

**T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**BETONARME KOLONLARIN YATAY YÜKLER ALTINDA
DAVRANIŞI**

Sinan CANSIZ

**DOKTORA TEZİ
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Yapı Programı**

**Danışman
Prof. Dr. Güray ARSLAN**

**Eş-Danışman
Doç. Dr. Cem AYDEMİR**

Şubat, 2020

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BETONARME KOLONLARIN YATAY YÜKLER ALTINDA DAVRANIŞI

Sinan CANSIZ tarafından hazırlanan tez çalışması 12.02.2020 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Yapı Programı **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Güray ARSLAN
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Doç. Dr. Cem AYDEMİR
İstanbul Aydın Üniversitesi
Eş-Danışman

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Güray ARSLAN, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Mustafa ZORBOZAN, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Alper İLKİ, Üye
İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Murat Serdar KIRÇIL, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Kutlu DARILMAZ, Üye
İstanbul Teknik Üniversitesi

Danışmanım Prof. Dr. Güray ARSLAN sorumluluğunda tarafımca hazırlanan Betonarme Kolonların Yatay Yükler Altında Davranışı başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Sinan CANSIZ

İmza

Bu alışma, Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Proje Koordinatörlüğü' nün
2016-05-01-DOP02 ID:1954 numaralı projesi ile desteklenmiştir.

Aileme

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam süresince ilgi ve yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyen, değerli görüş ve önerileri ile çalışmaya büyük katkı sağlayan tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Güray Arslan ve eş danışmanım Sayın Doç. Dr. Cem Aydemir'e teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca tezimin ilerlemesindeki katkılarından dolayı tez izleme komitesi üyeleri Sayın Prof. Dr. Mustafa Zorbozan ve Sayın Prof. Dr. Alper İlki'ye şükranlarımı sunarım. Bu tez çalışması kapsamında yapılan deneylere eşlik eden İstanbul Aydın Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Öğretim Üyesi Sayın Prof. Dr. Müberra Eser Aydemir ve İnşaat Mühendisliği Laboratuvarı personellerine ayrı ayrı teşekkürlerime sunarım. Bu günlere gelmemi sağlayan, her zaman olduğu gibi doktora eğitimim süresince de sonsuz sevgi ve desteklerini yanımda hissettiğim aileme minnet ve şükranlarımı sunarım.

Sinan CANSIZ

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ	viii
KISALTMA LİSTESİ	xii
ŞEKİL LİSTESİ	xiii
TABLO LİSTESİ	xviii
ÖZET	xx
ABSTRACT	xxii
1 GİRİŞ	1
1.1 Literatür Özeti	2
1.2 Tezin Amacı	7
1.3 Hipotez	7
2 DENEY PROGRAMI	10
2.1 Kolonlara Ait Özellikler	10
2.2 Kolonların Üretimi	12
2.3 Deney Düzenegi	20
2.3.1 Birim Şekildeğiştirme Ölçer ve LVDT'lerin Konumları	21
2.3.2 Veri Toplayıcı	25
2.4 Yükleme Profili	25
3 DENEY SONUÇLARI	29
3.1 Göçme Biçimleri ve Deneysel Hasar Durumları	29
3.1.1 S351008 Numaralı Kolona ait Hasar Durumları	30
3.1.2 S451008 Numaralı Kolona ait Hasar Durumları	33
3.1.3 S601008 Numaralı Kolona ait Hasar Durumları	36
3.1.4 S352008 Numaralı Kolona ait Hasar Durumları	39
3.1.5 S452008 Numaralı Kolona ait Hasar Durumları	42
3.1.6 S602008 Numaralı Kolona ait Hasar Durumları	45
3.1.7 S353508 Numaralı Kolona ait Hasar Durumları	48

3.1.8	S453508 Numaralı Kolona ait Hasar Durumları	51
3.1.9	S603508 Numaralı Kolona ait Hasar Durumları	54
3.1.10	S451006 Numaralı Kolona ait Hasar Durumları	57
3.1.11	S452006 Numaralı Kolona ait Hasar Durumları	60
3.2	Yük-Yerdeğiştirme İlişkileri	63
3.3	Moment-Eğrilik İlişkileri	70
4	PLASTİK MAFSAL BOYU	77
4.1	Plastik Mafsal Boyu Modelleri	77
4.1.1	Priestley ve Paulay (1992) Modeli	78
4.1.2	ACI318 ve TBDY (2018)'e göre Plastik Mafsal Boyu	78
4.1.3	Bae ve Bayrak (2008) Plastik Mafsal Modeli	78
4.1.4	EUROCODE-8'e göre Plastik Mafsal Modeli	79
4.2	Deneyssel Plastik Mafsal Boyu	79
4.3	Deneyssel ve Analitik Modellerin Karşılaştırılması	111
5	YERDEĞİŞTİRME KAPASİTESİ	112
5.1	Yönetmeliklere Göre Yerdeğiştirme Kapasite Tahminleri	112
5.1.1	Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY)'e Göre Kapasite Tahmini	112
5.1.2	EUROCODE-8'e Göre Kapasite Tahmini	114
5.1.3	FEMA356'e Göre Kapasite Tahmini	115
5.2	Yönetmeliklerin Karşılaştırılması	115
6	DÜKTİLİTEYE BAğLI HASAR İNDEKSİ	124
6.1	Hasar İndeksi Modelleri	125
6.1.1	Kratzig ve Meskouris (1987) Hasar İndeksi	125
6.1.2	Park ve Ang (1985) Hasar İndeksi	126
6.1.3	Düzeltilmiş Park ve Ang (1985) Hasar İndeksi	126
6.1.4	Powell ve Allahabadi (1989) Hasar İndeksi	126
6.1.5	Yumuşama Hasar İndeksi	127
6.2	Hasar İndeksi Önerisi	127
6.3	Hasar İndekslerinin Karşılaştırılması ve Değerlendirilmesi	132
7	SONUÇ ve ÖNERİLER	138
	Kaynakça	141
	Tezden Üretilmiş Yayınlar	146

SİMGE LİSTESİ

V_n	ACI 318'e Göre Nominal Kesme Kapasitesi
θ_y	Akma Dönmesi
E_y	Akma Durumuna Kadar Toplam Sönümleme Enerjisi
ϕ_y	Akma Eğriliği
F_y	Akma Yerdeğiştirmesine Karşı Gelen Kesme Kuvveti
$\Delta_{y,analitik}$	Analitik Olarak Hesaplanan Akma Yerdeğiştirmesi
ω, ω'	Basınç ve Çekme Donatısı Mekanik İndeksi
k_o	Başlangıç Rijitliği
V_c	Betonun Kesme Kuvveti Taşıma Gücüne Katkısı
ε_{cg}	Beton Toplam Birim Şekildeğiştirme Üst Sınırı (TBDY)
A_{st}	Boyuna Donatı En Kesit Alanı Toplamı
d_b	Boyuna Donatı Çapı
f_{su}	Boyuna Donatının Deneysel Çekme Dayanımı
f_y	Boyuna Donatının Deneysel Akma Dayanımı
n_b	Boyuna Donatı Sayısı
ε_s	Boyuna Donatının Birim Şekildeğiştirmesi
ε_{sh}	Boyuna Donatının Pekleşme Başlangıç Birim Şekildeğiştirmesi
ε_{su}	Boyuna Donatının Kopma Birim Şekildeğiştirmesi
ω_t	Boyuna Donatı Mekanik İndeksi
ϑ	Boyutsuz Eksenel Yük (EUROCODE-8)
$E_s i$	Çevrimsel Yüklemenin Sönümleme Enerjisi
k_m	Çevrime Ait Maksimum Rijitlik
θ_m	Çevrime Ait Maksimum Dönme

Δ_m	Çevrime Ait Maksimum Yerdeğiştirme
M_{maks}	Deneysel Maksimum Eğilme Momenti
V_{maks}	Deneysel Kesme Kuvvetinin Maksimum Değeri
$\Delta_{maks,deneysel}$	Deneysel Yerdeğiştirme Kapasitesi
ρ_d	Diagonal Donatı Oranı
E_s	Donatı Çeliğinin Elastisite Modülü
θ	Dönme
M	Eğilme Momenti
EI	Eğilme Rijitliği
ϕ_Δ	Eğrilik Düktilitesi
N	Eksenel Yük
P	Eksenel Yük
P_1, P_2	En Alt Kottaki LVDT'ler
f_{yw}	Enine Donatının Deneysel Akma Dayanımı
V_w	Enine Donatının Kesme Kuvveti Taşıma Gücüne Katkısı
ω_{wc}	Enine Donatı Mekanik İndeksi
d	Etkili Derinlik
A_g	Faydalı Kesit Alanı
$\varepsilon_c^{G.Ö}$	Göçmenin Önlenmesi Performans Düzeyi İçin Beton Birim Kısılması
D	Hasar İndeksi
$E_{i,km}$	i Adımındaki Sönümleme Enerjisi
μ_i	i Adımındaki Yerdeğiştirme Sünekliği
D^+, D^-	İtme ve Çekme Durumu Hasar İndeksi
L_v	Kesme Açıklığı (EUROCODE-8)
a	Kesme Açıklığı
a/d	Kesme Açıklığının Etkili Derinliğe Oranı
L	Kolon Boyu
ρ	Kolon Boyuna Donatı Oranı
b	Kolon Enkesit Genişliği

b_w	Kolon Enkesit Genişliği (FEMA356)
h	Kolon Enkesit Yüksekliği
ε_{cm}	Kolon Enkesitinde En Dış Basınç Lifi Birim Şekildeğiştirme
ε_{sm}	Kolon Enkesiti En Dış Çekme Düzeyindeki Boyuna Donatı Birim Şekildeğiştirme
$\rho_{h, enine}$	Kolon Enine Donatı Oranı
f_c	Kolon Numunesinin Deney Günündeki Beton Basınç Dayanımı
L_m	LVDT'ler Arası Mesafe
L_1, L_2	LVDT'lerin Mesnet Noktasına Olan Uzaklığı
Δ_1, Δ_2	LVDT Okumaları
L_0	LVDT'nin Temel Yüzüne Olan Mesafesini
E_u	Monotonik Yüklemenin Sönümlleme Enerjisi
θ_u	Monotonik Yüklemeye Ait Maksimum Dönme
Δ_u	Monotonik Yüklemeye Ait Maksimum Yerdeğiştirme
k_f	Monotonik Yüklemeye Ait Maksimum Rijitlik
M_n	Nominal Eğilme Momenti Kapasitesi (ACI-318, $\phi=1$)
P_0	Nominal Eksenel Yük Kapasitesi
ε_1	Negatif Yönde LVDT'lerden Alınan Toplam Birim Şekildeğiştirme
d'	Paspayı
θ_p	Plastik Dönme
ϕ_p	Plastik Eğrilik
L_p	Plastik Mafsal Boyu
Δ_p	Plastik Yerdeğiştirme
ε_2	Pozitif Yönde LVDT'lerden Alınan Toplam Birim Şekildeğiştirme
γ_{el}	Sismik Eleman Katsayısı
M_u	Son Limit (Taşıma Gücü) Sınır Durumu Eğilme Momenti
μ_u	Son Limit Durumdaki Yerdeğiştirme Sünekliliği
ϕ_u	Son Limit Eğriliği
E_i	Sonraki Çevrimsel Yüklemenin Sönümlleme Enerjisi

dE	Sönümleme Enerjisi
x_{LVDT}	Tarafsız Eksenin Negatif Yöndeki LVDT'ye Olan Mesafesi
α	Tezde Kullanılan Düzeltme Katsayısı
θ_{um}	Toplam Dönme Değeri (EUROCODE-8%)
DI	Toplam Hasar İndeksi
$\Delta_{top.}$	Toplam Yerdeğiştirme
Δ	Yerdeğiştirme
μ	Yerdeğiştirme Sünekliği
μ_{Δ}	Yerdeğiştirme Süneklik Oranı
ρ_{sx}	Yükleme Yönüne Paralel Enine Donatı Oranı

KISALTMA LİSTESİ

C	Sargı Özelliği Yüksek Beton (FEMA 356)
CP	Göçmenin Önlenmesi Performans Düzeyi (FEMA 356)
DBYBHY	Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik
DL	Minimum Hasar Sınırı (EUROCODE 8)
GÇ	Göçme Sınırı (TBDY)
GÖ	Göçmenin Önlenmesi (TBDY)
GV	Güvenlik Sınırı (TBDY)
IO	Hemen Kullanım Performans Düzeyi (FEMA 356)
KK	Kesintisiz Kullanım (TBDY)
KH	Kontrollü Hasar (TBDY)
LS	Can Güvenliği Performans Düzeyi (FEMA 356)
LVDT	Yerdeğiştirme Ölçer
MN	Minimum Hasar Sınırı (TBDY)
NC	Göçme Öncesi Hasar Sınırı (EUROCODE 8)
SD	Belirgin Hasar Sınırı (EUROCODE 8)
SH	Sınırlı Hasar (TBDY)
TBDY	Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1	Yerdeğiştirme kapasitesine eksenel yükün etkisi [47]	9
Şekil 2.1	Kolonların isimlendirilmesinde kullanılan kısaltmalar	10
Şekil 2.2	S351008-S352008-S353508 numaralı kolonlara ait donatı detayları	12
Şekil 2.3	S351008-S352008-S353508 kolonlara ait imalat fotoğrafları	13
Şekil 2.4	S451008-S452008-S453508 kolonlara ait donatı detayları	14
Şekil 2.5	S451008-S452008-S453508 kolonlara ait imalat fotoğrafları	15
Şekil 2.6	S601008-S602008-S603508 numaralı kolonlara ait donatı detayları	16
Şekil 2.7	S601008-S602008-S603508 numaralı kolonlara ait imalat fotoğrafları	17
Şekil 2.8	S451006-S452006 numaralı kolonlara ait donatı detayları	18
Şekil 2.9	S451006-S452006 numaralı kolonlara ait imalat fotoğrafları	19
Şekil 2.10	Şematik test düzeneği	20
Şekil 2.11	Deney düzeneğinin yan ve ön görünüşleri	21
Şekil 2.12	Şekildeğiştirme ölçerlerin bağlanması	22
Şekil 2.13	Şekildeğiştirme ölçerlerin konumları	23
Şekil 2.14	Kolon boyunca yerleştirilen LVDT'lerin konumu	24
Şekil 2.15	Veri toplayıcıya ait fotoğraf	25
Şekil 2.16	Şematik yükleme profili	25
Şekil 2.17	Kolonların analitik moment-eğrilik ilişkileri	26
Şekil 2.18	Kolonlara uygulanan yükleme profilleri	27
Şekil 3.1	S351008 kolonu için kapasite eğrisi	30
Şekil 3.2	S351008 için deney sırasında gözlemlenen hasar durumları	32
Şekil 3.3	S351008 için deney sonuna ait hasar durumu	32
Şekil 3.4	S451008 kolonu için kapasite eğrisi	33
Şekil 3.5	S451008 için deney sırasında gözlemlenen hasar durumları	35
Şekil 3.6	S451008 için deney sonu hasar fotoğrafları	35
Şekil 3.7	S601008 kolonu için kapasite eğrisi	36
Şekil 3.8	S601008 için deney sırasında gözlemlenen hasar durumları	38
Şekil 3.9	S601008 için deney sonu hasar fotoğrafları	38
Şekil 3.10	S352008 için kapasite eğrisi	39
Şekil 3.11	S352008 için deney sırasında gözlemlenen hasar durumları	41
Şekil 3.12	S352008 için deney sonu hasar fotoğrafları	41

Şekil 3.13 S452008 için kapasite eğrisi	42
Şekil 3.14 S452008 için deney sırasında gözlemlenen hasar durumları	44
Şekil 3.15 S452008 için deney sonu hasar fotoğrafları	44
Şekil 3.16 S602008 için kapasite eğrisi	45
Şekil 3.17 S602008 için deney sırasında gözlemlenen hasar durumları	47
Şekil 3.18 S602008 için deney sonu hasar fotoğrafları	47
Şekil 3.19 S353508 için kapasite eğrisi	48
Şekil 3.20 S353508 için deney sırasında gözlemlenen hasar durumları	50
Şekil 3.21 S353508 için deney sonu hasar fotoğrafları	50
Şekil 3.22 S453508 için kapasite eğrisi	51
Şekil 3.23 S453508 için deney sırasında gözlemlenen hasar durumları	53
Şekil 3.24 S453508 için deney sonu hasar fotoğrafları	53
Şekil 3.25 S603508 için kapasite eğrisi	54
Şekil 3.26 S603508 için deney sırasında gözlemlenen hasar durumları	56
Şekil 3.27 S603508 için deney sonu hasar fotoğrafları	56
Şekil 3.28 S451006 için kapasite eğrisi	57
Şekil 3.29 S451006 için deney sırasında gözlemlenen hasar durumları	59
Şekil 3.30 S451006 için deney sonu hasar fotoğrafları	59
Şekil 3.31 S452006 için kapasite eğrisi	60
Şekil 3.32 S452006 için deney sırasında gözlemlenen hasar durumları	62
Şekil 3.33 S452006 için deney sonu hasar fotoğrafları	62
Şekil 3.34 S351008 için yük-yerdeğiştirme ilişkisi	63
Şekil 3.35 S451008 için yük-yerdeğiştirme ilişkisi	64
Şekil 3.36 S601008 için yük-yerdeğiştirme ilişkisi	64
Şekil 3.37 S352008 için yük-yerdeğiştirme ilişkisi	65
Şekil 3.38 S452008 için yük-yerdeğiştirme ilişkisi	65
Şekil 3.39 S602008 için yük-yerdeğiştirme ilişkisi	66
Şekil 3.40 S353508 için yük-yerdeğiştirme ilişkisi	66
Şekil 3.41 S453508 için yük-yerdeğiştirme ilişkisi	67
Şekil 3.42 S603508 için yük-yerdeğiştirme ilişkisi	67
Şekil 3.43 S451006 için yük-yerdeğiştirme ilişkisi	68
Şekil 3.44 S452006 için yük-yerdeğiştirme ilişkisi	68
Şekil 3.45 Deneysel eğriliğin hesabı	70
Şekil 3.46 S351008 için deneysel maksimum moment-eğrilik ilişkisi	71
Şekil 3.47 S451008 için deneysel maksimum moment-eğrilik ilişkisi	71
Şekil 3.48 S601008 için deneysel maksimum moment-eğrilik ilişkisi	72
Şekil 3.49 S352008 için deneysel maksimum moment-eğrilik ilişkisi	72
Şekil 3.50 S452008 için deneysel maksimum moment-eğrilik ilişkisi	73
Şekil 3.51 S602008 için deneysel maksimum moment-eğrilik ilişkisi	73

Şekil 3.52 S353508 için deneysel maksimum moment-eğrilik ilişkisi	74
Şekil 3.53 S453508 için deneysel maksimum moment-eğrilik ilişkisi	74
Şekil 3.54 S603508 için deneysel maksimum moment-eğrilik ilişkisi	75
Şekil 3.55 S451006 için deneysel maksimum moment-eğrilik ilişkisi	75
Şekil 3.56 S452006 için deneysel maksimum moment-eğrilik ilişkisi	76
Şekil 4.1 Plastik mafsalları tanımları [48]	78
Şekil 4.2 S351008 için kolon boyunca eğrilik diyagramı	80
Şekil 4.3 S351008 için üç farklı seviyede moment-eğrilik diyagramı	80
Şekil 4.4 S351008 için farklı seviyelere ait maksimum birim şekil değiştirme diyagramı	81
Şekil 4.5 S351008 kolonu için plastik mafsalları boyu	82
Şekil 4.6 S451008 için kolon boyunca eğrilik diyagramı	82
Şekil 4.7 S451008 için üç farklı seviyede moment-eğrilik diyagramı	83
Şekil 4.8 S451008 için farklı seviyelere ait maksimum birim şekil değiştirme diyagramı	84
Şekil 4.9 S451008 kolonu için plastik mafsalları boyu	84
Şekil 4.10 S601008 için kolon boyunca eğrilik diyagramı	85
Şekil 4.11 S601008 için üç farklı seviyede moment-eğrilik diyagramı	85
Şekil 4.12 S601008 için farklı seviyelere ait maksimum birim şekil değiştirme diyagramı	86
Şekil 4.13 S601008 kolonu için plastik mafsalları boyu	87
Şekil 4.14 S352008 için kolon boyunca eğrilik diyagramı	88
Şekil 4.15 S352008 için üç farklı seviyede moment-eğrilik diyagramı	88
Şekil 4.16 S352008 için farklı seviyelere ait maksimum birim şekil değiştirme diyagramı	89
Şekil 4.17 S352008 kolonu için plastik mafsalları boyu	90
Şekil 4.18 S452008 için kolon boyunca eğrilik diyagramı	91
Şekil 4.19 S452008 için üç farklı seviyede moment-eğrilik diyagramı	91
Şekil 4.20 S452008 için farklı seviyelere ait maksimum birim şekil değiştirme diyagramı	92
Şekil 4.21 S452008 kolonu için plastik mafsalları boyu	93
Şekil 4.22 S602008 için kolon boyunca eğrilik diyagramı	94
Şekil 4.23 S602008 için üç farklı seviyede moment-eğrilik diyagramı	94
Şekil 4.24 S602008 için farklı seviyelere ait maksimum birim şekil değiştirme diyagramı	95
Şekil 4.25 S452008 kolonu için plastik mafsalları boyu	96
Şekil 4.26 S353508 için kolon boyunca eğrilik diyagramı	97
Şekil 4.27 S353508 için üç farklı seviyede moment-eğrilik diyagramı	97

Şekil 4.28 S353508 için farklı seviyelere ait maksimum birim şekildeğiştirme diyagramı	98
Şekil 4.29 S353508 kolonu için plastik mafsallık boyu	99
Şekil 4.30 S453508 için kolon boyunca eğrilik diyagramı	100
Şekil 4.31 S453508 için üç farklı seviyede moment-eğrilik diyagramı	100
Şekil 4.32 S453508 için farklı seviyelere ait maksimum birim şekildeğiştirme diyagramı	101
Şekil 4.33 S453508 kolonu için plastik mafsallık boyu	102
Şekil 4.34 S603508 için kolon boyunca eğrilik diyagramı	103
Şekil 4.35 S603508 için üç farklı seviyede moment-eğrilik diyagramı	103
Şekil 4.36 S603508 için farklı seviyelere ait maksimum birim şekildeğiştirme diyagramı	104
Şekil 4.37 S603508 kolonu için plastik mafsallık boyu	105
Şekil 4.38 S451006 için kolon boyunca eğrilik diyagramı	106
Şekil 4.39 S451006 için üç farklı seviyede moment-eğrilik diyagramı	106
Şekil 4.40 S451006 için farklı seviyelere ait maksimum birim şekildeğiştirme diyagramı	107
Şekil 4.41 S451006 kolonu için plastik mafsallık boyu	108
Şekil 4.42 S452006 için kolon boyunca eğrilik diyagramı	109
Şekil 4.43 S452006 için üç farklı seviyede moment-eğrilik diyagramı	109
Şekil 4.44 S452006 için farklı seviyelere ait maksimum birim şekildeğiştirme diyagramı	110
Şekil 4.45 S452006 kolonu için plastik mafsallık boyu	111
Şekil 5.1 TBDY'e göre taşıyıcı sistem elemanları için bina performans düzeyleri	113
Şekil 5.2 S351008 kolonu için yönetmeliklere göre yerdeğiştirme kapasitesi .	118
Şekil 5.3 S451008 kolonu için yönetmeliklere göre yerdeğiştirme kapasitesi .	118
Şekil 5.4 S601008 kolonu için yönetmeliklere göre yerdeğiştirme kapasitesi .	119
Şekil 5.5 S352008 kolonu için yönetmeliklere göre yerdeğiştirme kapasitesi .	119
Şekil 5.6 S452008 kolonu için yönetmeliklere göre yerdeğiştirme kapasitesi .	120
Şekil 5.7 S602008 kolonu için yönetmeliklere göre yerdeğiştirme kapasitesi .	120
Şekil 5.8 S353508 kolonu için yönetmeliklere göre yerdeğiştirme kapasitesi .	121
Şekil 5.9 S453508 kolonu için yönetmeliklere göre yerdeğiştirme kapasitesi .	121
Şekil 5.10 S603508 kolonu için yönetmeliklere göre yerdeğiştirme kapasitesi .	122
Şekil 5.11 S451006 kolonu için yönetmeliklere göre yerdeğiştirme kapasitesi .	122
Şekil 5.12 S452006 kolonu için yönetmeliklere göre yerdeğiştirme kapasitesi .	123
Şekil 6.1 ASCE/SEI 41-13 yönetmeliğine göre omurga eğrisi çizimi [80] . . .	129
Şekil 6.2 Normalize edilmiş kümülatif sönümlenme enerjisi ile düktilite ilişkisi	130
Şekil 6.3 Göçme durumuna ait normalize edilmiş kümülatif sönümlenme enerjisi ile düktilite ilişkisi	131

Şekil 6.4	S351008 kolonu için hasar indeksi sonuçları	133
Şekil 6.5	S451008 kolonu için hasar indeksi sonuçları	133
Şekil 6.6	S601008 kolonu için hasar indeksi sonuçları	134
Şekil 6.7	S352008 kolonu için hasar indeksi sonuçları	134
Şekil 6.8	S452008 kolonu için hasar indeksi sonuçları	134
Şekil 6.9	S602008 kolonu için hasar indeksi sonuçları	135
Şekil 6.10	S353508 kolonu için hasar indeksi sonuçları	135
Şekil 6.11	S453508 kolonu için hasar indeksi sonuçları	135
Şekil 6.12	S603508 kolonu için hasar indeksi sonuçları	136
Şekil 6.13	S451006 kolonu için hasar indeksi sonuçları	136
Şekil 6.14	S452006 kolonu için hasar indeksi sonuçları	136

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1	Deney numunelerinin geometrik özellikleri ve donatı düzeni	11
Tablo 2.2	Kolonlara ait malzeme özellikleri	11
Tablo 2.3	Kolonlara uygulanan yükleme profilleri	28
Tablo 3.1	ATC-38'e [42] göre hasar durumları ve karşı gelen hasar	29
Tablo 3.2	S351008 numaralı kolona ait kapasiteler	30
Tablo 3.3	S351008 için deney sırasında ölçülen ve gözlemlenen hasar durumları	31
Tablo 3.4	S451008 numaralı kolona ait kapasiteler	33
Tablo 3.5	S451008 için deney sırasında ölçülen ve gözlemlenen hasar durumları	34
Tablo 3.6	S601008 numaralı kolona ait kapasiteler	36
Tablo 3.7	S601008 için deney sırasında ölçülen ve gözlemlenen hasar durumları	37
Tablo 3.8	S352008 numaralı kolona ait kapasiteler	39
Tablo 3.9	S352008 için deney sırasında ölçülen ve gözlemlenen hasar durumları	40
Tablo 3.10	S452008 numaralı kolona ait kapasiteler	42
Tablo 3.11	S452008 için deney sırasında ölçülen ve gözlemlenen hasar durumları	43
Tablo 3.12	S602008 numaralı kolona ait kapasiteler	45
Tablo 3.13	S602008 için deney sırasında ölçülen ve gözlemlenen hasar durumları	46
Tablo 3.14	S353508 numaralı kolona ait kapasiteler	48
Tablo 3.15	S353508 için deney sırasında ölçülen ve gözlemlenen hasar durumları	49
Tablo 3.16	S453508 numaralı kolona ait kapasiteler	51
Tablo 3.17	S453508 için deney sırasında ölçülen ve gözlemlenen hasar durumları	52
Tablo 3.18	S603508 numaralı kolona ait kapasiteler	54
Tablo 3.19	S603508 için deney sırasında ölçülen ve gözlemlenen hasar durumları	55
Tablo 3.20	S451006 numaralı kolona ait kapasiteler	57
Tablo 3.21	S451006 için deney sırasında ölçülen ve gözlemlenen hasar durumları	58
Tablo 3.22	S452006 numaralı kolona ait kapasiteler	60
Tablo 3.23	S452006 için deney sırasında ölçülen ve gözlemlenen hasar durumları	61
Tablo 5.1	Kolonlara ait yönetmeliklere göre hesaplanmış plastik dönme kapasiteleri	116
Tablo 5.2	Kolonlara ait yerdeğiştirme kapasiteleri	116
Tablo 6.1	Hasar indeks modellerine göre hasar seviyeleri ve göstergeleri . . .	125
Tablo 6.2	Veri tabanındaki kolonlara ait özellikler	128

Tablo 6.3 Veri tabanındaki kolonların ait malzeme ve geometrik özellikleri . . 129

Betonarme Kolonların Yatay Yükler Altında Davranışı

Sinan CANSIZ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Doktora Tezi

Danışman: Prof. Dr. Güray ARSLAN

Eş-Danışman: Doç. Dr. Cem AYDEMİR

Son yıllarda, sismik yükler altında zorlanan betonarme kolonların davranışı ve belirli bir performans hedefine göre tasarımına yönelik literatürde çok sayıda çalışma yapılmaktadır. Bu çalışmaların büyük bir kısmı, belirli bir performans hedefine bağlı olarak tanımlanan hasar sınırı için tasarım detaylarının iyileştirilmesi ve hasar sınır yaklaşımında uygulanan yöntemin geliştirilmesinin amaçlandığı ve yaygın olarak deneysel çalışmaları içermektedir. Bu tez çalışmasında, betonarme kolonların deprem yükleri altındaki davranışı, hasar sınır durumları ve karşı gelen yerdeğiştirme kapasitelerinin deneysel olarak incelenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla, konsol olarak üretilen ve sabit eksenel yük etkisindeki kolon numunesine tersinir çevrimsel deprem yükü, yerdeğiştirme kontrollü ve artan genlikli yatay olarak etki ettirildiği bir yükleme profili ile benzeştirilerek uygulanmıştır. Deney programında 11 adet kolon üretilmiş ve test edilmiştir. Deneysel olarak elde edilen yük-yerdeğiştirme ilişkisi, moment-eğrilik ilişkisi, çeşitli hasar düzeylerindeki hasar gözlemleri, plastik mafsallık boyu ve malzeme hasar birim, sekildeğiştirmeleri irdelenmiştir. Ayrıca çeşitli hasar sınırları için deneysel olarak belirlenen yerdeğiştirme kapasiteleri, plastik mafsallık boyu ve malzeme birim, sekildeğiştirme sınır değerleri, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, EUROCODE-8 ve FEMA356 yönetmeliklerinde verilen hasar sınırı yaklaşımları ile çeşitli araştırmacıların önerileri kullanılarak belirlenen analitik sonuçlar karşılaştırılmış ve bağıntıların daha iyi tahminine yönelik yorumlar yapılmıştır. Performansa dayalı tasarım, birçok uluslararası yönetmelikte yaygın olarak kullanılmaktadır. Betonarme elemanlar Performansa Dayalı Tasarım prensibine dayanarak hedef performans seviyesine ulaşana kadar hasara maruz kalır.

Sismik hasar indeksleri olası zararı tahmin etmek için yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu hasar indeksleri, yapısal elemanın yükleme sonrası oluşan hasar durumun değerlendirilmesi için yapının tepki parametreleri kullanılarak tahmin edilmektedir. Bu deneysel veriler ışığında yeni bir hasar modeli önerilerek literatürde sıkça kullanılan hasar modelleri ile karşılaştırmıştır.

Anahtar Kelimeler: Sismik performans, hasar indeksi, deneysel yük-yerdeğiştirme ilişkisi, yerdeğiştirme kapasitesi, plastik mafsall boyu

Behavior of Reinforced Concrete Columns under Horizontal Loads

Sinan CANSIZ

Department of Civil Engineering

Doctor of Philosophy Thesis

Advisor: Prof. Dr. Güray ARSLAN

Co-advisor: Assoc. Prof. Dr. Cem AYDEMİR

In recent years, a significant number of studies on the behavior of reinforced concrete columns subjected to seismic loads and their design according to a particular target performance have been conducted. The majority of these studies involve mostly experimental studies aiming to improve design details for the damage limit defined according to a particular target performance and to enhance the method used in the damage limit approach. In this study, it is aimed to investigate the behavior of reinforced concrete columns under earthquake loads, damage limits and corresponding displacement capacities experimentally. For this purpose, a displacement-controlled loading profile with increasing amplitude, which represents reversed-cyclic earthquake loading, was laterally applied to cantilever columns under constant axial loads. In the test program, 11 column samples were produced and tested. Load-displacement and moment-curvature relations, damage observations at various damage levels, plastic hinge lengths and material damage strains obtained experimentally were examined. In addition, displacement capacities, plastic hinge lengths and material damage strain limits determined for various damage limits experimentally were compared with the results obtained by using the damage limit approaches given by Turkey Building Earthquake Code, Eurocode-8 and FEMA356 and those proposed by various researchers, and comments for improving the accuracy of predictions delivered by these equations were made. Performance-based design has been widely used in many international codes. Reinforced concrete elements are subjected to damage until they reach the target performance level according to the

principle of performance-based design.

Seismic damage indices have been widely used to estimate potential damage. These damage indices are estimated to assess the damage state after loading the structural element by using the response parameters of the structure. In the light of the experimental data, a new damage model has been proposed and compared with the commonly used damage models in the literature.

Keywords: Seismic performance, damage index, experimental load-displacement relationship, deformation capacity, plastic hinge length

1 GİRİŞ

Betonarme taşıyıcı sistemlerin tasarımı, kuvvet ya da şekildeğiştirme esaslı yaklaşımlar esas alınarak yapılabilir. Şekildeğiştirme esaslı yaklaşımlar, elastik ötesi zorlamalar altında yapısal davranışı daha gerçekçi betimlemesi nedeniyle son yıllarda tasarım yönetmeliklerde yaygın olarak kullanılmaya başlamıştır. Performansa dayalı tasarım olarak da adlandırılan bu yöntemde belirli bir deprem etkisindeki yapısal sistemdeki muhtemel hasarın nitelenmesi, deprem talebine bağlı belirlenen şekildeğiştirme istemlerinin şekildeğiştirme hasar sınırları ile karşılaştırılmasıyla yapılmaktadır.

Yapıların depreme dayanıklı tasarımında süneklik, tasarımın ekonomikliğini etkileyen önemli bir parametredir. Yönetmeliklerde yapının sünek davranış gösterebilmesi için istenmeyen türde mekanizma durumlarının ya da göçme biçimlerinin önlenmesi amaçlanır. Sünek yapısal davranışın temini için tasarım yönetmeliklerinde yapısal davranış ve eleman bazında birçok kural/prensip uygulanır. Kolonların kirişlerden kuvvetli tasarlanması prensibi, sistem bazında uygulanan tasarım kurallarına örnek olarak verilebilir. Bu tasarım prensibi uygulamasıyla elastik ötesi zorlanan bir yapıda plastik davranış kiriş uç kesimlerinde meydana gelmesi ve kiriş mekanizması durumu sağlanarak; istenmeyen tür mekanizma durumu olan kolon mekanizması durumu önlenir. Sünek davranış biçiminin temini için eleman bazında uygulanan prensiplere kapasite tasarımı örnek olarak verilebilir. Bu tasarım prensibi uygulamasıyla yapının potansiyel plastik davranış bölgelerinde kesme kuvveti talebinin olası en büyük değeri elde edilerek, gevrek tür kesme kırılmasının önlenmesi sağlanır.

Yapısal sistemlerin öngörülen performansa göre tasarımı, taşıyıcı sistem elemanlarında öngörülen hasar miktarının aşılmamasının kontrolüyle yapılmaktadır. Bu uygulama belirli bir deprem etkisinde yapısal sistemin ön görülen performansın ve sünek taşıyıcı sistemler için izin verilen en büyük şekildeğiştirme kapasitesi ya da hasar sınırının yönetmeliklerce tanımlanması gerektirir. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY) sünek taşıyıcı sistem elemanlarında öngörülen hasar sınırları nitelendirilmesinde malzeme birim şekildeğiştirme üst sınırları tanımlamaktadır. Yeni

Zelanda Betonarme Yapı Standardı, Türk Deprem Yönetmeliğine benzer biçimde, betonarme yapı elemanlarının hasar sınırlarını, malzeme birim şekildeğiştirme üst sınırları yardımıyla ifade etmektedir. Yeni Zelanda Betonarme Yapı Standardı, şekildeğiştirme üst sınırlarını ya da eğrilik sünekliği oranlarını; eleman türü, yükleme türü, sargı donatısının ve boyuna donatı oranının minimum gereksinimleri karşılayıp karşılamadığı ile süneklik düzeyine göre farklı bir biçimde tanımlamaktadır. EUROCODE-8 ise yapısal elemanların hasar sınırlarını ötelenme oranına bağlı olarak ifade etmektedir. EUROCODE-8 yönetmeliğinde betonarme elemanların maksimum ve plastik ötelenme oranı birçok parametreye bağlı olarak hesaplanabilmektedir. Yaygın olarak kullanılan bir diğer yönetmelik olan FEMA356'da, taşıyıcı elemanlarda meydana gelen geçici ve kalıcı dönme oranına göre hasar sınırları belirlenebilmektedir.

1.1 Literatür Özeti

Betonarme yapılarda sünek tasarımın sağlanmasında en önemli yapı elemanı olan kolon üzerine birçok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmaların ilklerinden birisi olarak 1975 yılında betonarme konsol bir kolonda eğrilik düktilitesi ile yerdeğiştirme düktilitesi arasındaki ilişki bir bağıntı ile ifade edilmiştir. Bu bağıntı kolon boyunca eğrilik profilini kullanarak hesaplanmaktadır [1].

İlerleyen yıllarda devam eden çalışmalarda farklı eksenel yük seviyesi ve farklı kesite sahip betonarme kolonların taşıma kapasitesi, maksimum eğrilik ve yerdeğiştirme kapasitesi üzerine araştırmalar yapılmıştır [2]. Sonrasında betonarme kolonların enine donatı etkisi araştırılarak farklı eksenel yük seviyeleri altında incelenmiştir [3]. Enine donatıların etkisi üzerine birçok araştırmacı çalışmıştır. 1986 yılında yapılan çalışmada 4 betonarme kolon test edilerek teorik ve deneysel eğilme dayanımları karşılaştırılmıştır[4].

Sonrasında bazı araştırmacılar tarafından betonarme kolonların yükleme profilinin etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla farklı eksenel yük seviyesi, farklı enine donatı oranı ve farklı yükleme profiline sahip 14 betonarme kolon sismik olarak analiz edilmiştir [5]. Ardından betonarme kolonların kesme açıklığı ve plastik mafsallık boyu arasındaki ilişki araştırılmıştır. 1989 yılında yapılan çalışmada 1/6 ölçekli 6 betonarme köprü kolon numunesinin elastik ötesi (inelastik) çevrimsel yükleme altında davranışını incelenerek, plastik mafsallık boyunun kesme açıklığı ile doğru orantılı olarak değiştiği tespit edilmiştir [6]. İlerleyen yıllarda betonarme kolonları etkileyen parametreler üzerine devam eden birçok deneysel ve teorik çalışmalar yapılmıştır.

Betonarme kolonların hasar durumlarının tespiti için hasar indeksleri birçok araştırmacı tarafından kullanılmaktadır. Bu alanda yapılan ilk çalışmalardan birisi olan Park-Ang modelinde yük-yerdeğiştirme ilişkisi ile sönümleme enerjisine bağlı bir bağıntı geliştirilmiştir [7].

Watson ve Park tarafından 1989 yılında yapılan çalışmada betonarme kolonların farklı enine donatı oranının etkisini incelenmiştir [8]. Sonuç olarak kolonlarda yeterli süneklik oranı sağlanması için Yeni Zelanda Deprem Yönetmeliği (NZS3101) için yeni bağıntı önerilmiştir. Çalışmada ana tasarım parametresi olarak yanal donatı etkisi incelenmiştir.

Park, Reinhorn ve Kunnath 1987 yılından yapılan çalışmasında betonarme çerçevenin sismik analizi incelenmiştir. İncelenen sistem bilgisayar programı ile modellenerek deneysel verilerle doğrulanmıştır [9].

Tanaka ve Park (1990) tarafından yapılan çalışmada enine donatının betonarme kolonların düktilitesine olan etkisini inceleyerek betonarme kolonların tasarımında deprem etkisinin en önemli bileşen olduğu belirtilmiştir. Ayrıca enine donatıların kancalarına ait açılarının farklı değerlerine göre sünekliğe etkisi araştırılmıştır [10].

Rolf ve Longfei 1992 yılında yapılan çalışmasında maksimum dönme kapasitesi ile plastik mafsallı boyunun hesabı incelenmiştir [11]. Çalışma neticesinde betonarme elemanların dönme kapasitesini belirleyen sayısal bir model önerilmiştir.

Azizinamini, Corley ve Johal (1992) tarafından farklı eksenel yük seviyesi ve farklı enine donatı oranına sahip 12 betonarme kolonun sismik analizi yapılmıştır [12]. Çalışma kapsamında araştırılan parametreler; eksenel yük seviyesi ve enine donatı detayları yer almaktadır. Çalışma sonucunda yeni enine donatı detayları tanımlanmış ve test edilmiştir.

Sheikh ve Khoury (1993) tarafından yapılan çalışmada, yüksek dayanımlı betona sahip 4 betonarme kolon ile normal dayanıma sahip 6 betonarme kolon incelenerek, yüksek dayanımlı betonun çekirdek betonun davranışına etkisi araştırılmıştır [13].

Mander, Panthaki ve Kasalanati (1994) tarafından yapılan çalışmada, betonarme çeliğinin düşük genlikte yorulma davranışı incelenmiştir. Çalışma neticesinde yükleme genliğinin, tekrar sayısına etkisi tespit edilerek bir model önerilmiştir [14].

Kunnath, Hoffman, Reinhorn ve Mander (1995) tarafından yapılan çalışmada, kolon-kiriş birleşim noktalarının deprem etkisinde zeminle birlikte etkileşimi incelenmiştir. Çalışmada, zemin değerlerinin deprem etkisini önemli oranda yansıtan bir parametre olduğunu gösterip, birleşim bölgesine ait hasar indeks değerleri hesaplanmıştır [15].

Bracci, Kunnath ve Reinhorn (1997) tarafından yapılan çalışmada, betonarme bir çerçevenin sismik analizi gerçekleştirilmiştir. Ayrıca her bir kat için dönme oranı ile hasar durumları ve elastik kapasiteler karşılaştırılmıştır [16].

Bayrak ve Sheikh tarafından yapılan çalışmada, yüksek dayanıma sahip 24 betonarme kolon test edilmiştir. Test sonucunda; artan eksenel yük ile her yükleme çevriminde rijitlikte önemli oranda azalma olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca yerdeğiştirme düktilitesinin kesit geometrisi ve kesme açıklığının etkili derinlik oranına bağlı olduğu belirlenmiştir [17].

Ghobarah, Abou Elfath ve Biddah (1999) tarafından yapılan çalışmada, çeşitli deprem kayıtlarından elde edilen yükleme profillerinin farklı hasar indekslerine göre sonuçları incelenmiştir. İnceleme sonucu, her deprem kaydı sonucunda farklı hasar durumları ortaya çıktığı tespit edilmiştir [18].

El-Bahy, Kunnath, Stone ve Taylor (1997) tarafından yapılan çalışmada, farklı yükleme profillerine sahip 12 betonarme kolonun sismik analizi yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre yükleme profilinin betonarme kolonların davranışına etki ettiği görülmüş ve yeni bir hasar modeli önerilmiştir [19].

Lehmann ve Moehle (2000) tarafından hazırlanan raporda, hasar indekslerinin tekrarlı yükler altında sonuçları irdelenmiştir. Çalışma neticesinde deneysel sonuçlar kullanılarak yeni bir hasar modeli geliştirilmiştir. Analitik araştırmada, deneysel sonuçlar kullanılarak eleman hasarını değerlendirmek için mühendislik parametrelerini sayısal olarak değerlendirme yöntemleri geliştirilmiştir. Araştırma sonuçları betonarme köprü kolonları için performans dayalı yaklaşımı geliştirmek amacıyla kullanılmıştır [20].

Cosenza ve Manfredi (2000) tarafından yapılan çalışmada, literatürde sıklıkla kullanılan hasar modelleri karşılaştırılmıştır [21]. Ayrıca çalışmada depreme ait parametreler gözden geçirilmiştir. Deprem ivme kayıtlarına dayalı olarak sismik hasar potansiyeli ölçümleri ilk olarak anlatılmakta, ardından basit (doğrusal) ve daha karmaşık (doğrusal olmayan) yapısal tepkiler ile ilgili hasar modelleri araştırılmıştır. Elwood ve Moehle tarafından yapılan çalışmada betonarme kolonların yerdeğiştirme bileşenleri ile FEMA356 yönetmeliğinde bulunan iskelet eğrisi metodunu kullanarak betonarme kolonların dönme kapasitesi üzerine inceleme yapılmıştır [22].

Sezen ve Moehle (2004) tarafından yapılan çalışmada, betonarme kolonların eğilme, sıyrılma ve kesme bileşenlerini kullanarak, yerdeğiştirme kapasitesini hesaplanmıştır. Elde edilen deneysel sonuçların analitik sonuçlar ile uyumlu olduğu tespit edilmiştir [23].

Tsuno ve Park (2004) tarafından yapılan çalışmada, betonarme kolonların çevrimsel yatay yük ve eksenel yük altında hasar ve göçme performansının tahminine dönük çalışma yapılmıştır. Tsuno ve Park'ın çalışmasında sıkça kullanılan hasar modellerinin karşılaştırılması ve izlenen hasar göstergelerinin değerleri araştırılmıştır [24].

Kunnath ve Chai (2004) tarafından yapılan çalışmada, yorulma davranışını inceleyerek betonarme kolonlar için çevrime ait tekrar sayısı ile yerdeğiştirme duktilitesi arasında bir bağıntı önerilmiştir [25].

Sucuoglu ve Erberik 2004 yılında yapılan çalışmasında düşük genlikli yükleme profilinin betonarme kolonların sönmleme enerjisine etkisi incelenmiştir [26]. Düşük genlikli yüklemeye maruz kolonlarda sönmleme enerjisi; rijitlik ve yerdeğiştirme duktilitesine bağlı olarak ifade edilmiştir.

Li He ve Xianguo Ye tarafından yapılan çalışmada, betonarme kolon numunesinin

artan genlikli yükleme profili altında hasar durumunu farklı hasar indekslerine göre incelenmiştir. Literatürde kullanılan hasar indekslerinden elde edilen sayısal değerler ile gözle görülen hasar durumları arasındaki ilişki incelenmiştir. Çalışmada çeşitli hasar modellerinin sayısal olarak farklı sonuçlar verdiği tespit edilmiştir [27].

Bazan ve Sasani tarafından yapılan çalışmada, betonarme bir elemanın çevrimsel yükleme altında deneysel analizi yapılarak Park ve Ang'ın hasar indeksi bağıntısı ile karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak monotonik yüklemenin yapıda gerçekleşmeyecek bir yükleme türü olduğu belirtilerek hasarın göstergesi olarak ötelenme oranına bağlı bağıntı önerilmiştir [28].

Colombo ve Negro (2005) tarafından yapılan çalışmada, yeni bir hasar modeli geliştirilerek, literatürde yapılmış deneyler üzerinde karşılaştırılmıştır [29]. Ayrıca, alışma neticesinde hasar indeksi; yapının başlangıç rijitliği ile azalan rijitliği arasındaki oran olarak tanımlanmıştır.

Bae, Mises ve Bayrak tarafından 2005 yılında yapılan çalışmada betonarme donatısının burkulma davranışı incelenmiştir [30]. İncelenen bu çalışmada, toplam 162 donatı çubuğu örneğinin salt basınç altında testi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre donatı çubuklarının burkulma davranışına, L/d ve e/d oranlarının etkisi incelenmiş ve L/d oranının kapasite üzerinde ana etken olduğu bulunmuştur.

Bae ve Bayrak (2008) tarafından yapılan çalışmada, yeni bir plastik mafsal modeli önerilmiştir. Önerilen plastik mafsal modeli eksenel yükün etkisini dikkate alarak, mevcut modellerle karşılaştırılmıştır. Deneysel ve literatürdeki verilere göre önerilen plastik mafsal modelinin uygun sonuçlar verdiği belirtilmiştir [31].

Vielma, Barbat ve Oller (2008) tarafından yapılan çalışmada, literatürde kullanılan hasar modellerinin sayısal uygulaması yapılmış ve karşılaştırılmıştır [32].

Zhang, Xiao ve Kunnath (2008) tarafından yapılan çalışmada, 10 betonarme kolonun düşük genlikli yükleme altında sismik analizi yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre yükleme profilinin tekrar sayısı üzerinde etken olduğu tespit edilmiştir [33].

Jiang, Chen vd. (2011) tarafından yapılan çalışmada, Park ve Ang'a ait hasar indeksi modeli geliştirilmiştir. Geliştirilen yeni bağıntının orjinal modele göre daha iyi sonuçlar verdiği belirtilmiştir [34].

Vui, Ashraf, Ronagh ve Baji (2011) taraflarından yapılan çalışmada yaygın olarak kullanılan hasar indeksleri araştırılmış, yeni bir hasar modeli önerilmiştir. Bu modele göre hasarın en önemli parametresi olarak kalıcı yerdeğiştirme düşünülüp bunu ifade eden enerjiye bağlı bağıntı önerilmiştir. Önerilen bağıntıya göre elde edilen sonuçlar Park ve Ang'ın bağıntısı ile karşılaştırarak sonucunun kullanılabilir olduğunu belirtilmiştir [35].

Rodrigues, Arede, Varum ve Costa (2012) tarafından yapılan çalışmada, 24 betonarme kolonun bir eksenli ve iki eksenli yükleme altında hasar durumları gözlemlenmiştir. Park ve Ang'a ait hasar modelindeki bulunan hasar değerlerine göre gözlemlenen

hasar düzeyleri karşılaştırılmıştır. Sonuçları irdelendiğinde Park ve Ang hasar modeli ile hesaplanan hasar katsayıları ile hasar gözlemleri arasında iyi sonuçlar verdiği görülmüştür [36].

Sinha ve Shiradhonkar tarafından yapılan çalışmada, literatürde kullanılan yerel hasar hasar indeksleri karşılaştırılmıştır. Çalışma neticesinde yaygın kullanılan bağıntıların göçme ve minimum hasar düzeylerini tahmin etmede başarılı oldukları belirtilmiştir. Ancak hasarın kademeli olarak değiştiği, göçme ve minimum hasar arasındaki bölgede tahminlerin istenilen düzeyde olmadığı tespit edilmiştir [37].

Heo ve Kunnath (2013) tarafından yapılan çalışmada, betonarme bir çerçevenin gerçek bir deprem kaydı etkisinde davranışı incelenmiştir [38]. Çalışma sonucunda betonarme çerçevelerin performans dayalı sismik değerlendirmesi için hasara dayalı bir yaklaşım önerilmektedir.

Ou, Alrasyid, Haber ve Lee (2015) tarafından yapılan çalışmada, yüksek dayanımlı beton ve yüksek dayanımlı çelik kullanılarak üretilen betonarme kolonların sismik analizi yapılarak davranışı test edilmiştir [39]. Çalışmada boyuna donatı ekleri ile enine donatı eklerinin etkisi araştırılarak, kaynaklı eklerin normal kancalı birleşimlerden daha üstün olduğu önerilmektedir.

Xing, Özbulut, Lei ve Liu tarafından 2016 yılında yapılan çalışmada düşük genlikli yükleme etkisini incelemek amacıyla 14 betonarme kolonun sismik analizi gerçekleştirilmiştir. Çalışma neticesinde düşük genlikli yorulma etkisini dikkate alan yaklaşımların daha uygun sonuçlar verdiği tespit edilmiştir [40].

Literatür araştırması sonucunda aşağıda belirtilen bazı bulgular belirlenmiştir.

- Deneysel çalışmalarda çoğunlukla betonarme kolonlarda eksenel yük etkisi ile enine donatı oranının etkisi araştırılmıştır. Buna karşın betonarme kolonların etkili derinliğin kesme açıklığına oranının etkisi (a/d), yükleme şekillerinin etkisi ve eğrilik düktilitesini etkileyen parametrelere az ilgi duyulmuştur.
- Deneysel çalışmalarda çoğunlukla düşük eksenel yüke sahip kolonlar incelenmiştir. Yüksek eksenel yükün etkisini inceleyen deneysel çalışmalar sınırlı sayıdadır.

1.2 Tezin Amacı

Bu çalışmanın amacı, sabit eksenel yük altında tersinir çevrimsel zorlanan betonarme kolonların davranışı deneysel olarak incelenmesidir. Deneysel incelemelerde; eksenel yük düzeyi, kesme açıklığının etkili derinliğe oranı (a/d) ve yanal donatı miktarı gibi tasarım parametreleri değişken olarak dikkate alınmıştır. Deney programında eksenel yük seviyesi ($N/(A_c f_c)$) 0.1, 0.2 ve 0.35 olmak üzere üç ayrı düzeyde incelenecektir. Eksenel yük seviyesinin en küçük inceleme değeri olan 0.1 değeri kolon davranışı için yönetmeliklerde verilen alt sınır olması nedeniyle; üst sınır değeri olan 0.35 değeri ise TBDY’de esas alınan eksenel yük üst sınırının (0.4) mukayese edilebilmesi için seçilmiştir. Betonarme çerçeve yapılarında kolon a/d değeri birçok parametreye bağlı bir değişkendir. Konsol tip yükleme düzeninin benimseneceği deney programında bu oran (a/d) 3.5, 4.5 ve 6.0 olarak dikkate alınmıştır. Ayrıca deney programında enine donatı oranı da değişken olarak dikkate alınmıştır. Enine donatı teşkilinde 2007 tarihli DBYBHY esaslarına uygun olan ve olmayan (zayıf) iki farklı yanal donatı aralığı esas alınmıştır [41]. Böylece deney programında değişken alınan tasarım parametrelerinin başta yerdeğiştirme kapasitesi olmak üzere birçok davranış göstergesine etkisi incelenebilecektir.

Çalışmanın temel konu başlıkları; betonarme kolonların yerdeğiştirme kapasitesi, betonarme kolonlar için yönetmeliklerce tanımlanan hasar sınırlarının deneysel veriler ile karşılaştırılması, plastik dönme kapasitesinde önemli bir büyüklük olan analitik plastik mafsallı boyu önerilerinin deneysel sonuçlar ile karşılaştırılması, hasar indeks modellerin deneysel sonuçlar ve hasar gözlenmeleriyle karşılaştırılması ve betonarme kolonlar için yeni bir hasar modelinin geliştirilmesi olarak sıralanmaktadır.

1.3 Hipotez

Performansa dayalı tasarım prensibi gereği betonarme elemanların tasarımında şekildeğiştirme esaslı yöntemler kullanılmaktadır. Bu yaklaşımda betonarme elemanlar elastik sınırı geçip, maruz kaldığı yüklere plastik yerdeğiştirmeler yardımıyla karşı koymaktadır. Bu durumda betonarme elemanlarda meydana gelen hasarı yönetmelikler sınırlandırmaktadır. Bu sınır değerler genellikle yerdeğiştirme, dönme ve malzeme şekildeğiştirmeleri cinsinden ifade edilmektedir. Birçok araştırmacı hem bu hasarı ifade edebilmek, hem de tasarım deprem yükü altında istenen performansı sağlayabileceği azami yerdeğiştirme kapasitesinin hesabı üzerine çalışmalar yapmaktadır. Bu yaklaşıma göre betonarme elemanların tasarımında ve maruz kaldığı yükün etkisinde iki ana sorun ortaya çıkmaktadır. Bunlar sırasıyla betonarme elemanların yerdeğiştirme veya dönme kapasitesi ile hedef yerdeğiştirme altında ulaştığı hasarın sayısal büyüklüğü olarak ifade edilebilir. Betonarme

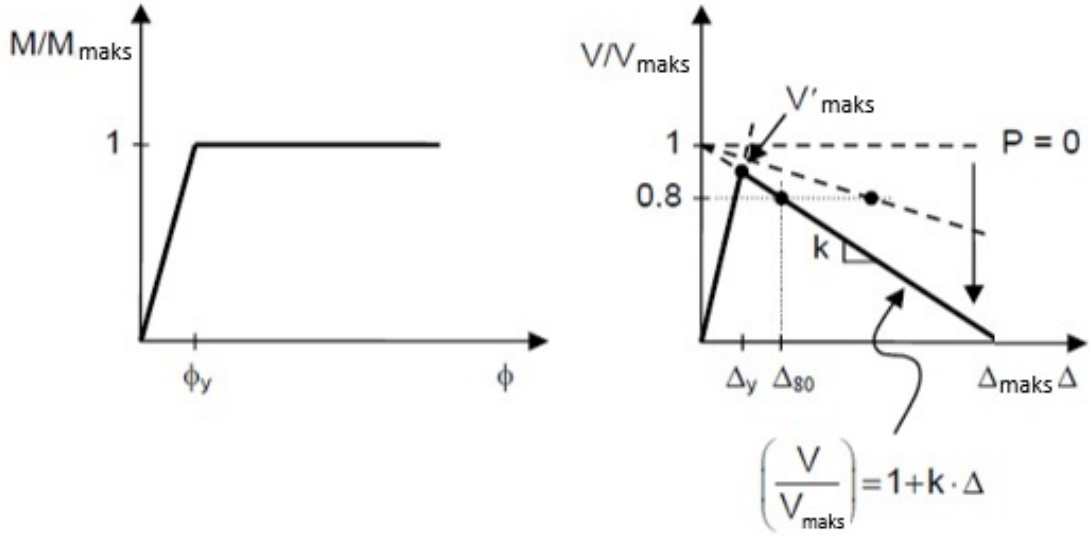
elemanlar çevrimsel yükleme altında ve sabit eksenel yük etkisinde çeşitli hasarlara maruz kalmaktadır. Betonarme kolonda hasar bölgeleri ile kolon boyunca çizilen eğrilik diyagramı arasında güçlü bir ilişki bulunmaktadır. Bilindiği gibi akma eğriliğinin üzerinde değer oluşan kesitlerde hızlı bir şekilde hasar gözlemlenmeye başlanmaktadır. Bu hasarın yoğunlaştığı bölgelere ise plastik mafsal bölgesi denmektedir. Betonarme kolonların yerdeğiştirme kapasitesi ise plastik mafsal bölgesinin eğrilik kapasitesi olarak değerlendirilebilir. Betonarme elemanın davranışı temel olarak iki farklı seviyede açıklanabilir. Kesit seviyesindeki davranışı belirleyen parametre eğrilik olurken, eleman seviyesindeki davranışı belirleyen parametre ise yerdeğiştirme veya dönme olarak ifade edilmektedir. Kesit sünekliliği ve eleman sünekliliği davranışı arasındaki ilişkiyi ilk açıklayan araştırmacılar olan Park ve Paulay (1975) tarafından 1 numaralı denklemle tanımlanmıştır [1].

$$\mu_{\Delta} = 1 + 3(\mu_{\phi} - 1)l_p/L(1 - 0.5l_p/L) \quad (1.1)$$

Burada; μ_{Δ} yerdeğiştirme düktilitesini, μ_{ϕ} eğrilik düktilitesini, l_p plastik mafsal boyunu ve L eleman boyunu tanımlamaktadır.

1 numaralı denkleme göre yerdeğiştirme düktilitesi; eğrilik düktilitesi ve plastik mafsal boyuna bağlı olarak hesaplanan bir parametredir. Park ve Paulay kısıtlı deney numunesi sayısı ile yaptığı bu çalışmada, eksenel yük seviyesi ve kesme açıklığının etkili derinliğe oranı dikkate alınmamıştır. Özetle eğrilik düktilitesini artırmanın yolunun enine donatı oranının düzenlenmesiyle yapılabileceği ima edilmiştir. Bu yaklaşım birçok yönetmelik (ACI 318-05, NZS 3101-1995, ATC-32) ve performansa dayalı tasarım üzerine çalışma yapan araştırmacılar tarafından kabul görmüştür[8],[17], [42], [43], [44], [45], [46]. Buna karşın sonraki yıllarda yapılan çalışmalarda görüldüğü üzere, betonarme kolonların kesit ve eleman düktilitesini eksenel yük seviyesi ile kesme açıklığının etkili derinliğe oranı açıkça etkilemektedir.

Performansa dayalı tasarım gereği betonarme elemanlar belirli yükler altında hedef performansı sağlaması istenir. Performansa dayalı yaklaşımlarda genel olarak yapıların tasarım depremi altında mutlaka hasar alacağı bilinmektedir. Yönetmelikler bu hasarı yapının kullanım amacına göre belirli düzeylerde tutmaktadır. Hasar düzeyinin göreceli bir kavram olması sebebiyle birçok araştırmacı bu hasarı sayısal olarak ifade etmeye çalışmıştır. Bu alanda yapılan çalışmalar incelendiğinde genel olarak hasar indeksleri, yatay yük kapasitesi, yerdeğiştirme kapasitesi, sönmüleme enerjisi, akma yerdeğiştirmesi gibi belirli parametrelere bağlı olarak hasarı belirlemektedir. Literatürde önerilen hasar modellerinin ortak özelliği son limit durumu ifade eden enerjiyi veya yerdeğiştirmeyi monotonik yükleme altında elde

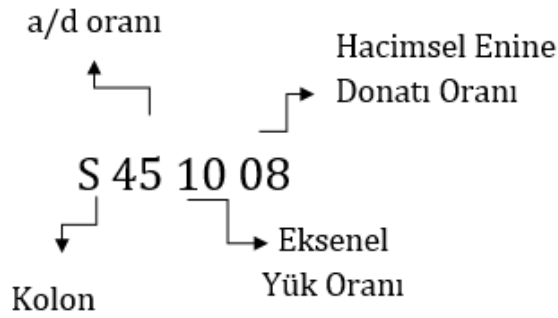


Şekil 1.1 Yerdeğiştirme kapasitesine aksenal yükün etkisi [47]

edilen yerdeğiştirme veya sönümleme enerjisinden hesaplamaktadır. Kunnath vd. (1997) tarafından hazırlanan raporda betonarme elemanların yükleme tiplerine göre farklı davranışlar sergilediği bilinmektedir [19]. Genel olarak betonarme kolonların hasarını veren farklı bağıntılar mevcuttur. Bu bağıntılar enerji tabanlı, yerdeğiştirme tabanlı, ve bu iki parametrenin beraber kullanıldığı eşitliklerden oluşmaktadır. İncelenen çalışmalarda farklı yükleme profillerinin hasar indeksleri üzerinde farklı sonuçlar çıkarabileceği görülmektedir. Bu sebeple betonarme elemanların hasar indeksini yerdeğiştirme duktilitesi cinsinden hesaplanması ve son limit durumu gerçek duruma en yakın düzeyde tahmin edilmesi üzerine deneyler yapılarak yeni hasar modelleri önerilmiştir.

2 DENEY PROGRAMI

Deney programında, kesit boyutları ve boyuna donatısı özdeş; enine donatı aralığı (s), kesme açıklığının etkili derinliğe oranı (a/d) ve boyutsuz eksenel yük düzeyi (n) değişken olan 11 adet kolon numunesinin deprem yüklerine benzeştirilen deneysel zorlama altında davranışları incelenecektir. Deney numunelerinin isimlendirilmesinde kullanılan kısaltma ve açıklaması Şekil 2.1’de gösterilmektedir.



Şekil 2.1 Kolonların isimlendirilmesinde kullanılan kısaltmalar

Deney numunelerinin geometrik özellikleri ile kullanılan malzeme özellikleri sonraki bölümlerde gösterilecektir.

2.1 Kolonlara Ait Özellikler

Kolon numunelerinin geometrik özellikleri, boyuna ve enine donatı bilgileri Tablo 2.1’de özetlenmiştir.

Deney elemanlarında kullanılan donatı çeliği, deney elemanlarından alınan standart silindir numunelerin deney günü elde edilen beton basınç dayanımları ile uygulanan eksenel yük düzeyleri Tablo 2.2’de gösterilmektedir.

Tablo 2.1 Deney numunelerinin geometrik özellikleri ve donatı düzeni

Kolon No	$N/A_c f_c$	a/d	b/h	ϕ_e/s	$\rho_{s, enine}$	$n_b \phi_b$	$\rho_{t, boyuna}$
			(mm)	(mm)		mm	
S351008	0.10	3.50	300/300	$\phi 8/100$	0.008	$6\phi 14$	0.0103
S451008	0.10	4.50	300/300	$\phi 8/100$	0.008	$6\phi 14$	0.0103
S601008	0.10	6.00	300/300	$\phi 8/100$	0.008	$6\phi 14$	0.0103
S352008	0.20	3.50	300/300	$\phi 8/100$	0.008	$6\phi 14$	0.0103
S452008	0.20	4.50	300/300	$\phi 8/100$	0.008	$6\phi 14$	0.0103
S602008	0.20	6.00	300/300	$\phi 8/100$	0.008	$6\phi 14$	0.0103
S353508	0.35	3.50	300/300	$\phi 8/100$	0.008	$6\phi 14$	0.0103
S453508	0.35	4.50	300/300	$\phi 8/100$	0.008	$6\phi 14$	0.0103
S603508	0.35	6.00	300/300	$\phi 8/100$	0.008	$6\phi 14$	0.0103
S451006	0.10	4.50	300/300	$\phi 8/150$	0.006	$6\phi 14$	0.0103
S452006	0.20	4.50	300/300	$\phi 8/150$	0.006	$6\phi 14$	0.0103

$N/A_c f_c$: Boyutsuz eksenel yük düzeyi

a/d : Kesme açıklığının etklili derinliğe oranı

b : Kesit genişliği

h : Kesit yüksekliği

ϕ_e : Enine donatı çapı

s : Enine donatı aralığı

$\rho_{s, enine}$: Enine donatı oranı

ϕ_b : Boyuna donatı çapı

n_b : Boyuna donatı sayısı

$\rho_{t, boyuna}$: Boyuna donatı oranı

Tablo 2.2 Kolonlara ait malzeme özellikleri

Numune No	f_c^1	f_y^2	f_{yw}^3	ϵ_{sh}^4	ϵ_{su}^5
	(MPa)	(MPa)	(MPa)		
S351008	29.0	484	637	0.008	0.10
S451008	32.5	484	637	0.008	0.10
S601008	32.0	484	637	0.008	0.10
S352008	29.0	484	637	0.008	0.10
S452008	32.0	484	637	0.008	0.10
S602008	31.5	484	637	0.008	0.10
S353508	40.0	484	637	0.008	0.10
S453508	33.0	484	637	0.008	0.10
S603508	37.0	484	637	0.008	0.10
S451006	30.0	484	637	0.008	0.10
S452006	30.0	484	637	0.008	0.10

(1) Deney elemanı silindirik basınç dayanımı

(2) Boyuna donatıya ait akma dayanımı

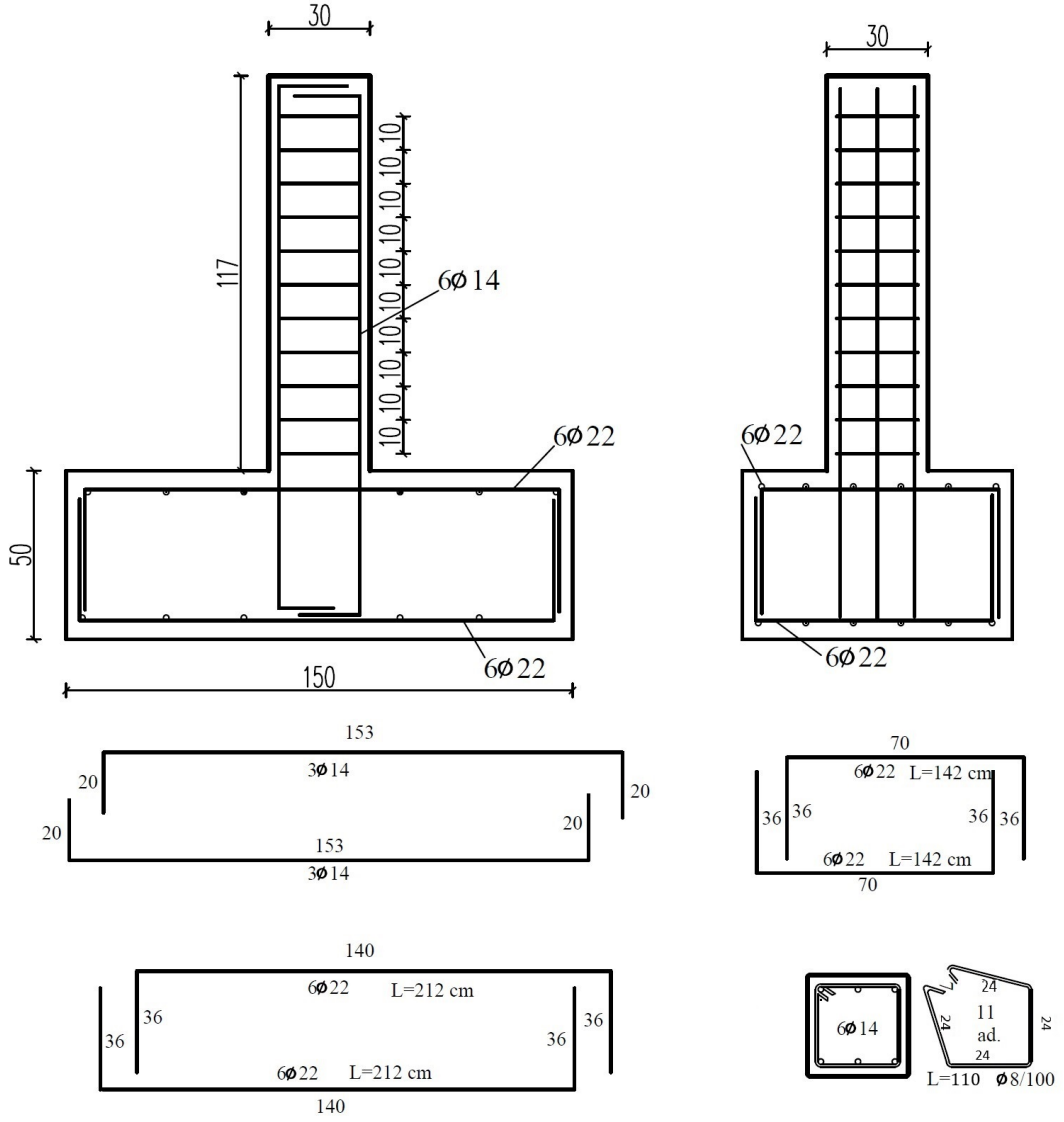
(3) Enine donatıya ait akma dayanımı

(4) Boyuna donatıya ait çekleşme birim şekildeğiştirmesi

(5) Boyuna donatıya ait kopma birim şekildeğiştirmesi

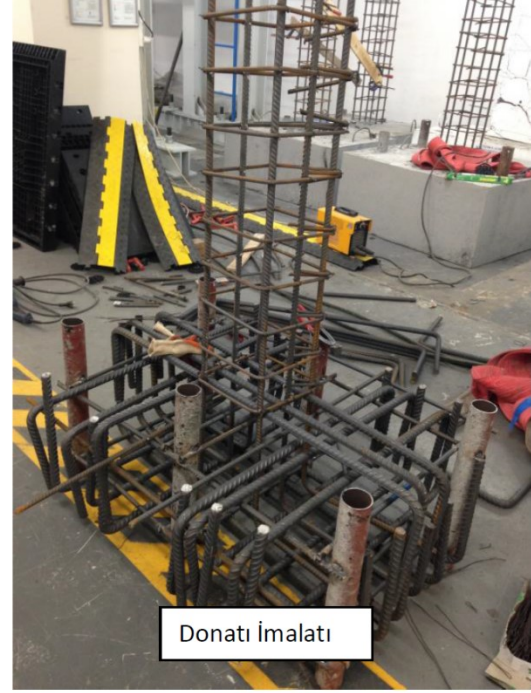
2.2 Kolonların Üretimi

Tez çalışması kapsamında tasarlanan kolon numunelerinin imalatı İstanbul Aydın Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Laboratuvarında yapılmıştır.

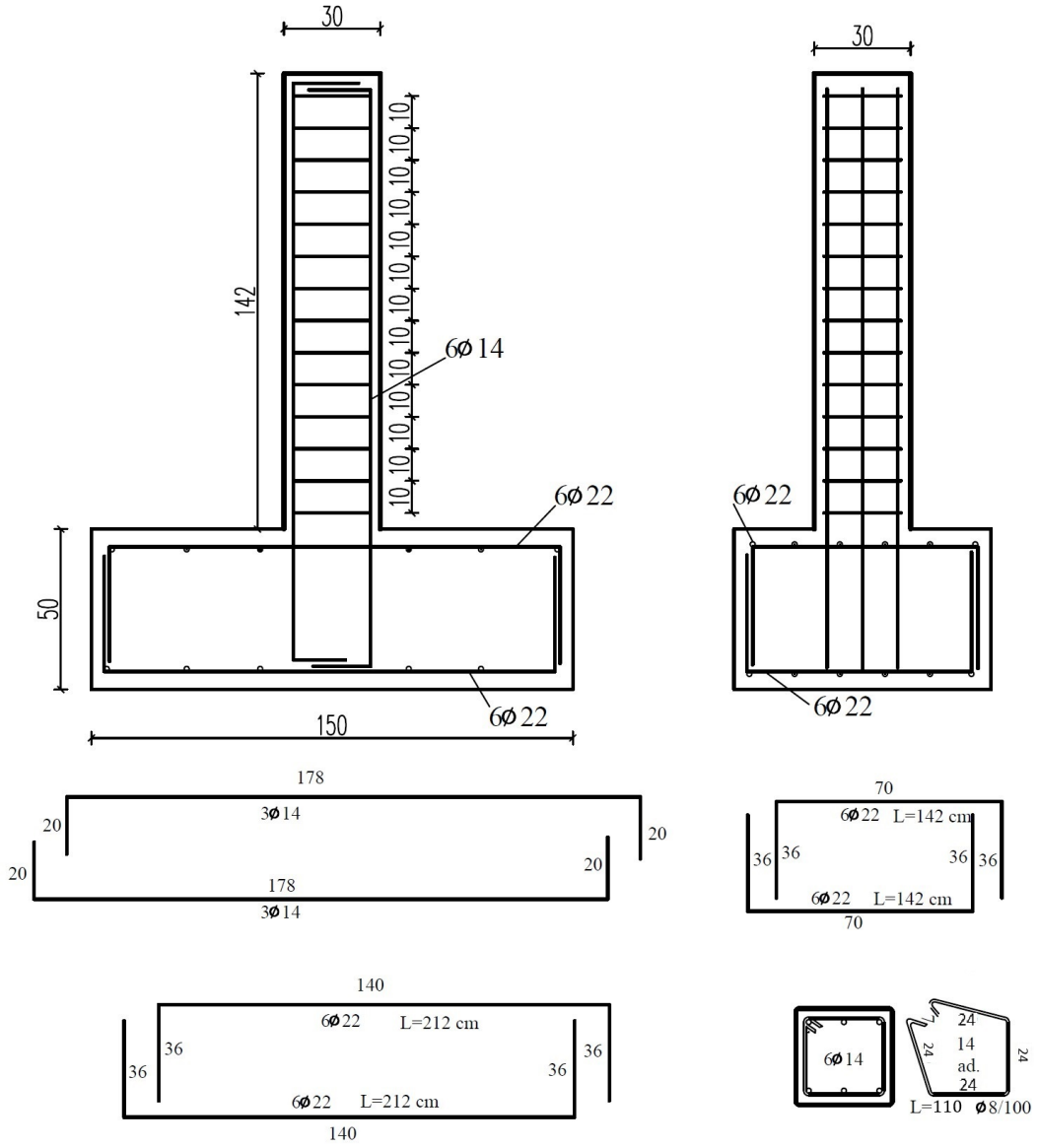


Şekil 2.2 S351008-S352008-S353508 numaralı kolonlara ait donatı detayları

S351008-S352008-S353508 numaralı kolonlara ait donatı detayları Şekil 2.2’de imalat süreçleri Şekil 2.3’de gösterilmektedir. Bu 3 kolonun donatı detayları ve üretimi benzer şekilde yapılmıştır.



Şekil 2.3 S351008-S352008-S353508 kolonlara ait imalat fotoğrafları

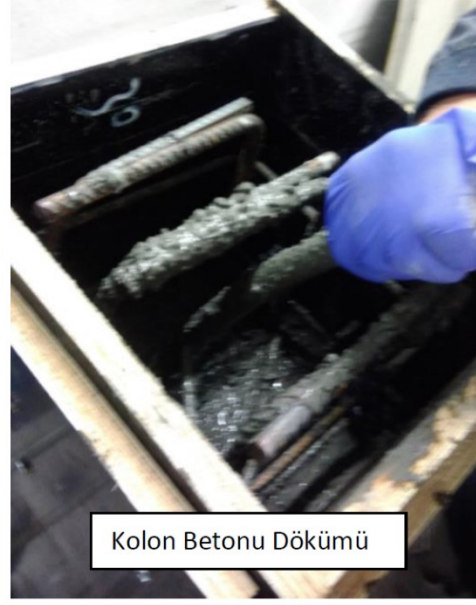


Şekil 2.4 451008-S452008-S453508 kolonlara ait donatı detayları

S451008-S452008-S453508 numaralı kolonlara ait donatı detayları Şekil 2.4'te imalat süreçleri Şekil 2.5'de gösterilmektedir. Bu 3 kolonun donatı detayları ve üretimi benzer şekilde yapılmıştır.



Numune Alımı



Kolon Betonu Dökümü

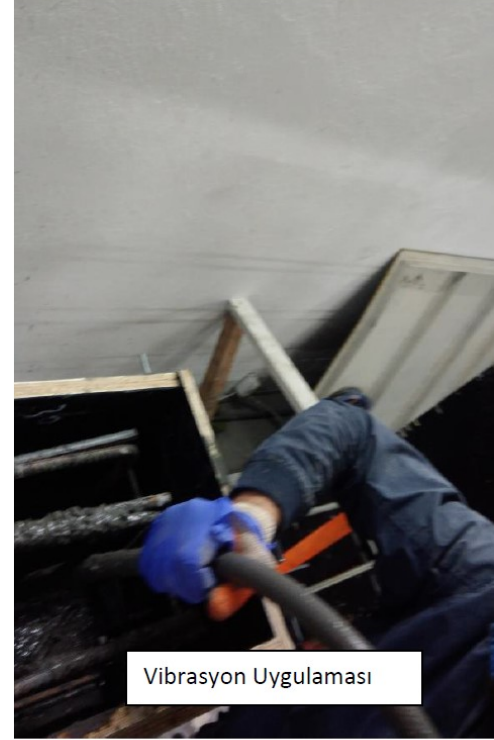
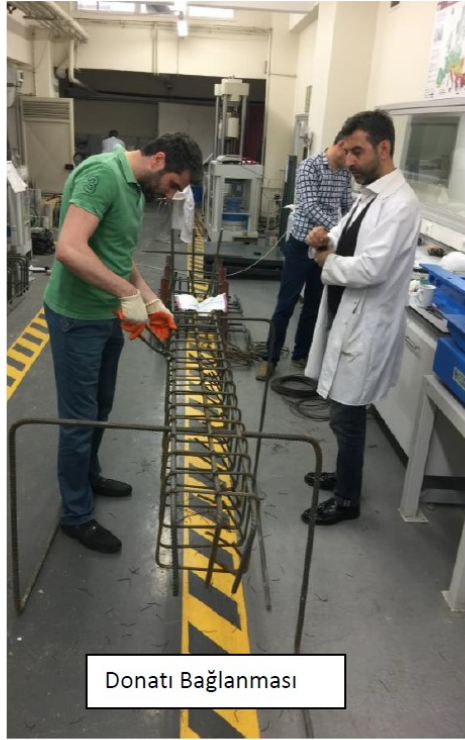


Donatı İmalatı



Temel Betonu Dökümü

Şekil 2.5 S451008-S452008-S453508 kolonlara ait imalat fotoğrafları



Şekil 2.7 S601008-S602008-S603508 numaralı kolonlara ait imalat fotoğrafları



Donatı Bağlama



Kalıbı Sabitleme



Hazır Beton Aktarımı

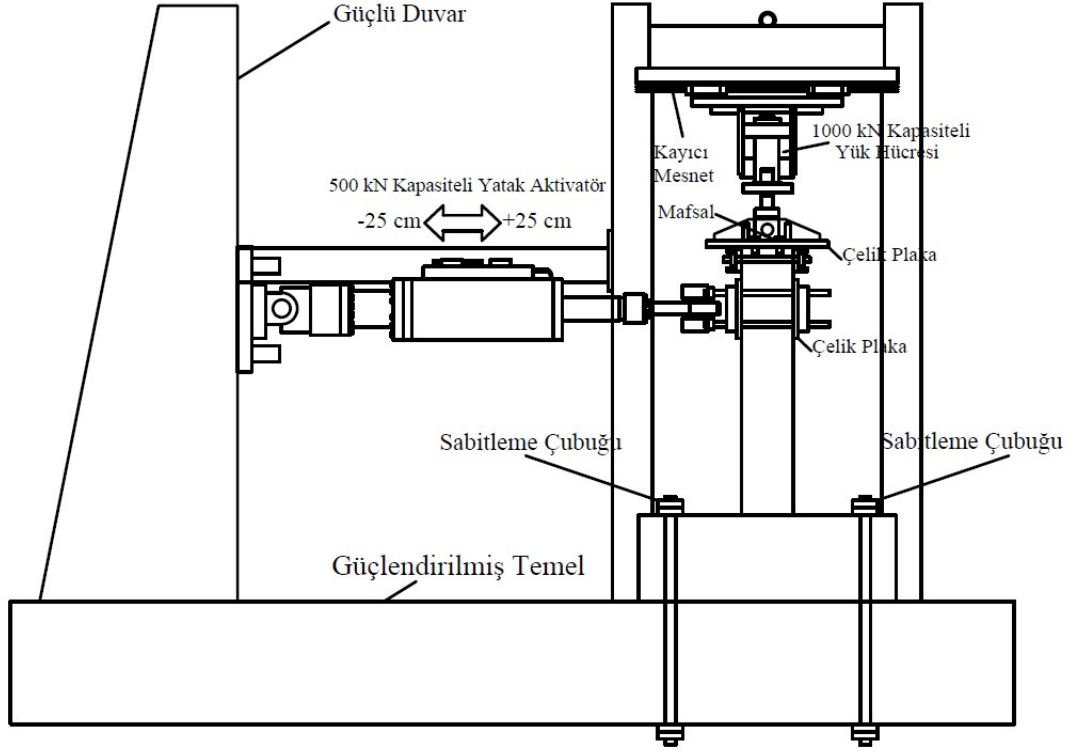


Beton Dökümü

Şekil 2.9 S451006-S452006 numaralı kolonlara ait imalat fotoğrafları

2.3 Deney Düzenegi

Deney programında imal edilen kolon numunelerinin fiziksel testleri İstanbul Aydın Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Deneylerde uygulanan test düzenegi Şekil 2.10'da şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.10 Şematik test düzenegi

Deney numuneleri güçlü zemin üzerine konsol olarak bağlanarak test edilmiştir. Bu bağlantı noktasının çerçevesel bir sistemde rijit temele benzeştirilebilir. Test düzeninde yatay ve düşey yük vericilerin bağlantı noktası, çerçevesel bir sistemde moment büküm noktasıyla benzeştirilebilir. Test düzeninde bu noktanın yatay yerdeğiştirmesi, düşey yerdeğiştirmesi ve dönmesi serbesttir. Düzenegin çerçeve düzelemine dik doğrultudaki yatay yerdeğiştirmesi ise tutuludur. Deney düzeneginde yatay yük yerdeğiştirme, düşey yük ise kuvvet esas alınarak servo-kontrollü uygulanmıştır. Sistemde çevrimsel yük verici servo kontrollü aktivatör rijit duvara bağlanarak mesnetlenmiştir. Aktivatör ± 500 kN yük ve ± 25 cm yerdeğiştirme kapasitesine sahiptir. Konsol deney numunesine eksenel yük uygulayan servo kontrollü hidrolik piston 1000 kN yük ve 20cm yerdeğiştirme kapasitesine sahiptir. Konsol deney numunesine bağlı düşey krikonumuneye dönme serbest biçimde bağlı olup, krikodan uygulanan eksenel yükün doğrultusu deney süresince değişmemektedir. Ayrıca numuneye verilecek yatay yük etkisiyle oluşacak yatay doğrultudaki yerdeğiştirmeyi sağlaması için 25 cm kapasiteye sahip ray sistemi kurulmuştur. Bu ray

sisteminin sürtünme katsayısı %3 mertebesinde olup, harekete mani olmayacak düzeydedir. Programa eklenen yazılımda da kızak sistemi harekete başladıktan sonra yerdeğiştirme profili uygulanmaktadır. Böylece hata düzeyi en düşüğe indirgenmektedir.



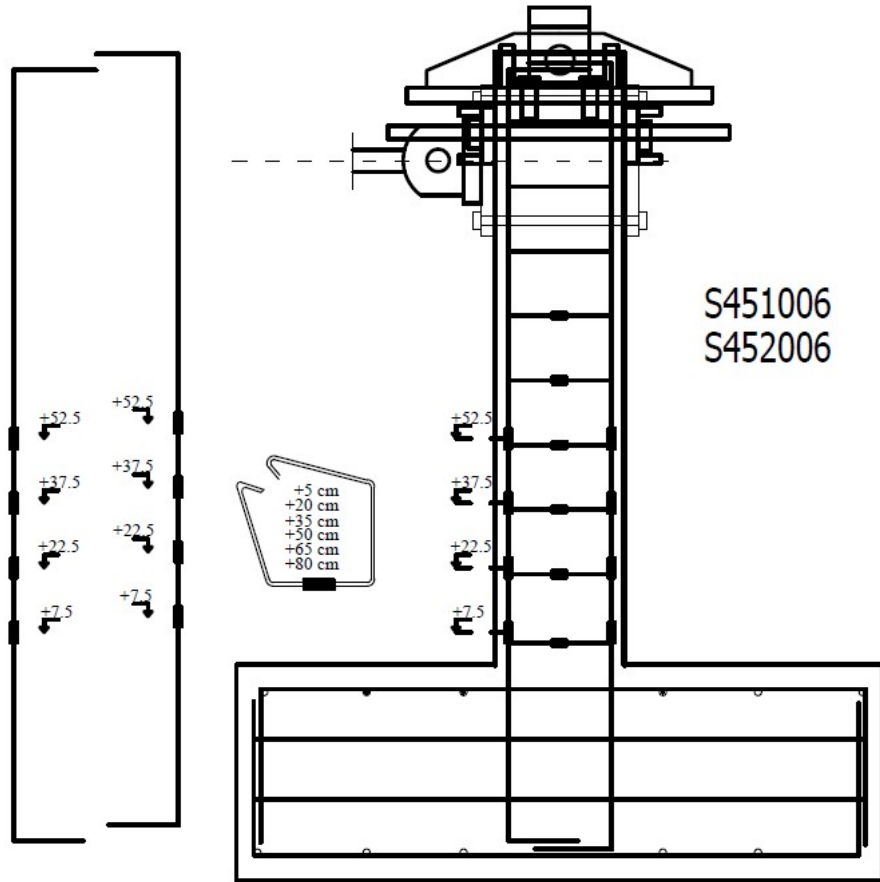
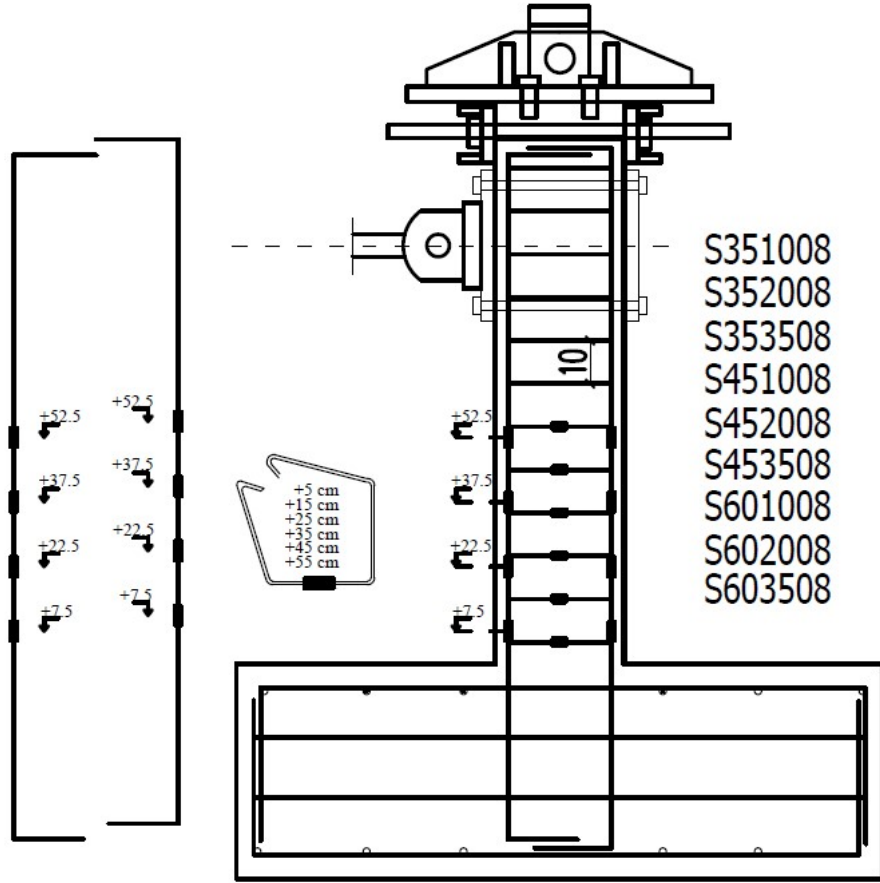
Şekil 2.11 Deney düzeneğinin yan ve n görünüşleri

2.3.1 Birim Şekildeğiştirme lçer ve LVDT’lerin Konumları

Deney sırasında kolonların oluşabilecek hasar bölgelerinde boyuna ve enine donatılarda birim şekildeğiştirme ölçerler yerleştirilmiştir. Şekildeğiştirme ölçerlerin hassas ölçü alması için makaron yardımı ile sarılarak montajı yapılmıştır. Ayrıca tüm şekildeğiştirme ölçerler montaj sonrasında çalışıp çalışmadığı voltmetre yardımı ile kontrol edilerek doğrulanmıştır. Şekil 2.12’de şekildeğiştirme ölçerlere ait montaj gösterilmektedir. Şekil 2.13’de birim şekildeğiştirme ölçen şekildeğiştirme ölçerlerin kolonlar üzerindeki şematik yerleri gösterilmiştir.

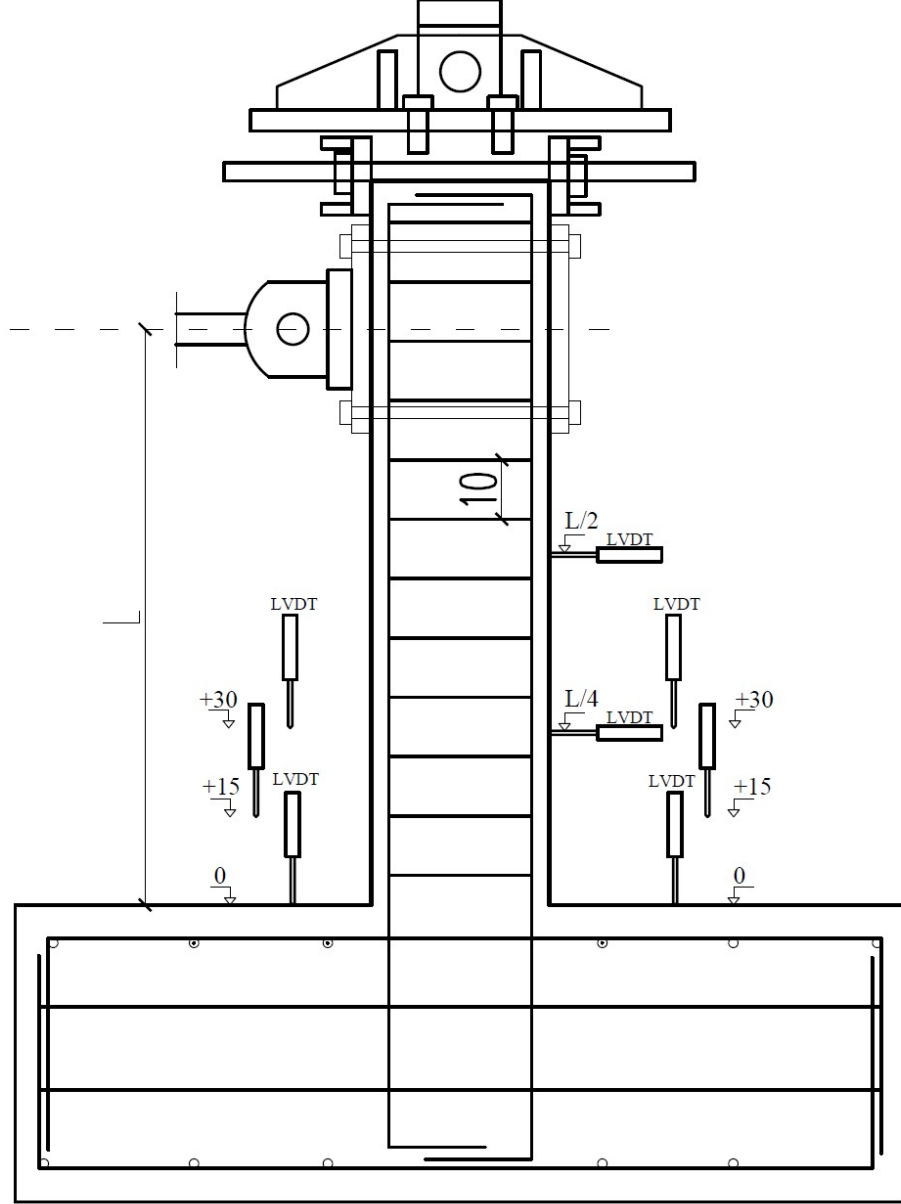


Şekil 2.12 Şekildeğiştirme ölçerlerin bağlanması



Şekil 2.13 Şekildeğiştirme ölçerlerin konumları

Kolonlarda meydana gelen yerdeşistirmelerin ölçölmesi amacıyla harici yerdeşistirme (Linear Voltage Differential Transducer, LVDT) ölçerler kullanılmıştır. Kolon boyunca 8 farklı noktadan ölçüm alabilecek yatay ve düşey konumlandırılmış LVDT'lerin montaj şeması şekil 2.14'de gözükmemektedir.



şekil 2.14 Kolon boyunca yerleştirilen LVDT'lerin konumu

Kolonlarda oluşabilecek hasar bölgelerinin mesnet kesitlerinde hem basınç hem çekme yüzeyleri için 6 düşey konumda ve 2 yatay konumda LVDT'ler tijler vasıtasıyla sabitlenmiştir. Tijlerin betonarme kolonda donatı gibi çalışmasını engelleme amacıyla sistemden plastik boru vasıtasıyla izole edilmiştir.

2.3.2 Veri Toplayıcı

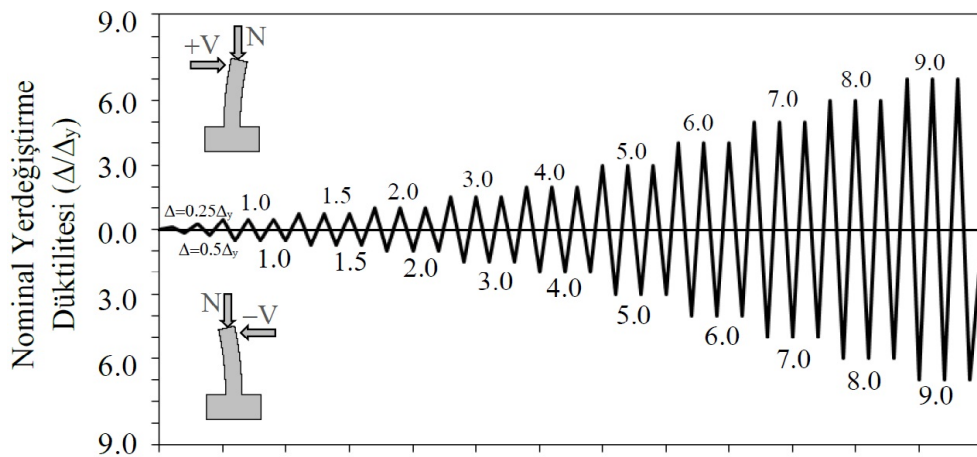
Test düzeneğinde kullanılan tüm ölçüm cihazları 30 kanala ve 100 Hz kapasiteye sahip veri kaydediciye bağlanmıştır. Veri kaydediciye ait detaylar Şekil 2.15’de görülmektedir.



Şekil 2.15 Veri toplayıcıya ait fotoğraf

2.4 Yükleme Profili

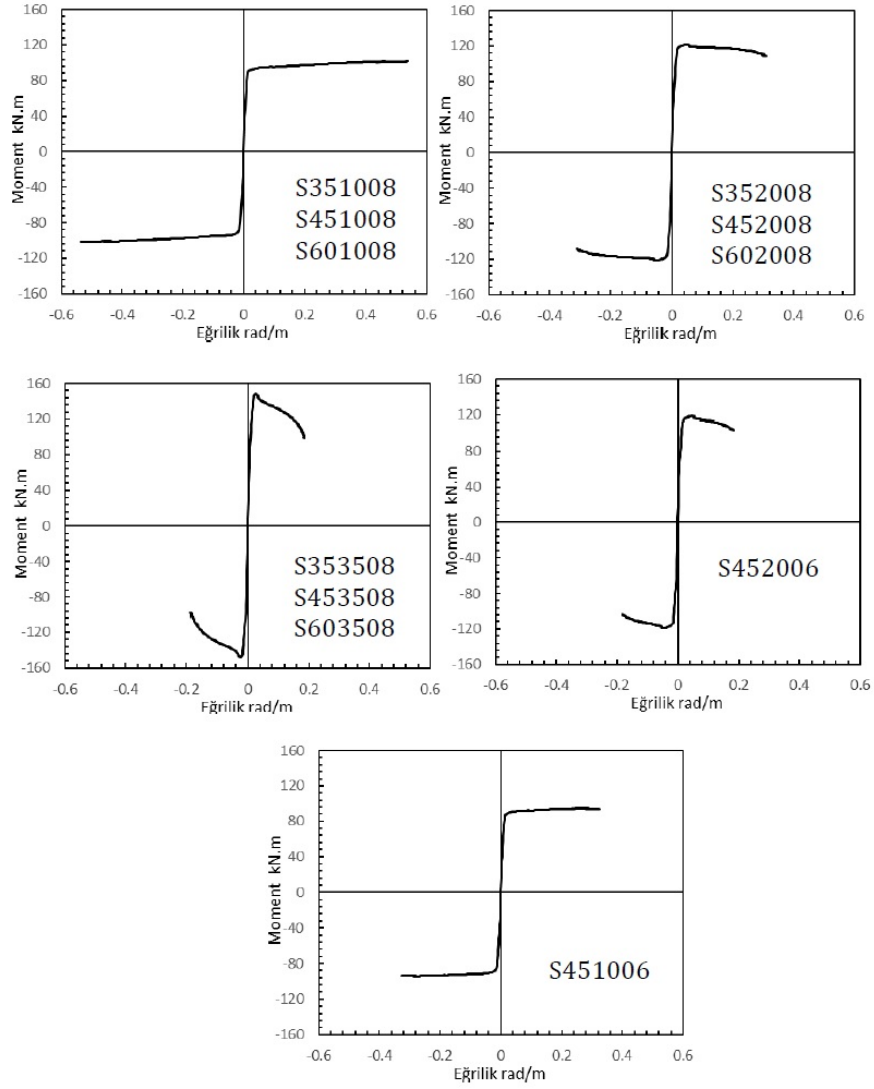
Deney programında yerdeğiştirme kontrollü olan yükleme geçmişi kullanılmıştır. Şematik yükleme profili Şekil 2.16’da görülmektedir.



Şekil 2.16 Şematik yükleme profili

Kolonların analitik akma yerdeğiştirmeleri yardımıyla bulunan analitik akmaya ait analitik süneklik oranları ($\mu_{\Delta} = \Delta/\Delta_y$) yüklemede kullanılmıştır. Yükleme profilini belirlemede esas alınan analitik belirlenmiş süneklik oranları 0.25, 0.5,

1.0, 1.5, 2.0, 3.0, 4.0, ve artan katlarıdır. Kolonların akma yerdeşistirmeleri, moment-eğrilik ilişkisinden elde edilen akma eğriliği kullanılarak belirlenmiştir. Tüm deney elemanlarının analitik olarak hesaplanan moment-eğrilik ilişkileri topluca şekil 2.17’de gösterilmiştir.

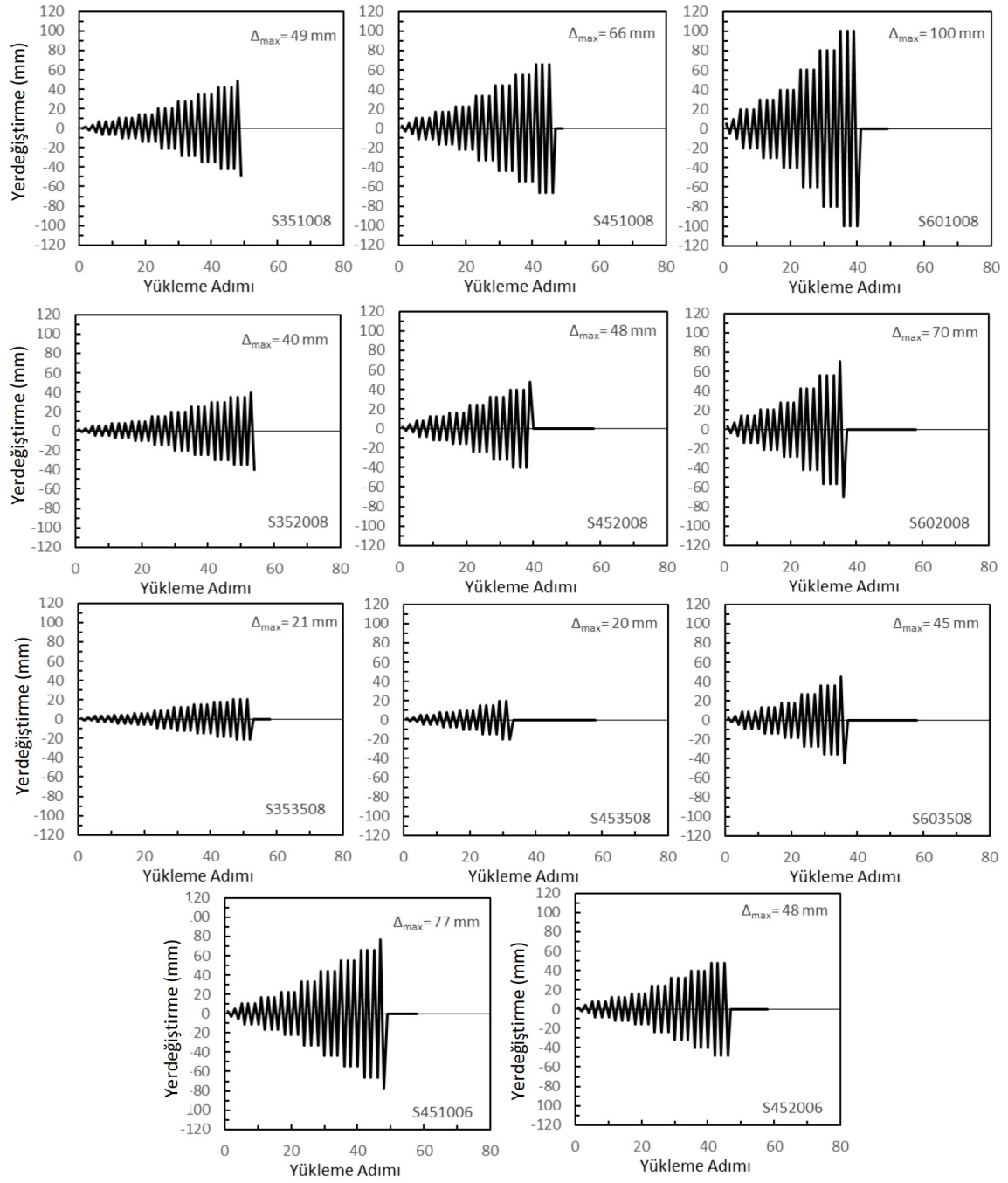


şekil 2.17 Kolonların analitik moment-eğrilik ilişkileri

Analitik olarak hesaplanan akma eğriliği değerleri 2.1 numaralı denklem kullanılarak yerdeğistirmeye dnştrlmştir.

$$\Delta_y = \phi_y \times L^2/3 \quad (2.1)$$

Analitik olarak hesaplanıp deney sırasında kullanılan yükleme profilleri şekil 2.18’de topluca gösterilmektedir.



Şekil 2.18 Kolonlara uygulanan yükleme profilleri

Deney elemanlarına akma öncesi çevrimlerde bir tekrar, akma ve sonrası çevrimlerde ise 3 tekrarlı olarak uygulanmıştır. Her bir deney elemanına uygulanan yükleme geçmişi Tablo 2.3’de sunulmaktadır.

Tablo 2.3 Kolonlara uygulanan yükleme profilleri

Kolon No	0.25μ	0.5μ	1μ	1.5μ	2μ	3μ	4μ	5μ	6μ	7μ	8μ
	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
S351008	1.75	3.5	7	10.5	14	21	28	35	42	49	
S451008	2.75	5.5	11	16.5	22	33	44	55	66		
S601008	5	10	20	30	40	60	80	100			
S352008	1.25	2.5	5	7.5	10	15	20	25	30	35	40
S452008	2	4	8	12	16	24	32	40	48		
S602008	3.5	7	14	21	28	42	56	70			
S353508	0.75	1.5	3	4.5	6	9	12	15	18	21	
S453508	1.25	2.5	5	7.5	10	15	20				
S603508	2.25	4.5	9	13.5	18	27	36	45			
S451006	2.75	5.5	11	16.5	22	33	44	55	66	77	
S452006	2	4	8	12	16	24	32	40	48		

3 DENEY SONUÇLARI

Deney programında incelenen eksenel yük seviyesi, kesme açıklığı ve enine donatı değişken 11 kolon numunesinin sabit eksenel yük ve çevrimsel yatay yükler altında elde edilen temel sonuçları aşağıda özetlenmiştir.

3.1 Göçme Biçimleri ve Deneysel Hasar Durumları

Çevrimsel yük altında zorlanan elemanlarda hasar düzeyi, deney sırasında gözlem ya da ölçümle tespit edilen hasar durumları ilişkilendirilebilir. Tablo 3.1’de ATC-38’e [42] göre hasar durumları ve karşı gelen hasar gözlemleri özetlenmiştir . Deney programında fiziksel testleri gerçekleştirilen kolon numunelerinde gözlenen ya da ölçülen hasar göstergeleri; kolonda çekme bölgesinde oluşan ilk çatlak, boyuna donatıda çekme ve basınç bölgesindeki ilk akma, sargısız betonda ezilme, boyuna donatıda burkulma başlangıcı veya burkulma ve sargılı betonda belirgin ezilme olarak sıralanabilir.

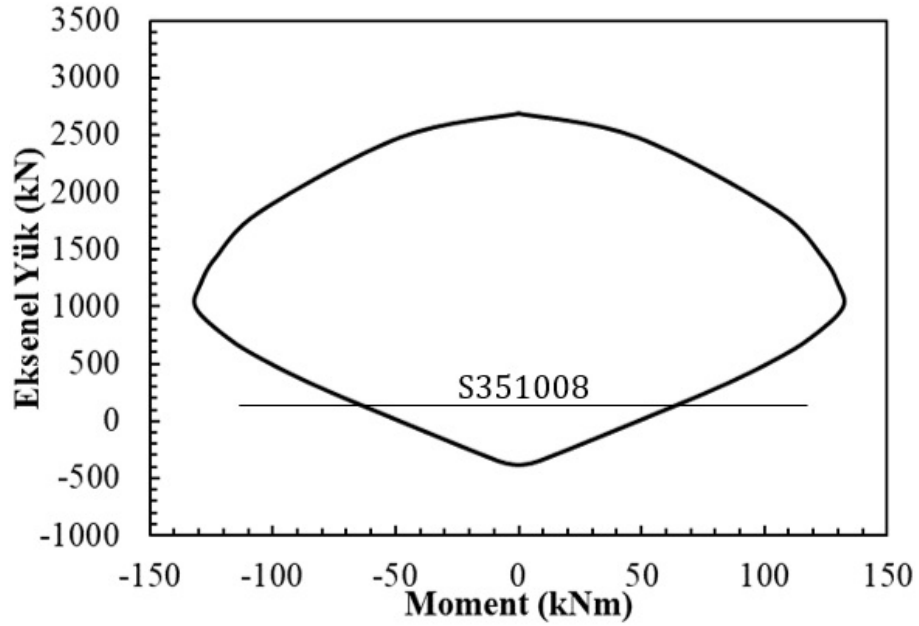
Tablo 3.1 ATC-38’e [42] göre hasar durumları ve karşı gelen hasar

ATC-38’e göre Hasar Durumları	Hasara ait Gösterge
Hasar Yok	Belli olmayan çatlaklar
Sınırlı Hasar	Sargısız betonda oluşan çatlaklar
Belirgin Hasar	Sargısız betonda dökülme
Ağır Hasar	Burkulma ve Sargılı Betonda Ezilme

Deney programında incelenen kolonların göçme biçimlerinin karşılaştırılması ve çeşitli hasar göstergelerine karşı gelen yerdeğiştirmelerin sunumu her bir kolon numunesi için ayrı ayrı yapılmıştır.

3.1.1 S351008 Numaralı Kolona ait Hasar Durumları

Kesme açıklığının etkili derinliğe oranı 3.5, boyutsuz eksenel yük seviyesi 0.1 ve enine donatı aralığı 10 cm olan betonarme kolon taşıma gücüne eğilme kırılması ile ulaşmıştır. Betonarme kolon numunesinin deneysel sonuçları ile nominal eğilme ve kesme kapasiteleri Tablo 3.2’de karşılaştırılmış ve kırılma biçimi belirtilmiştir. Ayrıca kolon numunesinin deneysel moment-eksenel yük etkileşim; nominal kapasite eğrisi diyagramı üzerinde gösterilerek; Şekil 3.1’de kıyaslanmıştır.



Şekil 3.1 S351008 kolonu için kapasite eğrisi

Tablo 3.2 S351008 numaralı kolona ait kapasiteler

Kolon	M_n (kNm)	V_n (kN)	$V_{eg.}$ (kN)	V_{maks} (kN)	M_{maks} (kNm)	Kırılma Türü
S351008	81.17	271.30	88.22	112.48	107.22	E/Ç
				-116.36	-111.98	

M_n :ACI 318’e göre nominal moment kapasitesi,

V_n :ACI 318’e göre nominal kesme kapasitesi ($V_w + V_c$)

$V_{eg.}$: M_n / L_{kolon}

V_{maks} :Deneysel maksimum kesme kuvveti,

M_{maks} :Deneysel maksimum eğilme momenti,

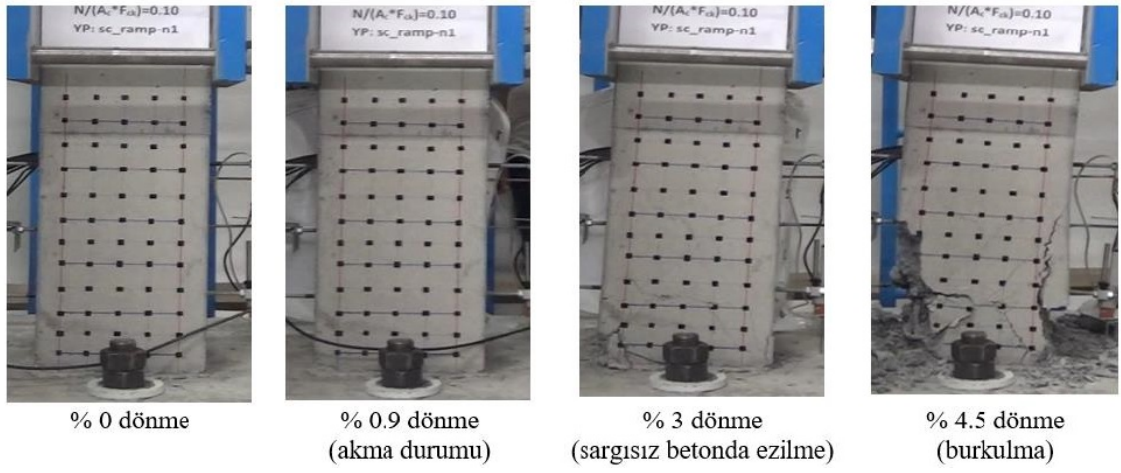
E/Ç: Eğilmede çekme kırılması

Deney sırasında ölçü aletleri yardımıyla ölçülen veya gözlem ile tespit edilen hasar durumları ve karşı gelen yerdeğiştirme talepleri Tablo 3.3’de özetlenmiştir. Deneylerde kullanılan yükleme profilinde akma yerdeğiştirmesi ile beraber sonraki her yerdeğiştirme değeri üç tekrarlı olarak uygulanmıştır. Gözlemlenen veya ölçülen hasar durumunun hangi tekrara geldiği Tablo 3.3’de gösterilmektedir.

Tablo 3.3 S351008 için deney sırasında ölçülen ve gözlemlenen hasar durumları

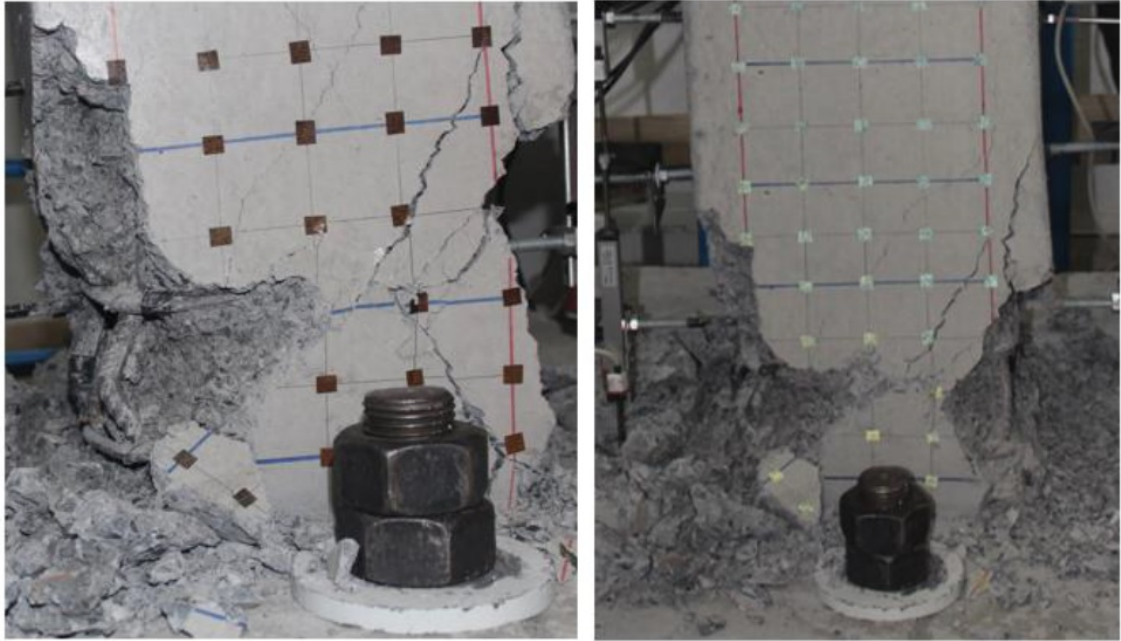
Hasar No	Hasar Gözlemi	Δ (Yerdeğiştirme) (mm/) (Tekrar adımı)		θ (Dönme) %	
		İtme	Çekme	İtme	Çekme
1	İlk çatlak oluşumu	7/1	7/1	0.7	0.7
2	Akma	9/1	9/1	0.9	0.9
3	Sargısız betonda ezilme	28/1	28/1	3	3
4	Boyuna donatı burkulma başlangıcı	35/1	35/1	3.8	3.8
5	Boyuna donatıda burkulma	42/1	42/1	4.5	4.5
6	Sargılı betonda ezilme	35/3	35/3	3.8	3.8

S351008 numaralı kolon için sabit eksenel yük altında artan genlikli yükleme için yapılan deney sonucunda artan hasarı gösteren fotoğraflar Şekil 3.2’de gösterilmektedir. İlk yükleme çevriminde analitik akma yerdeğiştirmesinin %25’i kadar yerdeğiştirme uygulanmıştır. Sonraki çevrimde akma yerdeğiştirmesinin %50’si uygulanmıştır. Bu iki çevrimde tek bir tekrarlı olarak uygulanmıştır. Bu yüklemelerde herhangi bir hasar gözlemlenmemiştir. Analitik hesaplanan akma yerdeğiştirme değeri olan 7 mm uygulandığında ise çekme bölgesinde ilk çatlak gözlemlenmiştir. Boyuna donatılara yerleştirilen şekildeğiştirme ölçerlerde ise akma şekildeğiştirme değerine ulaşmamıştır. Bir sonraki çevrimde ise analitik akma yerdeğiştirmesinin 1.5 katı olan 10.5 mm uygulanmıştır. Bu çevrimde ise 9 mm değerine ulaştığında ise şekildeğiştirme ölçerden çekme bölgesindeki boyuna donatının aktığı tespit edilmiştir. Bir sonraki hasar durumu ise analitik akma yerdeğiştirmesinin 4 katı olan 28 mm yerdeğiştirmede sargısız betonda ezilme olarak gerçekleşmiştir. Bu çevrimde temel üstünden yaklaşık 150 mm’lik kısmı hasarı yoğun olarak yansıtmıştır. Bir sonraki çevrim olan 35 mm yerdeğiştirme değerinde ise ilk tekrarında boyuna donatıda burkulma başlangıcı, üçüncü tekrarında ise sargılı betonda ezilme gözlemlenmiştir. Deneyin sonraki çevriminde ise 42 mm yerdeğiştirme uygulanmış ve boyuna donatıda burkulma gözlemlenmiştir. Taşıma gücüne erişen deney elemanı için son olarak 49 mm yerdeğiştirme değeri uygulanmış ve deney güvenlik gereği sonlandırılmıştır.



Şekil 3.2 S351008 için deney sırasında gözlemlenen hasar durumları

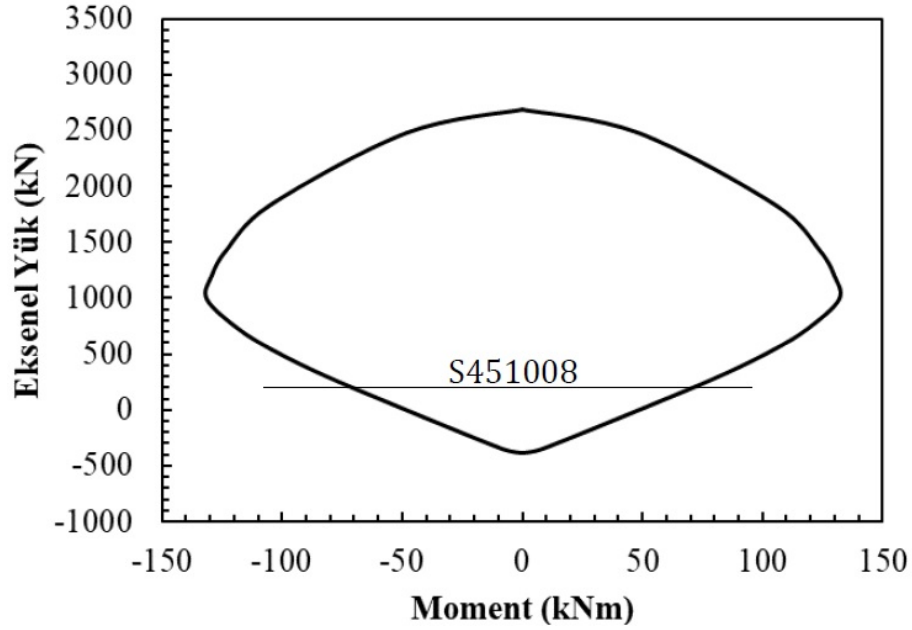
Deney sonuna ait hasar fotoğrafları Şekil 3.3’de gösterilmektedir. Deney elemanında boyuna donatıda burkulma olup taşıma gücünde etkili bir oranda azalma meydana geldiğinde deney sonlandırılmıştır. Deney sonrası fotoğraflara göre hasarın 1xh yüksekliğe kadar yoğun olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 3.3 S351008 için deney sonuna ait hasar durumu

3.1.2 S451008 Numaralı Kolona ait Hasar Durumları

Kesme açıklığının etkili derinliğe oranı 4.5, boyutsuz eksenel yük seviyesi 0.1 ve enine donatı aralığı 10 cm olan betonarme kolon taşıma gücüne eğilme kırılması ile ulaşmıştır. Betonarme kolon numunesinin deneysel sonuçları ile nominal eğilme ve kesme kapasiteleri Tablo 3.4’de karşılaştırılmış ve kırılma biçimi belirtilmiştir. Ayrıca kolon numunesinin deneysel moment-eksenel yük etkileşim; nominal kapasite eğrisi diyagramı üzerinde gösterilerek; Şekil 3.4’de kıyaslanmıştır.



Şekil 3.4 S451008 kolonu için kapasite eğrisi

Tablo 3.4 S451008 numaralı kolona ait kapasiteler

Kolon	M_n (kNm)	V_n (kN)	$V_{eg.}$ (kN)	V_{maks} (kN)	M_{maks} (kNm)	Kırılma Türü
S451008	81.17	260.33	69.37	78.32	97.90	E/Ç
				-80.36	-104.05	

M_n :ACI 318’e göre nominal moment kapasitesi,

V_n :ACI 318’e göre nominal kesme kapasitesi ($V_w + V_c$)

$V_{eg.}$: M_n / L_{kolon}

V_{maks} :Deneysel maksimum kesme kuvveti,

M_{maks} :Deneysel maksimum eğilme momenti,

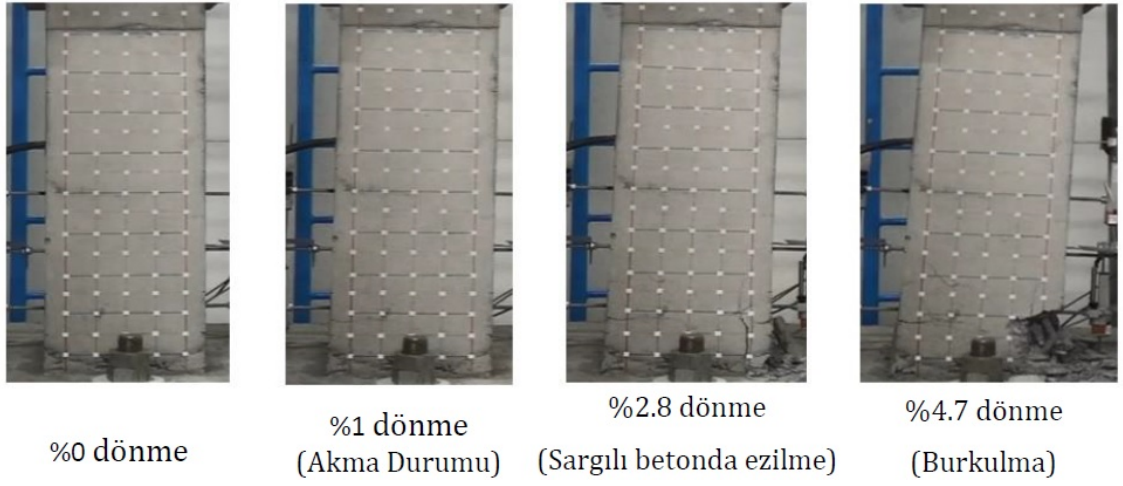
E/Ç: Eğilmede çekme kırılması

Deney sırasında ölçü aletleri yardımıyla ölçülen veya gözlem ile tespit edilen hasar durumları ve karşı gelen yerdeğiştirme talepleri Tablo 3.5’de özetlenmiştir. Deneylerde kullanılan yükleme profilinde akma yerdeğiştirmesi ile beraber sonraki her yerdeğiştirme değeri üç tekrarlı olarak uygulanmıştır. Gözlemlenen veya ölçülen hasar durumunun hangi tekrara geldiği Tablo 3.5’de gösterilmektedir.

Tablo 3.5 S451008 için deney sırasında ölçülen ve gözlemlenen hasar durumları

Hasar No	Hasar Gözlemi	Δ (Yerdeğiştirme) (mm/) (Tekrar adımı)		θ (Dönme) %	
		İtme	Çekme	İtme	Çekme
1	İlk çatlak oluşumu	11/1	11/1	0.9	0.9
2	Akma	12/1	12/1	1.0	1.0
3	Sargısız betonda ezilme	33/1	33/1	2.8	2.8
4	Boyuna donatı burkulma başlangıcı	44/1	55/2	3.7	4.7
5	Boyuna donatıda burkulma	55/1	66/1	4.7	5.6
6	Sargılı betonda ezilme	55/3	66/2	4.7	5.6

S451008 numaralı kolon için 292.5 kN sabit eksenel yük altında artan genlikli yükleme sonucuna göre ortaya çıkan hasar durumları Şekil 3.5’de gösterilmektedir. İlk yükleme çevriminde analitik akma yerdeğiştirmesinin %25’i ardından %50’si kadar yerdeğiştirme uygulanmış ve herhangi bir hasar durumu gözlemlenmemiştir. Analitik hesaplanmış akma yerdeğiştirme değeri olan 11 mm uygulandığında ise çekme bölgesinde ilk çatlak gözlemlenmiştir. Bir sonraki çevrimde ise analitik akma yerdeğiştirmesinin 1.5 katı olan 16.5 mm uygulanmıştır. Bu çevrimde ise 12 mm değerine ulaştığında ise şekildeğiştirme ölçerden çekme bölgesindeki boyuna donatının aktığı tespit edilmiştir. Bir sonraki hasar durumu ise analitik akma yerdeğiştirmesinin 3 katı olan 33 mm yerdeğiştirmede sargısız betonda ezilme olarak gerçekleşmiştir. Bu çevrimde temel üstünden yaklaşık 200 mm’lik kısmı hasarı yoğun olarak yansıtmıştır. Boyuna donatıda burkulma başlangıcı için ise itme evresinde 44 mm çekme evresinde ise 55 mm yatay yerdeğiştirme değerinde ulaşmıştır. Benzer şekilde burkulma ise itme evresinde 55 mm, çekme evresinde ise 66 mm yatay yerdeğiştirme değerinde oluşmuştur. Bununla birlikte burkulma gerçekleştikten sonra ise itme evresinin 55 mm yatay yerdeğiştirmenin üçüncü tekrarında sargılı betonda ezilme, çekme evresinin 66 mm yatay yerdeğiştirmenin ikinci tekrarında sargılı betonda ezilme gerçekleşmiştir. Güvenlik gereği sargılı betonda ezilme, burkulma ve taşıma gücünde hatırı sayılır azalma gerçekleştikten sonra deney sonlandırılmıştır.



Şekil 3.5 S451008 için deney sırasında gözlemlenen hasar durumları

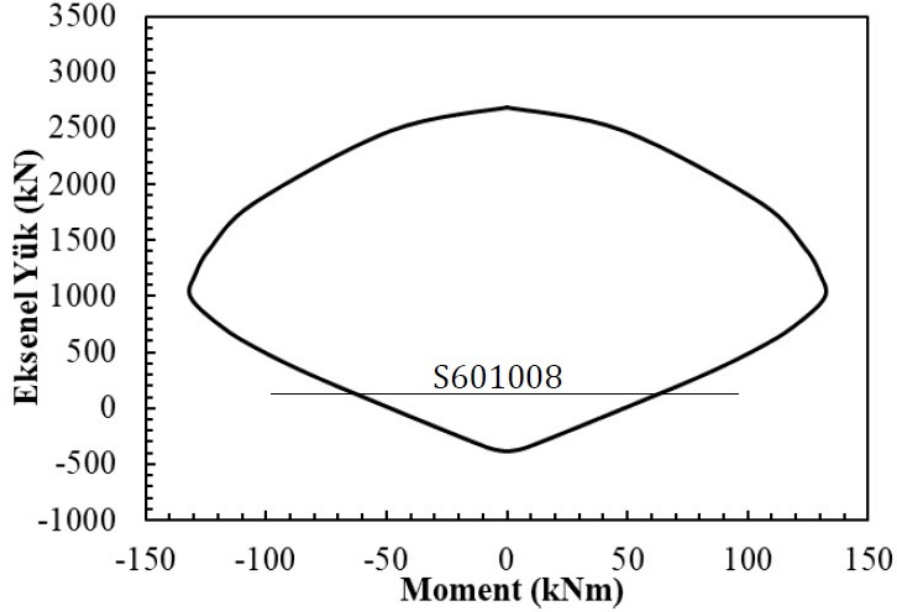
Deney sonuna ait hasar fotoğrafları Şekil 3.6'da gösterilmektedir. Deney sonrası fotoğraflara göre hasarın 0.5xh yüksekliğe kadar yoğun olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 3.6 S451008 için deney sonu hasar fotoğrafları

3.1.3 S601008 Numaralı Kolona ait Hasar Durumları

Kesme açıklığının etkili derinliğe oranı 6, boyutsuz eksenel yük seviyesi 0.1 ve enine donatı aralığı 10 cm olan betonarme kolon taşıma gücüne eğilme kırılması ile ulaşmıştır. Betonarme kolon numunesinin deneysel sonuçları ile nominal eğilme ve kesme kapasiteleri Tablo 3.6’da karşılaştırılmış ve kırılma biçimi belirtilmiştir. Ayrıca kolon numunesinin deneysel moment-eksenel yük etkileşim; nominal kapasite eğrisi diyagramı üzerinde gösterilerek; Şekil 3.7’de karşılaştırılmıştır.



Şekil 3.7 S601008 kolonu için kapasite eğrisi

Tablo 3.6 S601008 numaralı kolona ait kapasiteler

Kolon	M_n (kNm)	V_n (kN)	$V_{eg.}$ (kN)	V_{maks} (kN)	M_{maks} (kNm)	Kırılma Türü
S601008	86.40	259.70	55.38	53.19	96.22	E/Ç
				-55.29	-98.54	

M_n :ACI 318’e göre nominal moment kapasitesi,

V_n :ACI 318’e göre nominal kesme kapasitesi ($V_w + V_c$)

$V_{eg.}$: M_n / L_{kolon}

V_{maks} :Deneysel maksimum kesme kuvveti,

M_{maks} :Deneysel maksimum eğilme momenti,

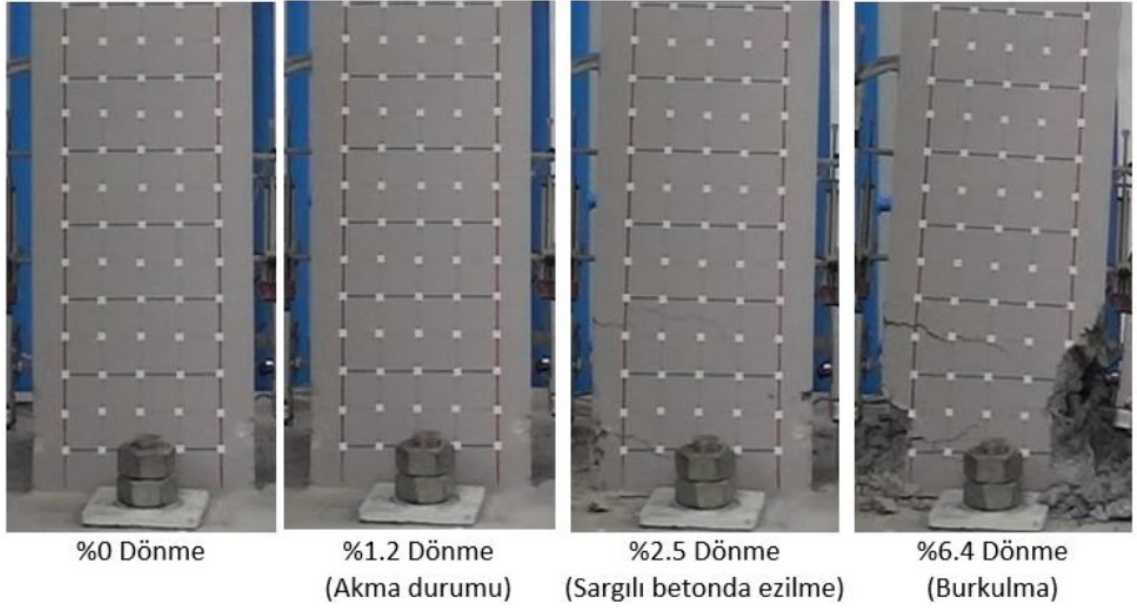
E/Ç: Eğilmede çekme kırılması

Deney sırasında ölçü aletleri yardımıyla ölçülen veya gözlem ile tespit edilen hasar durumları ve karşı gelen yerdeğiştirme talepleri Tablo 3.7’de özetlenmiştir. Deneylerde kullanılan yükleme profilinde akma yerdeğiştirmesi ile beraber sonraki her yerdeğiştirme değeri üç tekrarlı olarak uygulanmıştır. Gözlemlenen veya ölçülen hasar durumunun hangi tekrara geldiği Tablo 3.7’de gösterilmektedir.

Tablo 3.7 S601008 için deney sırasında ölçülen ve gözlemlenen hasar durumları

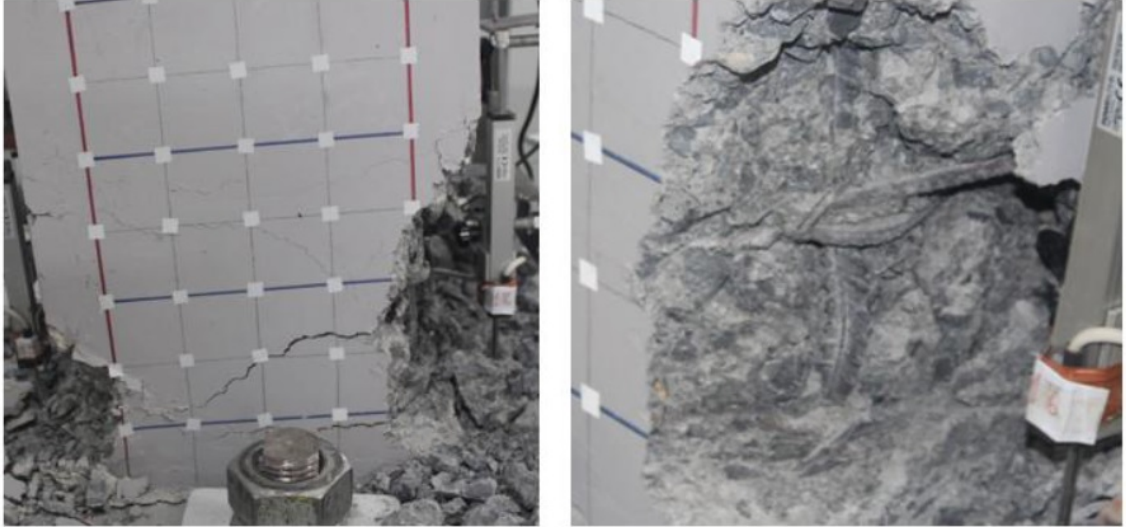
Hasar No	Hasar Gözlemi	Δ (Yerdeğiştirme) (mm/) (Tekrar adımı)		θ (Dönme) %	
		İtme	Çekme	İtme	Çekme
1	İlk çatlak oluşumu	10/1	10/1	0.6	0.6
2	Akma	12/1	12/1	0.7	0.7
3	Sargısız betonda ezilme	40/1	40/1	2.5	2.5
4	Boyuna donatı burkulma başlangıcı	80/3	80/3	5.1	5.1
5	Boyuna donatıda burkulma	100/2	100/2	6.4	6.4
6	Sargılı betonda ezilme	100/3	100/3	6.4	6.4

S601008 numaralı kolon için 292 kN sabit eksenel yük altında artan genlikli yükleme sonucuna göre ortaya çıkan hasar durumları Şekil 3.8’de gösterilmektedir. İlk yükleme çevriminde analitik akma yerdeğiştirmesinin %25’i kadar yerdeğiştirme uygulanmış ve herhangi bir hasar durumu gözlemlenmemiştir. Analitik hesaplanmış akma yerdeğiştirme değerinin yarısı kadar yerdeğiştirme (10 mm) uygulandığında ise çekme bölgesinde ilk çatlak gözlemlenmiştir. Ardından analitik akma yerdeğiştirme değeri olan 20 mm yerdeğiştirme uygulandığında ise 12 mm yerdeğiştirme altında şekildeğiştirme ölçerler yardımıyla boyuna donatıda akma tespit edilmiştir. Bir sonraki çevrimde ise analitik akma yerdeğiştirmesinin 1.5 katı olan 30 mm uygulanmıştır. Bir sonraki hasar durumu ise analitik akma yerdeğiştirmesinin 2 katı olan 40 mm yerdeğiştirmede sargısız betonda ezilme olarak gerçekleşmiştir. Boyuna donatıda burkulma başlangıcı için ise 80 mm yatay yerdeğiştirme değerinin üçüncü tekrarında oluşmuştur. Burkulma hasar durumu ise 100 mm yatay yerdeğiştirmenin ikinci tekrarında görülmüştür. Aynı genliğin üçüncü tekrarında ise sargılı betonda ezilme gerçekleşmiş ve deney sonlandırılmıştır.



Şekil 3.8 S601008 için deney sırasında gözlemlenen hasar durumları

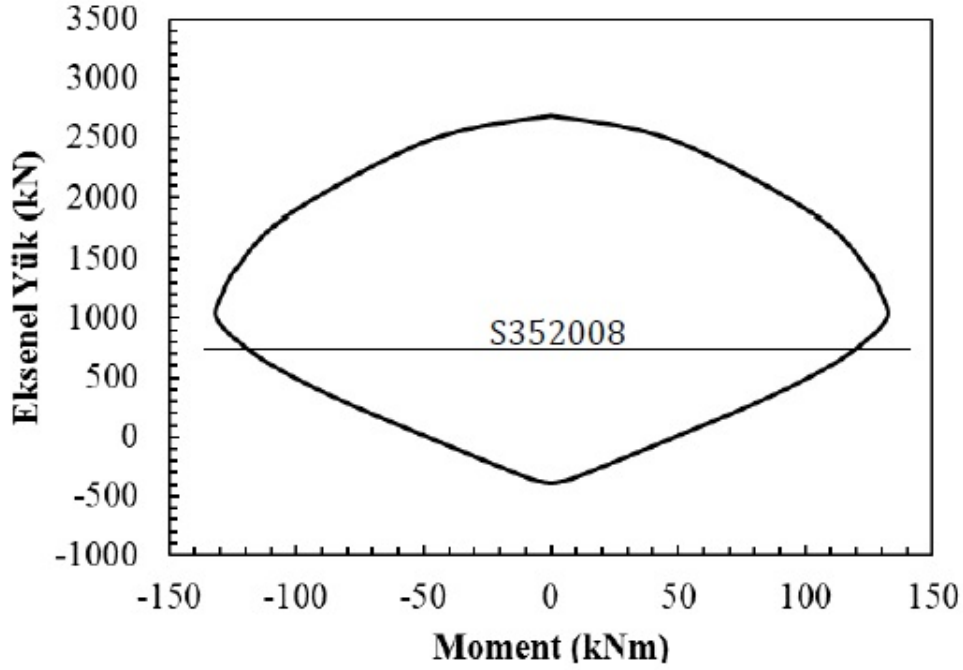
Deney sonuna ait hasar fotoğrafları Şekil 3.9’da gösterilmektedir. Deney sonrası fotoğraflara göre hasarın 0.75xh yüksekliğe kadar yoğun olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 3.9 S601008 için deney sonu hasar fotoğrafları

3.1.4 S352008 Numaralı Kolona ait Hasar Durumları

Kesme açıklığının etkili derinliğe oranı 3.5, boyutsuz eksenel yük seviyesi 0.2 ve enine donatı aralığı 10 cm olan betonarme kolon taşıma gücüne eğilme kırılması ile ulaşmıştır. Betonarme kolon numunesinin deneysel sonuçları ile nominal eğilme ve kesme kapasiteleri Tablo 3.8’de karşılaştırılmış ve kırılma biçimi belirtilmiştir. Ayrıca kolon numunesinin deneysel moment-eksenel yük etkileşim; nominal kapasite eğrisi diyagramı üzerinde gösterilerek; Şekil 3.10’da karşılaştırılmıştır.



Şekil 3.10 S352008 için kapasite eğrisi

Tablo 3.8 S352008 numaralı kolona ait kapasiteler

Kolon	M_n (kNm)	V_n (kN)	$V_{eg.}$ (kN)	V_{maks} (kN)	M_{maks} (kNm)	Kırılma Türü
S352008	109.21	289.04	118.70	143.27	142.57	E/Ç
				-134.13	-138.09	

M_n :ACI 318’e göre nominal moment kapasitesi,

V_n :ACI 318’e göre nominal kesme kapasitesi ($V_w + V_c$)

$V_{eg.}$: M_n / L_{kolon}

V_{maks} :Deneysel maksimum kesme kuvveti,

M_{maks} :Deneysel maksimum eğilme momenti,

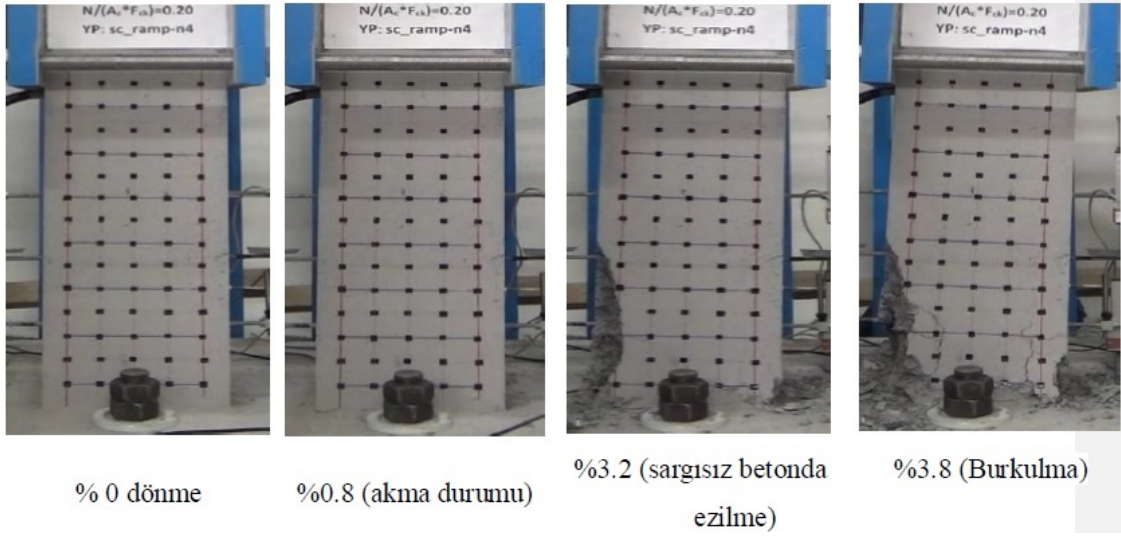
E/Ç: Eğilmede çekme kırılması

Deney sırasında ölçü aletleri yardımıyla ölçülen veya gözlem ile tespit edilen hasar durumları ve karşı gelen yerdeğiştirme talepleri Tablo 3.9'da özetlenmiştir. Deneylerde kullanılan yükleme profilinde akma yerdeğiştirmesi ile beraber sonraki her yerdeğiştirme değeri üç tekrarlı olarak uygulanmıştır. Gözlemlenen veya ölçülen hasar durumunun hangi tekrara geldiği Tablo 3.9'da gösterilmektedir.

Tablo 3.9 S352008 için deney sırasında ölçülen ve gözlemlenen hasar durumları

Hasar No	Hasar Gözlemi	Δ (Yerdeğiştirme) (mm/) (Tekrar adımı)		θ (Dönme) %	
		İtme	Çekme	İtme	Çekme
1	İlk çatlak oluşumu	10/1	10/1	1.0	1.0
2	Akma	8/1	8/1	0.8	0.8
3	Sargısız betonda ezilme	30/1	30/1	3.2	3.2
4	Boyuna donatı burkulma başlangıcı	30/3	30/3	3.2	3.2
5	Boyuna donatıda burkulma	35/1	35/1	3.8	3.8
6	Sargılı betonda ezilme	35/3	35/3	3.8	3.8

S352008 numaralı kolon için 725 kN sabit eksenel yük altında artan genlikli yükleme sonucuna göre ortaya çıkan hasar durumları Şekil 3.11'de gösterilmektedir. Bu deneyde analitik olarak hesaplanan akma yerdeğiştirmesi 5 mm olup, bu yükleme çevrimine kadar herhangi bir hasar kaydedilmemiştir. Akma yerdeğiştirmesinin 2 katı olan 10 mm yatay yerdeğiştirme altında ise 8 mm değerine ulaştığında boyuna donatıda akma tespit edilmiş ve hemen ardından çekme bölgesinde ilk çatlak gözlemlenmiştir. Eksenel yükün etkisi sebebiyle akma yerdeğiştirmesinin yaklaşık 4 katı olan 30 mm yerdeğiştirme değerine kadar sargısız betonda ezilme oluşmamıştır. Benzer şekilde 30 mm yatay yerdeğiştirmenin üçüncü tekrarında boyuna donatıda burkulma başlamıştır. Bir sonraki genlikte (35 mm) ise betonarme kolon numunesinde burkulma gerçekleşmiş ve üçüncü tekrarında sargılı betonda ezilme oluşmuştur. Bir sonraki yükleme olan 40 mm yatay yerdeğiştirmede ağır hasarın gözlemlenmesi ve taşıma gücünde meydana gelen yüksek oranda azalma sebebiyle deney sonlandırılmıştır.



Şekil 3.11 S352008 için deney sırasında gözlemlenen hasar durumları

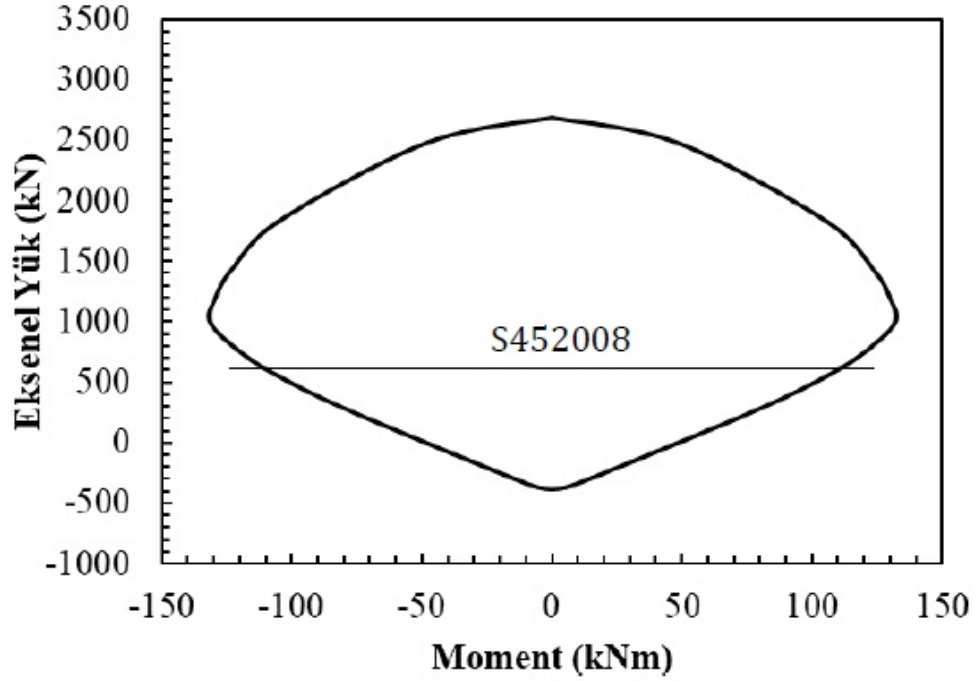
Deney sonuna ait hasar fotoğrafları Şekil 3.12’de gösterilmektedir. Deney sonrası fotoğraflara göre hasarın 1.25xh yüksekliğe kadar yoğun olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 3.12 S352008 için deney sonu hasar fotoğrafları

3.1.5 S452008 Numaralı Kolona ait Hasar Durumları

Kesme açıklığının etkili derinliğe oranı 4.5, boyutsuz eksenel yük seviyesi 0.2 ve enine donatı aralığı 10 cm olan betonarme kolon taşıma gücüne eğilme kırılması ile ulaşmıştır. Betonarme kolon numunesinin deneysel sonuçları ile nominal eğilme ve kesme kapasiteleri Tablo 3.10’da karşılaştırılmış ve kırılma biçimi belirtilmiştir. Ayrıca kolon numunesinin deneysel moment-eksenel yük etkileşim; nominal kapasite eğrisi diyagramı üzerinde gösterilerek; Şekil 3.13’de karşılaştırılmıştır.



Şekil 3.13 S452008 için kapasite eğrisi

Tablo 3.10 S452008 numaralı kolona ait kapasiteler

Kolon	M_n (kNm)	V_n (kN)	$V_{eg.}$ (kN)	V_{maks} (kN)	M_{maks} (kNm)	Kırılma Türü
S452008	109.29	260.95	93.34	90.53	123.44	E/Ç
				-99.91	-124.97	

M_n :ACI 318’e göre nominal moment kapasitesi,

V_n :ACI 318’e göre nominal kesme kapasitesi ($V_w + V_c$)

$V_{eg.}$: M_n / L_{kolon}

V_{maks} :Deneysel maksimum kesme kuvveti,

M_{maks} :Deneysel maksimum eğilme momenti,

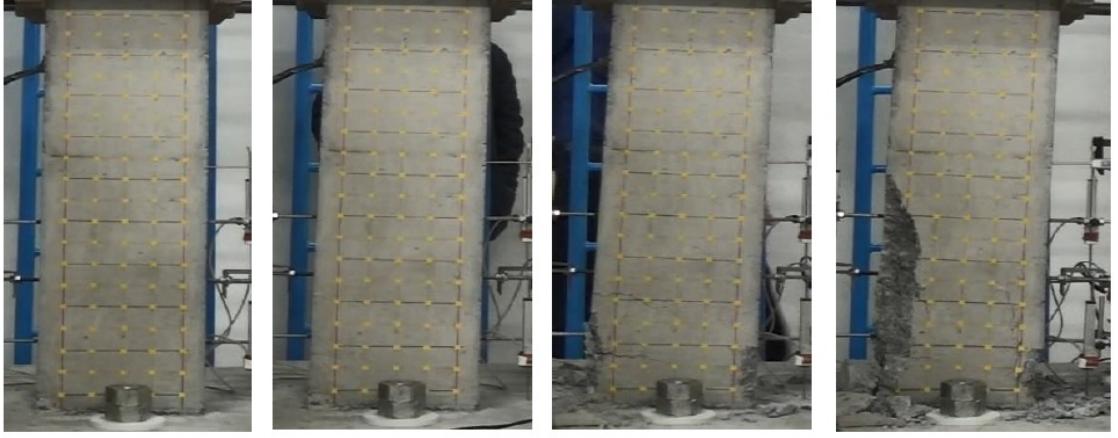
E/Ç: Eğilmede çekme kırılması

Deney sırasında ölçü aletleri yardımıyla ölçülen veya gözlem ile tespit edilen hasar durumları ve karşı gelen yerdeğiştirme talepleri Tablo 3.11’de özetlenmiştir. Deneylerde kullanılan yükleme profilinde akma yerdeğiştirmesi ile beraber sonraki her yerdeğiştirme değeri üç tekrarlı olarak uygulanmıştır. Gözlemlenen veya ölçülen hasar durumunun hangi tekrara geldiği Tablo 3.11’de gösterilmektedir.

Tablo 3.11 S452008 için deney sırasında ölçülen ve gözlemlenen hasar durumları

Hasar No	Hasar Gözlemi	Δ (Yerdeğiştirme) (mm/) (Tekrar adımı)		θ (Dönme) %	
		İtme	Çekme	İtme	Çekme
1	İlk çatlak oluşumu	8/1	8/1	0.6	0.6
2	Akma	16/1	16/1	1.3	1.3
3	Sargısız betonda ezilme	24/1	24/1	2.0	2.0
4	Boyuna donatı burkulma başlangıcı	32/3	32/3	2.7	2.7
5	Boyuna donatıda burkulma	40/1	40/1	3.4	3.4
6	Sargılı betonda ezilme	40/3	40/3	3.4	3.4

S452008 numaralı deney elemanı için 595 kN sabit eksenel yük altında artan genlikli yükleme sonucuna göre ortaya çıkan hasar durumları Şekil 3.14’de gösterilmektedir. Bu deneyde analitik olarak hesaplanan akma yerdeğiştirmesi 8 mm olup, bu yükleme çevrimine kadar herhangi bir hasar kaydedilmemiştir. 8 mm yatay yerdeğiştirme altında çekme bölgesinde ilk çatlak gözlemlenmiştir. Eksenel yükün etkisi sebebiyle boyuna donatıda akma şekildeğiştirme ölçerler yardımıyla yatay yerdeğiştirme 16 mm değerine eşit olduğu anda gerçekleşmiştir. Bir sonraki hasar durumu için ise sargısız betonda ezilme 24 mm yatay yerdeğiştirme altında oluşmuştur. Artan genliğin sonraki değeri olan 32 mm yatay yerdeğiştirme altında ise boyuna donatıda burkulma başlamıştır. Bir sonraki genlikte (40 mm) ise betonarme kolon numunesinde burkulma gerçekleşmiş ve üçüncü tekrarında sargılı betonda ezilme oluşmuştur. Bir sonraki yükleme olan 48mm yatay yerdeğiştirmede ağır hasarın gözlemlenmesi ve taşıma gücünde meydana gelen yüksek oranda azalma sebebiyle deney sonlandırılmıştır.



% 0 dönme

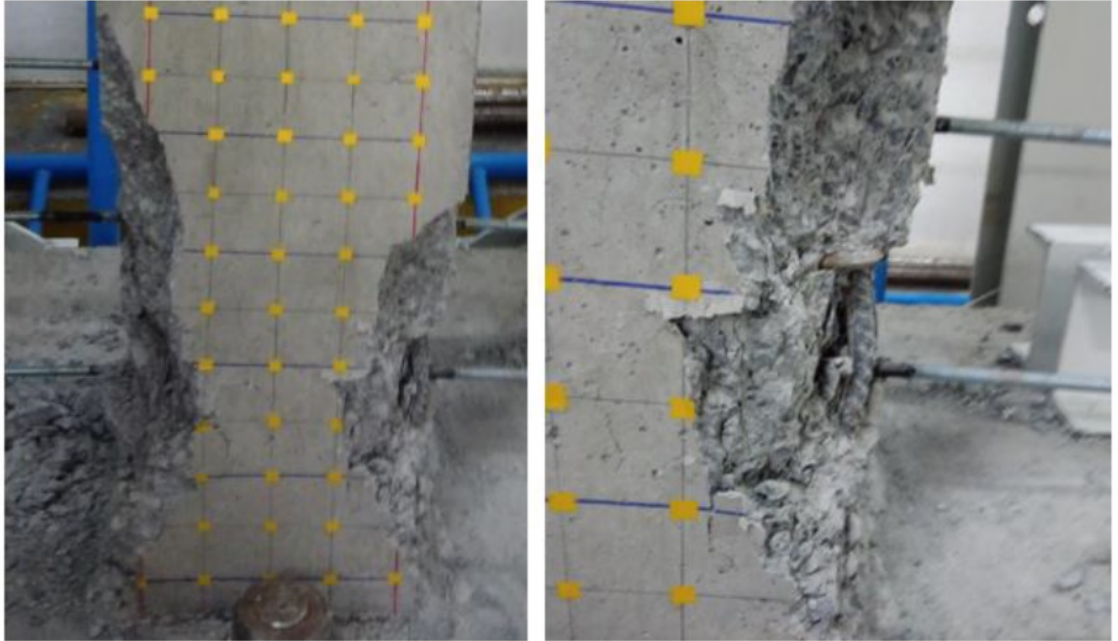
%1.3 (akma durumu)

%2.0 (sargısız betonda ezilme)

%3.4 (Burkulma)

Şekil 3.14 S452008 için deney sırasında gözlemlenen hasar durumları

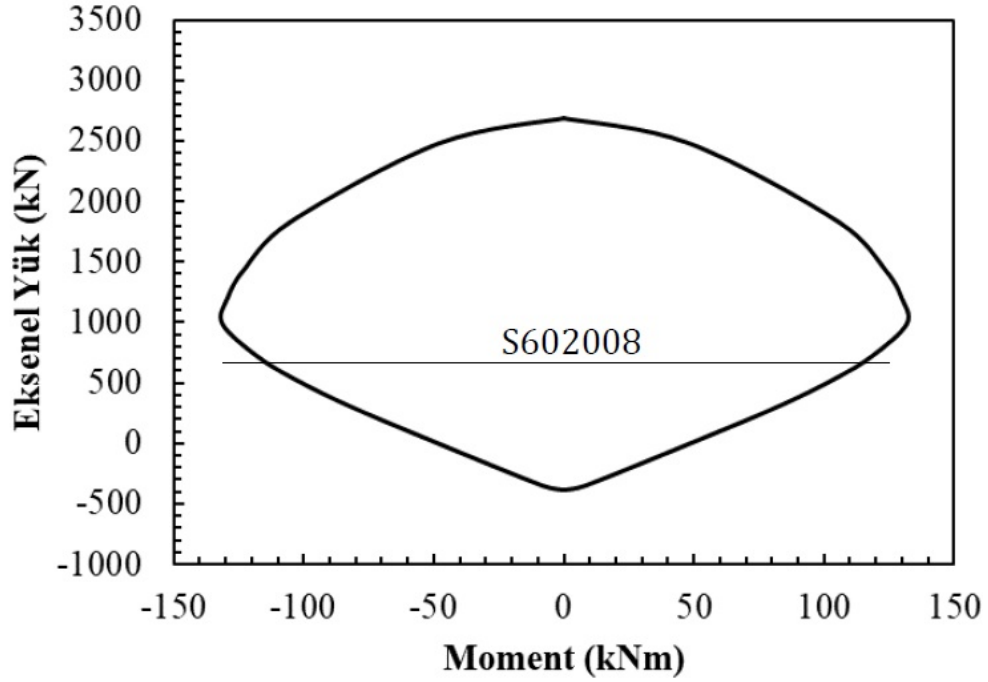
Deney sonuna ait hasar fotoğrafları Şekil 3.15’de gösterilmektedir. Deney sonrası fotoğraflara göre hasarın 1.5xh yüksekliğe kadar yoğun olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 3.15 S452008 için deney sonu hasar fotoğrafları

3.1.6 S602008 Numaralı Kolona ait Hasar Durumları

Kesme açıklığının etkili derinliğe oranı 6, boyutsuz eksenel yük seviyesi 0.2 ve enine donatı aralığı 10 cm olan betonarme kolon taşıma gücüne eğilme kırılması ile ulaşmıştır. Betonarme kolon numunesinin deneysel sonuçları ile nominal eğilme ve kesme kapasiteleri Tablo 3.12’de karşılaştırılmış ve kırılma biçimi belirtilmiştir. Ayrıca kolon numunesinin deneysel moment-eksenel yük etkileşim; nominal kapasite eğrisi diyagramı üzerinde gösterilerek; Şekil 3.16’da karşılaştırılmıştır.



Şekil 3.16 S602008 için kapasite eğrisi

Tablo 3.12 S602008 numaralı kolona ait kapasiteler

Kolon	M_n (kNm)	V_n (kN)	$V_{eg.}$ (kN)	V_{maks} (kN)	M_{maks} (kNm)	Kırılma Türü
S602008	124.87	265.75	80.04	67.49	127.62	E/Ç
				-69.75	-133.67	

M_n :ACI 318’e göre nominal moment kapasitesi,

V_n :ACI 318’e göre nominal kesme kapasitesi ($V_w + V_c$)

$V_{eg.}$: M_n / L_{kolon}

V_{maks} :Deneysel maksimum kesme kuvveti,

M_{maks} :Deneysel maksimum eğilme momenti,

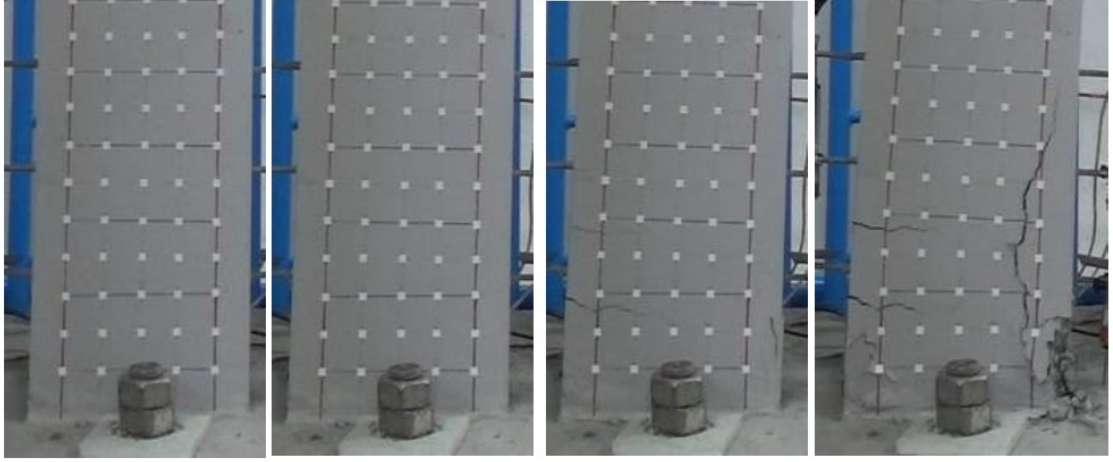
E/Ç: Eğilmede çekme kırılması

Deney sırasında ölçü aletleri yardımıyla ölçülen veya gözlem ile tespit edilen hasar durumları ve karşı gelen yerdeğiştirme talepleri Tablo 3.13’de özetlenmiştir. Deneylerde kullanılan yükleme profilinde akma yerdeğiştirmesi ile beraber sonraki her yerdeğiştirme değeri üç tekrarlı olarak uygulanmıştır. Gözlemlenen veya ölçülen hasar durumunun hangi tekrara geldiği Tablo 3.13’de gösterilmektedir.

Tablo 3.13 S602008 için deney sırasında ölçülen ve gözlemlenen hasar durumları

Hasar No	Hasar Gözlemi	Δ (Yerdeğiştirme) (mm/) (Tekrar adımı)		θ (Dönme) %	
		İtme	Çekme	İtme	Çekme
1	İlk çatlak oluşumu	14/1	14/1	0.9	0.9
2	Akma	12/1	12/1	0.8	0.8
3	Sargısız betonda ezilme	42/1	42/1	2.6	2.6
4	Boyuna donatı burkulma başlangıcı	56/1	56/1	3.5	3.5
5	Boyuna donatıda burkulma	56/3	56/3	3.5	3.5
6	Sargılı betonda ezilme	70/1	70/1	4.4	4.4

S602008 numaralı deney elemanı için 666 kN sabit eksenel yük altında artan genlikli yükleme sonucuna göre ortaya çıkan hasar durumları Şekil 3.17’de gösterilmektedir. Analitik olarak hesaplanmış akma yerdeğiştirmesi (14 mm) değeri uygulandığında çekme bölgesinde ilk çatlak görülmüştür. Aynı zamanda bu genlikte şekildeğiştirme ölçerler yardımıyla boyuna donatıda akma (12 mm) tespit edilmiştir. Sonrasında akma yerdeğiştirmesinin 3 katı değeri olan 42 mm yerdeğiştirme uygulandığında ise sargısız betonda ezilme meydana gelmiştir. Artan genliğin sonraki değeri olan 55 mm yatay yerdeğiştirmenin ilk genliğinde ise boyuna donatıda burkulma başlamıştır. Aynı genliğin üçüncü tekrarında ise betonarme kolon numunesinde burkulma gerçekleşmiştir. Bir sonraki genlikte (70 mm) ise betonarme kolonda sargılı betonda ezilme oluşmuştur. Bu genlik değerinden sonra taşıma gücünden ani azalma oluşmuş ve deney sonlandırılmıştır.



% 0 dönme %0.8 (akma durumu) %2.6 (sargısız betonda ezilme) %3.5 (Burkulma)

Şekil 3.17 S602008 için deney sırasında gözlemlenen hasar durumları

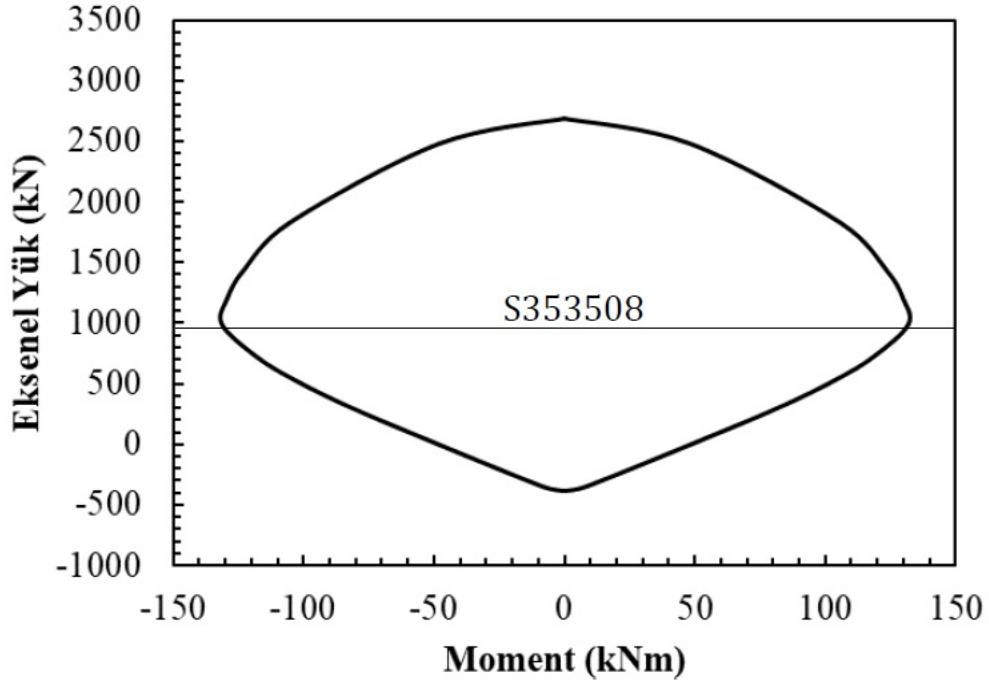
Deney sonuna ait hasar fotoğrafları Şekil 3.18’de gösterilmektedir. Deney sonrası fotoğraflara göre hasarın 1.0xh yüksekliğe kadar yoğun olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 3.18 S602008 için deney sonu hasar fotoğrafları

3.1.7 S353508 Numaralı Kolona ait Hasar Durumları

Kesme açıklığının etkili derinliğe oranı 3.5, boyutsuz eksenel yük seviyesi 0.35 ve enine donatı aralığı 10 cm olan betonarme kolon taşıma gücüne eğilme kırılması ile ulaşmıştır. Betonarme kolon numunesinin deneysel sonuçları ile nominal eğilme ve kesme kapasiteleri Tablo 3.14’de karşılaştırılmış ve kırılma biçimi belirtilmiştir. Ayrıca kolon numunesinin deneysel moment-eksenel yük etkileşim; nominal kapasite eğrisi diyagramı üzerinde gösterilerek; Şekil 3.19’da karşılaştırılmıştır.



Şekil 3.19 S353508 için kapasite eğrisi

Tablo 3.14 S353508 numaralı kolona ait kapasiteler

Kolon	M_n (kNm)	V_n (kN)	$V_{eg.}$ (kN)	V_{maks} (kN)	M_{maks} (kNm)	Kırılma Türü
S353508	131.95	312.78	143.42	169.64	166.52	E/Ç
				-170.98	-170.73	

M_n :ACI 318’e göre nominal moment kapasitesi,

V_n :ACI 318’e göre nominal kesme kapasitesi ($V_w + V_c$)

$V_{eg.}$: M_n / L_{kolon}

V_{maks} :Deneysel maksimum kesme kuvveti,

M_{maks} :Deneysel maksimum eğilme momenti,

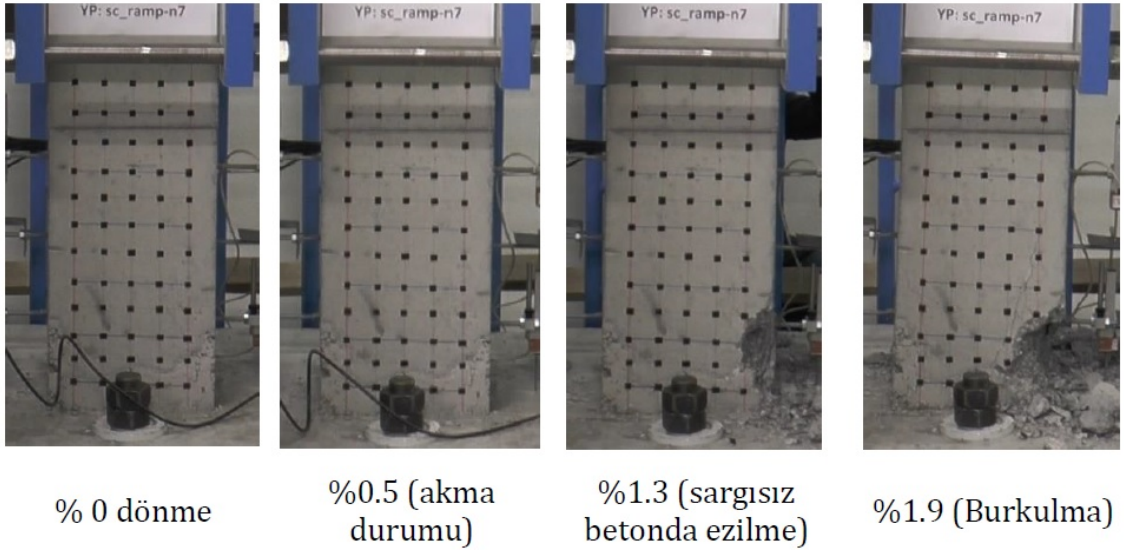
E/Ç: Eğilmede basınç kırılması

Deney sırasında ölçü aletleri yardımıyla ölçülen veya gözlem ile tespit edilen hasar durumları ve karşı gelen yerdeğiştirme talepleri Tablo 3.15’de özetlenmiştir. Deneylerde kullanılan yükleme profilinde akma yerdeğiştirmesi ile beraber sonraki her yerdeğiştirme değeri üç tekrarlı olarak uygulanmıştır. Gözlemlenen veya ölçülen hasar durumunun hangi tekrara geldiği Tablo 3.15’de gösterilmektedir.

Tablo 3.15 S353508 için deney sırasında ölçülen ve gözlemlenen hasar durumları

Hasar No	Hasar Gözlemi	Δ (Yerdeğiştirme) (mm/) (Tekrar adımı)		θ (Dönme) %	
		İtme	Çekme	İtme	Çekme
1	İlk çatlak oluşumu	9/1	9/1	0.9	0.9
2	Akma	5.4/1	5.4/1	0.5	0.5
3	Sargısız betonda ezilme	12/1	12/1	1.3	1.3
4	Boyuna donatı burkulma başlangıcı	15/2	15/2	1.6	1.6
5	Boyuna donatıda burkulma	18/1	18/1	1.9	1.9
6	Sargılı betonda ezilme	21/2	21/2	2.2	2.2

S353508 numaralı deney elemanı için 913 kN sabit eksenel yük altında artan genlikli yükleme yapılarak deneysel olarak incelenmiştir. Eksenel yükün etkisi sebebiyle akma öncesi yüklemelerde herhangi bir hasar gözlemlenmemiştir. Analitik olarak hesaplanan akma yerdeğiştirmesinin 3 katı olan 9 mm yerdeğiştirme altında çekme bölgesinde ilk çatlak gözlemlenmiştir. Boyuna donatıda akma ise çekme bölgesi için 12 mm yerdeğiştirme altında oluşmuştur. Ancak betonda meydana gelen yumuşama etkisi gereği, beton bölgesinde 0.002 kısalma (5.4 mm) olduğu anda donatının aktığı kabul edilmiştir. Ardından 12 mm yerdeğiştirme altında basınç bölgesinde ezilme gerçekleşmiştir. Sonraki yükleme adımında (15mm) ise boyuna donatıda burkulma başlangıcı gözlenmiştir. Artan genlikle birlikte 18 mm yerdeğiştirme altında boyuna donatı burkulmuştur. Bir sonraki yükleme adımında ise 21 mm yatay yerdeğiştirmede betonarme kolonun sargılı betonunda ezilme gerçekleşmiş ve güvenlik gereği deney sonlandırılmıştır. Deney sırasında gözlemlenen hasar durumlarına ait fotoğraflar Şekil 3.20’de gösterilmektedir.



Şekil 3.20 S353508 için deney sırasında gözlemlenen hasar durumları

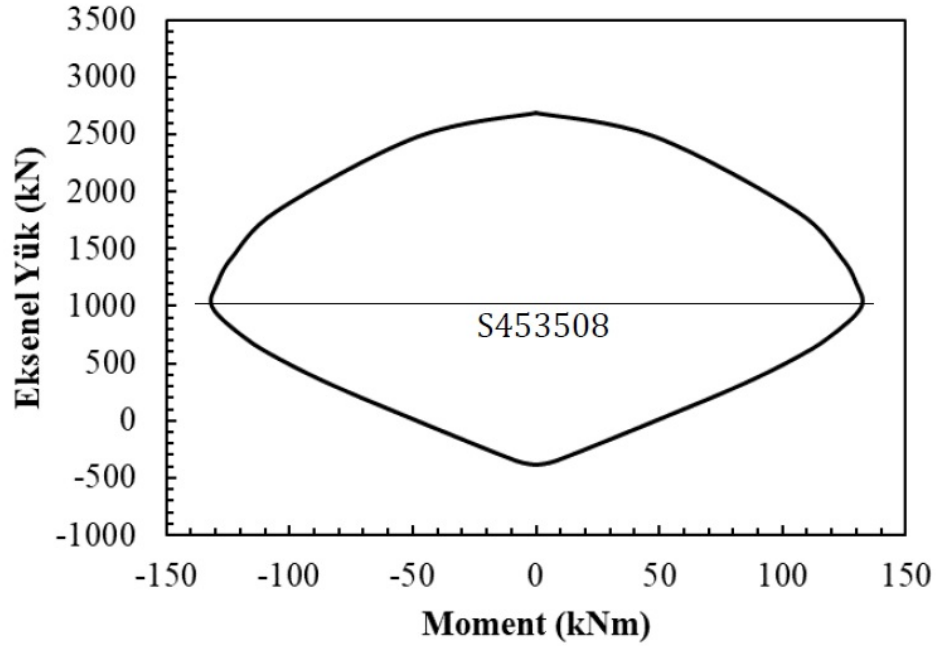
Deney sonuna ait hasar fotoğrafları Şekil 3.21’de gösterilmektedir. Deney sonrası fotoğraflara göre hasarın 0.75xh yüksekliğe kadar yoğun olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 3.21 S353508 için deney sonu hasar fotoğrafları

3.1.8 S453508 Numaralı Kolona ait Hasar Durumları

Kesme açıklığının etkili derinliğe oranı 4.5, boyutsuz eksenel yük seviyesi 0.35 ve enine donatı aralığı 10 cm olan betonarme kolon taşıma gücüne eğilmede basınç kırılması ile ulaşmıştır. Betonarme kolon numunesinin deneysel sonuçları ile nominal eğilme ve kesme kapasiteleri Tablo 3.16’da karşılaştırılmış ve kırılma biçimi belirtilmiştir. Ayrıca kolon numunesinin deneysel moment-eksenel yük etkileşim; nominal kapasite eğrisi diyagramı üzerinde gösterilerek; Şekil 3.22’de karşılaştırılmıştır.



Şekil 3.22 S453508 için kapasite eğrisi

Tablo 3.16 S453508 numaralı kolona ait kapasiteler

Kolon	M_n (kNm)	V_n (kN)	$V_{eg.}$ (kN)	V_{maks} (kN)	M_{maks} (kNm)	Kırılma Türü
S453508	131.95	259.70	112.77	86.13	115.10	E/B
				-103.80	-135.68	

M_n :ACI 318’e göre nominal moment kapasitesi,

V_n :ACI 318’e göre nominal kesme kapasitesi ($V_w + V_c$)

$V_{eg.}$: M_n / L_{kolon}

V_{maks} :Deneysel maksimum kesme kuvveti,

M_{maks} :Deneysel maksimum eğilme momenti,

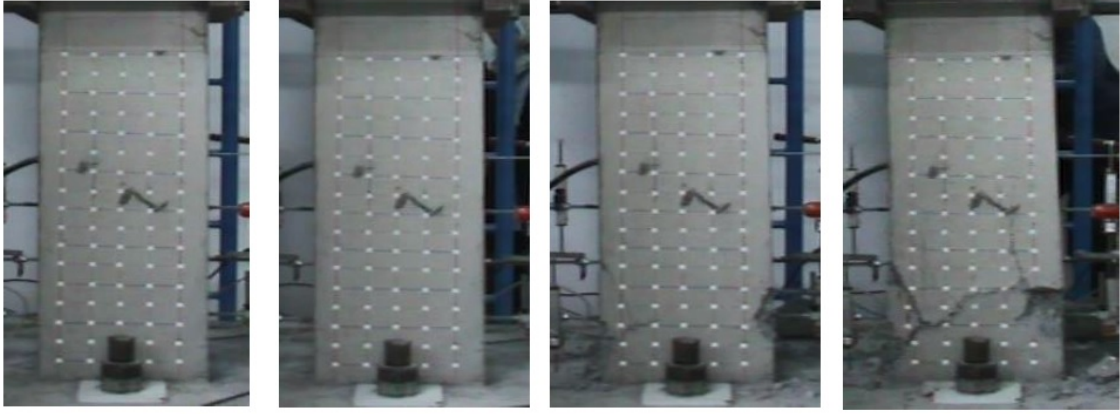
E/B: Eğilmede basınç kırılması

Deney sırasında ölçü aletleri yardımıyla ölçülen veya gözlem ile tespit edilen hasar durumları ve karşı gelen yerdeğiştirme talepleri Tablo 3.17’de özetlenmiştir. Deneylerde kullanılan yükleme profilinde akma yerdeğiştirmesi ile beraber sonraki her yerdeğiştirme değeri üç tekrarlı olarak uygulanmıştır. Gözlemlenen veya ölçülen hasar durumunun hangi tekrara geldiği Tablo 3.17’de gösterilmektedir.

Tablo 3.17 S453508 için deney sırasında ölçülen ve gözlemlenen hasar durumları

Hasar No	Hasar Gözlemi	Δ (Yerdeğiştirme) (mm/) (Tekrar adımı)		θ (Dönme) %	
		İtme	Çekme	İtme	Çekme
1	İlk çatlak oluşumu	10/1	10/1	0.8	0.8
2	Akma	5/1	5/1	0.4	0.4
3	Sargısız betonda ezilme	15/1	15/1	1.2	1.2
4	Boyuna donatı burkulma başlangıcı	15/3	15/3	1.2	1.2
5	Boyuna donatıda burkulma	20/1	20/1	1.7	1.7
6	Sargılı betonda ezilme	20/2	20/2	1.7	1.7

S453508 numaralı deney elemanı için 1000 kN sabit eksenel yük altında artan genlikli yükleme yapılarak deneysel olarak incelenmiştir. Eksenel yükün etkisi sebebiyle akma öncesi yüklemelerde herhangi bir hasar gözlemlenmemiştir. Analitik olarak hesaplanan akma yerdeğiştirmesinin 2 katı olan 10 mm yerdeğiştirme altında çekme bölgesinde ilk çatlak gözlemlenmiştir. Boyuna donatıda akma ise çekme bölgesi için 10 mm yerdeğiştirme altında oluşmuştur. Ancak betonda meydana gelen yumuşama etkisi gereği, beton bölgesinde 0.002 kısalma (5.0 mm) olduğu an akma kabul edilmiştir. Ardından 15 mm yerdeğiştirme çevriminin ilk tekrarında basınç bölgesinde ezilme gerçekleşmiştir. Aynı yüklemenin üçüncü tekrarında ise boyuna donatıda burkulma başlangıcı gözlenmiştir. Artan genlikle birlikte 20 mm yerdeğiştirme genliğinin ilk tekrarı altında boyuna donatı burkulmuştur. Aynı yükleme genliğinin ikinci tekrarında ise betonarme kolonun sargılı betonunda ezilme gerçekleşmiş ve güvenlik gereği deney sonlandırılmıştır. Bu kolonda boyutsuz eksenel yük Türkiye Bina Deprem Yönetmeliğinde (TBDY) verilen sınır ($N/A_c f_c \leq 0.4$) içinde kalmasına rağmen gevrek davranış söz konusudur. Ayrıca kolonda ileri yerdeğiştirme adımlarında eksenel yük güç tükenmesi de gözlenmiştir. Yükleme adımı tamamlanmadan birçok noktada burkulma gözlenerek güç tükenmesine ulaşmıştır. Deney sırasında gözlemlenen hasar durumlarına ait fotoğraflar Şekil 3.23’de gösterilmektedir.



% 0 dönme

%0.4 (akma durumu)

%1.2 (sargısız betonda ezilme)

%1.7 (Burkulma)

Şekil 3.23 S453508 için deney sırasında gözlemlenen hasar durumları

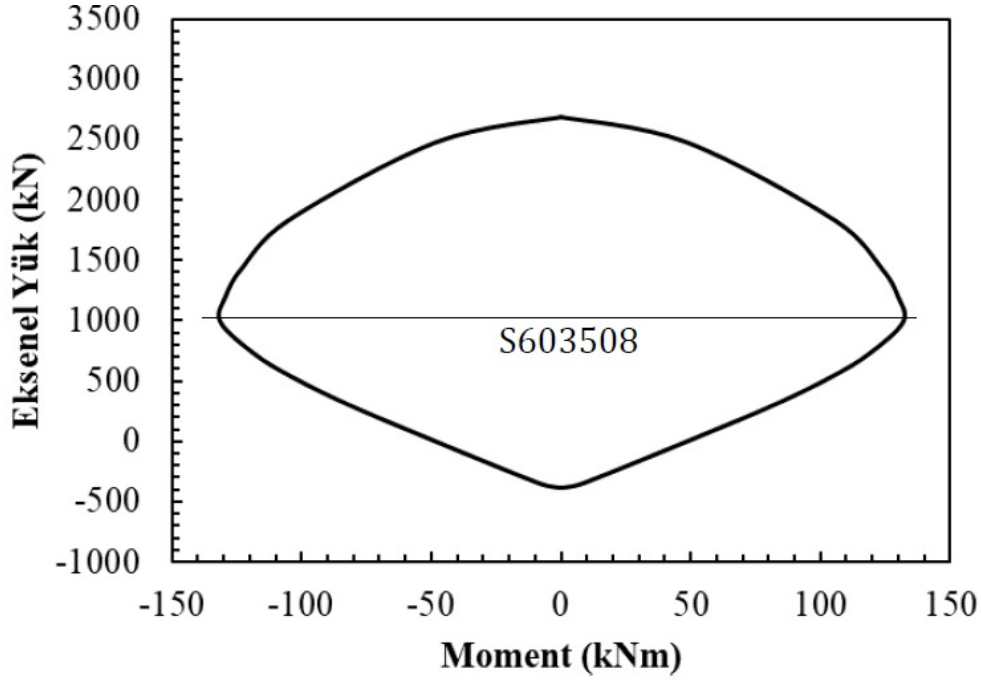
Deney sonuna ait hasar fotoğrafları Şekil 3.24'de gösterilmektedir. Deney sonrası fotoğraflara göre hasarın 1.5xh yüksekliğe kadar yoğun olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 3.24 S453508 için deney sonu hasar fotoğrafları

3.1.9 S603508 Numaralı Kolona ait Hasar Durumları

Kesme açıklığının etkili derinliğe oranı 6, boyutsuz eksenel yük seviyesi 0.35 ve enine donatı aralığı 10 cm olan betonarme kolon taşıma gücüne eğilme kırılması ile ulaşmıştır. Betonarme kolon numunesinin deneysel sonuçları ile nominal eğilme ve kesme kapasiteleri Tablo 3.18’de karşılaştırılmış ve kırılma biçimi belirtilmiştir. Ayrıca kolon numunesinin deneysel moment-eksenel yük etkileşim; nominal kapasite eğrisi diyagramı üzerinde gösterilerek; Şekil 3.25’de karşılaştırılmıştır.



Şekil 3.25 S603508 için kapasite eğrisi

Tablo 3.18 S603508 numaralı kolona ait kapasiteler

Kolon	M_n (kNm)	V_n (kN)	$V_{eg.}$ (kN)	V_{maks} (kN)	M_{maks} (kNm)	Kırılma Türü
S603508	136.08	259.07	87.23	79.28	150.79	E/Ç
				-78.48	-148.49	

M_n :ACI 318’e göre nominal moment kapasitesi,

V_n :ACI 318’e göre nominal kesme kapasitesi ($V_w + V_c$)

$V_{eg.}$: M_n / L_{kolon}

V_{maks} :Deneysel maksimum kesme kuvveti,

M_{maks} :Deneysel maksimum eğilme momenti,

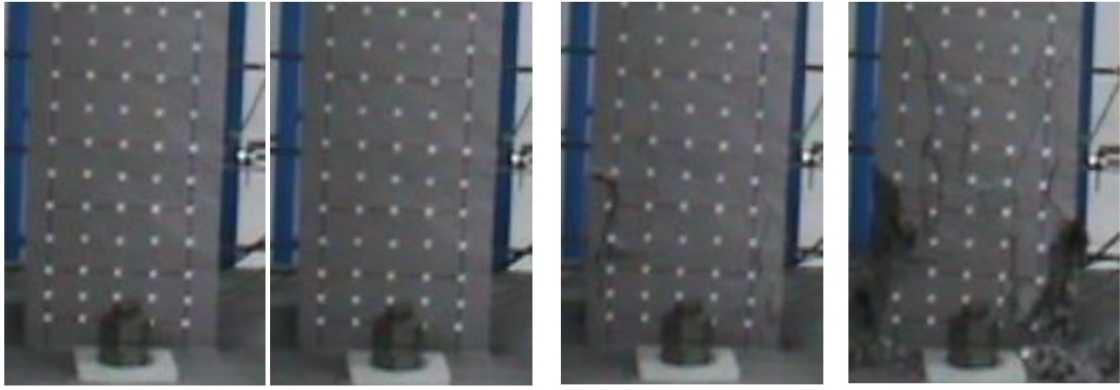
E/Ç: Eğilmede çekme kırılması

Deney sırasında ölçü aletleri yardımıyla ölçülen veya gözlem ile tespit edilen hasar durumları ve karşı gelen yerdeğiştirme talepleri Tablo 3.19’da özetlenmiştir. Deneylerde kullanılan yükleme profilinde akma yerdeğiştirmesi ile beraber sonraki her yerdeğiştirme değeri üç tekrarlı olarak uygulanmıştır. Gözlemlenen veya ölçülen hasar durumunun hangi tekrara geldiği Tablo 3.19’da gösterilmektedir.

Tablo 3.19 S603508 için deney sırasında ölçülen ve gözlemlenen hasar durumları

Hasar No	Hasar Gözlemi	Δ (Yerdeğiştirme) (mm/) (Tekrar adımı)		θ (Dönme) %	
		İtme	Çekme	İtme	Çekme
1	İlk çatlak oluşumu	9/1	9/1	0.6	0.6
2	Akma	8/1	8/1	0.5	0.5
3	Sargısız betonda ezilme	27/1	27/1	1.7	1.7
4	Boyuna donatı burkulma başlangıcı	27/3	27/3	1.7	1.7
5	Boyuna donatıda burkulma	36/1	36/1	2.3	2.3
6	Sargılı betonda ezilme	36/2	36/2	2.3	2.3

S603508 numaralı kolon için 999 kN sabit eksenel yük altında artan genlikli yükleme yapılarak deneysel olarak incelenmiştir. Eksenel yükün etkisi sebebiyle akma öncesi yüklemelerde herhangi bir hasar gözlemlenmemiştir. Analitik olarak hesaplanan akma yerdeğiştirmesi altında çekme bölgesinde ilk çatlak gözlemlenmiştir. Aynı zamanda boyuna donatıda akma ise çekme bölgesi için 8 mm yerdeğiştirme altında oluşmuştur. Ardından 27 mm yerdeğiştirme çevriminin ilk tekrarında basınç bölgesinde ezilme gerçekleşmiştir. Aynı yüklemenin üçüncü tekrarında ise boyuna donatıda burkulma başlangıcı gözlenmiştir. Artan genlikle birlikte 36 mm yerdeğiştirme genliğinin ilk tekrarı altında boyuna donatı burkulmuştur. Aynı yükleme genliğinin ikinci tekrarında ise betonarme kolonun sargılı betonunda ezilme gerçekleşmiş ve güvenlik gereği deney sonlandırılmıştır. Deney sırasında gözlemlenen hasar durumlarına ait fotoğraflar Şekil 3.26’da gösterilmektedir.



% 0 dönme %0.5 (akma durumu) %1.7 (sargısız betonda ezilme) %2.3 (Burkulma)

Şekil 3.26 S603508 için deney sırasında gözlemlenen hasar durumları

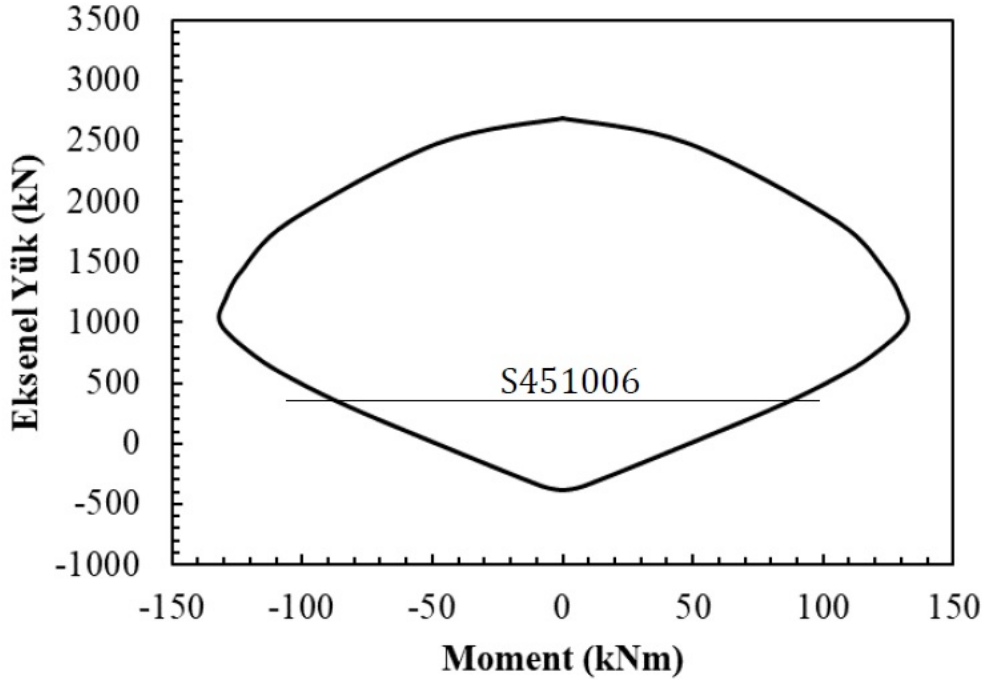
Deney sonuna ait hasar fotoğrafları Şekil 3.24’de gösterilmektedir. Deney sonrası fotoğraflara göre hasarın 1.5xh yüksekliğe kadar yoğun olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 3.27 S603508 için deney sonu hasar fotoğrafları

3.1.10 S451006 Numaralı Kolona ait Hasar Durumları

Kesme açıklığının etkili derinliğe oranı 4.5, boyutsuz eksenel yük seviyesi 0.1 ve enine donatı aralığı 15 cm olan betonarme kolon taşıma gücüne eğilme kırılması ile ulaşmıştır. Betonarme kolon numunesinin deneysel sonuçları ile nominal eğilme ve kesme kapasiteleri Tablo 3.20’de karşılaştırılmış ve kırılma biçimi belirtilmiştir. Ayrıca kolon numunesinin deneysel moment-eksenel yük etkileşim; nominal kapasite eğrisi diyagramı üzerinde gösterilerek; Şekil 3.28’de karşılaştırılmıştır.



Şekil 3.28 S451006 için kapasite eğrisi

Tablo 3.20 S451006 numaralı kolona ait kapasiteler

Kolon	M_n (kNm)	V_n (kN)	$V_{eg.}$ (kN)	V_{maks} (kN)	M_{maks} (kNm)	Kırılma Türü
S451006	105.30	208.25	90.00	74.47	97.10	E/Ç
				-83.71	-106.22	

M_n :ACI 318’e göre nominal moment kapasitesi,

V_n :ACI 318’e göre nominal kesme kapasitesi ($V_w + V_c$)

$V_{eg.}$: M_n / L_{kolon}

V_{maks} :Deneysel maksimum kesme kuvveti,

M_{maks} :Deneysel maksimum eğilme momenti,

E/Ç: Eğilmede çekme kırılması

Deney sırasında ölçü aletleri yardımıyla ölçülen veya gözlem ile tespit edilen hasar durumları ve karşı gelen yerdeğiştirme talepleri Tablo 3.21’de özetlenmiştir. Deneylerde kullanılan yükleme profilinde akma yerdeğiştirmesi ile beraber sonraki her yerdeğiştirme değeri üç tekrarlı olarak uygulanmıştır. Gözlemlenen veya ölçülen hasar durumunun hangi tekrara geldiği Tablo 3.21’de gösterilmektedir.

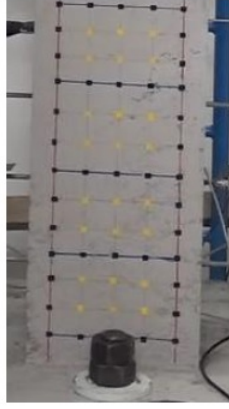
Tablo 3.21 S451006 için deney sırasında ölçülen ve gözlemlenen hasar durumları

Hasar No	Hasar Gözlemi	Δ (Yerdeğiştirme) (mm/) (Tekrar adımı)		θ (Dönme) %	
		İtme	Çekme	İtme	Çekme
1	İlk çatlak oluşumu	11/1	11/1	0.9	0.9
2	Akma	16/1	16/1	1.4	1.4
3	Sargısız betonda ezilme	33/1	33/1	2.8	2.8
4	Boyuna donatı burkulma başlangıcı	55/1	55/1	4.7	4.7
5	Boyuna donatıda burkulma	66/1	66/1	5.6	5.6
6	Sargılı betonda ezilme	66/3	66/3	5.6	5.6

S451006 numaralı deney elemanı için 352 kN sabit eksenel yük altında artan genlikli yükleme yapılarak deneysel olarak incelenmiştir. Eksenel yükün etkisi sebebiyle akma öncesi yüklemelerde herhangi bir hasar gözlemlenmemiştir. Analitik olarak hesaplanan akma yerdeğiştirmesi altında çekme bölgesinde ilk çatlak gözlemlenmiştir. Çatlak sonrası artan ilk genlikte ise 16 mm yatay yerdeğiştirme altında çekme bölgesinde boyuna donatıda akma tespit edilmiştir. Yaklaşık olarak akmanın 2 katı olan 33 mm yerdeğiştirme altında sargısız betonda basınç bölgesinde ezilme görülmüştür. Yatay yerdeğiştirme 55 mm değerine ulaştığında ise boyuna donatıda burkulma başlangıcı gözlenmiştir. Bir sonraki artan genlikte ise 66 mm yerdeğiştirme için ilk tekrarında boyuna donatı burkulmuştur. Aynı yükleme genliğinin üçüncü tekrarında ise, betonarme kolonun sargılı betonunda ezilme gerçekleşmiş ve güvenlik gereği deney sonlandırılmıştır. Deney sırasında gözlemlenen hasar durumlarına ait fotoğraflar Şekil 3.29’da gösterilmektedir.



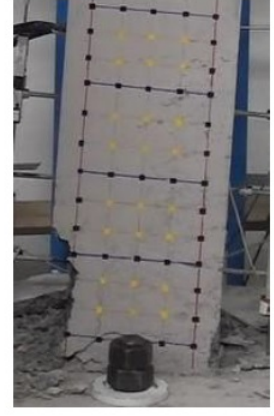
% 0 dönme



%1.4 (akma durumu)



%2.8 (sargısız betonda ezilme)



%5.6 (Burkulma)

Şekil 3.29 S451006 için deney sırasında gözlemlenen hasar durumları

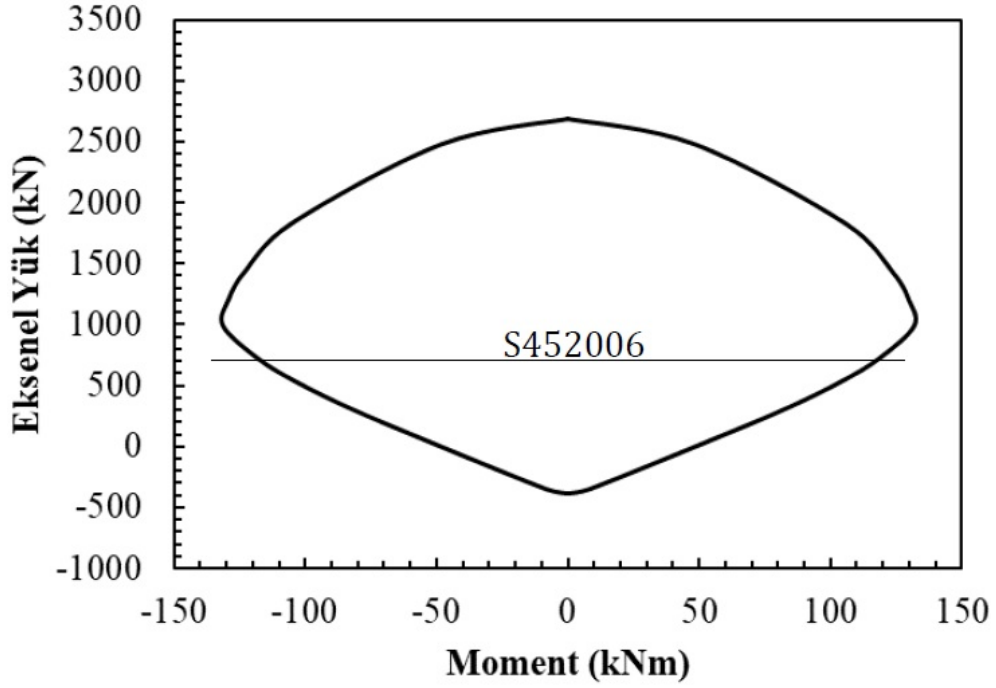
Deney sonuna ait hasar fotoğrafları Şekil 3.30'de gösterilmektedir. Deney sonrası fotoğraflara göre hasarın 0.75xh yüksekliğe kadar yoğun olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 3.30 S451006 için deney sonu hasar fotoğrafları

3.1.11 S452006 Numaralı Kolona ait Hasar Durumları

Kesme açıklığının etkili derinliğe oranı 4.5, boyutsuz eksenel yük seviyesi 0.2 ve enine donatı aralığı 15 cm olan betonarme kolon taşıma gücüne eğilme kırılması ile ulaşmıştır. Betonarme kolon numunesinin deneysel sonuçları ile nominal eğilme ve kesme kapasiteleri Tablo 3.22’de karşılaştırılmış ve kırılma biçimi belirtilmiştir. Ayrıca kolon numunesinin deneysel moment-eksenel yük etkileşim; nominal kapasite eğrisi diyagramı üzerinde gösterilerek; Şekil 3.31’de karşılaştırılmıştır.



Şekil 3.31 S452006 için kapasite eğrisi

Tablo 3.22 S452006 numaralı kolona ait kapasiteler

Kolon	M_n (kNm)	V_n (kN)	$V_{eg.}$ (kN)	V_{maks} (kN)	M_{maks} (kNm)	Kırılma Türü
S452006	136.89	208.25	117.00	95.54	128.21	E/Ç
				-96.32	-134.16	

M_n :ACI 318’e göre nominal moment kapasitesi,

V_n :ACI 318’e göre nominal kesme kapasitesi ($V_w + V_c$)

$V_{eg.}$: M_n / L_{kolon}

V_{maks} :Deneysel maksimum kesme kuvveti,

M_{maks} :Deneysel maksimum eğilme momenti,

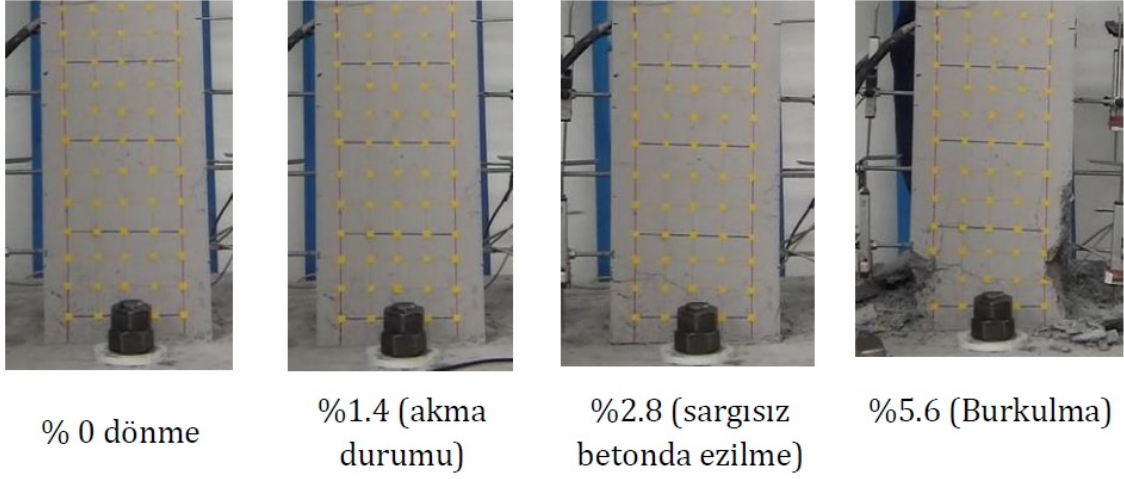
E/Ç: Eğilmede çekme kırılması

Deney sırasında ölçü aletleri yardımıyla ölçülen veya gözlem ile tespit edilen hasar durumları ve karşı gelen yerdeğiştirme talepleri Tablo 3.23’de özetlenmiştir. Deneylerde kullanılan yükleme profilinde akma yerdeğiştirmesi ile beraber sonraki her yerdeğiştirme değeri üç tekrarlı olarak uygulanmıştır. Gözlemlenen veya ölçülen hasar durumunun hangi tekrara geldiği Tablo 3.23’de gösterilmektedir.

Tablo 3.23 S452006 için deney sırasında ölçülen ve gözlemlenen hasar durumları

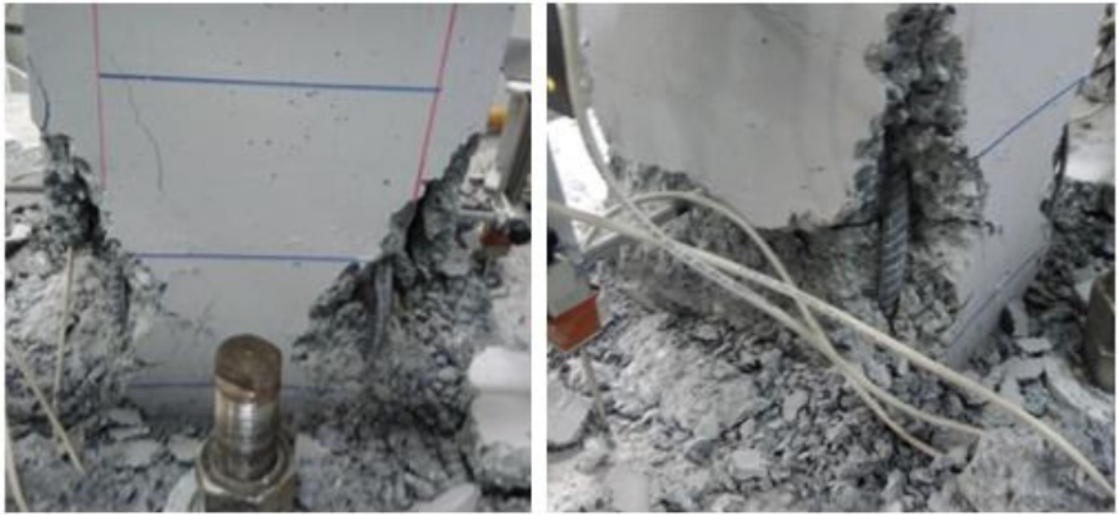
Hasar No	Hasar Gözlemi	Δ (Yerdeğiştirme) (mm/) (Tekrar adımı)		θ (Dönme) %	
		İtme	Çekme	İtme	Çekme
1	İlk çatlak oluşumu	12/1	12/1	1.0	1.0
2	Akma	16/1	16/1	1.4	1.4
3	Sargısız betonda ezilme	24/1	24/1	2.0	2.0
4	Boyuna donatı burkulma başlangıcı	40/1	40/1	3.4	3.4
5	Boyuna donatıda burkulma	48/1	48/1	4.1	4.1
6	Sargılı betonda ezilme	48/3	48/3	4.1	4.1

S452006 numaralı deney elemanı için 702 kN sabit eksenel yük altında artan genlikli yükleme yapılarak deneysel olarak incelenmiştir. Eksenel yükün daha yüksek olması sebebiyle akma öncesi yüklemelerde herhangi bir hasar gözlemlenmemiştir. Çekme bölgesinde ilk çatlak 12 mm yatay yerdeğiştirme altında gerçekleşmiştir. İlk çatlak tespitinden sonra 16 mm yatay yerdeğiştirme altında, çekme bölgesinde bulunan şekildeğiştirme ölçer cihazlarından boyuna donatılarda akma tespit edilmiştir. Yatay yerdeğiştirme değeri 24 mm değerine ulaştığı çevrimde sargısız betonda basınç bölgesinde ezilme görülmüştür. Sonraki çevrimlerde artan genlikle birlikte hasar yayılmaya ve çatlaklar genişlemeye devam etmiştir. Yatay yerdeğiştirme 40 mm değerine ulaştığında ise boyuna donatıda burkulma başlangıcı gözlenmiştir. Bir sonraki artan genlikte ise 48 mm yerdeğiştirme için ilk tekrarında boyuna donatı burkulmuştur. Aynı yükleme genliğinin üçüncü tekrarında ise betonarme kolonun sargılı betonunda ezilme gerçekleşmiş ve güvenlik gereği deney sonlandırılmıştır. Deney sırasında gözlemlenen hasar durumlarına ait fotoğraflar Şekil 3.32’de gösterilmektedir.



Şekil 3.32 S452006 için deney sırasında gözlemlenen hasar durumları

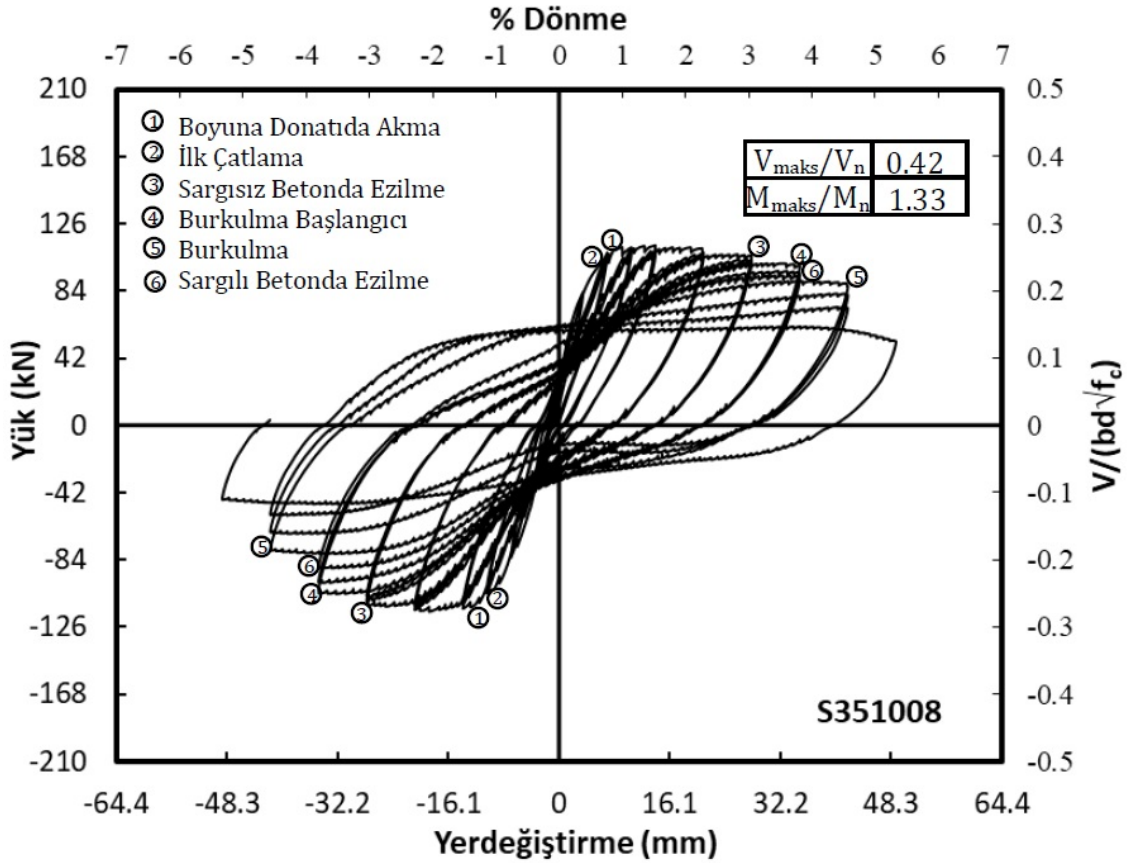
Deney sonuna ait hasar fotoğrafları Şekil 3.33’de gösterilmektedir. Deney sonrası fotoğraflara göre hasarın 1.25xh yüksekliğe kadar yoğun olduğu tespit edilmiştir.

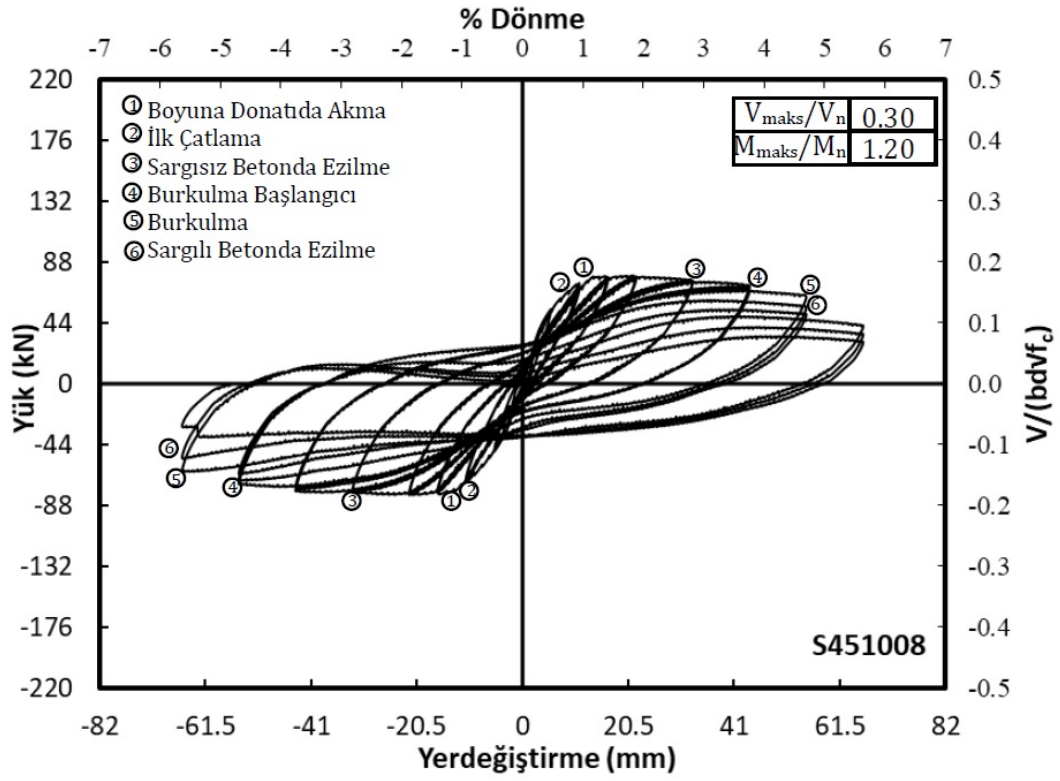


Şekil 3.33 S452006 için deney sonu hasar fotoğrafları

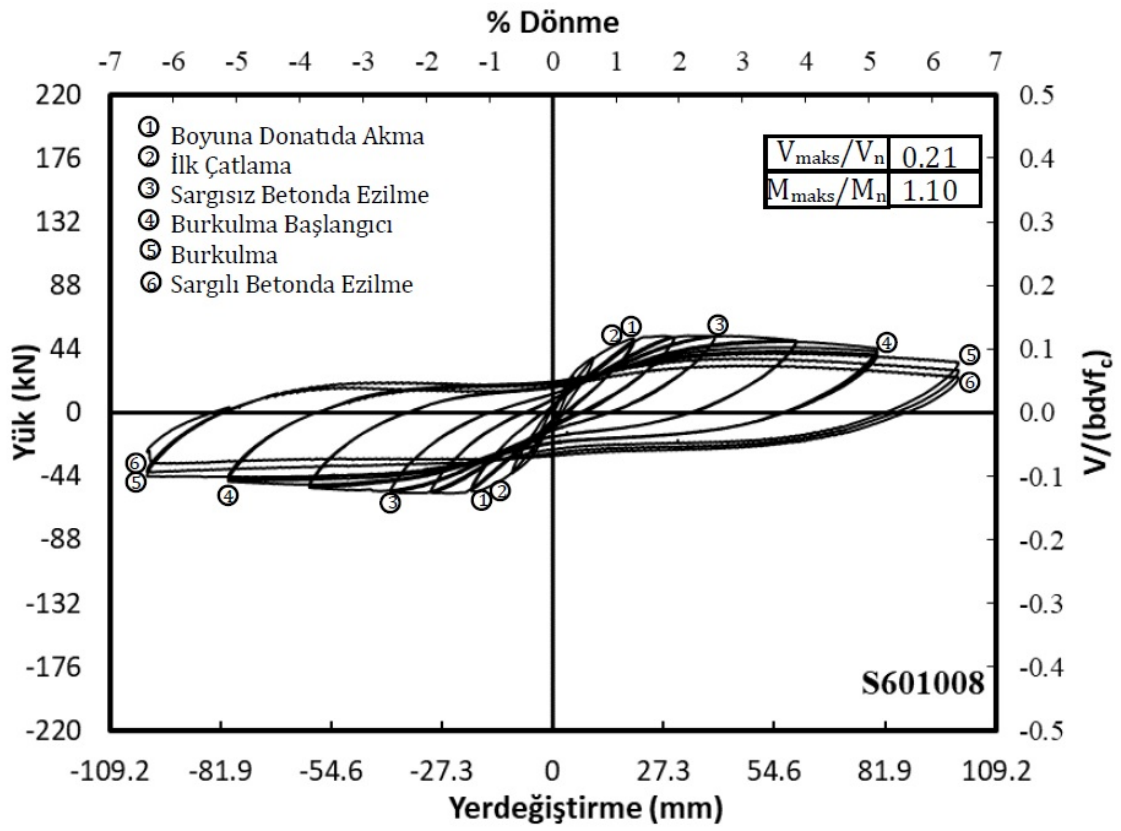
3.2 Yük-Yerdeğiştirme İlişkileri

Kolonlara uygulanan yükleme profili sonrasında elde edilen yük-yerdeğiştirme ilişkileri Şekil 3.34-44'de gösterilmiştir. Deney sırasında ölçü aletleri ile tespit edilen veya gözle görülen hasar durumları eğri üzerinde işaretlenmiştir. Ayrıca her şekil üzerinde deneysel maksimum kesme kuvveti ve moment değerlerinin ACI318'e göre hesaplanan nominal kapasiteye oranları gösterilmiştir.

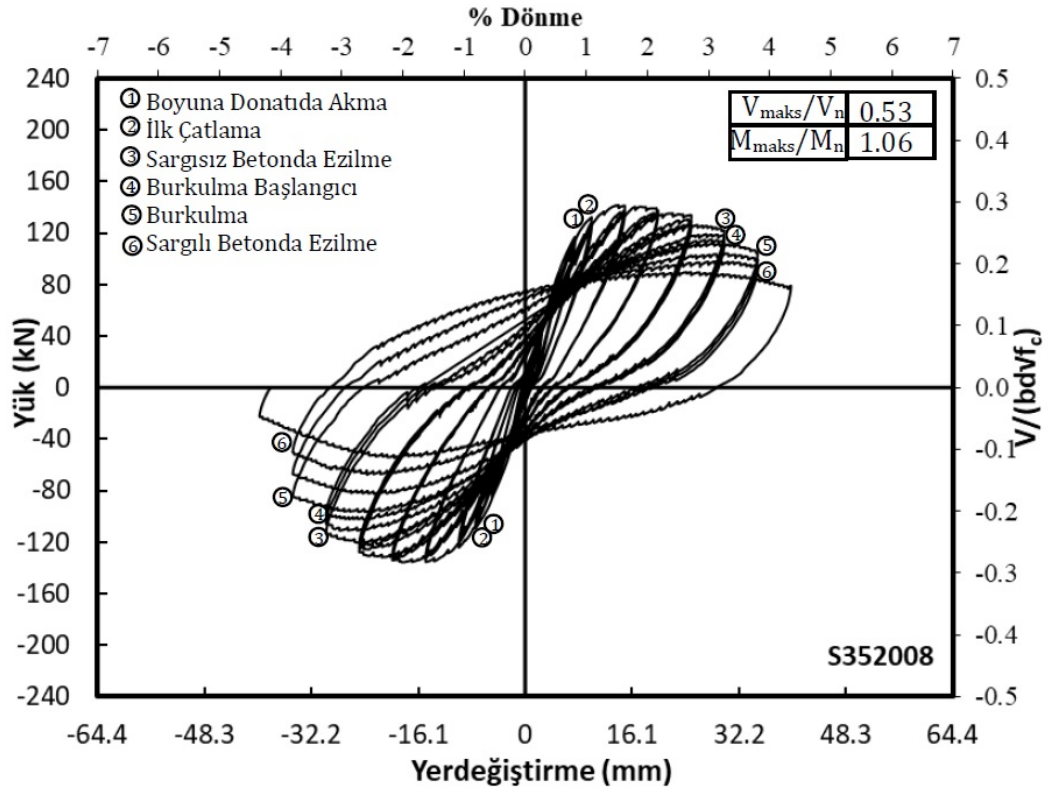




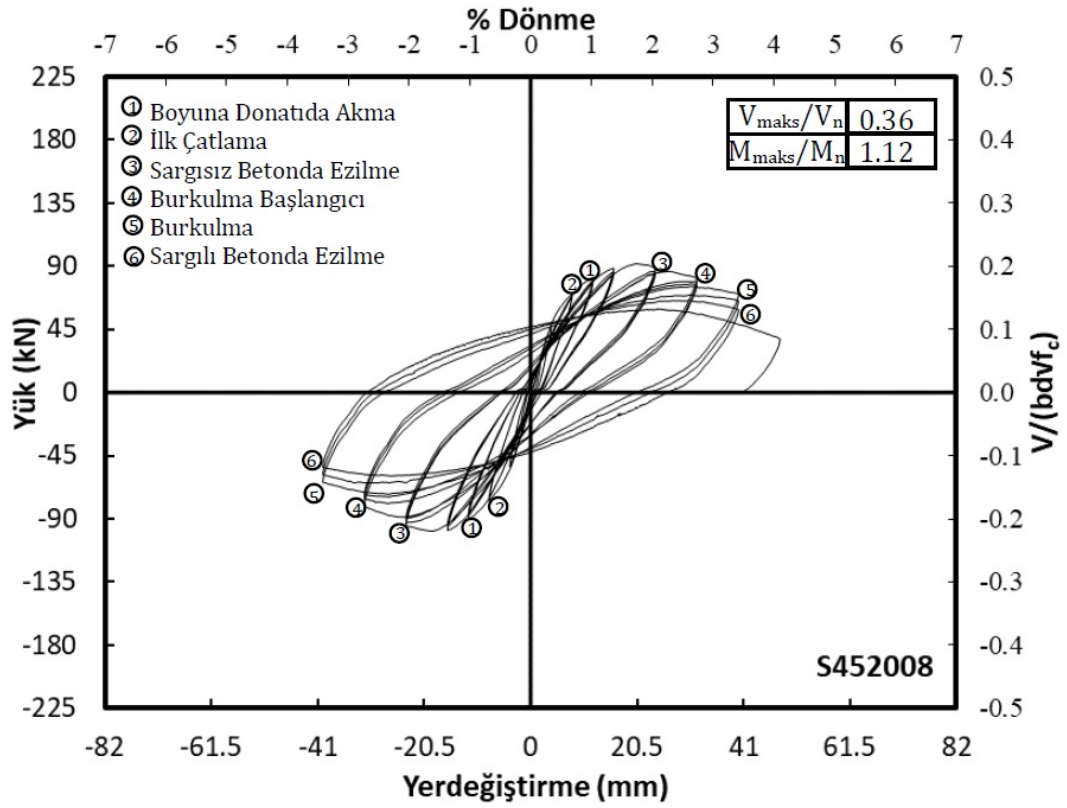
Şekil 3.35 S451008 için yük-yerdeğiştirme ilişkisi



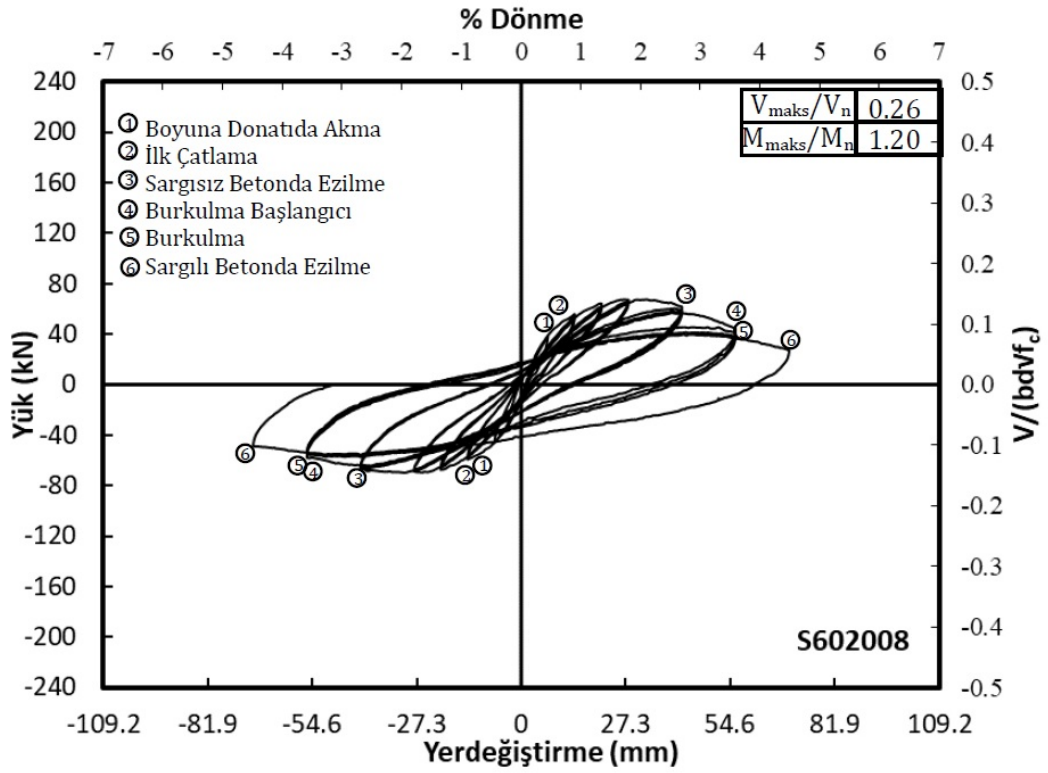
Şekil 3.36 S601008 için yük-yerdeğiştirme ilişkisi



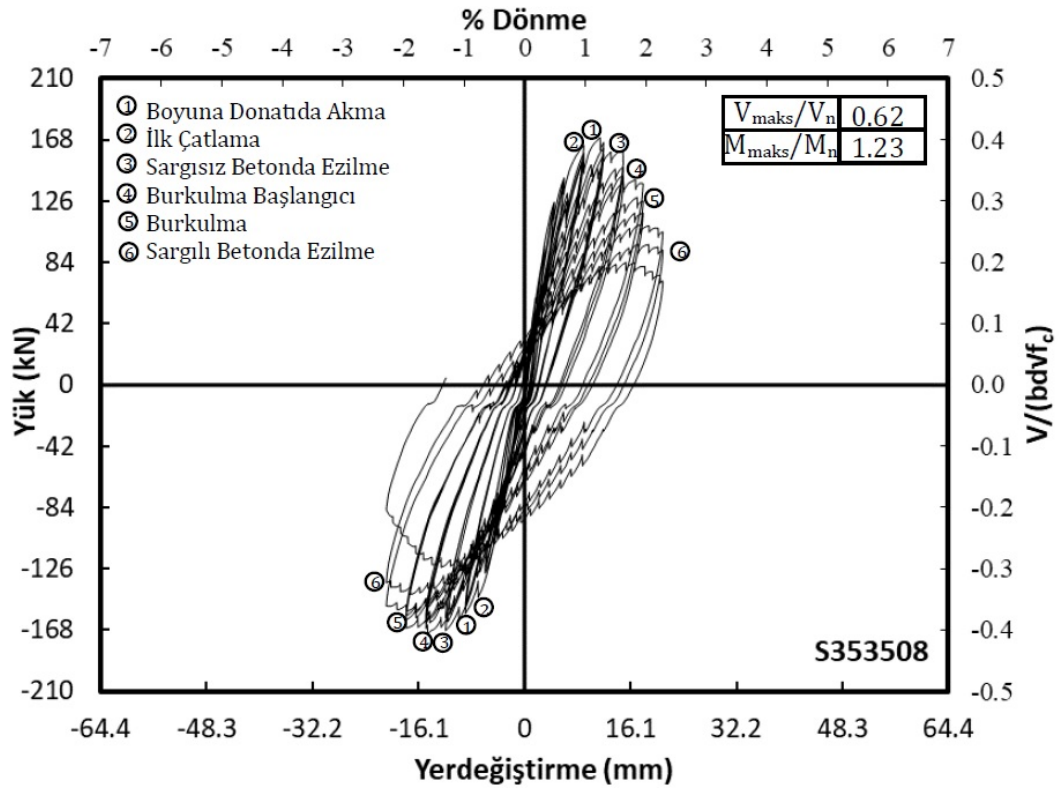
Şekil 3.37 S352008 için yük-yerdeğiştirme ilişkisi



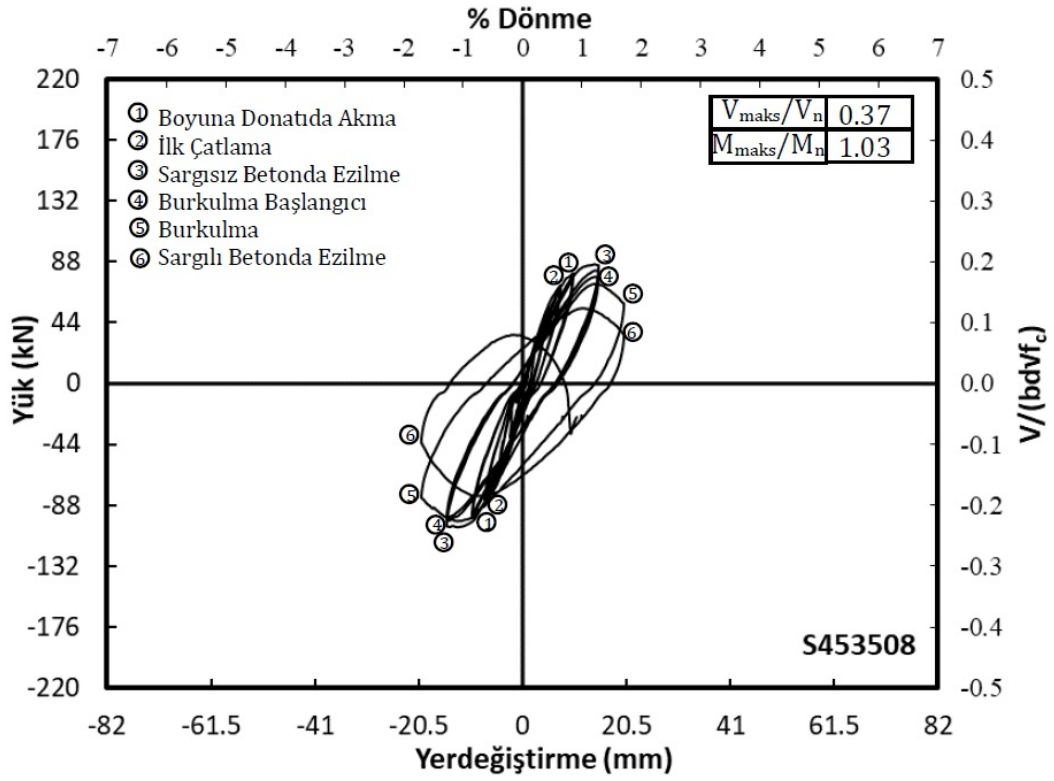
Şekil 3.38 S452008 için yük-yerdeğiştirme ilişkisi



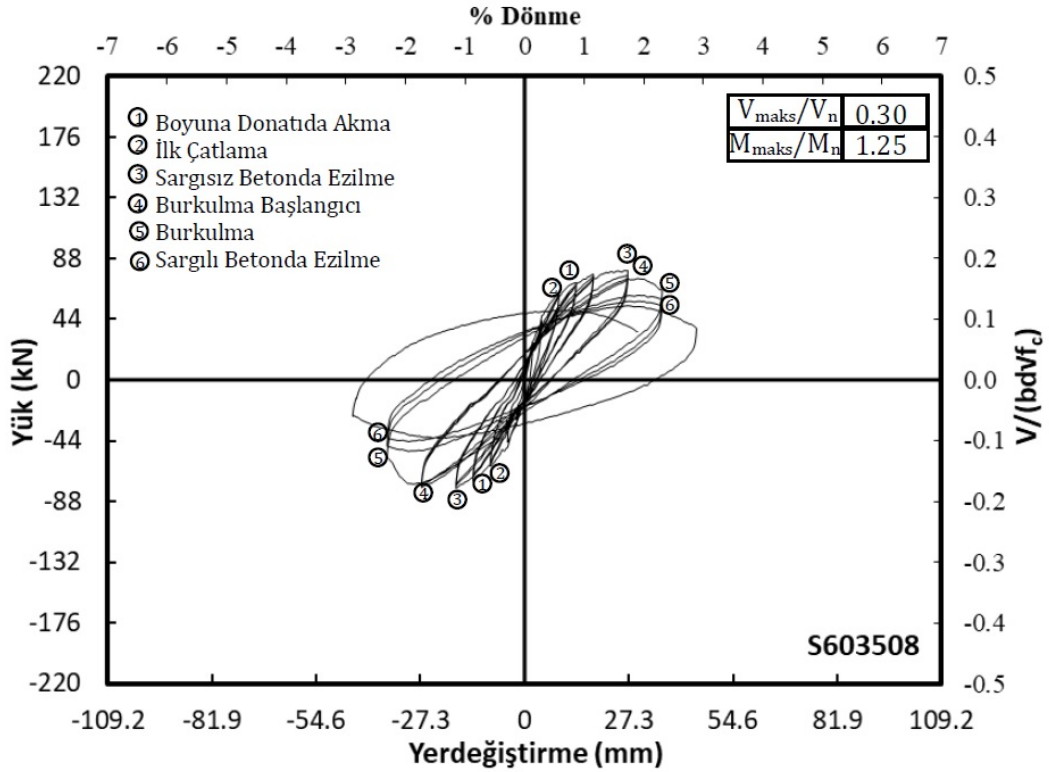
Şekil 3.39 S602008 için yük-yerdeğiştirme ilişkisi



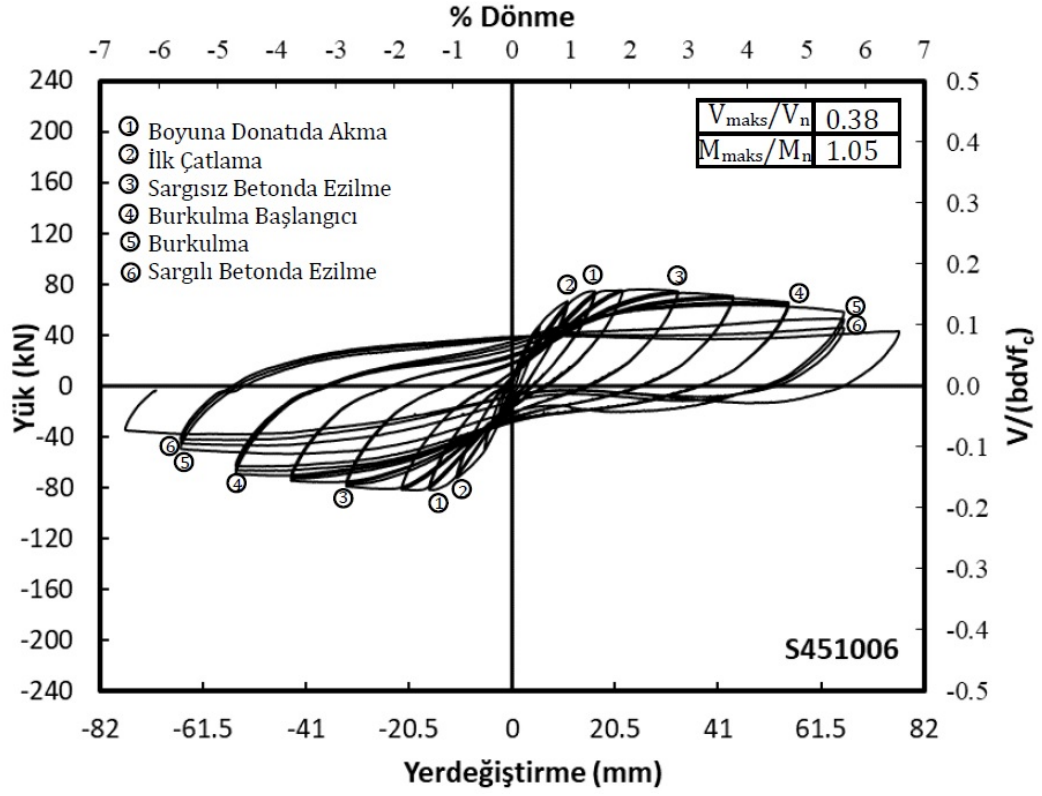
Şekil 3.40 S353508 için yük-yerdeğiştirme ilişkisi



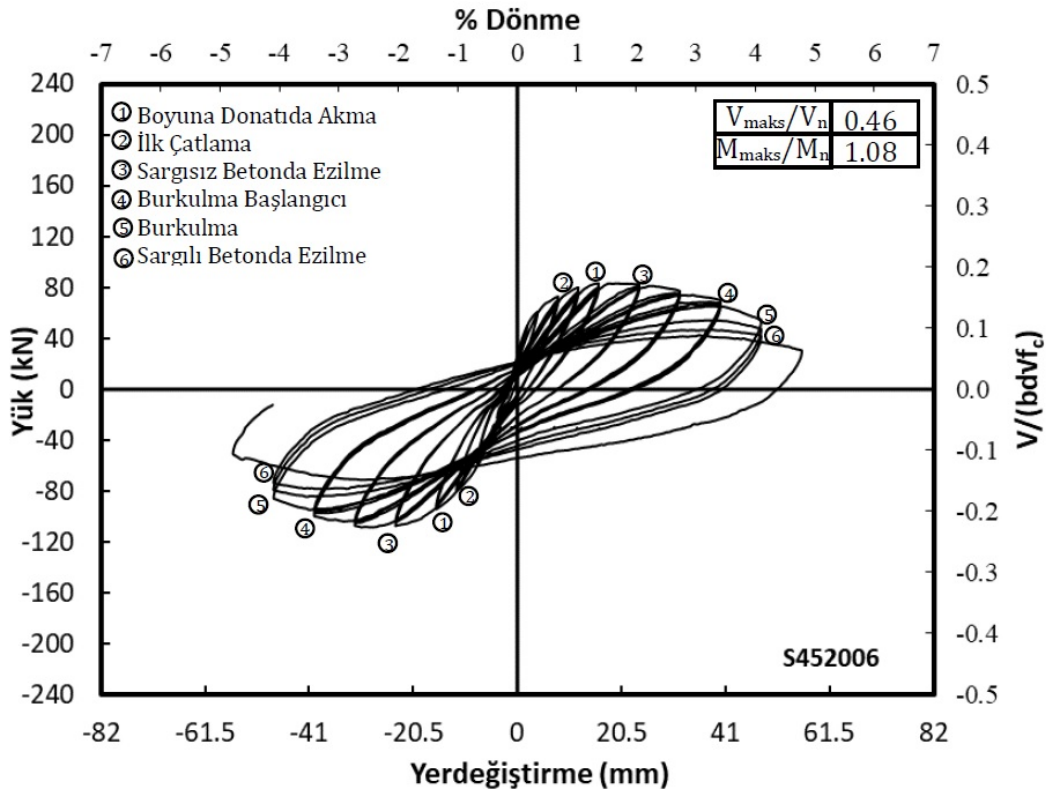
Şekil 3.41 S453508 için yük-yerdeğiştirme ilişkisi



Şekil 3.42 S603508 için yük-yerdeğiştirme ilişkisi



Şekil 3.43 S451006 için yük-yerdeğiştirme ilişkisi



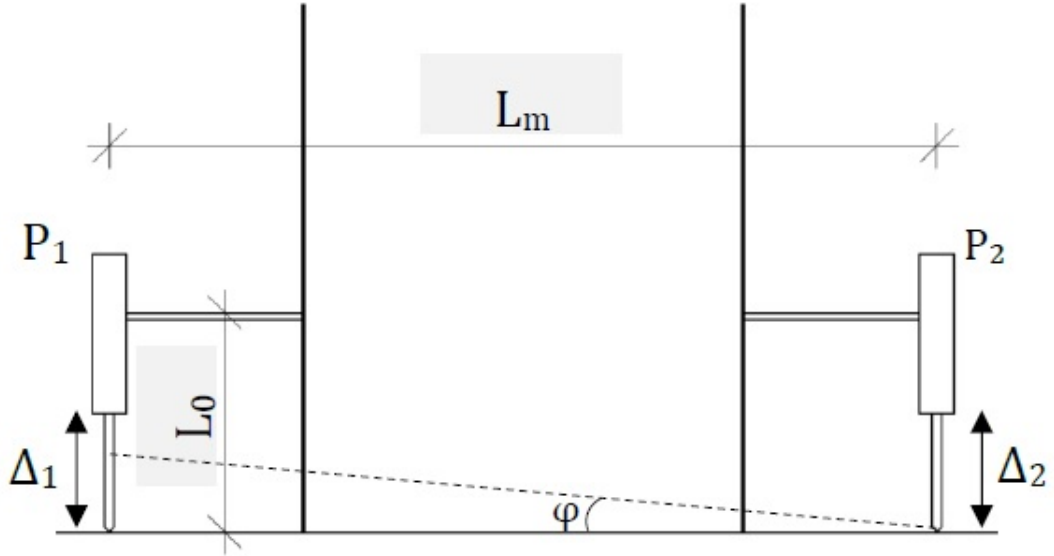
Şekil 3.44 S452006 için yük-yerdeğiştirme ilişkisi

Yük-yerdeğiştirme ilişkileri irdelendiğinde elde edilen sonuçlar maddeler halinde aşağıda kısaca özetlenmiştir.

- Eksenel yük seviyesi arttıa yerdeğiştirme kapasitesi azalıırken, maksimum taban kesme kuvvet talebi artmıştır.
- Kesme açıklığının etkili derinliğe oranı (a/d) arttıa yerdeğiştirme kapasitesi artarken, taban kesme kuvvet talebi azalmaktadır.
- Eksenel yük seviyesi düşük elemanlarda hasar durumları geniş yerdeğiştirme aralığına yayılmaktadır. Eksenel yük seviyesi yüksek elemanlarda ise hasar oluşumu daha erken gözlenmiş ve hasarın ilk evreleri (atlama, akma gibi) beklenen yerdeğiştirme değerlerinin üzerinde olmuştur.
- Eksenel yük seviyesi düşük elemanlarda ($N/A_c f_c=0.1-0.2$) “ekme-eğilme” kırılması gerçekleşirken, eksenel yük seviyesi yüksek bir elemanda (S453508) ise “basınç-eğilme” kırılması grlmştir.
- Enine donatı oranı düşük elemanlarda yerdeğiştirme kapasitesindeki düşüş sınırlı iken, hasarın ilerlemesi daha hızlı gerçekleşmiştir. Ayrıca enine donatı oranı düşük olan elemanlarda, hasar sonrası taşıma gücünde daha hızlı bir azalma olmaktadır.

3.3 Moment-Eğrilik İlişkileri

Kolonlarda LVDT'ler kullanılarak deneysel moment-eğrilik diyagramları çizilmiştir (Şekil 3.46-56). Şekil 3.45'de LVDT'den elde edilen verilerle eğriliğin hesabı özetlenmiştir.



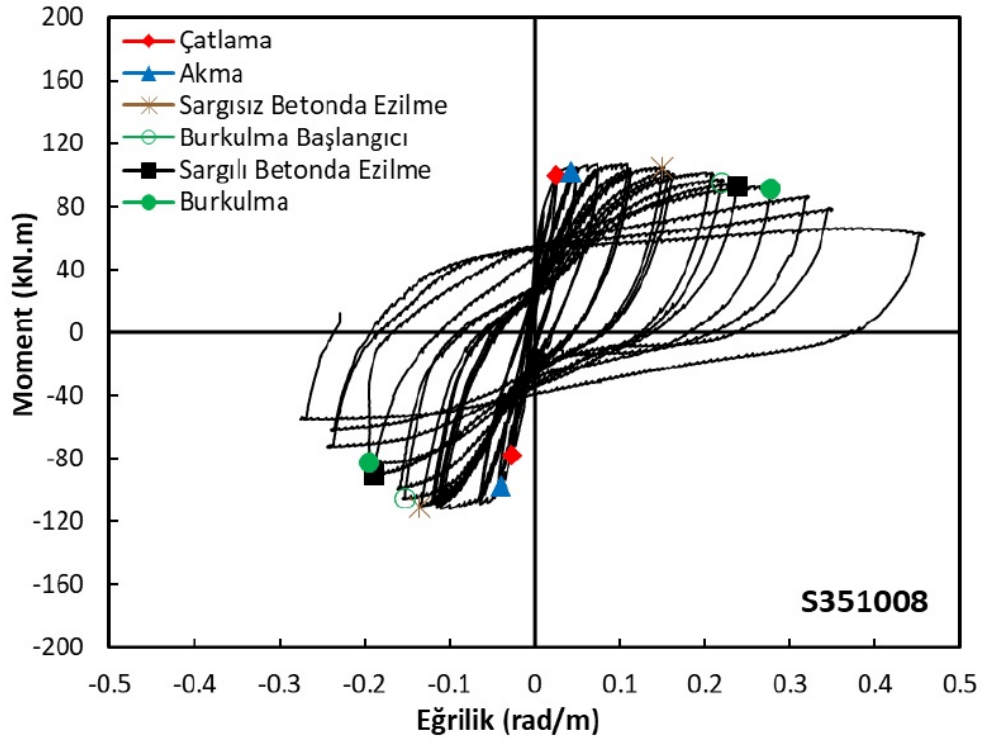
Şekil 3.45 Deneysel eğriliğin hesabı

Burada; $P_1 - P_2$ en alt kottaki LVDT'yi, $\Delta_1 - \Delta_2$ LVDT okumalarını, L_m iki LVDT arası mesafeyi ve L_0 LVDT'nin temel yüzüne olan mesafesini ifade etmektedir.

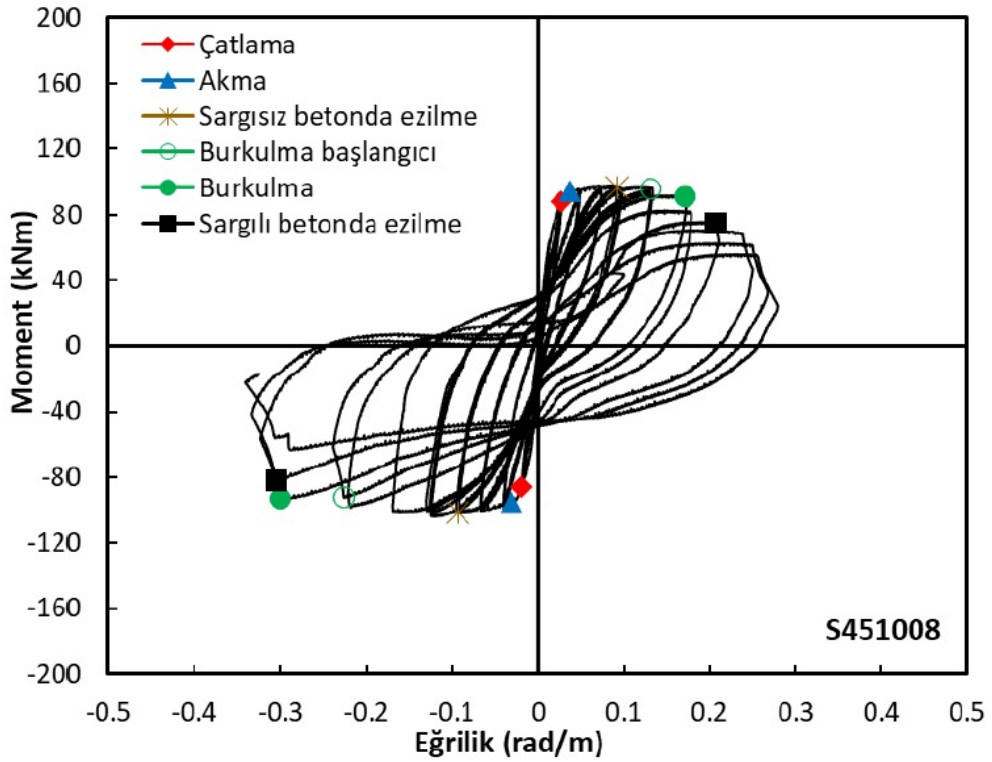
$$\theta = \frac{\Delta_1 - \Delta_2}{L} \quad (3.1)$$

$$\phi = \frac{\theta}{L_0} \quad (3.2)$$

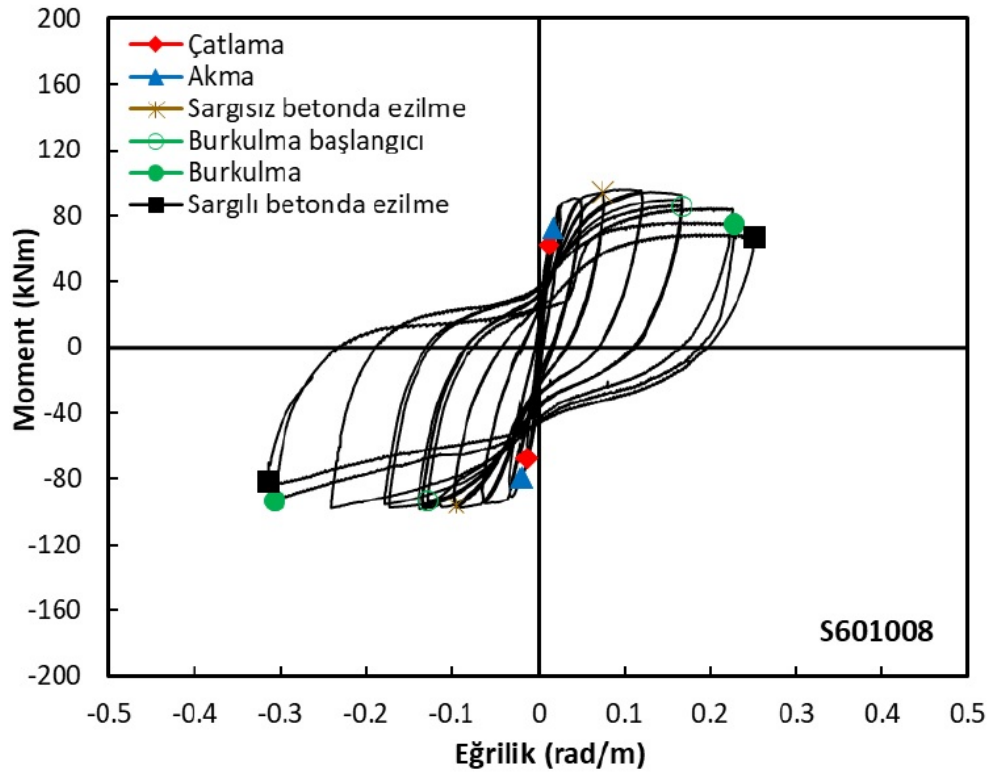
Deney sırasında LVDT cihazlarından elde edilen verilerle dönme ve eğrilik değerleri 3.1 ve 3.2 denklemleri yardımıyla hesaplanmaktadır.



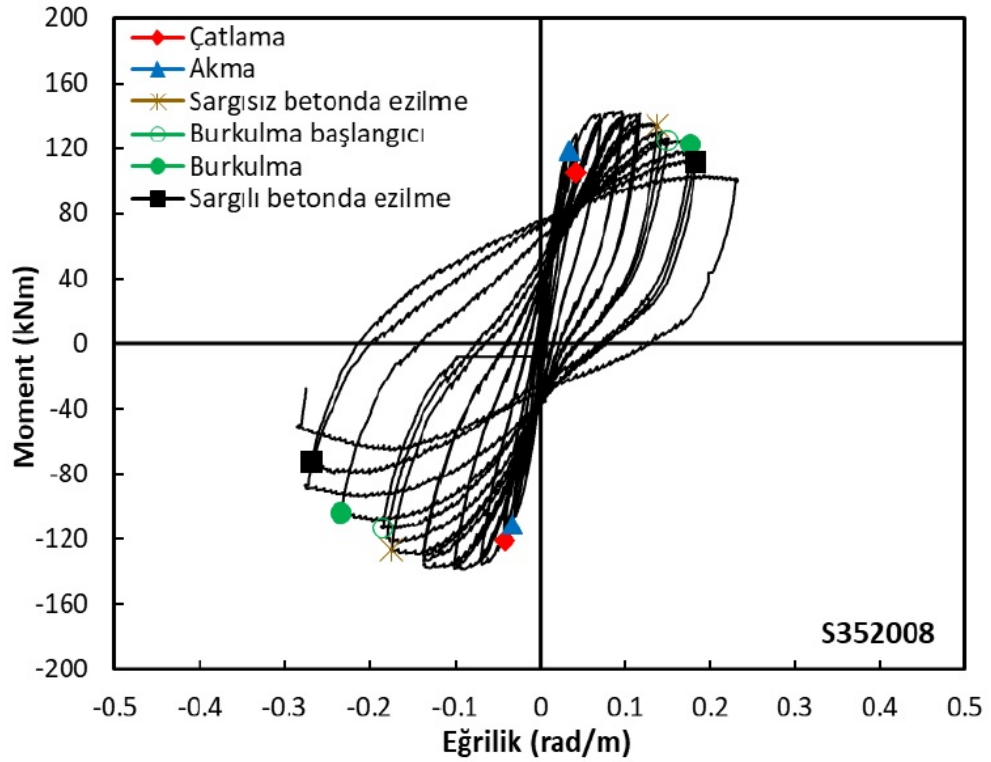
Şekil 3.46 S351008 için deneysel maksimum moment-eğrilik ilişkisi



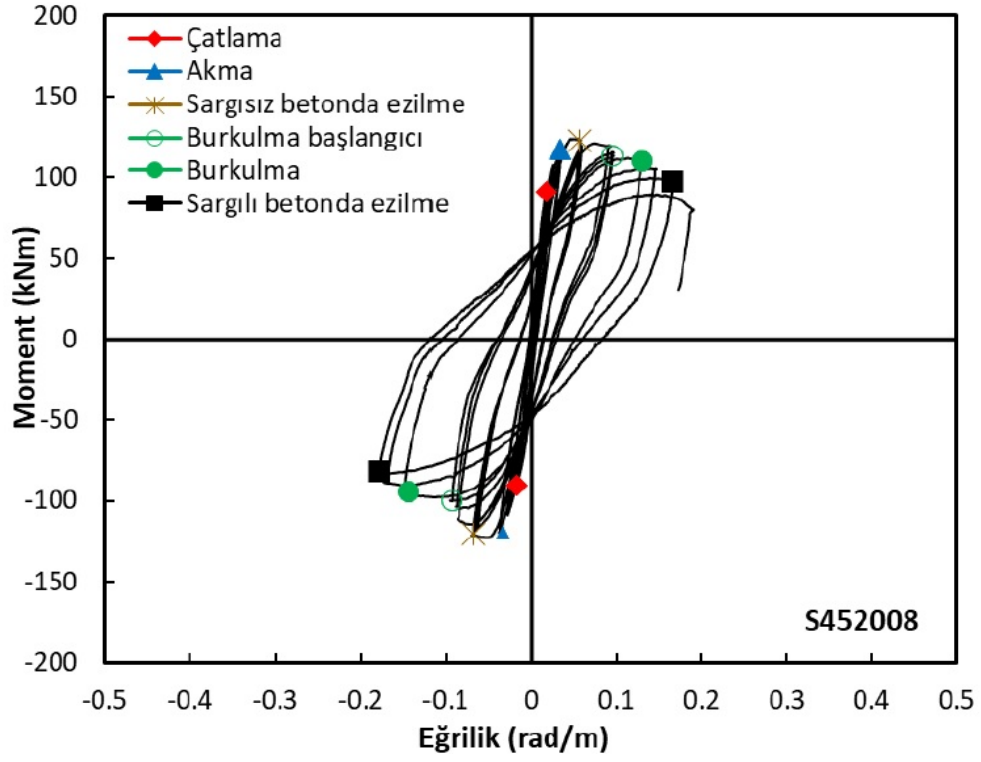
Şekil 3.47 S451008 için deneysel maksimum moment-eğrilik ilişkisi



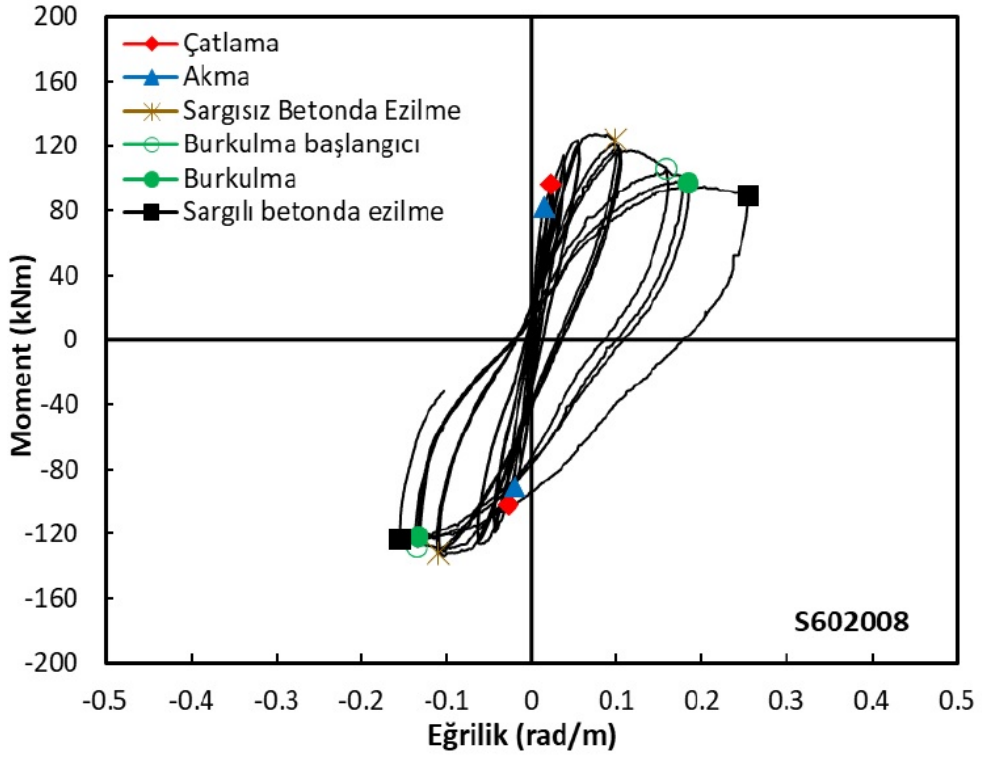
Şekil 3.48 S601008 için deneysel maksimum moment-eğrilik ilişkisi



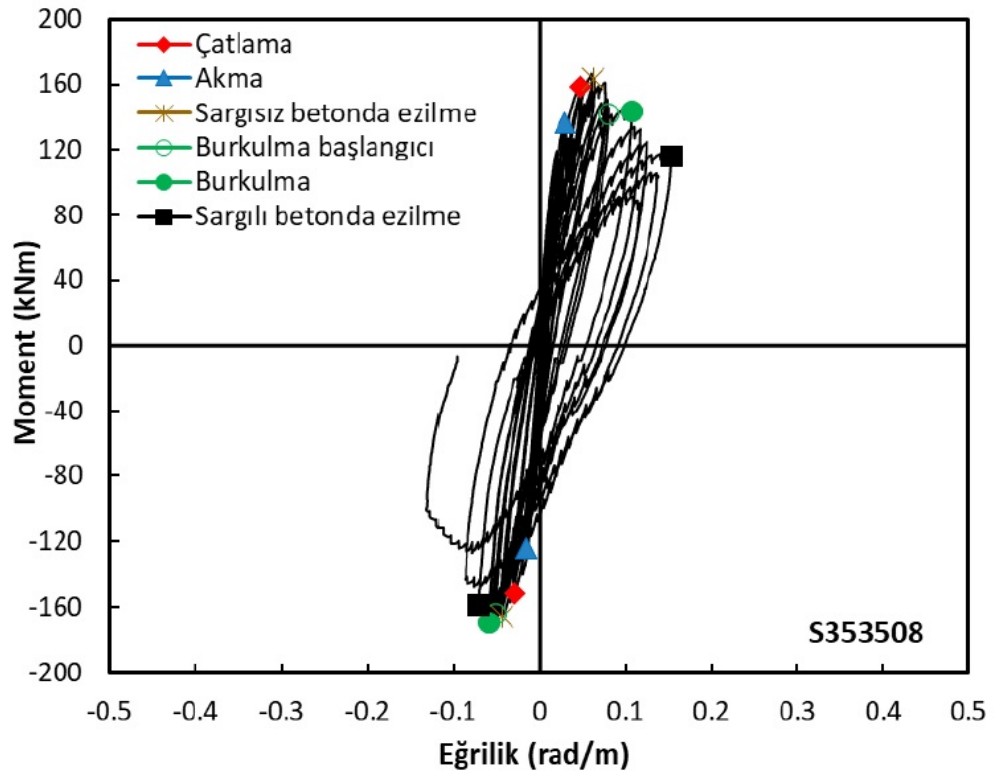
Şekil 3.49 S352008 için deneysel maksimum moment-eğrilik ilişkisi



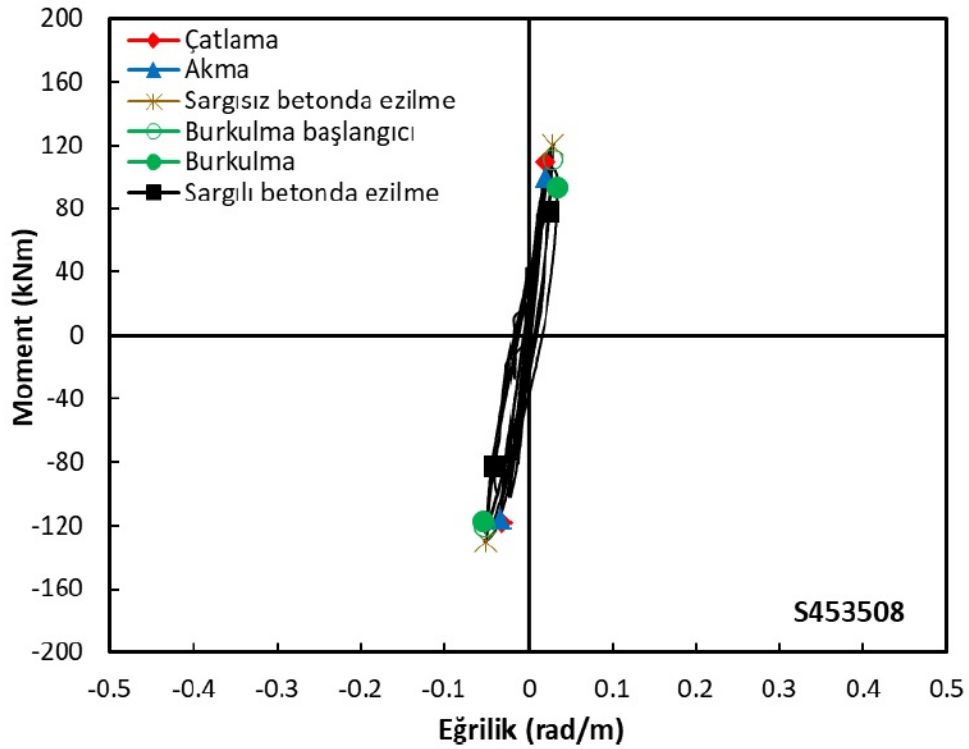
Şekil 3.50 S452008 için deneysel maksimum moment-eğrilik ilişkisi



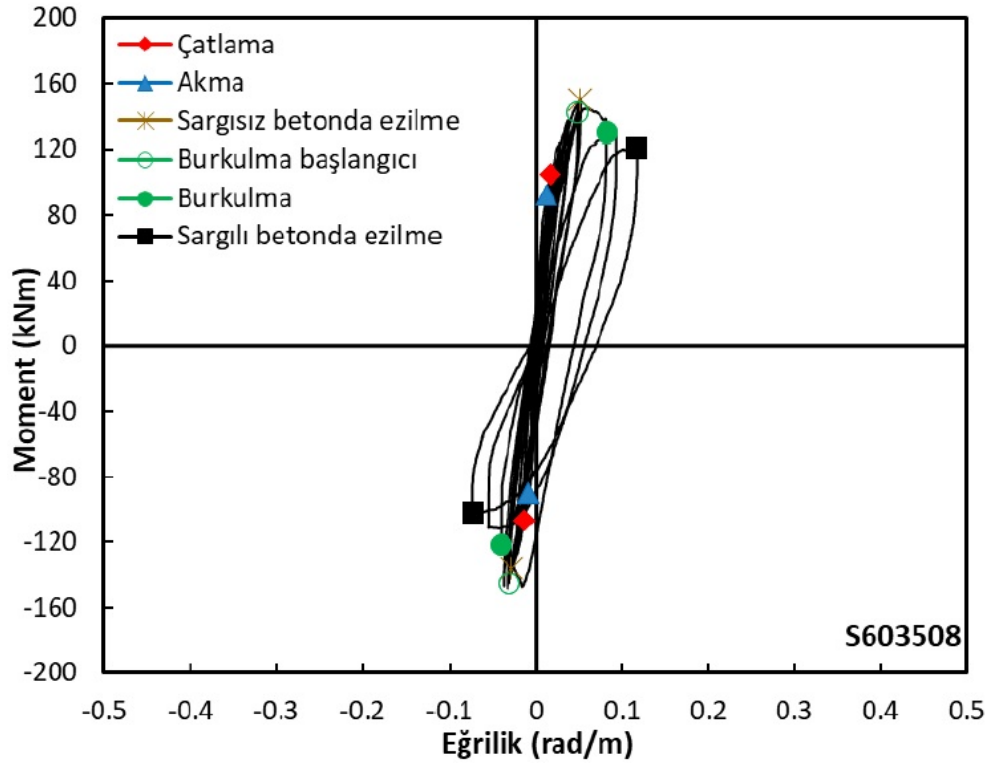
Şekil 3.51 S602008 için deneysel maksimum moment-eğrilik ilişkisi



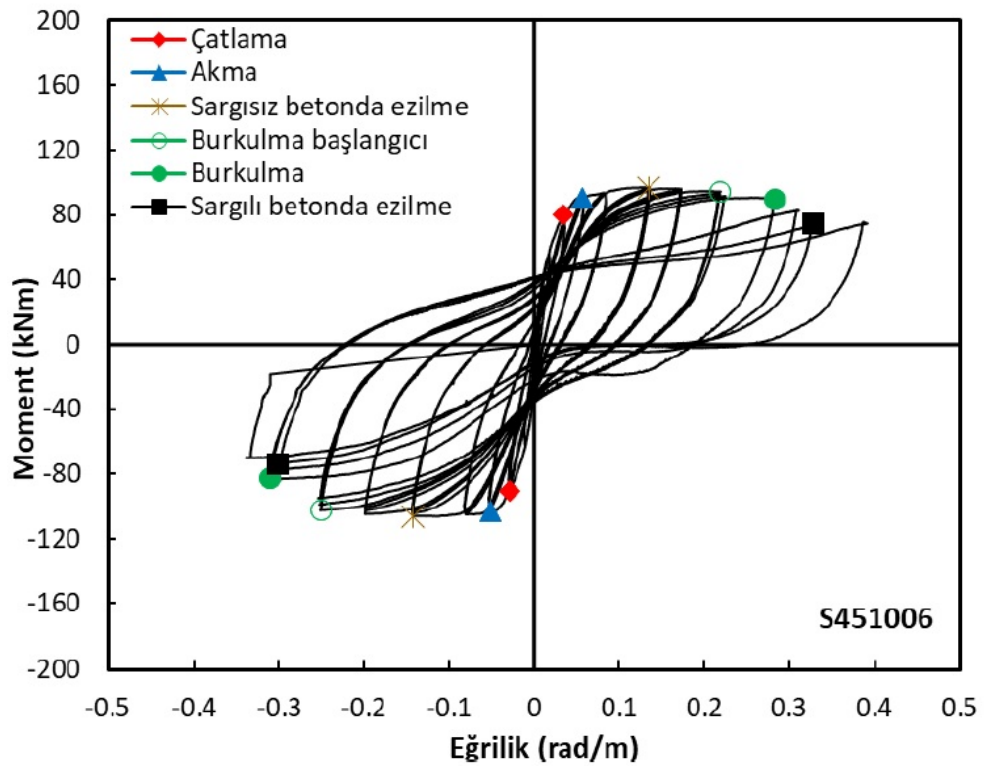
Şekil 3.52 S353508 için deneysel maksimum moment-eğrilik ilişkisi



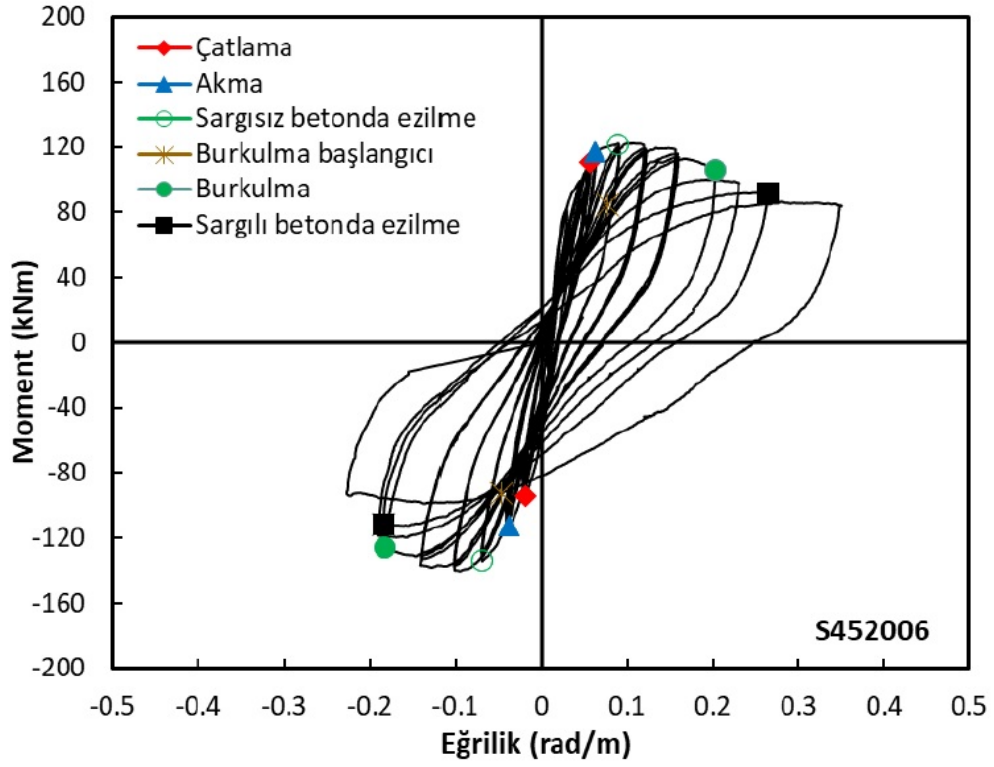
Şekil 3.53 S453508 için deneysel maksimum moment-eğrilik ilişkisi



Şekil 3.54 S603508 için deneysel maksimum moment-eğrilik ilişkisi



Şekil 3.55 S451006 için deneysel maksimum moment-eğrilik ilişkisi



Şekil 3.56 S452006 için deneysel maksimum moment-eğrilik ilişkisi

Deneysel moment-eğrilik ilişkileri incelendiğinde elde edilen sonuçlar maddeler halinde aşağıda özetlenmiştir.

- Eksenel yük seviyesi düşük elemanlarda, a/d oranındaki değişkenliğin etkisi düşük olurken, eksenel yük seviyesi yükseldiğinde a/d oranının etkisi daha belirgin ortaya çıkmaktadır.
- Eksenel yük seviyesi yüksek elemanlarda hasar durumları kısıtlı bir eğrilik aralığında meydana gelirken, eksenel yük seviyesi düşük elemanlarda hasar durumları daha geniş bir eğrilik dilimine yayılmaktadır.

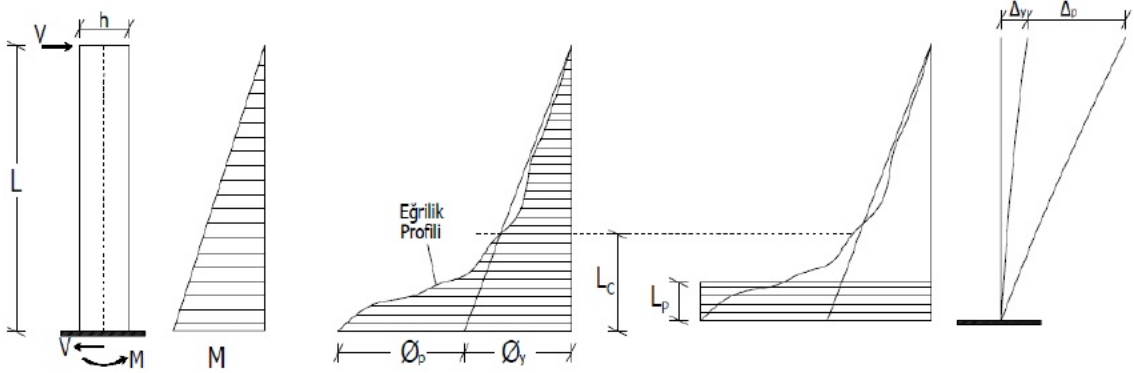
Kolonlarda elastik olmayan şekildeğişirmelerin olduğu bölge plastik mafsalsal olarak bilinmektedir. Bu bölge boyunca sismik enerjinin sönümlenmesi için yeterince sünek olması kolonların güvenliği açısından önemlidir.

4.1 Plastik Mafsalsal Boyu Modelleri

Betonarmeyi oluşturan malzemelerin belirsizliği ve bu malzemeler arasındaki ilişkinin değişken olması sebebiyle birçok araştırmacı tarafından plastik mafsalsal bölgesini tanımlama amacıyla deneysel çalışmalar yapılmıştır. Paulay ve Priestley (1992), Bae ve Bayrak (2008), ve Berry ve Eberhard (2005) tarafından plastik mafsalsal bölgesinin boyunu tanımlayan bağıntılar geliştirilmiştir [48], [49], [31]. Plastik mafsallar kolonların maksimum hasar bölgesi olarak bilinir. Eğer L_p plastik mafsalsal boyu bilinirse kolona ait uç noktasının yerdeğiştirmesi, eğriliklerin toplanması ile hesaplanabilir. Bu yüzden L_p plastik mafsalsal boyu doğru bir şekilde hesaplanırsa kolon davranışının eleman düzeyinde tespiti daha doğru bir yaklaşımla belirlenebilecektir. Plastik mafsalsal boyu birçok parametreye bağlıdır. Plastik mafsalsal boyunu etkileyen parametreler; aksenal yük seviyesi, taban kesme kuvveti, boyuna ve enine donatı özellikleri, beton dayanımı ve donatı oranı olarak sıralanabilir.

4.1.1 Priestley ve Paulay (1992) Modeli

Priestley ve Paulay (1992) tarafından önerilen plastik mafsalsal model Şekil 4.1’de gösterilmektedir [48].



Şekil 4.1 Plastik mafsalsal tanımları [48]

Priestley ve Paulay’ın önerisine göre kolonlarda plastik mafsalsal boyu 4.1 denklemi ile hesaplanabilmektedir.

$$L_p = 0.08L + 0.022d_b f_y \quad (4.1)$$

Burada, d_b boyuna donatı çapını, L kolon boyunu ve f_y boyuna donatıya ait akma dayanımını ifade etmektedir.

4.1.2 ACI318 ve TBDY (2018)’e göre Plastik Mafsalsal Boyu

ACI318’e göre plastik mafsalsal boyu 4.2 denklemi ile hesaplanmaktadır [50].

$$L_p = 0.5h \quad (4.2)$$

Benzer şekilde Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY)’de plastik mafsalsal boyunu ACI318 gibi hesaplamaktadır [44].

4.1.3 Bae ve Bayrak (2008) Plastik Mafsalsal Modeli

Bae ve Bayrak (2008) tarafından yapılan çalışmada, eksenel yükü de dikkate alan plastik mafsalsal boyunu veren 4.3 denklemi önerilmiştir [31].

$$\frac{L_p}{h} = \left[0.3 \frac{P}{P_0} + 3 \frac{A_s}{A_g} - 0.1 \right] \frac{L}{h} + 0.25 > 0.25 \quad (4.3)$$

Burada; h kolon yüksekliği, P aksenal yükü, P_o nominal aksenal yük kapasitesini, A_s boyuna donatıya ait kesit alanını ve A_g ise kesit alanını ifade etmektedir.

4.1.4 EUROCODE-8'e göre Plastik Mafsal Modeli

EUROCODE-8'e göre plastik mafsal boyu 4.4 denklemi ile hesaplanmaktadır [46].

$$L_p = \frac{L}{30} + 0.2h + 0.11 \frac{d_b f_y}{\sqrt{f_c}} \quad (4.4)$$

Burada; L kolon boyunu, h kolon yüksekliğini, d_b boyuna donatı çapını, f_y boyuna donatıya ait akma dayanımını ve f_c beton dayanımını ifade etmektedir.

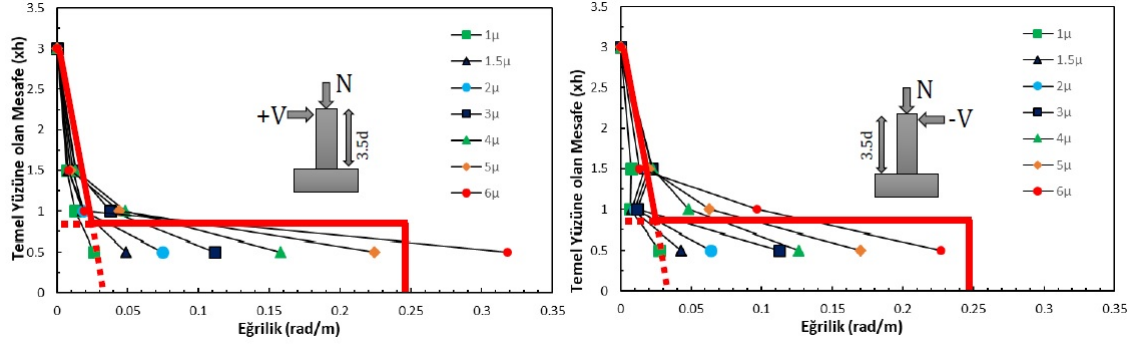
4.2 Deneysel Plastik Mafsal Boyu

Eğilme kırılmasına maruz kolonlarda, akma eğrililği değerinden sonra plastik şekildeğiştirmeler meydana gelmektedir. Akma eğriliği değeri aşıldıktan kesitte momentin değeri değişmeden plastik eğriliklerde artmalar meydana gelmektedir. Bu durum için kesitte moment kapasitesi değerine ulaşıldığında kesit dönerek plastik mafsal oluşumuna sebep olmaktadır. Bu amaçla plastik mafsal bölgesinin boyunu tespit etmek için çeşitli seviyelere ait birim şekildeğiştirmeler ile eğrilik değerleri hesaplanmıştır. Deneysel olarak her çevrim için plastik mafsal boyu 4.5 ile denklemi ile hesaplanmıştır.

$$L_p = \frac{\theta_p}{\phi_p} \quad (4.5)$$

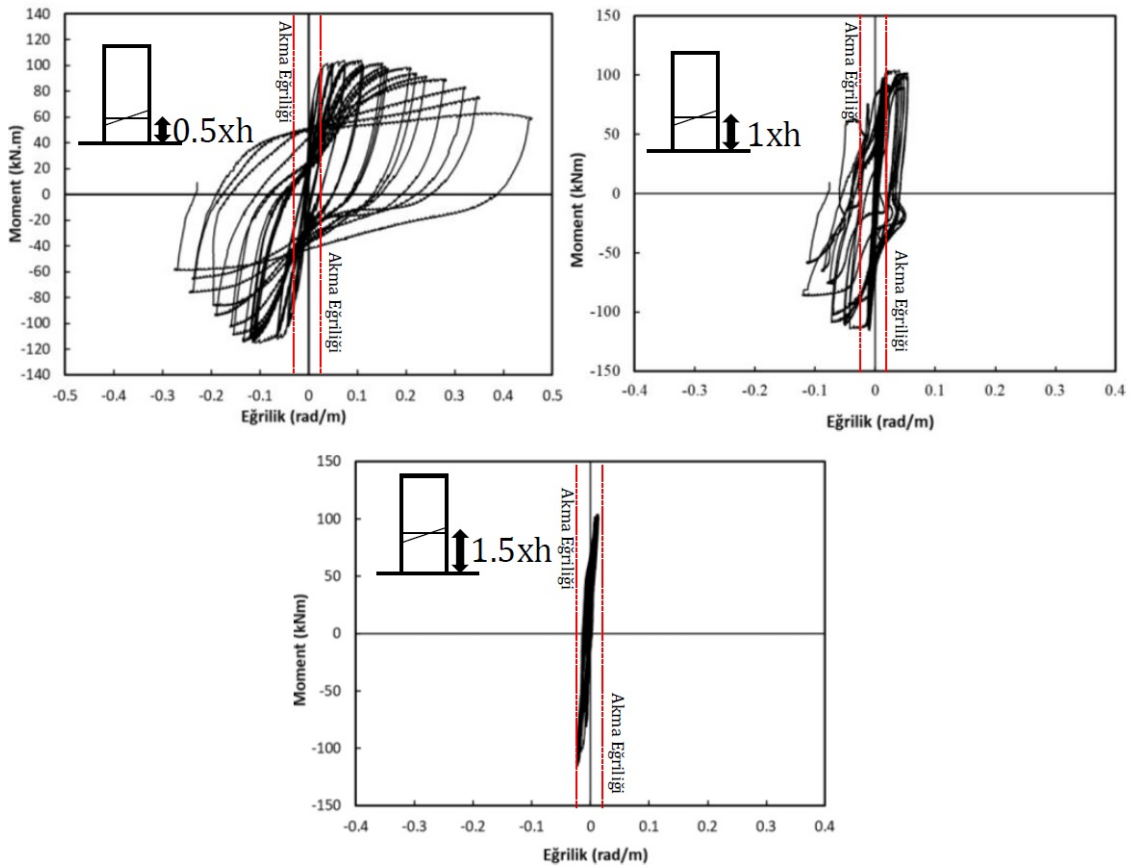
S351008

Deney elemanlarının sismik analizi sırasında kullanılan LVDT cihazlarından alınan değerler ile kolon boyunca üç ayrı seviyede (0.5h-1h-1.5h) eğrilik değerleri hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 4.2’de grafik üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 4.2 S351008 için kolon boyunca eğrilik diyagramı

Benzer şekilde LVDT’lerden elde edilen eğrilik ile moment diyagramları üç seviye için Şekil 4.3’de gösterilmektedir.

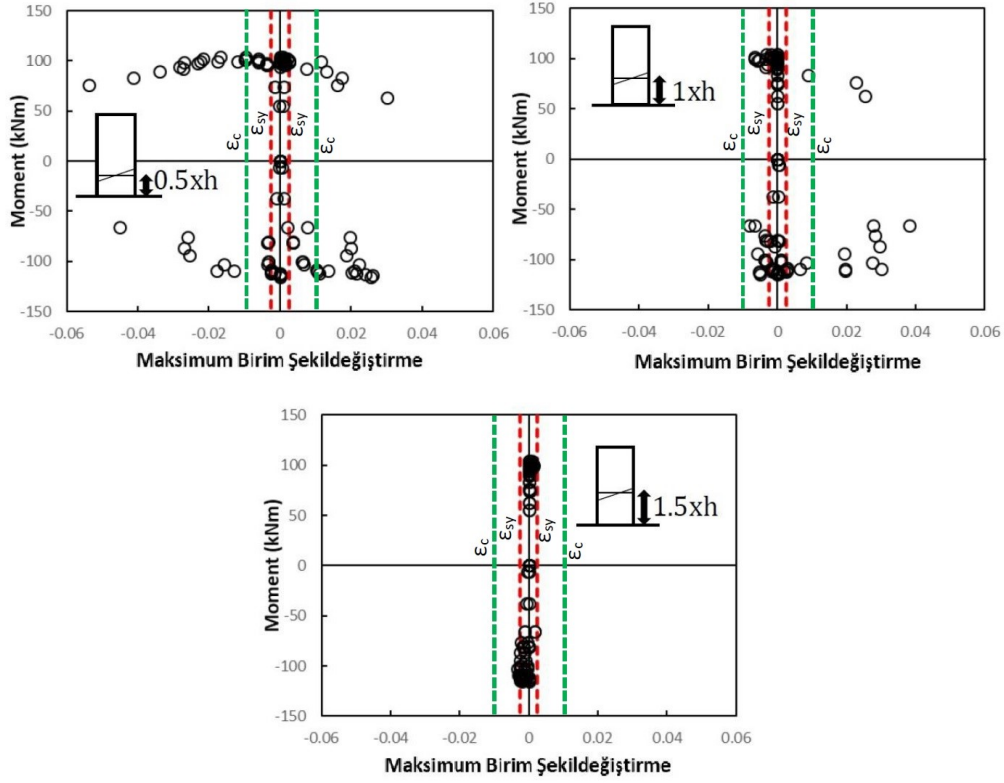


Şekil 4.3 S351008 için üç farklı seviyede moment-eğrilik diyagramı

Şekil 4.3’e göre kolon 0.5xh-1xh seviyesinde akma eğriliğini aşan değerlerin olduğu görülmektedir. Kolonun 1.5xh seviyesinde ise eğrilik akma eğriliğini aşmadığı

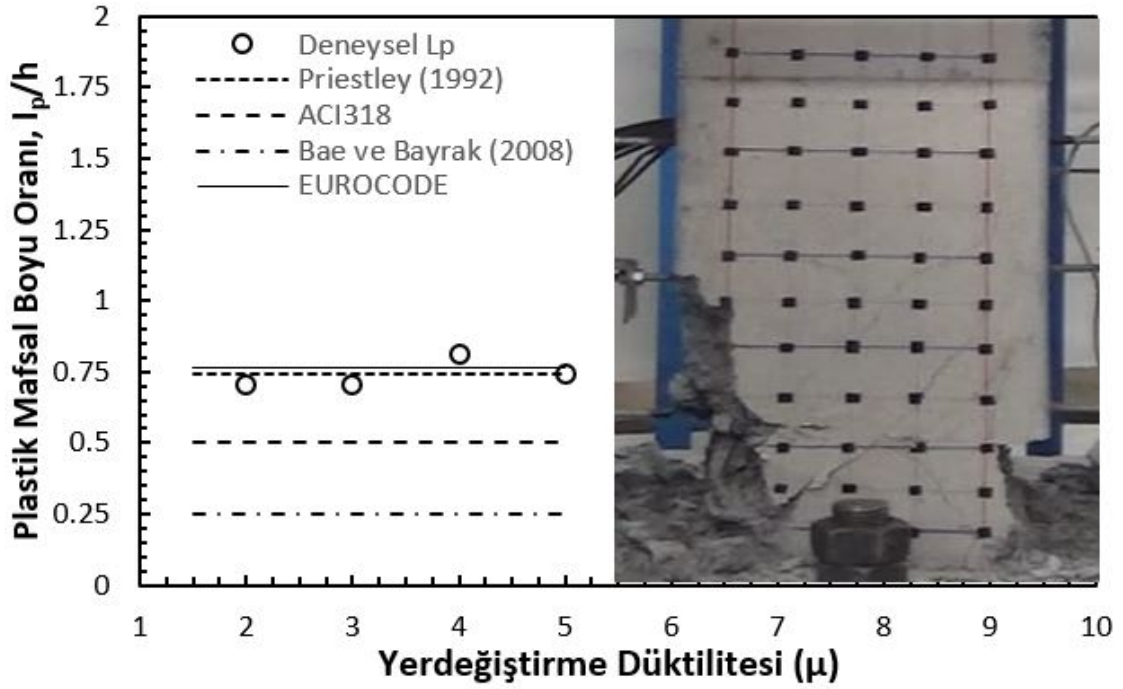
görülmektedir.

Benzer şekilde üç farklı seviyeye yerleştirilen LVDT okumalarından elde edilen maksimum birim şekil değiştirmelerin değerleri Şekil 4.4’de gösterilmektedir.



Şekil 4.4 S351008 için farklı seviyelere ait maksimum birim şekil değiştirme diyagramı

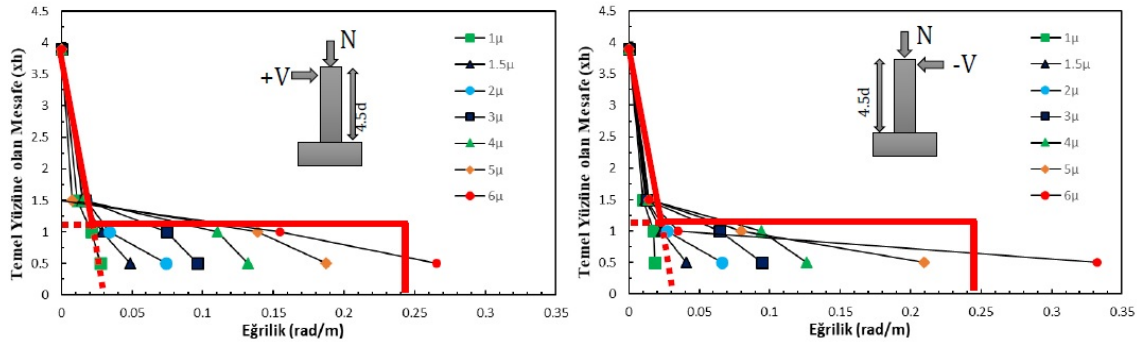
Şekil 4.4’e göre üç farklı seviye için elde edilen maksimum birim şekil değiştirme diyagramları incelendiğinde 0.5xh-1xh yüksekliğine kadar akma birim şekil değiştirme değerlerinin aşıldığı görülmektedir. Eğrilik diyagramlarına benzer şekilde 1.5xh yüksekliğinde maksimum birim şekil değiştirme değerlerinin akma birim şekil değiştirme değerinden az olduğu tespit edilmiştir. Deneysel sonuçlara göre hesaplanan plastik mafsallık boyu ile plastik mafsallık modellerine göre hesaplanan değerler Şekil 4.5’de gösterilmektedir.



Şekil 4.5 S351008 kolonu için plastik mafsal boyu

S451008

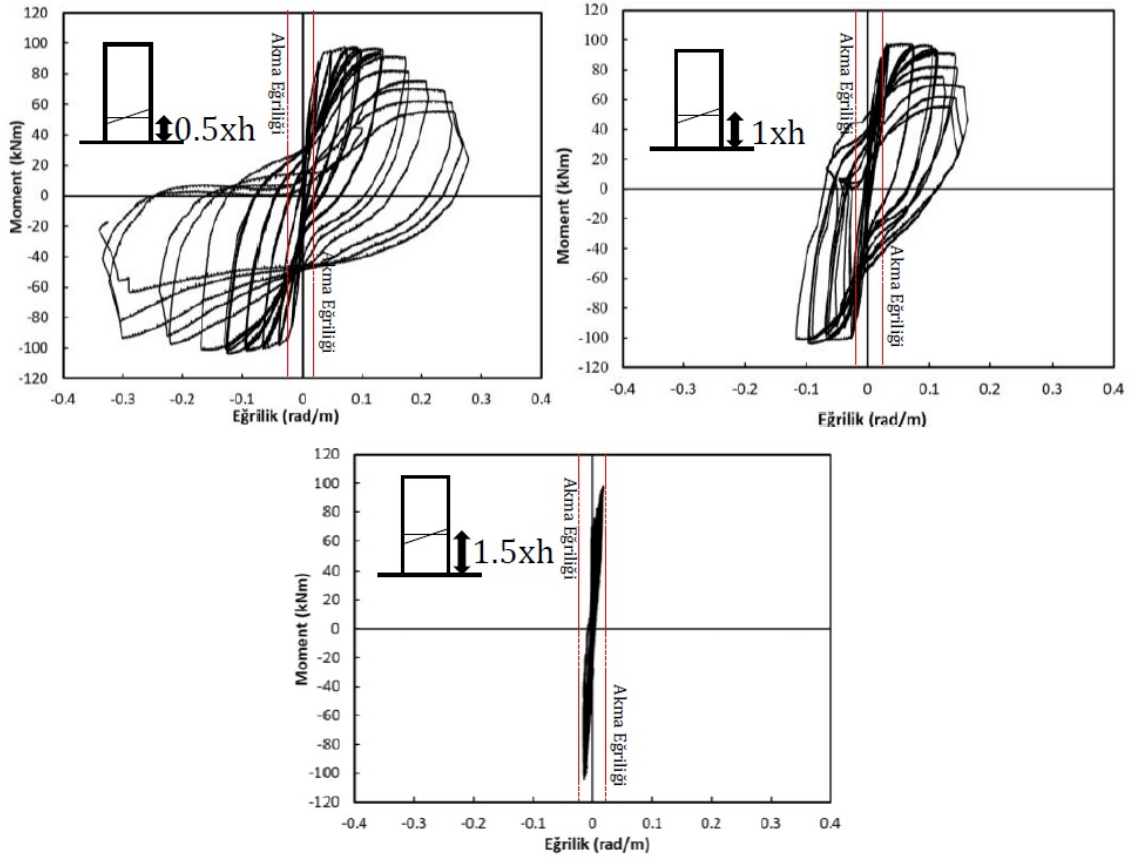
Deney elemanlarının sismik analizi sırasında kullanılan LVDT cihazlarından alınan değerler ile kolon boyunca üç ayrı seviyede (0.5h-1h-1.5h) eğrilik değerleri hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 4.6'da diyagram üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 4.6 S451008 için kolon boyunca eğrilik diyagramı

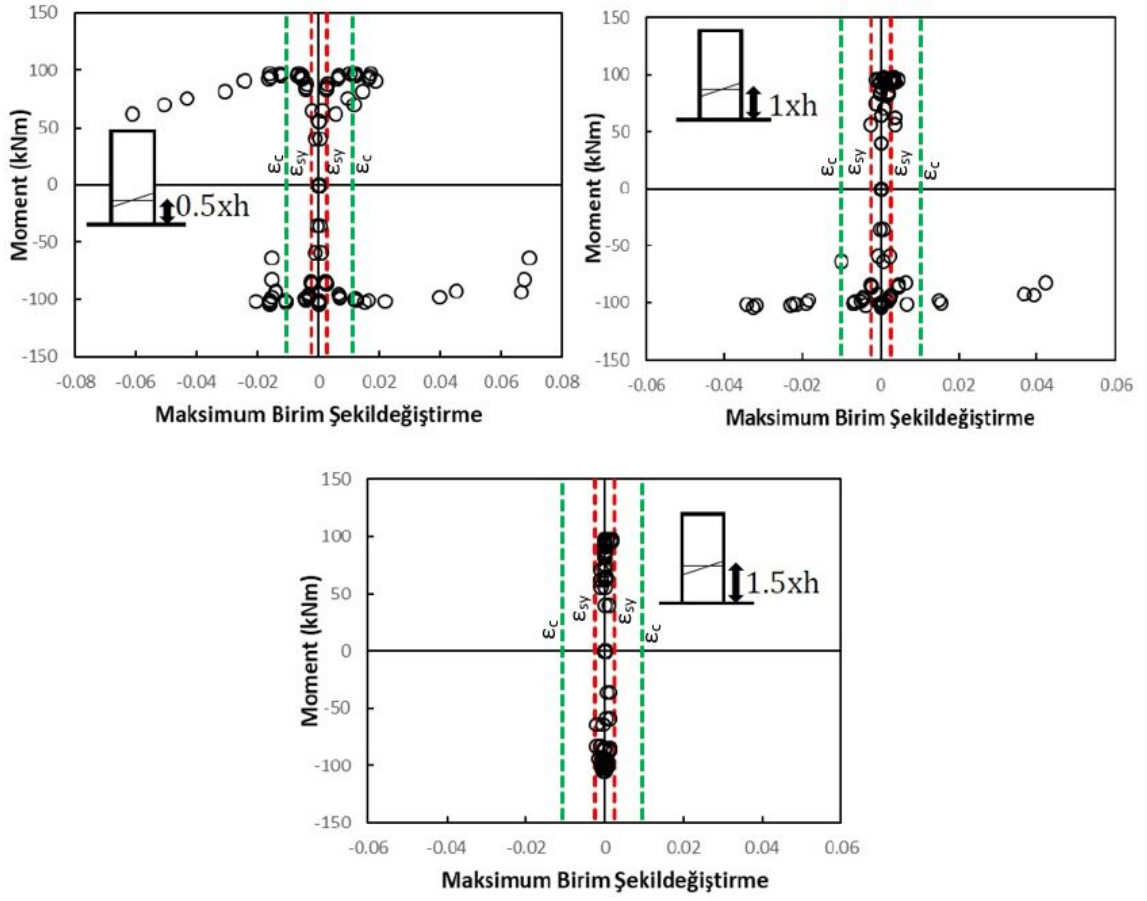
Benzer şekilde LVDT'lerden elde edilen eğrilik ile moment diyagramları üç seviye için Şekil 4.7'de gösterilmektedir.

Şekil 4.7'e göre kolon 0.5xh-1xh seviyesinde akma eğriliğini aşan değerlerin olduğu görülmektedir. Kolonun 1.5xh seviyesinde ise eğriliğin akma eğriliğini aşmadığı görülmektedir. Benzer şekilde üç farklı seviyeye yerleştirilen LVDT okumalarından elde edilen maksimum birim şekildeğiştirmelerin değerleri Şekil 4.8'de gösterilmektedir.

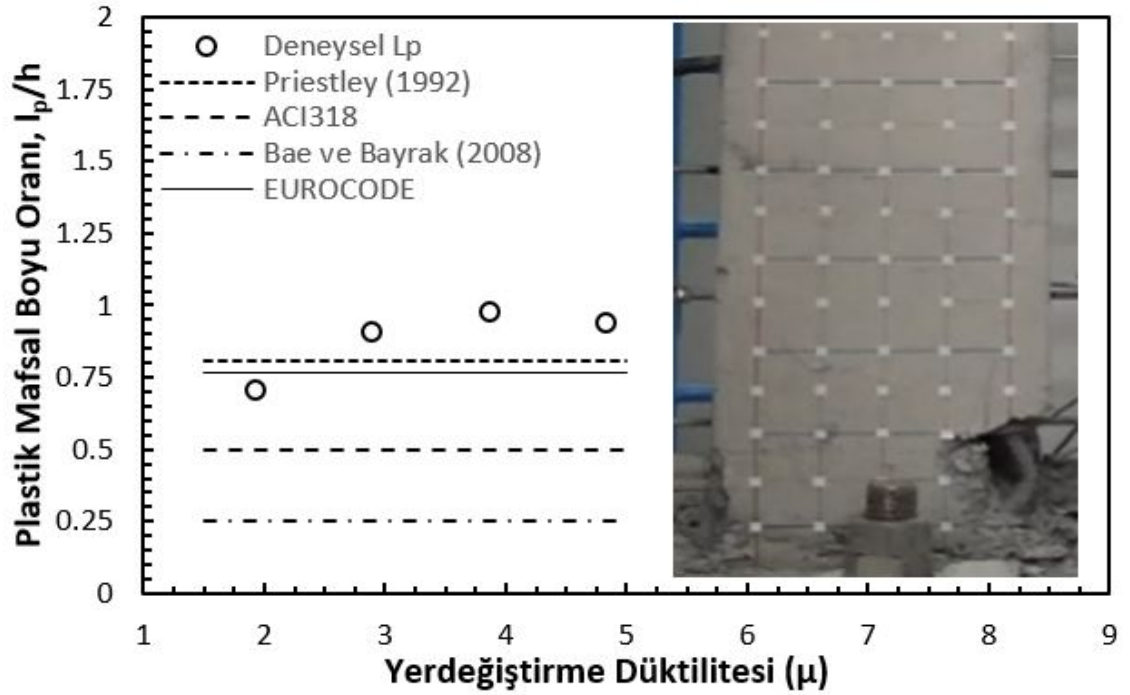


Şekil 4.7 S451008 için üç farklı seviyede moment-eğrilik diyagramı

Şekil 4.8'e göre üç farklı seviye için elde edilen maksimum birim şekildeğiştirme diyagramları incelendiğinde 0.5xh yüksekliğine kadar akma birim şekildeğiştirme değerlerinin aşıldığı görülmektedir. 1xh seviyesinde ise çekme durumunda akma sınır değerini aşarken, itme durumunda ise akma sınır değerleri aşılmamıştır. Eğrilik diyagramlarına benzer şekilde 1.5xh yüksekliğinde maksimum birim şekildeğiştirme değerlerinin akma birim şekildeğiştirme değerinden az olduğu tespit edilmiştir. Deneysel sonuçlara göre hesaplanan plastik mafsallık boyu ile plastik mafsallık modellerine göre hesaplanan değerler Şekil 4.9'da gösterilmektedir.



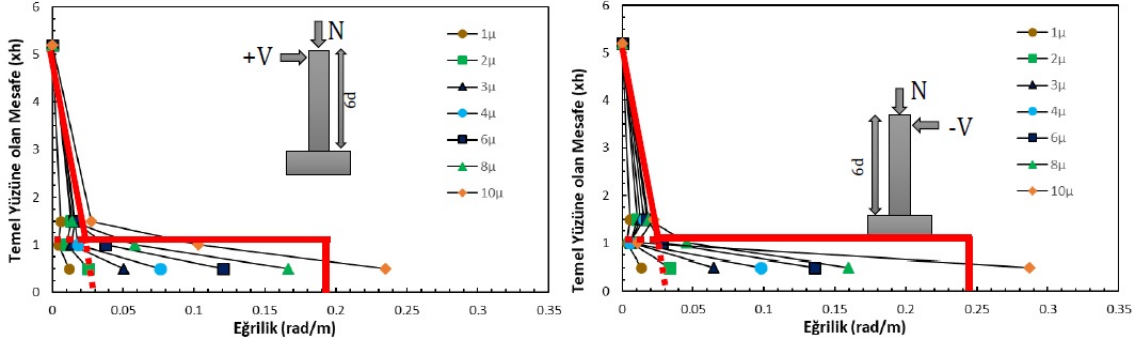
Şekil 4.8 S451008 için farklı seviyelere ait maksimum birim şekildeğiştirme diyagramı



Şekil 4.9 S451008 kolonu için plastik mafsal boyu

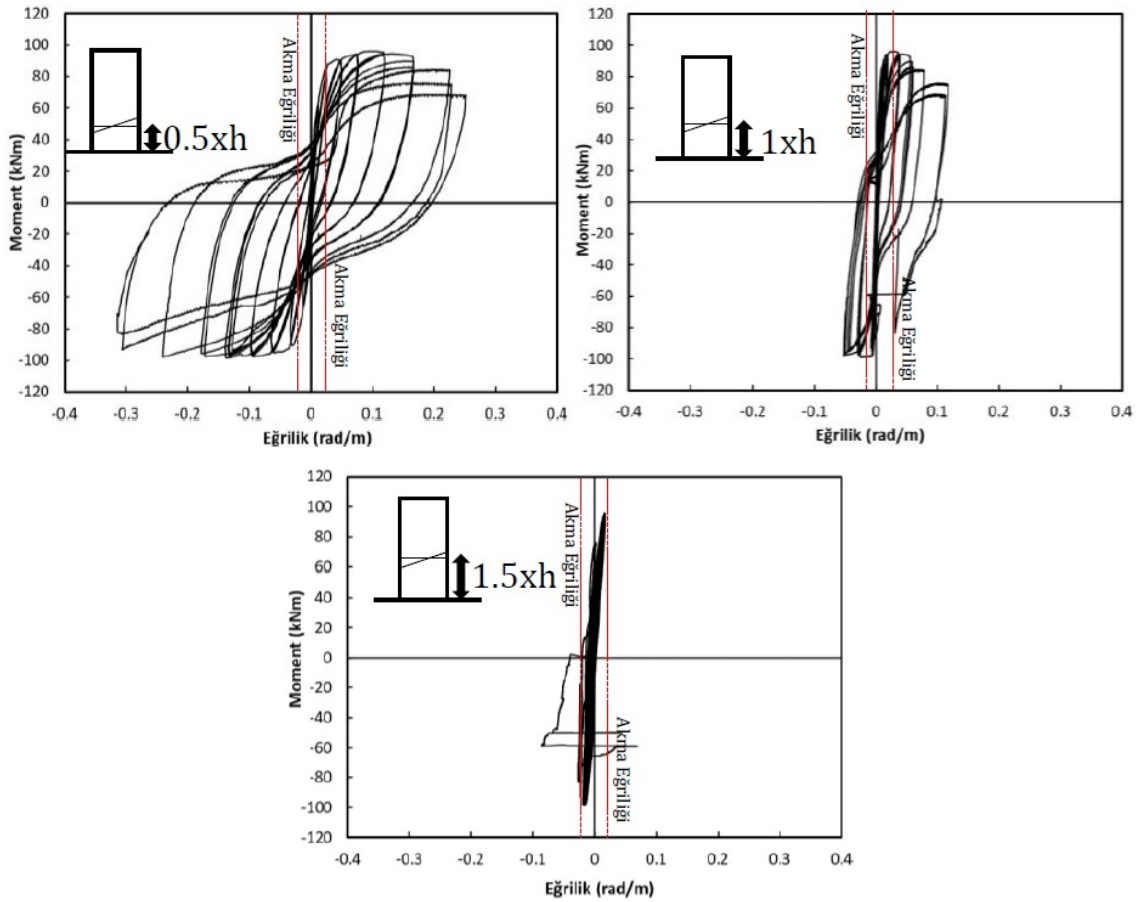
S601008

Deney elemanlarının sismik analizi sırasında kullanılan LVDT cihazlarından alınan değerler ile kolon boyunca üç ayrı seviyede (0.5h-1h-1.5h) eğrilik değerleri hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 4.10'da diyagram üzerinde gösterilmiştir.



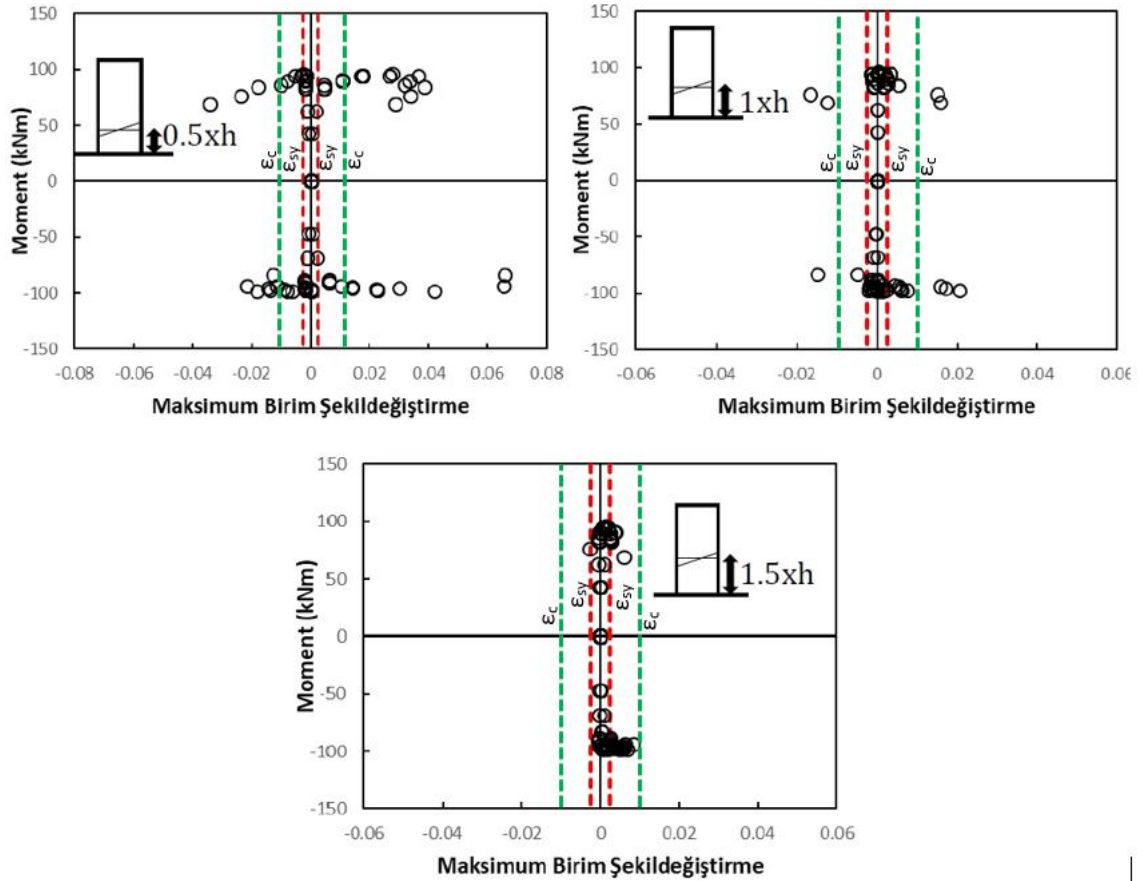
Şekil 4.10 S601008 için kolon boyunca eğrilik diyagramı

Benzer şekilde LVDT'lerden elde edilen eğrilik ile moment diyagramları üç seviye için Şekil 4.11'de gösterilmektedir.



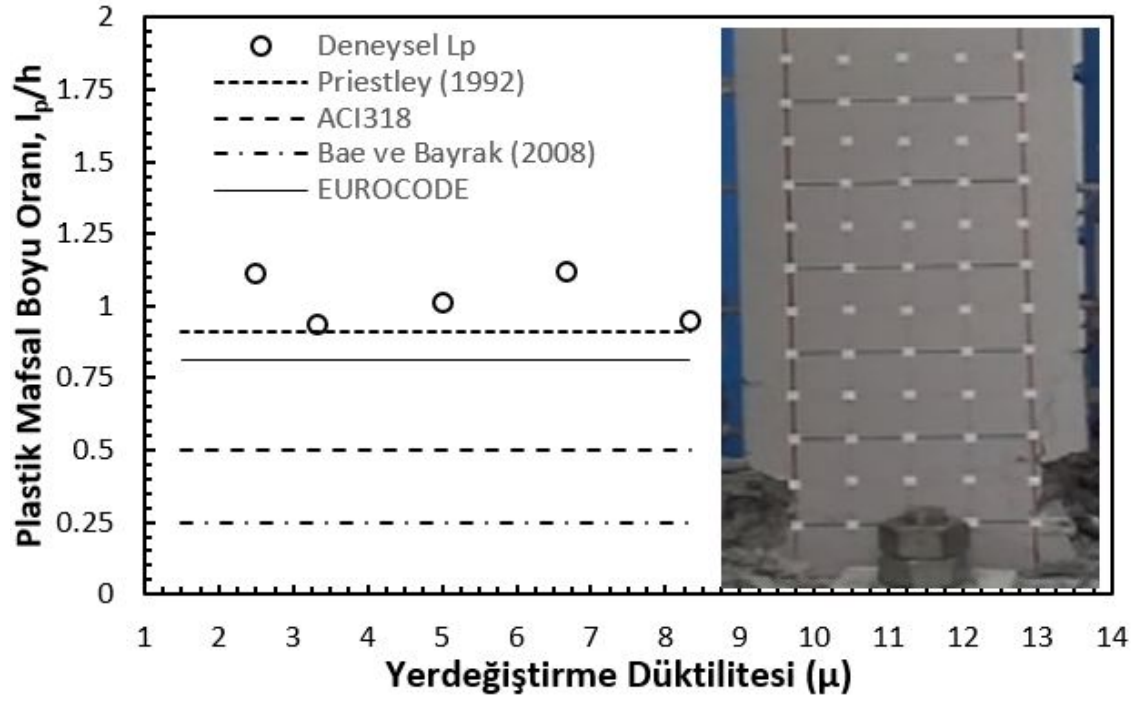
Şekil 4.11 S601008 için üç farklı seviyede moment-eğrilik diyagramı

Şekil 4.11'e göre kolon 0.5xh-1xh seviyesinde akma eğriliğini aşan değerlerin olduğu görülmektedir. Kolonun 1.5xh seviyesinde ise eğriliğin akma eğriliğini aşmadığı görülmektedir. Benzer şekilde üç farklı seviyeye yerleştirilen LVDT okumalarından elde edilen maksimum birim şekil değiştirmelerin değerleri Şekil 4.12'de gösterilmektedir.



Şekil 4.12 S601008 için farklı seviyelere ait maksimum birim şekil değiştirme diyagramı

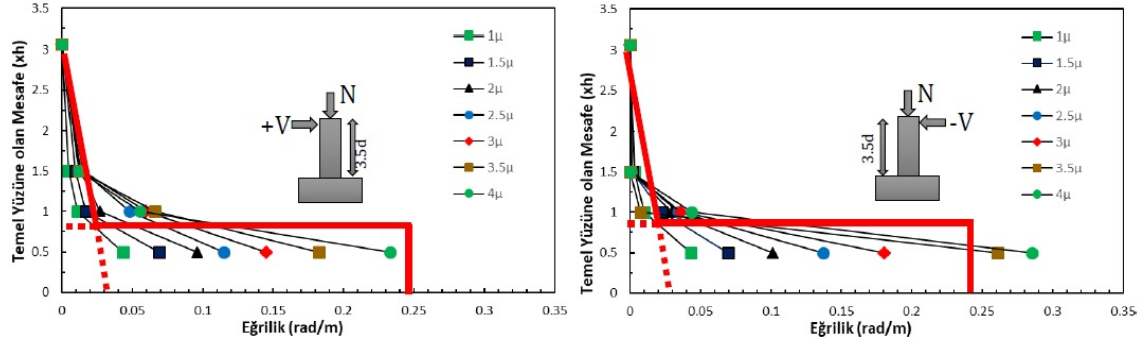
Şekil 4.12'e göre üç farklı seviye için elde edilen maksimum birim şekil değiştirme diyagramları incelendiğinde 0.5xh-1xh yüksekliğine kadar akma birim şekil değiştirme değerlerinin aşıldığı görülmektedir. Eğrilik diyagramlarına benzer şekilde 1.5xh yüksekliğinde maksimum birim şekil değiştirme değerlerinin akma birim şekil değiştirme değerinden az olduğu tespit edilmiştir. Deneysel sonuçlara göre hesaplanan plastik mafsallık boyu ile plastik mafsallık modellerine göre hesaplanan değerler Şekil 4.13'de gösterilmektedir.



Şekil 4.13 S601008 kolonu için plastik mafsal boyu

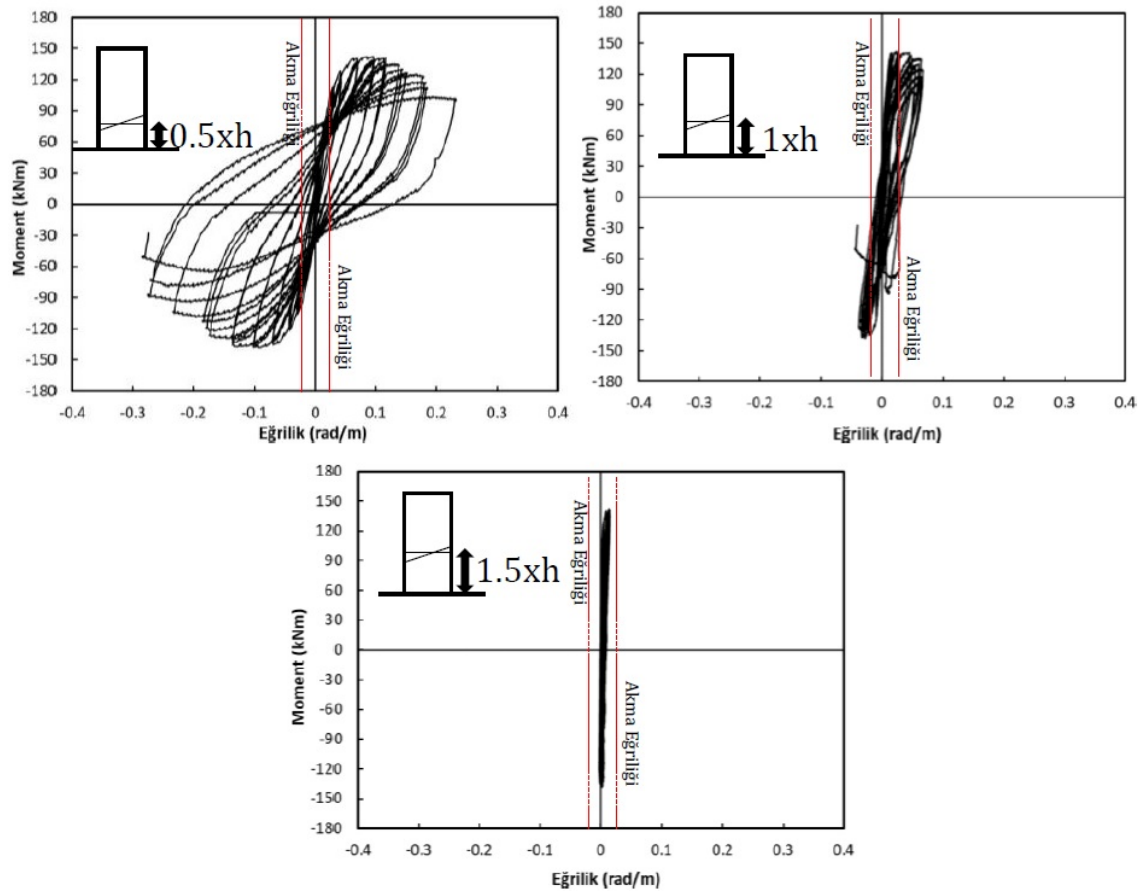
S352008

Deney elemanlarının sismik analizi sırasında kullanılan LVDT cihazlarından alınan değerler ile kolon boyunca üç ayrı seviyede (0.5h-1h-1.5h) eğrilik değerleri hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 4.14’de diyagram üzerinde gösterilmiştir.



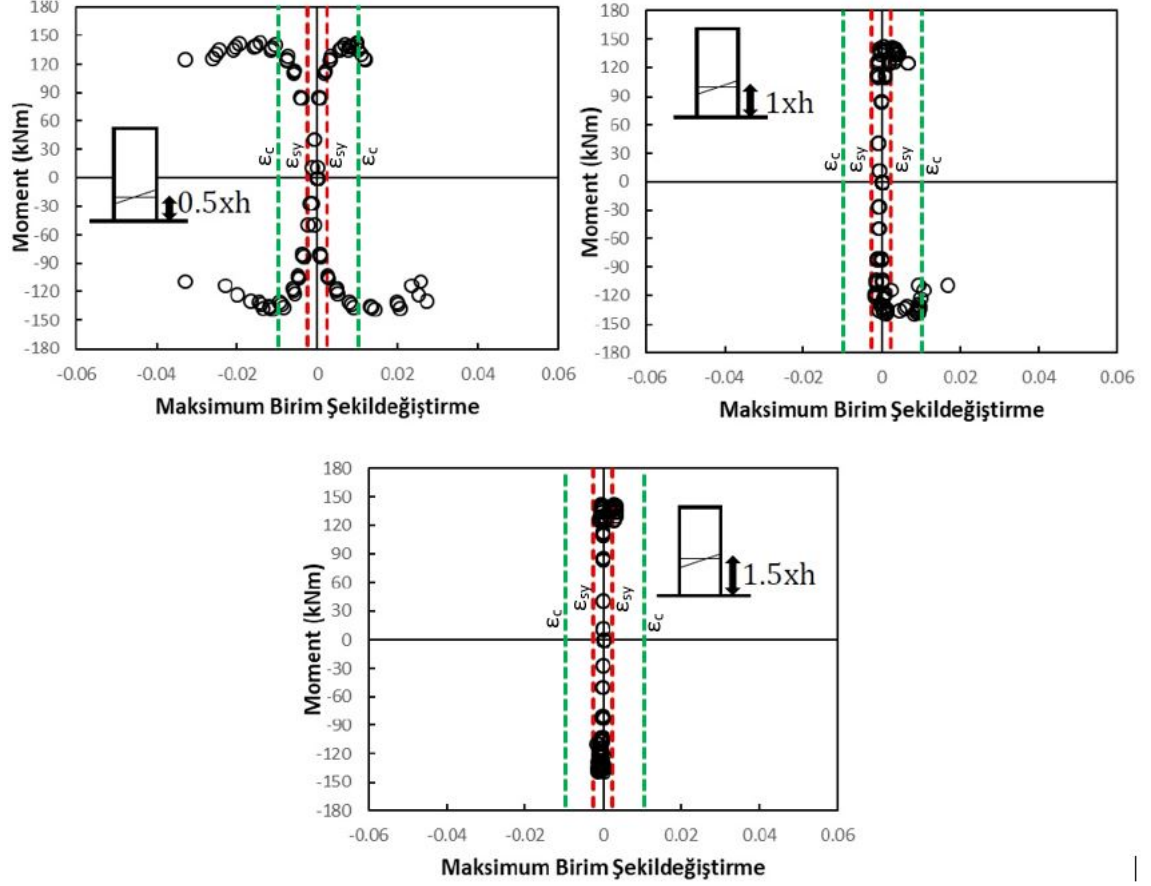
Şekil 4.14 S352008 için kolon boyunca eğrilik diyagramı

Benzer şekilde LVDT’lerden elde edilen eğrilik ile moment diyagramları üç seviye için Şekil 4.15’de gösterilmektedir.



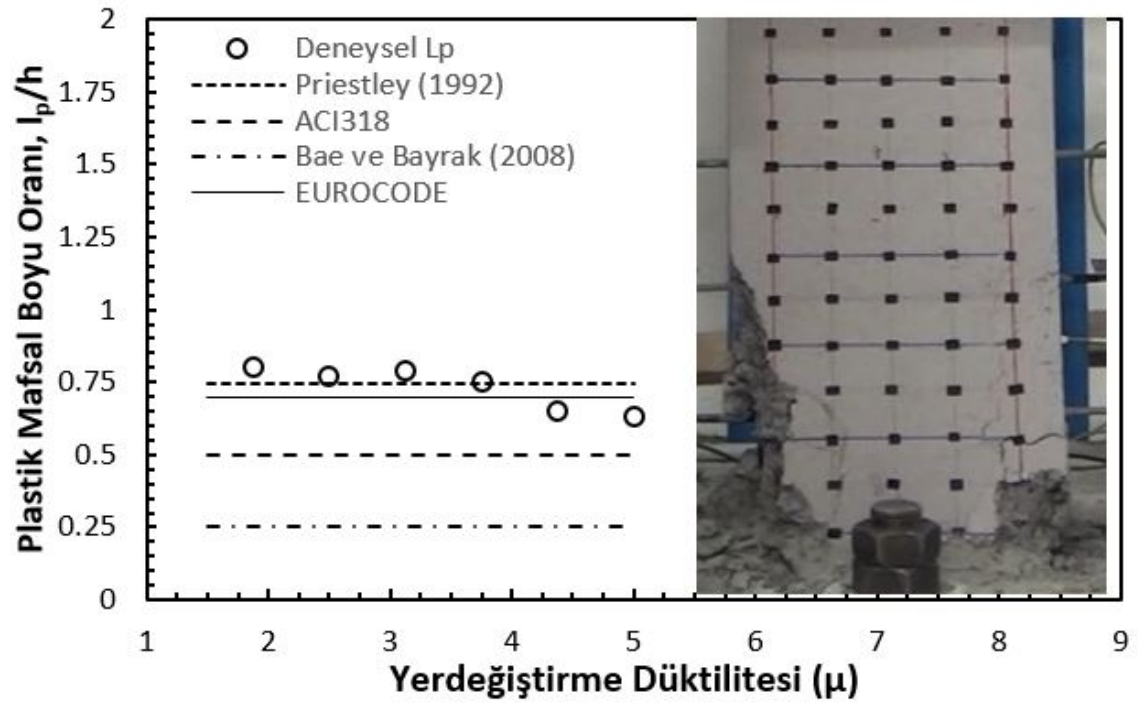
Şekil 4.15 S352008 için üç farklı seviyede moment-eğrilik diyagramı

Şekil 4.15'e göre kolon 0.5xh-1xh seviyesinde akma eğriliğini aşan değerlerin oluştuğu görülmektedir. Kolonun 1.5xh seviyesinde ise hem itme hem çekme durumunda eğriliğin, akma eğriliğini aşmadığı görülmektedir. Benzer şekilde üç farklı seviyeye yerleştirilen LVDT okumalarından elde edilen maksimum birim şekil değiştirmelerin değerleri Şekil 4.16'da gösterilmektedir.



Şekil 4.16 S352008 için farklı seviyelere ait maksimum birim şekil değiştirme diyagramı

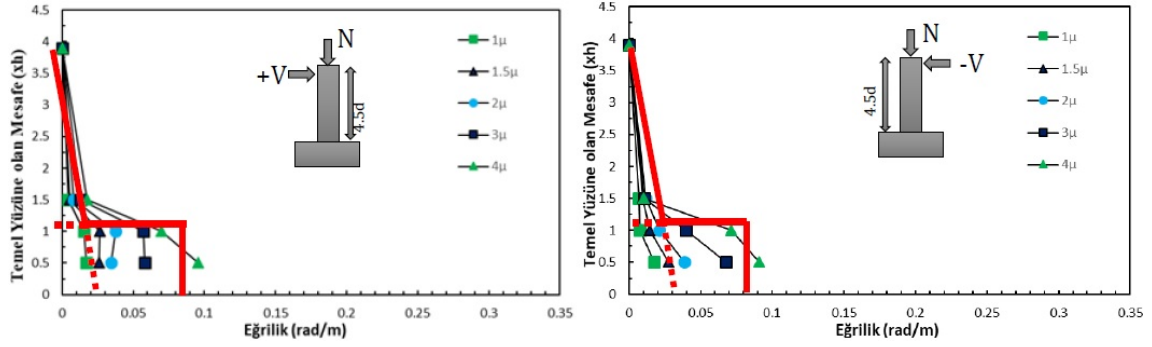
Şekil 4.16'ya göre üç farklı seviye için elde edilen maksimum birim şekil değiştirme diyagramlarını incelendiğinde 0.5xh-1xh yüksekliğine kadar akma birim şekil değiştirme değerlerinin aşıldığı görülmektedir. Eğrilik diyagramlarına benzer şekilde 1.5xh yüksekliğinde maksimum birim şekil değiştirme değerlerinin akma birim şekil değiştirme değerinden az olduğu tespit edilmiştir. Deneysel sonuçlara göre hesaplanan plastik mafsallık boyu ile plastik mafsallık modellerine göre hesaplanan değerler Şekil 4.17'de gösterilmektedir.



Şekil 4.17 S352008 kolonu için plastik mafsal boyu

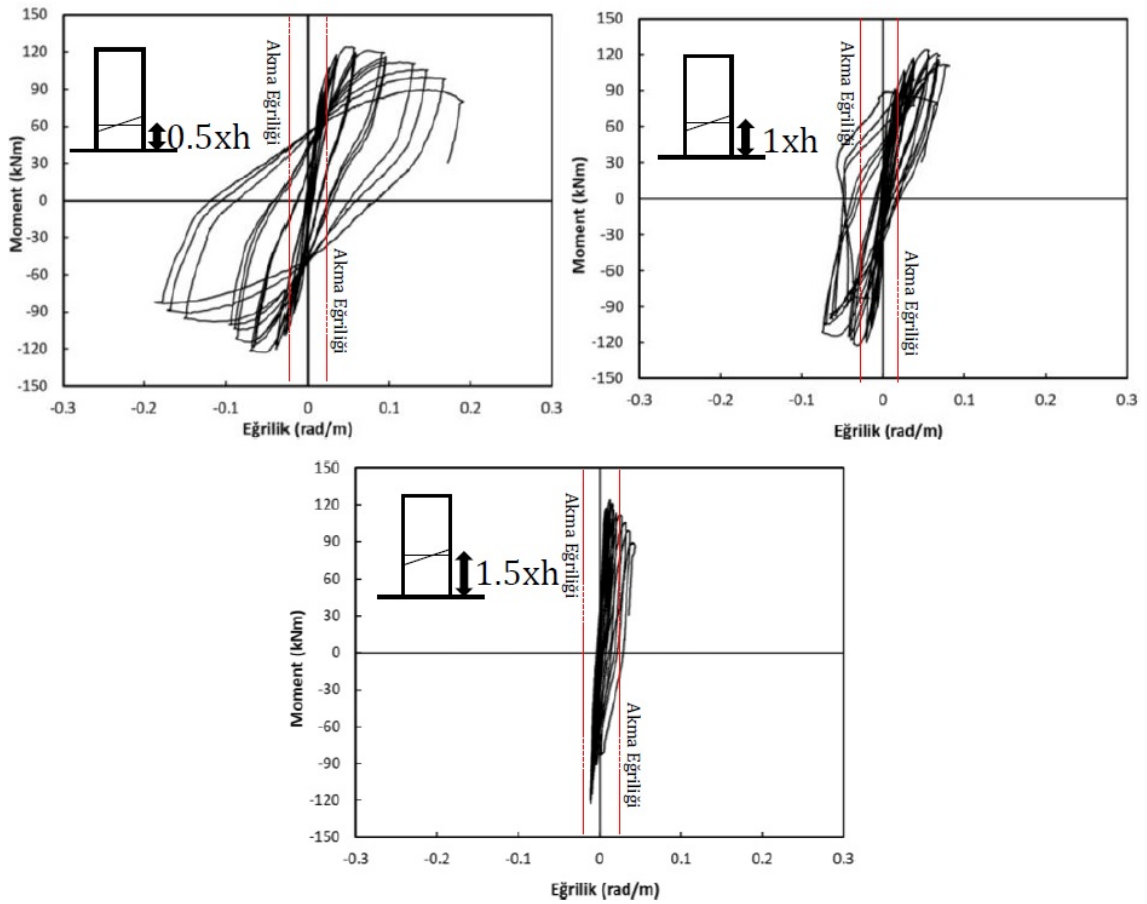
S452008

Deney elemanlarının sismik analizi sırasında kullanılan LVDT cihazlarından alınan değerler ile kolon boyunca üç ayrı seviyede (0.5h-1h-1.5h) eğrilik değerleri hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 4.18’de diyagram üzerinde gösterilmiştir.



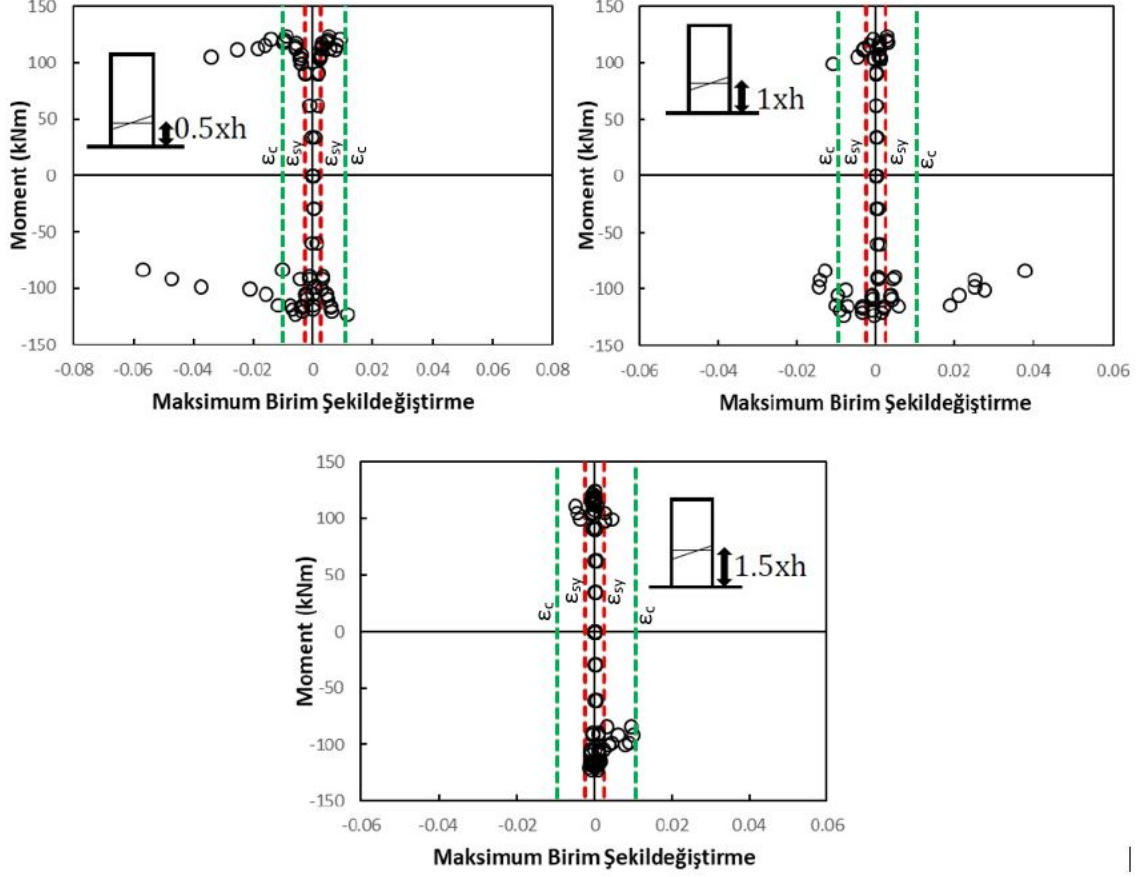
Şekil 4.18 S452008 için kolon boyunca eğrilik diyagramı

Benzer şekilde LVDT’lerden elde edilen eğrilik ile moment diyagramları üç seviye için Şekil 4.19’da gösterilmektedir.



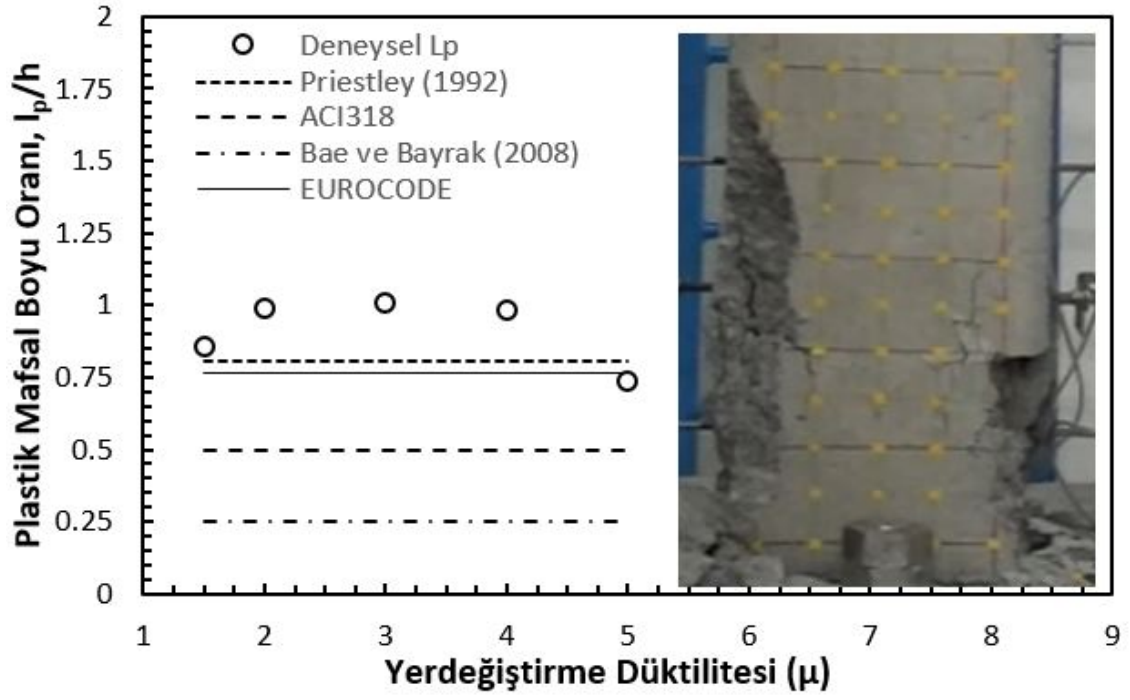
Şekil 4.19 S452008 için üç farklı seviyede moment-eğrilik diyagramı

Şekil 4.19'e göre kolon 0.5xh-1xh-1.5xh seviyesinde akma eğriliğini aşan değerlerin olduğu görülmektedir. Benzer şekilde üç farklı seviyeye yerleştirilen LVDT okumalarından elde edilen maksimum birim şekil değiştirmelerin değerleri Şekil 4.20'de gösterilmektedir.



Şekil 4.20 S452008 için farklı seviyelere ait maksimum birim şekil değiştirme diyagramı

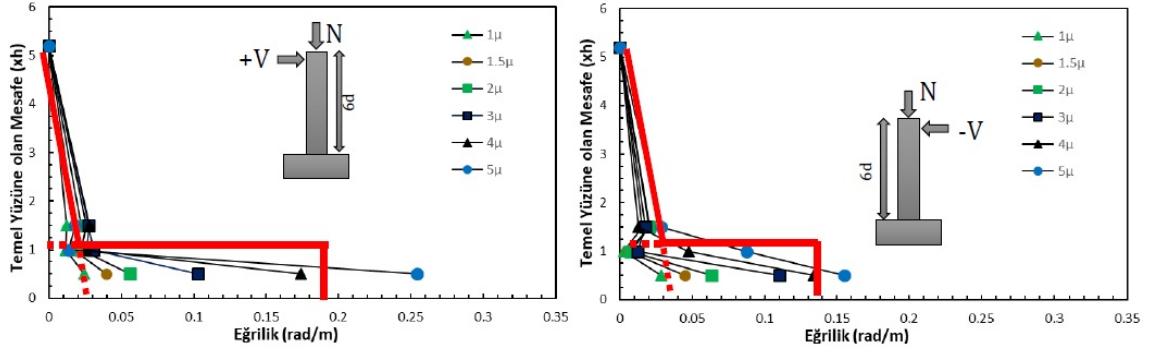
Şekil 4.20'ye göre üç farklı seviye için elde edilen maksimum birim şekil değiştirme diyagramları incelendiğinde 0.5xh-1xh yüksekliğine kadar akma birim şekil değiştirme değerlerinin aşıldığı görülmektedir. 1.5xh yüksekliğinde ise akma birim şekil değiştirme değerini birkaç noktada geçtiği tespit edilmiştir. Deneysel sonuçlara göre hesaplanan plastik mafsallık boyu ile plastik mafsallık modellerine göre hesaplanan değerler Şekil 4.21'de gösterilmektedir.



Şekil 4.21 S452008 kolonu için plastik mafsalsal boyu

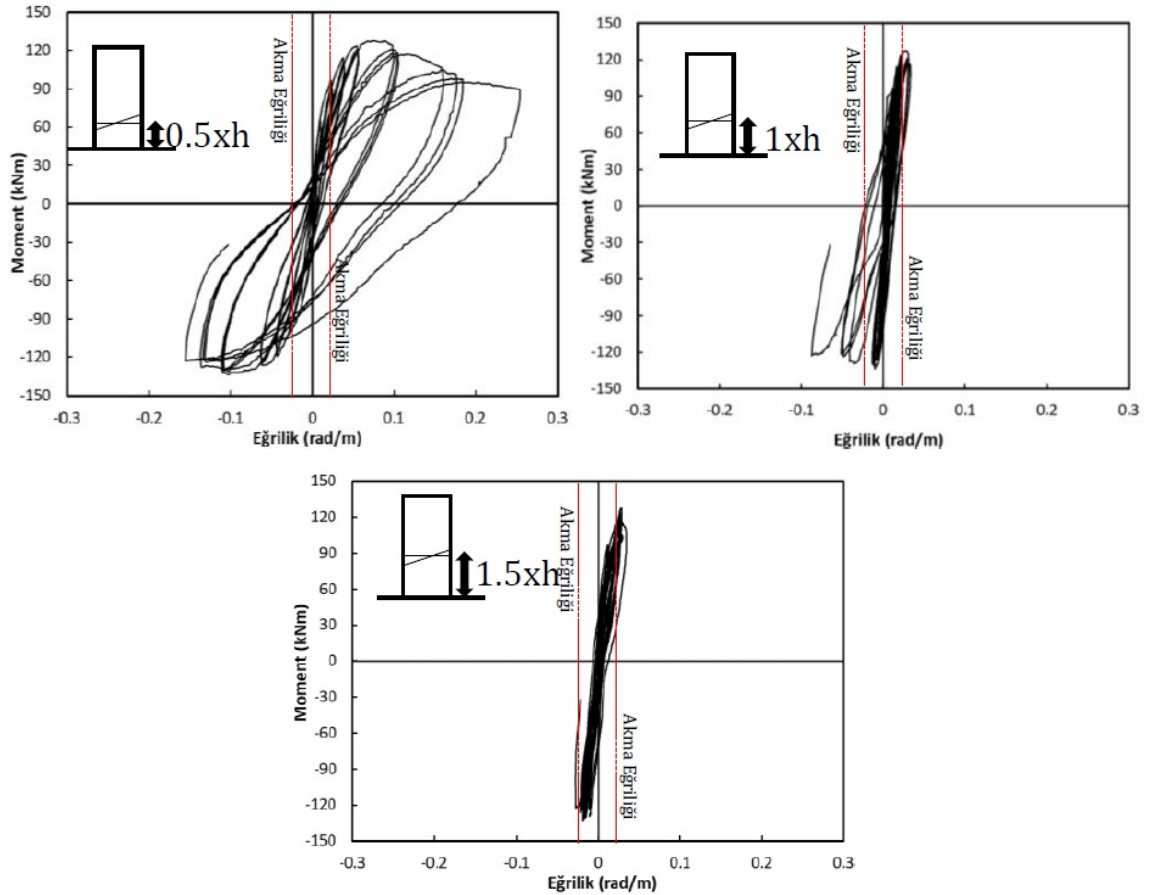
S602008

Deney elemanlarının sismik analizi sırasında kullanılan LVDT cihazlarından alınan değerler ile kolon boyunca üç ayrı seviyede (0.5h-1h-1.5h) eğrilik değerleri hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 4.22’de diyagram üzerinde gösterilmiştir.



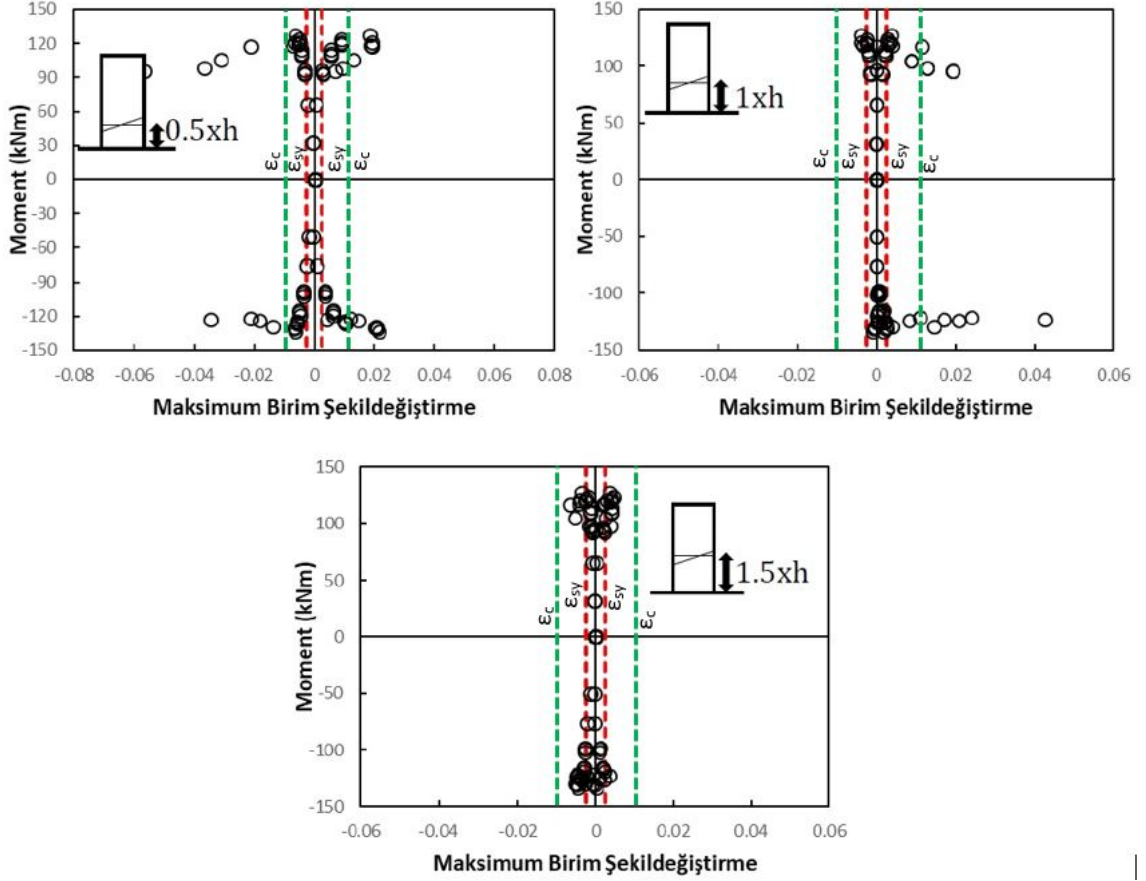
Şekil 4.22 S602008 için kolon boyunca eğrilik diyagramı

Benzer şekilde LVDT’lerden elde edilen eğrilik ile moment diyagramları üç seviye için Şekil 4.23’de gösterilmektedir.



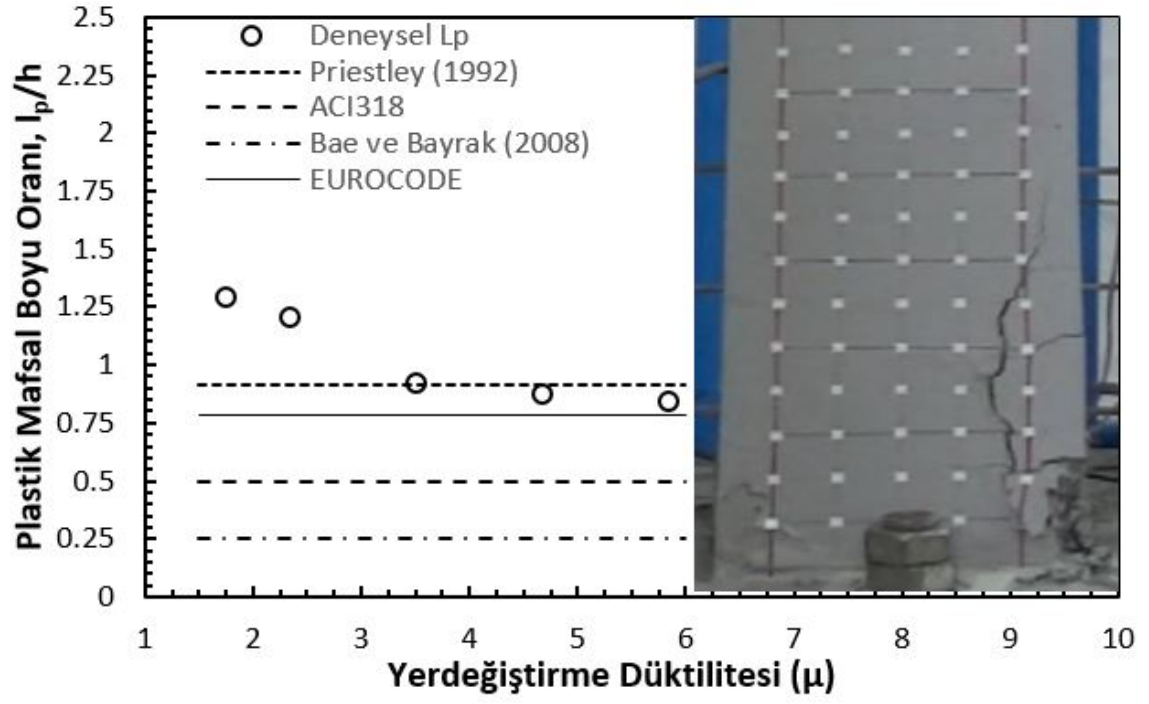
Şekil 4.23 S602008 için üç farklı seviyede moment-eğrilik diyagramı

Şekil 4.23'e göre kolon 0.5xh-1xh(Çekme durumunda) seviyesinde akma eğriliğini aşan değerlerin olduğu görülmektedir. Kolonun 1.5xh seviyesinde ise eğriliğin akma eğriliğini aşmadığı görülmektedir. Benzer şekilde üç farklı seviyeye yerleştirilen LVDT okumalarından elde edilen maksimum birim şekil değiştirmelerin değerleri Şekil 4.24'de gösterilmektedir.



Şekil 4.24 S602008 için farklı seviyelere ait maksimum birim şekil değiştirme diyagramı

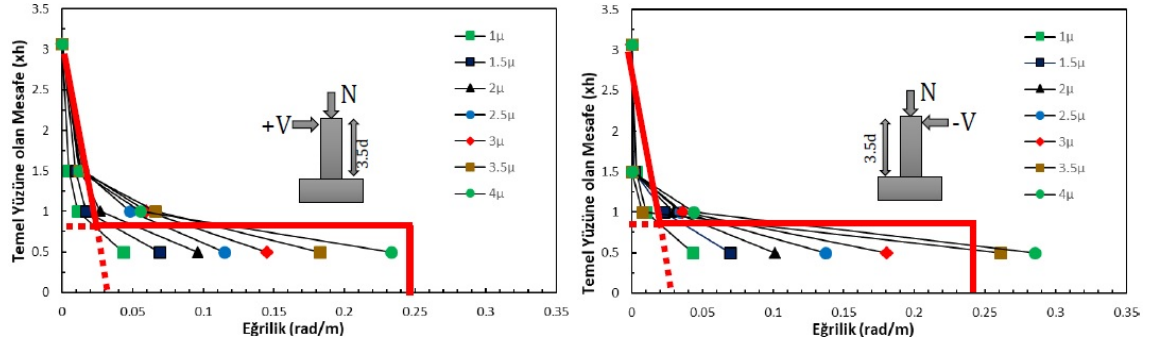
Şekil 4.24'e göre üç farklı seviye için elde edilen maksimum birim şekil değiştirme diyagramları incelendiğinde 0.5xh-1xh yüksekliğine kadar akma birim şekil değiştirme değerlerinin aşıldığı görülmektedir. Eğrilik diyagramlarına benzer şekilde 1.5xh yüksekliğinde maksimum birim şekil değiştirme değerlerinin akma birim şekil değiştirme değerini bir miktar geçtiği saptanmıştır. Deneysel sonuçlara göre hesaplanan plastik mafsallık boyu ile plastik mafsallık modellerine göre hesaplanan değerler Şekil 4.25'de gösterilmektedir.



Şekil 4.25 S452008 kolonu için plastik mafsal boyu

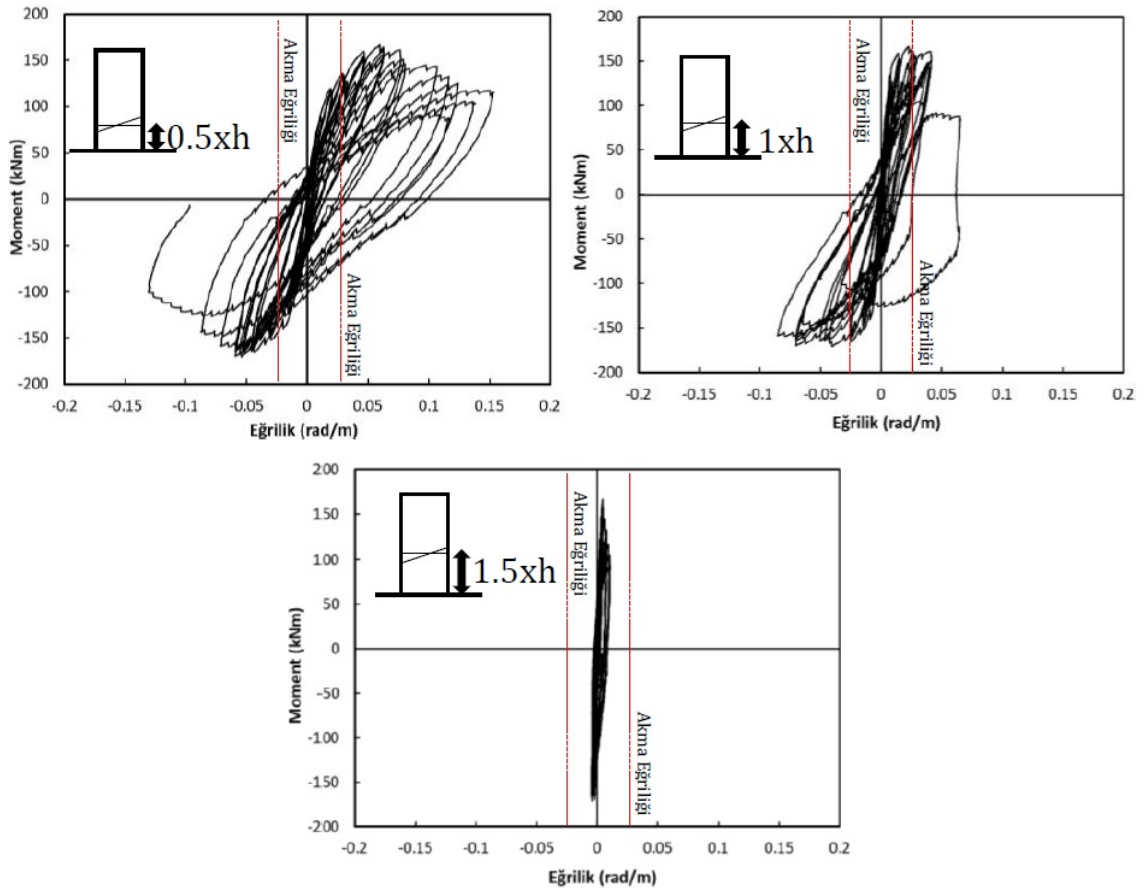
S353508

Deney elemanlarının sismik analizi sırasında kullanılan LVDT cihazlarından alınan değerler ile kolon boyunca üç ayrı seviyede (0.5h-1h-1.5h) eğrilik değerleri hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 4.26’da diyagram üzerinde gösterilmiştir.



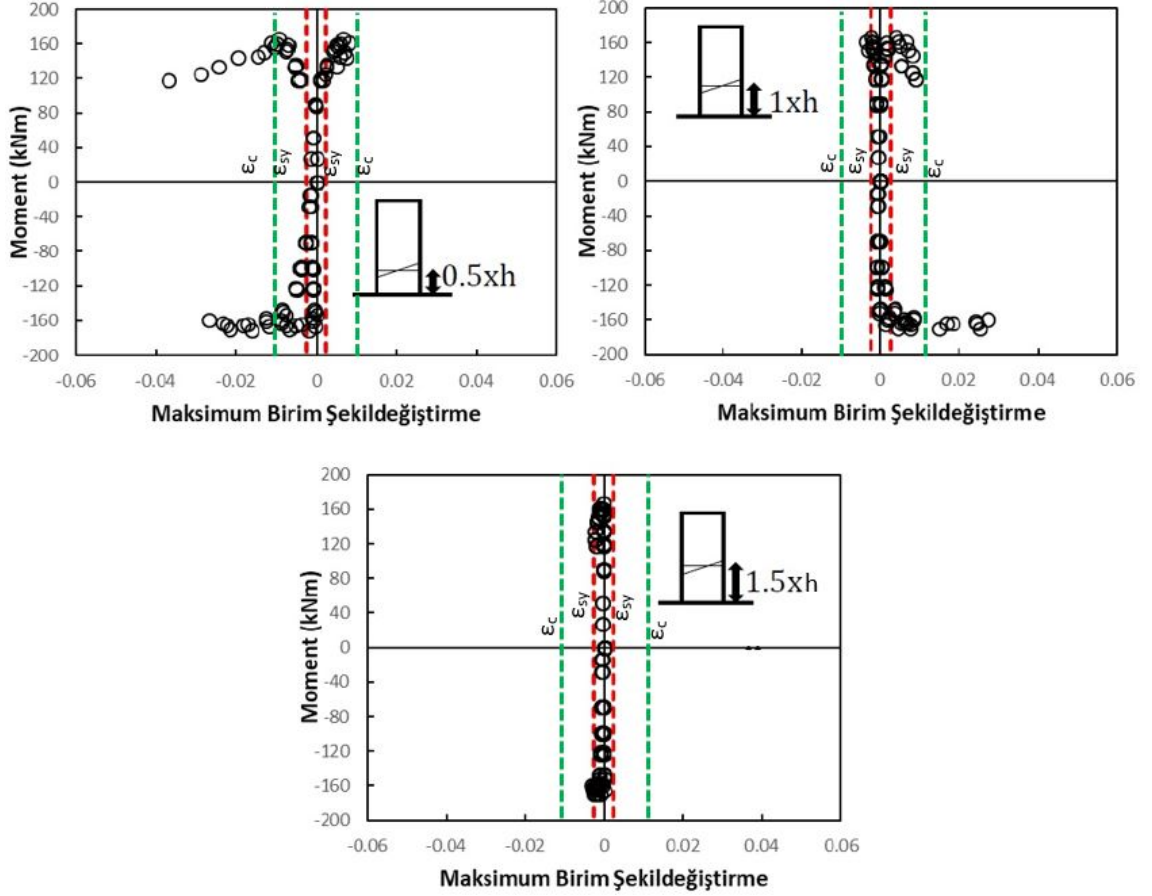
Şekil 4.26 S353508 için kolon boyunca eğrilik diyagramı

Benzer şekilde LVDT’lerden elde edilen eğrilik ile moment diyagramları üç seviye için Şekil 4.27’de gösterilmektedir.



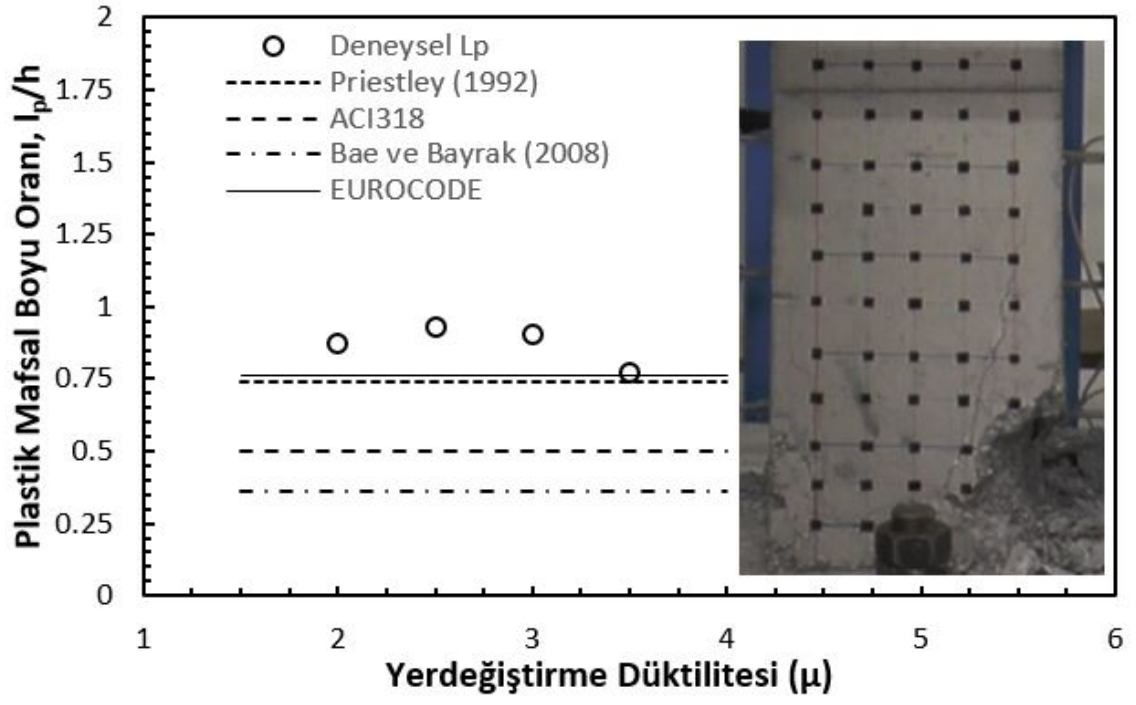
Şekil 4.27 S353508 için üç farklı seviyede moment-eğrilik diyagramı

Şekil 4.27'e göre kolon 0.5xh-1xh seviyesinde akma eğriliğini aşan değerlerin oluştuğu görülmektedir. Kolonun 1.5xh seviyesinde ise hem itme hem çekme durumunda eğriliğin, akma eğriliğini aşmadığı görülmektedir. Benzer şekilde üç farklı seviyeye yerleştirilen LVDT okumalarından elde edilen maksimum birim şekildeştirmelerin değerleri Şekil 4.28'de gösterilmektedir.



Şekil 4.28 S353508 için farklı seviyelere ait maksimum birim şekildeğiştirme diyagramı

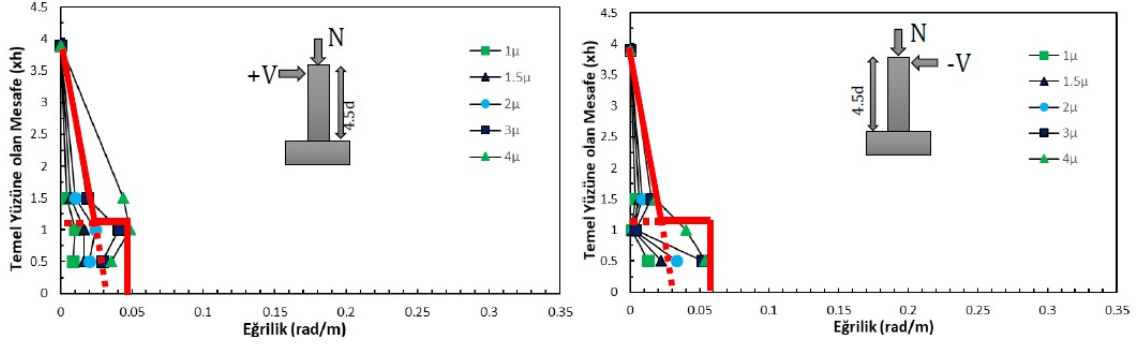
Şekil 4.28'e göre üç farklı seviye için elde edilen maksimum birim şekildeğiştirme diyagramlarını incelendiğinde 0.5xh-1xh yüksekliğine kadar akma birim şekildeğiştirme değerlerinin aşıldığı görülmektedir. Eğrilik diyagramlarına benzer şekilde 1.5xh yüksekliğinde maksimum birim şekildeğiştirme değerlerinin akma birim şekildeğiştirme değerinden az olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca 0.5xh seviyesinde eksenel yükün etkisi sebebiyle çekme durumu için çekme bölgesinde akma birim şekildeğiştirme değerine ulaşamamıştır. Deneysel sonuçlara göre hesaplanan plastik mafsallık boyu ile plastik mafsallık modellerine göre hesaplanan değerler Şekil 4.29'da gösterilmektedir.



Şekil 4.29 S353508 kolonu için plastik mafsall boyu

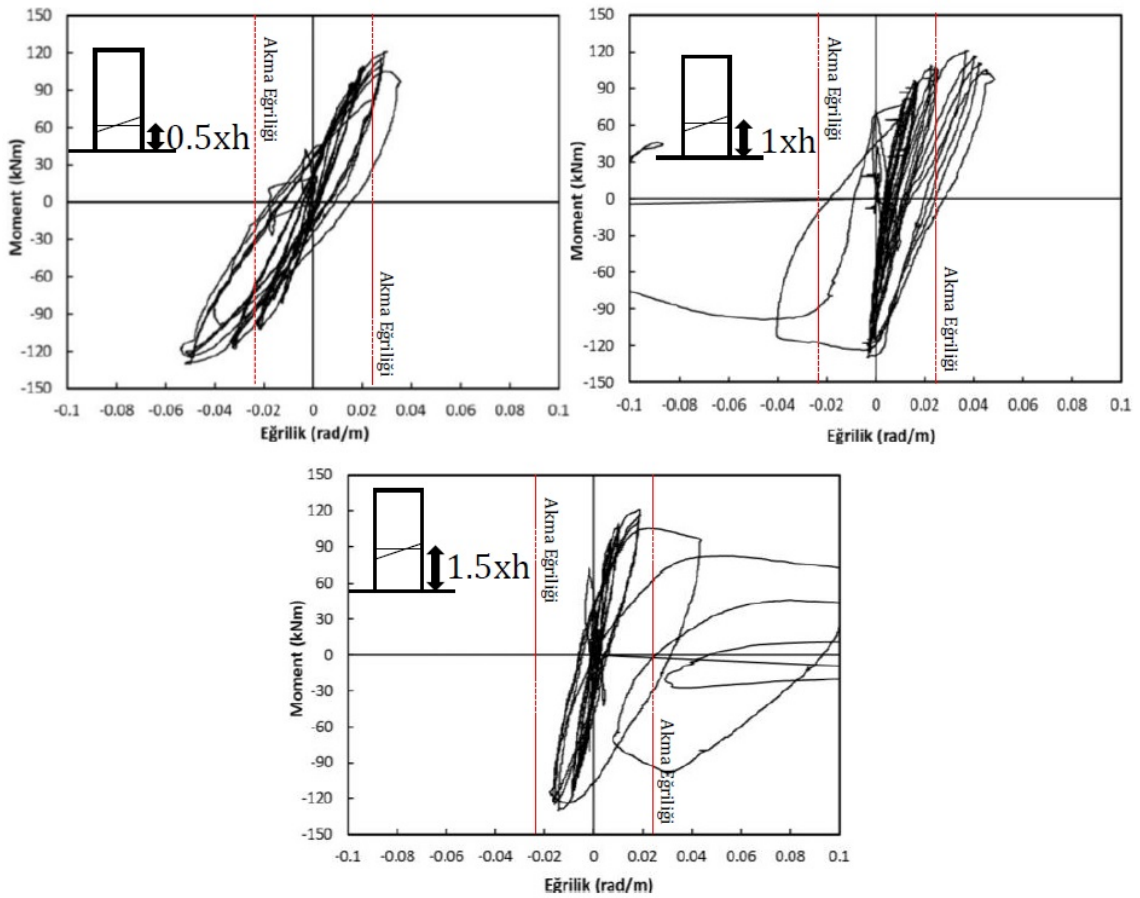
S453508

Deney elemanlarının sismik analizi sırasında kullanılan LVDT cihazlarından alınan değerler ile kolon boyunca üç ayrı seviyede (0.5h-1h-1.5h) eğrilik değerleri hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 4.30'da diyagram üzerinde gösterilmiştir.



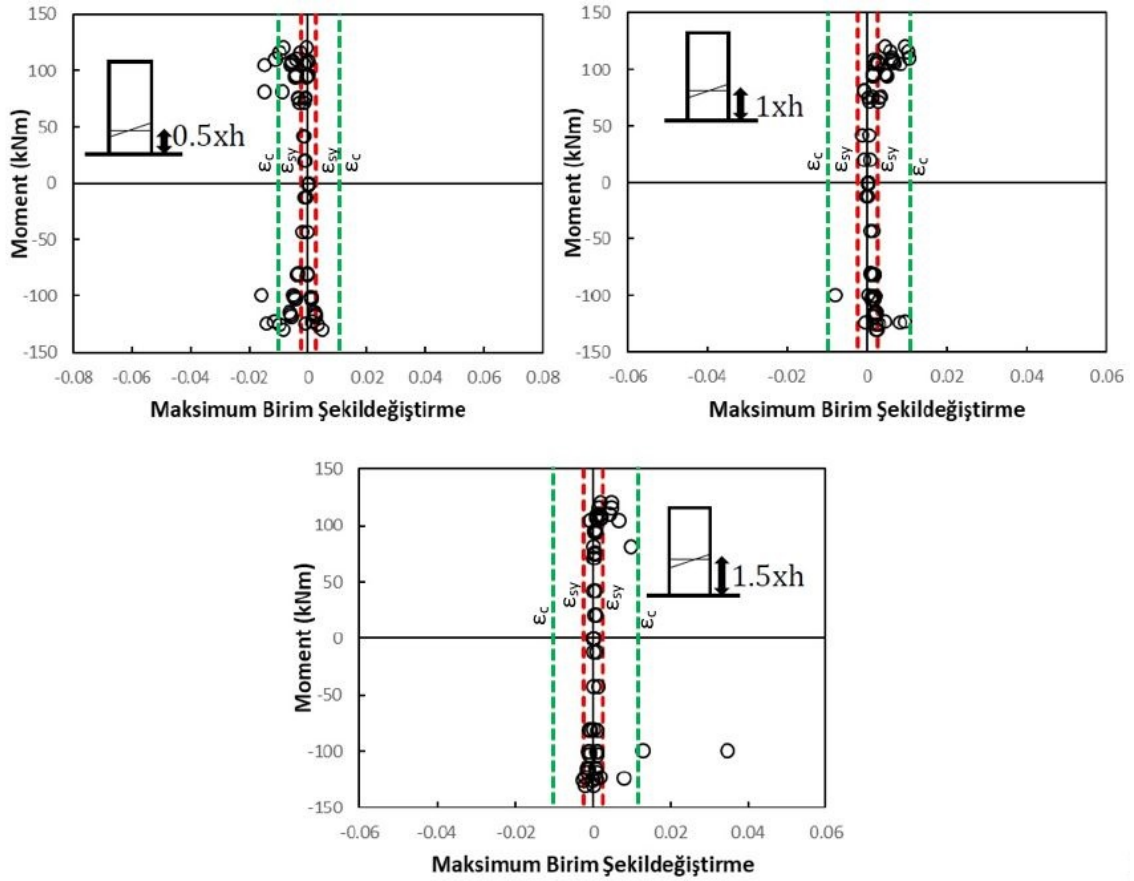
Şekil 4.30 S453508 için kolon boyunca eğrilik diyagramı

Benzer şekilde LVDT'lerden elde edilen eğrilik ile moment diyagramları üç seviye için Şekil 4.31'de gösterilmektedir.



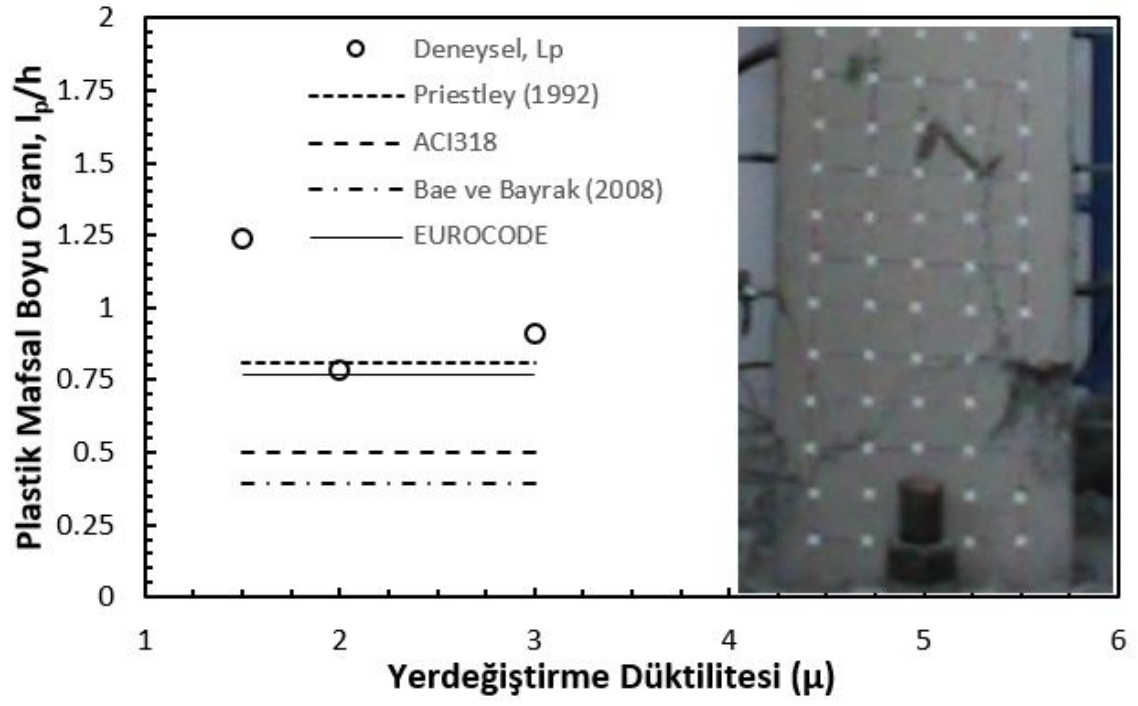
Şekil 4.31 S453508 için üç farklı seviyede moment-eğrilik diyagramı

Şekil 4.31'e göre kolon 0.5xh-1xh-1.5xh seviyesinde akma eğriliğini aşan değerlerin olduğu görülmektedir. Benzer şekilde üç farklı seviyeye yerleştirilen LVDT okumalarından elde edilen maksimum birim şekil değiştirmelerin değerleri Şekil 4.32'de gösterilmektedir.



Şekil 4.32 S453508 için farklı seviyelere ait maksimum birim şekil değiştirme diyagramı

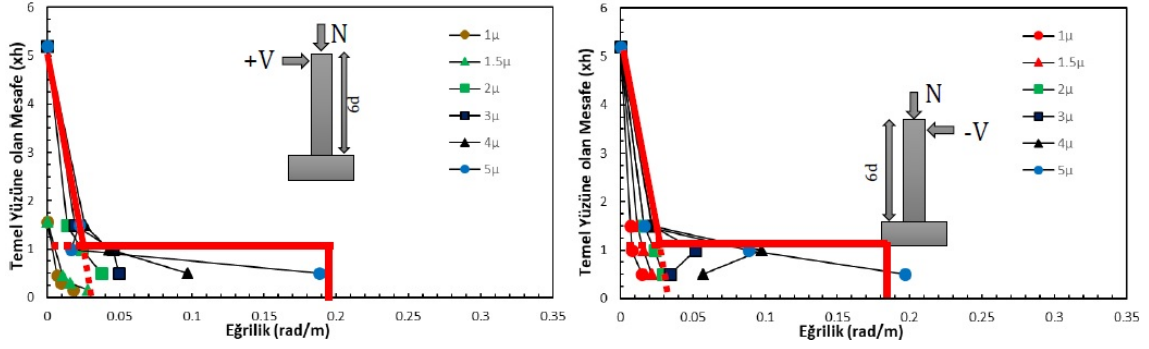
Şekil 4.32'e göre üç farklı seviye için elde edilen maksimum birim şekil değiştirme diyagramları incelendiğinde 0.5xh-1xh-1.5xh yüksekliğine kadar akma birim şekil değiştirme değerlerinin aşıldığı görülmektedir. Deney sonuçlarına göre hesaplanan plastik mafsalları ile plastik mafsalları modellerine göre hesaplanan değerler Şekil 4.33'de gösterilmektedir.



Şekil 4.33 S453508 kolonu için plastik mafsalsal boyu

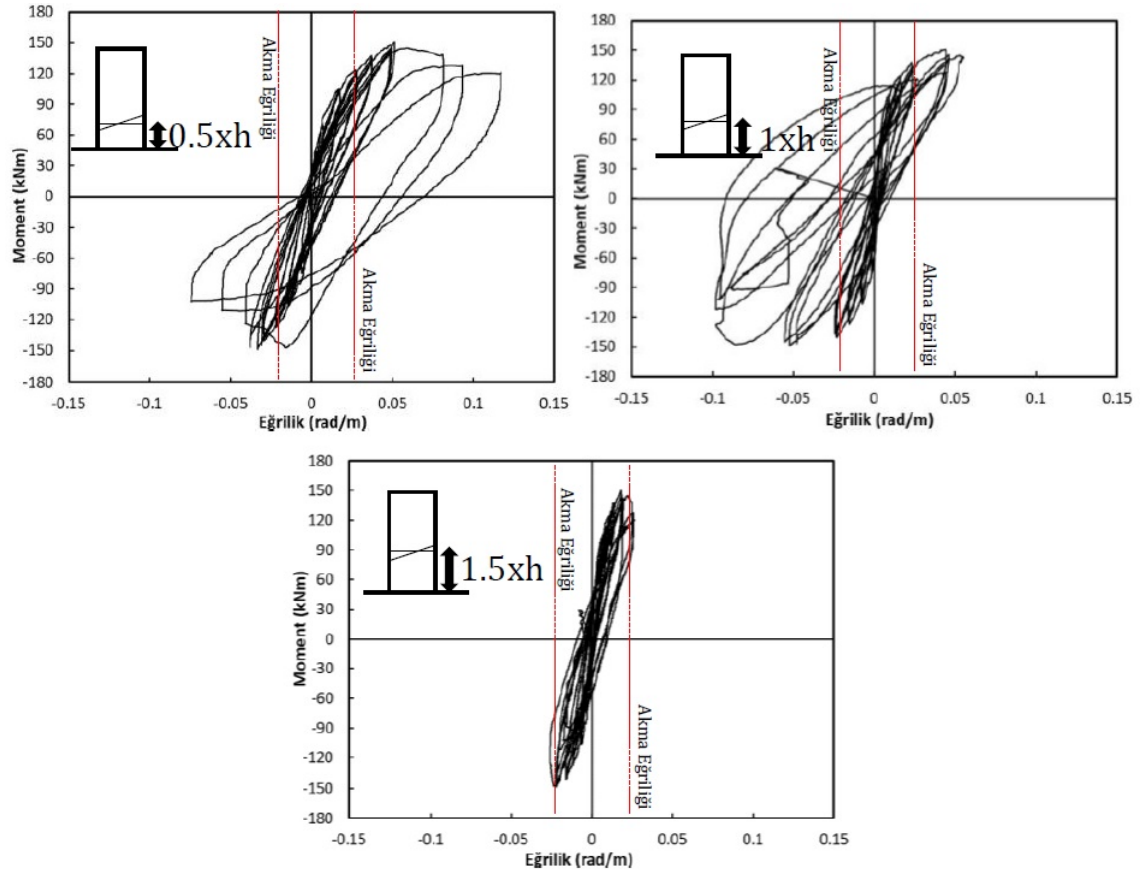
S603508

Deney elemanlarının sismik analizi sırasında kullanılan LVDT cihazlarından alınan değerler ile kolon boyunca üç ayrı seviyede (0.5h-1h-1.5h) eğrilik değerleri hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 4.34’de diyagram üzerinde gösterilmiştir.



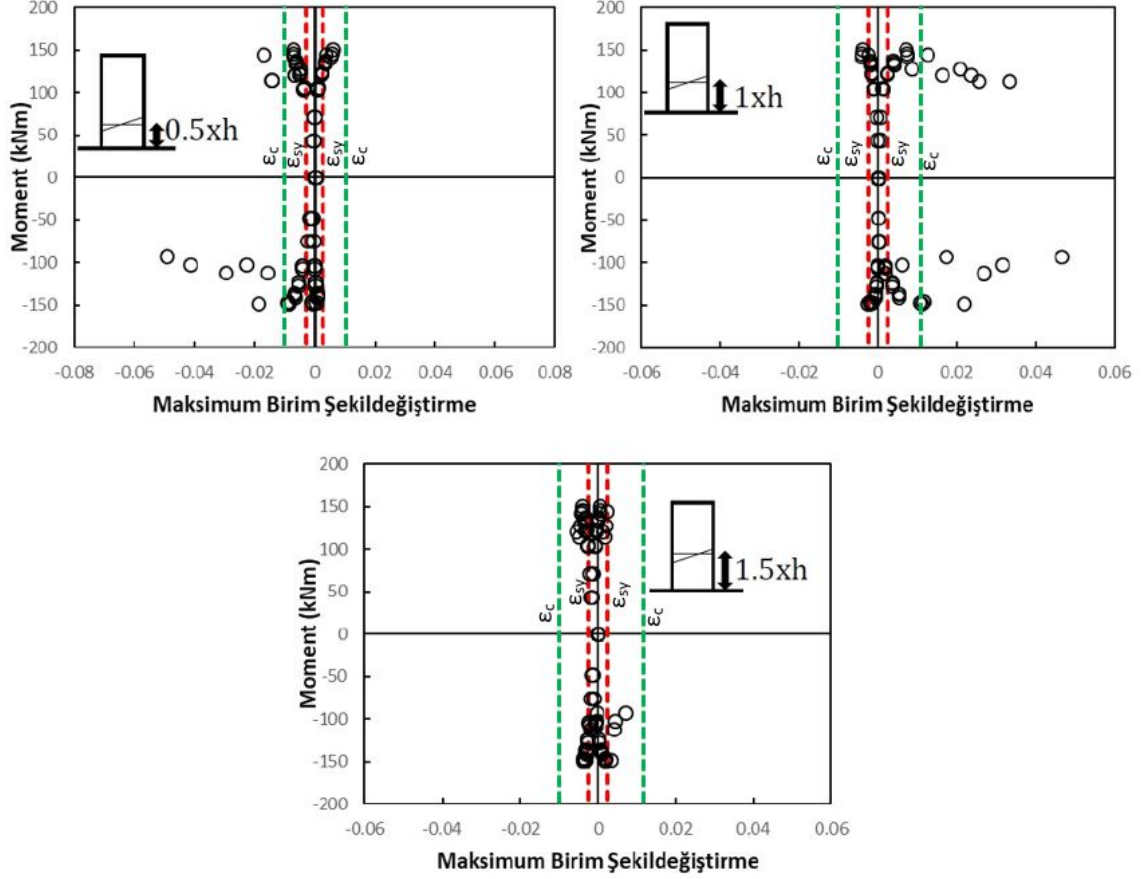
Şekil 4.34 S603508 için kolon boyunca eğrilik diyagramı

Benzer şekilde LVDT’lerden elde edilen eğrilik ile moment diyagramları üç seviye için Şekil 4.35’de gösterilmektedir.



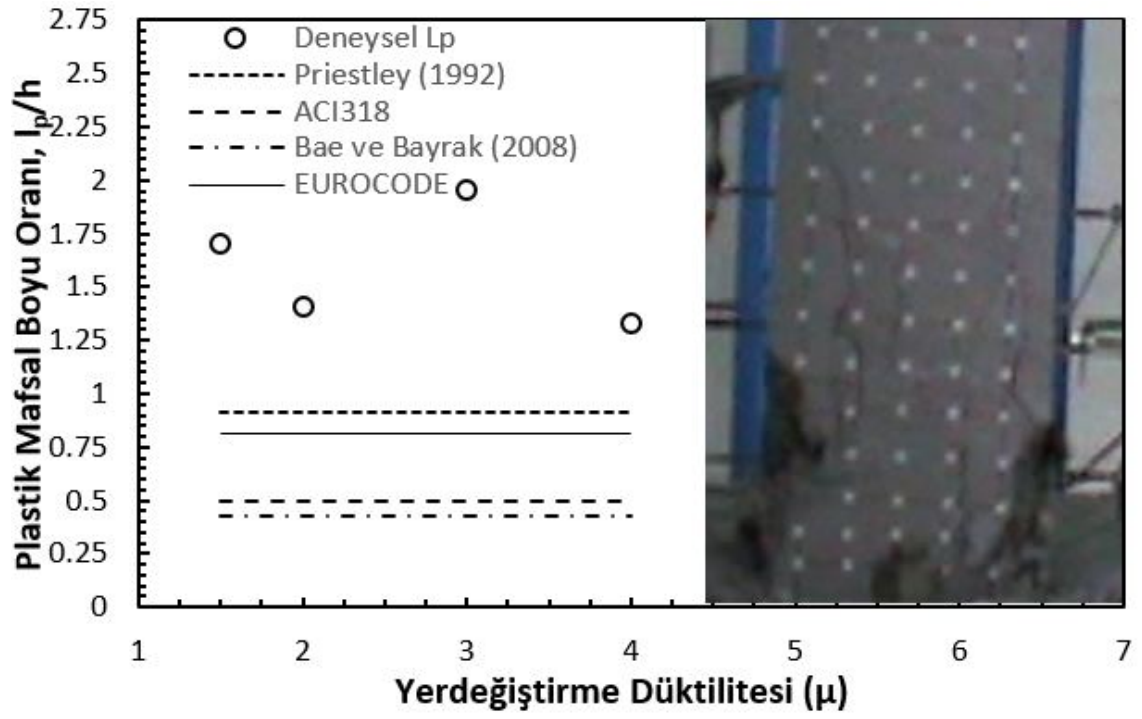
Şekil 4.35 S603508 için üç farklı seviyede moment-eğrilik diyagramı

Şekil 4.35'e göre kolon 0.5xh-1xh seviyesinde akma eğriliğini aşan değerlerin olduğu görülmüştür. 1.5xh seviyesinde ise akma eğriliğine yaklaşık eşit olduğu belirlenmiştir. Benzer şekilde üç farklı seviyeye yerleştirilen LVDT okumalarından elde edilen maksimum birim şekil değiştirmelerin değerleri Şekil 4.36'da gösterilmektedir.



Şekil 4.36 S603508 için farklı seviyelere ait maksimum birim şekil değiştirme diyagramı

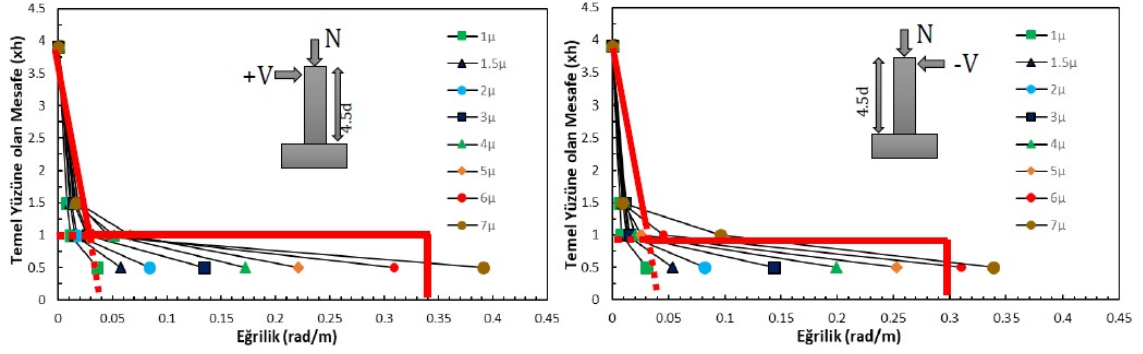
Şekil 4.36'da göre üç farklı seviye için elde edilen maksimum birim şekil değiştirme diyagramları incelendiğinde 0.5xh-1xh yüksekliğine kadar akma birim şekil değiştirme değerlerinin aşıldığı görülmektedir. Eğrilik diyagramlarına benzer şekilde 1.5xh yüksekliğinde maksimum birim şekil değiştirme değerlerinin akma birim şekil değiştirme değerini bir miktar geçtiği saptanmıştır. Deney sonuçlarına göre hesaplanan plastik mafsallık boyu ile plastik mafsallık modellerine göre hesaplanan değerler Şekil 4.37'de gösterilmektedir.



Şekil 4.37 S603508 kolonu için plastik mafsalsal boyu

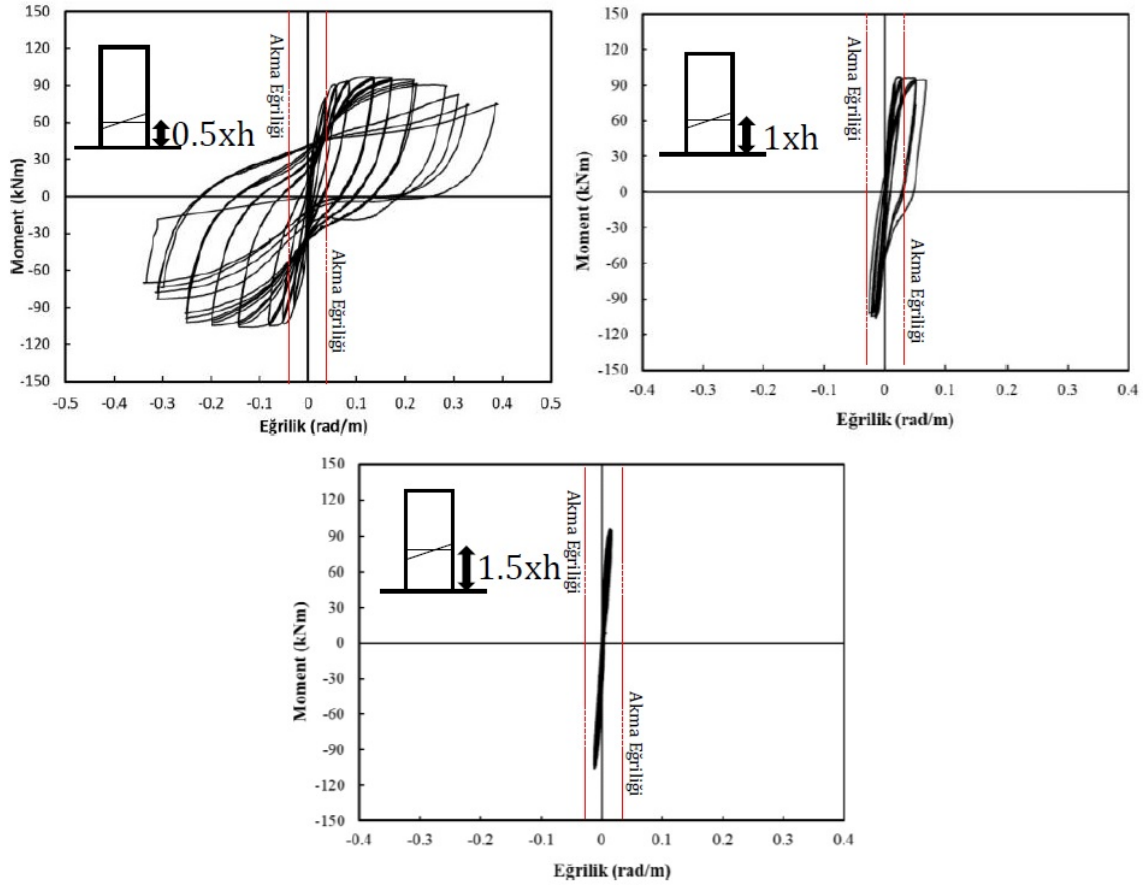
S451006

Deney elemanlarının sismik analizi sırasında kullanılan LVDT cihazlarından alınan değerler ile kolon boyunca üç ayrı seviyede (0.5h-1h-1.5h) eğrilik değerleri hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 4.38’de diyagram üzerinde gösterilmiştir.



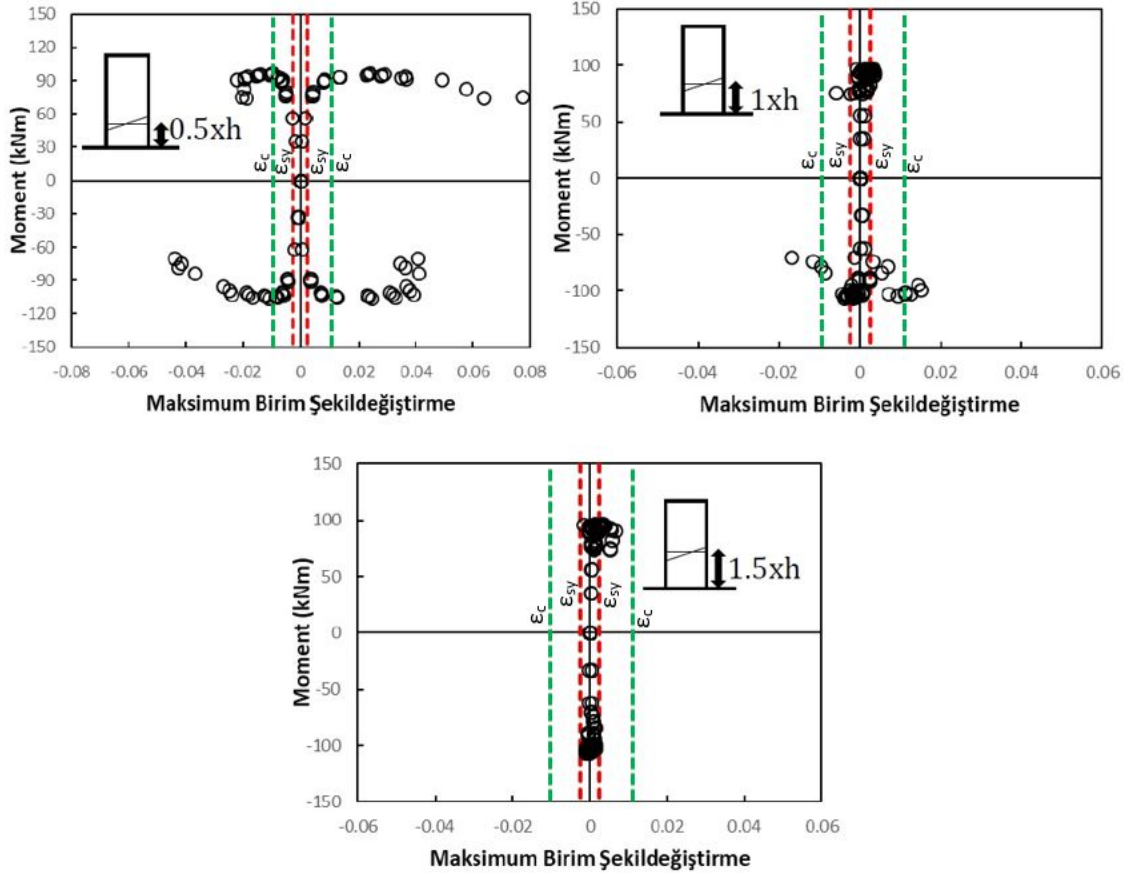
Şekil 4.38 S451006 için kolon boyunca eğrilik diyagramı

Benzer şekilde LVDT’lerden elde edilen eğrilik ile moment diyagramları üç seviye için Şekil 4.39’da gösterilmektedir.



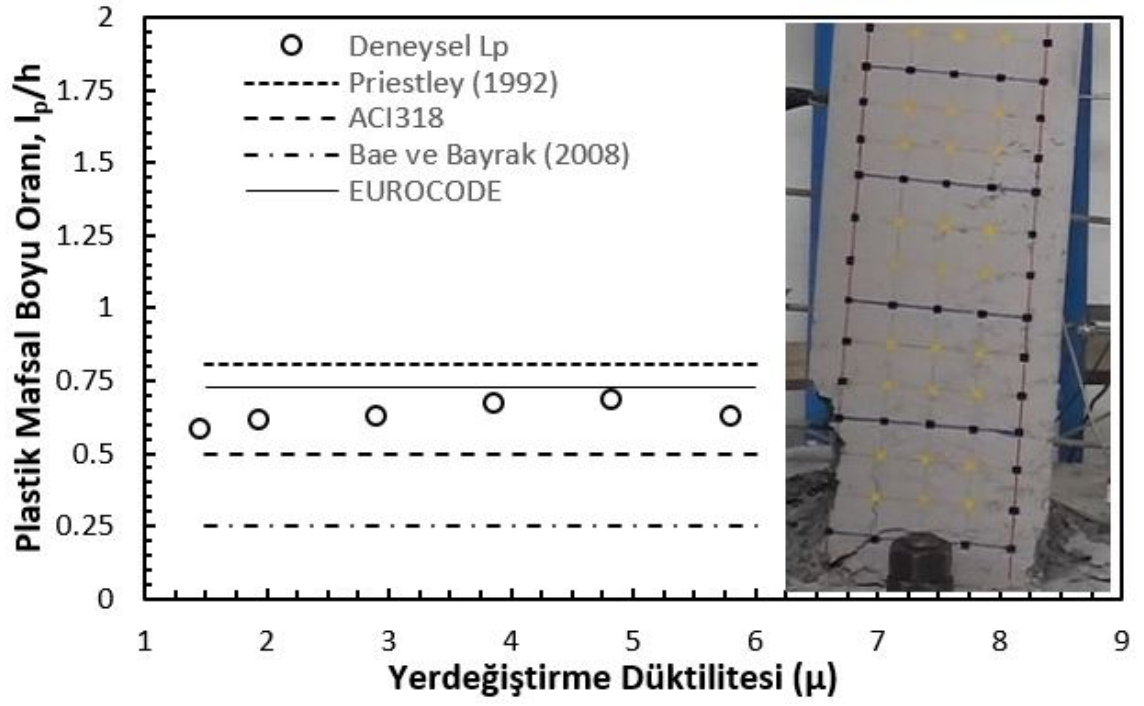
Şekil 4.39 S451006 için üç farklı seviyede moment-eğrilik diyagramı

Şekil 4.39'a göre kolon 0.5xh-1xh seviyesinde akma eğriliğini aşan değerlerin olduğu görülmektedir. 1.5xh seviyesinde akma eğriliği değerinin altında değerler oluşmaktadır. Benzer şekilde üç farklı seviyeye yerleştirilen LVDT okumalarından elde edilen maksimum birim şekil değiştirmelerin değerleri Şekil 4.40'da gösterilmektedir.



Şekil 4.40 S451006 için farklı seviyelere ait maksimum birim şekil değiştirme diyagramı

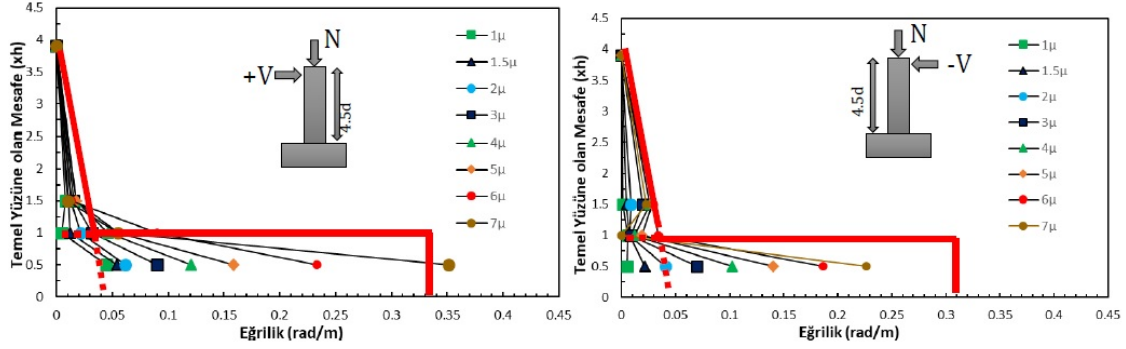
Şekil 4.40'a göre üç farklı seviye için elde edilen maksimum birim şekil değiştirme diyagramları incelendiğinde 0.5xh-1xh yüksekliğine kadar akma birim şekil değiştirme değerlerinin aşıldığı görülmektedir. 1.5xh seviyesinde ise akma birim şekil değiştirme değerlerine bir miktar geçtiği tespit edilmiştir. Deneysel sonuçlara göre hesaplanan plastik mafsallık boyu ile plastik mafsallık modellerine göre hesaplanan değerler Şekil 4.41'de gösterilmektedir.



Şekil 4.41 S451006 kolonu için plastik mafsalları

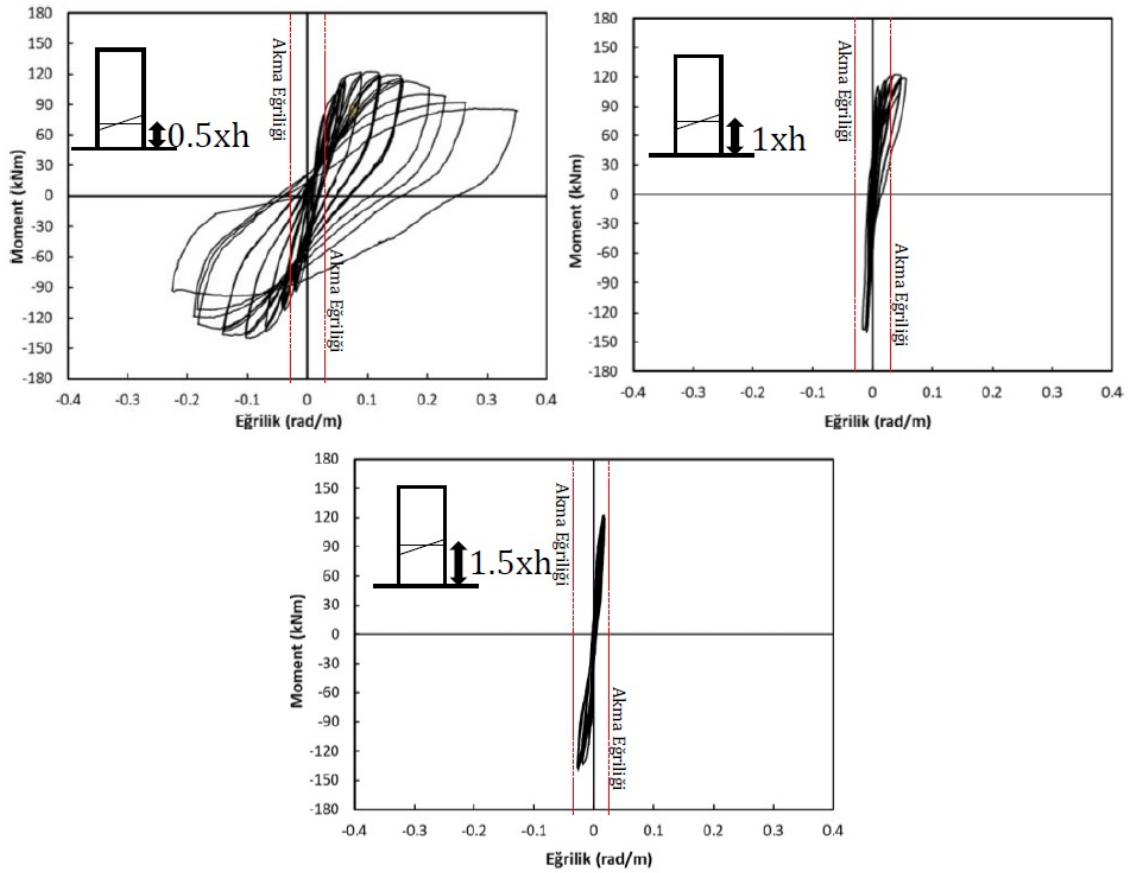
S452006

Deney elemanlarının sismik analizi sırasında kullanılan LVDT cihazlarından alınan değerler ile kolon boyunca üç ayrı seviyede (0.5h-1h-1.5h) eğrilik değerleri hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 4.42’de diyagram üzerinde gösterilmiştir.



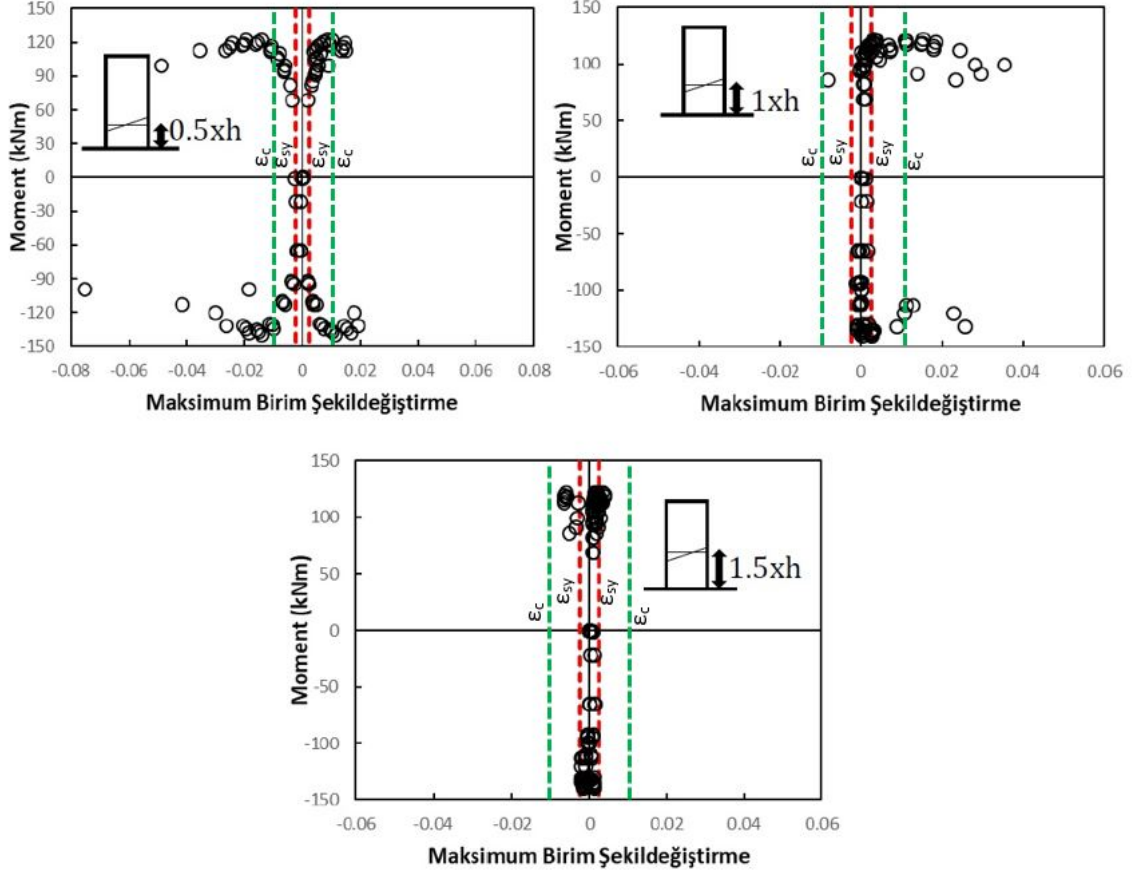
Şekil 4.42 S452006 için kolon boyunca eğrilik diyagramı

Benzer şekilde LVDT’lerden elde edilen eğrilik ile moment diyagramları üç seviye için Şekil 4.43’de gösterilmektedir.



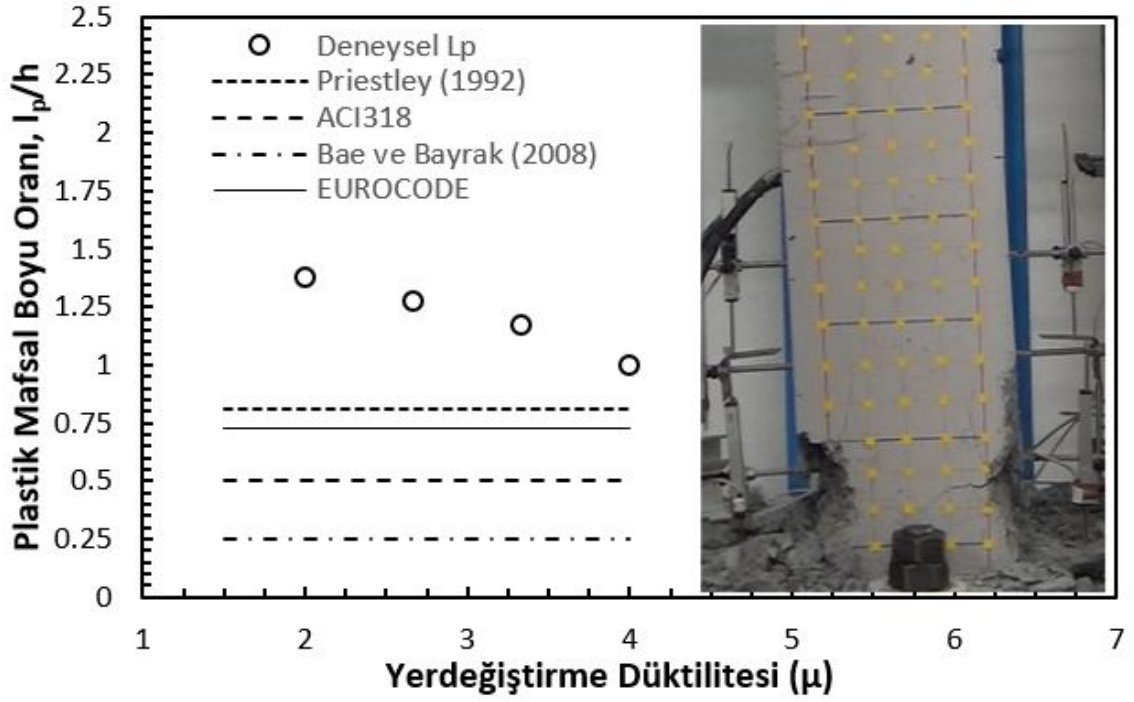
Şekil 4.43 S452006 için üç farklı seviyede moment-eğrilik diyagramı

Şekil 4.43'e göre kolon 0.5xh seviyesinde itme ve çekme durumunda, 1xh seviyesinde ise itme durumunda akma eğriliğini aşan değerlerin olduğu görülmektedir. 1.5xh seviyesinde akma eğriliği değerinin altında değerler oluşmaktadır. Benzer şekilde üç farklı seviyeye yerleştirilen LVDT okumalarından elde edilen maksimum birim şekil değiştirmelerin değerleri Şekil 4.44'de gösterilmektedir.



Şekil 4.44 S452006 için farklı seviyelere ait maksimum birim şekil değiştirme diyagramı

Şekil 4.44'e göre üç farklı seviye için elde edilen maksimum birim şekil değiştirme diyagramları incelendiğinde 0.5xh yüksekliğine kadar itme-çekme durumu için akma birim şekil değiştirme değerlerinin aşıldığı görülmektedir. 1xh seviyesinde ise sadece itme durumunda akma birim şekil değıştirme değerini geçtiği belirlenmiştir. 1.5xh seviyesinde ise akma birim şekil değıştirme değerlerine bir miktar geçtiği tespit edilmiştir. DeneySEL sonuçlara göre hesaplanan plastik mafsallık boyu ile plastik mafsallık modellerine göre hesaplanan değerler Şekil 4.45'de gösterilmektedir.



Şekil 4.45 S452006 kolonu için plastik mafsal boyu

4.3 Deneyisel ve Analitik Modellerin Karşılaştırılması

Deneyisel veriler incelendiğinde elde edilen sonuçlar maddeler halinde aşağıda özetlenmiştir.

- Eksenel yük seviyesi yüksek elemanların plastik mafsal boyu, eksenel yük seviyesi düşük elemanlara göre daha yüksek olmaktadır.
- Kesme açıklığının etkili derinliğe oranı (a/d) yüksek elemanlarda, a/d oranı düşük olan elemanlara göre daha yüksek plastik mafsal boyu oluşmaktadır.
- Plastik mafsal boyu eksenel yük seviyesinden etkilenmektedir. Priestley ve Paulay'a ait bağıntı bu parametreden bağımsız olmasına rağmen uygun sonuçlar vermektedir. Bu durum için kolon L boyunun plastik mafsal boyunda daha etken olduğu düşünülebilir.
- Bae ve Bayrak modeli eksenel yük seviyesini dikkate almasına rağmen plastik mafsal boyunu düşük tahmin etmektedir.
- ACI318 ve TBDY plastik mafsal boyunu tüm elemanlarda aynı değer kabul etmekte olup, gerçek değerlerin altında kalmaktadır. Bu durum $1xh$ - $1.5xh$ seviyelerinde elde edilen eğrilik ve birim şekildeğiştirme değerleri tarafından doğrulanmıştır.

5

YERDEĞİŞTİRME KAPASİTESİ

Dünyada betonarme elemanların tasarımında yaygın olarak kuvvet esaslı yaklaşımlar ile yerdeğiştirme esaslı yaklaşımlar kullanılmaktadır. Şekildeğiştirme esaslı yaklaşımlar, elastik ötesi zorlamalar altında yapısal davranışı daha gerçekçi betimlemesi nedeniyle son yıllarda tasarım yönetmeliklerde yaygın olarak kullanılmaya başlamıştır. Ekonomik bir çözüm olan şekildeğiştirme esaslı yaklaşımlarda amaç betonarme elemanın yerdeğiştirme kapasitesini doğru tahmin edilebilmesidir. Bu amaçla son yıllarda birçok çalışma yapılmıştır. Kowalsky vd. (1994) tarafından yapılan çalışmada, tek serbestlik dereceli betonarme yapıların tasarımında yerdeğiştirmeleri dikkate alarak sismik bir tasarım yapılmıştır [51]. Ardından California Mühendisler Birliği tarafından yayınlanan Vision 2000(1995) belgesinde yapılar için dört farklı performans seviyesi tanımlanmıştır [52]. Priestley vd (1996) tarafından performansa dayalı tasarımın ana ilkelerini örneklerle açıklamıştır [53], [54], [55], [56], [57] . Doğrusal olmayan çok serbestlik dereceli betonarme yapıların elastik ötesi yerdeğiştirme değeri, eşdeğer deprem yükü metoduna göre hesabı FEMA440 yönetmeliğine girmiştir [58].

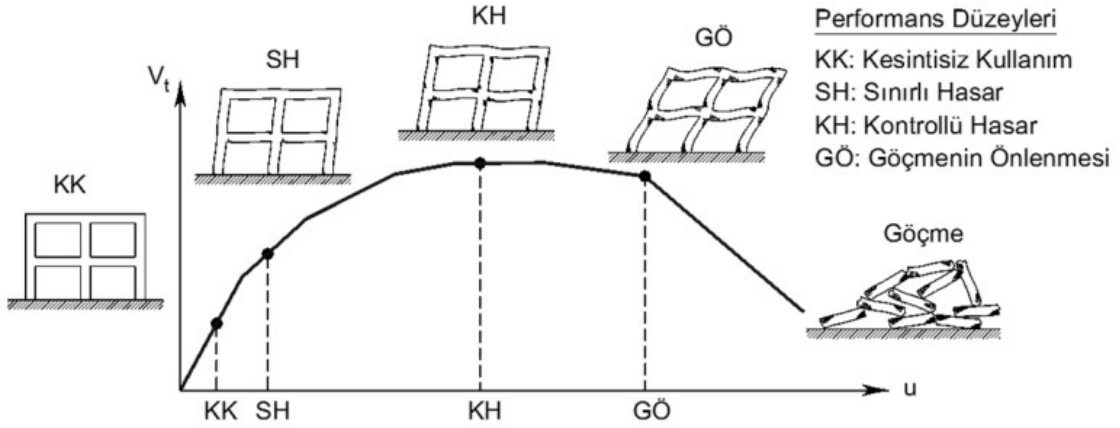
5.1 Yönetmeliklere Göre Yerdeğiştirme Kapasite Tahminleri

Performansa dayalı tasarım gereği betonarme kolonların yerdeğiştirme kapasitesi elastik ötesi davranış ile belirlenmektedir. Dünyada yaygın olarak kullanılan ulusal ve uluslararası yönetmeliklerde yerdeğiştirme kapasitesi farklı yaklaşımlar ile farklı parametrelere bağlı olarak hesaplanmaktadır.

5.1.1 Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY)’e Göre Kapasite Tahmini

Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği’nde (TBDY-2018), mevcut yapı stokunun incelenmesi sürecinde uygulanan performans tespit yöntemleri, “Kuvvet esaslı yöntemler” ve “Şekildeğiştirme esaslı yöntemler” olarak iki başlık altında toplanabilir [44]. Yönetmelik, taşıyıcı sistemleri; Kesintisiz Kullanım (KK), Sınırlı Hasar (SH),

Kontrollü Hasar (KH) ve Göçmenin Önlenmesi (GÖ) olmak üzere dört farklı performans durumuyla ifade etmektedir. Yapı performansının belirlenmesinde yapının tasarım depremi altında yapıda oluşabilecek hasarın beklenen durumu yapısal performans olarak değerlendirilebilir. Yönetmelik'te tanımlanan hasar sınırları ve bu sınırlara karşı gelen hasar bölgeleri, Şekil 5.1'deki tipik kuvvet-yerdeğiştirme ilişkisi üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 5.1 TBDY'e göre taşıyıcı sistem elemanları için bina performans düzeyleri

TBDY'e göre betonarme kolonların performans düzeyleri; malzeme birim şekildeğiştirmeleri ve elemana ait plastik dönme değerinden 5.1-3 denklemleri yardımıyla hesaplanmaktadır.

$$\varepsilon_c = 0.0035 + 0.07 \sqrt{\omega_{wc}} \leq 0.01 \quad (5.1)$$

$$\varepsilon_s = 0.4 \varepsilon_{su} \quad (5.2)$$

$$\theta_p = \frac{2}{3} [(\phi_u - \phi_y) L_p (1 - 0.5 \frac{L_p}{L_s}) + 4.5 \phi_u d_b] \quad (5.3)$$

Burada; ε_c en dış beton basınç lifindeki kısılmayı, ω_{wc} enine donatı mekanik indeksi, ε_s boyuna donatıya ait birim uzama, ε_{su} boyuna donatıya ait maksimum gerilme anındaki birim uzama, θ_p elemana ait plastik dönme oranını, ϕ_u kesite ait maksimum eğriliği, ϕ_y kesite ait akma eğriliğini, L_p plastik mafsallı boyunu, L_s kolon boyunu ve d_b boyuna donatı çapını ifade etmektedir.

5.1.2 EUROCODE-8'e Göre Kapasite Tahmini

EUROCODE-8 betonarme kolonların hasar düzeyini birçok parametreye bağlı olarak hesaplamaktadır [46], [59]. Göçme öncesi performans düzeyi için betonarme kolonda yatay yük taşıma kapasitesinde %20 azalmaya karşılık gelen nokta olarak belirlenmektedir. EUROCODE-8'de, yukarıda belirtilen performans seviyelerine karşılık gelen üç sınır durumu kullanılır; Sınırlı Hasar (DL), Önemli Hasar (SD) ve Göçme Öncesi (NC). EUROCODE-8'e göre her bir sınır durumu için karşılık gelen bir dönme değeri vardır. Göçme öncesi sınır durumu (elastik ve plastik davranış toplamı) için toplam dönme kapasitesi 5.4 denkleminde hesaplanmaktadır.

$$\theta_{um} = \frac{1}{\gamma_{el}} 0.016 \times 0.3^{\vartheta} \left(\frac{\max(0.01, \omega')}{\max(0.01, \omega)} f_c \right)^{0.225} \left(\min\left(9; \frac{L_v}{h}\right) \right)^{0.35} 25^{\alpha_{sx} \frac{f_{yw}}{f_c}} 1.25^{100\rho_d} \quad (5.4)$$

Burada, γ_{el} sismik eleman katsayısı (birincil taşıyıcı elemanlarda 1.5, ikincil taşıyıcı elemanlarda 1), ϑ boyutsuz eksenel yük ($N/A_c f_c$), h kesit yüksekliği, ω basınç ve çekme için mekanik donatı oranı, L_v kesme açıklığı, f_c beton dayanımı, $f_{yw, enine}$ donatıya ait akma dayanımı, ρ_{sx} yükleme yönüne paralel enine donatı oranı, α donatı katsayısı ve ρ_d diyagonal donatı oranını ifade etmektedir. Benzer şekilde EUROCODE-8'de plastik dönme kapasitesi tahmini için 5.5 denklemi önerilmektedir.

$$\theta_{um} = \frac{1}{\gamma_{el}} 0.0145 \times 0.25^{\vartheta} \left(\frac{\max(0.01, \omega')}{\max(0.01, \omega)} f_c \right)^{0.3} \left(\min\left(9; \frac{L_v}{h}\right) \right)^{0.35} 25^{\alpha_{sx} \frac{f_{yw}}{f_c}} 1.25^{100\rho_d} \quad (5.5)$$

Burada γ_{el} tüm elemanlarda 1.8 olarak alınmaktadır.

5.1.3 FEMA356'e Göre Kapasite Tahmini

FEMA356 Amerika Birleşik Devletlerinde kullanılan betonarme yapıların performans düzeyinde kullanılan bir yönetmeliktir. Bu yönetmelikte performans düzeyleri kesit dönmeleri cinsinden ifade edilmektedir [45]. FEMA356'da verilen şekildeğiştirme limitleri plastik dönme kapasitesini belirlemektedir. Bu sınır değerler; elemanın çökme modu, boyutsuz eksenel yük seviyesi ($N/(A_g f_c)$), enine donatı aralığı ve nominal kesme kapasitesi ($V/(b_w d \sqrt{f_c})$). Göçmenin önlenmesi performans düzeyi için plastik dönme kapasitesi 5.6-9 denklemlerinde verilmektedir.

$$\frac{P}{A_g f_c} \leq 0.1 \rightarrow \frac{V}{b_w d \sqrt{f_c}} \geq 3 \rightarrow \theta_p = 0.02 \quad (5.6)$$

$$\frac{P}{A_g f_c} \leq 0.1 \rightarrow \frac{V}{b_w d \sqrt{f_c}} \geq 6 \rightarrow \theta_p = 0.016 \quad (5.7)$$

$$\frac{P}{A_g f_c} \geq 0.4 \rightarrow \frac{V}{b_w d \sqrt{f_c}} \leq 3 \rightarrow \theta_p = 0.015 \quad (5.8)$$

$$\frac{P}{A_g f_c} \geq 0.4 \rightarrow \frac{V}{b_w d \sqrt{f_c}} \leq 6 \rightarrow \theta_p = 0.012 \quad (5.9)$$

Burada, P eksenel yükü, A_g kesit alanını, f_c beton dayanımını, V maksimum kesme kuvvetini, b_w kesit genişliğini ve d faydalı yüksekliği ifade etmektedir.

5.2 Yönetmeliklerin Karşılaştırılması

Bu çalışma kapsamında üretilen test numunelerinin yönetmeliklere göre yerdeğiştirme kapasiteleri belirlenmiştir. Bu kapasite değerleri, Park ve Paulay (1975) tarafından önerilen tepe noktası yerdeğiştirmesini veren 5.10-11 denklemi ile hesaplanmaktadır [1].

$$\Delta_{top.}] = \Delta_y + \Delta_p = \frac{\phi_y L^2}{3} + (\phi_u - \phi_y) L_p (L - L_p) \quad (5.10)$$

$$\Delta_{top.}] = \Delta_y + \theta_p (L - L_p) \quad (5.11)$$

Burada; $\Delta_{top.}$ tepe noktasında oluşan toplam yerdeğiştirmeyi, Δ_y kesitte akma

oluşturan tepe noktasına ait yerdeğiştirme değerini, ϕ_y kesite ait akma eğriliğini, L kolonun kesme açıklığını, ϕ kesite ait malzeme birim şekildeğiştirmelerinin sınır değerine karşılık gelen maksimum eğriliği, L_p plastik mafsallık boyunu (0.5h kabul edilmiştir) ve θ_p plastik dönme oranını ifade etmektedir. Yönetmeliklere göre belirlenen plastik dönme kapasiteleri Tablo 5.1’de özetlenmiştir.

Tablo 5.1 Kolonlara ait yönetmeliklere göre hesaplanmış plastik dönme kapasiteleri

Kolon	θ_p		
	TBDY	EUROCODE-8	FEMA356
S351008	0.0252	0.0219	0.0190
S352008	0.0147	0.0199	0.0177
S353508	0.0109	0.0155	0.0138
S451008	0.0255	0.0241	0.0200
S452008	0.0149	0.0211	0.0183
S453508	0.0110	0.0171	0.0158
S601008	0.0258	0.0267	0.0200
S602008	0.0148	0.0237	0.0183
S603508	0.0107	0.0189	0.0158
S451006	0.0216	0.0244	0.0200
S452006	0.0123	0.0212	0.0183

Plastik dönme kapasiteleri hesaplanmış test numunelerinin yerdeğiştirme kapasitesi ile deneysel olarak hesaplanmış yerdeğiştirme kapasitesi Tablo 5.2’de gösterilmektedir.

Tablo 5.2 Kolonlara ait yerdeğiştirme kapasiteleri

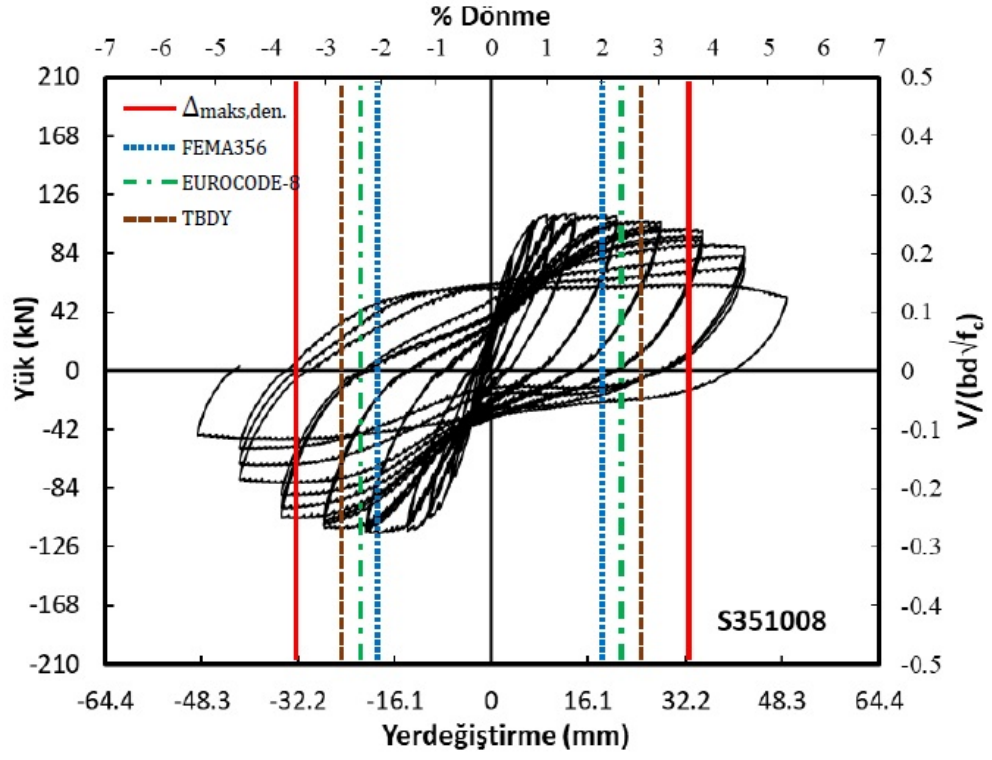
Kolon	Δ_y (mm)	$\Delta_{top.}$ (mm)/Bağlı Hata			Δ_u
		TBDY	EUROCODE-8	FEMA356	
S351008	4.80	24.21/%26	21.64/%34	19.43/%40	32.75
S352008	4.23	15.54/%44	19.56/%29	17.86/%36	27.89
S353508	3.67	12.02/%29	15.58/%8	14.29/%16	17.02
S451008	7.76	33.79/%30	32.34/%33	28.16/%42	48.70
S452008	6.84	22.01/%26	28.34/%5	25.51/%14	29.87
S453508	5.93	17.14/%-9	23.39/%-48	22.05/%-40	15.73
S601008	13.79	50.20/%34	51.37/%32	41.99/%44	76.00
S602008	12.17	33.10/%29	45.55/%2	37.97/%19	46.90
S603508	10.55	25.67/%14	37.23/%-24	32.82/%-10	29.85
S451006	6.84	28.92/%42	31.69/%36	27.24/%45	49.81
S452006	5.93	18.52/%55	27.56/%33	24.60/%40	41.27

Kolonların deneysel yerdeğiştirme kapasitesi için yatay yük taşıma kapasitesinde %20 azalmaya karşılık gelen yerdeğiştirme değeri kabul edilmiştir. Yönetmeliklere

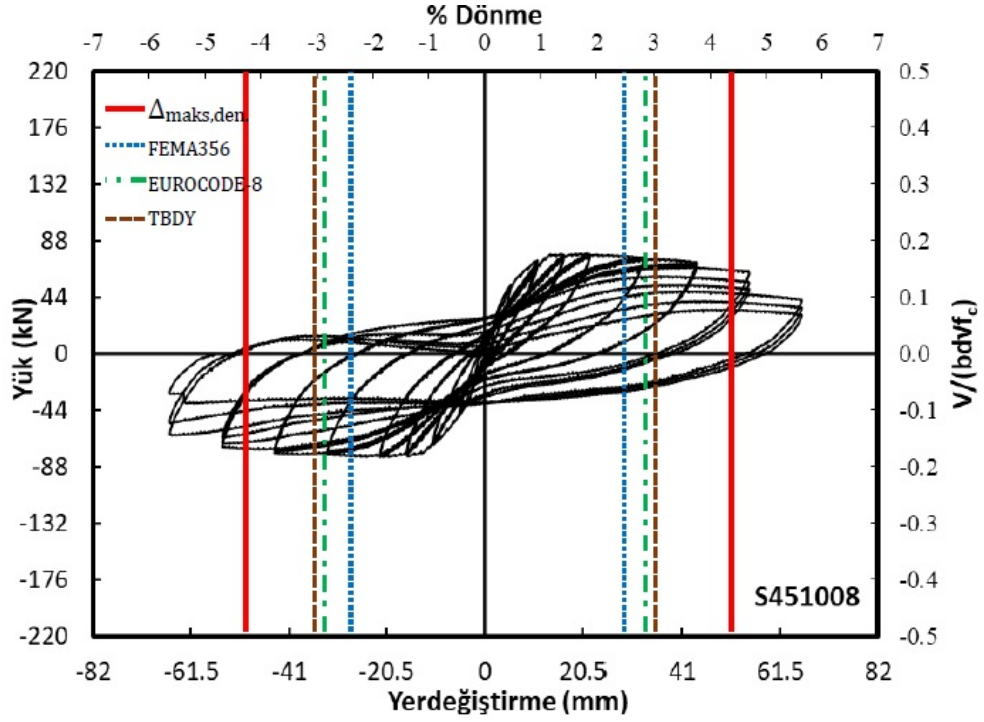
göre hesaplanan yerdeğiştirme kapasitesi ile deneysel hesaplanan yerdeğiştirme kapasitelerinin bağıl hata yüzdeleri Tablo 5.2’de verilmiştir. Deneysel veriler ile analitik veriler incelendiğinde elde edilen sonuçlar maddeler halinde sıralanmıştır.

- TBDY tüm kolonlarda güvenli sonuçlar verdiği görölmektedir. Özellikle eksenel yük seviyesi yüksek kolonlarda bile deneysel sonuçlara yakın tahminde bulunmaktadır. S453508 numaralı kolonda mevcut deneysel kapasite %9 hata ile hesaplanmaktadır. Diğer kolonlarda ise TBDY yaklaşık olarak deneysel kapasitenin altında tahminde bulunmaktadır. Tüm kolonlarda ortalama %29 bağıl hata ile yerdeğiştirme kapasitesini hesaplamaktadır.
- EUROCODE-8 yönetmeliği ise eksenel yük seviyesi yüksek olan kolonlarda daha güvensiz sonuçlar vermektedir. S453508-S603508 numaralı kolonlarda kapasiteyi deneysel kapasiteden yüksek tahmin etmektedir. Diğer kolonlarda ise kapasiteyi oldukça yakın hesaplamaktadır. Tüm kolonlar için ise yerdeğiştirme kapasitesini yaklaşık %12 bağıl hata ile tahmin etmektedir. EUROCODE yönetmeliği eksenel yük seviyesi yüksek kolonlar hariç oldukça iyi sonuçlar vermektedir.
- FEMA356 yönetmeliği ise EUROCODE-8 yönetmeliğine benzer şekilde eksenel yük seviyesi yüksek kolonlarda kapasiteyi yüksek hesaplamaktadır. S453508-S603508 numaralı kolonlarda %40-%10 düzeyinde kapasiteyi yüksek tahmin etmektedir. FEMA356 yönetmeliği TBDY ve EUROCODE-8 yönetmeliklerine göre kapasite hesabında daha az parametreye ihtiyaç duymaktadır. FEMA356 yönetmeliği az parametreyi dikkate almasına rağmen tüm kolonlarda yaklaşık %22 hata payı ile hesap yapmaktadır.

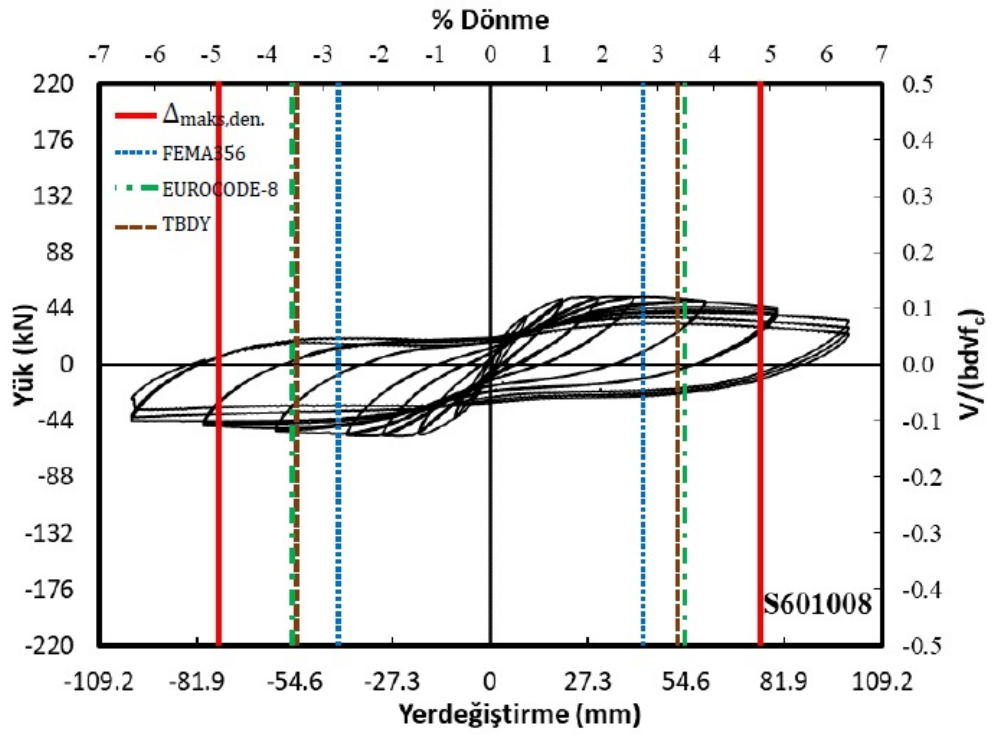
Tüm kolonların yük-yerdeğiştirme eğrileri üzerinde gösterilen kapasiteleri şekil 5.2-12’de gösterilmektedir.



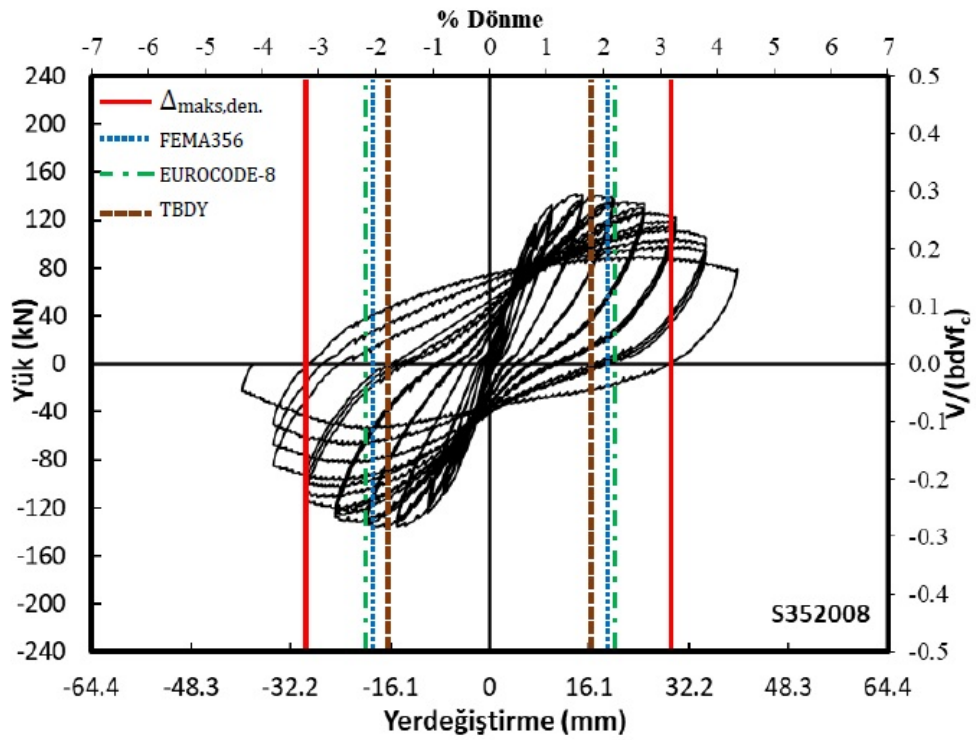
Şekil 5.2 S351008 kolonu için yönetmeliklere göre yerdeğiştirme kapasitesi



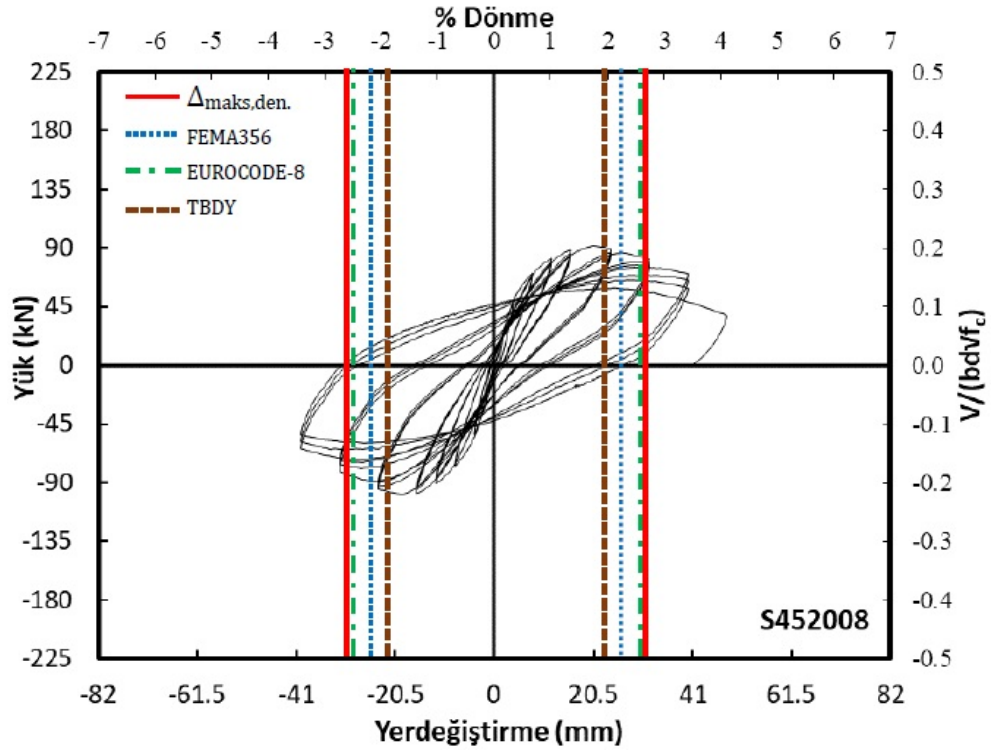
Şekil 5.3 S451008 kolonu için yönetmeliklere göre yerdeğiştirme kapasitesi



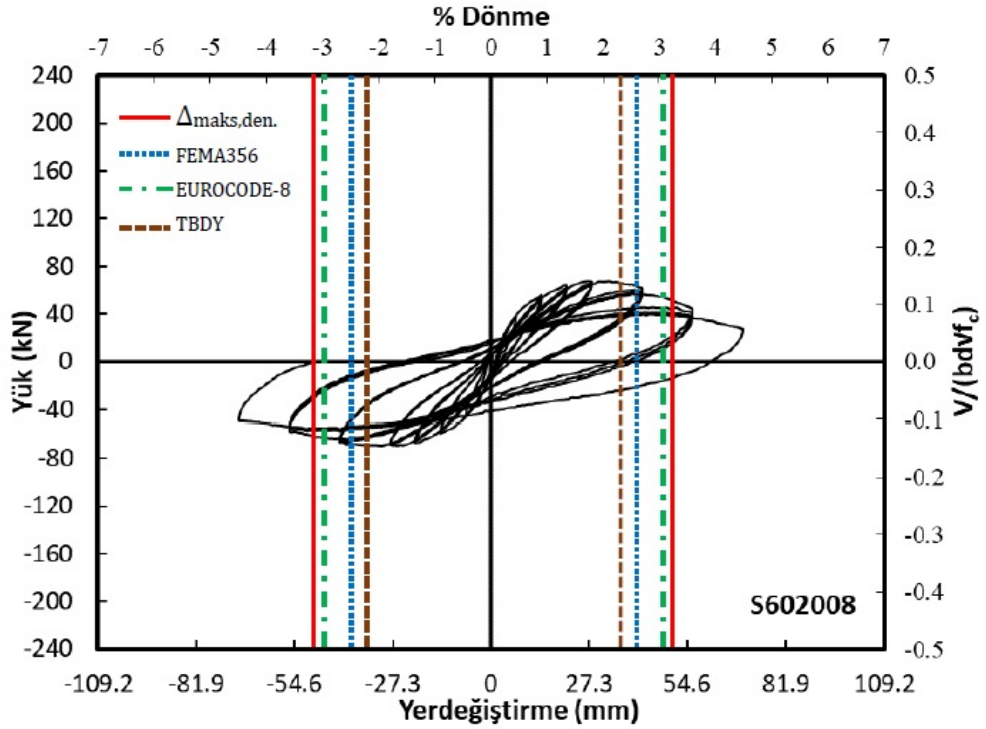
Şekil 5.4 S601008 kolonu için yönetmeliklere göre yerdeğiştirme kapasitesi



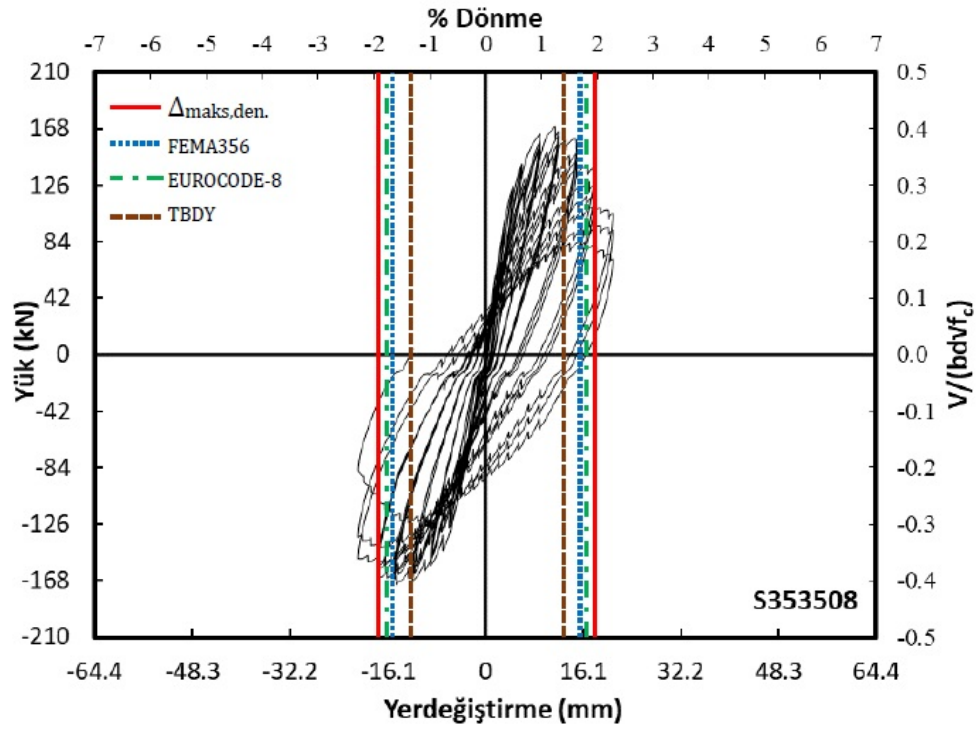
Şekil 5.5 S352008 kolonu için yönetmeliklere göre yerdeğiştirme kapasitesi



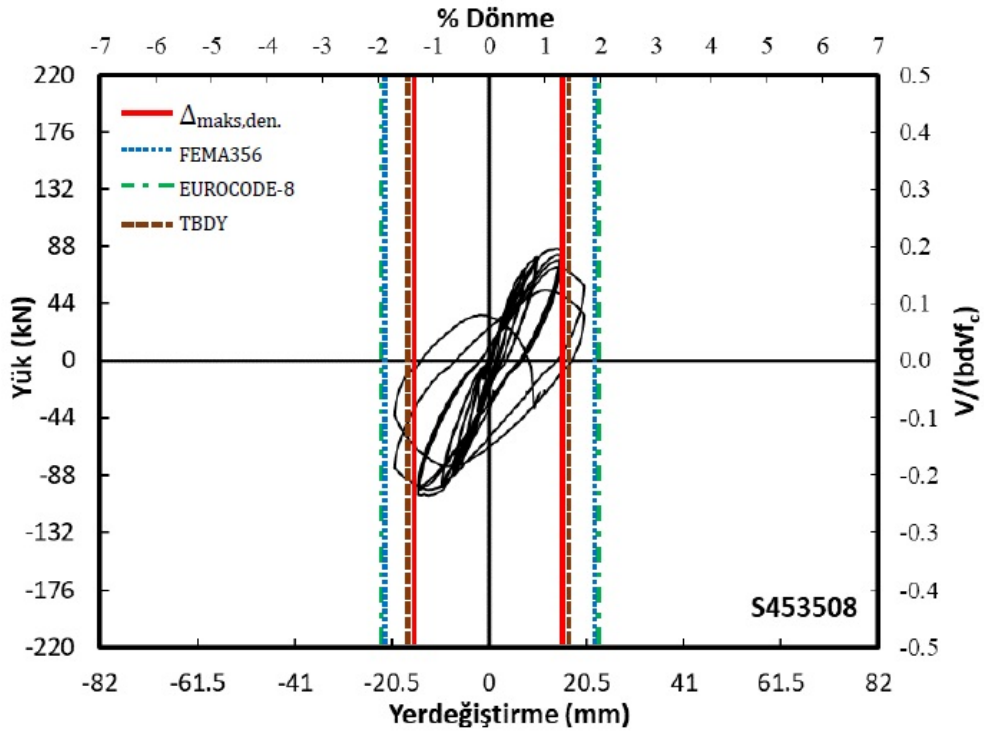
Şekil 5.6 S452008 kolonu için yönetmeliklere göre yerdeğiştirme kapasitesi



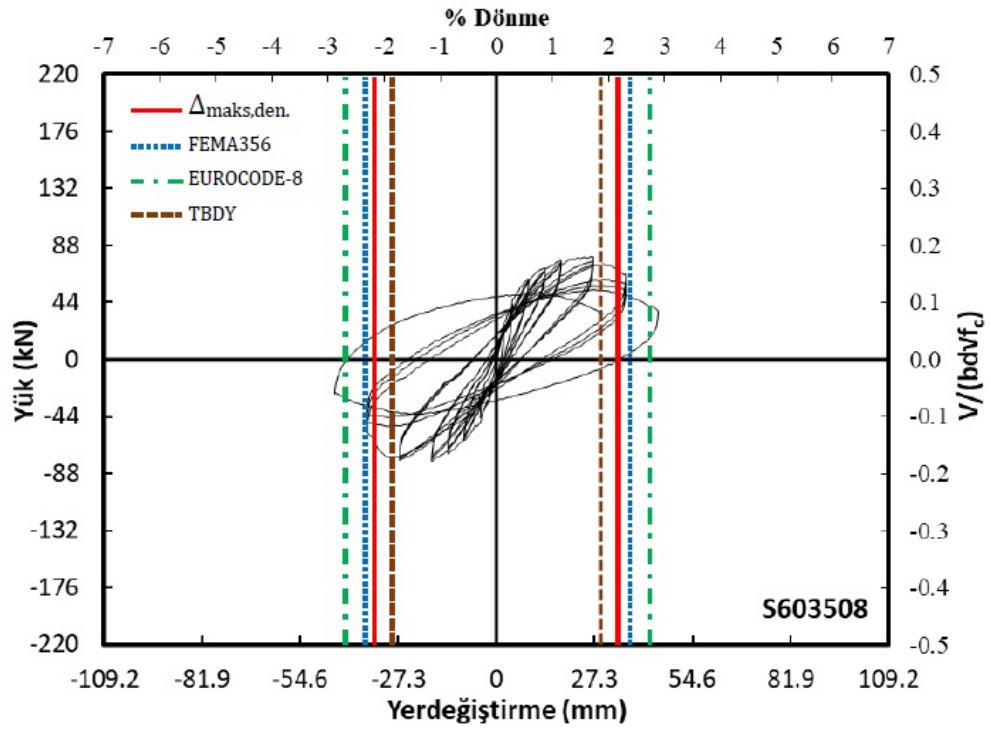
Şekil 5.7 S602008 kolonu için yönetmeliklere göre yerdeğiştirme kapasitesi



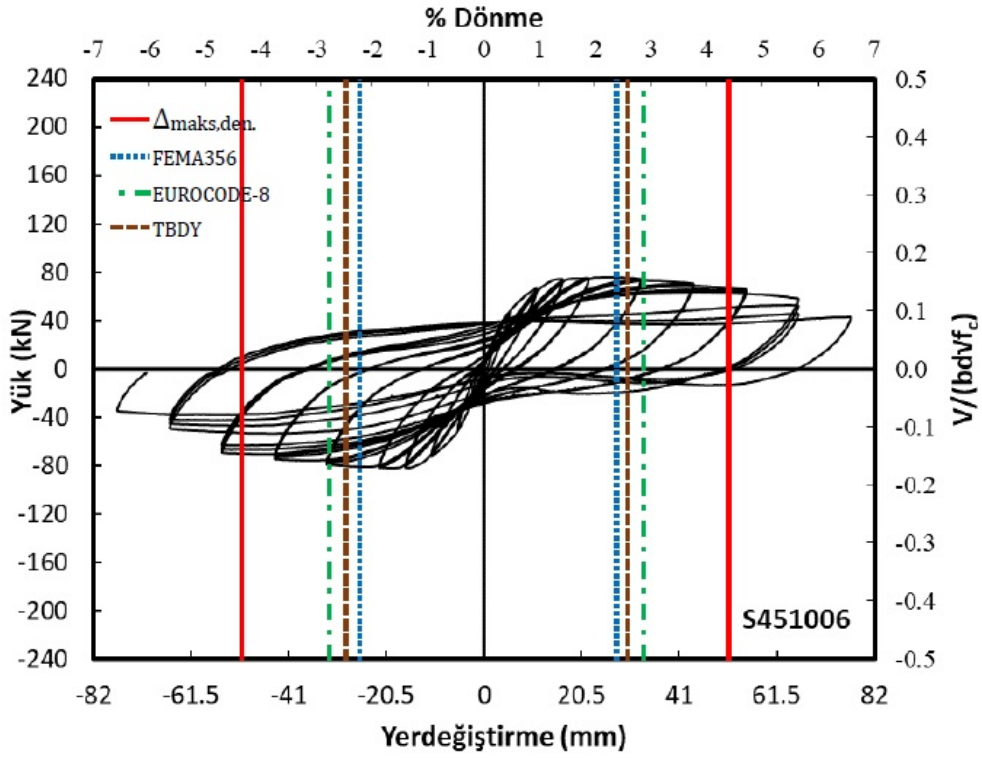
Şekil 5.8 S353508 kolonu için yönetmeliklere göre yerdeğiştirme kapasitesi



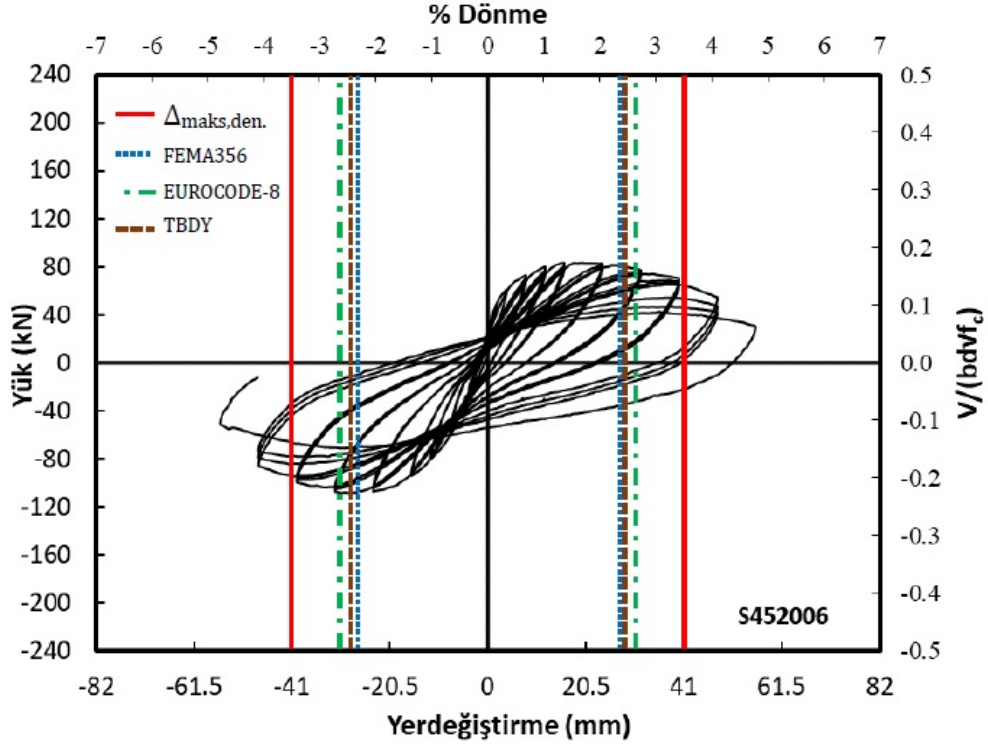
Şekil 5.9 S453508 kolonu için yönetmeliklere göre yerdeğiştirme kapasitesi



Şekil 5.10 S603508 kolonu için yönetmeliklere göre yerdeğiştirme kapasitesi



Şekil 5.11 S451006 kolonu için yönetmeliklere göre yerdeğiştirme kapasitesi



Şekil 5.12 S452006 kolonu için yönetmeliklere göre yerdeğiştirme kapasitesi

Yük-yerdeğiştirme ilişkileri üzerinde gösterilen yönetmeliklere göre hesaplanmış yerdeğiştirme kapasiteleri incelendiğinde elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

- Eksenel yük seviyesi düşük elemanlarda ($N/(A_c f_c) = 0.1$) tez çalışması kapsamında irdelenen yönetmeliklerin tamamı kapasiteyi beklenen değerin altında hesaplamıştır.
- Eksenel yük seviyesi orta düzeyde olan elemanlarda ($N/(A_c f_c) = 0.2$) yönetmeliklere göre hesaplanan yerdeğiştirme kapasitesi beklenen değere yaklaşmaktadır.
- Eksenel yük seviyesi yüksek elemanlarda ($N/(A_c f_c) = 0.35$) yönetmeliklerin tamamı kapasiteyi beklenen değerin üzerinde hesaplamıştır.
- Eksenel yük seviyesi arttıkça yönetmeliklerin hata payı artmaktadır. Mevcut betonarme kolonların tasarımında yönetmeliklere göre $N/(A_c f_c) = 0.4$ seviyesine kadar eksenel yük değerine müsaade edilmektedir. Bu sebepten dolayı yönetmeliklerin kapasitesi bu eksenel yük seviyesinde uygun sonuçlar vermemektedir. Yönetmeliklerin hesaplarda kullandığı parametrelerde eksenel yüke ait değişkenin etki değerinin araştırılması önem arz etmektedir.
- Tez çalışması kapsamında incelenen yönetmelikler kesme açıklığının etkisinde uygun şekilde yansıtmaktadır. Kesme açıklığındaki değişkenlik yönetmeliklerin sonuçlarında aykırı bir etkiye sebep olmamaktadır.

Betonarme kolonlar, performansa dayalı tasarım prensibi gereği farklı yükleme durumları için belirli hasar limitlerine göre tasarlanabilir. Performansa dayalı tasarım sürecinde, analitik hasar indeksi modelleri, hasar durumunu sayısal ifade etmek için kullanılmaktadır. Farklı yükleme durumları için betonarme kolonların performansı, hasar indeksi modelleri kullanılarak tahmin edilebilir.

Önceki çalışmalar incelendiğinde, hasar indeksleri genel olarak dört farklı yaklaşım benimsemiş olup bunlar; bir parametreye bağlı yaklaşımlar, sönümleme enerjisi kullanan bağıntılar, bazı parametreler ile sönümleme enerjisini beraber kullanan hibrid bağıntılar ve malzemelerin yorulma etkisini dikkate alan modeller olarak sıralanabilir [7], [19], [60].

Daha önceki çalışmalarda, Banon vd. (1981) tarafından rijitliğe bağlı hasar indeksi geliştirilmiştir [61]. Sonrasında, Banon ve arkadaşlarının formülü, Roufaiel ve Meyer tarafından rijitlik ve süneklığe bağlı olarak geliştirilmiştir [62]. Ancak, bir yapıya veya bileşenlerine verilen hasar, bir deprem sırasındaki çevrimsel yüklemeye bağlı yerdeğiştirme kapasitesinden kaynaklanmaktadır. Betonarme kolonların çevrimsel yükleme altında hem rijitlik hem de dayanımında azalmalar oluşmaktadır. Bu çevrimsel yükün etkisi, tekrar sebebiyle, kümülatif etki etmelidir. Bu nedenle Park ve Ang çevrimsel yükleme altındaki eğilme hasarını ölçmek için süneklilik oranını birincil değişken olarak normalleştirmiştir [7]. Ancak, kümülatif sönümleme enerji ikincil değişken olarak dikkate alınmıştır. Powell ve Allahabadi (1988), hasar indeksini belirlemek için betonarme kolondaki plastik yerdeğiştirmeleri hesaba katacak şekilde bağıntı önermiştir [63]. Kratzig ve Meskouris betonarme elemanların hasar indeksini belirlemek için kolonun sönümleme enerjisine dayanan bir formülasyon geliştirmiştir [60].

Betonarme kolonlar ulusal ve uluslararası yönetmeliklere göre sünek tasarım prensibine göre tasarlanmaktadır. Elastik ötesi davranış gereği betonarme kolonlarda yapısal hasarlar meydana gelmektedir. Bazı araştırmacılar tarafından bu hasar

durumları 0-1 arasında ölçeklendirilerek sınıflandırılmaktadır. Bu ölçeklendirmede 0 hasarsız durumu, 1 ise çökme durumunu ifade etmektedir. Literatürde kullanılan hasar indekslerine ait ölçek Tablo 6.1’de sunulmaktadır.

Tablo 6.1 Hasar indeks modellerine göre hasar seviyeleri ve göstergeleri

Hasar Seviyesi	Hasar İndeksi	Hasar Göstergeleri
I	$D < 0.1$	Hasar yok
II	$0.1 < D < 0.25$	İnce çatlaklar
III	$0.25 < D < 0.4$	Belirgin hasar ve kabuk betonda ezilme
IV	$0.4 < D < 1$	Burkulma ve çekirdek betonda ezilme
V	$1 < D$	Çökme

Hasar seviyesi I durumunda minimum hasarı temsil ederken, hasar artışı ile artan katsayı 1 değeri ve üzerinde çökme durumunu temsil etmektedir. Deprem sonrası oluşan hasarın tespiti için hasar indekslerine ait ölçek kullanılabilir.

6.1 Hasar İndeksi Modelleri

Betonarme kolonlara ait hasar indeksine ait çalışmalar son 30 yıldır yaygın şekilde araştırılmaktadır. Bu tez çalışması kapsamında literatürde sıkça kullanılan hasar indeksi modelleri kullanılmıştır.

6.1.1 Kratzig ve Meskouris (1987) Hasar İndeksi

Kratzig ve Meskouris (1987) tarafından yapılan çalışmada, betonarme kolonun çevrimsel yükleme altında sönümlendiği enerjinin, monotonik yükleme altında hesaplanan son limit durumdaki enerjiye oranından elde ederek hasarı sayısal olarak ifade etmiştir [60].

$$D^+ = \frac{\Sigma E_{si} + \Sigma E_i}{E_u + \Sigma E_i} \quad (6.1)$$

$$D^- = \frac{\Sigma E_{si} + \Sigma E_i}{E_u + \Sigma E_i} \quad (6.2)$$

Burada; E_{si} ilk çevrimsel yüklemenin enerjisini, E_i sonraki çevrimsel yüklemenin enerjisini ve E_u ise monotonik yükleme sonucu elde edilen toplam enerjiyi ifade etmektedir. İtme ve çekme için hesaplanan hasar değerlerine göre toplam hasar 6.3 denkleminde ifade edilmiştir.

$$DI = D^+ + D^- - D^+ D^- \quad (6.3)$$

6.1.2 Park ve Ang (1985) Hasar İndeksi

Park ve Ang (1985) tarafından yapılan çalışmada, hasarı yerdeğiştirme ve çevrimsel enerjiye bağlı olarak hesaplamıştır [7].

$$D = \frac{\Delta_m}{\Delta_u} + \beta \frac{\int dE}{F_y \Delta_u} \quad (6.4)$$

Burada 6.4 denkleminde ifade edilen bağıntıda; Δ_m i anındaki yerdeğiştirmeyi, Δ_u monotonik yükleme altında son limit duruma ait yerdeğiştirmeyi, F_y maksimum kesme kuvvetini ve dE ise i anına kadar kümülatif enerjiyi ifade etmektedir. Burada β (0.27-0.6) bir katsayı olup, çevrimsel yüklemenin toplam enerjisinin monotonik yüklemenin son limit durumundaki enerjisine oranını ifade etmektedir.

6.1.3 Düzeltilmiş Park ve Ang (1985) Hasar İndeksi

Kunnath (1992) tarafından yapılan çalışmada, Park ve Ang'a ait bağıntı geliştirilerek 6.5 denkleminde ifade edilen forma getirilmiştir [64].

$$D = \frac{\Delta_m - \Delta_y}{\Delta_u - \Delta_y} + \beta \frac{\int dE}{F_y \Delta_u} \quad (6.5)$$

Burada; Δ_y akma yerdeğiştirmesini ifade etmektedir.

6.1.4 Powell ve Allahabadi (1989) Hasar İndeksi

Powell ve Allahabadi (1988) tarafından yapılan çalışmada, hasar düzeyini maksimum yerdeğiştirme ile akma yerdeğiştirmesine bağlı olarak ifade etmiştir [63].

$$D = \frac{\theta_m - \theta_y}{\theta_u - \theta_y} \quad (6.6)$$

Burada; θ_m her adımda hesaplanan ötelenme oranı, θ_y akma anında hesaplanan ötelenme oranı ve θ_u ise monotonik yükleme altında yapabileceği maksimum ötelenme oranı olarak belirtilmiştir.

6.1.5 Yumuşama Hasar İndeksi

Literatürde sıkça kullanılan bir diğer yaklaşım ise yumuşama indeksidir. Bu yaklaşımda yapının rijitliğindeki azalmaya bağlı olarak hasar düzeyi hesaplanmaktadır [62].

$$D = \frac{k_m - k_0}{k_f - k_0} \quad (6.7)$$

Burada k_m her bir çevrim için maksimum yerdeğiştirme anındaki rijitliği, k_f monotonik yükleme altında kırılma noktasına karşılık gelen rijitliği ve k_0 ise yükleme başlangıcındaki ilk rijitliği ifade etmektedir.

6.2 Hasar İndeksi Önerisi

Hasar indeksi için literatürde kullanılan modeller incelendiğinde sönümlleme enerjisi, monotonik yüklemeye ait maksimum yerdeğiştirme kapasitesi ve akma yerdeğiştirmesi gibi parametreler kullanılmaktadır. Bu parametrelerin tamamını yansıtan sönümlleme enerjisi ortak bir değer olarak kabul edilebilir. Bu amaçla betonarme kolonların normalize edilmiş sönümlleme enerjileri ile eleman bazındaki düktilite arasında bir ilişki bulunmaktadır. Bu tez çalışması kapsamında önerilen hasar indeksi modeli yerdeğiştirme düktilitesine bağlı ifade edilmiştir. Bu amaçla literatürde sıklıkla kullanılan 48 betonarme kolona ait deneysel veriler kullanılmıştır. Bu amaçla PEER veri tabanında bulunan 48 adet dikdörtgen kesite sahip betonarme kolon incelenmiştir [65]. Çalışma kapsamında oluşturulan veri tabanı için incelenen parametreler; mekanik donatı indeksi, enine donatı oranı, L/h kesme açıklığının kesit yüksekliğine oranı ve boyutsuz eksenel yük seviyesi olarak belirlenmiştir. Tez çalışması için kullanılan 48 betonarme kolonun özellikleri Tablo 6.2-3'de özetlenmiştir.

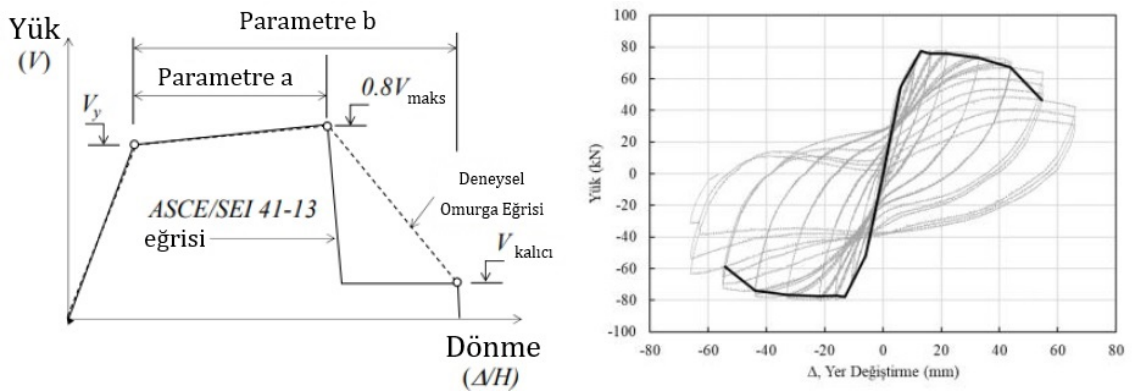
Tablo 6.2 Veri tabanındaki kolonlara ait özellikler

Kolon Adı	Adet	$N/A_c f_c$	L/h	N/N_o
S350108 vd.	11	0.1-0.35	3.03-5.2	0.09-0.33
Azizinamini vd. 1988 [66]	2	0.31-0.20	3.00	0.291-0.193
Bechtoula, Kono, Arai vd. [67]	2	0.6-0.567	2.5-2	0.522
Matamoros [68]	2	0.143-0.211	3.00	0.131-0.207
Mugaruma vd. 1989 [69]	1	0.423	2.50	0.431
Paultre ve Legeron [70]	4	0.13-0.39	6.56	0.11-0.41
Saatcioglu ve Ozcebe 1989 [5]	1	0.153	2.86	0.118
Xiao vd. [71]	1	0.192	2.00	0.192
Saatcioglu ve Grira 1999 [72]	2	0.46-0.23	4.70	0.371-0.185
Bayrak ve Sheikh 1996 [73]	3	0.36-0.5	6.04	0.47-0.35
Thomsen ve Wallace 1994 [74]	2	0.2-0.1	3.92	0.20-0.09
Sugano 1996 [75]	2	0.599-0.3	2.00	0.65-0.38
Lehman vd. [20]	1	0.072	8.00	0.067
Calderone vd. [76]	1	0.091	10.00	0.075
Lim vd.. 1990 [77]	2	0.241	7.5-3.75	0.1530
Zhou vd. 1987 [78]	1	0.8	2.00	0.6618
Watson ve Park 1989 [8]	4	0.7-0.5	4.00	0.68-0.48
Ang vd. 1981[2]	3	0.55-0.21	4.00	0.502-0.189
Soesianawati vd. 1986 [79]	2	0.1-0.3	4.00	0.10-0.29
NIST Model [6]	1	0.211	3.00	0.1717
Toplam	48	0.072-0.8	2-10	0.067-0.68

Tablo 6.3 Veri tabanındaki kolonların ait malzeme ve geometrik özellikleri

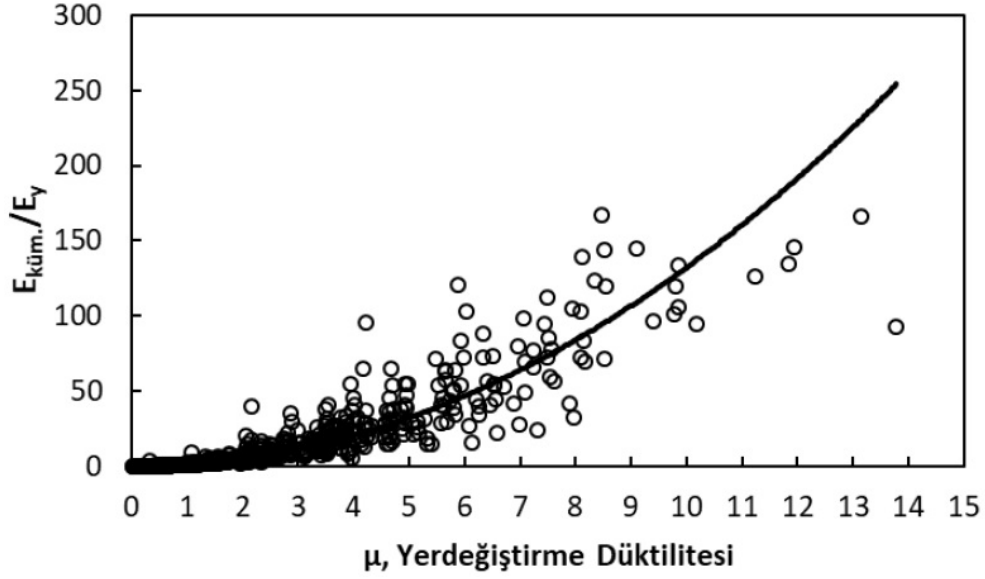
Kolon Adı	Adet	$f_c(MPa)$	$f_y(MPa)$	ρ_t
S350108 vd.	11	29-40	480	0.0136
Azizinamini vd. 1988 [66]	2	39.5	439	0.0194
Bechtoula, Kono, Arai vd. [67]	2	37.6	461	0.0243
Matamoros [68]	2	48-65.5	586-572	0.0193
Mugaruma vd. 1989 [69]	1	115.8	399	0.038
Paultre ve Legeron [70]	4	94-104.3	451-430	0.0215
Saatcioglu ve Ozcebe 1989 [5]	1	32	438	0.0321
Xiao vd. [71]	1	86	510	0.0246
Saatcioglu ve Grira 1999 [72]	2	34	455	0.0293
Bayrak ve Sheikh 1996 [73]	3	101-71.7	454	0.0258
Thomsen ve Wallace 1994 [74]	2	87-74.6	475	0.0245
Sugano 1996 [75]	2	118	393	0.0186
Lehman vd. [20]	1	31	462	0.0149
Calderone vd. [76]	1	34.5	441	0.0273
Lim vd.. 1990 [77]	2	34.5	448	0.0558
Zhou vd. 1987 [78]	1	21.1	341	0.0222
Watson ve Park 1989 [8]	4	42-39	474	0.0151
Ang vd. 1981[2]	3	28-23.6	308-427	0.024-0.015
Soesianawati vd. 1986 [79]	2	46.5-44	446	0.0151
NİST Model [6]	1	23.1	446	0.0196
Toplam	48	21.1-115.8	308-586	0.0136-0.032

Kolon deneylerinin sonuçları irdelendiğinde akma yerdeğiştirmesinin belirlenmesi amacıyla ASCE/SEI 41-13 yönetmeliğinde ifade edilen Backbone (Omurga) eğrisi çizilmiştir [80]. ASCE yönetmeliğinde çizilen omurga eğrisi ile mevcut veritabanında uygulanan örnek omurga eğrisi Şekil 6.1’de gösterilmektedir.

**Şekil 6.1** ASCE/SEI 41-13 yönetmeliğine göre omurga eğrisi çizimi [80]

Yük-yerdeğiştirme ilişkisi bilinen betonarme kolonların her bir çevrimine ait sönümleme enerjileri ile her bir çevrime ait düktilite değerleri arasında yüksek korelasyona sahip bir ilişki bulunmaktadır. Bu amaçla 48 betonarme kolon için 603

çevrime ait sönümlenme enerjisi ile düktilite değeri, akma değeri ile normalize edilerek gösterimi Şekil 6.2’de verilmiştir.



Şekil 6.2 Normalize edilmiş kümülatif sönümlenme enerjisi ile düktilite ilişkisi

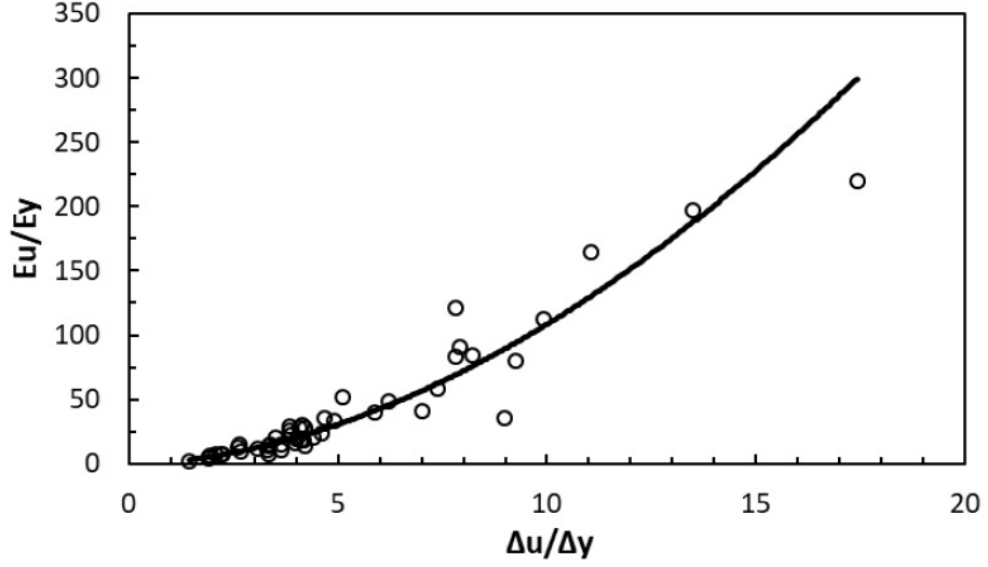
Şekil 6.2’de elde edilen sonuçlara göre 603 kolon verisi için $R^2 = 0.94$ korelasyona sahip ilişki bulunmaktadır. Sonuca göre normalize edilmiş kümülatif sönümlenme enerjisi ile düktilite arasındaki ilişki 6.8 denkleminde verilmektedir.

$$\frac{E_{i,kum}}{E_y} = \left(\frac{\Delta_i}{\Delta_y} \right)^{2.06} \quad (6.8)$$

Benzer şekilde incelenen betonarme kolonların taşıma gücünde %20 azalmaya karşılık gelen yerdeğiştirme değeri için belirlenen kümülatif sönümlenme enerjisi kolona ait son limit duruma ait enerjiyi ifade etmektedir. Veri tabanı için kullanılan 48 betonarme kolon için hesaplanan göçme moduna karşılık gelen sönümlenme enerjisi ile göçme anına karşılık gelen yerdeğiştirme düktilite değeri arasındaki ilişki Şekil 6.3’de gösterilmektedir. Belirlenen kolonlarda göçme modu için yatay yük taşıma kapasitesinde %20 azalmaya karşılık gelen yerdeğiştirme değeri kabul edilmiştir.

Şekil 6.3’de verilen sonuçlara göre 48 kolon verisi için $R^2 = 0.92$ korelasyona sahip ilişki bulunmaktadır. Sonuca göre göçme durumuna ait normalize edilmiş kümülatif sönümlenme enerjisi ile düktilite arasındaki ilişki 6.9 bağıntısında verilmektedir.

$$\frac{E_u}{E_y} = \left(\frac{\Delta_u}{\Delta_y} \right)^{1.97} \quad (6.9)$$



Şekil 6.3 Göçme durumuna ait normalize edilmiş kümülatif sönümleme enerjisi ile düktilite ilişkisi

Literatürde kullanılan hasar indeksi modelleri incelendiğinde betonarme elemanların hasarı herhangi bir i adımında elde edilen yerdeğiştirme veya enerjinin son limit durumuna karşılık yerdeğiştirme veya enerjisine oranı olarak tanımlanmaktadır. Sıklıkla kullanılan hasar modellerinde monotonik yükleme altında elde edilen enerji veya yerdeğiştirme değeri kapasite olarak değerlendirilip hasarı belirlemede kullanılmaktadır. Kunnath vd. (1997) tarafından yapılan çalışmada, betonarme elemanların yükleme profilinden etkilendiği tespit edilmiştir [19]. Bu durumda betonarme elemanların kapasitesini monotonik yüklemekten elde edilen değer olarak belirlemek doğru olmayabilir. Bu amaçla bu çalışmada betonarme elemanların hasar indeksini belirlemek için gerçek yüklemelerden elde edilen sonuçlara göre kapasiteyi tahmin edilmesi amaçlanmıştır. Betonarme elemanın herhangi bir i anındaki kümülatif sönümleme enerjisinin yerdeğiştirme kapasitesine ulaşınca kadar sönümleyeceği kümülatif enerjiye oranı hasarın değerini ifade etmektedir. Bu ilişki 6.10 denkleminde gösterilmektedir.

$$D = \frac{E_i}{E_u} \quad (6.10)$$

Daha önce elde edilen ilişkiler 6.11 denkleminde yerine yazılırsa yerdeğiştirme düktilitesine bağlı hasar modeli yazılır.

$$D = \frac{E_y \times \mu_i^{2.06}}{E_y \times \mu_u^{1.97}} = \frac{\mu_i^{2.06}}{\mu_u^{1.97}} \quad (6.11)$$

6.9 numaralı denklemde verilen bağıntıya göre betonarme kolonların hasar indeksi sönümlleme enerjisinden elde edilmiş yerdeğiştirme düktilitesine bağlı olarak hesaplanmaktadır. Burada herhangi bir i anındaki yerdeğiştirme değerine karşılık hesaplanması gereken 2 değer bulunmaktadır. Bunlar sırasıyla akma yerdeğiştirmesi ve yükte %20 azalmaya karşılık gelen yerdeğiştirme kapasitesidir. Akma yerdeğiştirmesi için kesit analiz programlarından elde edilen akma eğriliğinin belirlenmesi yeterli gelmektedir. Bu durumda belirlenen akma eğriliği Priestley ve Paulay (1975) tarafından verilen 6.12 denklemi ile akma yerdeğiştirmesine dönüştürülmektedir [1].

$$\Delta_y = \frac{\phi_y \times L^2}{3} \quad (6.12)$$

TBDY'e göre betonarme elemanların şekildeğiştirme sınırları beton ve donatı cinsinden 6.13 ve 6.14 numaralı denklemlerde ifade edilmiştir.

$$\varepsilon_c = 0.0035 + 0.07\sqrt{\omega_{wc}} \leq 0.01 \quad (6.13)$$

$$\varepsilon_s = 0.4\varepsilon_{su} \quad (6.14)$$

Betonarme kolonların mekanik özelliklerine göre belirlenen şekildeğiştirme sınırları göçme anını ifade etmektedir. Kesit analiz programları yardımıyla betonarme elemanların malzeme şekildeğiştirme sınır değerine karşılık belirlenen maksimum eğrilik kapasite olarak değerlendirilebilir. Bu amaçla TBDY'de verilen göçme anındaki plastik dönme değeri 6.15 denkleminde verilmiştir.

$$\theta_p = \frac{2}{3}[(\phi_u - \phi_y)L_p(1 - 0.5\frac{L_p}{L_s}) + 4.5\phi_u d_b] \quad (6.15)$$

TBDY'e göre göçme öncesi limit durum için elde edilen plastik dönme kapasitesinden betonarme elemanın yerdeğiştirme kapasitesi hesaplanabilir. Bu çalışmada analitik olarak elde edilen bu kapasite hasar indeksinin belirlenmesinde kullanılmaktadır.

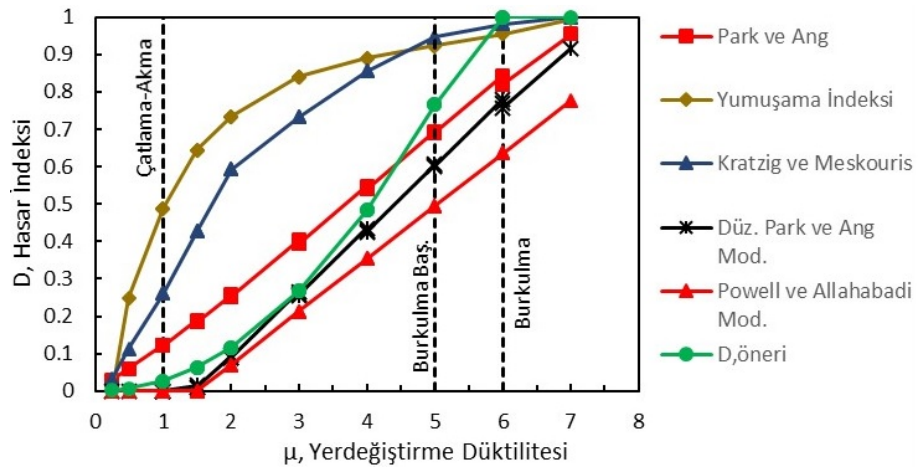
6.3 Hasar İndekslerinin Karşılaştırılması ve Değerlendirilmesi

Deneysel elemanların analitik akma yerdeğiştirmesi ile TBDY'e göre hesaplanan analitik yerdeğiştirme kapasiteleri Bölüm 5'te gösterilmiştir. Deney kolonlarına ait TBDY'e göre hesaplanan kapasite ile deney sırasında dayanımda %20 azalmaya

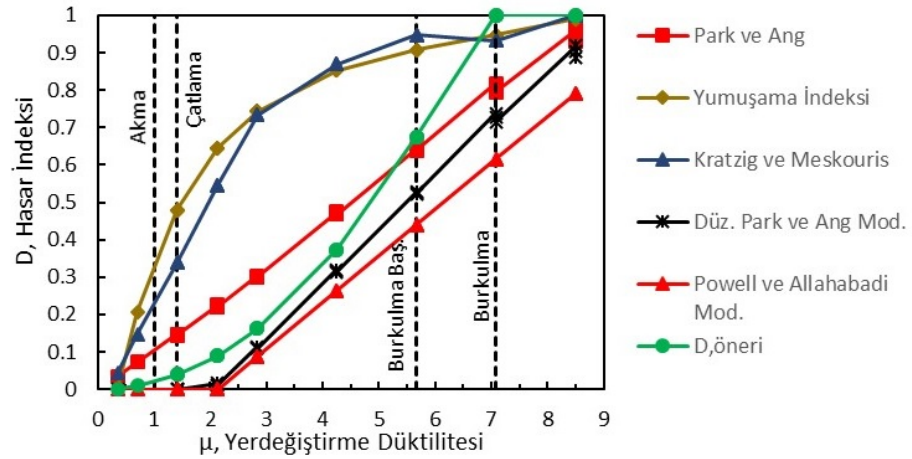
karşılık gelen yerdeğiştirme talepleri karşılaştırıldığında aralarında fark olduğu görülmüştür. Hasar modeli için önerilen bağıntıda yerdeğiştirme kapasitesi TBDY'ye göre hesaplandığı durumda bu durumu düzeltme amaçlı olarak düzeltme katsayısı belirlenerek 6.16 numaralı bağıntıda sunulmuştur.

$$D = \frac{E_y \times \mu_i^{2.06}}{E_y \times \mu_u^{1.97}} = \frac{\mu_i^{2.06}}{(\mu_u^{1.97})/\alpha} \quad (6.16)$$

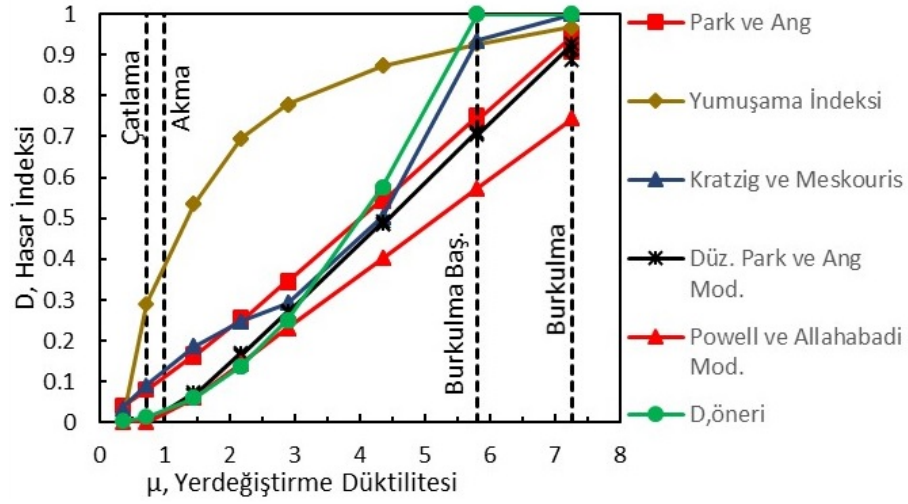
Elde edilen deneysel sonuçlara göre α katsayısı 0.6 olarak kabul edildiğinde Şekil 6.4-14'de verilen sonuçlar elde edilmiştir.



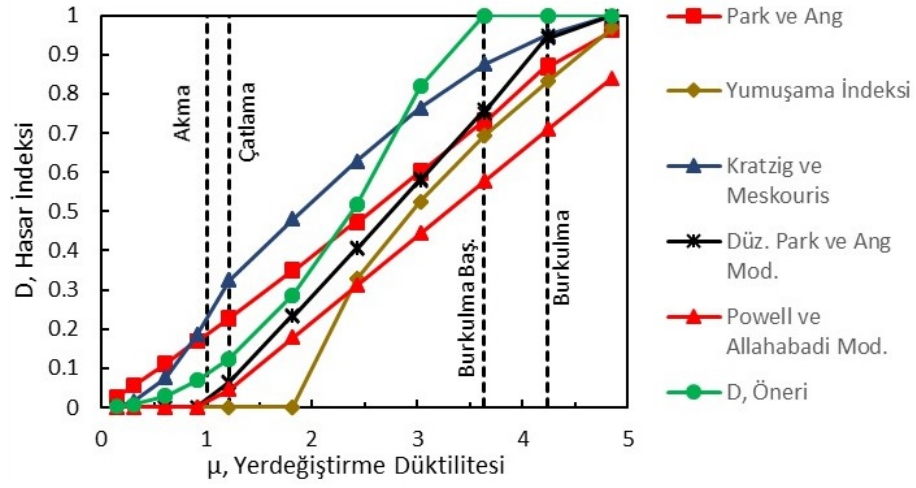
Şekil 6.4 S351008 kolonu için hasar indeksi sonuçları



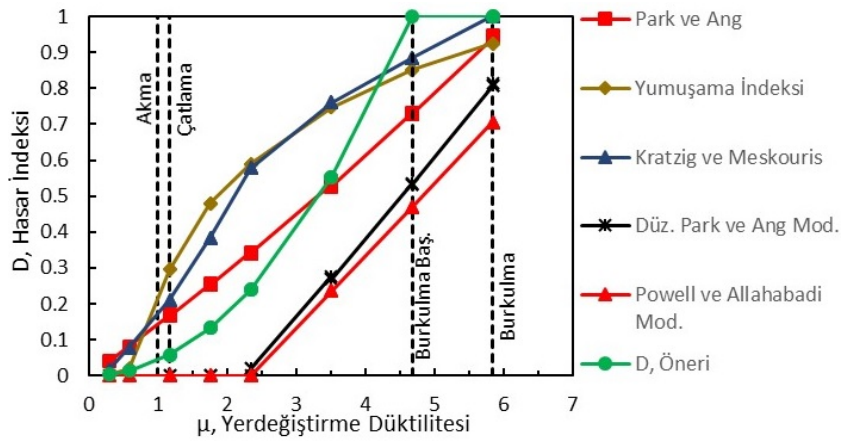
Şekil 6.5 S451008 kolonu için hasar indeksi sonuçları



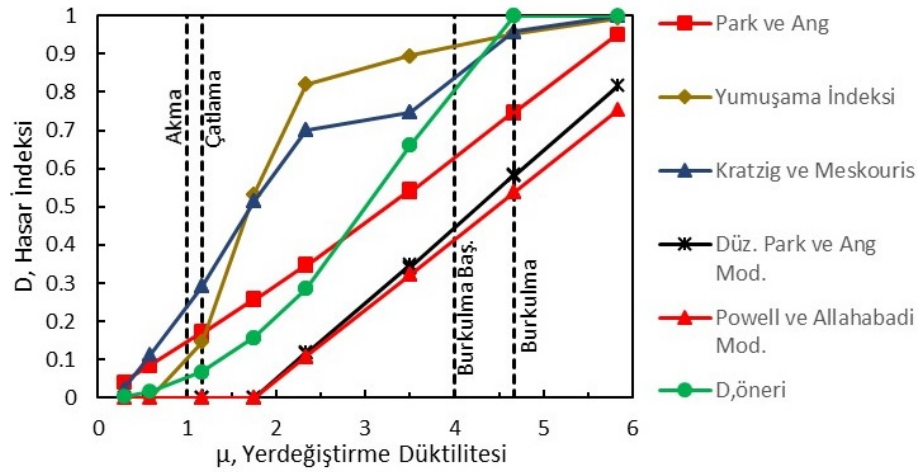
Şekil 6.6 S601008 kolonu için hasar indeksi sonuçları



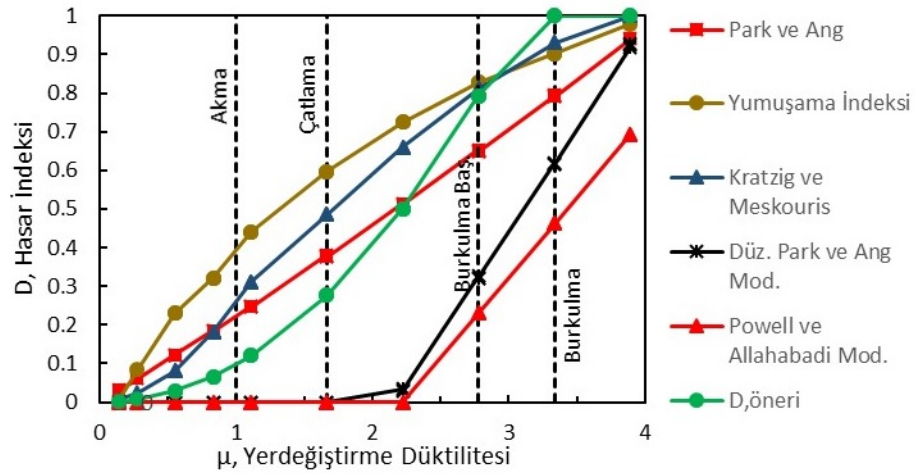
Şekil 6.7 S352008 kolonu için hasar indeksi sonuçları



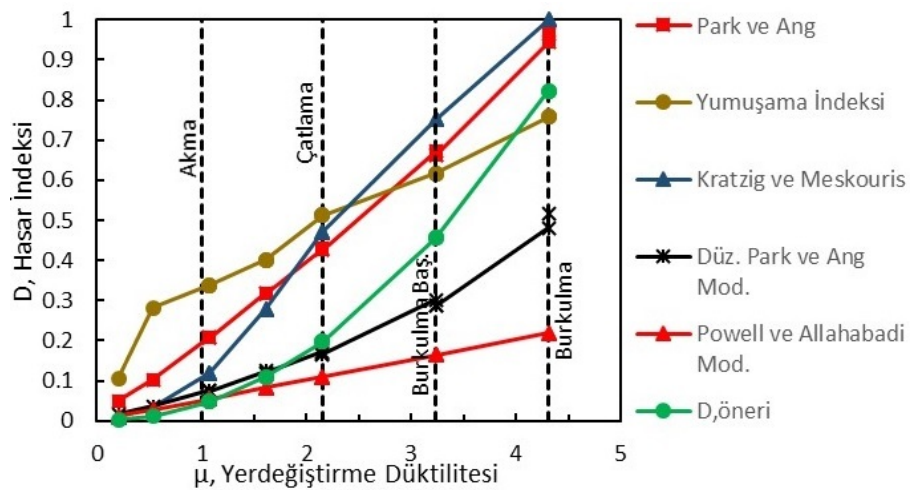
Şekil 6.8 S452008 kolonu için hasar indeksi sonuçları



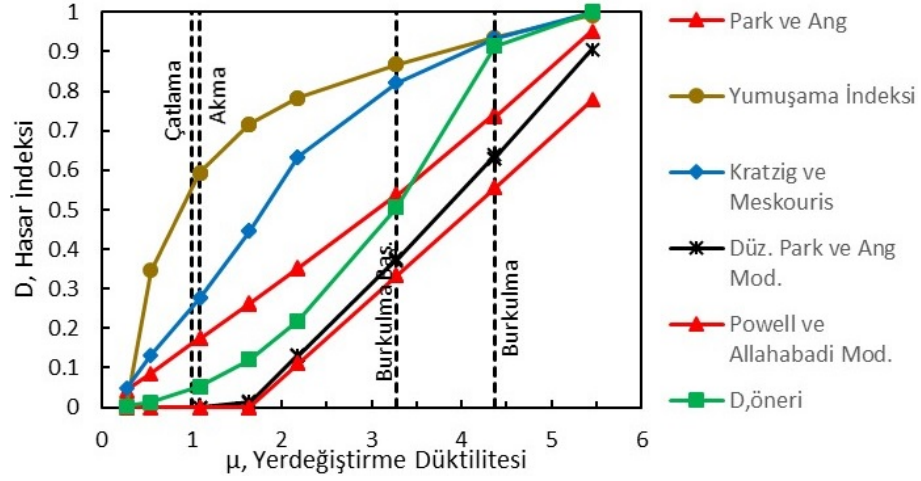
Şekil 6.9 S602008 kolonu için hasar indeksi sonuçları



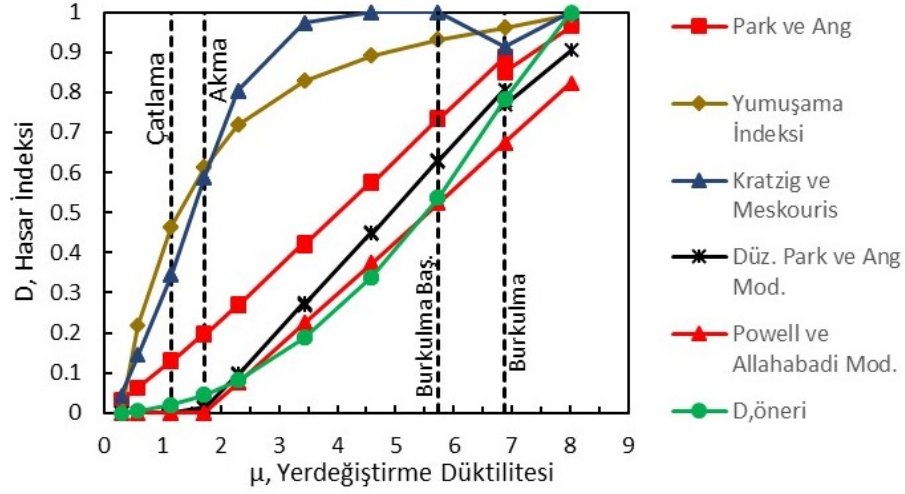
Şekil 6.10 S353508 kolonu için hasar indeksi sonuçları



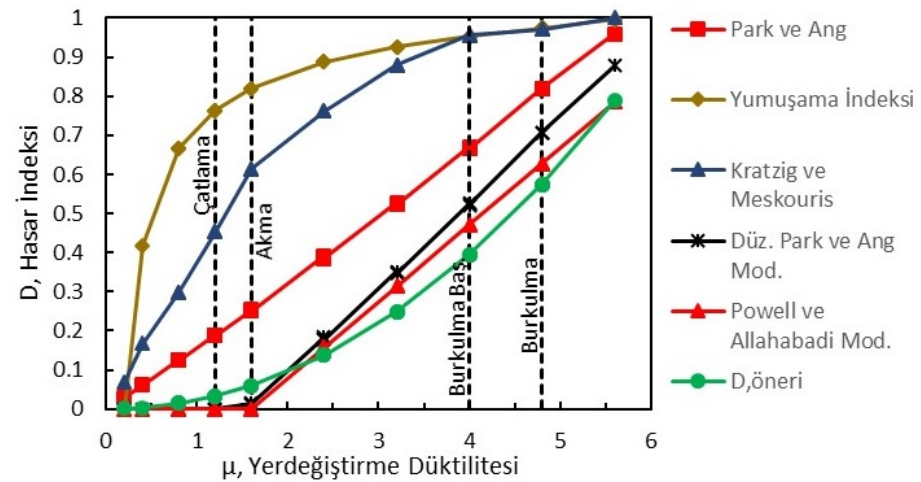
Şekil 6.11 S453508 kolonu için hasar indeksi sonuçları



Şekil 6.12 S603508 kolonu için hasar indeksi sonuçları



Şekil 6.13 S451006 kolonu için hasar indeksi sonuçları



Şekil 6.14 S452006 kolonu için hasar indeksi sonuçları

Deneyisel sonuçlara göre hasar indeksi modellerinin karşılaştırılması sonucu elde edilen sonuçlar maddeler halinde sıralanmıştır.

- Yumuşama indeksi ile Kratzig ve Meskouris hasar modelleri başlangıçta hasarı yüksek olarak başlatmaktadır. Son durumda ise burkulma durumuna geldiğinde hasar 1 değerine yakın tahmin etmektedir. Ancak yumuşama indeksinin kullanılabilmesi için elemana ait yük-yerdeğiştirme ilişkisine ihtiyaç duymaktadır.
- Önerilen hasar modeli ile Park ve Ang'a ait hasar modeli akma ve çatlama durumunu doğru tahmin edebilmektedir. Bununla birlikte burkulma durumu için iyi tahminde bulunmaktadır.
- Tüm hasar modelleri monotonik yükleme altındaki yerdeğiştirme veya sönümlleme enerjisine ihtiyaç duymaktadır. Kısıtlı veriye sahip kolonların değerlendirilmesinde dezavantaj olarak öne çıkmaktadır. Buna karşın önerilen hasar modeli sadece yükleme profili veya yerdeğiştirme değerine bağlı olarak hasar modelini hesaplayabilmektedir.

7 SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu tez çalışması kapsamında 11 adet betonarme kolon deprem yüklerinden benzeştirilen artan genlikli yatay yükleme ve sabit eksenel yük altında deneyi gerçekleştirilmiştir. Deneysel verilere göre bu tez çalışması kapsamında elde edilen sonuçlar maddeler halinde sıralanmıştır.

- Tez çalışması kapsamında üretilen 11 adet betonarme kolon eğilme kırılmasına maruz kalacak şekilde taşıma gücüne erişmiştir. Boyutsuz eksenel yük seviyesi 0.35 olan bir kolon (S453508) ise eğilmede basınç kırılmasına maruz kalacak şekilde gevrek davranış sergilemiştir. TBDY’de verilen eksenel yük sınırı içerisinde kalmasına rağmen eğilmede basınç kırılması ile taşıma gücüne ulaşmıştır.
- Tüm elemanların deneysel yerdeğiştirme kapasiteleri yönetmeliklerin tahminleri ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlara göre TBDY tüm elemanlarda daha güvenli sonuçlar vermektedir. EUROCODE-8 ve FEMA356 yönetmelikleri ise eksenel yük seviyesi arttıkça daha güvensiz sonuçlar verdiği görülmüştür.
- TBDY kapasite hesabında malzeme birim şekildeğiştirme değerlerini kullanmaktadır. EUROCODE-8 ise eksenel yük, kesme açıklığı, donatı düzeni gibi birçok parametreye bağlı olarak yerdeğiştirme kapasitesini hesaplamaktadır. FEMA356 ise eksenel yük ve boyutsuz kesme kuvvetine bağlı olarak kapasite tahmini yapmaktadır. TBDY’nin diğer yönetmeliklere göre daha uygun sonuçlar vermesi, malzeme birim şekildeğiştirme değerlerini kullanması olarak yorumlanabilir.
- Plastik mafsallı boyu için TBDY’de yapılan 0.5h kabulünün deneysel verilere göre uyumlu olmadığı gözükmektedir. Plastik mafsallı boyunun gerçek değerden küçük kabul edilmesi sebebiyle TBDY’e göre yerdeğiştirme kapasitesi düşük hesaplanarak güvenli kalmaktadır. Kolon boyuna bağlı olarak sonuçlar veren Priestley ve Paulay modelinin deneysel sonuçlara en yakın değerler verdiği

görülmüştür. Eksenel yük seviyesine bağlı çalışan Bae ve Bayrak modelinin deneysel sonuçları yeteri kadar doğru yansıtmadığı ifade edilebilir. Ayrıca eksenel yük seviyesi arttıkça belirgin şekilde plastik mafsallı boyunun arttığı hem ölçü aletleriyle hem de deney sonu fotoğraflarla tespit edilmiştir. Eksenel yükün ve kesme açıklığının plastik mafsallı boyunu etkilediği deneysel verilerle doğrulanmıştır.

- Bu tez çalışması kapsamında önerilen hasar modeli ile literatürde kullanılan hasar modelleri karşılaştırıldığında önerilen hasar modelinin deneysel verilere göre uygun sonuçlar verdiği görülmüştür. Literatürde kullanılan birçok hasar modelinde hasar indeksi hesaplanırken monotonik yüklemeden elde edilen yer değiştirme kapasitesi gibi değerler kullanılmaktadır. Önceki çalışmalar incelendiğinde yükleme profilinin kolon davranışını etkilediği görülmektedir. Bu sebeple hasar modellerinde monotonik yüklemeden elde edilen kapasitenin kullanılması sonuçları olumsuz etkilediği düşünülmektedir.

Bu tez çalışması kapsamında elde edilen sonuçlara göre öneriler maddeler halinde aşağıda sıralanmıştır.

- TBDY’de tanımlanan boyutsuz eksenel yük seviyesi sınırının altında gevrek davranış görülmüştür. Kısıtlı sayıda yapılan deneyler sebebiyle TBDY tanımlanan eksenel yük sınırının araştırılması ve gevrek davranışın önlenmesi önem arz etmektedir.
- Plastik mafsallı boyu TBDY’de ve ACI318’de 0.5h olarak kabul edilmektedir. Betonarme kolonun davranışında etken bir parametre olan plastik mafsallı boyunun deneysel sonuçlara göre 1.5h mertebesine kadar ulaştığı görülmüştür. Eksenel yük seviyesi düşük kolonlarda TBDY yer değiştirme kapasitesini güvenli kalarak düşük hesaplamaktadır. Özellikle eksenel yük seviyesi düşük kolonlarda plastik mafsallı boyunun gerçeğe yakın tahmin edilmesi, yer değiştirme kapasitesini daha doğru tahmin etmeyi sağlayacaktır. Bu sonuçlar ışığında yönetmeliklerde plastik mafsallı boyunun tahmininde veya kabulünde eksenel yük seviyesini dikkate alan yaklaşımların geliştirilmesi sonraki çalışmalar için önemlidir.
- Yer değiştirme kapasitesinin tahmininde kullanılan yönetmeliklerde EUROCODE-8 ve FEMA356 yönetmelikleri eksenel yük seviyesi yüksek kolonlarda uygun olmayan sonuçlar vermektedir. Kısıtlı sayıda yapılan deneylere göre elde edilen bu sonuç için bu yönetmeliklerde eksenel yük parametresinin daha fazla etken şekilde dikkate alması gerektiği görülmektedir.

- Tez çalışması kapsamında 0.01 boyuna donatı oranına sahip kolonlar incelenmiştir. Günümüzde yüksek katlı yapılarda ve orta katlı yapılarda donatı oranları 0.015-0.02 aralığında kullanılmaktadır. Ayrıca donatı çapı $\phi 14$ kullanılmıştır. Donatı çapının artması enine donatı aralığını değiştirmektedir. İleriki çalışmalarda bu durumları dikkate alan tasarımlar kullanılabilir. Ayrıca farklı donatı oranlarının plastik mafsallara boyuna etkisi araştırılabilir.

- [1] R. Park T. Paulay, *Reinforced concrete structures*. John Wiley & Sons, 1975.
- [2] G. Ang Beng, M. Priestley, R. Park, *Ductility of reinforced bridge piers under seismic loading*, 1981.
- [3] R. Park, M. Priestley, W. D. Gill, "Ductility of square-confined concrete columns," *Journal of the structural division*, vol. 108, no. 4, pp. 929–950, 1982.
- [4] F. A. Zahn, "Design of reinforced concrete bridge columns for strength and ductility," 1985.
- [5] M. Saatcioglu G. Ozcebe, "Response of reinforced concrete columns to simulated seismic loading," *Structural Journal*, vol. 86, no. 1, pp. 3–12, 1989.
- [6] G. S. Cheok W. C. Stone, "Behaviour of 1/6 scale model bridge columns subjected to cyclic inelastic loading," 1986.
- [7] Y.-J. Park A. H.-S. Ang, "Mechanistic seismic damage model for reinforced concrete," *Journal of structural engineering*, vol. 111, no. 4, pp. 722–739, 1985.
- [8] S. Watson, "Design of reinforced concrete frames of limited ductility," 1989.
- [9] Y. Park, A. Reinhorn, S. Kunnath, "Idarc: Inelastic damage analysis of frame shear-wall structures," *Techincal Report NCEER*, pp. 87–0008, 1987.
- [10] H. Tanaka, "Effect of lateral confining reinforcement on the ductile behaviour of reinforced concrete columns," 1990.
- [11] R. Eligehausen L. Li, "Rotation capacity of prestressed concrete members," 1992.
- [12] A. Aziznamini, W. G. Corley, L. (Johal, "Effects of transverse reinforcement on seismic performance of columns," *Structural Journal*, vol. 89, no. 4, pp. 442–450, 1992.
- [13] S. A. Sheikh S. S. Khoury, "Confined concrete columns with stubs," *ACI Structural Journal*, vol. 90, pp. 414–414, 1993.
- [14] J. B. Mander, F. Panthaki, A. Kasalanati, "Low-cycle fatigue behavior of reinforcing steel," *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 6, no. 4, pp. 453–468, 1994.
- [15] G. Hoffman, S. K. Kunnath, J. Mander, A. Reinhorn, "Gravity-load-designed reinforced concrete buildings: Seismic evaluation of existing construction and detailing strategies for improved seismic resistance," 1992.
- [16] J. M. Bracci, S. K. Kunnath, A. M. Reinhorn, "Seismic performance and retrofit evaluation of reinforced concrete structures," *Journal of Structural Engineering*, vol. 123, no. 1, pp. 3–10, 1997.

- [17] O. Bayrak S. A. Sheikh, "Confinement reinforcement design considerations for ductile hsc columns," *Journal of Structural Engineering*, vol. 124, no. 9, pp. 999–1010, 1998.
- [18] A. Ghobarah, H. Abou-Elfath, A. Biddah, "Response-based damage assessment of structures," *Earthquake engineering & structural dynamics*, vol. 28, no. 1, pp. 79–104, 1999.
- [19] S. K. Kunnath, A. El-Bahy, A. Taylor, W. Stone, "Cumulative seismic damage of reinforced concrete bridge piers," 1997.
- [20] D. E. Lehman, "Seismic performance of well-confined concrete bridge columns," 2000.
- [21] E. Cosenza G. Manfredi, "Damage indices and damage measures," *Progress in Structural Engineering and Materials*, vol. 2, no. 1, pp. 50–59, 2000.
- [22] K. J. Elwood J. P. Moehle, "Drift capacity of reinforced concrete columns with light transverse reinforcement," *Earthquake Spectra*, vol. 21, no. 1, pp. 71–89, 2005.
- [23] H. Sezen J. P. Moehle, "Shear strength model for lightly reinforced concrete columns," *Journal of Structural Engineering*, vol. 130, no. 11, pp. 1692–1703, 2004.
- [24] K. Tsuno R. Park, "Prediction method for seismic damage of reinforced concrete bridge columns," *Doboku Gakkai Ronbunshu*, vol. 2004, no. 766, pp. 1–15, 2004.
- [25] S. Kunnath Y. Chai, "Cumulative damage-based inelastic cyclic demand spectrum," *Earthquake engineering & structural dynamics*, vol. 33, no. 4, pp. 499–520, 2004.
- [26] H. Sucuoğlu A. Erberik, "Energy-based hysteresis and damage models for deteriorating systems," *Earthquake engineering & structural dynamics*, vol. 33, no. 1, pp. 69–88, 2004.
- [27] L. He X. G. Ye, "Comparative study on major damage index models," in *Applied Mechanics and Materials*, Trans Tech Publ, vol. 204, 2012, pp. 2424–2427.
- [28] M. Bazan M. Sasani, "A new damage model for reinforced concrete elements," in *Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering*, Vancouver, BC, Canada, 2004.
- [29] A. Colombo P. Negro, "A damage index of generalised applicability," *Engineering Structures*, vol. 27, no. 8, pp. 1164–1174, 2005.
- [30] S. Bae, A. M. Miseses, O. Bayrak, "Inelastic buckling of reinforcing bars," *Journal of Structural Engineering*, vol. 131, no. 2, pp. 314–321, 2005.
- [31] S. Bae O. Bayrak, "Plastic hinge length of reinforced concrete columns," *ACI Structural Journal*, vol. 105, no. 3, p. 290, 2008.
- [32] J. Vielma, A. Barbat, S. Oller, "An objective seismic damage index for the evaluation of the performance of rc buildings," 2008.
- [33] G. W. Zhang, Y. Xiao, S. K. Kunnath, "Low-cycle fatigue test of circular concrete filled tubular columns," in *Key Engineering Materials*, Trans Tech Publ, vol. 400, 2009, pp. 873–880.

- [34] H. Jiang, L. Chen, Q. Chen, "Seismic damage assessment and performance levels of reinforced concrete members," *Procedia engineering*, vol. 14, pp. 939–945, 2011.
- [35] V. V. Cao, H. R. Ronagh, M. Ashraf, H. Baji, "A new damage index for reinforced concrete structures," *Earthquakes and Structures*, vol. 6, no. 6, pp. 581–609, 2014.
- [36] H. Rodrigues, H. Varum, A. Arêde, A. Costa, "A comparative analysis of energy dissipation and equivalent viscous damping of rc columns subjected to uniaxial and biaxial loading," *Engineering Structures*, vol. 35, pp. 149–164, 2012.
- [37] R. Sinha S. Shiradhonkar, "Seismic damage index for classification of structural damage—closing the loop," in *Proceedings of the 15th World Conference On Earthquake Engineering, Libosa, Portugal*, 2012.
- [38] Y. Heo S. K. Kunnath, "Damage-based seismic performance evaluation of reinforced concrete frames," *International Journal of Concrete Structures and Materials*, vol. 7, no. 3, pp. 175–182, 2013.
- [39] Y.-C. Ou, H. Alrasyid, Z. B. Haber, H.-J. Lee, "Cyclic behavior of precast high-strength reinforced concrete columns," *ACI Structural Journal*, vol. 112, no. 6, 2015.
- [40] G. Xing, O. E. Ozbulut, T. Lei, B. Liu, "Cumulative seismic damage assessment of reinforced concrete columns through cyclic and pseudo-dynamic tests," *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, vol. 26, no. 2, e1308, 2017.
- [41] DBYBHY, *Deprem bölgelerinde yapılacak binalar hakkında yönetmelik-bayındırlık ve iskan bakanlığı*, 2007.
- [42] ATC-38, *Database on the performance of structures near strong-motion recordings: 1994 northridge, california, earthquake*, 2000.
- [43] NZSEE, "The seismic assessment of existing buildings. technical guidelines for engineering assessments. part c – detailed seismic assessment. section c5 – concrete buildings," *New Zealand Society for Earthquake Engineering-2017*,
- [44] TBDY, *Türkiye bina deprem yönetmeliği*, Çevre ve Şehircilik Bakanlığı-2018.
- [45] FEMA356, "Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings," *American Society of Civil Engineers (ASCE)*, 2000.
- [46] EN-1998, "Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance, european committee for standardization," 2005.
- [47] S. Bae, "Seismic performance of full-scale reinforced concrete columns," PhD thesis, 2005.
- [48] T. Paulay M. N. Priestley, "Seismic design of reinforced concrete and masonry buildings," 1992.
- [49] M. P. Berry M. O. Eberhard, "Practical performance model for bar buckling," *Journal of Structural Engineering*, vol. 131, no. 7, pp. 1060–1070, 2005.
- [50] ACI-318, *Building code requirements for structural concrete and commentary*, American Concrete Institute-2011.

- [51] M. J. Kowalsky, M. N. Priestley, G. A. Macrae, "Displacement-based design of rc bridge columns in seismic regions," *Earthquake engineering & structural dynamics*, vol. 24, no. 12, pp. 1623–1643, 1995.
- [52] SEAOC, *Vision 2000: Performance Based Seismic Engineering of Buildings*. Structural Engineers Association of California, 1995, vol. 2.
- [53] M. Priestley, "Displacement-based approaches to rational limit states design of new structures," *Proc. 11 ECEE*, vol. 2, pp. 317–335, 1999.
- [54] M. Priestley, "Brief comments on elastic flexibility of reinforced concrete frames and significance to seismic design," *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*, vol. 31, no. 4, pp. 246–259, 1998.
- [55] M. Priestley, "Concepts and procedures for direct displacement-based design and assesment," in *Proceedings of the International Workshop on Seismic Design Methodologies for the Next Generation of Code*, 1997, pp. 171–182.
- [56] M. Priestley M. Kowalski, "Aspects of drift and ductility capacity of cantiveler structural walls," *Bulletin, New*, 1998.
- [57] M. Priestley M. Kowalsky, "Direct displacement-based seismic design of concrete buildings," *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*, vol. 33, no. 4, pp. 421–444, 2000.
- [58] FEMA440, "Improvement of nonlinear static seismic analysis procedures, prepared by: Applied technology council (atc-55 project)," *Department of Homeland Security, Federal Emergency Management Agency*, vol. 7, no. 9, p. 11, 2005.
- [59] T. B. Panagiotakos M. N. Fardis, "Deformations of reinforced concrete members at yielding and ultimate," *Structural Journal*, vol. 98, no. 2, pp. 135–148, 2001.
- [60] W. Kratzig M. Meskouris, "Nonlinear seismic analysis of reinforced concrete frames," *Earthquake prognostics*, 1987.
- [61] H. Banon, H. M. Irvine, J. M. Biggs, "Seismic damage in reinforced concrete frames," *Journal of the Structural Division*, vol. 107, no. 9, pp. 1713–1729, 1981.
- [62] M. S. Roufaiel C. Meyer, "Reliability of concrete frames damaged by earthquakes," *Journal of Structural Engineering*, vol. 113, no. 3, pp. 445–457, 1987.
- [63] G. H. Powell R. Allahabadi, "Seismic damage prediction by deterministic methods: Concepts and procedures," *Earthquake engineering & structural dynamics*, vol. 16, no. 5, pp. 719–734, 1988.
- [64] S. K. Kunnath, A. M. Reinhorn, R. Lobo, "Idarc version 3.0: A program for the inelastic damage analysis of reinforced concrete structures," 1992.
- [65] M. Berry, M. Parrish, M. Eberhard, "Peer structural performance database user's manual (version 1.0)," *University of California, Berkeley*, 2004.
- [66] A. Aziznamini, L. S. Johal, N. W. Hanson, D. W. Musser, W. G. Corley, "Effects of transverse reinforcement on seismic performance of columns—a partial parametric investigation," *Project No. CR*, vol. 9617, 1988.
- [67] S. Kono, H. Bechtoula, M. Sakashita, H. Tanaka, F. Watanabe, M. Eberhard, "Damage assessment of reinforced concrete columns under high axial loading," *Special Publication*, vol. 237, pp. 165–176, 2006.

- [68] A. B. Matamoros, "Study of drift limits for high-strength concrete columns.," 2000.
- [69] H. Muguruma, F. Watanabe, T. Komuro, "Applicability of high strength concrete to reinforced concrete ductile column," *Transactions of the Japan Concrete Institute*, vol. 11, no. 1, pp. 309–316, 1989.
- [70] P. Paultre, F. Légeron, D. Mongeau, "Influence of concrete strength and transverse reinforcement yield strength on behavior of high-strength concrete columns," *Structural Journal*, vol. 98, no. 4, pp. 490–501, 2001.
- [71] Y. Xiao H. W. Yun, "Experimental studies on full-scale high-strength concrete columns," *Structural Journal*, vol. 99, no. 2, pp. 199–207, 2002.
- [72] M. Saatcioglu M. Grira, "Confinement of reinforced concrete columns with welded reinforced grids," *Structural Journal*, vol. 96, no. 1, pp. 29–39, 1999.
- [73] O. Bayrak S. Sheikh, "Confinement steel requirements for high strength concrete columns," in *Proceedings of the 11th World Conference on Earthquake Engineering*, 1996.
- [74] J. H. Thomson J. W. Wallace, "Lateral load behavior of reinforced concrete columns constructed using high-strength materials," *Structural Journal*, vol. 91, no. 5, pp. 605–615, 1994.
- [75] S. Sugano, "Seismic behavior of reinforced concrete columns which used ultra-high-strength concrete," in *11th World Conf. on Earthquake Engineering*, 1996.
- [76] A. Calderone, D. E. Lehman, J. P. Moehle, *Behavior of reinforced concrete bridge columns having varying aspect ratios and varying lengths of confinement*. Pacific Earthquake Engineering Research Center, 2001.
- [77] E. Henley Jr, D. I. McLean, E. H. Henley Jr, "Moment-reducing hinge details for the bases of bridge columns," *Transportation Research Record*, no. 1275, 1990.
- [78] X. Zhou, T. Satoh, W. Jiang, A. Ono, Y. Shimizu, "Behavior of reinforced concrete short column under high axial load," *Transactions of the Japan Concrete Institute*, vol. 9, no. 2, pp. 541–548, 1987.
- [79] M. Soesianawati, "Limited ductility design of reinforced concrete columns.," 1986.
- [80] ASCE-41-13, "Publication anticipated seismic evaluation and upgrade of existing buildings," American Society of Civil Engineers Reston, Virginia, 2013.

Tezden Üretilmiş Yayınlar

İletişim Bilgileri: sinancansiz@hotmail.com

Makale

1. Cansız, S.; Aydemir, C. ve Arslan, G. (2019), “Comparison of displacement capacity of reinforced concrete columns with seismic codes ”, Advances in Concrete Construction, 8(4), 295-304.