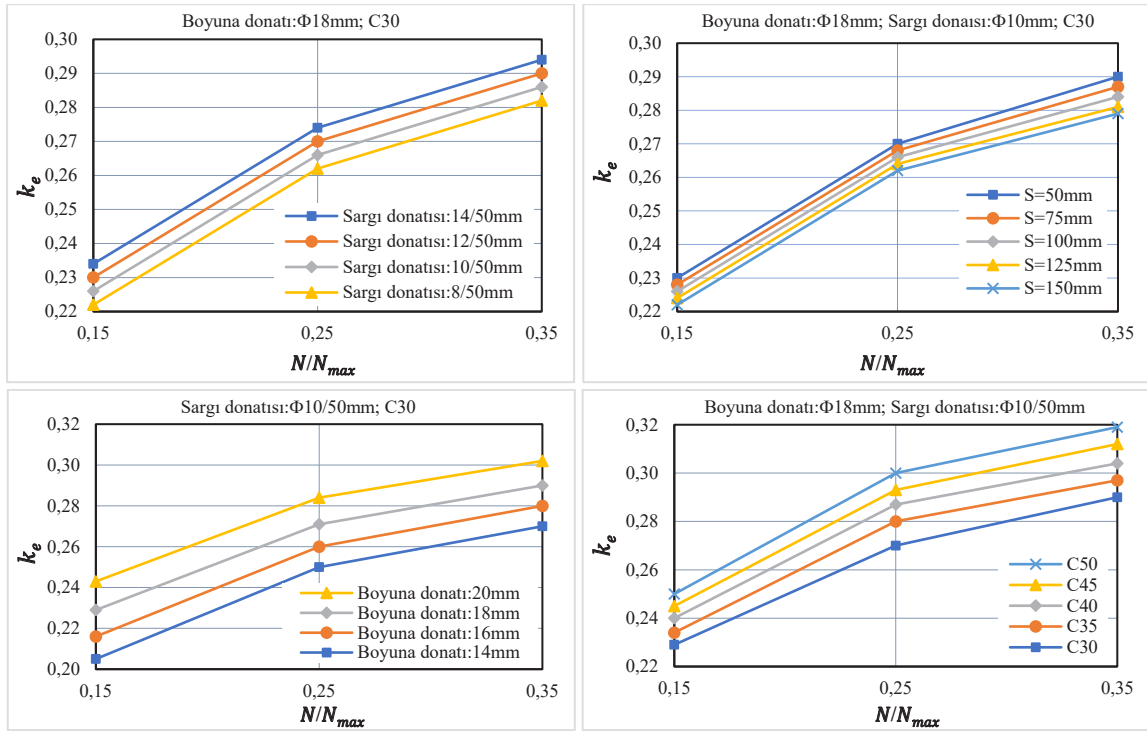
4.2.3. TBDY (2018) kapsamında yığılı plastik davranış modeline göre hesaplanan etkin rijitlik değerleri

Bu bölümde, betonarme perde duvar elemanlarının etkin eğilme rijitliği (k_e) katsayıları, TBDY (2018)'de tanımlanan yığılı plastik davranış yaklaşımı esas alınarak belirlenmiştir. Söz konusu yaklaşımda, eleman davranışı plastikleşmenin belirli bölgelerde yoğunlaştığı kabulü ile modellenmekte olup, çatlama sonrası kesit rijitliğinin temsili için yönetmelikte tanımlanan indirgeme esasları kullanılmaktadır. Bu çerçevede, perde duvar kesitlerine ait etkin rijitlik değerleri, ilgili kuramsal kabuller doğrultusunda ve Tablo 4.4'te sunulan bağıntılar yardımıyla analitik olarak hesaplanmıştır.

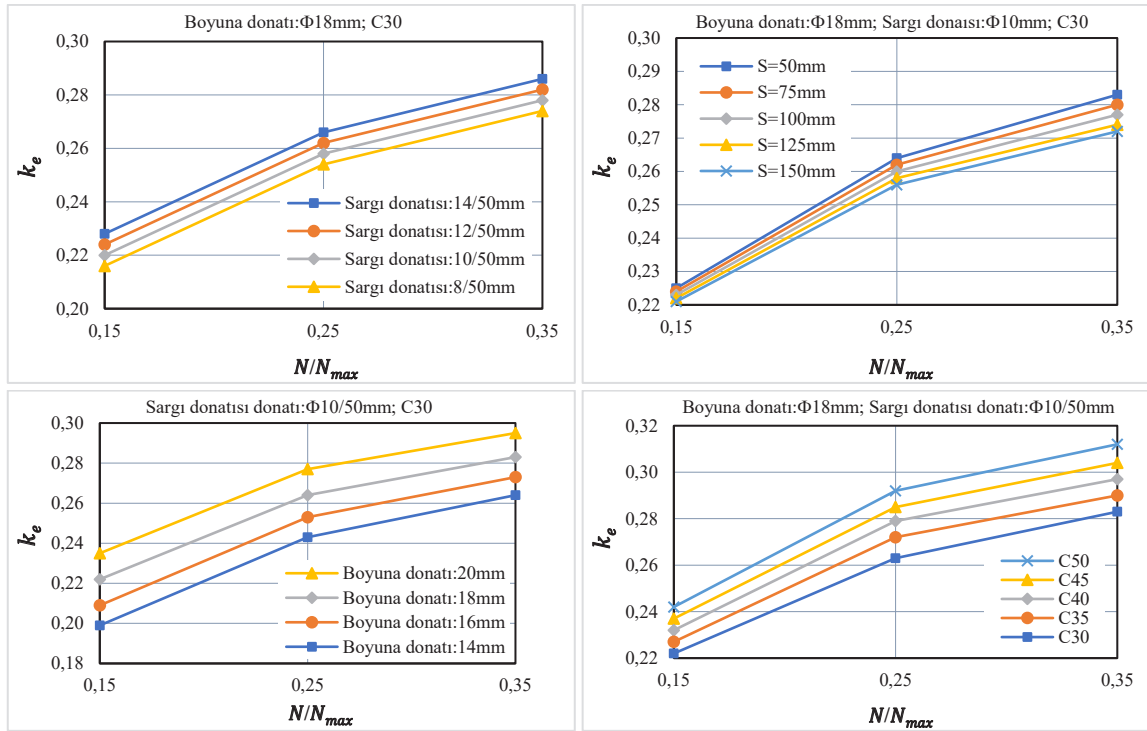
Elde edilen etkin eğilme rijitliği katsayıları, farklı yönetmelik yaklaşımları ve literatürde önerilen modeller ile karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Bu kapsamda, TBDY (2018) esaslarına göre belirlenen k_e değerlerinin tasarım parametrelerine bağlı değişimi Şekil 4.6'da sunulmakta olup, yığılı plastik davranış modelinin kesit rijitliği üzerindeki etkileri sistematik biçimde ortaya konulmaktadır. Buna karşılık, Eurocode 8 (2005) kapsamında öngörülen etkin rijitlik kabullerine göre elde edilen sonuçlar Şekil 4.7'de verilmiş ve iki farklı yönetmeliğin rijitlik tanımlamaları arasındaki farklılıkların karşılaştırılmasına olanak sağlanmıştır.

Yönetmelik yaklaşımlarına ek olarak, literatürde yer alan analitik modeller de değerlendirmeye dahil edilmiştir. Bu doğrultuda, Biskinis ve Fardis (2004) tarafından önerilen modele göre hesaplanan k_e katsayısının tasarım parametrelerine bağlı değişimi Şekil 4.8'de sunulmuştur. Benzer şekilde, Biskinis (2007) tarafından geliştirilen model kullanılarak elde edilen k_e değerlerinin parametrelerle ilişkisi Şekil 4.9'da gösterilmiştir. Ayrıca, Fenwick ve Bull (2000) tarafından önerilen yöntemle göre belirlenen k_e katsayılarının değişimi Şekil 4.10'da verilmiş ve karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

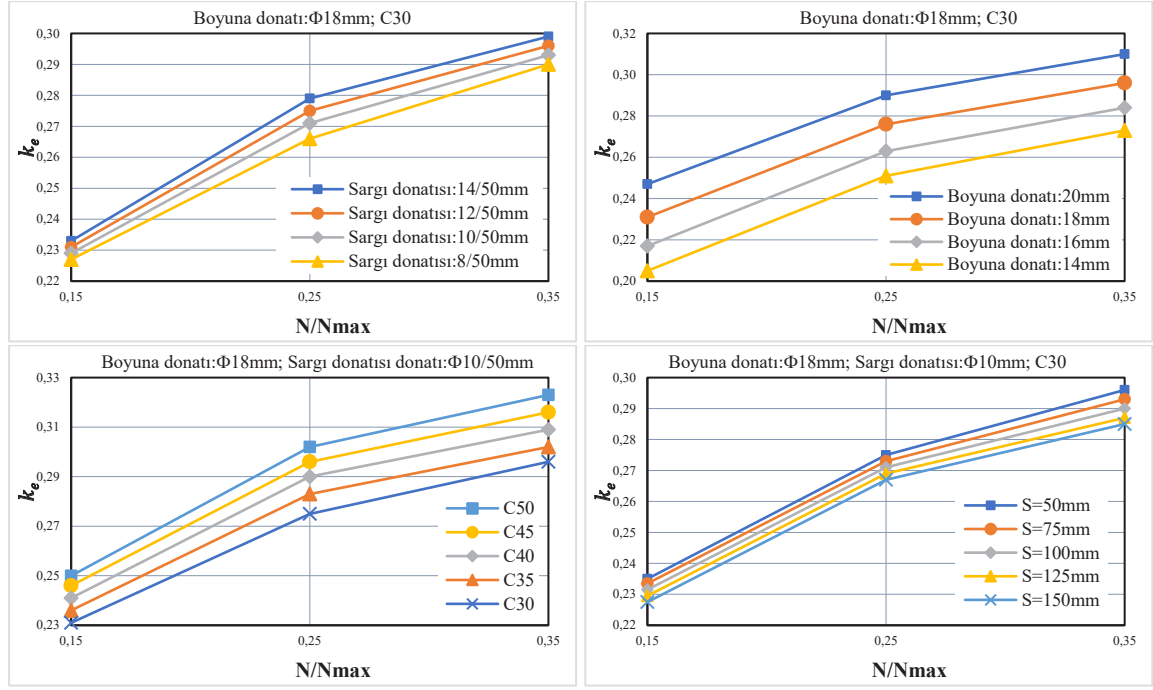
Tüm bu sonuçlar birlikte ele alındığında, betonarme perde duvar kesitlerinin etkin eğilme rijitliği katsayısının, kullanılan hesap yöntemi ve dikkate alınan parametrelere bağlı olarak önemli ölçüde değişkenlik gösterdiği anlaşılmaktadır. Bu durum, etkin rijitliğin belirlenmesinde yöntem seçiminin mühendislik değerlendirmeleri açısından kritik bir rol oynadığını ve farklı yaklaşımların temsil kabiliyetlerinin dikkatle incelenmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.



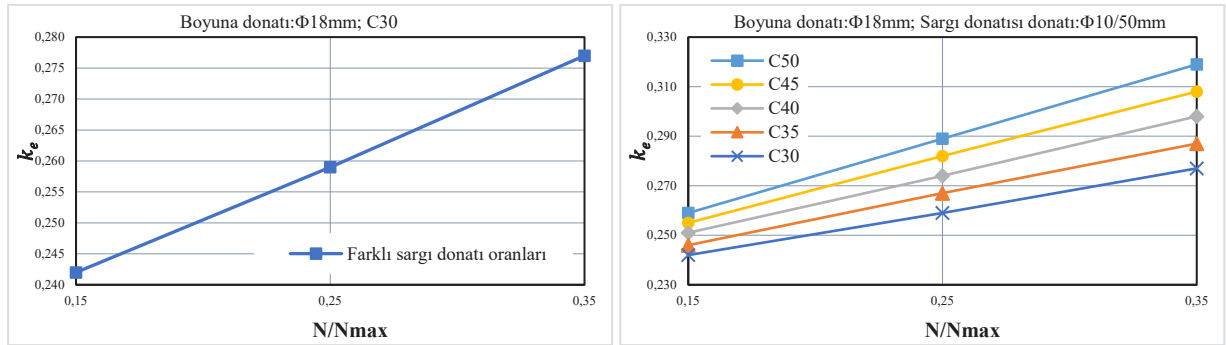
Şekil 4.6. Betonarme perde duvar kesitleri için TBDY (2018) kapsamında yığılı plastik davranış yaklaşımına göre elde edilen etkin kesit rijitliği katsayısının parametrelerle değişimi



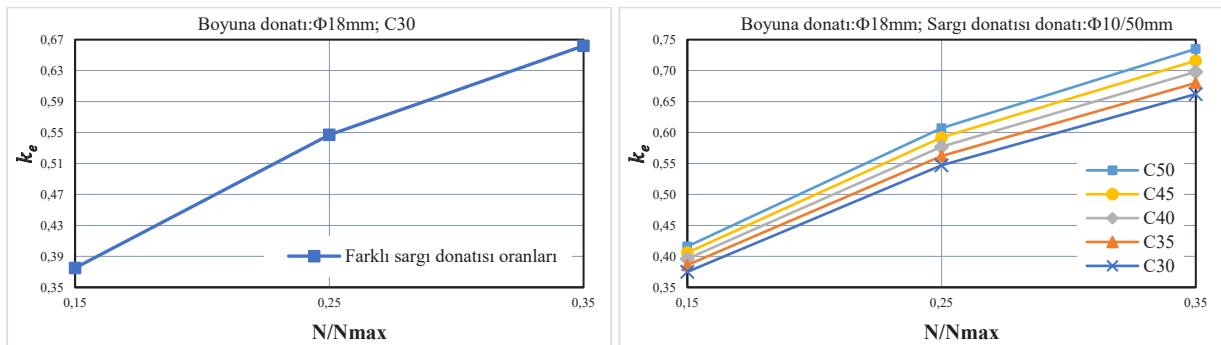
Şekil 4.7. Betonarme perde duvar kesitleri için Eurocode 8 (2005) esaslarına göre belirlenen etkin eğilme rijitliği katsayısı ilişkilerinin karşılaştırmalı gösterimi



Şekil 4.8. Betonarme perde duvar kesitlerin Bisikis ve Fardis (2004) modeline göre hesaplanan etkin eğilme rijitliği katsayısının farklı tasarım parametrelerine bağlı değişimi



Şekil 4.9. Betonarme perde duvar kesitlerin Bisikis (2007) yaklaşımından elde edilen etkin eğilme rijitliği katsayısının farklı parametrelerine bağlı değişimi



Şekil 4.10. Betonarme perde duvar kesitlerin Fenwick ve Bull (2000) yaklaşımından elde edilen etkin eğilme rijitliği katsayısının farklı parametrelerine bağlı değişimi

4.2.4. Foroughi ve Yüksel (2025)'e göre betonarme perde duvarlar için alternatif etkin rijitlik denkleminin geliştirilmesi

Betonarme perde duvarların moment-eğrilik analizlerinden elde edilen bulgular, kesit davranışını etkileyen başlıca parametreleri net biçimde ortaya koymaktadır. Eksenel yük düzeyi, boyuna ve enine donatı özellikleri ile beton basınç dayanımı, kesitin hem elastik hem de plastik bölgelerdeki moment-eğrilik davranışını doğrudan şekillendirmektedir. Bu parametreler, yalnızca taşıma kapasitesini belirlemekle kalmayıp, aynı zamanda çatlamış kesitlerde etkin eğilme rijitliğinin değişkenliğine de önemli ölçüde katkı sağlamaktadır. Bu kapsamda, betonarme perde duvarların doğrusal olmayan davranışını daha güvenilir ve gerçekçi biçimde temsil edebilmek amacıyla, farklı tasarım parametrelerini dikkate alan pratik ve uygulanabilir hesap yöntemlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu gereklilik doğrultusunda, Foroughi ve Yüksel (2025) tarafından süneklik düzeyi yüksek betonarme perde duvar kesitleri için basitleştirilmiş bir etkin rijitlik bağıntısı geliştirilmiştir. Önerilen model, mühendislik uygulamalarında doğrudan kullanılacak şekilde sadeleştirilmiş olup, kesit ve malzeme davranışını temsil eden temel parametreleri içermektedir.

Söz konusu modelde perde duvarların etkin rijitlik katsayısı (k_e), eksenel yük seviyesi (N/N_{\max}), boyuna donatı çapı (d_l), enine donatı çapı (d_{tr}), enine donatı aralığı (s) ve beton basınç dayanımı (f_{ck}) gibi kritik tasarım değişkenlerinin fonksiyonu olarak tanımlanmaktadır. Bu parametreler, moment-eğrilik analizlerinden elde edilen sayısal verilerle kalibre edilmiş olup, çatlamış kesitler için etkin eğilme rijitliğinin güvenilir ve tutarlı bir biçimde tahmin edilmesini sağlamaktadır.

Analiz bulguları, N/N_{\max} , d_l , d_{tr} , s ve f_{ck} parametrelerindeki değişimlerin, önerilen etkin eğilme rijitliği katsayısı ($k_{e,prop}$) üzerinde belirgin ve sistematik bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Bu kapsamda, betonarme perde duvar kesitleri için geliştirilen $k_{e,prop}$ bağıntısı, kesit ve malzeme davranışını temsil eden temel tasarım değişkenlerinin bir fonksiyonu olarak Denklem (4.1)'de tanımlanmıştır. Önerilen ifade, etkin rijitliğin farklı tasarım koşulları altındaki değişimini dikkate alarak, hem tasarım hem de performansa dayalı mühendislik uygulamalarında kullanılacak rasyonel ve uygulanabilir bir hesap çerçevesi sunmaktadır.

$$k_{e,prop} = f \left\{ \left(\frac{N}{A_c f_{ck}} \right), (d_l), (d_{tr}), (s), (f_{ck}) \right\} \quad (4.1)$$

Denklem (4.1), etkin kesit rijitliğinin çok parametreliliğini vurgulamakta olup, her bir değişkenin kesit davranışına katkısını bütüncül bir çerçevede değerlendirmeye imkan tanımaktadır. Sayısal analiz sonuçlarına dayanarak, regresyon analizi ile $k_{e,prop}$ ve f_{ck} parametrelerinin ilişkileri Denklem (4.2) ile elde edilir.

$$k_{e,cal_1} = 0.0012(f_{ck}) + 0.28 \quad (4.2)$$

Etkin kesit rijitliğinin k_{e,cal_1} oranı ile d_l arasındaki ilişki Denklem (4.3) ile elde edilir.

$$k_{e,cal_2} = 0.029(d_l) + 0.48 \quad (4.3)$$

Etkin kesit rijitliğinin [$k_{e,cal_1} \times k_{e,cal_2}$] oranı ile d_{tr} arasındaki ilişki Denklem (4.4) ile elde edilir.

$$k_{e,cal_3} = -0.006(d_{tr}) + 1.06 \quad (4.4)$$

Etkin kesit rijitliğinin [$k_{e,cal_1} \times k_{e,cal_2} \times k_{e,cal_3}$] oranı ile s arasındaki ilişki Denklem (4.5) ile elde edilir.

$$k_{e,cal_4} = -0.0005(s) + 1.2 \quad (4.5)$$

Etkin kesit rijitliğinin [$k_{e,cal_1} \times k_{e,cal_2} \times k_{e,cal_3} \times k_{e,cal_4}$] oranı ile $N/A_c f_{ck}$ arasındaki ilişki Denklem (4.6) ile elde edilir.

$$k_{e,cal_5} = 1.04 \left(\frac{N}{A_c f_{ck}} \right) + 0.7 \quad (4.6)$$

Perde duvar kesitlerinin etkin rijitlik davranışını ortaya koymak amacıyla gerçekleştirilen parametrik analizler sonucunda; eksenel yük oranı (N/N_{max}), boyuna donatı çapı (d_l), enine donatı çapı (d_{tr}), enine donatı aralığı (s) ve beton basınç dayanımı (f_{ck}) gibi temel tasarım değişkenlerinin etkileri dikkate alınarak bir tahmin modeli geliştirilmiştir. Önerilen etkin eğilme rijitliği katsayısı ($k_{e,prop}$) bağıntısı, her bir parametrenin katkısını ayrı ayrı temsil eden alt regresyon ifadelerinin çarpımı esasına dayanmaktadır. Bu kapsamda, değişkenlerin rijitlik üzerindeki etkileri bağımsız katsayılar aracılığıyla modellenmiş ve bu katsayıların birleşimiyle genel bir ifade elde edilmiştir. Söz konusu yaklaşım, parametreler arası etkileşimleri dolaylı olarak yansıtarak daha gerçekçi ve tutarlı bir rijitlik tahmini sunmaktadır. Dikdörtgen kesitli betonarme perde duvarlar için geliştirilen nihai etkin rijitlik katsayısı bağıntısı, Foroughi ve Yüksel (2025) tarafından önerilmiş olup Denklem (4.7)'de verilmektedir.

$$k_{e,prop} = [0.0012(f_{ck}) + 0.28] \times [0.029(d_l) + 0.48] \times [-0.006(d_{tr}) + 1.06] \times [-0.0005(s) + 1.2] \times \left[1.04 \left(\frac{N}{A_c f_{ck}} \right) + 0.7 \right] \quad (4.7)$$

Tablo 4.1'de ayrıntıları sunulan betonarme perde duvar kesitlerine ait rijitlik katsayısı değerleri ($k_{e,prop}$), farklı tasarım parametreleri dikkate alınarak, Foroughi ve Yüksel tarafından önerilen etkin rijitlik bağıntısı (Denklem 5.7) kullanılarak hesaplanmıştır (bkz. Tablo 4.5). Elde edilen etkin rijitlik katsayılarının, değişen parametrelere bağlı olarak gösterdiği karşılaştırmalı davranış, grafiksel analiz yöntemiyle değerlendirilmiş ve sonuçlar Şekil 4.11'de sunulmuştur.

Tablo 4.5. Betonarme perde duvar kesitleri için moment-eğrilik ilişkilerinden hesaplanan etkin rijitlik katsayısı değerleri

a) Farklı sargı donatısı oranı

Etkin Kesit Rijitlik Katsayıları (k_e)							
f_{ck} (MPa)	Boyuna Donatı		N/N_{max}	Sargı Donatısı Oranı			
	Uç bölgesi	Gövde Bölgesi		$\Phi 8/50$ mm	$\Phi 10/50$ mm	$\Phi 12/50$ mm	$\Phi 14/50$ mm
30	$\Phi 18$ mm	$\Phi 14$ mm	0.10	0.311	0.315	0.318	0.322
			0.20	0.349	0.353	0.357	0.362
			0.30	0.386	0.391	0.396	0.401

b) Farklı sargı donatısı aralığı

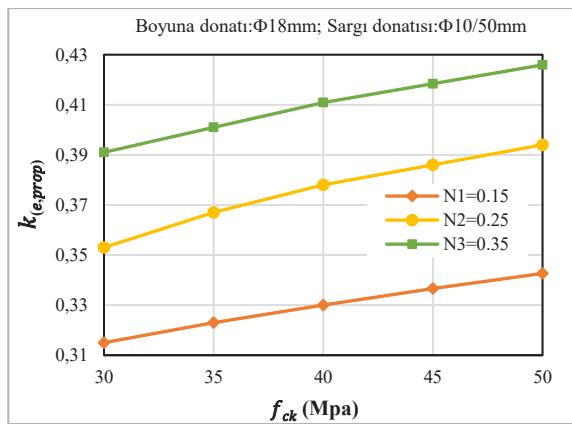
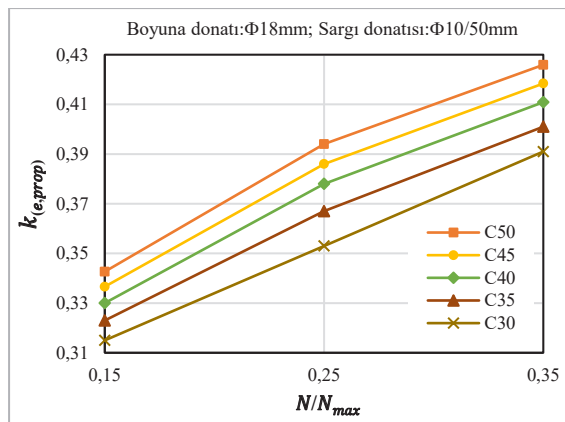
f_{ck} (MPa)	Boyuna Donatı		N/N_{max}	Sargı Donatısı Aralığı				
	Uç bölgesi	Gövde Bölgesi		$\Phi 10/50$ mm	$\Phi 10/75$ mm	$\Phi 10/100$ mm	$\Phi 10/125$ mm	$\Phi 10/150$ mm
30	$\Phi 18$ mm	$\Phi 14$ mm	0.10	0.315	0.312	0.308	0.304	0.301
			0.20	0.353	0.350	0.346	0.341	0.338
			0.30	0.391	0.387	0.383	0.379	0.375

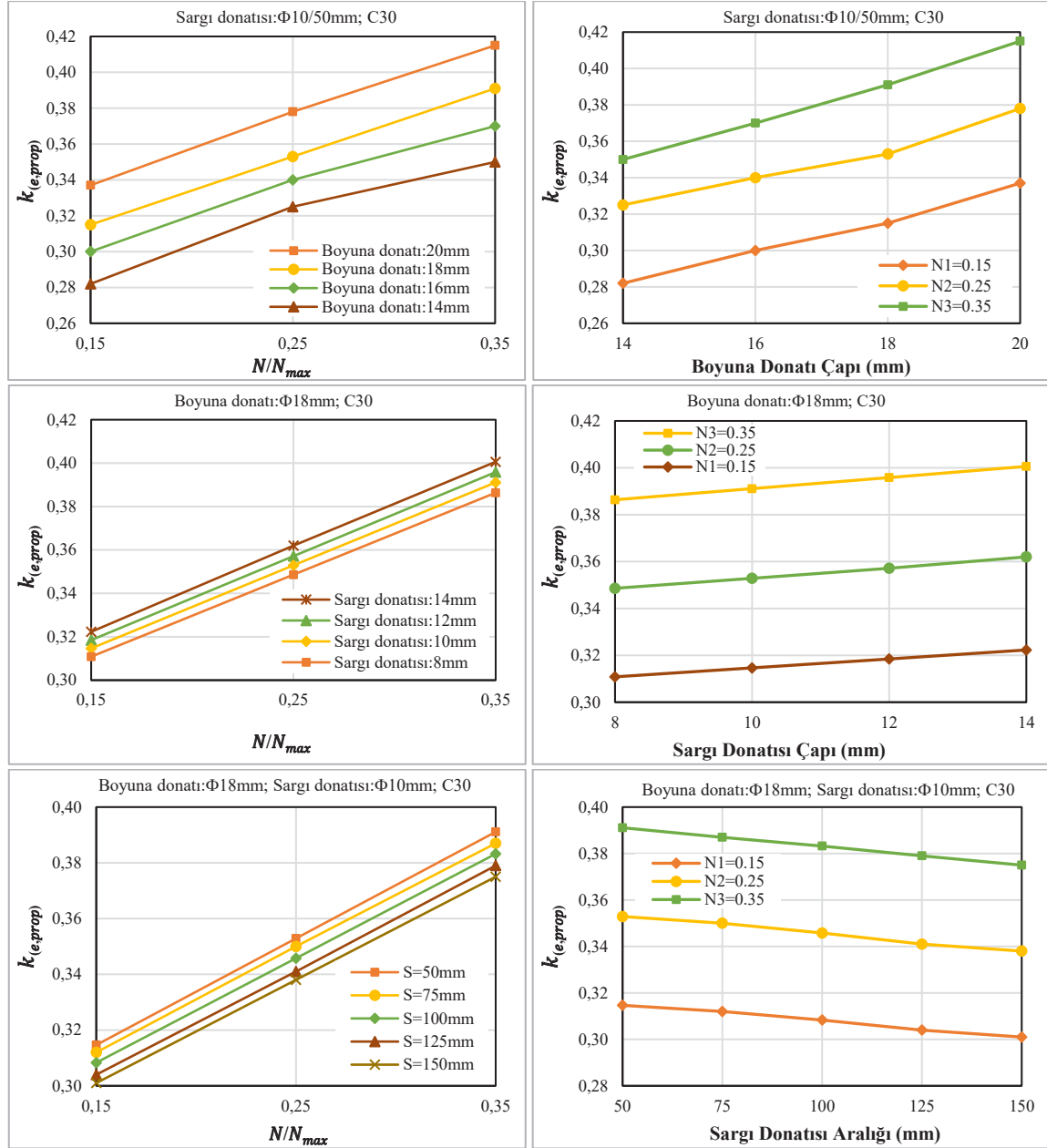
c) Uç bölgesi farklı boyuna donatı oranı

f_{ck} (MPa)	Sargı Donatısı	Gövde Bölgesi Boyuna Donatı	N/N_{max}	Uç Bölgesi Boyuna Donatı			
				$\Phi 14$ mm	$\Phi 16$ mm	$\Phi 18$ mm	$\Phi 20$ mm
30	$\Phi 10/50$ mm	$\Phi 14$ mm	0.10	0.282	0.300	0.315	0.337
			0.20	0.325	0.340	0.353	0.378
			0.30	0.350	0.370	0.391	0.415

d) Farklı beton sınıfı

f_{ck} (MPa)	Sargı Donatısı	Boyuna Donatı		N/N_{max}	Beton Sınıfı				
		Uç bölgesi	Gövde Bölgesi		C30	C35	C40	C45	C50
30	$\Phi 10/50$ mm	$\Phi 18$ mm	$\Phi 14$ mm	0.10	0.315	0.325	0.331	0.337	0.343
				0.20	0.353	0.370	0.380	0.388	0.394
				0.30	0.391	0.403	0.411	0.418	0.426





Şekil 4.11. Betonarme perde duvar kesitlerinde farklı tasarım parametre oranlarının etkin eğilme rijitliği katsayısı üzerindeki etkisinin karşılaştırmalı gösterimi

Betonarme perde duvar kesitlerine yönelik gerçekleştirilen parametrik analizlerde, etkin eğilme rijitliği katsayısının N/N_{max} , d_l , d_{tr} , s ve f_{ck} gibi temel tasarım değişkenlerine bağlı değişimi, çok değişkenli analiz yaklaşımı çerçevesinde parametrik olarak incelenmiştir. Bu kapsamda, betonarme perde duvarlar için farklı tasarım parametreleri altında moment-eğrilik analizlerinden elde edilen sayısal etkin eğilme rijitliği katsayıları ($k_{e,num}$) ile Denklem (4.7) ile hesaplanan etkin rijitlik katsayıları ($k_{e,prop}$) karşılaştırmalı olarak Tablo 4.6'da sunulmuş; önerilen bağıntının farklı parametre kombinasyonları altındaki performans sürekliliği ve tahmin güvenirliliği istatistiksel karşılaştırmalar aracılığıyla ortaya konulmuştur.

Tablo 4.6. Perde duvar kesitleri için hesaplanan etkin rijitlik katsayılarının karşılaştırılması

a) Farklı sargı donatısı oranı

f_{ck} (MPa)	Boyuna Donatı		Sargı Donatısı	N/N_{max}	$k_{e,num}$ (M- ϕ)	$k_{e,prop}$ (Denklem 4.7)	$k_{e,prop} / k_{e,num}$
	Uç bölgesi	Gövde Bölgesi					
30	$\Phi 18$ mm	$\Phi 14$ mm	$\Phi 8/50$ mm	0.10	0.308	0.311	1.010
				0.20	0.349	0.349	1.000
				0.30	0.383	0.386	1.008
			$\Phi 10/50$ mm	0.10	0.313	0.315	1.006
				0.20	0.355	0.353	0.994
				0.30	0.388	0.391	1.008
			$\Phi 12/50$ mm	0.10	0.317	0.318	1.003
				0.20	0.360	0.357	0.992
				0.30	0.393	0.396	1.008
			$\Phi 14/50$ mm	0.10	0.320	0.322	1.006
				0.20	0.365	0.362	0.992
				0.30	0.398	0.401	1.008

b) Farklı sargı donatısı aralığı

f_{ck} (MPa)	Boyuna Donatı		Sargı Donatısı	N/N_{max}	$k_{e,num}$ (M- ϕ)	$k_{e,prop}$ (Denklem 4.7)	$k_{e,prop} / k_{e,num}$
	Uç bölgesi	Gövde Bölgesi					
30	$\Phi 18$ mm	$\Phi 14$ mm	$\Phi 10/50$ mm	0.10	0.313	0.315	1.006
				0.20	0.355	0.353	0.994
				0.30	0.388	0.391	1.008
			$\Phi 10/75$ mm	0.10	0.310	0.312	1.006
				0.20	0.351	0.350	0.997
				0.30	0.383	0.387	1.010
			$\Phi 10/100$ mm	0.10	0.307	0.308	1.003
				0.20	0.346	0.346	1.000
				0.30	0.379	0.383	1.011
			$\Phi 10/125$ mm	0.10	0.304	0.304	1.000
				0.20	0.342	0.341	0.997
				0.30	0.374	0.379	1.013
			$\Phi 10/150$ mm	0.10	0.301	0.301	1.000
				0.20	0.338	0.338	1.000
				0.30	0.369	0.375	1.016

c) Uç bölgesi farklı boyuna donatı oranı

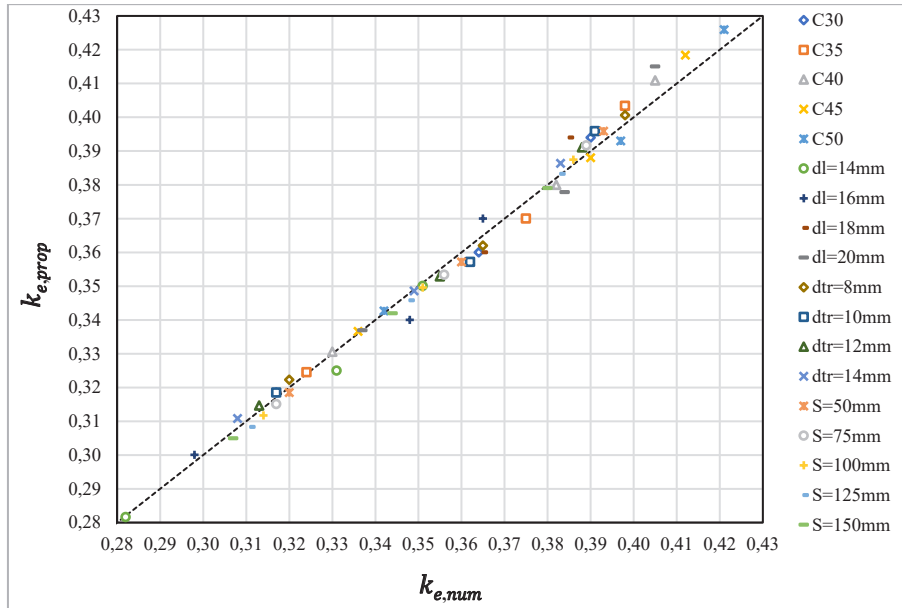
f_{ck} (MPa)	Sargı Donatısı	Boyuna Donatı		N/N_{max}	$k_{e,num}$ (M- ϕ)	$k_{e,prop}$ (Denklem 4.7)	$k_{e,prop} / k_{e,num}$
		Gövde Bölgesi	Uç Bölgesi				
30	$\Phi 10/50$ mm	$\Phi 14$ mm	$\Phi 14$ mm	0.10	0.282	0.282	1.000
				0.20	0.331	0.325	0.982
				0.30	0.351	0.350	0.997
			$\Phi 16$ mm	0.10	0.298	0.300	1.007
				0.20	0.348	0.340	0.977
				0.30	0.365	0.370	1.014
			$\Phi 18$ mm	0.10	0.313	0.315	1.006
				0.20	0.355	0.353	0.994
				0.30	0.388	0.391	1.008
			$\Phi 20$ mm	0.10	0.337	0.337	1.000
				0.20	0.384	0.378	0.984
				0.30	0.405	0.415	1.025

d) Farklı beton sınıfı

Boyuna Donatı		Sargı Donatısı	f_{ck} (MPa)	N/N_{max}	$k_{e,num}$ (M- ϕ)	$k_{e,prop}$ (Denklem 4.7)	$k_{e,prop} / k_{e,num}$
Uç bölgesi	Gövde Bölgesi						
$\Phi 18$ mm	$\Phi 14$ mm	$\Phi 10/50$ mm	C30	0.10	0.313	0.315	1.006
				0.20	0.355	0.353	0.994
				0.30	0.388	0.391	1.008
			C35	0.10	0.324	0.325	1.003
				0.20	0.375	0.370	0.987
				0.30	0.398	0.403	1.013
			C40	0.10	0.330	0.331	1.003
				0.20	0.382	0.380	0.995
				0.30	0.405	0.411	1.015
			C45	0.10	0.336	0.337	1.003
				0.20	0.390	0.388	0.995
				0.30	0.412	0.418	1.015
			C50	0.10	0.342	0.343	1.003
				0.20	0.397	0.394	0.992
				0.30	0.421	0.426	1.012

Perde duvarlara ilişkin olarak Denklem (4.7) kullanılarak hesaplanan etkin rijitlik katsayısı ($k_{e,prop}$) ile sayısal analizler sonucunda elde edilen rijitlik katsayısı ($k_{e,num}$) değerlerinin karşılaştırılması Şekil 4.12’de sunulmuştur. Söz konusu grafik, önerilen bağıntının farklı tasarım parametreleri altındaki performansını değerlendirmek amacıyla, iki değişken arasındaki ilişkiyi karşılaştırmalı olarak ortaya koymaktadır. Grafik genel olarak incelendiğinde, veri noktalarının büyük ölçüde $y = x$ doğrusu etrafında yoğunlaştığı görülmektedir. Bu durum, Denklem (4.7) ile elde edilen sonuçların sayısal analiz bulgularıyla yüksek düzeyde uyumlu olduğunu ve önerilen bağıntının güçlü bir tahmin kapasitesine sahip bulunduğunu göstermektedir. Nitekim determinasyon katsayısının (R^2) 0.99’un oldukça üzerinde olması, modelin açıklayıcılık düzeyinin son derece yüksek olduğunu ve iki veri seti arasındaki korelasyonun mükemmel yakın olduğunu ortaya koymaktadır.

Denklem (4.7) kullanılarak hesaplanan rijitlik katsayılarının sayısal analiz sonuçlarına oranı esas alındığında, ortalama değer 1.025 ve standart sapmanın %2.410 olarak belirlenmesi, önerilen modelin yüksek doğruluk düzeyine sahip olduğunu ve sonuçların düşük varyasyon gösterdiğini ortaya koymaktadır. Bu bulgu, önerilen bağıntının hem doğruluk hem de tutarlılık açısından güvenilir bir yaklaşım sunduğunu desteklemektedir. Elde edilen bulgular, önerilen etkin rijitlik bağıntısının betonarme perde duvarların davranışını başarılı bir şekilde temsil ettiğini göstermektedir. Ayrıca aksel yük düzeyi (N/N_{max}), boyuna ve enine donatı özellikleri (d_l, d_{tr}, s) ile beton basınç dayanımı (f_{ck}) gibi temel tasarım parametrelerinin rijitlik üzerindeki belirleyici etkileri açık biçimde ortaya konulmuştur. Bu nedenle, söz konusu parametrelerin tasarım ve analiz süreçlerinde bütüncül bir yaklaşımla dikkate alınması büyük önem arz etmektedir.

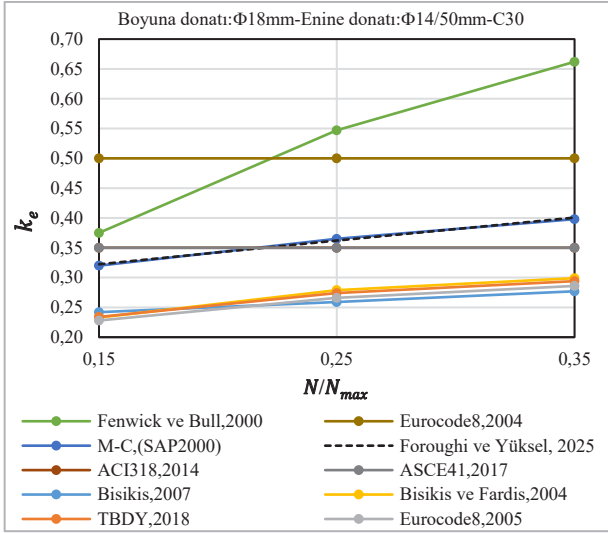
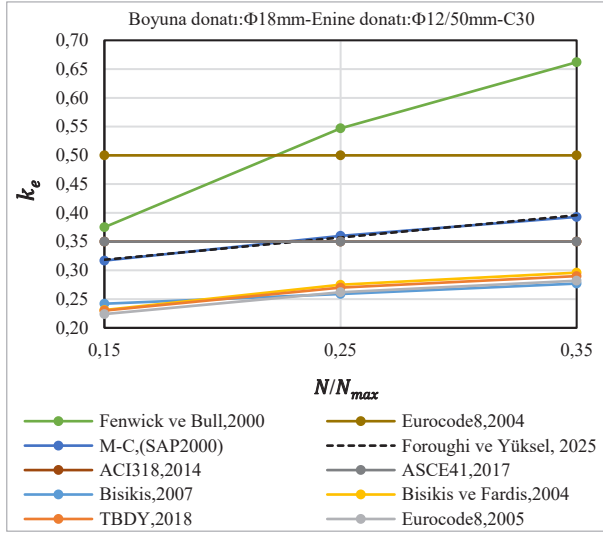
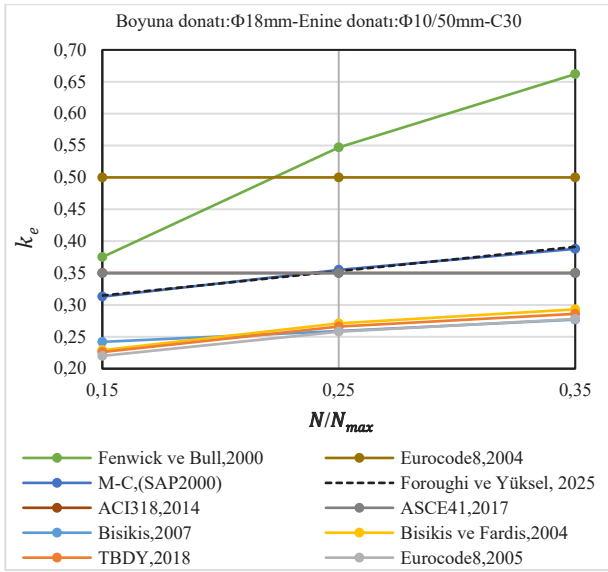
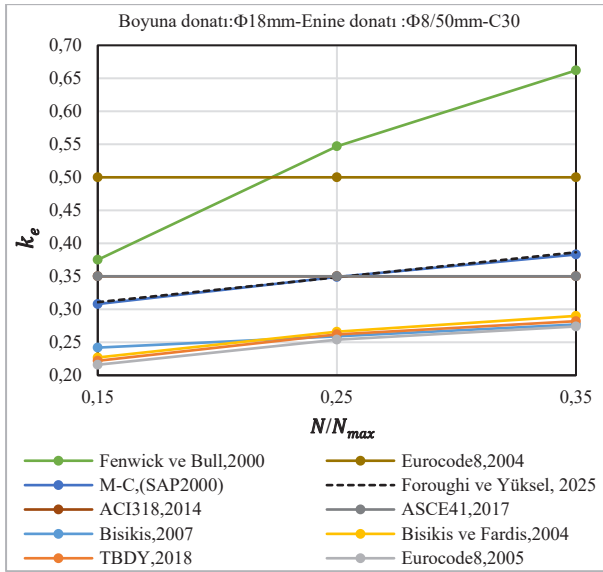


Şekil 4.12. Betonarme perde duvarların farklı tasarım parametrelerine göre $k_{e,prop} - k_{e,num}$ ilişkilerinin karşılaştırılması

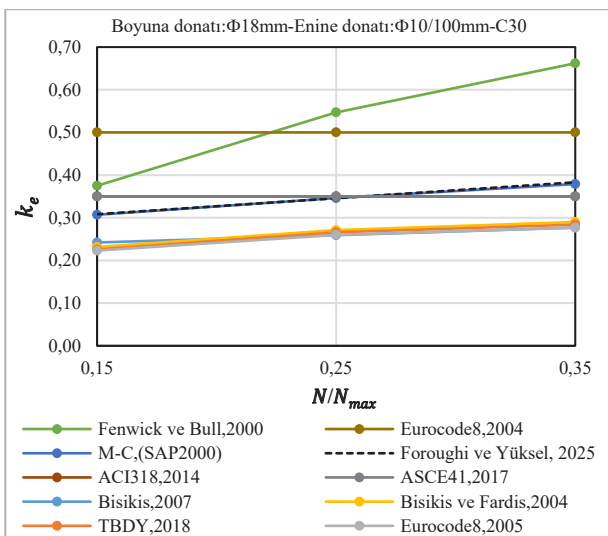
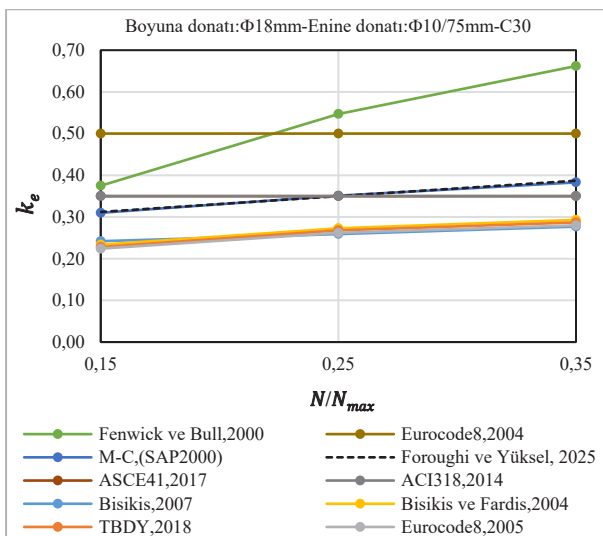
4.3. Betonarme Perde Duvarlar İçin Önerilen Etkin Rijitlik Bağıntılarının Karşılaştırılması

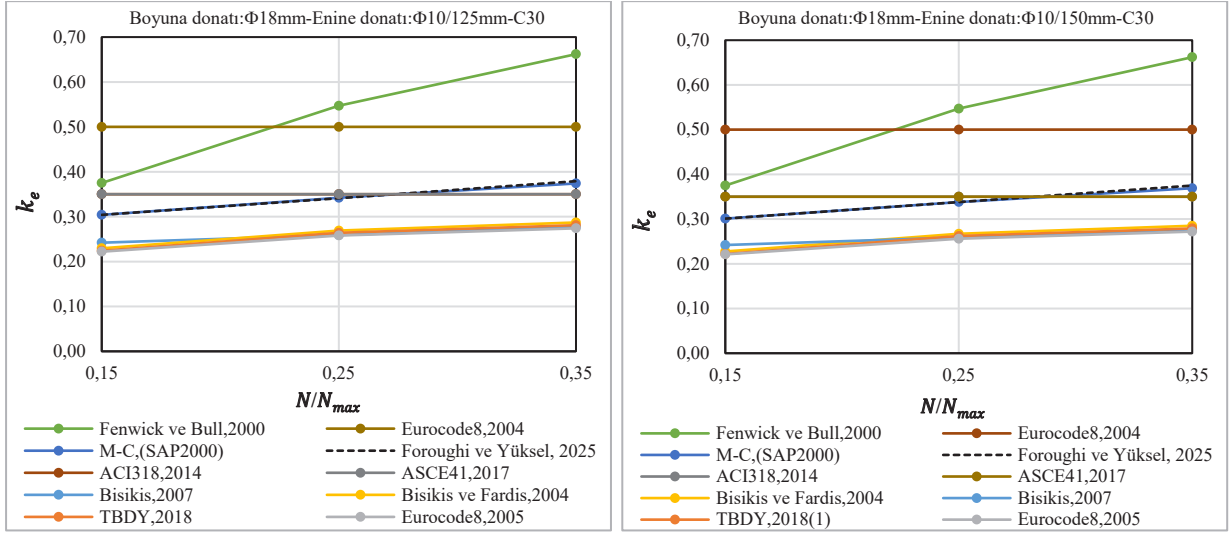
Bu bölümde, betonarme perde duvar elemanlarına ait etkin eğilme rijitliği katsayıları, farklı tasarım parametreleri dikkate alınarak karşılaştırmalı bir yaklaşımla incelenmiştir. Bu kapsamda, perde duvar modelleri için analitik yöntemlerle elde edilen etkin rijitlik katsayıları; moment-eğrilik ilişkilerine dayalı sayısal analiz sonuçları, yürürlükteki yönetmeliklerde önerilen yaklaşımlar ve literatürde yer alan ampirik bağıntılar ile birlikte değerlendirilmiştir.

Analizler, aksenal yük düzeyi (N/N_{max}), boyuna donatı çapı (d_l), enine donatı çapı (d_{tr}), enine donatı aralığı (s) ve beton basınç dayanımı (f_{ck}) gibi temel tasarım parametreleri çerçevesinde gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, incelemeler süneklilik düzeyi yüksek betonarme perde duvar modelleri özelinde ele alınarak, söz konusu parametrelerin etkin eğilme rijitliği üzerindeki etkileri sistematik biçimde ortaya konulmuştur. Her bir değişkenin rijitlik üzerindeki katkısı ayrı ayrı analiz edilmiş ve elde edilen bulgular karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçların görsel analizi amacıyla, farklı analiz prosedürlerine göre belirlenen etkin rijitlik oranlarının karşılaştırılması Şekil 4.13'te grafiksel olarak sunulmuştur. Bu grafik, çeşitli yöntemler arasındaki uyum düzeyini ve sapma eğilimlerini ortaya koyarak, önerilen bağıntıların performansının bütüncül bir şekilde değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır.

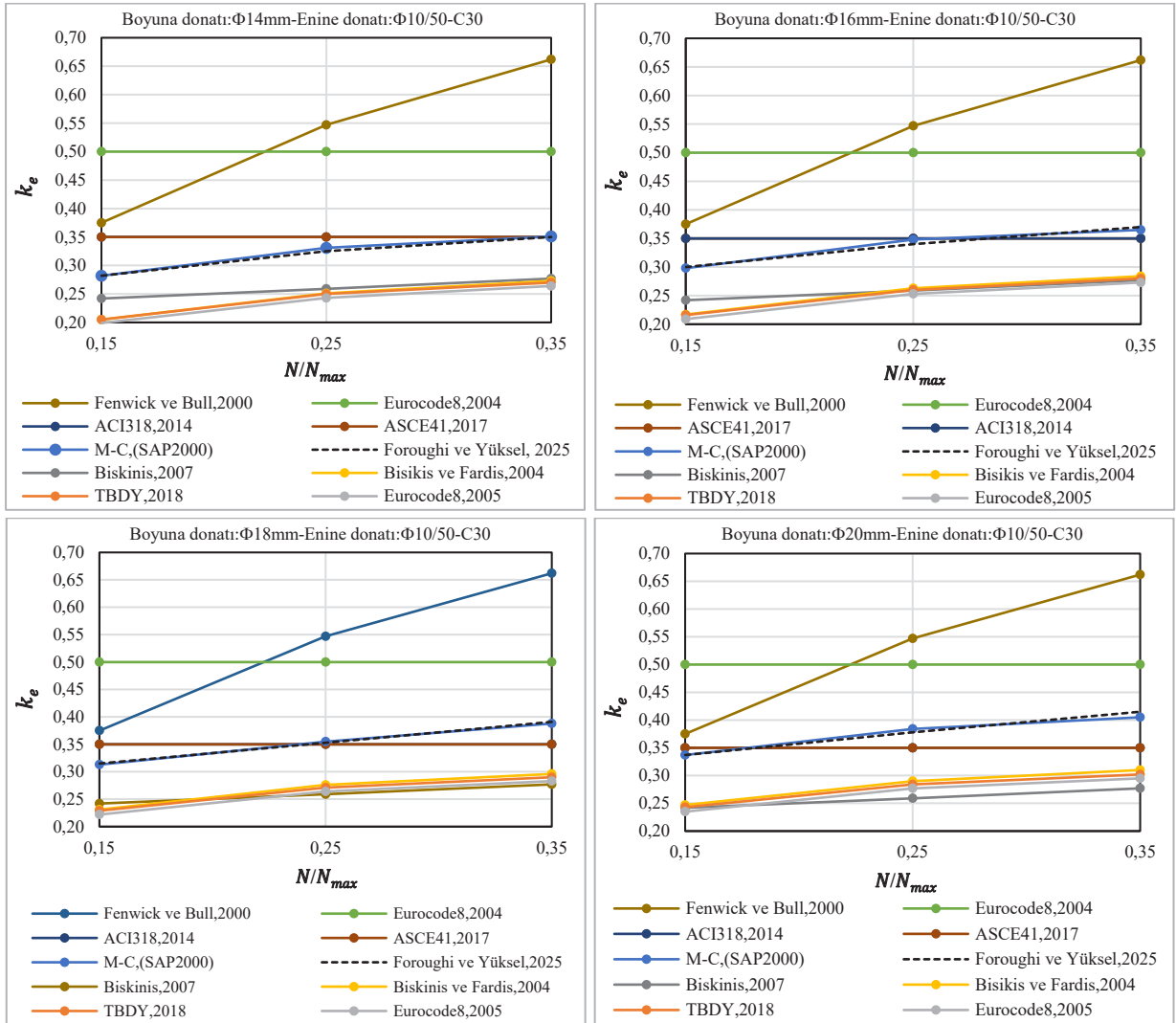


a) Farklı yatay donatı çapı

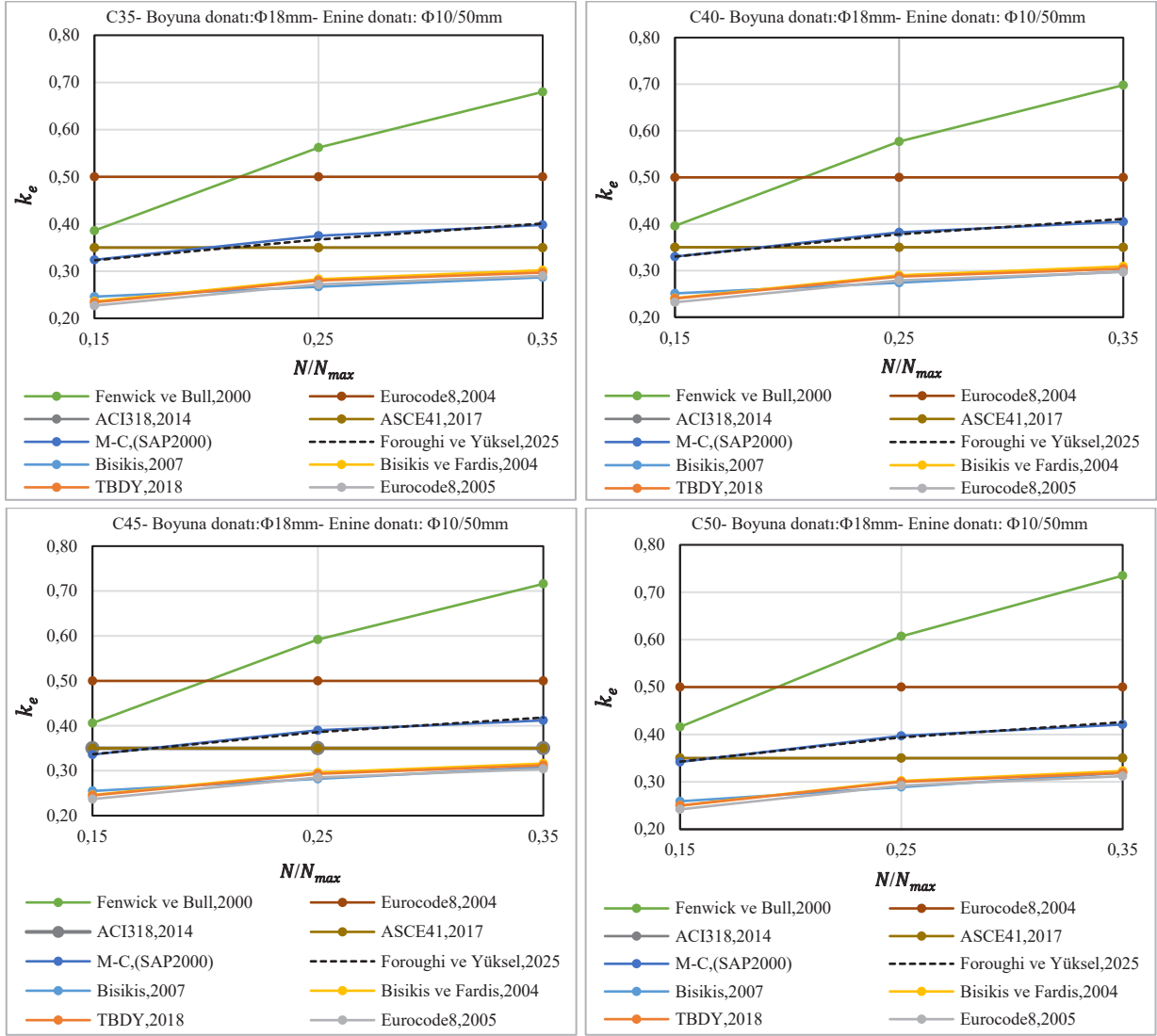




b) Farklı yatay donatı aralığı



c) Perde duvar uç bölgesi boyuna donatı çapı



d) Farklı beton basınç dayanımı

Şekil 4.13. Betonarme perde duvarların farklı parametrelere göre $k_e - N/N_{max}$ ilişkileri

4.4. Bölüm Sonu: Araştırma Bulgularının Değerlendirilmesi, Yorumlanması ve Sonuçları

Bu bölümde betonarme perde duvar elemanlarının etkin eğilme rijitliği, doğrusal olmayan kesit analizlerine dayalı kapsamlı bir parametrik inceleme ile ele alınmış ve elde edilen bulgular farklı yönetmelik yaklaşımları ile literatürde önerilen modeller çerçevesinde karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Çalışmanın en belirgin katkılarından biri, moment-eğrilik ilişkilerinden elde edilen kesit davranışı ile pratik mühendislik yaklaşımları arasındaki farkların sistematik biçimde ortaya konulmasıdır.

Moment-eğrilik analizleri, betonarme perde duvar kesitlerinin elastik sınır ötesi davranışını güvenilir biçimde temsil ederek çatlama, donatı akması ve göçme durumlarına karşılık gelen karakteristik parametrelerin tutarlı şekilde belirlenmesine olanak sağlamıştır. Elde edilen eğriler,

kesit davranışının yalnızca malzeme dayanımlarıyla değil; donatı düzeni ve eksenel yük düzeyi ile birlikte etkileşimli olarak şekillendiğini açıkça göstermektedir.

Analiz sonuçları, moment kapasitesinin başlıca boyuna donatı oranı, beton basınç dayanımı ve eksenel yük seviyesi tarafından kontrol edildiğini ortaya koymaktadır. Buna karşılık, eğrilik kapasitesi ve süneklik performansı büyük ölçüde enine donatı oranı ve donatı aralığına bağlıdır. Enine donatı oranının artırılması ve donatı aralığının azaltılması, kesitin deformasyon kapasitesini belirgin biçimde iyileştirerek daha sünek bir davranış sağlamaktadır.

Öte yandan, eksenel yük oranındaki artış başlangıç rijitliği ve moment kapasitesini artırmakla birlikte, göçme eğriliğini sınırlandırarak sünekliği azaltmakta ve kesiti daha gevrek bir davranışa yönlendirmektedir. Benzer şekilde, yüksek beton dayanımı taşıma kapasitesine olumlu katkı sağlarken süneklik üzerinde sınırlayıcı bir etki göstermektedir. Boyuna donatı oranındaki artış ise kapasiteyi artıran temel parametrelerden biri olmakla birlikte, süneklik üzerindeki etkisi ikincil düzeyde kalmaktadır. Taşıma kapasitesi ile deformasyon/süneklik performansının farklı tasarım değişkenleri tarafından kontrol edildiğini ve performans dayalı tasarım yaklaşımında bu parametrelerin dengeli ve bütüncül bir biçimde ele alınmasının zorunlu olduğunu ortaya koymaktadır.

Parametrik incelemeler sonucunda, etkin eğilme rijitliğinin tek bir sabit katsayı ile temsil edilemeyecek kadar çok değişkenli bir davranış sergilediği açıkça belirlenmiştir. Bu bağlamda:

- **Eksenel yük düzeyi** arttıkça, kesitin çatlama sonrası rijitliğinde belirgin bir artış gözlenmiştir. Özellikle $N/N_{max} = 0.30$ seviyesine yaklaşıldığında, etkin rijitlik katsayısının anlamlı ölçüde yükseldiği ve kesitin daha rijit bir davranış sergilediği belirlenmiştir. Bu durum, eksenel basıncın çatlak gelişimini sınırlayıcı etkisi ile açıklanabilir.
- **Sargı donatısı oranı ve aralığı**, kesit rijitliği üzerinde doğrudan etkili olup; artan sargı donatısı oranı ve azalan sargı donatısı aralığı, hem rijitlik hem de süneklik performansını artırmıştır. İlgili tablo ve şekiller incelendiğinde, sargı etkisinin özellikle yüksek eksenel yük seviyelerinde daha belirgin hale geldiği görülmektedir.
- **Boyuna donatı oranı (uç bölgelerde)**, etkin rijitlik üzerinde en etkili parametrelerden biri olarak öne çıkmıştır. Uç bölgede boyuna donatı çapının artırılmasıyla birlikte rijitlik katsayısında düzenli ve anlamlı bir artış meydana gelmiştir. Bu durum, plastik mafsal bölgelerinde donatının rijitlik katkısının kritik önemini ortaya koymaktadır.
- **Beton basınç dayanımı** arttıkça etkin rijitlikte artış gözlenmiş, ancak bu artışın diğer parametrelere kıyasla daha sınırlı olduğu belirlenmiştir. Bu sonuç, rijitlik davranışında donatı düzeninin beton dayanımına kıyasla daha baskın bir rol oynadığını göstermektedir.

Moment-eğrilik analizlerinden elde edilen etkin rijitlik katsayılarının, yönetmeliklerde önerilen sabit katsayılarla karşılaştırılması önemli bulgular ortaya koymuştur. TBDY (2018), Eurocode 8 (2004), ACI 318 (2014) ve ASCE/SEI 41 (2017) gibi yönetmeliklerin sunduğu yaklaşımlar incelendiğinde:

- Yönetmeliklerin çoğunlukla sabit veya sınırlı parametreye bağlı katsayılar kullandığı,
- Bu nedenle kesit davranışındaki değişkenliği yeterince yansıtamadığı,
- Ancak, buna karşın yöntemin güvenli tarafta kalan sonuçlar ürettiği belirlenmiştir.

Özellikle Eurocode 8 (2004)'ün yaklaşık %50 rijitlik kabulü ve ACI 318 (2014) ve ASCE/SEI 41 (2017) yaklaşımlarının daha düşük rijitlik öngörülmesi, analiz sonuçlarına kıyasla belirli durumlarda önemli sapmalar göstermiştir. Buna karşın TBDY (2018)'in doğrusal olmayan davranışı dikkate alan yaklaşımı, diğer yönetmeliklere kıyasla daha gerçekçi sonuçlar üretmiştir.

Literatürde yer alan analitik modellerin değerlendirilmesi de benzer şekilde önemli sonuçlar ortaya koymuştur. Biskinis ve Fardis (2004), Biskinis (2007) ve Fenwick ve Bull (2000) modellerinin, belirli parametreler için kabul edilebilir sonuçlar verdiği; ancak genel davranışı temsil etmede sınırlı kaldığı görülmüştür. Bu modellerin çoğu, parametre etkileşimlerini yeterince dikkate almayan yarı-ampirik yapılarından dolayı geniş parametre aralıklarında tutarlı sonuçlar üretememektedir.

Bu bölümün en önemli katkılarından biri, Foroughi ve Yüksel (2025) tarafından önerilen çok parametrelili etkin rijitlik bağıntısının perde duvarlara uygulanması ve kapsamlı biçimde doğrulanmasıdır. Elde edilen sonuçlar göstermektedir ki:

- Önerilen bağıntı, moment-eğrilik analizlerinden elde edilen sonuçlarla yüksek uyum göstermektedir.
- Tablo 4.6'da verilen karşılaştırmalara göre, ortalama sapma oranı yaklaşık 1.025, standart sapma ise %2.41 seviyesindedir.
- Determinasyon katsayısının $R^2 \approx 0.99$ olması, modelin açıklayıcılık gücünün son derece yüksek olduğunu ortaya koymaktadır.

Bu bulgular, önerilen modelin hem doğruluk hem de tutarlılık açısından güçlü bir tahmin aracı olduğunu ve mühendislik uygulamalarında güvenle kullanılabileceğini göstermektedir. Ayrıca modelin, aksenal yük, donatı özellikleri ve beton dayanımı gibi temel parametreleri doğrudan içermesi, onu mevcut yönetmelik yaklaşımlarına kıyasla daha rasyonel ve temsil gücü yüksek bir çözüm haline getirmektedir.

Sonuç olarak, bu bölümde gerçekleştirilen analizler aşağıdaki temel çıkarımları ortaya koymaktadır:

1. Betonarme perde duvarların etkin eğilme rijitliği, çok sayıda parametrenin etkileşimiyle belirlenen karmaşık bir davranış olup sabit katsayılarla güvenilir biçimde temsil edilemez.
2. Doğrusal olmayan moment-eğrilik analizleri, çatlama sonrası davranışın belirlenmesinde en güvenilir yöntemdir.
3. Aksenal yük, donatı düzeni ve beton dayanımı, rijitlik üzerinde belirleyici parametrelerdir; özellikle donatı detayları kritik rol oynamaktadır.
4. Foroughi ve Yüksel (2025) tarafından önerilen bağıntı, yüksek doğruluk düzeyi ve geniş parametre kapsayıcılığı ile betonarme perde duvarların etkin rijitliğinin belirlenmesinde güçlü ve uygulanabilir bir model sunmaktadır.

Bu doğrultuda, performansa dayalı tasarım ve doğrusal olmayan analiz yaklaşımlarının yaygınlaştırılması, özellikle yüksek süneklik düzeyine sahip betonarme perde duvarların daha gerçekçi modellenmesi açısından büyük önem taşımaktadır. Geliştirilen bağıntıların ve elde edilen bulguların, hem akademik çalışmalar hem de mühendislik uygulamaları için önemli bir referans oluşturacağı değerlendirilmektedir.

5. GENEL DEĞERLENDİRME VE UYGULAMA ÖNERİLERİ

5.1. Temel Çıkarımlar

Kitap kapsamında betonarme kiriş, kolon ve perde duvar elemanlarının doğrusal olmayan davranışı; moment-eğrilik ilişkileri, süneklik kapasitesi ve etkin kesit rijitliği değişimi çerçevesinde bütüncül bir yapısal analiz yaklaşımı ile ele alınmıştır. Gerçekleştirilen sayısal ve parametrik değerlendirmeler, betonarme taşıyıcı sistemlerin davranışının doğrusal elastik kabullerle açıklanamayacak derecede karmaşık, değişken ve çok parametreliliğe sahip olduğunu ortaya koymaktadır.

Moment-eğrilik davranış eğrileri, betonarme kesitlerin yükleme süreci boyunca üç temel davranış evresi sergilediğini göstermektedir: elastik davranış, çatlama sonrası rijitlik kaybı ve donatı akması sonrası doğrusal olmayan bölgesi. Özellikle çatlama sonrasında gözlenen ani rijitlik düşüşü, kesit rijitliğinin sabit bir büyüklük olarak ele alınmasının fiziksel gerçekliği temsil etmede yetersiz kaldığını açık biçimde göstermektedir. Bu durum, rijitlik kavramının yükleme geçmişine bağlı olarak değişen evrimsel bir parametre olarak değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

Yapılan parametrik analizler, etkin kesit rijitliği üzerinde en belirleyici değişkenlerin eksenel yük oranı, boyuna donatı oranı, beton basınç dayanımı ve sargı donatısı özellikleri olduğunu göstermektedir. Bu değişkenler arasında eksenel yük ve donatı oranının baskın kontrol parametreleri olduğu; beton dayanımının orta düzeyde etkili olduğu; sargı donatısının ise özellikle süneklik ve enerji tüketim kapasitesi üzerinden dolayı fakat önemli bir katkı sağladığı belirlenmiştir. Ayrıca eksenel yük artışının rijitliği artırıcı etkisinin, belirli bir kritik eksenel yük oranının aşılmasıyla birlikte sünekliliği sınırlayıcı bir davranışa dönüştüğü tespit edilmiştir.

Eleman bazlı değerlendirmeler, kiriş, kolon ve perde duvarların farklı mekanik davranış karakteristiklerine sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Kiriş elemanlarında basınç donatısının varlığı, yalnızca taşıma kapasitesini değil aynı zamanda rijitlik kaybının kontrolünü ve sünek davranışın gelişimini de doğrudan etkilemektedir. Kolon elemanlarında kesit geometrisi ve eksenel yük etkileşimi kritik rol oynamakta olup, dairesel kesitlerin daha homojen gerilme dağılımı sayesinde daha yüksek süneklik kapasitesi sağladığı; dikdörtgen kesitlerin ise eksenel yük değişimlerine daha hassas olduğu belirlenmiştir. Perde duvar elemanları ise yüksek yatay rijitlik ile birlikte önemli düzeyde enerji yutma kapasitesi sağlayabilen temel taşıyıcı sistem bileşenleri olarak öne çıkmaktadır.

Etkin kesit rijitliğinin belirlenmesine yönelik farklı yaklaşım yöntemlerinin karşılaştırılması sonucunda, yönetmelik temelli sabit katsayı yaklaşımlarının mühendislik uygulamalarında pratiklik sağladığı ancak gerçek davranış değişkenliğini temsil etmede sınırlı kaldığı görülmüştür. Buna karşılık moment-eğrilik temelli analizler ve parametrik model yaklaşımları, kesit davranışını çok daha yüksek doğrulukla temsil edebilmektedir. Bu bağlamda Foroughi ve Yüksel (2022; 2025) tarafından önerilen parametrik modelin geniş parametre aralığında tutarlı ve güvenilir sonuçlar üretmesi, söz konusu yaklaşımın mühendislik tasarım süreçleri için güçlü bir alternatif olduğunu göstermektedir.

5.2. Uygulama Önerileri

Elde edilen analiz sonuçları, betonarme yapıların tasarım ve performans değerlendirme süreçlerinde etkin kesit rijitliği kavramının yeniden tanımlanması gerektiğini açıkça göstermektedir. Bu kapsamda rijitliğin sabit bir tasarım katsayısı olarak değil, yapısal ve malzeme parametrelerine bağlı değişken bir büyüklük olarak ele alınması önerilmektedir. Bu yaklaşım özellikle doğrusal olmayan analizler ve performansa dayalı tasarım yöntemlerinde daha gerçekçi sonuçlar elde edilmesini sağlayacaktır.

Tasarım süreçlerinin aşamalı bir yaklaşımla yürütülmesi daha uygun bir mühendislik stratejisi olarak değerlendirilmektedir. Ön tasarım aşamasında yönetmeliklerde yer alan basitleştirilmiş rijitlik katsayıları kullanılabilirken, ileri analiz ve performans değerlendirme aşamalarında moment-eğrilik temelli veya parametrik model tabanlı yöntemlerin tercih edilmesi gerekmektedir. Bu çok aşamalı yaklaşım, hem hesaplama verimliliği hem de davranış doğruluğu açısından dengeli bir çözüm sunmaktadır.

Kolon tasarımında aksenal yük düzeyinin rijitlik ve süneklik üzerindeki belirleyici etkisi mutlaka dikkate alınmalıdır. Yüksek aksenal yük seviyeleri, başlangıçta rijitliği artırsa da belirli sınırların ötesinde sünekliği önemli ölçüde azaltabilmektedir. Bu nedenle tasarımda yalnızca rijitlik artışı değil, aynı zamanda sünek davranışın korunması da temel bir tasarım kriteri olarak ele alınmalıdır.

Kiriş elemanlarında basınç donatısının etkisi yalnızca dayanım ile sınırlı olmayıp, rijitlik kaybının geciktirilmesi ve sünek davranışın iyileştirilmesi açısından da kritik öneme sahiptir. Özellikle deprem etkisi altındaki yapı sistemlerinde çift donatılı kesitlerin kullanılması, kesit davranışının daha dengeli ve güvenilir olmasına katkı sağlamaktadır.

Perde duvar sistemlerinde ise rijitlik ve süneklik arasındaki dengenin doğru kurulması gerekmektedir. Yalnızca yüksek rijitlik sağlayan sistemler yerine, enerji tüketme kapasitesi yüksek ve sünek davranış gösterebilen sistemlerin tercih edilmesi gereklidir. Bu bağlamda donatı düzeni, sargı etkisi ve detaylandırma kriterleri tasarım performansını doğrudan etkileyen temel parametrelerdir.

Ayrıca doğrusal olmayan analiz yöntemlerinin mühendislik uygulamalarında daha yaygın ve sistematik bir şekilde kullanılması gerekmektedir. Bu analizler, özellikle deprem mühendisliği uygulamalarında yapıların gerçek davranışını daha doğru temsil ederek daha güvenilir performans değerlendirmeleri yapılmasına olanak sağlamaktadır.

5.3. Genel Değerlendirme

Betonarme yapı elemanlarının davranışı, doğrusal elastik varsayımlar çerçevesinde tam olarak temsil edilemeyen karmaşık bir yapısal sistem davranışı sergilemektedir. Bu kitap kapsamında yapılan kapsamlı değerlendirmeler, etkin kesit rijitliğinin yapı davranışının doğru tahmin edilmesinde kritik ve belirleyici bir parametre olduğunu ortaya koymaktadır. Rijitliğin yükleme süreci boyunca değişkenlik göstermesi, klasik sabit katsayı temelli tasarım yaklaşımlarının özellikle deprem etkileri altında yetersiz kaldığını göstermektedir.

Çok parametrelili analiz sonuçları, etkin kesit rijitliğinin aksenal yük, donatı oranı, beton dayanımı ve sargı donatısı gibi değişkenlerin etkileşimi sonucunda oluştuğunu ortaya koymaktadır. Bu

durum, yapısal tasarım süreçlerinde tek değişkenli yaklaşımlar yerine çok parametrelili ve etkileşimli modellerin kullanılmasının gerekliliğini açık biçimde göstermektedir.

Farklı taşıyıcı eleman türleri açısından yapılan değerlendirmeler, her elemanın kendine özgü davranış mekanizmasına sahip olduğunu ve bu nedenle tasarımın eleman bazlı yapılması gerektiğini ortaya koymaktadır. Kiriş, kolon ve perde elemanlarının aynı rijitlik varsayımları ile değerlendirilmesi, yapısal performansın doğru tahmin edilmesini sınırlayan kritik bir modelleme varsayımı hatası oluşturmaktadır.

Karşılaştırmalı analizler, parametrik modellere dayalı yaklaşımların etkin kesit rijitliği tahmininde en yüksek doğruluk düzeyini sağladığını göstermektedir. Özellikle Foroughi ve Yüksel (2025; 2026a; 2026b) tarafından geliştirilen modelin geniş parametre aralıklarında tutarlı sonuçlar üretmesi, bu tür yaklaşımların mühendislik uygulamalarında güvenilir bir hesaplama yöntemi olarak kullanılabileceğini ortaya koymaktadır.

Genel olarak değerlendirildiğinde, etkin kesit rijitliğinin doğru tanımlanması; yapıların yatay yükler altındaki deplasman davranışlarının, iç kuvvet dağılımlarının ve performans seviyelerinin güvenilir şekilde belirlenmesi açısından temel bir gerekliliktir. Bu nedenle rijitlik kavramının, kesit davranışını etkileyen temel mekanik ve geometrik parametreleri içeren gelişmiş modeller çerçevesinde yeniden ele alınması gerekmektedir.

Sonuç olarak bu kitap, betonarme yapıların:

- Doğrusal olmayan davranışlarının daha gerçekçi şekilde modellenmesi gerektiğini,
- Etkin kesit rijitliğinin sabit bir büyüklük değil, değişken bir sistem parametresi olduğunu,
- Parametrik ve analitik model yaklaşımlarının mühendislik uygulamalarında yüksek doğrulukla kullanılabilmesini ortaya koymaktadır.

Bu çerçevede kitap, betonarme yapı tasarımında daha gerçekçi, güvenilir ve performans esaslı yaklaşımların geliştirilmesine katkı sağlamakta ve mevcut tasarım yaklaşımlarının geliştirilmesi için teorik ve uygulamalı bir temel sunmaktadır.

6. KAYNAKLAR

- American Concrete Institute. (2014). *Building code requirements for structural concrete (ACI 318-14) and commentary (ACI 318R-14)*.
- American Society of Civil Engineers. (2017). *Seismic evaluation and retrofit of existing buildings (ASCE/SEI 41-17)*. ASCE.
- Avşar, Ö., Bayhan, B., & Yakut, A. (2014). Effective flexural rigidities for ordinary reinforced concrete columns and beams. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 23(6), 463-482.
- Biskinis, D. E. (2007). *Resistance and deformation capacity of concrete members with or without retrofitting* (Doctoral dissertation). University of Patras.
- Biskinis, D. E., & Fardis, M. N. (2004). Cyclic strength and deformation capacity of RC members, including members retrofitted for earthquake resistance. In J. Walraven et al. (Eds.), *5th International PhD Symposium in Civil Engineering* (pp. 1125-1133). Balkema.
- Bischoff, P. H., & Scanlon, A. (2007). Effective moment of inertia for calculating deflections of concrete members containing steel reinforcement and fiber-reinforced polymer reinforcement. *ACI Structural Journal*, 104(1), 68-75.
- Çoşut, M., Bekdaş, G., & Nigdeli, S. M. (2023). Optimization of reinforced concrete frame structures and matrix displacement method. *Challenge Journal of Concrete Research Letters*, 14(1), Article 688. <https://doi.org/10.20528/cjcr.2023.01.002>
- Dalyan, İ., & Şahin, B. (2019). Mevcut betonarme bir binanın 2007 ve 2018 deprem yönetmeliklerine göre deprem yükleri altındaki taşıyıcı sistem performansının değerlendirilmesi. *Türk Deprem Araştırma Dergisi*, 1(2), 134-147. <https://doi.org/10.46464/tdad.631998>
- Das, S., Mansouri, I., Choudhury, S., Gandomi, A. H., & Hu, J. W. (2021). A prediction model for the calculation of effective stiffness ratios of reinforced concrete columns. *Materials*, 14(7), 1792. <https://doi.org/10.3390/ma14071792>
- Elwood, K. J., & Eberhard, M. O. (2009). Effective stiffness of reinforced concrete columns. *ACI Structural Journal*, 106(4), 476-484. <https://doi.org/10.14359/56613>
- European Committee for Standardization. (2004). *Eurocode 2: Design of concrete structures—Part 1-1: General rules and rules for buildings*. BSI.
- European Committee for Standardization. (2004). *Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance—Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings*. BSI.
- European Committee for Standardization. (2005). *Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance—Part 3: Assessment and retrofitting of buildings*. BSI.
- Fardis, M., Carvalho, E., Elnashai, A., Faccioli, E., Pinto, P., & Plumier, A. (Eds.). (2005). *Designers' guide to EN 1998-1 and EN 1998-5: Eurocode 8—Design provisions for earthquake resistant structures*. Thomas Telford. <https://doi.org/10.1680/dgte8.33481>
- Fenwick, R., & Bull, D. (2000). What is the stiffness of reinforced concrete walls? *SESOC Journal*, 13(2), 23-32.
- Fields, K., & Bischoff, P. H. (2004). Tension stiffening and cracking of high-strength reinforced concrete tension members. *ACI Structural Journal*, 101(4), 447-456. <https://doi.org/10.14359/13330>
- Foroughi, S., & Yüksel, B. (2026a). A New Approach to Determine the Effective Flexural Stiffness of Doubly-Reinforced Beams According to Nonlinear Behavior. *El-Cezeri*, 13(2), 220-232. <https://doi.org/10.31202/ecjse.1783406>
- Foroughi, S., & Yüksel, B. (2026b). A New Approach to Determine the Flexural Stiffness for Reinforced Concrete Columns According to Non-Linear Behavior. *Konya Journal of Engineering Sciences*, 14(2), 536-567. <https://doi.org/10.36306/konjes.1654245>
- 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. (2022). *Betonarme yapısal elemanlarının lineer olmayan yöntemler ile deprem performanslarının belirlenmesi* (Doktora tezi). Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

- Foroughi, S., & Yüksel, B. (2021a). 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, B. (2021b). Sünek betonarme perde duvarların şekil değiştirme esaslı hasar sınırları. *Journal of Advanced Research in Natural and Applied Sciences*, 7(2), 244-255. <https://doi.org/10.28979/jarnas.845418>
- Foroughi, S., Jamal, R., & Yüksel, B. (2020). Sargı donatısı ve eksenel yük seviyesinin betonarme kolonların eğrilik sünekliliği ile etkin kesit rijitliğe etkisi. *El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi*, 7(3), 1309-1319. <https://doi.org/10.31202/ecjse.750775>
- Han, S. W., Lee, C. S., Paz Zambrana, M. A., & Lee, K. (2019). Calibration factor for ASCE 41-17 modeling parameters for stocky rectangular RC columns. *Applied Sciences*, 9(23), 5193. <https://doi.org/10.3390/app9235193>
- Haselton, C. B., Liel, A. B., Taylor-Lange, S. C., & Deierlein, G. G. (2016). Calibration of model to simulate response of reinforced concrete beam-columns to collapse. *ACI Structural Journal*, 113(6). <https://doi.org/10.14359/51689245>
- Koosha, K., Fadi, O., & Pedram, S. (2023). Reliability-based evaluation of the stiffness reduction factor for slender GFRP reinforced concrete columns. In S. Walbridge et al. (Eds.), *Proceedings of the Canadian Society of Civil Engineering Annual Conference 2021* (Vol. 241). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-19-0511-7_33
- Kristombu Baduge, S., Mendis, P., Ngo, T. D., et al. (2019). Ductility design of reinforced very-high strength concrete columns (100-150 MPa) using curvature and energy-based ductility indices. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 13, 37. <https://doi.org/10.1186/s40069-019-0347-y>
- Lan, S., Liu, Y., Mao, D., & Wang, D. (2025). Experimental and theoretical study on flexural rigidity reduction of reinforced concrete eccentric column. *Scientific Reports*, 15, Article 29268. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-15363-4>
- MacGregor, J. G., & Wight, J. K. (2012). *Reinforced concrete: Mechanics and design*. Pearson.
- 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. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1988\)114:8\(1804\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1988)114:8(1804))
- Michael, A., & Christou, P. (2011). Moment-curvature analysis of concrete flexural members confined with CFRP grids. *WIT Transactions on Engineering Sciences*, 72, 131-141. <https://doi.org/10.2495/MC110121>
- Öztaş, V., & Torunbalcı, N. (2023). An experimental study of strength increase in masonry wall reinforced by one-sided Khorasan mortar with steel mesh. *Civil Engineering Journal*, 9(12), 3233-3253. <https://doi.org/10.28991/CEJ-2023-09-12-019>
- Park, R., & Paulay, T. (1975). *Reinforced concrete structures*. Wiley.
- Pratama, M. M. A., Andi, M. F., & Hadhinata, C. (2022). Moment-curvature analysis of graded concrete beam with concrete strength disparity variations. *Jurnal Pensil: Pendidikan Teknik Sipil*, 11(1), 20-35. <https://doi.org/10.21009/jpensil.v11i1.25072>
- Priestley, M. J. N., Calvi, G. M., & Kowalsky, M. J. (2007). *Displacement-based seismic design of structures*. IUSS Press.
- 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))
- Sturm, A. B., & Visintin, P. (2023). Pre- and post-yield bond, tension-stiffening, and cracking in ultra-high performance fiber reinforced concrete. *Structural Concrete*, 24(1), 1201-1225. <https://doi.org/10.1002/suco.202100711>
- Türkiye Cumhuriyeti Çevre ve Şehircilik Bakanlığı. (2018). *Türkiye bina deprem yönetmeliği (TBDY 2018)*.
- Wong, J.-M., Sommer, A., Briggs, K., & Ergin, C. (2017). Effective stiffness for modeling reinforced concrete structures. *Structure Magazine*. <https://www.structuremag.org/article/effective-stiffness-for-modeling-reinforced-concrete-structures>
- Yüksel, S., Jamal, R., & Foroughi, S. (2020). Effect of compression reinforcement ratio of beams on the moment-curvature relationships. *Konya Journal of Engineering Sciences*, 8(1), 1-17. <https://doi.org/10.36306/konjes.571642>

Bu eser, betonarme taşıyıcı sistemlerin doğrusal olmayan davranışını kuramsal temeller ile ileri düzey sayısal analiz yaklaşımlarını bütünleştirerek ele alan kapsamlı bir akademik çalışmadır. Çalışmada, performansa dayalı tasarım anlayışı çerçevesinde betonarme elemanların gerçek davranışının doğru temsil edilmesinin önemi vurgulanmakta; moment-eğrilik ilişkisi, süneklik ve etkin kesit rijitliği kavramları sistematik ve derinlemesine bir biçimde incelenmektedir.

Kitapta, betonarme kiriş, kolon ve perde duvar elemanlarının davranışı; malzeme doğrusal olmama, çatlama, donatı akması ve göçme mekanizmaları bağlamında analiz edilmekte, moment-eğrilik temelli yaklaşımla kesit düzeyinden sistem davranışına uzanan çok ölçekli bir değerlendirme sunulmaktadır. Ayrıca, ulusal ve uluslararası yönetmeliklerde önerilen etkin kesit rijitliği yaklaşımları, literatürdeki analitik modellerle karşılaştırmalı olarak değerlendirilmekte; sabit katsayıya dayalı geleneksel yöntemlerin sınırlılıkları ortaya konulmaktadır.

Eserin özgün katkısı, farklı betonarme eleman tipleri için geliştirilen parametreye bağlı yeni etkin kesit rijitliği bağıntılarıdır. Bu modeller, detaylı doğrusal olmayan analizlere ihtiyaç duymadan güvenilir mühendislik tahminleri yapılmasına olanak sağlayarak akademik bilgi ile mühendislik pratiği arasında güçlü bir bağ kurmaktadır.

Sonuç olarak çalışma, betonarme eleman davranışını sabit kabuller yerine parametreye bağlı dinamik bir sistem olarak ele alarak, hem akademik literatüre katkı sunmakta hem de araştırmacılar ve uygulayıcı mühendisler için analitik ve pratik bir başvuru kaynağı niteliği taşımaktadır.



Bu eser, betonarme taşıyıcı sistemlerin doğrusal olmayan davranışını kuramsal temeller ile ileri düzey sayısal analiz yaklaşımlarını bütünleştirerek ele alan kapsamlı bir akademik çalışmadır. Çalışmada, performansa dayalı tasarım anlayışı çerçevesinde betonarme elemanların gerçek davranışının doğru temsil edilmesinin önemi vurgulanmakta; moment-eğrilik ilişkisi, süneklilik ve etkin kesit rijitliği kavramları sistematik ve derinlemesine bir biçimde incelenmektedir.

Kitapta, betonarme kiriş, kolon ve perde duvar elemanlarının davranışı; malzeme doğrusal olmama, çatlama, donatı akması ve göçme mekanizmaları bağlamında analiz edilmekte, moment-eğrilik temelli yaklaşımla kesit düzeyinden sistem davranışına uzanan çok ölçekli bir değerlendirme sunulmaktadır. Ayrıca, ulusal ve uluslararası yönetmeliklerde önerilen etkin kesit rijitliği yaklaşımları, literatürdeki analitik modellerle karşılaştırmalı olarak değerlendirilmekte; sabit katsayıya dayalı geleneksel yöntemlerin sınırlılıkları ortaya konulmaktadır.

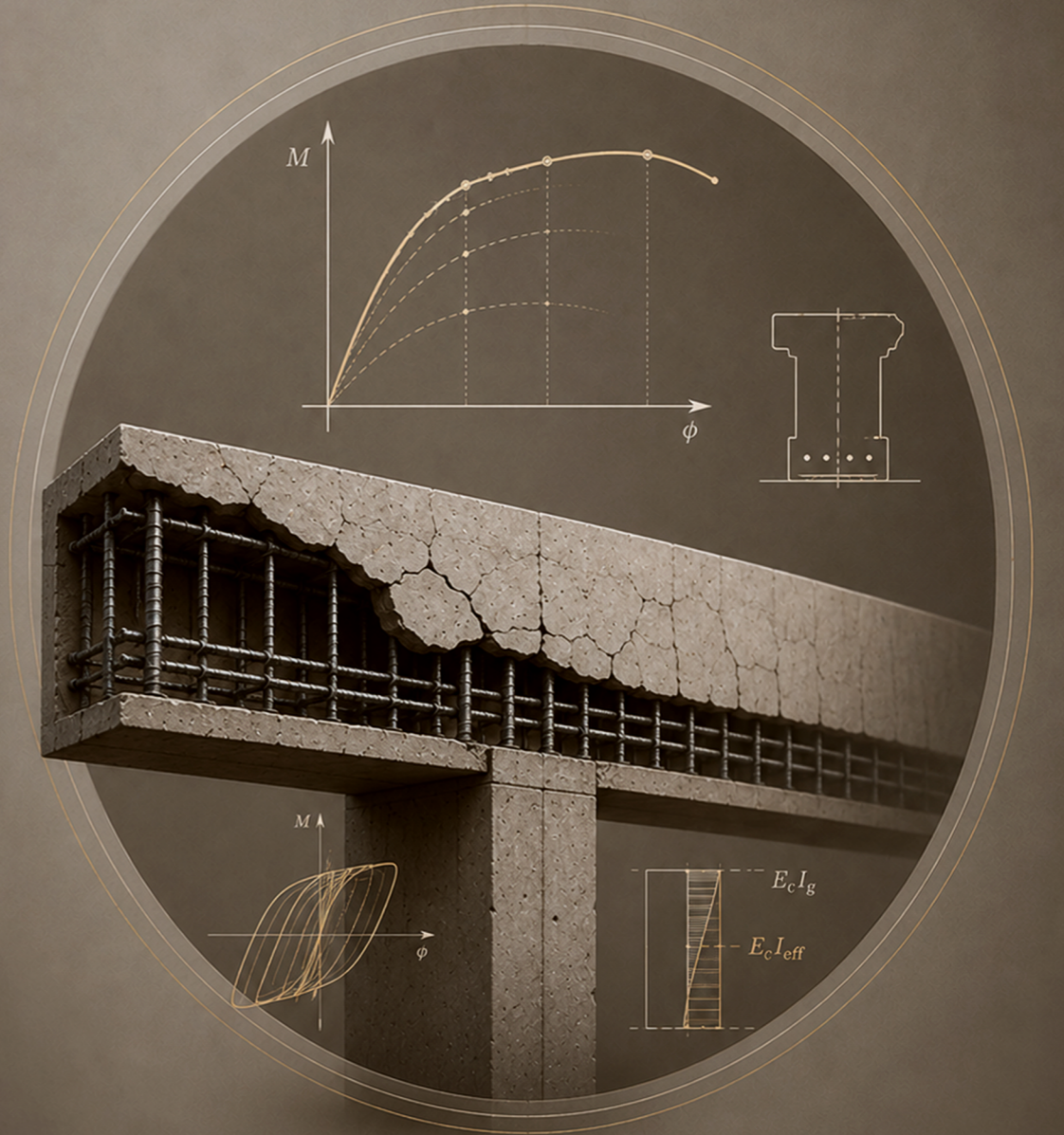
Eserin özgün katkısı, farklı betonarme eleman tipleri için geliştirilen parametreye bağlı yeni etkin kesit rijitliği bağıntılarıdır. Bu modeller, detaylı doğrusal olmayan analizlere ihtiyaç duymadan güvenilir mühendislik tahminleri yapılmasına olanak sağlayarak akademik bilgi ile mühendislik pratiği arasında güçlü bir bağ kurmaktadır.

Sonuç olarak çalışma, betonarme eleman davranışını sabit kabuller yerine parametreye bağlı dinamik bir sistem olarak ele alarak, hem akademik literatüre katkı sunmakta hem de araştırmacılar ve uygulayıcı mühendisler için analitik ve pratik bir başvuru kaynağı niteliği taşımaktadır.



BETONARME TAŞIYICI SİSTEMLERDE DOĞRUSAL OLMAYAN DAVRANIŞ: MOMENT-EĞRİLİK İLİŞKİSİ, SÜNEKLİK VE ETKİN KESİT RİJİTLİĞİ

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



BETONARME TAŞIYICI SİSTEMLERDE DOĞRUSAL OLMAYAN DAVRANIŞ: MOMENT-EĞRİLİK İLİŞKİSİ, SÜNEKLİK VE ETKİN KESİT RİJİTLİĞİ



2026

