ÇELİK LEVHALI PERDE DUVARLARDA TASARIM PARAMETRELERİNİN DAVRANIŞA ETKİSİ

Muhammed GÜRBÜZ

Doktora Tezi
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. İlker KAZAZ

2021
Her hakkı saklıdır.

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DOKTORA TEZİ

ÇELİK LEVHALI PERDE DUVARLARDA TASARIM PARAMETRELERİNİN DAVRANIŞA ETKİSİ

Muhammed GÜRBÜZ

Tez Danışmanı: Prof. Dr. İlker KAZAZ

Anabilim Dalı: İnşaat Mühendisliği

Erzurum

2021

Her hakkı saklıdır

ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

Erzurum Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez içindeki tüm bilgilerin doğru ve tam olduğunu, bilgilerin üretilmesi aşamasında bilimsel etiğe uygun davrandığımı, yararlandığım bütün kaynakları atıf yaparak belirttiğimi beyan ederim.

12 / 07 / 2021

Muhammed GÜRBÜZ

ÖZET

DOKTORA TEZİ

ÇELİK LEVHALI PERDE DUVARLARDA TASARIM PARAMETRELERİNİN DAVRANIŞA ETKİSİ

Muhammed GÜRBÜZ

Erzurum Teknik Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. İlker KAZAZ

Çelik levhalı perde duvarlar (ÇLPD) yüksek enerji tüketme kapasitesi, yüksek süneklik ve rijitliğe sahip olan yapısal elemanlardır. Daha önceki çalışmalarda yatay yükleme altındaki çelik levhalı perde duvarlar üzerinde çeşitli tasarım konuları analitik ve deneysel yöntemler kullanılarak araştırılmıştır. Araştırmacılar genellikle plaka en boy oranı, kolon esneklik parametresi, sınır çerçeve kolonları üzerindeki eksenel yük oranı, gövde plakası kalınlığı, sınır elemanlarının rijitliği gibi tasarım parametrelerinin etkisini yönetmeliklerde bulunan ötelenme sınırları içerisinde incelemiştir. Fakat, bütün bu parametrelerin etkisini bir arada inceleyen çalışmaların mevcut olmadığı görülmüştür. Bu çalışmada bütün bu parametrelerin nihai ötelenme oranları, göçme mekanizmaları ve gövde plakası – çerçeve kesme kuvveti dağılımı üzerine etkileri nümerik olarak incelenmiştir. Bu amaçla sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak üç katlı, tek açıklıklı ve moment taşıyabilen kolon – kiriş birleşimlerine sahip çelik levhalı perde duvar modelleri oluşturulmuştur. Modeller monotonik ve çevrimsel yüklemelere maruz bırakılmıştır. Ön tasarım aşamasında daha iyi çevrimsel davranış elde edilebilmesi için tasarım parametrelerinin en uygun kombinasyonunu belirlemek için ÇLPD davranışına kapsamlı bir bakış sağlanmıştır. Sonuç olarak çelik levhalı perde duvarların düşey sınır elemanlarının minimum atalet momentini belirlemek için kullanılan kolon esneklik parametresinin üst limitinin 2.1 seviyesinde tutulmasının birçok istenmeyen göçme mekanizmasının oluşumunu engellediği görülmüştür. Ayrıca iyileştirmiş davranış elde etmek için çelik gövde plakası kesme kuvvetinin toplam dayanıma katkısının %75 ile sınırlandırılması gerektiği sonucuna ulaşılmıştır. Parametrelere bağlı olarak ötelenme oranı ve ÇLPD'yi oluşturan gövde plakası ve çerçeve bileşenlerinin kuvvet dağılımını tahmin eden güvenilir bağıntılar elde edilmiştir.

2021, 254 sayfa

Anahtar Kelimeler: Çelik Levhalı Perde Duvar, Tasarım Parametreleri, Nihai Ötelenme, Göçme Mekanizması, Çelik Gövde – Çerçeve Etkileşimi

ABSTRACT

Ph.D

THE EFFECT OF DESIGN PARAMETERS ON THE BEHAVIOR OF STEEL PLATE SHEAR WALLS

Muhammed GÜRBÜZ

Erzurum Technical University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Civil Engineering

Supervisor: Prof. Dr. İlker KAZAZ

Steel plate shear walls (SPSW) are structural elements with high energy dissipation capacity, high ductility and high rigidity. In previous studies, various design issues on steel plate shear walls under lateral loading have been investigated using analytical and experimental methods. Researchers generally investigated the effect of design parameters within the drift limits found in the regulations. However, it has been observed that no studies examining the effect of all these parameters altogether. In this study, the effects of all these parameters on ultimate drift ratio, failure mechanism and infill plate-frame shear force distribution were numerically investigated. For this purpose, three-story, single-span SPSW models with moment-resisting beam to column connections were created using the finite element method. Models were subjected to monotonic and cyclic loading. A comprehensive overview of the SPSW behavior is provided to determine the optimal combination of design parameters so that better cyclic behavior can be obtained during the preliminary design phase. As a result, it has been observed that when the column flexibility parameter of the vertical boundary elements is limited to 2.1, many undesirable failure mechanism formations are eliminated. It was also concluded that the contribution of the steel infill plate shear force to the total strength should be limited to 75% to obtain improved behavior. Depending on the design parameters, reliable equations were suggested that predict the ultimate drift ratio and the force distribution of the infill plate and frame.

2021, 254 pages

Keywords: Steel Plate Shear Walls, Design Parameters, Ultimate Drift, Failure Mechanism, Infill plate- Frame Interaction

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım süresince hiçbir desteğini benden esirgemeyen, deneyimlerini ve bilgi birikimini benimle paylaşan, tezin hazırlanmasında çok büyük emekleri olan, zaman zaman içerisine düştüğüm çıkmazlarda yol gösteren ve tezimde isminin bulunmasından gurur duyduğum sayın danışman hocam Prof. Dr. İlker KAZAZ'a minnettarım.

Tezin hazırlanması katkılarını esirgemeyen tez izleme komitesi üyelerim Prof. Dr. Ali Fatih YETİM ve Doç. Dr. Merve MAALİ'ye çok teşekkür ederim. Ayrıca, değerli zamanlarını ayırıp savunma jürime katılan ve çalışmayı detaylı bir biçimde inceleyip tavsiyeler veren saygıdeğer hocalarım Prof. Dr. Cem TOPKAYA'ya ve Doç. Dr. Barış ERDİL'e de teşekkür ederim.

Beni yetiştiren anne ve babama, her zaman yardımıma koşan sevgili kardeşlerime minnettarım. Bu yorucu ve uzun süreçte en büyük destekçim olan sevgili eşim ve yoldaşım Nihal Elif'e ve canım çocuklarım Reyhan Melek ve Hasan Yiğit'e bana karşı göstermiş oldukları büyük anlayış ve sabırdan dolayı sonsuz teşekkürler ederim.

Muhammed GÜRBÜZ

İÇİNDEKİLER

ÖZET ..... **i**
ABSTRACT ..... **ii**
TEŞEKKÜR ..... **iii**
İÇİNDEKİLER ..... **iv**
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ ..... **vi**
ŞEKİLLER DİZİNİ ..... **x**
ÇİZELGELER DİZİNİ ..... **xiv**
1. GİRİŞ **1**
1.1. Genel 1
1.2. Tezin Amacı 3
1.3. Tezin İçeriği 3
2. LİTERATÜR TARAMASI **5**
2.1. Çelik Levhalı Perde Duvarların Geçmişi ve Tasarım Parametrelerinin Gelişimi 5
2.2. Tasarım Parametreleri Üzerine Yapılan Çalışmalar 25
2.3. Analiz Yöntemleri 31
2.3.1. Şerit-Çubuk yöntemi 31
2.3.2. Ortotropik Membran Yöntemi 31
2.3.3. Doğrusal Olmayan Analiz 32
2.4. Geçmiş Deneysel Çalışmalar 32
3. SONLU ELEMAN YÖNTEMİ İLE MODELLEME **38**
3.1. Sonlu Eleman Modeli Oluşturma 38
3.1.1. Elaman seçimi 38
3.1.2. Malzeme modeli özellikleri 39
3.1.3. Gövde plakasına düzlem dışı yük uygulaması 40
3.1.4. Sonlu eleman çözüm yöntemi 42
3.1.5. Çözüm Hassasiyeti 44
3.2. Model Doğrulama Çalışması 47
3.2.1. Deneysel çalışmalar 47
3.2.2. F2 numunesi yarı – rijit birleşimin modellenmesi 52
3.2.3. Birden fazla noktadan uygulanan deplasman kontrollü yükleme 57
3.2.4. Sonuçların karşılaştırılması 58
3.3. Numune ölçeğinin davranış üzerindeki etkisi 65
4. ÇLPD TASARIM DENKLEM LİMİTLERİ ÜZERİNE MONOTONİK YÜKLEME ALTINDA İNCELEME **74**
4.1. Parametrik Çalışma 74

4.2. Monotonik Yükleme Altında Yapıların Parametrelere Bağlı Davranışı 77
4.2.1. Kolon düzlem dışı burkulması 83
4.2.2. Kolon eğilme – burulma göçme durumu 86
4.2.3. Üst kiriş düzlem dışı burkulma 88
4.2.4. Kolon flanş yerel burkulması 91
4.2.5. Üst kiriş kesme burkulması 94
4.2.6. Kolon kesme burkulması 97
4.2.7. Kolon global burkulması 100
4.2.8. Sonuçların genel değerlendirmesi 102
4.3. Yönetmelik Denklemlerinin ve Önerilerinin Değerlendirilmesi 106
4.3.1. Plaka kesme kuvveti – toplam sistem kesme kuvveti oranı 106
4.3.2. Çekme alanı eğim açısı 107
4.3.3. Sistem kesme kuvveti 109
5. ÇLPD PARAMETRELERİNİN İYİLEŞTİRİLMİŞ ÇEVRİMSEL DAVRANIŞ İÇİN NÜMERİK OLARAK DEĞERLENDİRİLMESİ 112
5.1. Parametrik Çalışma 112
5.2. Analiz Sonuçları 116
5.2.1. Monotonik ve çevrimsel yüklemenin global davranış üzerine etkileri 116
5.2.2. Çelik levhalı perde duvarların göçme davranışı 119
5.2.3. Çelik levhalı perde duvarların nihai ötelenme oranları 126
5.2.4. Çelik levhalı perde duvarların histerezis davranışları 131
5.2.5. Çelik levhalı perde duvarların enerji tüketme kapasiteleri 133
5.2.6. ÇLPD modellerde plaka – çerçeve kesme kuvveti dağılımı 135
6. SONUÇ VE ÖNERİLER 137
KAYNAKLAR 141
EKLER 146
EK-1 146
EK-2 148
EK-3 155
EK-4 165
EK-5 167
EK-6 241

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
$(u_x)_{pi}$	Düğüm noktasının x eksenindeki deplasmanı
δ	İki komşu düğüm noktası arasındaki mesafe
A_b	Kiriş kesit alanı
A_c	Kolon kesit alanı
A_g	Kolon kesit alanı
A_{st}	Şerit alanı
b_f	Kiriş flanşı genişliği
d_i	Şeritlerin sol üst kiriş – kolon birleşimine kadar olan dik uzaklığı
DR_u	Nihai ötelenme oranı
E	Çeliğin elastisite modülü
E_d	Tüketilen enerji için hesaplama yapılacak olan ötelenme oranı seviyesine karşılık gelen ilk çevrimin oluşturduğu kapalı alan
E_p	İdeal elasto-plastik davranış sergileyen bir döngünün kapalı alanı
F	Tam integrasyon
F_i	i numaralı elemana ait kuvvetin x bileşeni
F_{st}	Şerit kuvveti
F_y	Çeliğin nominal akma dayanımı
h_b	Kiriş derinliği
H_e	Dıştaki bulon yuvasından korniyer kenarına kadar olan uzaklık
h_i	i numaralı eleman kuvvetinin tarafsız eksene olan uzaklığı
h_m	Modifiye edilmiş korniyer yüksekliği
H_o	Gerçek korniyer yüksekliği
h_p	Gövde plakası yüksekliği
h_s	Kat yüksekliği
h_{st}	Komşu berkitme levhaları arasındaki uzaklık
I_b	Kiriş kesiti atalet momenti
I_c	Kolon kesiti atalet momenti
$I_{c,min}$	İzin verilen minimum atalet momenti
I_o	Kiriş üst flanşın atalet momenti

I_u	Kiriş alt flanşın atalet momenti
k_i	Elastik rijitlik
L_d	Gövde levhası diyagonal uzunluğu
L_e	Sonlu eleman ağı genişliği
L_p	Gövde plakası genişliği
L_s	Kat genişliği
L_u	İki flanş arasındaki uzaklık
M	Birleşime etki eden toplam moment
MC	Orta seviye atalet momentine sahip kolonlar
M_{pb}	Kiriş plastik moment kapasitesi
M_{pc}	Kolon plastik moment kapasitesi
M_u	Birleşimin toplam moment kapasitesi
M_y	Kirişin akma momenti
n_b	Üst kirişe bağlı olan şerit sayısı
N_c	Basınç altında kritik burkulma yükü
N_t	Maksimum gerilme kuvveti
P_{cr}	Kolon nominal dayanımı
R	Azaltılmış integrasyon
R_y	Düşey reaksiyon kuvveti
S	Gövde levhası ölçeği
SC	En yüksek atalet momentine sahip kolonlar
t_f	Kiriş flanş kalınlığı
t_w	Gövde plakası kalınlığı
V_p	Plaka kesme kuvveti
V_s	Tasarım kesme kuvveti
V_t	Toplam kesme kuvveti
$V_{t,max}$	Maksimum kesme kuvveti
V_{tr}	Yük tersine çevrildikten sonraki çelik levha direnci
WC	Düşük atalet momentine sahip kolonlar
α	Çekme alanı eğim açısı
δ_y	Sistemde gözlemlenebilen ilk önemli akmanın meydana geldiği deplasman
ε_u	Malzemenin çekme dayanımına karşılık gelen gerinim
ε_y	Malzemenin akma dayanımına karşılık gelen gerinim

η_o	Gövde levhası çekmesi dolayısıyla oluşan üst kiriş deformasyonu
η_u	Gövde levhası çekmesi dolayısıyla oluşan alt flanş deformasyonu
θ	Birleşimin rotasyonu
λ	Burkulmuş gövde levhası dalga boyu
λ_{pi}	Çekme alanına dik kesit uzunluğu
σ_u	Malzemenin çekme dayanımı
σ_y	Malzemenin akma dayanımı
υ	Poisson oranı
ϕ	Eğrilik
ω_i	Kolon esneklik parametresi
ω_L	Alt ve üst kiriş esneklik parametresi
Ω_s	Plaka en-boy oranı katsayısı
ΔM	Histerezis parametresi
ε_g	Flanşların rijit olduğu kabul edildiğinde meydana gelen çekme alanındaki gerinim
σ_{ty1}	Plaka malzemesinin akmaya ilk başladığı gerilme
σ_{ty2}	Plaka malzemesinin akma gerilmesini
ω_t	Ankastre kiriş esneklik parametresi

Kısaltmalar

ÇLPD	Çelik Levhalı Perde Duvar
YSE	Yatay Sınır Elemanı
DSE	Düşey Sınır Elemanı
AISC	American Institute of Steel Construction
CSA	Canadian Standards Association
FEMA	Federal Emergency Management Agency
LRFD	Load and Resistance Factor Design
DN	Düğüm Noktası
ATC	Applied Technology Council
ASTM	American Society for Testing and Materials
JGJ	Chinese Specification for Seismic Test of Buildings

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. ÇLPD elemanları. 2
Şekil 2.1. (a) Diyagonal çekme çalışma ilkesi (b) kiriş üzerinde şerit halinde diyagonal çekme oluşumu. 6
Şekil 2.2. (a) Burkulmuş plakanın analitik modeli ve (b) gövde plakasının şeritler halinde gösterimi. 7
Şekil 2.3. Thorburn et al. (1983) tarafından geliştirilen temsili şerit modeli (a) tamamlanmış çekme alanı (b) kısmi çekme alanı. 8
Şekil 2.4. Timler and Kulak (1983) tarafından test edilen çelik levhalı perde duvar. 9
Şekil 2.5. ÇLPD'ler için Mimura and Akiyana (1977) tarafından önerilen histerezis davranış. 11
Şekil 2.6. (a) Tromposch and Kulak (1987) test düzeneği (b) önerilen histerezis davranış modeli. 12
Şekil 2.7. Test numunelerinin geometrik detayları. 14
Şekil 2.8. Elgaaly et al. (1993) tarafından çekme çubukları için kullanılan üç doğrulu gerilme-gerinim ilişkisi. 16
Şekil 2.9. Driver et al. (1998b) tarafından test edilen deney numunesi. 17
Şekil 2.10. Rezai (1999) tarafından geliştirilen çubuk modeli. 20
Şekil 2.11. Lubell (1997) tarafından test edilen tek katlı numunelerin boyutları (a) SPSW1 (b) SPSW2. 21
Şekil 2.12. Bir Çelik levhalı perde duvarın ortotropik modeli. 32
Şekil 3.1. Shell181 elemanının geometrisi. 39
Şekil 3.2. Çok doğrulu model (b) izotropik pekleşme (c) kinematik pekleşme. 40
Şekil 3.3. Sonlu elemana analizlerinde kullanılan malzeme modeli. 40
Şekil 3.4. (a) Yük uygulaması için rastgele seçilen düğüm noktaları (DN) ve (b) monotonik yükleme altında sonlu eleman analizi sonuçları. 41
Şekil 3.5. 0.05 ötelenme oranında farklı eleman ağı boyutuna sahip modellerin asal gerilme çizimleri. 45
Şekil 3.6. (a) Farklı eleman ağı boyutuna sahip modellerin yük-yer değiştirme grafikleri ve deneysel zarf eğrisi ile karşılaştırılması ve (b) farklı modellerin gerinim – ötelenme oranı karşılaştırması. 46

Şekil 3.7. Farklı integrasyon seçeneği ve farklı eleman ağı boyutlarına sahip modellerin yük – yer değiştirme eğrileri karşılaştırması. 46
Şekil 3.8. Model doğrulama çalışması için kullanılan modeller; (a) SPSW2, (b) F2, (c) TM2 ve (d)3SPSW. 51
Şekil 3.9. Seçilen numunelerin sonlu eleman modelleri (a)SPSW2, (b)F2, (c)TM2 ve (d)3SPSW. 52
Şekil 3.10. (a) F2 numunesinin kolon-kiriş birleşim ölçüleri (b) basitleştirilmiş kabuk model (c) kolon taban plakasını ve diğer yapısal elemanları gösteren kesit (d) kabuk modele ait moment – rotasyon hesaplamaları için kullanılan düğüm noktalarına ait kuvvetler ve deplasmanlar (e) yarı rijit birleşimin kolon – mafsal yöntemi ile modellenmiş hali. 55
Şekil 3.11. (a) Basitleştirilmiş kabuk model ve kiriş – mafsal modelin moment-rotasyon eğrileri karşılaştırması ve (b) paralel kirişlerin moment – eğrilik ilişkileri..... 57
Şekil 3.12. (a) Yük dağıtıcı çerçeve ve (b) n2 düğüm noktasına uygulanan 7 mm deplasman sonucu oluşan şekil değiştirme hali (Berman and Bruneau 2003b)..... 58
Şekil 3.13. Deneysel yük – deplasman eğrilerinin sonlu elemanı analizi sonuçları ile karşılaştırılması (a)SPSW2, (b)F2 basitleştirilmiş kabul model, (c) F2 kiriş – mafsal modeli (d)F2 modeli kiriş – mafsal modelinin C1, C2 ve C3 çevrim tekrarlı modelleri, (e)TM2, (f)3SPSW modeli birinci kat, (g) 3SPSW modeli ikinci kat, (h) 3SPSW modeli üçüncü kat. 63
Şekil 3.14. Deneysel göçme mekanizmalarının çevrimsel ve monotonik yükleme altında incelenmesi (a)SPSW2, (b)F2), (c)TM2, (d)3SPSW. 64
Şekil 3.15. Çelik levhalı perde duvarlar için önerilen histerezis modelleri (a) Mimura and Akiyama (1977) ve (b) Tromposch and Kulak (1987). 66
Şekil 3.16. (a) Çekme alanına dik şekilde tanımlanan λ_{p1} ve λ_{p2} uzunlukları ve (b) seçilen kesitlerde oluşan eksenel yük değişimi. 68
Şekil 3.17. Sonlu eleman analizlerinden elde edilen normalize edilmiş kuvvet-ötelenme oranı eğrileri. 70
Şekil 3.18. (a) Kolon esneklik parametresi ve V_p/V_t ilişkisi, (b) N_c/N_t ile L_d ilişkisi. 72
Şekil 3.19. Denklem 3.1 ile hesaplanan ve analizden gelen $V_{tr}/V_{t,max}$ ilişkisi. 73
Şekil 4.1. (a) Monotonik çevrimsel çalışmada kullanılan temsili bir ÇLPD sonlu eleman modeli ve (b) parametrelerin şematik olarak çizimi. 75

Şekil 4.2. Moment taşıyabilen çerçeveye sahip çok katlı bir çelik levhalı perde duvarın istenilen göçme mekanizması aşamaları. 78
Şekil 4.3. Maksimum kuvvette ve göçme anında temsili bir modelin Von Misses gerinim şekilleri ve birinci kat plakası boyunca gerilme dağılımları. 79
Şekil 4.4. Gözlemlenen göçme mekanizmalarının sistem ve eleman bazında göçme seviyesindeki Von Misses gerinim durumları. 81
Şekil 4.5. Nihai öteleneme oranı belirlenmesinde kullanılan kuvvet değerleri (a) maksimum dayanımın %85'i, (b) maksimum dayanımın %85 i ile %50 si arası, (c) maksimum dayanımın %50'si. 82
Şekil 4.6. Kolon düzlem dışı burkulma grubu için tasarım parametrelerinin ötelenme oranı ve V_p/V_t oranı ile ilişkileri. 85
Şekil 4.7. Kolon eğilme – burulma grubu için tasarım parametrelerinin ötelenme oranı ve V_p/V_t oranı ile ilişkileri. 87
Şekil 4.8. Üst kiriş düzlem dışı burkulma grubu için tasarım parametrelerinin ötelenme oranı ve V_p/V_t oranı ile ilişkileri. 90
Şekil 4.9. Kolon flanş yerel burkulma grubu için tasarım parametrelerinin ötelenme oranı ve V_p/V_t oranı ile ilişkileri. 93
Şekil 4.10. Üst kiriş kesme burkulması grubu için tasarım parametrelerinin ötelenme oranı ve V_p/V_t oranı ile ilişkileri. 96
Şekil 4.11. Kolon kesme burkulması grubu için tasarım parametrelerinin ötelenme oranı ve V_p/V_t oranı ile ilişkileri. 98
Şekil 4.12. Kolon global burkulması grubu için tasarım parametrelerinin ötelenme oranı ve V_p/V_t oranı ile ilişkileri. 101
Şekil 4.13. Kolon esneklik parametresi ve V_p/V_t ilişkisi. 107
Şekil 4.14. (a) Çekme alanı eğim açısı hesaplaması için kullanılan alanlar, (b) çekme alanı eğim açısı ve ötelenme oranı ilişkisi, (c) düzeltme katsayısı ve düzeltme katsayısı olmadan hesaplanan çekme alanı eğim açılarının sonlu eleman analiz sonuçları ile karşılaştırılması. 108
Şekil 4.15. (a) Denklem 2.9'dan ve analizden elde edilen toplam kesme kuvveti dağılımı karşılaştırması ve (b) Denklem 2.9 ve analizden gelen çerçeve kuvveti karşılaştırılması. 110
Şekil 4.16. (a) I_c/I_b oranı 1'e eşit olan ve (b) I_c/I_b oranı 1'den büyük olan temsili modeller üzerinde gerilme dağılımları. 111
Şekil 5.1. Kullanılan yükleme protokolü. 114

Şekil 5.2. Modellerin monotonik ve çevrimsel yükleme altındaki nihai ötelenme (DR_u) oranları. 117
Şekil 5.3. Temsili modellerde monotonik ve çevrimsel yükleme durumları için göçme mekanizmasını gösteren Von Misses gerinim çizimleri. 118
Şekil 5.4. Bütün modeller için gözlemlenen göçme aşamaları. 121
Şekil 5.5. Davranış tipi 1 (BT1): (a) yük – ötelenme oranı eğrisi ve (b) sistem tepki aşamaları ve temsili göçme mekanizması (t_w= 6 mm, ω_i =2.60, L_p/h_p =2.00, P/P_{cr}=0.1, I_c/I_b=1.11). 123
Şekil 5.6. Davranış tipi 2 (BT2): (a) yük – ötelenme oranı eğrisi ve (b) sistem tepki aşamaları ve temsili göçme mekanizması (t_w= 3 mm, ω_i =2.21, L_p/h_p =1.00, P/P_{cr}=0.1, I_c/I_b=3.77). 124
Şekil 5.7. Davranış tipi 3 (BT3): (a) yük – ötelenme oranı eğrisi ve (b) sistem tepki aşamaları ve temsili göçme mekanizması (t_w= 3 mm, ω_i =1.72, L_p/h_p=1.67, P/P_{cr}=0.2, I_c/I_b=2.02). 126
Şekil 5.8. Nihai ötelenme oranı ile farklı parametreler arasındaki ilişkiler. 129
Şekil 5.9. Genelleştirilmiş gövde plakası, çerçeve ve ÇLPD yük – deplasman histerezis modelleri. 132
Şekil 5.10. Farklı modellerin histerezis şekilleri karşılaştırması. 133
Şekil 5.11. E_d/E_p hesaplamasında kullanılan parametreler (b) bütün modellerin E_d/E_p oranları (c) 0.0075 ötelenme oranında farklı modellerin çevrimlerinin karşılaştırılması. 135
Şekil 5.12. Modellerin gövde levhası – toplam kesme kuvveti dağılımı. 136

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Deneysel çalışmalar. 37
Çizelge 3.1. Deneysel çalışmalardan ve sonlu eleman analizinden elde edilen başlangıç rijitliği ve maksimum dayanım değerleri. 65
Çizelge 3.2. Parametrik çalışma için oluşturulan sonlu eleman modellerinin geometrik özellikleri. 69
Çizelge 4.1. Göçme mekanizmalarına göre tasarım parametrelerinin ortalama değerleri. 103
Çizelge 5.1. Çevrimsel yükleme sonlu eleman modelleri detayları. 115
Çizelge 5.2. Davranışa etkili parametreler ve nihai ötelenmelerin ortalama değerleri. 127

1. GİRİŞ

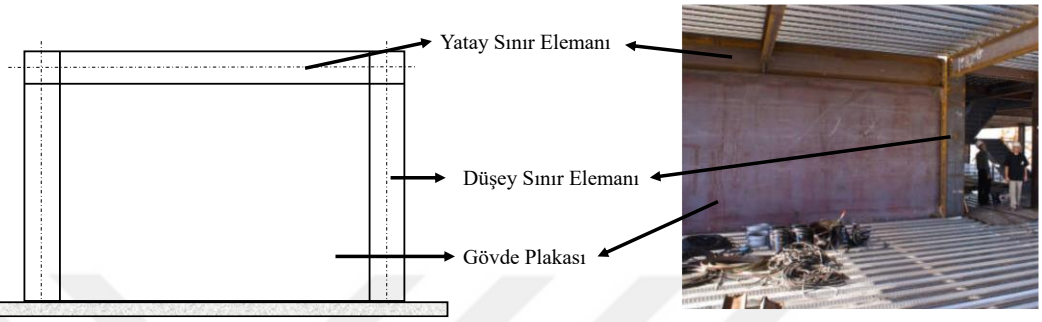
1.1. Genel

Çelik levhalı perde duvarlar (ÇLPD) yüksek enerji tüketme kapasitesi, yüksek rijitlik ve sünekliğe sahip yapısal elemanlardır. Bu özellikleri sebebi ile az katlı yapılardan çok katlı yüksek yapılara kadar uzanan geniş bir çerçevede kullanılmaktadırlar. Çelik levhalı perde duvarlar rüzgâr yükü, deprem yükü gibi yatay yüklere karşı koymak üzere tasarlanan yapı yanal yük taşıma sistemlerinin bir parçasıdırlar.

Bu sistemler genel olarak çelik perde duvarlar, sünek perde duvarlar ve özel plakalı perde duvarlar olarak da adlandırılmaktadır. İdealize edilmiş bir çelik levhalı perde duvar Şekil 1.1'de gösterildiği gibi yatay sınır elemanı (YSE), düşey sınır elemanı (DSE) ve gövde plakasından oluşur. Çelik çerçeve sisteminin açıklığı çok ince (birkaç mm düzeyinde) çelik plaka gövdesi ile doldurulur. Gövde plakası ile sınır elemanları arasındaki birleşimler açısından farklı uygulamalar mevcuttur. En yaygın kullanımı bir ek levha (fish-plate) yardımı ile plaka boyunca kaynaklı birleşim şeklindedir. Çok katlı sistemlerde gövde plakası yükseklik boyunca süreklidir fakat farklı katlarda farklı kalınlıklara sahip olabilir. Çelik levhalı perde duvarlar genel olarak 1970'lerin başlarında Amerika Birleşik Devletleri, Kanada ve Japonya gibi ülkelerde kullanılmaya başlamış ve daha sonra bütün dünyaya yayılmıştır.

Çelik levhalı perde duvarlar tasarım felsefesi olarak iki gruba ayrılmaktadır. İlk kullanıma başlanıldığında genel olarak berkitme levhaları ile güçlendirilmiş kalın plakalara sahip perde duvarlar olarak tasarlanmışlardır. Daha sonra berkitme plakası kullanılmayan güçlendirilmemiş ince plakalar ile tasarlanan ÇLPD sistemler de kullanılmaya başlanmıştır. Amerika Birleşik Devletleri ve Kanada'da daha yaygın olan kullanım güçlendirilmemiş ince levhalı çelik perde duvarlardır. Bu tip sistemlerde gövde levhaları berkitme levhaları olmayan çok ince plakalar olarak kullanıldığı için ihmal edilebilir basınç dayanımına sahiptirler. Gövde plakaları yüksek en ve boya sahipken birkaç milimetre kalınlığında olmasından dolayı oldukça narin elemanlardır ve burkulmaya karşı kendi ağırlığı altında bile bir dayanım gösteremez. Berkitme plakalı perde duvarlarda ise oluşan kesme kuvvetlerine karşı daha yüksek bir burkulma

dayanımından söz edilebilir. Bu berkitme levhaları sisteme orta derecede rijitlik ve dayanım kazandırmaktadır (Sabelli and Bruneau 2006). Ayrıca sistemin histerezis eğrisinde daha az sıkışma görülmesine sebebiyet vermektedir. Bu iki ana tasarım felsefesinin yanında kompozit perde duvarlar, açıklıklı plakalara sahip perde duvarlar, dalgalı plakalardan oluşan perde duvarlar gibi farklı uygulamalar da görülmektedir.



Şekil 1.1. ÇLPD elemanları.

Çelik levhalı perde duvarlar ekonomik ve yapısal olarak geleneksel perde duvar sistemlerine göre birçok avantaja sahiptir (Astaneh-Asl 2001). Bu avantajlar aşağıdaki gibi sıralanabilir;

- Tasarım parametreleri uygun bir şekilde seçilmiş çelik levhalı perde duvarlar yüksek rijitlik, süneklik ve enerji tüketme kapasitesine sahiptirler. Bu sayede yatay yüklere karşı koymak için efektif ve ekonomik çözümler üretmektedirler. Yüksek elastik rijitliği sayesinde ötelenmeyi limitlemek için kullanışlıdırlar.
- Çelik levhalı perde duvarlar geleneksel perde duvarlar ile karşılaştırıldığında 25-30 cm genişliğinde betonarme duvara karşılık birkaç mm kalınlığında çelik levhaları kullanarak yapının ağırlığı önemli ölçüde azaltılmaktadır. Bu sayede yapının taşıyıcı sistemine gelen zati yük büyük oranlarda azaltılabilmektedir. Aynı zamanda yapının ağırlığının azalması yine taşıyıcı sisteme gelen sismik yüklerinde azalmasına sebep olmaktadır. Örneğin, 2006 yılında Los Angeles, ABD de yapılan 55 katlı bir otel-rezidans yapısında betonarme perde yerine çelik levhalı perde kullanımı tercih edilmiş ve proje revize edilmiştir. Verilere göre bina ağırlığı yaklaşık olarak %35 oranında azalmıştır ve dolaylı olarak temel gereksinimleri azalmıştır (Kristeva 2010).

- Süre açısından bakıldığında uzun süren betonarme perde inşa süresine göre çok daha az zamanda inşa edilebilmektedirler. Ayrıca kısalan inşa süresinin yanında demir işçiliği, beton dökümü vb. aşamalar açısından bakıldığında geleneksel duvarlara göre daha az işçilik gerektirmektedir. Her iki durum da ekonomik olarak büyük avantajlar sağlamaktadır.
- Betonarme duvar elemanı yerine çok ince bir çelik plaka kullanıldığından daha geniş alanları mimari kullanıma kazandırmaktadır. Özellikle çok yüksek katlı yapılarda bu özellik büyük ekonomik kazanımlar sağlayabilmektedir.

Bunların yanında çelik levhalı perde duvarlar, servis yükleri altında burkulabilmesi, gövde plakasından gelen kuvvetlerin ancak büyük kesitli kolonlar tarafından karşılanabilmesi, betonarme perde duvarlara göre daha esnek yapıda olmaları, geleneksel duvarlara göre daha yeni sistemler olması dolayısıyla karışılabilecek öngörülemeyen problemlerin olması gibi dezavantajlara sahiptirler (Qian and Astaneh-Asl 2016; Seilie and Hooper 2005).

1.2. Tezin Amacı

Bu tezin amacı kullanılabilirliği doğrulanmış sonlu eleman yöntemleri ile çelik levhalı perde duvarların ön tasarımında yer alan parametrelerin sistem davranışına etkisini incelemektir. Sonlu elemanlar yöntemi ile üç katlı, tek açıklıklı ve moment taşıyabilen birleşimlere sahip modeller üzerinde doğrusal olmayan monotonik ve çevrimsel yükleme analizleri yapılmıştır. Gövde levhası kalınlığı, gövde levhası en – boy oranı, kolon esneklik parametresi, düşey ve yatay sınır elemanları atalet momentlerinin oranı ve eksenel yük seviyesi parametreleri incelenmiştir. Bu parametreler nihai ötelenme oranları, göçme mekanizmaları ve gövde plakası – çerçeve kesme kuvveti dağılımı yönünden ele alınmış ve yönetmelik limitlerinde veya perde duvar tasarım aşamalarında belirsiz olduğu düşünülen konular tartışılmıştır.

1.3. Tezin İçeriği

İkinci bölümde çelik levhalı perde duvarların geçmişi, gelişimi ve tasarım denklemlerinin türetilmesi hakkında yapılmış önceki çalışmalar derlenmiştir. Bunun için

kronolojik bir sıra izlenmemiş olup konu bütünlüğü sağlayan çalışmalar bir araya getirilmiştir. Ayrıca bu tez çalışmasında oluşturulan parametrik modellerin tasarım parametrelerinin sınırları hakkında öngörüye sahip olabilmek için daha önce yapılmış deneysel çalışmaların bir özeti sunulmuştur.

Üçüncü bölümde çelik levhalı perde duvarların davranışını temsil etmesi için kullanılan nümerik yöntem detaylarıyla açıklanmaktadır. Modelleme aşamaları, yakınsama problemleri, çözümün hassasiyeti gibi konular farklı başlıklar altında incelenmiştir. Sonlu eleman yöntemi ile oluşturulan modellerin doğrulama çalışması yine literatürde bulunan ve birbirinden farklı özelliklere sahip deneysel numune davranışları kullanılarak yapılmıştır. Karşılaştırma sonuçları yük – deplasman eğrileri, göçme mekanizmaları, sistemin genel davranışı gibi yönler ele alınarak tartışılmıştır.

Dördüncü bölümde çelik levhalı perde duvarların tasarım denklem limitlerini monotonik yükleme altında inceleyebilmek için 292 adet sonlu eleman modeli oluşturulmuştur. Modellerin göçme mekanizmaları ve bu mekanizmaların tasarım parametreleri ile ilişkisi irdelenmiştir. Gövde plakası – çerçeve arasındaki etkileşim, toplam dayanıma yaptıkları katkı dikkate alınarak incelenmiş ve plaka kesme kuvvetinin toplam kesme kuvvetine oranını tahmin eden bir formül geliştirilmiştir.

Beşinci bölümde tasarım parametrelerinin limitleri değerlendirilmiş ve bu parametrelerin farklı kombinasyonları altında çelik levhalı perde duvarlar incelenerek iyileştirilmiş çevrimsel davranışa sahip olması için gereken parametrik özellikler irdelenmiştir. Bu kapsamda 42 adet farklı model üzerinde çevrimsel yükleme yapılmıştır. Nihai ötelenme oranları, baskın göçme mekanizmaları, enerji tüketme kapasiteleri, çerçeve – gövde plakası kuvvet dağılımı gibi farklı yönlerden analiz sonuçları tartışılmıştır. Değişkenlerini tasarım parametrelerinin oluşturduğu ve çevrimsel yükleme altında nihai ötelenme oranını tahmin eden bir bağıntı önerilmiştir.

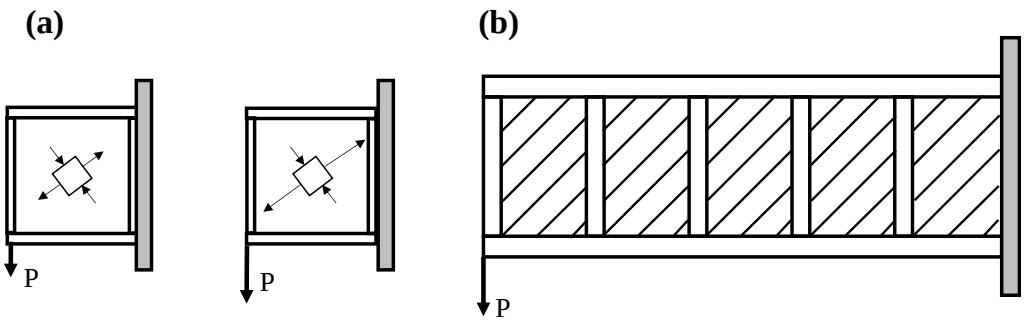
Son olarak altıncı bölümde ise bu çalışmanın önemli sonuçları verilmiştir. Farklı yükleme koşulları altında çelik levhalı perde duvarların davranışı tasarım parametreleri üzerinden özetlenmiştir.

2. LİTERATÜR TARAMASI

2.1. Çelik Levhalı Perde Duvarların Geçmişi ve Tasarım Parametrelerinin Gelişimi

Çelik levhalı perde duvarların ilk kullanımlarında çelik gövde levhasının burkulması bir göçme mekanizması olarak değerlendirilmekteydi. 1980'ler öncesinde bu limit durum göz önüne alınarak çelik levhalı perde duvarlar berkitme levhalarıyla rijitleştirilerek veya çok kalın gövde levhaları kullanılarak tasarlanmaktaydı. İnce metal levhaların burkulma sonrası dayanımları ve davranışları üzerine yapılan çalışmalar ise havacılık mühendisliği alanında çalışmalar yürüten Wagner'in (1931) yaptığı araştırmaya dayanmaktadır. Bu çalışmaya göre kenarları boyunca düzgün desteklenmiş bir plakanın kesme burkulması tam olarak bir göçme durumu teşkil etmemektedir. Wagner (1931) konsol kiriş üzerinde kiriş yatay eksenine dik yükleme altındaki gerilmelerden oluşan elastik deformasyonları göz önünde alarak kiriş flanşları için bir esneklik parametresi önermiştir. Daha sonra Basler (1961) dolu gövdeli çelik kirişlerde çelik gövdede oluşan çekme alanları sonucu meydana gelen kesme kuvveti dayanımını gerçeğe oldukça yakın değerlerde hesaplamıştır.

Kuhn et al. (1952) tarafından ABD ulusal havacılık komitesi için hazırlanan teknik notta plakaların diyagonal çekme davranışı teorik olarak detaylıca incelenmiştir. Bunun için Wagner (1931) gibi gövde plakası çekme etkisi altındaki bir yapma kirişin fiziksel koşullarından yola çıkmıştır. Kuhn et al. (1952) diyagonal çekme plakasının çalışma prensibini Şekil 2.1(a)'daki gibi basitleştirmiştir. Daha sonra Şekil 2.1(b)'de gösterilen kiriş gövde plakasını yatayla bir eğim açısına sahip ve üniform çekme altında olan şeritler halinde bölmüştür. Daha sonra yapılan çalışmalarda ÇLPD analojisi için Şekil 2.1(b)'de gösterilen berkitme levhalarının perde duvar kirişlerini, alt ve üstte bulunan flanşların ise perde duvar kolonlarını temsil ettiği kabul edilmiştir.



Şekil 2.1. (a) Diyagonal çekme çalışma ilkesi (b) kiriş üzerinde şerit halinde diyagonal çekme oluşumu.

İlk olarak Wagner (1931) tarafından geliştirilen flanş esneklik parametresini basitleştirerek daha sonra çelik levhalı perde duvarlarda kolon esneklik parametresi olarak kullanılacak olan ifadeyi ortaya çıkarmıştır. Kuhn et al. (1952) tarafından ifade edilen esneklik parametresi;

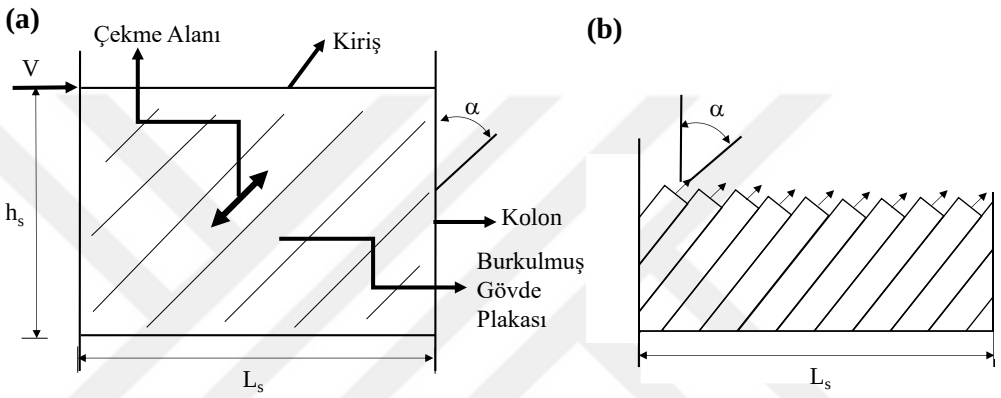
$$\omega_i = 0.7 h_{st} \left(\frac{t_w}{(I_u + I_0) L_u} \right)^{0.25} \tag{2.1}$$

şeklinde ifade edilmektedir. Buna göre h_{st} komşu berkitme levhaları arasındaki uzaklık, I_u alt flanşın atalet momenti, I_o üst flanşın atalet momenti, L_u iki flanş arasındaki uzaklık ve t_w ise gövde plakası kalınlığıdır. Bu denklemin türetilme aşamaları EK-1'de anlatılmıştır. Bu denklemde çelik levhalı perde duvarlarda plakanın her iki tarafında aynı kesitlere sahip kolonların kullanıldığı düşünüldüğünde I_u değeri ve I_o değeri birbirine eşit olacaktır ve denklem aşağıdaki şekli alacaktır;

$$\omega_i = 0.7 h_{st} \left(\frac{t_w}{2 I_c L_u} \right)^{0.25} \tag{2.2}$$

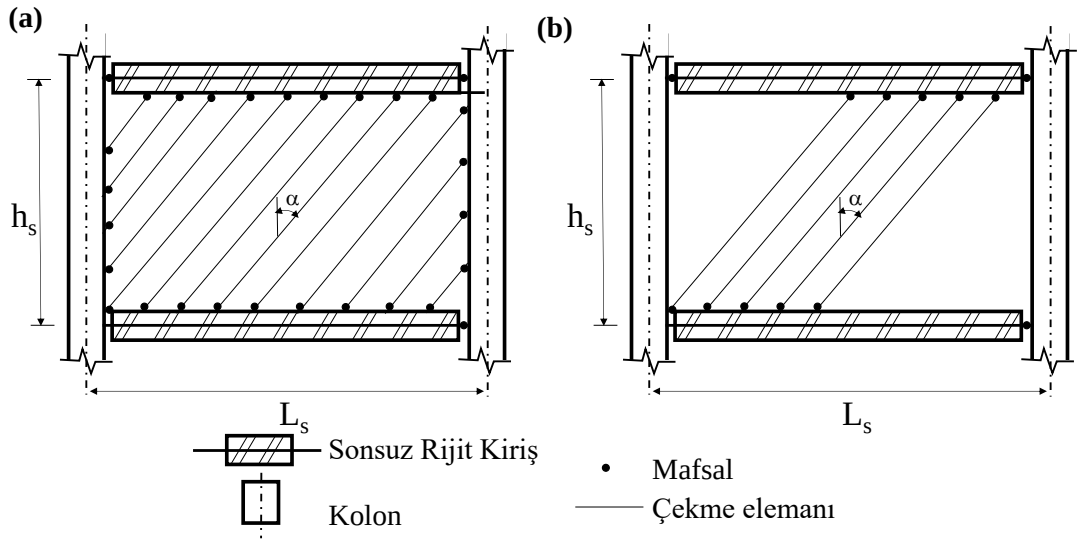
Thorburn et al. (1983) Alberta Üniversitesinde levha burkulma limit durumunu dikkate almayarak burkulma sonrası gövde levhası dayanımı üzerine çalışmalar yürütmüştür. Bu olgu yukarıda anlatıldığı gibi daha öncesinden bilinmesine rağmen Thorburn et al. (1983) burkulma sonrası dayanımı çelik levhalı perde duvarların tasarımına uyarlamıştır. Wagner (1931)' in belirttiği gibi plakaların burkulma öncesi herhangi bir kesme kuvvetine karşı dayanım göstermediği kabul edilmiştir. Bu çalışmaya

göre plakaların burkulma sonrası dayanımını ihmal etmek çok konservatiftir ve aslında en önemli karşı koyma mekanizması plakalar burkulduktan sonra oluşmaktadır. Burkulan plakaların bir çekme alanı oluşturarak dayanım elde etmesi kabul edilmiş ve analitik bir model kurulmuştur. Bu model şerit model veya çubuk modeli olarak adlandırılmaktadır. Bu modele göre burkulmuş gövde plakası eşit alanlara sahip ve belirli bir eğim açısına sahip şeritler olarak gösterilebilir. Sınır elemanlar arasında kalan burkulmuş plakada oluşan çekme alanı Şekil 2.2(a)'da verilmiştir. Gövde plakasının şeritlere bölünmüş şekli ve çekme alanı eğim açısı ise Şekil 2.2(b)' de şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.2. (a) Burkulmuş plakanın analitik modeli ve (b) gövde plakasının şeritler halinde gösterimi.

Bu çalışmada bir plaka için en az 10 şerit kullanılmasını önermiştir. Çekme çubuklarının alanı, belirlenen şeritlerin genişliği ve plaka kalınlığının çarpımından oluşan alan ile eşit olacak şekilde belirlenmiştir. Oluşturulan çubukların hepsi aynı eğime sahiptir. Thorburn et al. (1983) bu modeli geliştirirken iki uç durumu dikkate almışlardır. Birinci duruma göre sonsuz rijitliğe sahip kolonlardan oluşan perde duvarda çekme alanları plaka boyunca tamamıyla üniform bir şekilde oluşur. İkinci durumda ise tamamen esnek kolonların kullanıldığı varsayılarak kolonlar boyunca çekme alanı için hiçbir şekilde ankraj sağlanmadığı düşünülmüştür. Şeritlerin çekme çubukları şeklinde ifade edildiği üniform analitik model Şekil 2.3(a)'da gösterilmiştir. Şekil 2.3(b)'de ise tamamlanmamış çekme alanına ait model verilmiştir.



Şekil 2.3. Thorburn et al. (1983) tarafından geliştirilen temsili şerit modeli (a) tamamlanmış çekme alanı (b) kısmi çekme alanı.

Eğimi belirten çekme alanı eğim açısı, kolon ve kiriş kesit alanlarının, gövde levhası boyutlarının ve kalınlığının bir fonksiyonu olarak aşağıdaki gibi ifade edilmektedir:

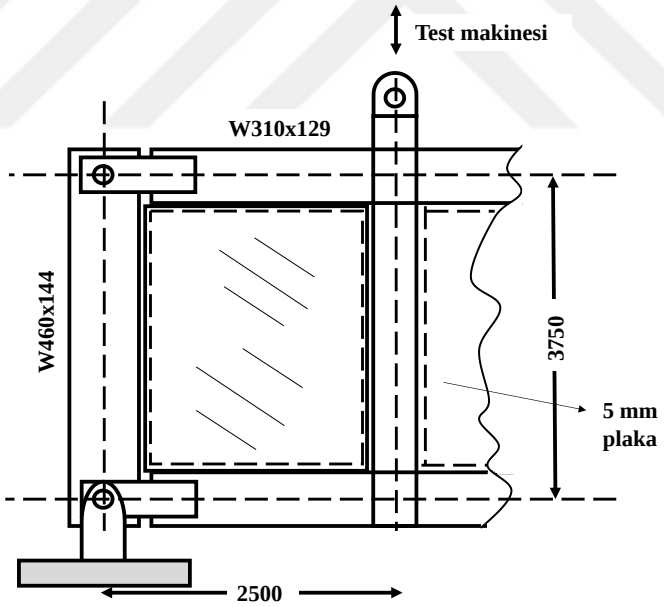
$$\tan^4 \alpha = \frac{1+\frac{L_s \times t_w}{2 \times A_c}}{1+\frac{h_s \times t_w}{A_b}} \tag{2.3}$$

Burada; α çekme alanı eğim açısı, L_s kat genişliği, t_w plaka kalınlığı, h_s kat yüksekliği, A_c kolon kesit alanı A_b kiriş kesit alanını temsil etmektedir. Bu eşitlik yapılan iç ve dış işlerin eşitliği ilkesinden yola çıkarak türetilmiştir. Ayrıca kiriş-kolon birleşimleri mafsal olarak değerlendirilmiştir.

Thorburn et al. (1983) ayrıca çekme alanındaki gerilmelerin ancak sonsuz rijitlikte kolonların kullanılması durumunda üniform olarak dağılabileceğini bildirmiştir. Kolonun esnekliği arttıkça gövde plakası boyunca gerilmelerdeki değişim artmaktadır. Tek katlı çelik perde duvar için geliştirilen bu analitik modelin uygun sınır şartları kullanılması durumunda çok katlı modeller için de uygun olduğu belirtilmiştir. Plaka kalınlığının artması durumunda panel rijitliğin artacağı, yüksekliğinin artması durumunda ise rijitliğin

azalacağı belirtilmiştir. Ayrıca kolon rijitliğinin artmasının panel rijitliğini artırdığını belirtmiştir.

Timler and Kulak (1983) Thorburn et al. (1983) tarafından ortaya konulan şerit modeli doğrulamak için büyük ölçekli bir deney yapmışlardır. Bu 5 mm kalınlığında gövde plakasına sahip olan tek katlı model önce servis limitine ulaşana kadar çevrimsel yüklemeye maruz bırakılmıştır daha sonra sistem göçmesi gerçekleşene kadar tek yönlü yüklenmiştir. Açıklığı 3750 mm ve yüksekliği 2500 mm olan modelde kolonlar düşey olarak yerleştirilmiş ve yaklaşık olarak W310x129' a eşit geometriye sahip yapma kesittir. Dikey yönde yerleştirilen kirişler ise yaklaşık olarak W460x144 kesite sahiptirler. Bu boyutların gerçek bir yapıya uygun olduğunu ve bu yüzden tercih edildiğini belirtmişlerdir. Piyasada hazır bulunan en ince kalınlığa sahip (5 mm) sıcak haddelenmiş gövde plakasını kullanmışlardır. Şekil 2.4'te Timler and Kulak (1983) tarafından yapılan test düzeneği verilmiştir.



Şekil 2.4. Timler and Kulak (1983) tarafından test edilen çelik levhalı perde duvar.

Timler and Kulak (1983)'ın çalışmalarında bildirdikleri sonuçlara göre tahmin edilen ve deneyde ölçülen eğim açıları arasında iyi bir tutarlılık elde edilmiştir. Asal gerilmelerin çekme alanı eğim açısı için hesaplanan değerler ile gerçek değerler arasında yalnızca %4 ile -%9 oranında bir sapma olduğu bildirilmiştir. Toplam yük-deformasyon ilişkileri karşılaştırıldığında ise deneysel değerler ile hesaplanan değerlerin büyük bir

yakınlıkta eşleştiği görülmüştür. Thorburn et al. (1983) tarafından önerilen şerit yönteminin ince plakalı çelik levhalı perde duvarlar için oldukça gerçekçi ve kullanılabilir olduğu ortaya konulmuştur. Bu çalışma ayrıca, Thorburn et al. (1983) tarafından önerilen eğim açısı formülünden hesaplanan değerlerin sadece ihmal edilebilecek seviyelerde farklılıklara sebep olduğu, fakat daha kesin sonuçlar için revize edilmiş olan aşağıdaki denklemin kullanılabileceğini ileri sürmüştür;

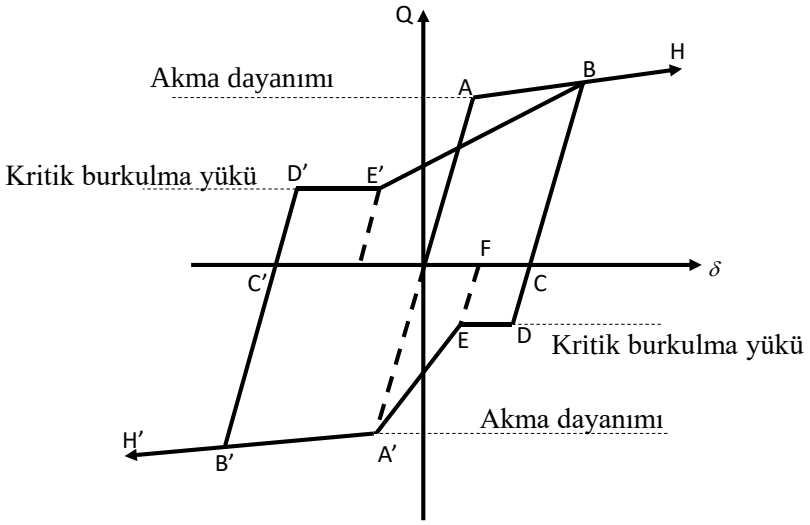
$$\tan^4 \alpha = \frac{1+\frac{t_w L}{2A_c}}{1+t_w h_s\left[\frac{1}{A_b}+\frac{h_s^3}{360 I_c L}\right]} \tag{2.4}$$

Tromposch and Kulak (1987) başka bir çalışmada yine Thorburn et al. (1983) tarafından öne sürülen şerit-çekme çubukları modelinin doğruluğunu kontrol etmek için tek katlı ve büyük ölçekli bir deneysel çalışma yürütmüşlerdir. Bu çalışmada kullanılan test düzeneği Timler and Kulak (1983) tarafından yapılan çalışmada olduğu gibi yatay kolon ve düşey kiriş şeklinde tasarlanmıştır. Deneyde çekme çubuğu-şerit modelin kontrolünün yanı sıra çelik levhalı perde duvar sistemin çevrimsel yükleme altındaki histerezis davranışının incelenmesi de amaçlanmıştır. Deney numunesi iki plaka içeren bir çerçeve sistemden oluşmaktadır. Yükleme Şekil 2.6(a)'da görüldüğü gibi iki plakanın ortasında bulunan kiriş üzerinden yapılarak farklı yönlerde oluşan çekme alanlarının davranışları gözlemlemek istenmiştir. Kolonlar W310x241, kirişler ise W610x241 kesitlerden oluşmaktadır. Gövde plaka kalınlığı ise 3 mm'dir. Kiriş-kolon birleşimleri genel olarak çelik yapılarda kullanılan tipik bir bulon birleşimi ile birleştirilmiştir. Ön gerilmeli yüksek dayanımlı çelik çubuklar vasıtasıyla kolonlara eksenel yükleme yapılarak yapıda oluşan zati yükler simüle edilmiştir. 28 çevrimsel yükleme ve ardından monotonik yükleme yapılan deney sonucunda eğik çekme çubukları ile basitleştirilmiş analitik modelin ÇLPD duvarların dayanımını ve nihai kapasitesini hesaplamak için güvenle kullanılabileceği belirtilmiştir.

Bu arada çelik levhalı perde duvarların histerezis davranışını inceleyen çalışmalar da yapılmıştır. Mimura and Akiyana (1977) çelik levhalı perde duvarların monotonik ve çevrimsel yükler altındaki davranışını tahmin eden analitik bir çalışma yapmışlardır. Bu

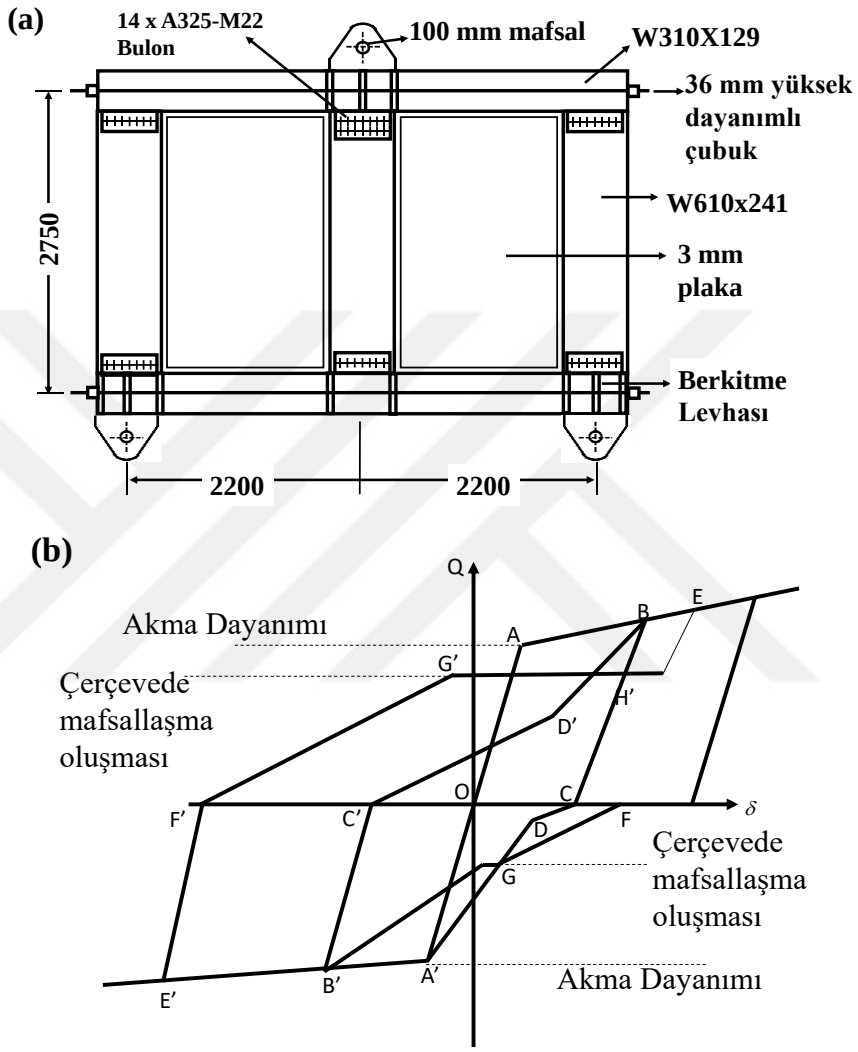
çalışmada ince plakaların elastik burkulma teorisi kullanılarak basit mesnetli bir gövde plakasının kesme kuvveti altında burkulma dayanımı hesaplanmıştır. Bu kritik elastik burkulma yükü aşıldıktan sonra ise çelik gövde plakalarının bir çekme alanı oluşturarak yüklere karşı koyduğu ifade edilmiştir. Mimura and Akiyana (1977) yük-yer değiştirme eğrileri ve teorik bilgilerin ışığında çelik levhalı perde duvarlar için Şekil 2.5'te verilen histerezis davranışı geliştirmişlerdir.

Buna göre çelik levhalı perde duvar OA arasındaki çizgi boyunca elastik rijitliği ile hareket eder daha sonra belirli bir gerinim pekleşmesi ile birlikte AH çizgisini takip eder. AH çizgisi üzerindeki herhangi bir B noktasından yük boşaltma başlar. C noktasına gelindiğinde yük tamamen kaldırılmış durumdadır. Daha sonra ilk yükleme yönünün negatifi yönde yeniden yükleme başlar. D noktasına ulaşıldığında teorik olarak hesaplanmış olan kritik burkulma yüküne ulaşılır. Çelik levhalı perde duvarlarda gövde plakası sadece çekmeye çalışan bir eleman olarak kabul edilse de D noktasına kadar belirli bir basınç dayanımı gösterirler. DE noktası arasında negatif yönde çekme alanları oluşur. E noktasına ulaşıldığında ise negatif yönde oluşan çekme alanları (burkulmuş plaka) uygulanan yüke karşı dayanım göstermeye başlar. Çelik levhalı perde duvarın çevrimsel yük altındaki davranışı bu histeresisi izleyerek bir göçme mekanizması oluşana kadar devam eder.



Şekil 2.5. ÇLPD'ler için Mimura and Akiyana (1977) tarafından önerilen histerezis davranış.

Tromposch and Kulak (1987), Mimura and Akiyana (1977) tarafından önerilen histerezis davranıştan yola çıkarak yeni bir davranış modeli önerilmiştir. Önerilen model Şekil 2.6(b)'de gösterilmiştir. Burada *Q*, uygulanan yatay kuvveti, δ ise yatay yer değiştirmeyi temsil etmektedir.

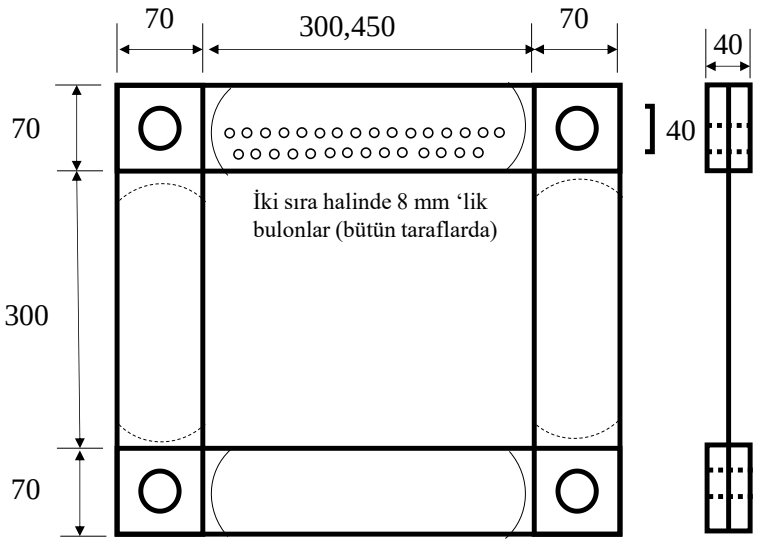


Şekil 2.6. (a) Tromposch and Kulak (1987) test düzeneği (b) önerilen histerezis davranış modeli.

Şekil 2.6(b)'de OA çizgisi üzerinde bulunan bölgede çelik levhalı perde duvar uygulanan yüklere elastik olarak reaksiyon vermektedir. A noktasından sonra akma başlamış ve gerinim pekleşmesi ile elastik olmayan bir davranış görülmektedir. Yükleme protokolüne uygun olan herhangi bir B noktasından sonra yük boşaltma işlemi başlar burada sadece çerçeve rijitliği ile BC çizgisi üzerinde ilerler. Bu histerezis model geliştirilirken gövde plakalarının burkulma öncesi dayanımı ihmal edilmiştir. Yük

tamamen boşaltıldıktan sonra negatif yönde yükleme başlar ve OC arasındaki uzaklığın yarısı kadar olan bir deplasman aşılana kadar çekme alanları oluşumlarını sürdürür. D noktasından A′ noktasında akma sınırına ulaşana kadar gelindikten sonra AB çizgisine paralel olan bir A′B′ yolu izlenir. Yine rastgele bir nokta olan B′ noktasından C′ noktasına kadar çerçeve rijitliği ile yük boşaltımı yapılır. D′ noktasına kadar plakada tekrar pozitif yönde çekme alanları oluşmaya devam eder. Burada CD mesafesi ile C′D′ mesafesi arasındaki büyüklük farkı bir önceki çevrimden gelen kalıcı deformasyonlardan kaynaklanmaktadır. Çekme alanları oluştuğunda tekrar AE çizgisi üzerinde bulunan ve bir önceki pozitif yüklemenin maksimum noktası olan B noktasına gelindiğinde çizginin eğimi BE arasındaki eğime eşit olur. Yükleme protokolünde bulunan daha sonraki artırımlar yine aynı yönelimleri takip ederek yeni çevrimleri oluşturur.

Roberts and Sabouri-Ghomi (1991) çelik levhalı perde duvarların histerezis karakteristiklerini tahmin edebilmek için teorik bir model önermiştir. Bunun için bir dizi çelik levhalı perde duvar üzerinde yarı statik – çevrimsel yükleme altında deneyler gerçekleştirmiştir. Bu teorik modelde gövde plakasının burkulması, plakanın ve çerçevenin plastik şekil değiştirmeleri göz önüne alınmıştır. Bu çalışmadaki deneylerde 0.83 mm ve 1.23 mm kalınlıklara sahip çelik plakalar kullanmıştır. Panellerin en-boy oranı 1 ve 1.5 olarak belirlenmiştir. Plaka kenarları çerçeve elemanlarına 2 sıra halinde 8 mm çapında yüksek dayanımlı bulonlar ile birleştirilmiştir. Çerçeve elemanlar birbirlerine ise pimler vasıtasıyla birleştirilmiştir. Test detayları Şekil 2.7'de verilmiştir. Toplamda 6 adet ÇLPD test edilmiş olup plaka boyutları 300 x 300 ve 300 x 450 mm olacak şekilde tasarlanmıştır. Deneylerin sonucunda bütün paneller yük taşıma kapasitelerinde bir düşüş göstermeden bütün yükleme çevrimlerini tamamlamaya yetecek kadar iyi süneklik göstermişlerdir. Ayrıca narin plakalar kullanmanın normal servis yükleri altında bile yüksek kusurlar gösterdiği ve göreceli olarak yüksek yer değiştirmelere sahip olduğu da belirtilmiştir. Önerilen teorik modelin yeterince iyi bir şekilde davranışı temsil ettiği bildirilmiştir.



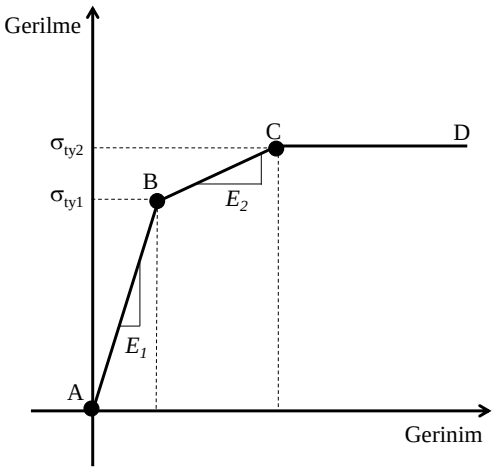
Şekil 2.7. Test numunelerinin geometrik detayları.

Caccese et al. (1993) çevrimsel yükleme altındaki çelik levhalı perde duvarların davranışlarını deneysel olarak incelemişlerdir. Üç katlı, 1:4 ölçekli, farklı birleşimlere ve plaka kalınlıklarına sahip altı farklı deney numunesi test etmişlerdir. Bu deneylerde W4x13 kesitlerine sahip kolonlar ve S3x5.7 kesitlerine sahip kirişler kullanılmıştır. Kiriş kolon birleşimlerinde kirişin uç kesiti boyunca devamlı bir şekilde kolona kaynaklı olduğu (tip1) ve sadece kiriş gövdesinin kaynaklı olduğu (tip2) olmak üzere iki çeşit birleşim kullanmışlardır. Gövde plakası ise kiriş ve kolon flanşlarına sürekli kaynak yapılarak çerçeveye bağlanmıştır. Deneyler çevrimsel ve monotonik yükleme yapılacak şekilde tasarlamıştır. %2 seviyesinde ötelenmeye gelene kadar 24 adet çevrim uygulanmıştır. Daha sonra eğer göçme gerçekleşmemişse aktüatör kapasitesine ulaşıncaya kadar monotonik itme uygulanmıştır. Deneyler sonucunda, narin plaka kullanılırsa sistemin elastik olmayan davranışının gövde plakasının akması ile başlayıp sistem dayanımının kolonlarda oluşan plastik mafsallar tarafından kontrol edildiğini fakat kalın plaka kullanılırsa sistem dayanımının kolonların stabilizesinin bozulması ile kontrol edildiğini ileri sürmüşlerdir. Her iki durumda da dayanım kolonlar tarafından kontrol edildiği için plaka kalınlığının artırılması durumunda sadece ihmal edilebilir bir dayanım kazanımı olduğunu, öte yandan fazla malzemenin gereksiz yere harcanmış olacağını bildirmişlerdir. Çalışmaya göre, düşük sismik hareketlerde ve yüksek rüzgâr yükü altında çelik levhalı perde duvarlar elastik olarak yükü karşılayacaktır. Fakat yüksek sismik hareketlerde plakanın tamamen akmasının tamamlanmasından önce kolonların

burkulmasına sebebiyet vermemek için daha narin plakaların kullanılmasını önermişlerdir.

Elgaaly et al. (1993) basit bir analitik model geliştirmişlerdir. Bu modelde plakaların burkulma öncesi dayanımları ihmal edilmiştir. Analitik modelin amacı lineer olmayan sonlu eleman yöntemleri kullanarak ince gövde plakalı perde duvarların burkulma donrası davranışlarını incelemektir. Modelde yüksek yer değiştirme etkileri ve lineer olmayan malzemeler dikkate alınmıştır. Davranışı doğru şekilde tahmin edebilmek için oldukça fazla elemana ihtiyaç olduğunu ve bunun uzun zaman ve yüksek hesaplama gücü gerektirdiğini bildirmişlerdir. Çalışma sonuçlarına göre düzgün desteklenmiş ince gövde plakaların burkulma sonrası ulaştığı taşıma gücü, elastik burkulma yüküne oranla çok fazladır. Analitik model için daha önce Caccese et al. (1993) tarafından testleri yapılan numunelerin deneyler sonucunda elde edilen gerilme-gerinim karakteristiklerini kullanılmıştır. Buna göre gövde plakasının davranışını modellemek için 12 çubuk elemanı tanımlanmıştır. Hepsi aynı açıya sahip olup bu açı 42.8 ° olarak belirlenmiştir. Çubuk eleman gerilme-gerinim ilişkisi elasto-plastik kabul edilmiştir. Sadece elastik rijitlik başarılı bir şekilde tahmin edilmiştir. Sistemin dayanımı gerilme-gerinim eğrisinin akma bölgesi test sonuçlarına göre oldukça fazla çıkmıştır. Bunun üzerine araştırmacılar gerilme gerinim eğrisini test sonuçlarını göz önüne alarak üç doğrulu bir şekilde temsil eden bir model geliştirmişlerdir. Şekil 2.8' de gösterilen bu modele göre σ_{ty2} değeri plaka malzemesinin akma gerilmesini, σ_{ty1} ise plaka malzemesinin akmaya ilk başladığı gerilme değerini belirtmektedir. Rijitlik katsayıları E_1 ve E_2 ise sırasıyla kullanılan çeliğin elastik modülü ve test sonuçları dikkate alınarak seçilen katsayıdır. Bu katsayılar ampirik formüller ile hesaplanmıştır ve plakanın kesme kuvveti altındaki burkulma gerilmesi ile kesme gerilmesi kullanılarak hesaplanmıştır.

Bu üç doğrulu gerilme gerinim eğrisi kullanıldığında çelik levhalı perde duvarların monotonik davranışının iyi bir hassasiyet ile tahmin edilebildiği araştırmacılar tarafından bildirilmiştir.

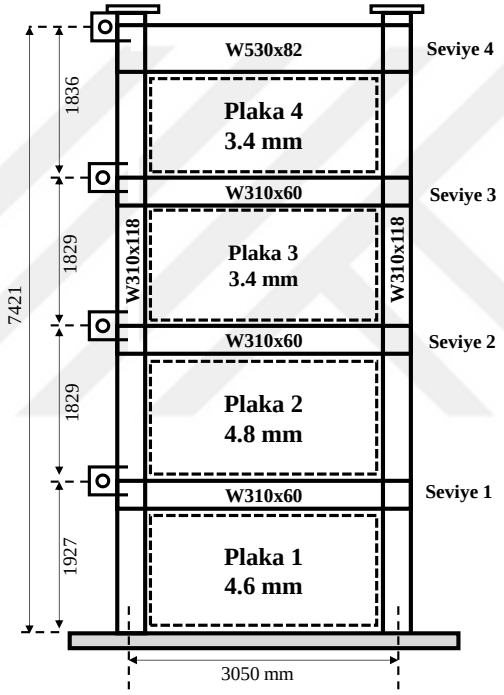


Şekil 2.8. Elgaaly et al. (1993) tarafından çekme çubukları için kullanılan üç doğrulu gerilme-gerinim ilişkisi.

Elgaaly and Liu (1997) çelik levhalı perde duvarların modellenmesi için yeni bir model önermişlerdir. Buna göre plaka gövdesi şerit yöntemindeki gibi kullanılarak kiriş ve kolonların birleşimi guse levhaları ile yapılmıştır. Elgaaly et al. (1993) çalışmasındaki gibi çubukların gerilme-gerinim eğrileri 3 doğrulu ilişki ile tanımlanmıştır. Bu çalışmada çekme çubukları her iki yönde de eşit açıya sahip olacak şekilde yerleştirilmiştir. Çekme alanı eğim açısı 45° olarak kabul edilmiştir. Analitik modelin doğrulanması için 1:4 ölçekli 4 adet çelik levhalı perde duvar tasarlanmıştır ve monotonik ve çevrimsel yüklemeler altında test edilmiştir. Analitik model plakanın çerçeve elemanlara bulonlu ve kaynaklı olarak birleştirilmesi şeklinde iki senaryo içermektedir. Bulonlu birleşime sahip modelde elastik rijitliğin ve akma yükünün daha az olduğu bildirilmiştir. Test sonucunda analitik modelin deney sonuçlarıyla iyi bir örtüşme gösterdiği ve kullanılabilir olduğu ortaya konmuştur. Çelik levhalı perde duvarların davranışının sınır şartları tarafından kontrol edilebildiği sonucuna varılmıştır. Ayrıca çelik levhalı perde duvarların tasarımında seçilecek kolonların, gövde plakasında oluşan diyagonal çekme alanlarının tamamen akmasına ve tam kapasitesine ulaşmasına izin verecek kadar rijit seçilmesi ve bu aşamaya gelinene kadar kolonda akma veya burkulma olmaması gerektiği vurgulanmıştır.

Driver et al. (Driver et al. 1997, 1998b; 1998a) tam ölçekli, dört katlı ve tek açıklıklı bir perde duvarın çevrimsel yükleme altındaki davranışını incelemek için bir deneysel çalışma yürütmüşlerdir. Deney düzeneğinin toplam yüksekliği 7.4 m toplam genişliği ise taban plakası dahil 3.4 m'dir. Birinci kat yüksekliği 1.93 m, diğer katların

yüksekliği ise 1.83 m'dir. Katlarda kullanılan gövde plakası kalınlıkları birinci kattan dördüncü kata doğru 4.54 mm, 4.65mm, 3.55 mm, 3.40 mm şeklindedir. Kolon kesitleri W310x118, katlar arası kirişlerin kesitleri W310x60 ve üst kiriş kesiti W530x82 olup deney düzeneği Şekil 2.9'da verilmiştir. Kolon-kiriş birleşimlerinde kaynaklı moment birleşimi kullanılmıştır. Yatay yükleme her kat seviyesinden olacak şekilde ATC-24 (Council 1992) tarafından hazırlanan protokole uygun olarak yapılmıştır. 20 tanesi elastik olmayan bölgede olmak üzere toplamda 30 çevrim uygulanmıştır. Moment çerçevesi kullanılan bu deneyde kolon tepe noktalarından eksenel kuvvet deney boyunca uygulanmıştır.



Şekil 2.9. Driver et al. (1998b) tarafından test edilen deney numunesi.

Deney sonuçlarına göre çelik levhalı perde duvar yüksek enerji tüketme kapasitesi, yüksek rijitlik ve yüksek süneklik göstermiştir. Nihai durumda bile sistemin ana sünek elemanı olan çelik gövde plakasının maksimum yük seviyesinin %85'ini taşıyabilecek seviyede olduğu gözlemlenmiştir. Histerezis eğriye bakıldığında ise herhangi bir ani düşüş gözlemlenmemiştir. Dayanımdaki düşüş yavaş ve kontrol edilebilir bir şekilde olmuştur. Sistemin akma deformasyonuna ulaştığı yük kapasitesi nihai dayanımının yaklaşık beşte biridir. Gövde plakası olmayan moment çerçevelerine göre kolon-kiriş birleşimlerindeki zorlamanın az olduğu, bunun sebebi olarak yatay yüke karşı koyan ana elemanın gövde plakasının olması gösterilmiştir. Ayrıca göçme meydana

gelmeden önce birinci katta ulaşılan yer değiştirme miktarı akma yer değiştirmesinin yaklaşık dokuz katına ulaşmıştır. Göçme mekanizması, en alt katta taban plakasının hemen üzerindeki ve birinci kat seviyesi kirişin hemen altındaki bölgede lokal kolon flanş burkulması sonucu oluşan çatlaklar ve gövde plakası yırtılması olarak açıklanmıştır. Kolonlarda lokal flanş burkulmasının önüne geçilmesi gerektiği belirtilmiş ve bu yönde önlemler alınması önerilmiştir.

Deney numunesinin modellenmesi önce sonlu elemanlar yöntemi ile bir hesaplama programı kullanılarak kabuk elemanlar ile yapılmıştır. Kabuk elemanlar hem gövde plakası hem de kiriş ve kolonlar için kullanılmıştır. Statik itme ve çevrimsel yükleme analizleri sonucunda nihai dayanımı itme analizi yaklaşık %7 oranında fazla olacak şekilde hesaplamıştır. Sistemin elastik rijitliği ise yaklaşık olarak %15 daha fazladır. Çevrimsel analiz sonuçlarında itme analizi gibi sistemin dayanım ve rijitlik değerleri deneysel verilerden fazla çıkmıştır. Modelleme çalışması şematik çizimi Şekil 2.3'(a) da verilen Thorburn et al. (1983) tarafından önerilen şerit yöntemi ile devam etmiştir. Bu yöntem uygulanırken kolon ve kirişlerin plastik kapasitesine ulaşıldığında manuel olarak plastik mafsal eklenmesi gibi modifikasyonlar yapılmıştır. Şerit yöntemi ile analiz sonuçlarında deneysel verilere göre nihai dayanım %8, elastik rijitlik ise %18 daha az değerler almıştır. Kullanılan şerit sayısı üzerine yapılan araştırmaya göre ise şerit sayısını 10'dan 20'ye çıkarmanın sonuçlar üzerinde bir ilerleme veya test sonuçlarına daha çok yaklaşma gibi etkileri olmadığı gözlemlenmiştir.

Rezai (1999) British Columbia Üniversitesinde gerçekleştirdiği deneysel çalışmanın ilk aşamasında iki adet tek katlı ve tek açıklıklı numune genel davranış hakkında öngörüde bulunabilmek için çevrimsel yükleme altında test edilmiştir. Daha sonra ise tek açıklıklı ve dört katlı, 1:4 ölçekli bir çelik levhalı perde duvar tasarlanmış ve yarı-statik çevrimsel yükleme altında test edilmiştir. Son olarak ise dört katlı numuneye benzeyen bir model sarsma tablasında düşük, orta ve yüksek dinamik yer hareketleri altında incelenmiştir. Tek katlı model oldukça rijit bir davranış göstermiştir. Enerji tüketme kapasitesi ve süneklik davranışı açısından iyi performansa sahiptir.

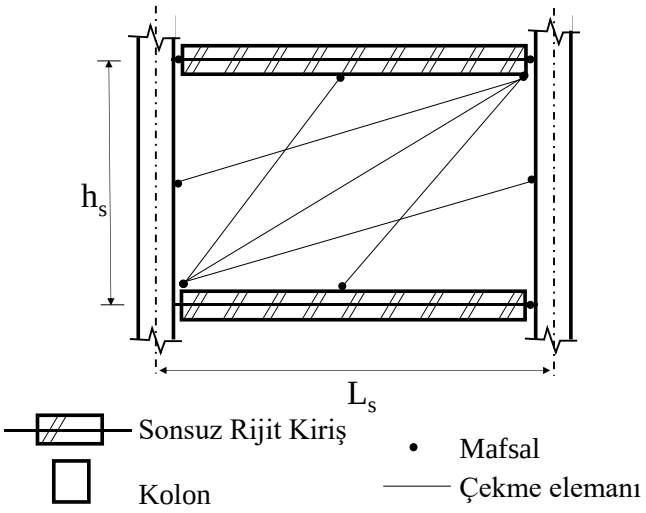
Dinamik yükleme aşamasında dört katlı model bir dizi kaydedilmiş ve sentetik olarak oluşturulmuş yer hareketine maruz bırakılmıştır. Dinamik yüklemelere sarsma

tablasının kapasitesine ulaşılıncaya kadar devam edilmiştir. Dinamik yükleme için kullanılan modelde kolonlar B100x9 kesitlere ve kirişler ise S75x8 kesitlere sahiptir. Gövde plakasını 1:1 en-boy oranına sahip olacak şekilde tasarlamışlardır. Gövde plakası kalınlıkları 1.5 mm'dir.

Dört katlı modelin gerilme-yer değiştirme eğrileri elde edildikten sonra yer hareketlerinin oluşturduğu enerjinin büyük oranda birinci kat gövde levhası tarafından absorbe edildiği görülmüştür. Diğer katlardaki davranış ise genel olarak birinci kat etrafında dönen rijit gövde halinde gerçekleşmiştir. Gövde plakalarının yükleme durumu tersine dönerken (yön değiştirirken) sistem dayanımına katkısının olmadığı, sistemin bu aşamada sadece çerçeve eleman gibi davrandığını bildirmişlerdir. Histerezis döngülerin bu yüzden sıkışma gösterdiği ileri sürülmüştür.

Deneysel sonuçlar nümerik modellerin doğrulanması için kullanılmıştır. Genel olarak daha önce tanımlanmış olan çubuk modelinin elastik rijitliği olduğundan daha yüksek tahmin ettiği görülmüştür. Analitik model ile test sonuçları arasındaki fark kat sayısının artmasıyla daha çok artmıştır. Bu sonuçlar üzerine farklı bir nümerik model geliştirilmiştir Şekil 2.10'da verilen bu modele göre çekme çubukları farklı açılarla yerleştirilmiştir. Çünkü yapılan araştırmaya göre çekme çubuklarının sahip olduğu eğim açıları farklı lokasyonlarda farklı değerlere sahip olmalıdır. Modeli daha basitleştirmek için çekme çubukları kiriş kolon birleşiminden diyagonal olarak geçmekte ve yine kiriş kolon birleşim yerinden çerçeve elemanların orta noktalarına gitmektedirler.

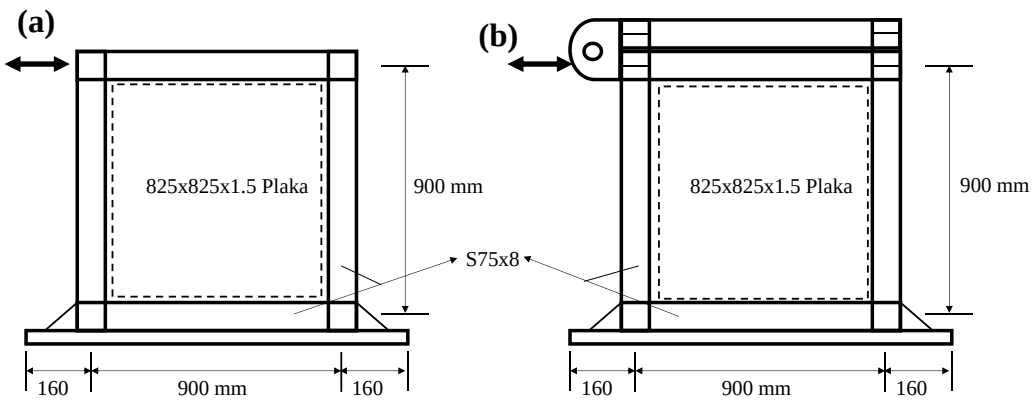
Geliştirilen model rijitliği hem monotonik hem çevrimsel yükleme için kabul edilebilir derecede tahmin etmiştir. Sabit açılı analitik modele göre sonuçlar daha iyi olmasına rağmen dayanımda ve elastik rijitlikte deney sonuçlarına göre farklılıklar gözlemlenmiştir. Farklılıkların büyük oranda kat sayısı ve gövde plakasının en-boy oranına bağlı olduğu bildirilmiştir. Bu çalışmaya göre çok katlı bir çelik levhalı perde duvar yapısında yükseklik ve genişlik oranı arttıkça çubuk modelde elastik rijitliği daha fazla hesaplama eğilimi artmaktadır.



Şekil 2.10. Rezai (1999) tarafından geliştirilen çubuk modeli.

Lubell et al. (1997; 2000) yaptığı çalışmada iki adet tek katlı ve bir adet dört katlı çelik levhalı perde duvarı test etmiştir. Bütün deney numuneleri tek açıklığa sahiptir ve plaka en-boy oranı 1:1 olan %30 ölçekli modellerdir. Kiriş-kolon birleşimleri moment taşıyabilen birleşimlerdir. Çalışmanın ana amacı yarı-statik yükleme altında çelik levhalı perde duvarların yük-yer değiştirme davranışlarını ve gerinim dağılımlarını incelemektir. Bütün deneyler test düzeneğinin yetersiz kapasitesi ve lokal problemler sonucunda sona erdirilmiştir. Bu durumun test numunelerin yer değiştirme kapasitelerinin yapılan deneylerde tam anlamı ile temsil edilememesine sebep olduğu bildirilmiştir. Monotonik ve çevrimsel yükleme altındaki davranış analitik çekme alanı ile modellenmiş ve deneysel veriler ile karşılaştırılmıştır. Yüklemeler ATC-24 (1992)' de yer alan protokole göre yapılmıştır.

Yapılan ilk tek katlı numuneye (SPSW1) ait test sonucunda ikinci tek katlı modelde üst kiriş flanşına ek olacak şekilde aynı kesite sahip ikinci bir kiriş eklenmesine karar verilmiştir. İlk iki test olan SPSW1 ve SPSW2 geometrik özellikleri Şekil 2.11(a) ve (b)' de verilmiştir. Testler sonucunda SPSW1 modeli ve dört katlı modelde test düzeneğinde çelik levhalı perde duvarlar için yatayda ve dış çerçevede yeterli destek elemanları kullanılmadığı, bu durumun sistemlerin göçme mekanizmalarını etkilediği görülmüştür.



Şekil 2.11. Lubell (1997) tarafından test edilen tek katlı numunelerin boyutları (a) SPSW1 (b) SPSW2.

Yapılan bu çalışmanın sonuçlarına göre çelik levhalı perde duvarlar iyi enerji tüketme özelliğine ve yüksek süneklik kapasitesine sahiptir. Yük-yer değiştirme eğrileri ise ani kırılım göstermeyen stabil eğrilerdir. Çok katlı modelde sistemin mekanizmasından kaynaklı olarak en alt kat en çok enerjinin tüketildiği kattır. Çekme alanı eğim açısı plaka çevresinde düzgün bir dağılım göstermesine rağmen çok katlı numunenin plaka merkezindeki açının farklılık gösterdiği görülmüştür. Modellerde kolonlar göreceli olarak esnek oldukları için plaka kuvveti etkisi ile içe doğru deformasyon göstermişlerdir. Bu yüzden plastik mafsallar kolon başında ve kolon tabanında oluşmuştur. Nümerik modellemede ise çubuk modeli kullanılmış ve deney sonuçlarına yakın davranış elde edilmiştir.

Montgomery and Medhekar (2001), Lubell et al. (2000) tarafından yapılan çalışmadaki deney numunelerini inceledikten sonra mevcut yönetmeliğin kolonların içe doğru deformasyon yapmasını engelleme konusuna yeterince değinmediğini vurgulamışlardır. Kolonlar sismik yük ve rüzgâr yükü ile birlikte gövde plakasından gelen yüklere karşı koymaktadır. Eğer kolonların eğilme rijitliği yeterli değilse gövde plakasına (içe) doğru eğilmektedirler. Bu durum kat ortalarında gövde plakasının çekme alanı gerilmesini azaltırken altta ve üstte yer alan kirişler çevresinde arttırmaktadır. Kuhn et al. (1952) çalışmasında ortaya konan esneklik parametresinin 2.5 üzerine çıkması durumunda üniform çekme alanlarının gelişememesi sebebi ile Denklem (2.1) 'deki ω_i değerinin üst limitinin 2.5 ile sınırlandırılması gerektiğini bildirmişlerdir.

Montgomery and Medhekar (2001) ayrıca çelik levhalı perde duvarlarda kolonların içe doğru deformasyon göstermemesi için çekme alanı eğim açısının 37 ve 45° arasında olmasını ve panel en-boy oranının 1.7 ile 2.3 arasında olmasını önermişlerdir. Bu en-boy oranının genel olarak yatay yük taşıma sistemlerinde kullanılan değerler olduğunu öne sürmüşlerdir. Bu yorumları desteklemek için Driver vd. (1997a) tarafından yapılan deneysel çalışmada numunelerin çekme alanı eğim açısının 41.8 ve 43.5° arasında değiştiğini, panel en-boy oranının ise 1.67 ile 1.77 arasında olduğunu ve sonuç olarak bu deneysel çalışmada herhangi bir içe doğru kolon deformasyonu gözlemlenmemesi durumunu örnek olarak vermiştir.

Kolon esneklik parametresi için verilen 2.5 üst limit değeri daha sonra ilgili yönetmeliklerde (AISC 2005, 2016; CAN/CSA 2001) yer bulmuş ve kolon atalet momentinin alması gereken minimum değer;

$$I_c \geq \frac{0.00307 t_w h_s}{L_s} \tag{2.5}$$

olarak hesaplanmıştır. Burada h_s kat yüksekliği, L_s kat açıklığı ve I_c kolon atalet momentidir.

Yönetmeliklerde minimum kolon atalet momenti ile aynı yöntem izlenerek kirişlerin sahip olması gereken minimum atalet momenti;

$$I_b \geq \frac{0.0031 L_s^{\,4}}{h_s}(t_{w,i+1} - t_{w,i}) \tag{2.6}$$

şeklinde hesaplanmıştır. Burada $t_{w,i}$ i numaralı katta bulunan gövde panelinin kalınlığını ifade etmektedir.

Berman and Bruneau (2003a) çelik levhalı perde duvarların tasarımı için bir prosedür geliştirmişlerdir. Bu çalışma yapıldığında henüz Amerika Birleşik Devletleri'nde çelik levhalı perde duvarları konu alan bir yönetmelik bulunmamaktaydı. Fakat Kanada'da CAN/CSA S16-01 (2001) standartlarında çelik levhalı perde duvarların tasarımı bölümü mevcuttu. Bu standartta Thorburn et al. (1983) tarafından önerilen çubuk modelinin çelik levhalı perde duvarların nihai dayanımını hesaplamak için

kullanılabileceği ifade edilmektedir. Plaka kalınlığı hesaplanması için yine aynı çalışmada yer alan eşdeğer çubuk modelinden (plaka köşegeninden geçen tek bir çubuk) yola çıkılarak hesaplanan;

$$t_w = \frac{2A\sin\theta\sin 2\theta}{L_s \sin^2 2\alpha} \tag{2.7}$$

formülü kullanılmaktadır. Burada A çubuk alanı, θ köşegenin düşeyle yaptığı açı, α ise Denklem (2.4) ile hesaplanan asal gerilmenin düşeyle yapmış olduğu açıdır.

Bu çalışmadaki tasarım prosedürüne göre çelik levhalı perde duvarda kullanılması gereken gövde plakasının kalınlığı çubuk modelin plastik analizi sonucunda belirlenmektedir. İlk önce tek katlı ve basit birleşimlere sahip bir model üzerinde çubuk modeli kullanılarak plastik analiz yapılmış ve maksimum dayanım:

$$V_r = \frac{1}{2} F_y t_w L_p \sin 2\alpha \tag{2.8}$$

şeklinde ifade edilmiştir. Burada F_y çelik gövde levhasının nominal akma dayanımını, L_p ise düşey sınır elemanları arasındaki mesafeyi (plaka genişliğini) ifade etmektedir. Diğer parametreler daha önce tanımlanmıştır. Bu denklemin denge metodu ve kinematik metot kullanılarak türetilme aşamaları şematik çizimleri ile birlikte EK-2'de gösterilmiştir.

Eğer çerçeve basit birleşimlere değil rijit birleşimlere sahip ise çerçeve tarafından yapılan toplam iş $4M_p\theta$ olacaktır. Burada $\theta=\Delta/h$, yani yatay kat yer değiştirmesinin kat yüksekliğine oranıdır. M_p plastik moment kapasitesini ifade etmektedir. Burada kiriş veya kolon plastik moment kapasitelerinden (sırasıyla M_{pb} ve M_{pc}) küçük olan değeri almaktadır. Bu durumda tek katlı bir çelik levhalı duvarda plastik mafsalların kolonlarda oluştuğu bir durumda toplam taban kesme kuvveti;

$$V_r = \frac{1}{2} F_y t_w L \sin 2\alpha + \frac{4M_{pc}}{h} \tag{2.9}$$

şeklinde ifade edilmektedir.

Bu çalışmada verilen tasarım prosedürü şu şekildedir:

- Bir taban kesme kuvveti hesaplanır ve yapı yüksekliği boyunca yönetmeliklerde yer alan şekilde dağıtılır.

$$t_w = \frac{2V_s\Omega_s}{F_y L_s \sin 2\alpha} \tag{2.10}$$

formülünden elde edilen plaka kalınlığı kullanılır. Burada V_s tasarım kesme kuvveti Ω_s ise 1.1 ile 1.5 arasında plaka en-boy oranına bağlı olarak değişen bir katsayıdır.

- Elastik analiz için şerit model oluşturulur ve (2.4) denklemi kullanılarak çekme çubuklarının eğim açısı hesaplanır.
- Sınır elemanlar belirlenir.
- Kat ötelenmeleri uygun yönetmelik göz önüne alınarak kontrol edilir.

Daha sonra (Sabelli and Bruneau 2007) tarafından hazırlanan AISC Tasarım Rehberi 20'de verilen düşük ve yüksek sismik bölgeler için yapılan ÇLPD tasarım örneklerinde ise aşağıdaki prosedür izlenmiştir;

- Bina periyodu belirlenir,
- Tasarım taban kesme kuvveti belirlenir,
- Yük katlar arasında dağıtılır,
- Yapıda kullanılan her bir duvarın rijitliği ve lokasyonuna bağlı olarak bu kuvvet duvarlara dağıtılır,
- Yapıda oluşan yatay yüklere sadece gövde plakalarının karşı koyacağı kabul edilerek Denklem (2.8)'i temel alan,

$$\phi \times V = 0.9 \times 0.42 \times F_y \times t_w \times L_p \times \sin 2\alpha \tag{2.11}$$

formülü kesme kuvveti hesabı için kullanılır. Burada ϕ ile temsil edilen güvenlik katsayısı 0.9'dur. Denklem (2.8)'de yer alan 0.5 değeri ise FEMA tarafından 1.2 olarak belirlenmiş olan dayanım fazlalığı (overstrength) katsayısına bölünerek 0.42 değeri elde edilmiştir. Çekme alanı eğim açısı için ise 30° ile 55° arasında bir varsayım yapılır.

- Çeşitli plaka kalınlıklarına karşılık gelen kesme kuvvetleri tablo halinde yazılır,
- Kolon tayini için Denklem (2.5) ve kiriş tayini için Denklem (2.6) kullanılır,
- Artık sınır eleman kesitleri belirlendiği için denklem (2.4) kullanılarak çekme alanı eğim açısı hesaplanır,
- Yeni açıya göre işlemler tekrarlanır. Birkaç tekrar yapılarak ön tasarım tamamlanır. Bu aşamadan sonra sistem analiz edilebilir.

2.2. Tasarım Parametreleri Üzerine Yapılan Çalışmalar

Yu et al. (2018) Denklem (2.2) ile belirlenmiş olan kolon esneklik parametresinin düşey sınır elemanlarına uygulanabilirliğini inceleyen bir çalışma yapmışlardır. Buna göre 1/3 ölçekli tek açıklıklı ve iki katlı bir çelik levhalı perde duvar numunesi yarı-statik çevrimsel yükleme altında test edilmiştir. Çalışmada kullanılan numunenin kolon esneklik parametresi 2.2 olup $0.3F_yA_g$ oranında düşey yüke maruz bırakılmıştır. Burada F_y malzeme akma dayanımı, A_g ise kolon kesit alanıdır. Kolonlara uygulanan eksenel yükün çelik levhalı perde duvarın göçme karakteristiklerini kötü yönde etkilediği belirtilmiştir. Kolonlarda yaklaşık %0.9 ötelenme seviyesinde ciddi miktarda düzlem içi deformasyon görülmüştür. Sonlu eleman modelleri oluşturularak deneysel sonuçlar ile doğrulaması yapılmıştır. Daha sonra bu yöntemi kullanarak farklı en – boy oranına sahip çelik levhalı perde duvarlar üzerinde parametrik bir çalışma yapmışlardır. Eksenel yük etkisi hesaba katılmadığında dahi kolon esneklik parametresi için verilen 2.5 değerinin yalnızca en – boy oranı 1.0 olan perde duvarlarda iyi sonuç verdiği görülmüştür. Bu en – boy oranından daha büyük modellerde ise gövde plakası çekme alanlarının oluşumunun yetersiz kaldığı ve bu yüzden kapasitenin düştüğü ve gerilme dağılımının üniform olmadığı görülmüştür. Dolayısı ile çelik levhalı perde duvarlarda düşey sınır eleman esneklik parametresi için verilen üst limiti 2.5'ten 2.1'e düşürülmesini önermişlerdir. Eksenel yük etkisi dahil edildiğinde ise özellikle düşük en – boy oranına sahip modellerde kolonlara etki eden eksenel yükün kesme kuvveti kapasitesini ciddi oranda düşürdüğünü ve bununla birlikte gerilme dağılımının da bozulduğunu gözlemlemişlerdir.

Curkovic et al. (2017) ise yine kolon esnekliğinin çelik levhalı perde duvar davranışı üzerindeki etkisini inceleyen bir deneysel çalışma yapmışlardır. Bu çalışma

sonucunda mevcut kolon esneklik parametresi limitinin konservatif olduğu ve üst limitin büyütülmesi gerektiğini belirtmişlerdir. Ayrıca sınır elemanlarda kullanılan malzeme kalitesinin de kolon esneklik parametresi üzerinde etkili olduğunu ve bu parametrenin mevcut limitlere dahil edilmesinin gerektiğini bildirmişlerdir.

Qu et al. (2013) kolon esneklik parametresinin çelik levhalı perde duvarlarda ötelenme yığılmasına etkisini incelemişlerdir. Buna göre iki katlı bir perde duvarın analitik modelini temel almışlardır. Ötelenme yığılmasının sayısal olarak değerlendirerek ve gövde plakasının iki katta da akması için gereken minimum tepe ötelenmesini hesaba katarak sistem davranışını formülleştirmişlerdir. Sonlu eleman model simülasyonu kullanılarak formül doğrulanmıştır. Esnek kolonlar kullanıldığında ciddi deprem hareketleri altında başlangıç akmasının olduğu katta ötelenme yığılmaları görülmüştür. Ötelenme yığılmaları, kolon rijitliğine, yanal yük dağılımına, gövde plakası kuvvet dağılımına ve hedef tepe ötelenmesine bağlıdır. Kolon rijitliğinin artması ile ötelenme yığılması azaltılabilir. Kolonları yönetmelik tarafından belirlenen esneklik parametresi üst sınırı 2.5 dikkate alınarak hesaplanan minimum atalet momentine sahip olan ve diğer parametrelerinin aynı olduğu modeller arasında gövde plakası en – boy oranı yüksek olan duvarda ötelenme yığılması olması daha muhtemeldir. Çalışma sonuçlarına göre kolon rijitliği, katlar arasında makul düzeyde üniform ötelenme oluşmasını ve perde duvar yüksekliği boyunca gövde levhalarının akmasını sağlayacak bir tasarım parametresi olmalıdır.

Yatay sınır eleman atalet momenti için Denklem (2.6)'da verilen ifade bazı durumlarda tasarımcıya gerekli limitleri vermemektedir. Örneğin, en üstte bulunan kirişlerde bu ifade geçersiz olmaktadır çünkü kiriş altında gövde levhası olmasına rağmen üst taraf boştur. Aynı şekilde eğer her iki katta kullanılan çelik gövde levhası aynı kalınlığa sahip ise formülde çarpan durumunda bulunan ($t_{w,i+1}$ - $t_{w,i}$) ifadesi formülü kullanılamaz hale getirmektedir. Bu konuda yapılan çalışmalarda yatay sınır elemanının seçilmesi konusunda yönetmeliklerde yer alan bu ifadenin yetersiz kaldığı ortaya konulmuştur.

Qu and Bruneau (2011) çelik levhalı perde duvarlarda katlar arasında yer alan yatay sınır elemanların plastik moment kapasitesi üzerine bir çalışma yürütmüşlerdir.

Çelik çerçevelerde kesitlerin plastik momentini belirlemek için geleneksel olarak kullanılan yöntemler çelik levhalı perde duvarların katlar arasındaki yatay sınır elemanları için kullanılamamaktadır. Bunun başlıca sebebi kirişlerin iki yönlü büyük gerilmelere maruz kalmasıdır. Kirişler üzerinde kolonların sebep olduğu eksenel kuvvetin yanı sıra alt ve üst katlarda bulunan çelik gövde levhalarının çekme alanları oluştuktan sonra uyguladıkları kuvvetler bulunmaktadır. Bu oluşan kuvvetleri de dikkate alan ve akma dayanımını kullanan analitik model geliştirilmiştir. Çalışma sonucunda analitik olarak elde edilen kiriş plastik momentinin sonlu elemanlar metodu ile hesaplanan sonuçlara uygun olduğu görülmüştür. Bu analitik modelin kiriş – kolon birleşimlerinin kapasite tasarımında kullanılması gerektiğini bildirmişlerdir.

Qin et al. (2017) çelik levhalı perde duvarın en alt ve en üstte bulunan tek taraftan gövde plakası yüklerine maruz kalan kirişler üzerine çalışma yürütmüşlerdir. Bu kirişler çelik levhalı perde duvarların iyi performans gösterebilmesi için yeterince güçlü olmalılardır. Bu çalışma, geleneksel yöntemler ve Qu and Bruneau (2011) çalışmasında verilen yöntemler kullanılarak yürütülmüştür. Üst ve alt kirişin plastik eğilme kapasitesini tahmin edebilmek için bir metodoloji geliştirilmiştir. Kiriş üzerinde artan kesme kuvveti, kirişin plastik eğilme kapasitesini düşürmektedir. Çalışmanın sonuçlarına göre, katlar arasındaki kirişlerde eğer her iki kattaki plaka kalınlıkları eşit ise yatay sınır elemanı gövdesi üzerine dağılan düşey yükler üniform olarak dağılmaktadır. Fakat plaka kalınlıkları farklı ise bu düşey yükler trapez şeklinde dağılım göstermektedir.

Dastfan and Driver (2008) çelik levhalı duvarların ankraj kirişleri (üst ve alt) üzerine bir çalışma gerçekleştirerek yeni bir esneklik parametresi geliştirmişlerdir. Halihazırda bulunan Denklem (2.6) yukarıda açıklandığı gibi komşu katlara sahip olamaması dolayısı ile ankraj kirişlerine uygulanamamaktadır. Çalışmada yeni geliştirilen esneklik parametresi ω_L değeri üst kirişte 2.5 ve alt kirişte 2 olmalıdır ve kolon esneklik parametresi (ω_i) değerinin 0.84 katına eşit ve büyük olmalıdır. Bu sayede kolon esneklik parametresi üst limiti 2.1 olarak belirlenmiştir ve bu durum daha rijit kesitlerin kullanılmasını sağlamaktadır.

Yukarıda kısaca özetlenen çelik plaka perde duvar tasarım denklemleri, çeşitli yönetmelik ve standartlarda yer almaktadır (AISC 2005, 2016; CAN/CSA 2001; CAN

2009). CAN/CSA 2009 (2009), çelik levhalı perde duvarların tasarlanması aşamasında gelen bütün yükün çelik gövde plakası tarafından taşınmasını ve çerçeve dayanımının hesaba katılmamasını önermektedir. AISC 2005 Deprem Yönetmeliği'nde de aynı yaklaşım savunulmaktaydı. Şu an Amerika Birleşik Devletleri'nde yürürlükte olan AISC-341 (2016) yönetmeliği ise bu yaklaşıma ek olarak tasarımda çerçevenin %25'ten az olmamak koşulu ile toplam dayanıma katkı sağlaması gerektiğini bildirmektedir. Bu tasarıma göre çelik levhalı perde duvarda tasarım yüklerinin hepsi yine gövde plakası tarafından karşılanmalıdır fakat ek olarak ön tasarımdan sonra yapılan analizde elde edilen sonuçlara göre çerçeve dayanımı toplam dayanımın %25'inden az olmamalıdır.

Purba and Bruneau (2015) toplam dayanımın çerçeve ve çelik gövde plakası arasındaki davranışı inceleyerek geleneksel (toplam kuvvetin plaka tarafından taşınacak şekilde tasarım) ve dengelenmiş (çerçeve katkısı dahil edilerek yapılan tasarım) tasarımlara sahip modelleri karşılaştırmışlardır. Yer hareketleri altında, dengelenmiş tasarımla oluşturulan modellerin geleneksel tasarım ile oluşturulan modellere göre çok daha fazla katlar arası ötelenmeye sahip olduğu görülmüştür. Bu çalışmaya göre, kullanılan çelik miktarından yapılacak tasarruf ve katlar arasındaki ötelenme farkı karşılaştırıldığında, çelik levhalı perde duvarların tasarımının geleneksel tasarım ile yapılması gerekmektedir. Yükü gövde plakası ve çerçeve arasında dağıtmaya gerek yoktur.

Berman (2011), yönetmelik sınırları içerisinde tasarlanmış çelik levhalı perde duvarları şerit model ile modelleyerek farklı seviyeleri temsil eden yer hareketleriyle analiz etmiştir. Modeller maksimum yüzde 5 katlar arası ötelenme oranını geçmeyerek tasarım depremi için ötelenme limitlerini karşılamıştır. Kesme kuvveti dağılımına göre ise gövde levhası çerçeveye göre %60 ile %80 arasında kuvvete direnç göstermiştir. Bu dağılımın panel en – boy oranı, duvar yüksekliği veya yer hareketine bağlı olmadığı fakat plaka kalınlığından etkilendiği bildirilmiştir.

Hosseinzadeh and Tehranizadeh (2014) yönetmeliklere uygun çelik levhalı perde duvarlar tasarlayarak bu perde duvarları nümerik olarak analiz etmişlerdir. Modellerin en- boy oranları 0.84, 1.4, 2 ve 2.5 olarak tasarlanmış ve 2, 4, 6, 8, 10, 12 katlı modeller oluşturulmuştur. Çalışmada gövde plakası – çerçeve etkileşimi incelenmiştir. Sonuçlara

göre çelik levhalı perde duvarlarda çerçeve sadece alt katlarda efektif bir şekilde toplam dayanıma katkı sağlamaktadır geri kalan katlarda yüklerin büyük kısmı gövde plakası tarafından karşılanmaktadır. Kolonlar üzerine gelen eksenel yüklerin ise %70 - %80 civarında gövde plakasında oluşan çekme alanlarından kaynaklandığı ortaya çıkmıştır. Yönetmeliklerde bulunan gövde plakasının tüm yükü taşıması yaklaşımından dolayı aynı plana sahip çelik levhalı perde duvarlarda farklı en – boy oranına sahip olunsa bile yaklaşık olarak aynı tasarım yükleri kullanılmakta fakat gerçekte en – boy oranı farklı modellerde rijitlik ve sünekliğin çok farklı olabileceği bildirilmiştir. Ayrıca tasarım yükleri altında bütün plakaların akması öngörülürken özellikle üst katlarda plakanın akmadığı gözlemlenmiştir ve bunun nedeni çerçevenin katkısının özellikle alt katlarda çok fazla olmasıdır.

Verma and Sahoo (2016) yönetmeliklerde belirtilen bütün yükün plaka tarafından taşındığı tasarım yaklaşımının fazla dayanıma ve fazla malzeme kullanılmasına neden olduğunu bildirmiş ve sınır elemanların yanal yüklere dirençlerini incelemek için bir çalışma yapmışlardır. Farklı yer hareketleri altında bir, üç, altı ve dokuz katlı modeller oluşturularak zaman tanım alanında (time-history) doğrusal olmayan analiz yapılmıştır. Gövde plakasının toplam dayanıma katkısının en – boy oranı ve kat sayısına bağlı oldu sonucuna ulaşarak bu katkı oranını tahmin edebilmek için bir denklem önermişlerdir. Sonuçlara göre toplam dayanımın, üç katlı modellerde %52.5'i ile %62.7'sini, altı katlı modellerde %60.6'sı ile %71.8'ini, dokuz katlı modellerde ise %63.6'sı ile %72.8'ini plakanın taşımaktadır. Her üç kat sayısında da dar perde duvarların dağılımda daha büyük paya sahip olduğu görülmüştür.

Uang and Bruneau (2018) yaptıkları çalışmada çelik levhalı perde duvar sisteminde gövde plakası dahil edilmeden sadece çerçevenin dayanıma yaptığı katkının %25 olmasının rastgele bir değer olduğunu fakat bu değerin ASCE-7 (2000)'de bulunan moment çerçevesi dayanım limitlerine uygun olduğunu bildirmişlerdir. Aynı zamanda yönetmelikte tasarım için kullanılan yaklaşımın çelik levhalı perde duvar tasarımını büyük ölçüde kolaylaştırdığı belirtilmişlerdir.

Çelik levhalı perde duvarlarda en – boy oranı sistem davranışını ve plaka – çerçeve yük dağılımını etkileyen bir başka önemli parametredir. AISC (2005)'te panel

genişliği ve boyu oranı için $0.8 \leq L_s/h_s \leq 2.5$ ifadesi bulunmaktadır. Bu oran üzerine de literatürde çeşitli çalışmalar mevcuttur.

Gholipour and Alina (2016) kat açıklığını dikkate alarak çok katlı çelik levhalı perde duvarlar üzerine bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada 4, 7, 10, 13, 16 ve 19 katlı modeller 0.83, 1.67 ve 2.56 olmak üzere üç faklı açıklığa sahip olacak şekilde dikkate alınmıştır. Bütün modeller benzer planlara sahiptir. Sonuçlara göre uygun kat açıklığı kullanımında çelik levhalı perde duvarlar daha ekonomik ve hafif olmaktadırlar. Özellikle yatay sınır eleman boyutu önemli ölçüde azaltılmıştır. Açıklığın artması ile perde duvarın deformasyon modu baskın olarak eğilme şeklindeyken kesme-eğilme şekline dönmüştür. Eğilmenin baskın olduğu modellerde yüklemenin erken aşamalarında %2.5 ötelenme değerlerine ulaşılmaktadır. Bu durumda gövde levhalarının hala elastik bölgede olduğu gözlemlenmiştir. Kesme-eğilme moduna yaklaşıldığında ise plakaların tamamen aktığı ve bu sayede etkin bir şekilde elemanların elastik olmayan kapasitelerine yaklaşıldığı görülmüştür.

Li and Tsai (2008) en – boy oranının etkisini incelemek için dar çelik levhalı perde duvar numunelerini deneysel olarak incelemiştir. Dört adet iki katlı 2.14 metre genişlikli ve 6.5 metre uzunluğa sahip numune test edilmiştir. Hedef ötelenme oranları 0.05 radyan olacak şekilde yükleme yapılmıştır. İki adet numunede yatay destek levhası kullanılmıştır. Deneyler sonucunda düzgün tasarlanmış dar çelik levhalı perde duvarların ciddi deprem yükleri altında geniş açıklıklı duvarlarla mukayese edilebilir tatmin edici performans gösterdiklerini bildirmişlerdir.

Formisano et al. (2007) farklı en – boy oranları ve plaka kalınlıkları kullanarak narin çelik levhalı perde duvarları inceleyen bir çalışma yürütmüşlerdir. Sonlu elemanlar yöntemi ile incelenen modellerin 0.8 ile 2.5 arasında değişen en boy oranlarında yüksek başlangıç rijitliği sağladığı görülmüştür. 0.8'den küçük en – boy oranına sahip modellerin daha esnek olduğu ve çekme alanı eğim açısının 45°'den daha büyük olduğu bildirilmiştir. Bu durumda davranışı iyileştirme için berkitme levhalarının kullanılabileceğini vurgulamışlardır.

2.3. Analiz Yöntemleri

Çelik levhalı perde duvarların analizi tasarım için gerekli olan sistemin elemanları üzerine etki eden kuvvetleri elde edebilmek için gereklidir. Aynı zamanda sistemin yapacağı yanal deplasmanı belirlemek veya tahmin edebilmek için de analiz yapılması gerekmektedir. Çok yüksek ötelenme oranları yönetmelikler tarafından belirlenen kriterlere uymayabilir.

2.3.1. Şerit-Çubuk yöntemi

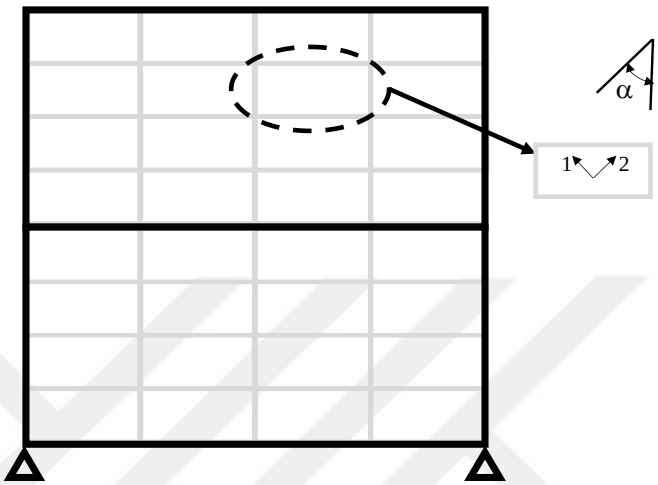
Önceki alt başlıklarda detayları verilen şerit yöntemi daha önceki araştırmacılar tarafından çokça kullanılmış olup tatmin edici sonuçlar verdiği görülmüştür. Buna göre çelik levhalı perde duvarın gövde plakası belirli bir eğime sahip birbirine paralel ve sadece çekme kuvveti altında çalışan bir grup çekme çubuğu ile temsil edilir. Bu çubuklar gövde plakasının belirli sayıda şeritlere bölünmesi ile elde edilir. Çubuk eleman alanları bu şeritlerin alanına eşit olacak şekilde kabul edilmelidir.

Bu yöntem Kanada Tasarım Yönetmeliğinde yer almıştır (CAN/CSA 2001). Daha sonra AISC-341 yorum bölümünde de bahsi geçmiştir. CSA yönetmeliğine göre çelik levhalı perde duvar çerçevesi üzerindeki yük dağılımını yeterince temsil edebilmek için en az 10 adet şerit kullanılmalıdır.

2.3.2. Ortotropik Membran Yöntemi

Bu yöntemde çekme çubukları yerine çelik gövde levhası farklı yönlerde farklı mekanik özelliklere sahip olan ortotropik elemanlar ile temsil edilmektedir (Sabelli and Bruneau 2007). Bu sayede narin gövde levhasının basınç altında dayanım göstermeyip çekme altında çalışması modellenebilmektedir. Çelik levhası çekme alanları oluşturduğunda dikey ile belirli bir açı oluşturduğu için bu ortotropik elemanın aks oryantasyonu yaklaşık olarak çekme alanı eğim açısına eşit olacak şekilde tasarlanır. Eğim açısı ile belirtilen yönlerde malzeme özellikleri gövde çeliği ile aynı, diğer yönlerde ise sıfır veya ihmal edilebilir bir değerde olmalıdır. Ayrıca membran elemanının düzlem içi kesme rijitliği de sıfır veya ihmal edilebilir olmalıdır.

Ortotropik elemanın sınır elemanlar üzerindeki kuvvetleri doğru tahmin edebilmesi için eleman ağı boyutunun seçimi de önem arz etmektedir. Buna göre Astaneh-Asl (2001) her yönde en az 4 bölüm kullanılmasını önermektedir. Diğer bir deyişle eleman sayısı plaka başına en az 16 olmalıdır. Şekil 2.12'de bir çelik levhalı perde duvarın ortotropik membran model ile gösterimi verilmiştir.



Şekil 2.12. Bir Çelik levhalı perde duvarın ortotropik modeli.

2.3.3. Doğrusal Olmayan Analiz

Bu analiz yöntemi çelik levhalı perde duvarların analizleri için çok avantajlı olabilmektedir. Doğrusal olmayan analiz sonucunda yatay ve düşey sınır elemanlar üzerindeki gerilme durumları kontrol edilebilir.

Doğrusal olmayan analiz yöntemi kullanıldığında sınır elemanların elastik olmayan davranışları da kontrol edilmeli ve istenilmeyecek burkulma durumları gibi sistem modları belirlenmelidir (Sabelli and Bruneau 2007). Bu tür analizlerde edilen tasarım kuvvetleri diğer yöntemlere göre daha gerçekçidir ve kapasite tasarımı kullanılarak elde edilen kuvvetlerden önemli ölçüde daha azdır.

2.4. Geçmiş Deneysel Çalışmalar

Literatürde çelik plaka perde duvar yapılarının çevrimsel performansı üzerine yapılan ve bazılarından yukarıda bahsedilen birçok deneysel çalışma bulunmaktadır.

Tasarım parametreleri dikkate alınarak farklı ölçek ve konfigürasyonlarda birçok farklı sistem araştırılmıştır. Bu bölümde tipik olarak hangi tasarım parametrelerinin hangi limitler dikkate alınarak araştırıldığını daha iyi görebilmek için birbirinden farklı tek ve çok katlı deneyler bir araya getirilmiştir. Çizelge 2.1, literatürden seçilen moment çerçevelerine sahip berkitmesiz çelik plaka perde duvar deneylerinin bir özetini vermektedir. Çizelge 2.1'de verilen deneysel çalışmalarda numuneler farklı yükleme protokolleri izlenerek çevrimsel yüklemeye maruz bırakılmışlardır. Yarı rijit bağlantılara sahip numuneler, farklı konfigürasyonlar (gövde plakası açıklıklı, sınır eleman kesitleri azaltılmış, dalgalı plakalar, berkitmeli modeller vb.) ve yalnızca monotonik yüklemeye tabi deneyler bu deneysel özete dahil edilmemiştir.

Toplam deneylerin %75'inde kolon esneklik parametresi yönetmeliklerde limit olarak verilen 2.5 değeri altındadır. Tüm deneysel çalışmaların yaklaşık %64'ünde kolon esneklik parametresi 2'den küçük olan bir düşey sınır elemanı kullanılmıştır. Dolayısıyla, araştırmacıların genellikle düşey sınır eleman kesitlerini verilen üst limitin çok altında, büyük kesitli olacak şekilde tasarladıkları sonucuna ulaşılabilir. $I_{c,min}$ değeri kolon esneklik parametresini 2.5 aldığımızda elde ettiğimiz ve Denklem (2.5) ile hesaplanan minimum atalet momentidir. Kolon esneklik parametresi 2 veya daha küçük bir değerde kullanıldığında elde edilen atalet momenti bu minimum atalet momentinin yaklaşık 2.3 katı veya daha fazla atalet momentine sahip kesitlerin kullanılmasına sebep olmaktadır. Bu gözlemlerden, deneysel çalışmalarda genellikle yönetmelik limitleri içerisinde olan atalet momentine sahip kesitleri kullandığı ortaya çıkmaktadır. Fakat bu kesitler genel olarak $I_{c,min}$ değerinin çok üzerinde rijitliğe sahip kesitler olabilmektedir. Örneğin, kolon esneklik parametresi 1.5 olduğunda, $I_{c,min}$'in atalet momenti açısından 7.7 katı rijitlik değerine sahip bir kesit kullanılmaktadır. Geçmiş araştırmalarda yapılan bu uygulamalara göre seçilen büyük kesitli sınır elemanları dolayısıyla çelik levhalı perde duvarların genel davranışında çerçeve elemanlarının önemli ölçüde katkıda bulunduğu ortaya çıkmaktadır. Bu katkının çelik levhalı perde duvar davranışına etkisi çerçeve eleman – gövde levhası kesme kuvveti dağılımı dikkate alınarak bu çalışmada incelenmiştir.

$I_{c,min}$ değerinin gövde plakasının üniform bir şekilde akması ve çekme alanları oluşturması için yeterli olduğu düşünüldüğünde bu deneysel çalışmalarda kullanılan düşük kolon esneklik parametrelerinin konservatif olup olmadığının araştırılması

sonucuna varılmıştır. Diğer taraftan, 2.5 limit değerinin gövde plakasının mekanizmasını tamamlaması için yeterli olmadığı ve araştırmacıların bu yüzden daha küçük limitler kullanma yoluna gittikleri seçeneğinin araştırılması da bu çalışmanın konularındandır.

Deneylerin yaklaşık yüzde 90'ı 0.6 ile 2.00 arasında L_p/h_p oranına sahiptir (burada L_p çelik gövde levha kalınlığı ve h_p çelik gövde levha yüksekliğidir). Çizelge 2.1'den görülebileceği gibi çoğu araştırmacı numune sayısı birden fazla olsa bile plaka için tek bir en – boy oranı kullanmışlardır.

Yapılan deneysel çalışmaların yük uygulama yöntemi incelendiğinde numunelerin yaklaşık olarak yüzde 90'ının üst kiriş seviyesinden bir yükleme plakası veya yükleme çerçevesi yardımı ile tek noktadan yapılan yüklemelere sahip olduğu görülmüştür. Özellikle büyük ölçekli deneylerde istenilen öteleme oranlarına ulaşabilecek yük ihtiyacı fazla olduğu için yüksek kapasitelere sahip aktüatörler kullanılması gerekmektedir. Örneğin, Behbahanifard et al. (2003) tarafından yapılan deneyde yatayda farklı noktalardan yükleme verebilmek için 890 kN kapasiteli altı adet, düşey yük için ise 420 kN kapasiteli dört adet aktüatör kullanılmıştır. Bu ve buna benzer sebeplerden dolayı deneylerde genelde tek noktadan yükleme yapılan düzenekler tasarlanmıştır.

Deneysel çalışmalarda genel olarak eksenel yük etkilerine yer verilmemektedir. Eksenel yük uygulanan deneyler incelendiğinde kolonun nominal dayanımı (F_yA_g) 'P' olarak gösterilirse, deneysel grubun eksenel yük oranları 0,1P ile 0,3P arasında değişmektedir. Testlerde eksenel yükün dahil edilme oranı yaklaşık yüzde 30'dur. Bu çalışmalarda bildirilen sonuçlara göre eksenel yük, kolon talebini büyük ölçüde artırır ve benzer ω_i' ye sahip numuneler için daha yüksek eksenel yüklere sahip modellerde ötelenme oranı kapasitesinin daha düşük olduğu gözlemlenmektedir.

Yatay sınır elemanı rijitliği tasarımı ele alındığında, daha önce bahsedildiği gibi yönetmeliklerde verilen limitler (Denklem 2.6) gerekli minimum atalet momenti hesabında katlar arası gövde plaka kalınlığı farkını çarpan olarak ele alır. Bu durumda katlardaki gövde plakası kalınlığı sabit ise bu durumda denklem kullanılamaz olmakta ve yatay sınır elemanı kesiti tasarımcının mühendislik takdirine bırakılmaktadır. Çizelge

2.1‘de görüldüğü gibi seçilen deneysel çalışmalarda kullanılan I_c/I_b oranı 0.64 ile 4.56 arasında değişmektedir. Deneylerin yüzde 67’sinde bu oran 1.0 ile 2.5 arasındadır.

Gövde plakası kalınlığına bakıldığında deneylerde 0,7 mm ile 6,5 mm arasında farklı kalınlıkların kullanıldığı görülmektedir. Deney numunelerinin %75’inde plaka kalınlığı yüzde 1.5 mm ile 4.65 mm arasındadır. Deneylerde gövde plakası uzunluğu ve gövde plakası kalınlık oranı (t_w/L_p) açısından 230 ile 1550 arasında değerler kullanılmıştır.

Farklı yönetmelikler farklı katlar arası öteleme sınırlarını benimsemektedirler. Kullanılabilirlik bakımından katlar arası ötelenme oranı limitinin amacı sık görülen küçük ve orta şiddetteki depremlerden kaynaklanan yapısal olmayan hasarın daha az olmasını sağlayabilmektir. Bu amaç doğrultusunda yönetmelikler genel olarak tasarım yer hareketinin etki ettiği yapıda tahmin edilen kat ötelenmesinin belirlenmiş bir sınır altında olmasını istemektedir. Bu sınırlar ise genellikle kat yüksekliğinin %1 ila %2.5'i aralığında olacak şekildedir (Robalino et al. 2020).

Genel olarak, Çizelge 2.1’de sunulan test numunelerinin tasarım parametreleri ile nihai ötelenme kapasitesi arasında güçlü bir korelasyon yoktur. Bunun başlıca iki sebebi vardır. Birincisi yukarıda belirtildiği gibi, çoğu yönetmelik katlar arası ötelenme açısından %1 ile %2.5 arasında bir sınır belirlemektedir. Bu hedef ötelenme oranlarına ulaşan deneylerde çelik levhalı perde duvar dayanımında önemli bir düşüş olmasa dahi testler durdurulmaktadır. Diğer sebep ise çelik levhalı perde duvarların yüksek sünek davranışı ve önemli dayanım kaybı olmadan büyük deplasmanlara ulaşabilmesidir. Deneysel çalışmalar ise genellikle aktüatör yük kapasitesi, piston hareket aralığı vb. şartlarla sınırlıdır. Bunlar gibi teknik nedenlere ek olarak çok yüksek deplasman seviyelerine kadar deneyi devam ettirmek yeterli destek çerçevesi kurulamaması, laboratuvar şartlarında ön görülemeyen aksaklıkların olması gibi nedenlerden dolayı tehlikeli sonuçlar doğurabilmektedir. Sonuç olarak her deneyden her numune için bir çökme seviyesi verisi toplamak mümkün değildir. Ancak bu verilerin elde edilememesi çelik levhalı perde duvarların daha fazla ötelenme oranı kapasitesine sahip olmadığı anlamına gelmemektedir. Örneğin, Caccasse et al. (1993) sistem mukavemetinde herhangi bir azalma olmamasına rağmen %1.8 ötelenme oranına ulaşıldığında yüklemeyi

durdurmuştur. Durdurulmasının nedeni, deneyler için hedeflenen ötelenme oranının ilgili şartnamede belirtilen sınır olan %2 olmasıdır. Çevrimsel yüklemeden sonra araştırmacılar aynı numune üzerinde monotonik yükleme ile yüklemeyi devam ettirmiş ve sistem dayanımının %5.35 ötelenme oranına kadar arttığını gözlemlemişlerdir. Aynı şekilde, Lubell et al. (2000), numuneleri %5'lik bir hedef ötelenme oranı ile test etmişlerdir. Çevrimsel yüklemenin hedef ötelenme oranına ulaşmasından sonra, çelik levhalı perde duvar numunesi %8.6 ötelenme oranına ulaşana kadar statik itme yüklemesi altında iyi performans göstermiştir. Bu test ise deney düzeneğinde yeterli düzlem dışı destek olmaması dolayısıyla durdurulmuştur. Bunlara benzer davranışlar farklı araştırmacılar tarafından da gözlemlenmiştir (Driver et al. 1997a; Park et al. 2007; Xu et al. 2019).

Çizelge 2.1. Deneysel çalışmalar.

Araştırmacılar	Numune	Kat	Yükleme noktası	t_w	ω_1	h_p	L_p	h_s	L_s	L_p/t_w	L_p/h_p	I_c/I_b[a]	Düşey yük $P/(F_yA_g)$	Nihai ötelenme oranı[b]
Li ve Tsai (2008)	N	2	Üst	2.6	2.53	2880	1790	3250	2140	688.46	0.62	2.03	N/A	0.047
	S	2	Üst	2.6	3.01	2875	1840	3250	2140	707.69	0.64	1.52	N/A	0.05
Park vd. (2007)	SC2T	3	Üst	2.42	1.24	1000	1500	1200	1750	619.83	1.50	2.44	N/A	0.034
	SC4T	3	Üst	4.49	1.44	1000	1500	1200	1750	334.07	1.50	2.44	N/A	0.026
	SC6T	3	Üst	6.50	1.58	1000	1500	1200	1750	230.76	1.50	2.44	N/A	0.026
	WC4T	3	Üst	4.49	1.62	1000	1500	1200	1750	334.07	1.50	0.64	N/A	0.017
	WC6T	3	Üst	6.50	1.77	1000	1500	1200	1750	230.76	1.50	0.64	N/A	0.013
Azandariani vd. (2020)	SPSW-aR	3	Üst	0.70	2.73	990	1040	1090	1100	1485.71	1.05	1.00	N/A	0.0348
Caccese vd. (1993)	M22	3	Üst	0.76	1.65	762	1139	838.2	1244.6	1498.59	1.49	4.48	N/A	0.018
	M14	3	Üst	1.90	2.08	762	1139	838.2	1244.6	599.43	1.49	4.48	N/A	0.02
	M12	3	Üst	2.66	2.26	762	1139	838.2	1244.6	428.16	1.49	4.48	N/A	0.017
Lubell vd. (2000)	SPSW1	1	Üst	1.50	3.35	825	825	900	900	550	1.00	1.00	N/A	0.05
	SPSW2	1	Üst	1.50	3.35	825	825	900	900	550	1.00	1.00	N/A	0.056
	SPSW4	4	Her kat	1.50	3.35	825	825	900	900	550	1.00	1.00	0.14	0.016
Yu vd. (2018)	N/A	2	Üst	3.30	2.15	1050	1175	1250	1350	356.06	1.12	1.60	0.3	0.022
Wang vd. (2015)	TM1[c]	3	Üst	6.00	1.98	1200	1800	1400	2050	300	1.50	1.90	0.2	0.011
	TM2[c]	3	Üst	4.00	1.72	1200	2160	1400	2410	540	1.80	1.90	0.2	0.034
	TM3[c]	3	Üst	4.00	1.68	1200	2400	1400	2650	600	2.00	1.90	0.2	0.026
Xu vd. (2019)	SPSW2	3	Üst	1.10	0.98	630	930	780	1130	845.45	1.48	4.56	N/A	0.0328
Choi ve Park (2009)	FSPSW2	3	Üst	4.00	1.85	1000	2200	1150	2350	550	2.20	1.1	N/A	0.054
	BSPW1	3	Üst	4.00	1.85	1000	2200	1150	2350	550	2.20	1.10	N/A	0.036
	BSPW2	3	Üst	4.00	1.85	1000	2200	1150	2350	550	2.20	1.1	N/A	0.036
Driver vd. (1998b)	N/A	4	Her kat	4.54	1.73	1624	2736	1927	3050	602.64	1.68	2.15	0.15	0.04
Behbahanifard vd. (2003)	N/A	3	Her kat	4.80	1.66	1527	2736	1830	3050	588.38	1.79	2.15	0.11	0.042

[a] *Katlar arası kiriş kesitleri hesaba katılmıştır. Üst kiriş kesiti farklı olabilir.*
[b] *Çalışmalarda verilen maksimum ötelenme oranı (göçme anındaki ötelenmeyi ifade etmemektedir).*
[c] *Kontrol katı ikinci kat olarak tasarlanmıştır verilen parametreler ikinci kat içindir.*

3. SONLU ELEMAN YÖNTEMİ İLE MODELLEME

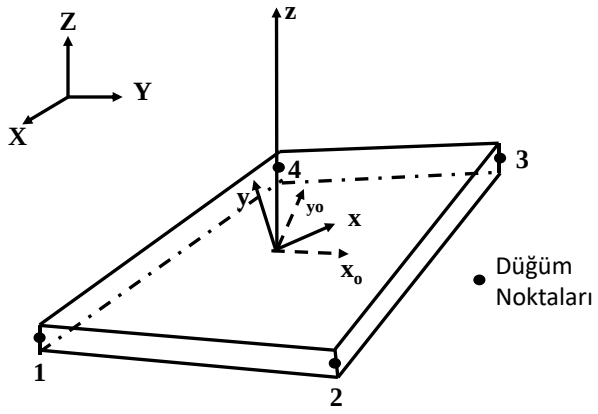
Bu bölümde çelik levhalı perde duvarların davranışını ortaya koymak için kullanılan ve araştırma yöntemini doğrulamak için kullanılan sonlu eleman yöntemi hakkında bilgi verilmiştir.

Üç boyutlu sonlu eleman modelleri genel amaçlı bir program olan ANSYS 16.0 (2016) (akademik versiyon) kullanılarak oluşturulmuştur.

3.1. Sonlu Eleman Modeli Oluşturma

3.1.1. Elaman seçimi

ÇLPD modellenmesi için ANSYS elaman kütüphanesinde tanımlı olan SHELL181 sonlu elemanı seçilmiştir. Bu eleman bütün yapısal elemanların (yatay sınır elemanı, düşey sınır elemanı ve gövde plakası) oluşturulmasında kullanılmıştır. SHELL181 elemanı ile tanımlanmıştır ANSYS kütüphanesinde verilen bilgilere göre SHELL 181 elemanı ince ve orta seviyede kalın kabuk elemanları modellemek için uygun bir eleman olarak tanımlanmıştır. SHELL181 elemanı Şekil 3.1'de görüldüğü gibi dört düğüm noktasına sahiptir. Her bir düğüm noktasında altı adet serbestlik derecesi bulunmaktadır. Bu serbestlik dereceleri x, y ve z yönlerinde ötelenmeler ve x, y ve aksları etrafında dönmelerdir. Yine ANSYS kütüphanesinde SHELL181 elemanının doğrusal olan büyük rotasyona sahip uygulamalar veya yüksek gerinim içeren doğrusal olmayan davranışa sahip uygulamalar için kullanılabileceği bildirilmiştir. Bir zaman artırımındaki eğriliğin yeterince küçük olması durumunda elamanın kinematik özellikleri elemanın esnemesine (streç hareketi) yapmasına olanak sağlamaktadır. Modellemede ilk başta SHELL181 eleman özelliklerinde programın varsayılan seçenekleri kullanılmıştır.

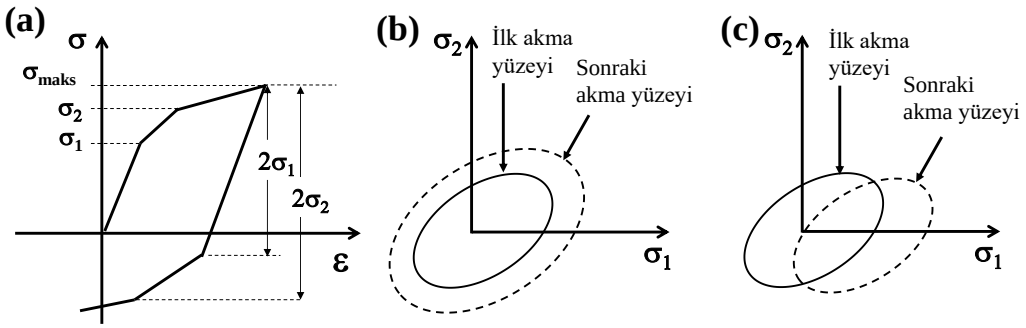


Şekil 3.1. Shell181 elemanının geometrisi.

3.1.2. Malzeme modeli özellikleri

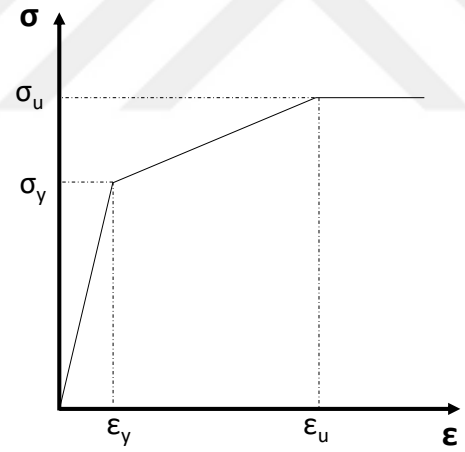
Malzeme özellikleri modellenen her deneysel numunenin yapısal elemanları için ayrı ayrı tanımlanmıştır. İlk önce malzemelerin Poisson oranı (υ), elastisite modülü (E) gibi lineer özellikleri tanımlanmıştır. Burada kullanılan birimler modelleme boyunca bütün sayısal verilerde sabit (Newton ve milimetre cinsinden) olarak kullanılmıştır.

Doğrusal olmayan malzeme modeli için yükleme hızından bağımsız (rate-indipendent) malzeme modeli seçilmiştir. Bu malzeme modeline göre belirli bir gerilme oranı geçildikten sonra geri dönülmez gerinimler oluşur. Bu gerinimler zamandan bağımsızdır. Akma kriteri ve pekleşme kuralları bu aşamada tanımlanmalıdır. Akma kriteri malzemenin akmaya başladığı gerilme seviyesini belirler. Bu plastisite modeli için tanımlanmış akma kriterini belirten çok doğrulu kinematik model Şekil 3.2(a)'da gösterilmektedir. Bu çalışmada da çok doğrulu kinematik model kullanılarak malzeme özellikleri tanımlanmıştır. Yükleme hızından bağımsız (Rate-independent) plastisite modelinde pekleşme kuralı ise izotropik ve kinematik olmak üzere iki tanedir. Bu çalışmada kinematik pekleşme kuralı tercih edilmiştir. Şekil 3.2(b)'de görülen izotropik pekleşme kuralında akma bölgesi merkezi değişmez ama plastik pekleşme gerçekleştikçe akma bölgesi genişler. Şekil 3.2(c)'de şematik çizimi verilen kinematik pekleşme kuralında ise akma bölgesi büyüklük olarak sabittir fakat ilerleyen akma durumunda akma bölgesi merkezi yüzey üzerinde ötelenerek ilerler.



Şekil 3.2. Çok doğrulu model (b) izotropik pekleşme (c) kinematik pekleşme.

Bu çalışmada kullanılan malzeme modeli Şekil 3.3'te verilmiş olup burada σ_y ve σ_u değerleri sırası ile malzemenin akma dayanımını ve çekme dayanımını, ε_y ve ε_u ise malzemenin akma ve çekme dayanımlarına karşılık gelen gerinim değerlerini temsil etmektedirler. Deneysel doğrulamalarda araştırmacıların bildirmiş olduğu malzeme dayanımları dikkate alınmıştır. Parametrik çalışmada ise belirlenen çelik sınıfında göre malzeme dayanım değerleri tanımlanmıştır.



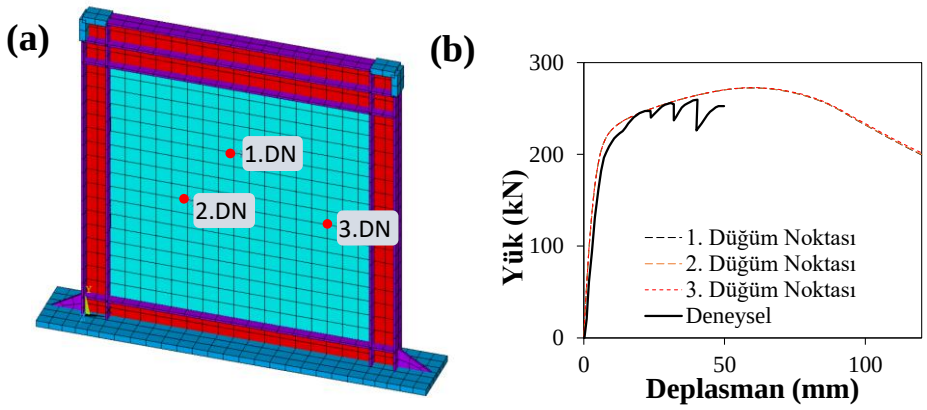
Şekil 3.3. Sonlu elemana analizlerinde kullanılan malzeme modeli.

3.1.3. Gövde plakasına düzlem dışı yük uygulaması

Çelik levhalı perde duvarlar daha önceki bölümlerde anlatıldığı gibi oldukça narin yapısal elemanlardır. Çelik gövde plakası geometrisinin narinliğinden dolayı henüz bir yük uygulanmadığı zaman bile elemanın kendi iç yükleri altında yer yer deformasyonlara maruz kalmaktadır. Ayrıca çelik levhalı perde duvar inşa aşamalarında kaynak işçiliği hataları veya sınır elemanlardaki küçük deformasyonlar gibi fabrikasyon ve insan

hatasından kaynaklı deformasyonlar da görülebilir. Bu kusurlu durum sonlu eleman modelinde de dikkate alınmalıdır. Sonlu eleman modelinde oluşturulan plaka mükemmel düzlüktedir ve bir kusur içermemektedir. Fakat mükemmel düzlükte modellenen plaka analiz başlangıcında dahi çözümün yakınsama problemi ile karşı karşıya kalmasına neden olmaktadır.

Gövde plakası üzerinde oluşturulmak istenen kusur durumu için önce Eigenvalue analizleri yapılmıştır. Elde edilen Eigenvalue modları üzerinden yola çıkılarak plakaya küçük oranda plaka eksenine dik yönde bir yük uygulanmıştır. Uygulanan bu yük genel olarak 50N veya daha küçük olacak şekilde ayarlanmıştır. Kusur yükünün uygulanma noktasının belirlenmesi için Eigenvalue analizine ihtiyaç olup olmadığını belirlemek için Lubell et al. (2000) tarafından yapılan çalışmadaki SPSW2 modeli kontrol modeli olarak seçilmiştir. Model taban seviyesindeki düğüm noktalarında ötelenmeler ve rotasyonlar her yönde sabitlenmiştir. Ayrıca kolon ve kirişlerin düzlem dışı hareketi kolon – kiriş birleşim yerlerinden ve kolon ve kirişlerin açıklık orta seviyelerinden engellenmiştir. Modele uygulanan kusur yükleri Şekil 3.4(a)'da görüldüğü gibi 3 farklı lokasyonda rastgele olarak seçilmiştir. Model üst kiriş seviyesinden monotonik olarak düzlem içi yer değiştirme verilerek yüklenmiştir. Bütün analizler aynı model üzerinde sınır şartları ve yükler kaldırılıp sonra tekrar tanımlanarak gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre uygulanan yükün lokasyonu analiz sonuçlarına etki etmemektedir. Şekil 3.4(b)'den görüleceği gibi bütün yük – yer değiştirme eğrileri tamamen üst üste gelecek şekilde örtüşmüştür. Bu çalışmadan sonraki bütün analizlerde bu yük plakanın ortasında bulunan düğüm noktasından uygulanmıştır.



Şekil 3.4. (a) Yük uygulaması için rastgele seçilen düğüm noktaları (DN) ve (b) monotonik yükleme altında sonlu eleman analizi sonuçları.

3.1.4. Sonlu eleman çözüm yöntemi

Çözüme başlanırken analiz tipi belirlendikten sonra büyük yer değiştirme etkilerini dikkate almak için NLGEOM komutu kullanılmıştır. Çözüm yükleme adımları ve alt adımlar belirlenmiştir. Çelik gövde plakasının narin yapısından dolayı burkulmaya başladığında düğüm noktalarında yüksek yer değiştirmeler meydana gelmektedir. Bu durum çözümün yakınsayamamasına sebep olmaktadır. Malzeme modelinin rahat çalışması ve yakınsama problemleri ile karşılaşmamak için başlangıç adım sayısı, maksimum adım sayısı ve minimum adım sayısı dikkatli seçilmelidir. Yük adımlarını çok büyük aralıklarla geçmek çözüm elde etmeyi zorlaştırmaktadır. Çözümün lineer veya adımlı yapılmasını KBC komutu kontrol etmektedir. Bu çalışmada doğrusal enterpolasyon artırımı (lineer) seçeneği seçilmiştir (KBC,0). Bu seçenekte yüklerin enterpolasyonu bir önceki ve bir sonraki yük adımı değerleri kullanılarak her alt adım için doğrusal olarak yapılmaktadır. Adımlı yüklemenin daha çok yükleme hızına bağımlı durumlarda kullanılması ANSYS kütüphanesi tarafından önerilmiştir.

Doğrusal olmayan denklemlerin çözümünde Newton-Rapshon prosedürü kullanılmıştır. Bu prosedüre göre doğrusal olmayan davranış küçük artırımlar ile belirlenir. Çözümlerde yakınsama tolerans değeri minimum seviyede tutulmuştur. Bu tolerans değeri iterasyonlar sonucunda elde edilen sonuçların kesin sonuca ne kadar yakın olacağını belirler. Tolerans arttıkça daha hızlı ama gerçek çözüme daha uzak çözümler elde edilir. Analizlerde sadece son alt adımlar değil her adım kaydedilmiştir. Bu sayede analiz sonunda istenilen öteleme oranında modellerin incelenebilmesi mümkün olmuştur.

Bir çözüm hatası ile karşılaşıldığında yapılacak ilk işlem hatanın sebebini anlamak olmalıdır. Kuvvet, moment veya yer değiştirme çözüm denklemlerinin tolerans değerleri içerisinde yakınsayamaması, rijit gövde hareketi (yetersiz sınır şartları), malzeme dengesizliği, eleman şeklinde bozukluk veya karşılanamayan kuvvetler gibi çok farklı sebeplere bağlı olabilir. Bu hatanın belirlenmesinde başvurulması gereken ilk yer ANSYS çözüm ekranıdır. Çözüm hatası belirlendikten sonra sorunu çözmeye yönelik adımlar atılmalıdır.

Bu çalışmada çözüm aşamasında en çok karşılaşılan problemler yakınsama problemleri ve eleman şekil bozuklukları olmuştur. Karşılaşılan her iki problem de genel olarak çelik levhalı perde duvarın yük boşaltım aşamasını geçtikten sonra negatif yönde yüklenirken meydana gelmiştir. Genel olarak narin plaka özellikle bu aşamada çok az yük artırımlarında çok büyük yer değiştirmelere sahip olmaktadır. Bunun sebebi, plakada bir yönde oluşan çekme alanları zıt yönde yükleme ile kaybolurken diğer yönde yeni çekme alanları oluşmaya başlamasıdır. Bu durumda birkaç çözüm seçeneği uygulanabilir. Bu durumda eğer kullanılan sonlu eleman ağı boyutu çok büyükse boyut küçültme yoluna gidilebilir. Yük adımlarında bulunan alt adım sayısı artırılabilir veya yakınsama toleransları artırılabilir. Son yöntem hariç diğerlerinde yapılacak analizin çözüm süresi ve ihtiyaç olan depolama alanı artacaktır. Son seçenekteki gibi yüksek toleransalar kullanıldığında ise gerçek sonuca daha uzak sonuçlar elde edilir. Bu çalışma sonuçlarına göre yakınsama toleranslarının program varsayılan değerlerinde bırakılması tavsiye edilmektedir.

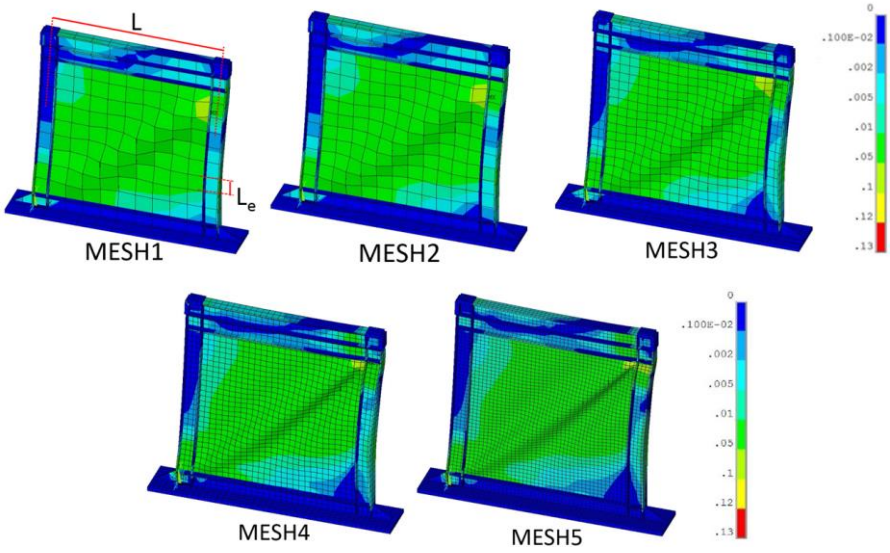
Bu çözümlerin yanında ANSYS kütüphanesinde geniş açıklaması bulunan STABILIZE komutu da kullanılmıştır. Bu komut kullanıldıktan sonra daha az yakınsama hatası ile karşılaşılmıştır. Komut sayesinde uygun elemanlarda (ör. SHEL181) serbestlik derecelerinde belirli miktarda stabilizasyon yapılır. Bu stabilizasyon gövde plakasında meydana gelen çok ani ve büyük yer değiştirmelerin daha kademeli olarak meydana gelmesine sebep olur. Bu komut yardımı ile enerji tüketme oranı veya sönümleme faktörü kullanılarak stabilizasyon seçeneği açılabilir. Yapılan çözümlerde elde edilen tecrübeye göre çelik levhalı perde duvarlar için kontrol parametresi olarak enerji tüketme oranı seçeneği seçilmesi gerekmektedir. Eğer bu komut üzerinde kullanıcının daha önce bir deneyimi yoksa program tarafından bu komut için girilen değerin 1.0e-4 olması önerilmektedir. Girilen değer üzerine yapılan çalışmalarda değerin büyütülmesinin yakınsama problemleri azalttığı görülmektedir. Fakat analiz sonuçlarında hatalara sebep olabilmektedir (bir seviyedeki eleman düğüm noktalarından alınan toplam kesme kuvveti ile yükleme noktasından alınan kuvvetin farklı değerlere sahip olması gibi). Bu gibi problemler monotonik yüklemede fark edilmeyecek kadar az olmasına rağmen çevrimsel yüklemede ihmal edilemez farklılıklara sebep olabilir buna benzer sebeplerle kolayca öngörülemeyen problemlerdir. Sonuç olarak STABILIZE komutu için kullanılan değerin program varsayılanı olarak kalmasına karar verilmiştir.

3.1.5. Çözüm Hassasiyeti

Sonlu eleman ağ boyutunu belirlemek için aynı model üzerinde farklı boyutlarda elemanlar kullanılarak monotonik yükleme altında sonlu eleman analizi sonuçları karşılaştırılmıştır. Yukarıda kısaca bahsedildiği gibi küçük eleman kullanmanın avantajları ve dezavantajları vardır. Eğer analiz süresi ve ihtiyaç duyduğu depolama alanı tolere edilebilecek seviyelerde ise daha küçük eleman ağı kullanılabilir. Bu durumda eleman sayısı ve hesaplanacak denklem sayısı artacaktır. Eleman ağı boyutu belirlenirken bir çalışma yapılarak hem çözüm doğruluğunu hem de kullanılan analiz zamanını göz önüne alan uygun bir seviye belirlenmesi önemlidir. Çözümler doğru ve ekonomik olmalıdır.

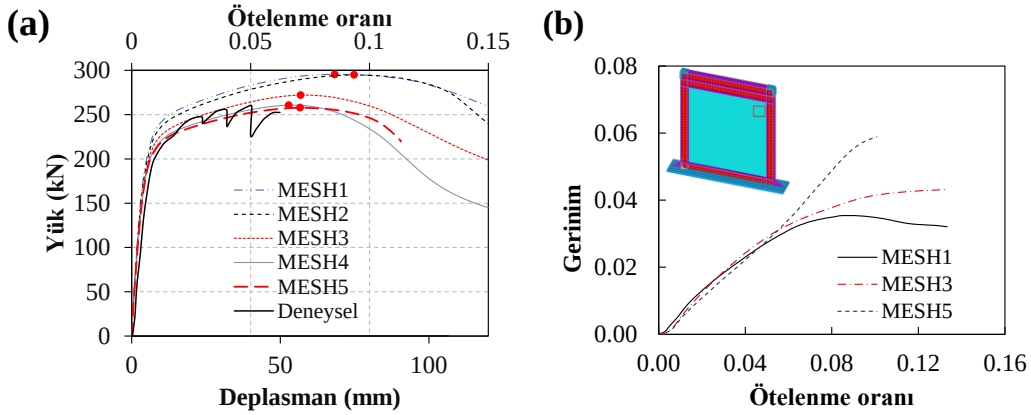
Eleman ağı boyutu çalışması için yine Lubell et al. (2000) çalışmasında bulunan tek katlı ve tek açıklıklı SPSW2 modeli kullanılmıştır. Bir eleman ağı boyut parametresi belirlenmiştir. Bu parametre eleman ağı genişliğinin (L_e), kolon merkezleri arasındaki uzaklık veya kiriş merkezleri arasındaki uzaklıktan küçük olanına (L_s) oranı olarak tanımlanmıştır. Şekil 3.5'te 0.05 ötelenme oranında asal gerilme çizimleri verilen 5 farklı boyut, L_e/L_s oranı 0.111, 0.088, 0.055, 0.033 ve 0.22 olacak şekilde belirlenmiştir. Bu modeller sırasıyla MESH1, MESH2, MESH3, MESH4 ve MESH5 olarak adlandırılmışlardır.

Modeller göçme mekanizması tamamlanıncaya kadar monotonik yüklemeye maruz bırakılmışlardır. Elde edilen sonuçlar Lubell et al. (2000) çalışmasında bulunan sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Yük-yer değiştirme sonuçları grafiksel olarak Şekil 3.6(a)'da verilmiştir. MESH1 ve MESH2 kaba eleman ağı boyutunu temsil ederken MESH4 ve MESH5 ince eleman ağı boyutunu gösterir. Bu iki grubun yük-yer değiştirme eğrileri arasında gözle görülür bir fark oluşmaktadır. MESH3, MESH4 ve MESH5 maksimum kapasitelerine yaklaşık 0.065 (55mm yer değiştirme) ötelenme oranında erişmişlerdir. Kaba boyutlara sahip modeller daha fazla yer değiştirme kapasitesine ve daha fazla maksimum dayanıma erişmişlerdir. Analiz verilerinin deneysel zarf eğrisi ile karşılaştırılması sonucunda yaklaşık olarak eleman ağı boyutu oranının (L_e/L_s) 0.055 ve 0.022 arasında seçilmesinin çelik levhalı perde duvarların davranışını tahmin etmede daha kabul edilebilir sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir.



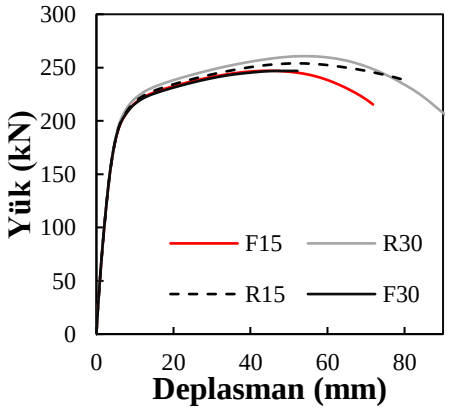
Şekil 3.5. 0.05 ötelenme oranında farklı eleman ağı boyutuna sahip modellerin asal gerilme çizimleri.

Gerinim – ötelenme oranı eğrisi verilerinin karşılaştırılması için modellerin gövde plakasının sağ üst köşesinde bulunan aynı bölge davranışı dikkate alınmıştır ve MESH1 MESH3 ve MESH5 için sonuçlar Şekil 3.6(b)'de gösterilmiştir. Model kolonunda lokal burkulma başlayana kadar bütün modellerde gerinim değerlerinin yaklaşık olarak aynı olduğu görülmüştür. Grafiklerden ve şekillerden de açıkça görülebildiği gibi seçilen eleman ağı boyutu burkulmadan sonra gerinimlerin lokalizasyonu farklı yumuşama (*softening*) davranışlarının ortaya çıkmasına sebep olmaktadır. Eleman ağı boyutu seçimi modelin özellikle maksimum yüke ulaştıktan sonra analiz sonuçlarına önemli ölçüde etki edebilecek, dikkat edilmesi gereken bir konudur. Belirli bir seviye altındaki boyut seçimi modellerin toplam karşı koyulan kesme kuvveti ve yer değiştirme kapasitesi gibi özelliklerinin gerçek deneylerde gözlemlenen davranışa daha yakın sonuç vermesini sağlamaktadır. Bu çalışma sonucunda hem analizin verimliliğini hem de doğruluğu artırmak için L_e/L_s oranının 0.05 üst limitine kadar kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.



Şekil 3.6. (a) Farklı eleman ağı boyutuna sahip modellerin yük-yer değiştirme grafikleri ve deneysel zarf eğrisi ile karşılaştırılması ve (b) farklı modellerin gerinim – ötelenme oranı karşılaştırması.

Eleman ağı boyutundan ayrı olarak integrasyon seçenekleri üzerine bir çalışma yapılmıştır. ANSYS programı kullanıcıya SHELL181 elemanı için tam integrasyon veya azaltılmış integrasyon kullanabilme seçeneğini sunmaktadır. Performans açısından oluşacak gecikmeler için varsayılan olarak program azaltılmış integrasyon seçeneği ile başlar. Tam integrasyon ve azaltılmış integrasyon seçenekleri eleman çözümünde kullanılacak olan Gauss Noktası sayısını belirler. Azaltılmış integrasyonda program çözücüsü bir eleman üzerinde daha az Gauss Noktası kullandığı için daha az integral çözer ve analiz süresi önemli ölçüde azalır. Tam integrasyonda ise daha fazla çözüm yapıldığı için daha çok zaman ve depolama alanı tüketilir ama daha hassas bir çözüm yapılmış olması beklenir. Şekil 3.7'de farklı integrasyon seçenekleri ve farklı eleman ağı boyutları ile yapılmış analizlerin sonuçları grafiksel olarak verilmiştir.



Şekil 3.7. Farklı integrasyon seçeneği ve farklı eleman ağı boyutlarına sahip modellerin yük – yer değiştirme eğrileri karşılaştırması.

Bu grafikte R azaltılmış integrasyon (*reduced*) ve F tam integrasyon (*full*) seçeneklerini belirtmektedir. 15 ve 30 sayıları ise eleman ağı kenar uzunluğunu temsil etmektedir. 15 daha ince eleman ağı boyutu, 30 ise daha kaba eleman ağı boyutunu belirtir.

Sonuçlar incelendiğinde bütün modellerin birbirine oldukça yakın sonuçlar verdiği görülmektedir. Buna karşın tam integrasyon kullanımı önemli ölçüde bilgisayar kaynağı ve zaman ihtiyacını artırmaktadır. Bu modeller özelinde en optimum seçeneğin daha küçük eleman ağı boyutu ile birlikte azaltılmış integrasyon kombinasyonunun olduğuna karar verilmiştir.

3.2. Model Doğrulama Çalışması

Bu bölümde literatürden seçilen bazı deneysel çalışmalar sonlu elemanlar yöntemi ile modellenerek analiz edilmiştir. Daha sonra elde edilen sonuçlar ile deneysel veriler karşılaştırılmıştır. Yük – deformasyon eğrileri hem çevrimsel yükleme hem monotonik yükleme altında oluşturulmuştur. Modellerin deneysel veriler ile karşılaştırması hem bu elde edilen yük – deformasyon ilişkileri hem de göçme mekanizmasının oluşumu aşamalarının incelenmesi ile yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre kullanılan sonlu eleman modelleme aracı çelik levhalı perde duvarların doğrusal ve doğrusal olmayan davranışlarının incelenmesi ve göçme mekanizmalarının tayini için tatmin edici seviyede doğruluğa sahip olup kullanmaya uygundur.

3.2.1. Deneysel çalışmalar

Deneysel çalışmalar seçilirken farklı özelliklere sahip olması göz önüne alınmıştır. Deneysel çalışmaların şematik çizimleri Şekil 3.8'de verilmiştir. Daha detaylı bilgiler ilgili çalışmalarda mevcuttur.

Doğrulama için seçilen ilk deneysel çalışma Lubell et al. (1997) tarafından test edilen SPSW2 numunesidir ve geometrik özellikleri Şekil 3.8(a)'da verilmiştir. Bu çalışmada seçilen numune tek katlı çelik levhalı perde duvar modelidir. Deneyde kullanılan çelik levhalı perde duvar kolon ve kirişleri Kanada'da kullanılan S75x8

kesitidir. Ayrıca çelik levha 824 mm x 824 mm x 1.5 mm boyutlarında sıcak haddelenmiş çelikten imal edilmiştir. Düşey sınır elemanı merkezleri arasındaki uzaklık 900 mm'dir. Moment taşıyabilen kolon-kiriş birleşimleri kullanılmıştır. Ayrıca perde duvar üstünde kirişe bir adet daha S75 x 8 kiriş kaynak birleşim ile birleştirilmiştir. Bu uygulamanın amacı kiriş elemanın deformasyonlarını sınırlandırarak plakanın davranışını daha iyi incelemektir. Kullanılan çelik için elastisite modülü 2 x 10^5 N/mm^2 ve Poisson oranı 0.3 olarak alınmıştır. Çelik gövde plakası akma gerilmesi 320 MPa olarak verilmiştir. Sınır elemanlar için seçilen materyal çok doğrulu kinematik özelliklere sahiptir. Sınır elemanlarının akma gerilmesi 380 MPa ve nihai gerilmesi 525 MPa olarak verilmiştir. Elastisite modülü ve Poison oranı gövde plakası için seçilen değerler ile aynıdır.

Yükleme tek seviyeden uygulanmış ve yükleme protokolü ATC-24'te verilen prosedüre göre oluşturulmuştur. Sınır koşulları olarak ankastre özellikleri modellemek için çelik levhalı perde duvar modeli tabanı bütün yönlerde rotasyon ve yer değiştirmeye karşı koyacak şekilde tasarlanmıştır. Ayrıca deneysel çalışmada herhangi bir düzlem dışı yer değiştirmeden bahsedilmediği için model düşey sınır elemanlarından düzlem dışı hareket etmeyecek şekilde tutulmuştur.

Model yukarıda belirtilen özellikler doğrultusunda oluşturulduktan sonra yüklemenin verileceği kiriş uç plakasının kalınlığı yüklemeyi kiriş başlığında lokal bir burkulma oluşturmadan verebilmek için artırılmıştır.

İkinci model olarak Berman and Bruneau (2003) tarafından test edilen ve geometrik ölçüleri Şekil 3.8(b)'de verilen F2 modeli tercih edilmiştir. F2 modeli dört katlı bir hastane binası örneğinden elde edilmiş 1/2 ölçekli, tek katlı ve tek açıklıklı bir prototiptir. Çelik plaka olarak 1 mm kalınlığında çelik levha kullanılmıştır. Kat genişliği 3657.6 mm ve kat yüksekliği 1828.8 mm olarak tasarlanmıştır. Gövde plakası materyali için yapılan malzeme testi sonucunda akma dayanımının 214 MPa olduğu görülmüştür. Kolon ve kiriş elemanları için bir malzeme testi yapılmamıştır çünkü bu elemanların elastik bölgede kalacağı öngörülmüştür. Sınır elemanlarda kullanılan çelik sınıfı ASTM A572 olarak bildirilmiştir.

F2 modelinde kullanılan çelik levhalı perde duvar modeli diğer modellerden farklı olarak yarı rijit birleşimlere sahip olacak şekilde oluşturulmuştur. Bu kolon-kiriş birleşimleri çift taraflı korniyer ile bulonlu birleşim olarak tasarlanmıştır. Korniyer ayakları kiriş gövdesine kaynaklanırken kolon flanşlarına bulonlanmıştır. Bu birleşimin modellenmesi "F2 numunesi yarı – rijit birleşimin modellenmesi" başlığı altında daha detaylı olarak anlatılmıştır.

F2 modelinden sonra doğrulama için kullanılan üçüncü model Wang et al. (2015) tarafından test edilen TM2 numunesidir. Şekil 3.8(c)'de geometrik özellikleri gösterilen bu numune 3 katlı 1/3 ölçekli bir numunedir. Çelik levhalı perde duvarların sismik davranışını araştırmak amacı ile yapılan bu çalışmada kontrol katı orta kattır. Kiriş flanşları arasında kalan mesafe birinci, ikinci ve üçüncü katta sırası ile 1000, 1200 ve 1000 mm'dir. Kolon flanşları arasındaki mesafe ise 2160 mm'dir. Bu numunenin birinci kat gövde plakası kalınlığı 6 mm iken diğer katlarda 4 mm kalınlığa sahip plakalar kullanılmıştır. Gövde plakası materyali Q235B ve çerçeve elemanları (kolon ve kirişler) Q345B çeliktir. Yapılan materyal testlerine göre farklı elemanlardan alınan numuneler çerçeve elemanları için 323 MPa ve 365 MPa arasında bir akma dayanımına sahip olurken gövde plakasında ise 6 mm için 418 MPa ve 4mm için 256 MPa olarak ölçülmüştür. Tabandan 1200 mm yükseklikte kolonlarda kesit değişimine gidilerek daha küçük bir kesit ile devam edilmiştir. Düzlem dışı hareketi önlemek için harici çerçeveler kullanılmıştır.

Yükleme iki aşamada gerçekleştirilmiştir. Birinci aşamada sadece kolon başlarına düşey yük uygulanmıştır. Daha sonra aktüatör yardımı ile üst kiriş seviyesinden yatay yük verilmiştir. Yükleme protokolü oluşturulurken JGJ – 101-96 (1997) prosedürü uygulanmıştır. Bu protokole göre numune akmasından önce yük kontrollü aktıktan sonra ise deplasman kontrollü yükleme gerçekleştirilir. Deplasman kontrollü yüklemede her bir yük artırımı akma deplasmanı kadar olacak şekilde bir protokol oluşturulmuştur.

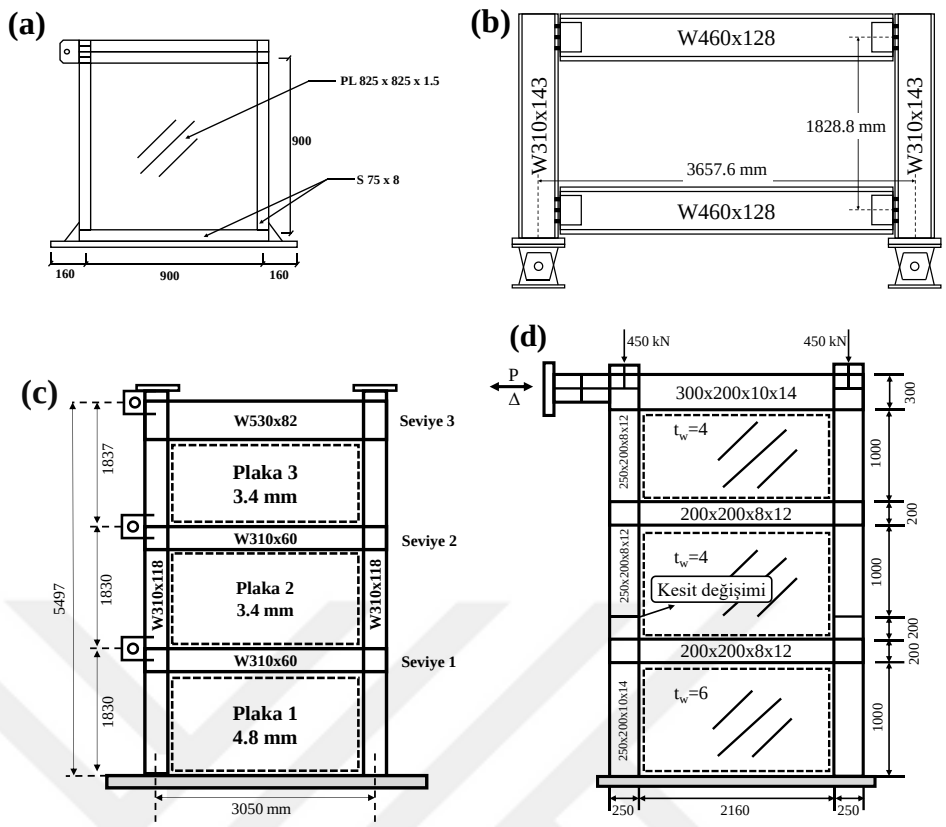
Son model, şematik gösterimi Şekil 3.8(d)'de verilen ve Behbahanifard et al. (2003) tarafından test edilen tek açıklıklı, 3 katlı 3SPSW modelidir. Kolonlar W310x118 kesitlere sahip olup kesit merkezleri arasındaki uzaklık 3050 mm'dir. Kiriş kesitleri ise birinci ve ikinci kat seviyesinde W310x60, en üstte ise W530x82 olarak verilmiştir. Kat

yüksekliği 1830 mm olup yapının toplam yüksekliği ise yükleme plakaları dahil 5497 mm'dir. Bu geometrik özelliklere sahip numunenin ½ ölçekli bir yapıyı temsil ettiği bildirilmiştir.

Bu çalışmada kullanılan deney numunesi Driver et al. (1997b) tarafından daha önce yüklemeye maruz bırakılmış dört katlı bir deney numunesinin en alt katının sistemden çıkarılması ile oluşturulmuştur. Kolonlar, boyutları 3800x800x90 mm boyutlarındaki taban plakasına kaynakla birleştirilmiştir. Yine gövde plakası da kolonlar gibi taban plakasına kaynak ile birleştirilmiştir. Driver et al. (1997b) tarafından verilen bilgilere göre birinci, ikinci ve üçüncü katlarda çelik gövde plakalarının akma dayanımları sırası ile 341 MPa, 257 MPa ve 262 MPa'dır. W310x118 kesitin akma dayanımı 313 MPa, W310x60 ve W530x82 kesitlerinin ise sırasıyla 332 MPa ve 349 MPa'dır. Kolon – kiriş birleşimleri moment taşıyabilen birleşimler olup flanşlar ve gövde arasında kaynak yapılarak oluşturulmuştur.

Bu modelde diğer modellerden farklı olarak yükleme sadece en üst kiriş seviyesinden değil, her kat seviyesinden ayrı ayrı yapılmıştır. Her kat seviyesinde eşit yük uygulayabilmek için bütün katlara ikişer adet 890 kN kapasiteye ulaşabilen aktüatör yerleştirilmiştir. Deney düzeneği yükleri her katta bulunan kirişlerin üst flanşlarına verilecek şekilde düzenlenmiştir. Bu farklı yükleme yönteminin modellenmesi hakkında detaylı bilgi Bölüm 3.2.3'te verilmiştir. Kolonlara 540 kN'a ulaşacak eksenel yük verebilmek için her kolon başına ikişer olacak şekilde 4 adet 420 kN kapasiteli yükleyici aktüatör kullanılmıştır. Düzlem dışı hareketleri engellemek için bütün kirişlerin her iki ucunda olmak üzere toplamda altı noktadan destek sağlanmıştır.

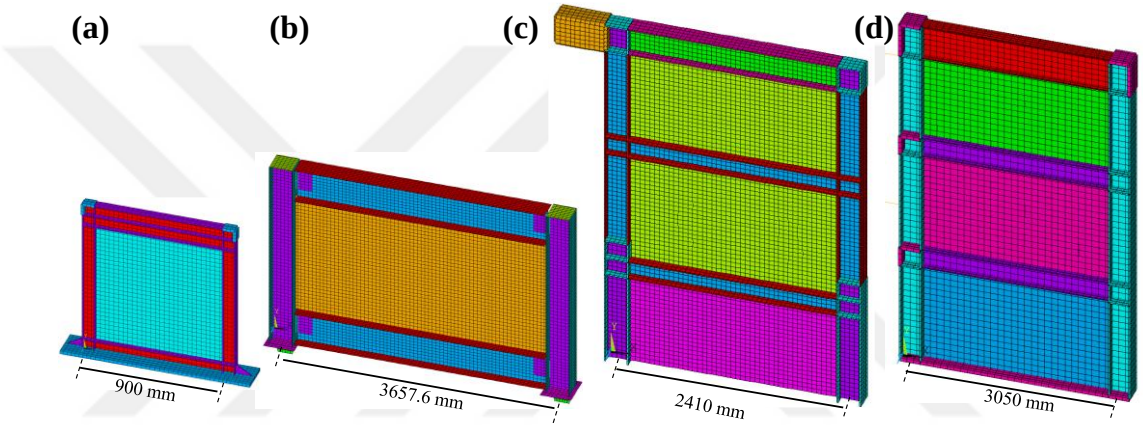
Yükleme protokolü, deprem yüklemesini simüle etmek için belirlenmiş ATC-24 (1992) yönergesine dayanarak oluşturulmuştur. Yatay yük uygulanmadan önce kolon başlarına 450 kN yük verilmiştir. İlk üç çevrimde yük sabit tutulduktan sonra 540 kN seviyesine çıkarılmış ve deney sonuna kadar sabit tutulmuştur. Toplamda 24 çevrim uygulanmış olup bunların 15 tanesi plastik davranış bölgesindedir.



Şekil 3.8. Model doğrulama çalışması için kullanılan modeller; (a) SPSW2, (b) F2, (c) TM2 ve (d)3SPSW.

Şekil 3.9'da oluşturulan sonlu eleman modelleri verilen bütün numuneler monotonik ve çevrimsel yükleme altında ve deney koşulları olabildiğince gerçeğe yakın simüle edilerek analiz edilmiştir. Doğrulama yapılırken ilgili çalışmalardaki numunelerin seçilmesinin ana amacı olabildiğince farklı davranışlara ve göçme mekanizmalarına sahip modeller oluşturabilmek ve bu sayede kullanılan sonlu eleman aracının farklı durumlarda istenilen sonuçları verip veremediğini kontrol edebilmektir. Bu sayede kullanılan yöntemin güvenilirliği artırılmıştır. Modellerin farkları özetlenecek olursa SPSW2 modeli tek katlı ve göreceli olarak esnek kolonlara sahip ve küçük ölçekli bir modeldir. Bu modelde üst kirişte kesit büyütmek yerine iki adet kirişin üst üste birleştirmesi ile ankraj sağlanmıştır. Göreceli olarak zayıf kolon kullanılması sonucu kolonlarda gövde plakası merkezine doğru, düzlem içi deformasyonlar meydana gelmiştir. F2 modeli tek katlıdır fakat diğer modellerden farklı olarak yarı rijit kolon birleşimlerine sahiptir ve kolonlar sabit mesnetler (dönmeye karşı koymayan) ile desteklenmiştir. Sınır koşulları, yatay ve düşey sınır elemanları tamamen elastik bölgede kalacak şekilde tasarlanmışlardır. Ana inceleme alanı çelik gövde levhasıdır. TM2 modeli 3 katlıdır ve kiriş – kolon birleşimlerinde momente karşı koyabilen birleşimler kullanılmıştır. Daha

önce de bahsedildiği gibi çelik levhalı perde duvarlarda genel olarak en altta bulunan kat hasarın büyük bir bölümünü alır. TM2 modelinde ise kontrol katı orta kat olarak belirlenmiş, alt katta daha kalın bir gövde plakası kullanılmış, kolon kesitleri ikinci kata gelindiğinde ise küçültülmüştür. 3SPSW numunesi daha önce test edilmiş, bir katındaki plakanın burkulması dışında gözlemlenen kalıcı bir hasar içermeyen büyük ölçekli bir numunedir. Önceki test sonucunda hasarın çoğunu alan kat 3SPSW modelinden çıkarılmıştır. Hem tekrar yükleme davranışını incelemesi açısından hem de tek seviyeden yükleme yerine çok noktalı yükleme düzeneğine sahip olması açısından diğer modellerden farklıdır.



Şekil 3.9. Seçilen numunelerin sonlu eleman modelleri (a)SPSW2, (b)F2, (c)TM2 ve (d)3SPSW.

3.2.2. F2 numunesi yarı – rijit birleşimin modellenmesi

F2 modeline genel olarak bakıldığında kolonlar pimler vasıtası ile desteklenmiş ve kiriş – kolon birleşimlerinde Şekil 3.10(a)'da ölçüleri verilen yarı – rijit birleşimler kullanılmıştır. Bu özellikleri sisteme sınır elemanlarının tamamen elastik bölgede kalması ve deformasyonların gövde plakasında oluşması özelliklerini kazandırmıştır. Genelleştirilmiş eksenel yük-deplasman davranışına sahip doğrusal olmayan yay elemanı COMBIN39, Şekil 3.10(b)'de gösterildiği gibi büyük yer değiştirmelerde iki yüzey arasındaki olası temas kuvvetlerini modellemek için kiriş ve kolonların düğüm noktaları arasında kullanılmıştır. Kolonda kullanılan basit mesnetin modellenmesi Şekil 3.10(c)'de verilmiştir.

Çift korniyer davranışını modellemek korniyer ayakları kolon flanş yüzeyine temas ettiği ama ayrı çalıştığı için oldukça karışık bir süreçtir. Çift korniyer birleşimine etki eden eğilme momenti birleşimin alt bölgesi ve üst bölgesinde basınç ve çekme bölgeleri oluşmasına sebep olmaktadır. Birleşimin moment – rotasyon ilişkisine bağlı olarak histerezis davranışında rijitlik azalmaları ve sıkışma-daralma etkisi görülmektedir. Çoğu zaman yükleme altında korniyerin ayağı ile kolon yüzeyi arasında bir boşluk oluşur ve yükleme çevrimleri devam ettiğinde bu boşluklar histerezis eğride sıkışmalara sebep olur (Altman et al. 1983; Astaneh et al. 1989; De Stefano et al. 1994). Ayrıca bulon davranışı da histerezis eğriyi etkilemektedir. Bulonlarda meydana gelen uzamalar, bulon yuvasında genişlemeler vb. daralmış histerezis eğrilerin oluşmasına sebep olur. Bu şekildeki eğriler eğilme elemanlarında karşılaşılan tipik bir davranıştır (Narayanan and Roberts 1991).

F2 modelinde bulunan yarı – rijit birleşim iki şekilde modellenmiştir ve Şekil 3.10'da her iki model de gösterilmiştir. Basit "kabuk model" SHELL181 elemanları ile modellenmiş ve monotonik analizden gelen sonuçlar ışığında moment – rotasyon ilişkisi çevrimsel yükleme için kullanılmıştır. Çevrimsel yüklemede kullanılan kiriş modeli (kiriş – mafsal model) BEAM188 elemanı kullanılarak oluşturulmuştur. Bu modelde iki paralel kiriş elemanı kullanılarak iki farklı plastik davranış kirişlere tanımlanmıştır. Bu davranış yarı – rijit birleşimin davranışına yaklaşabilmek için kalibre edilmiştir.

Basitleştirilmiş kabuk modelde kiriş gövdesi ve kolon flanşı arasındaki korniyer birleşimi kabuk elemanları ile geçilmiştir. Kullanılan bulonlar modellenmemiştir ve korniyer yüksekliği Şekil 3.10(a) ve (b)'de görüldüğü gibi değiştirilmiştir. Bu yeni yükseklik $h_m=H_o-H_e$, şeklinde hesaplanmıştır. Burada H_o gerçek korniyer yüksekliğini, H_e ise dıştaki bulon yuvasından korniyer kenarına kadar olan uzaklığı temsil etmektedir. Korniyer kalınlığı üzerinde herhangi bir değişiklik yapılmamıştır.

Birleşimin zarf eğrisi yarı – rijit birleşimin basitleştirilmiş kabuk modelinin moment – rotasyon davranışı ile elde edilmiştir. Moment – rotasyon eğrisini hesaplamada kullanılan bu birleşim üzerindeki düğüm kuvvetleri ve yer değiştirmelerinin detaylı illüstrasyonu Şekil 3.10(d)'de verilmiştir. Hesaplamalarda aşağıda verilen eşitlikler kullanılmıştır;

$$\delta_1 = (u_x)_{p1} - (u_x)_{p2} \tag{3.1}$$

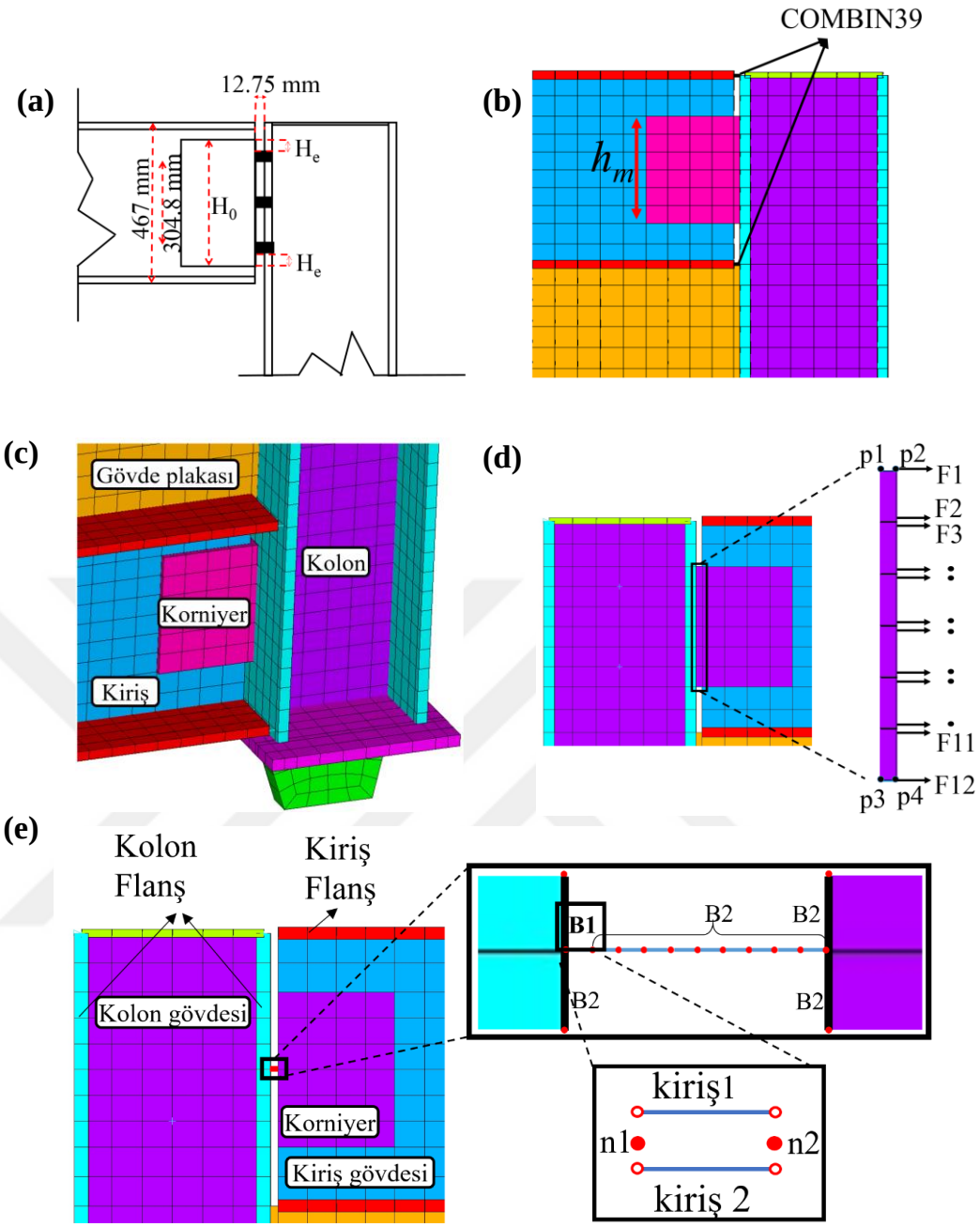
$$\delta_2 = (u_x)_{p3} - (u_x)_{p4} \tag{3.2}$$

$$\theta = \frac{\delta_1 - \delta_2}{h} \tag{3.3}$$

$$M = \sum F_i \times h_i \tag{3.4}$$

burada, $(u_x)_{pi}$ i numaralı düğüm noktasında x eksenindeki deplasmanı, δ iki komşu düğüm noktası arasındaki mesafeyi, θ birleşimin rotasyonunu, h birleşimin yüksekliğini, M birleşime etki eden toplam momenti, F_i i numaralı elemana ait kuvvetin x bileşenini, h_i i numaralı eleman kuvvetinin tarafsız eksene olan uzaklığını ifade etmektedir.

Kiriş modelinde F2 numunesindeki çift korniyerli birleşim kiriş elemanları (BEAM188) kullanılarak plastik bir mafsal ile değiştirilmiştir. Yarı rijit birleşimin moment – eğrilik davranışı, doğrusal olmayan genel kiriş kesiti özelliği (SECTYPE, ,GENB) kullanılarak uygulanmıştır. Kiriş elemanının uzunluğu boyunca tek nokta integrasyonlu doğrusal şekil fonksiyonu, uzunluk boyunca sabit momente neden olduğundan, uzunluk boyunca rotasyonu ve moment değişimini doğru bir şekilde yakalamak için bir eleman ağı boyutu iyileştirmesi gerekmiştir. Kiriş gövdesi ve kolon yüzeyi arasındaki boşluk, Şekil 3.10(e)'de gösterildiği gibi 10 eşit elemana bölünmüştür. Moment-eğrilik ilişkisi, kolon tarafına en yakın B1 kiriş elemanında kullanılmıştır. B2 olarak adlandırılan diğer tüm kiriş elemanları sonsuz rijit eleman olarak kabul edilmiştir.



Şekil 3.10. (a) F2 numunesinin kolon-kiriş birleşim ölçüleri (b) basitleştirilmiş kabuk model (c) kolon taban plakasını ve diğer yapısal elemanları gösteren kesit (d) kabuk modele ait moment – rotasyon hesaplamaları için kullanılan düğüm noktalarına ait kuvvetler ve deplasmanlar (e) yarı rijit birleşimin kolon – mafsal yöntemi ile modellenmiş hali.

Kabuk modelinden elde edilen rotasyonlar(θ), B1 kiriş elemanı uzunluğuna bölünerek eğriliğe dönüştürülmüştür (ϕ). B2 rijit kiriş elemanı ayrıca kabuk elemanları ile aynı düğüm noktalarını paylaşacak şekilde korniyer yüksekliğini geçmeyecek şekilde yerleştirilmiştir. Kiriş eleman yerleşimi Şekil 3.10(e)'de gösterilen bu modelde kabuk ve kiriş elemanları arasında tam moment aktarımı sağlanması amaçlanmıştır.

Şekil 3.11(a)'da görüldüğü gibi, kabuk model (basitleştirilmiş model) ile oluşturulan birleşim davranışı elasto – plastiktir. Çünkü elemanlara tanımlı olan kinematik plastisiteye sahip malzeme modeli yük çevrimlerinde herhangi bir rijitlik azalmasının olacağını dikkate almaz.

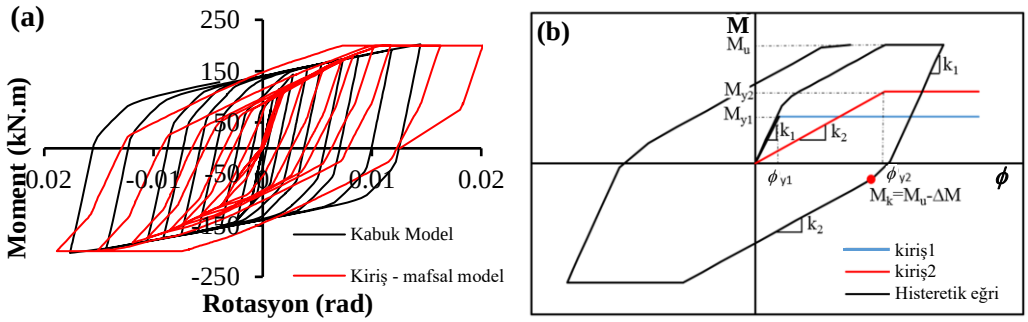
Bağlantıdaki sıkıştırma etkisinin modellenmesi için, yukarıda bahsedilen B1 doğrusal olmayan kiriş elemanı, Şekil 3.11(b)'de gösterildiği gibi farklı ideal elasto – plastik yük-deformasyon davranışına sahip iki paralel kiriş elemanından (kiriş1 ve kiriş2) oluşan bir sistem olarak kabul edilmiştir. Her kirişin başlangıç rijitliği ve akma kapasitesi ayarlanarak belirli bir miktarda sıkıştırılmış histerezis davranış elde edilebilmiştir. Kirişin akma momentini (M_y) tanımlamak için birleşimin toplam moment kapasitesi M_u, her iki eleman arasında dağıtılır. İki kirişin elastik rijitliği farklıdır. Bu kirişlerin paralel tepkisinden kaynaklanan moment-eğrilik eğrisi ve histerezis kuralı Şekil 3.11(b)'de sunulmuştur.

Şekil 3.11(b)'de M_u kabuk modeldeki birleşimin nihai moment kapasitesini, M_{y1}, M_{y2} ve k_1, k_2 ise sırasıyla kiriş1 ve kiriş2'nin akma momentlerini ve elastik rijitlik değerlerini ifade etmektedir. ϕ_{y1} ve ϕ_{y2} ise kiriş1 ve kiriş2'nin akmadaki eğrilik değerlerini göstermektedir. Histerezis eğrinin rijitliğinin değiştiği M_k moment değeri ise $M_k=M_u-\Delta M$ şeklinde hesaplanmıştır. Bu değeri hesaplamak için kullanılan histerezis parametresi ΔM aşağıdaki şekilde ifade edilmiştir;

$$\Delta M = 2\times M_{y1} + 2\times \phi_{y1} \times k_2 \tag{3.5}$$

F2 modelinin çift korniyer birleşimi için kullanılan M_{y1} ve M_{y2} değerleri $M_u/2$ olacak şekilde eşit alınmıştır. Burada kiriş1 elastik rijitlik değeri olan k_1 değeri basit kabuk modelinden elde edilen moment – eğrilik ilişkisinin başlangıç rijitliği olup aynı zamanda kiriş – mafsal yönteminin elastik rijitlik değerine eşittir. Diğer rijitlik girdisi olan k_2 ise moment – rotasyon ilişkisinde sıkıştırma ve rijitlik azalmasını etkileyen optimum bir parametredir. Bu yöntemde oluşan eğrinin sıkışma davranışını kontrol eden parametre M_{y1}/M_{y2}'dir. Daha sıkışmış bir histerezis eğri isteniyorsa M_{y1}/M_{y2} oranı

küçültülebilir. Her iki modelden (basitleştirilmiş kabuk modeli ve kiriş – mafsal modeli) elde edilen histerezis eğrilerin karşılaştırması Şekil 3.11(a)'da verilmiştir.



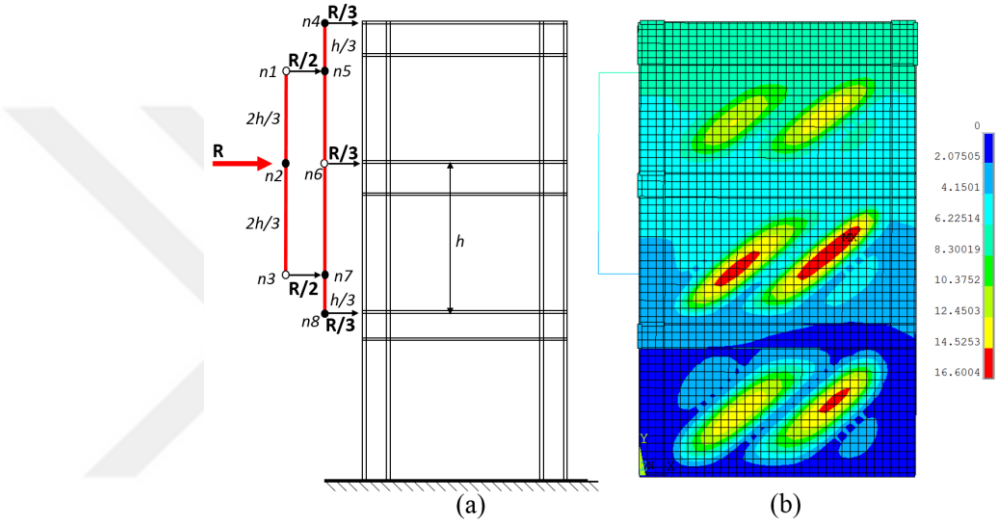
Şekil 3.11. (a) Basitleştirilmiş kabuk model ve kiriş – mafsal modelin moment-rotasyon eğrileri karşılaştırması ve (b) paralel kirişlerin moment – eğrilik ilişkileri.

3.2.3. Birden fazla noktadan uygulanan deplasman kontrollü yükleme

Numune 3SPSW daha önce de belirtildiği üzere her kat seviyesinde bulunan aktüatörler yardımı ile yüklenmiştir. ANSYS programında oluşturulan modeller eğer tek noktadan (tek aktüatör ile) belirli bir lokasyondan yükleniyorsa bu durum tek veya belirli bir bölge içerisinde kalan düğüm noktalarına deplasman uygulanarak kolayca yapılabilmektedir. Analiz sonrasında tek noktalı yükleme yapılan yerden tepki kuvvetleri ve yükleme sonucu oluşan deplasman verileri kısa işlemler sonucu elde edilebilir. Ayrıca maksimum yüke ulaştıktan sonraki göçme durumu da düğüm noktalarındaki tepkilerden elde edilen yük – deplasman eğrileri ile incelenebilir. Ancak kuvvet kontrollü yüklemede yükün kademeli olarak artırılması gerekir, bu nedenle maksimum yükten sonra tepkinin alınması mümkün değildir. 3SPSW modelinde her yükleme seviyesinde eşit kuvvetler uygulamak ve yer değiştirme kontrollü analiz yapmak için Şekil 3.12(a)'da gösterildiği gibi bir dağıtma çerçevesi kullanılmıştır. Bu modelde yer değiştirme n2 düğümüne verilmiştir. Şekil 3.12(b)'de ise, düğüm 2'nin (n2) 7 mm deplasmana gelindiğinde modelin sahip olduğu deforme şekli gösterilmektedir.

Dağıtıcı çerçeve için iki adet birbirinden farklı doğrusal olmayan genel kiriş kesiti tanımlanmıştır. n4 ile n8 düğümleri arasında bulunan düşey kirişlere, bu elemanların ikinci ve üçüncü katlarda düşey sınır elemanının eksenel rijitliğine katkısını önlemek için çok düşük eksenel rijitlik tanımlanmıştır. Dağıtıcı çerçevenin diğer kirişlerinin eksenel ve

eğilme rijitliklerine yüksek değerler tanımlanarak deformasyona uğramayacak şekilde kalması sağlanmıştır. n1, n3 ve n6 düğüm noktaları düzlem dışı eksen etrafında dönmesi serbest olacak şekilde yani mafsal özellikleri ile tanımlanmıştır. Diğer düğüm noktaları olan n2, n4 ve n8 ise bütün rotasyonlar tutulacak şekilde tasarlanmıştır. Yükleme etkisini istenilen yerlere iletmek için düşey kirişler üzerinde n5 ve n7 olmak üzere iki ek düğüm noktası tanımlanmıştır. n5 ve n7 düğümlerinin konumu düzenlenerek, yer değiştirme kontrollü hareket ile modele farklı yanal yük biçimleri uygulanabilir. Şekil 3.12(a)'da gösterilen mevcut konfigürasyon ile her katta üniform yükleme modeli oluşturulmuştur.



Şekil 3.12. (a) Yük dağıtıcı çerçeve ve (b) n2 düğüm noktasına uygulanan 7 mm deplasman sonucu oluşan şekil değiştirme hali (Berman and Bruneau 2003b).

3.2.4. Sonuçların karşılaştırılması

Şekil 3.13(a), SPSW2 sonlu elemanı analizinden elde edilen monotonik ve çevrimsel analiz kuvvet-yer değiştirme eğrilerinin deneysel verilerle karşılaştırmasını göstermektedir. Test ve analiz sonuçları modelin deforme olmuş şekli ve Von Misses gerinim dağılımlarının çizildiği Şekil 3.14(a)'da karşılaştırılmıştır.

Lubell (1997) ve Lubell et al. (2000) çalışmalarında verilen bilgilere göre akma gerçekleştikten sonraki rijitlik değeri elastik rijitliğin 1/10'u kadar olmuştur. Global akma kuvveti seviyesi 200 kN olmasına rağmen sistem iyi bir akma sonrası güç dayanımı elde etmiştir ve maksimum dayanım 260 kN seviyelerine kadar çıkmıştır. SPSW2 çevrimsel

testi, yaklaşık 48 mm'ye denk gelen $6\delta_y$ deplasmanda kolonun kırılması nedeniyle sona ermiştir. Burada δ_y değeri sistemde gözlemlenebilen ilk önemli akmanın meydana geldiği deplasmanı temsil etmektedir. Bu deplasman değeri 0.056 radyan kat ötelenmesine denk gelmektedir. Göçme mekanizması Şekil 3.14(a)'da görüldüğü üzere yükleme yapılan taraftaki kolonun tabanına yakın bir bölgede flanşta başlayan çatlağın kolon gövdesine doğru ilerlemesi şeklinde olmuştur. Sistem genel olarak iyi bir süneklik seviyesine sahiptir ve önemli derecede enerji tüketilmiştir. Kolonlardaki plastik mafsallar yüksek kesme kuvveti altında kolon – kiriş birleşimlerinin alt seviyesinde ve taban guse levhası üzerinde oluşmuştur. Kolonlar test sonunda önemli ölçüde plastik deformasyonlar göstermişlerdir.

Sonlu elemanlar analizinde çevrimsel yüklemeden ayrı olarak sonlu eleman modelinin sol üst düğümlerine 120 mm'ye kadar monotonik bir yükleme uygulanmıştır. Monotonik yükleme altında kolon elemanlarında burkulmalar meydana gelmiştir. Analiz sonunda kolonlarda önemli derecede plastik deformasyonlar gözlenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre sistemin elastik rijitliğinin ve nihai kesme mukavemetinin, Şekil 3.13(a)'da görülebileceği gibi monotonik statik analiz ile yeterli hassasiyetle ölçülebildiği sonucuna varılmıştır. Fakat göçme mekanizması bakımından ele alındığında monotonik yüklemenin deneysel davranıştan farklı bir yol izlediği görülmektedir. Yüklemenin yapıldığı taraftaki kolonda tabanda plastik davranış gözlemlense de kolon – kiriş birleşimi altındaki bölgede bir mafsal oluşumu gözlemlenmemiştir. Ayrıca Şekil 3.14(a)'da görülebileceği gibi deney sonuçlarında rapor edilen kolonların içe doğru deforme olması monotonik sonlu eleman analizi sonucunda gözlemlenmemektedir. Öte yandan çevrimsel analiz sonuçları, SPSW2'nin fiziksel test sonuçlarını başarıyla simüle etmiştir. FE modelinde elastik rijitlik, yük-deplasman davranışı, histerezis döngüsünün sıkışması doğru bir şekilde elde edilmiştir. Deneyde gözlemlenen göçme mekanizması oluşumu, Şekil 3.14(a)'da gösterildiği gibi sonlu elemanlar analizi ile başarılı bir şekilde tahmin edilmektedir. Kolondaki Von Misses maksimum gerilme yığılması, deneysel çalışmada bildirilen çatlak ile tam olarak aynı konumdadır. Kolonlardaki gövde merkezine doğru deforme olma davranışı çevrimsel yükleme sonucunda da elde edilmiştir.

F2 numunesinde sünek bir davranış elde edilmiştir ve model yüksek enerji tüketme kapasitesine sahiptir. Kolon mesnetleri pim bağlantılı ve kiriş-kolon bağlantıları

yarı rijit olarak tasarlandığından, sınır elemanları elastik limitleri aşmadan göçme meydana gelmiştir. Numune, dayanımında önemli bir azalma olmadan %3.7 ötelenme oranına ulaşabilmiştir. Nihai göçme ise kaynak köşelerinden başlayarak ilerleyen çatlaklar sonucunda oluşmuştur. Sistemin başlangıç rijitliğinin yaklaşık %90'ının çelik gövde plakasının katkısı ile olduğu bildirilmiştir.

F2 numunesinin deneyden elde edilen çevrimsel davranışı ve sonlu eleman modeli monotonik ve çevrimsel yükleme sonuçları Şekil 3.13'te sunulmuştur. Şekil 3.13(b)'de verilen sonuçlar önceki bölümlerde detaylıca anlatılan basitleştirilmiş kabuk modelden elde edilen sonuçlardır. Başlangıç rijitliği ve toplam kesme kuvveti kapasitesi deneysel verilerle oldukça iyi bir uyum içindedir. Sadece yük-deplasman zarf eğrisinin lineer kısmından hemen sonra küçük bir farkın oluştuğu gözlemlenmiştir.

Çevrimsel yükleme altındaki sonlu modelinde, deneysel davranış iyi bir şekilde takip edilmiştir ve gövde plakası boyunca oluşan gerilme yığılmalarının rapor edilen göçme modeliyle aynı konumlarda olduğu gözlemlenmiştir. Histereziste meydana gelen sıkışma davranışı kiriş – kolonlarda kullanılan yarı rijit birleşimlerden etkilenmektedir (Narayanan and Roberts 1991). Bu sebepten dolayı basitleştirilmiş kabuk model ile elde edilen yük-deplasman eğrisinde sıkışma davranışı bu açıdan test sonuçlarıyla eşleşmemiştir. Sonlu elemanlar modelinde bağlantı modellemesinin basitliği göz önüne alındığında, nümerik tahmin ve deneysel sonuçlar arasındaki uyum F2 modeli için tatmin edici olarak kabul edilebilir. Bağlantıda daha önce detayları verilen kiriş mafsal modeli kullanıldığında, Şekil 3.13(c)'de gösterildiği gibi F2 numunesinin tepkisi için daha iyi bir sıkışma davranışı elde edilmiştir.

Çevrim tekrarı, histerezis döngü oluşumunu ve yerel burkulma davranışını etkileyen bir diğer önemli faktördür. F2'nin sonlu eleman modeli, Şekil 3.13(d)'de verildiği gibi C1, C2 ve C3 olmak üzere farklı sayıda yükleme döngüsü ile analiz edilmiştir. Model C1 yer değiştirme artışı başına yalnızca bir döngüye sahiptir, C2 modelinin son iki döngüsü iki kez tekrarlanmıştır ve kalan yer değiştirme artımları yalnızca bir döngüye sahiptir. Son olarak, C3 modelinde, F2 numunesinin gerçek deneyinde olduğu gibi ATC-24 (1992) yükleme protokolü izlenmiştir. Çevrim sayısı arttıkça Şekil 3.14(d)'de görüldüğü gibi dayanımdaki azalma daha başarılı bir şekilde

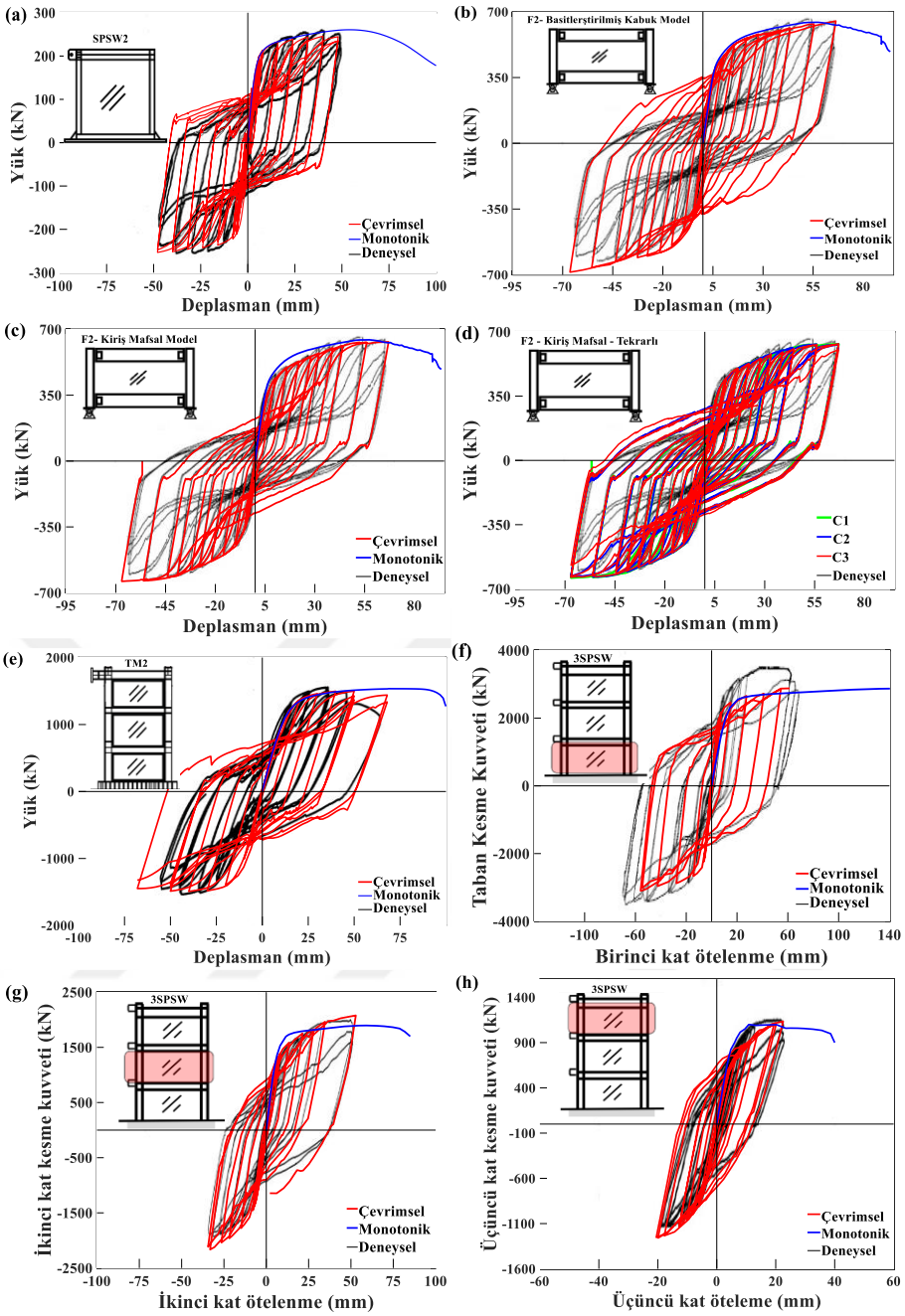
yakalanmıştır. Burkulma davranışı, yükleme protokolünden önemli ölçüde etkilenir. Öte yandan, analizlerin deplasman artışı başına tek döngü ile yapılması, çelik levhalı perde duvarların başlangıç rijitliği ve nihai mukavemeti için güvenilir bir tahmin sağlamaktadır.

TM2 numunesi için hesaplanan yük-deformasyon ilişkileri, test sonuçlarıyla iyi bir uyum sergilemiştir ve bu ilişkiler Şekil 3.14(e)'de verilmiştir. Çevrimsel test sonuçlarının histerezis eğrisi sonlu eleman analizi sonuçları ile karşılaştırıldığında, yapının elastik rijitliği ve kapasitesinin iyi tahmin edildiği görülmektedir. TM2 modelinde ilk aşamada verilen eksenel yük altında birkaç küçük düzlem dışı deformasyon gözlemlenmiştir. Daha sonra akma yüküne ulaşıncaya kadar numunede herhangi bir deformasyon gözlemlenmemiştir. Bu seviyeden sonra düzlem dışı deformasyonlar ve gözle görülür çekme alanları oluşmuştur. Çerçeve henüz elastik bölgedeyken plaka plastik aşamaya geçmiştir. TM2'de ilk kat çelik gövde plakası diğer katlara göre daha kalındır ve ayrıca ikinci katta kolon kesit değişikliği vardır. Yükleme $6\delta_y$ seviyesine ulaştığında oluşan çekme alanları etkisi ile oluşan yapının gözlenen göçme modu, ikinci kat kolonlarında oluşan lokal flanş burkulması ve orta gövde plakasında oluşan yırtılmalar şeklindedir. Numune sünekliğinin gayet iyi olduğu testte yüklemeye daha fazla devam edilebileceği halde yükleme düzeneğinin limitleri yüzünden testin sonlandırdığı bildirilmiştir.

Monotonik yükleme altındaki sonlu eleman analizi sonucunda, yükleme tarafı kolonunun tepesinde flanşlarda burkulmalar meydana gelmiştir. Kolonun global deforme olmuş şekli Şekil 3.14(c)'de gösterilmiştir. Ekonomik bir çözüm elde etmek için işlem gücü ve depolama alanı limitleri göz önüne alınarak yükleme protokolünde verilen deplasmanlarda çevrimler birer defa yapılmış, sadece son çevrim, çevrim sayısı etkisini gözlemleyebilmek için iki defa tekrar edilmiştir. Tekrarlı çevrim durumunda Şekil 3.13(e)'de görülebileceği gibi kesme kuvveti kapasitesinde %7 azalma gözlemlenmiştir. Gerçek testte gözlemlenen sıkışmış histerezis davranışı, sonlu elemanlar analizinin çevrimsel davranışında da yakalanmıştır. Beklenilebileceği gibi TM2 modelinin göçmesi, monotonik yükleme durumuna kıyasla çevrimsel yüklemede daha düşük bir yer değiştirmede meydana gelmiştir. Ayrıca, iki farklı yükleme senaryosunda çelik levhalı perde duvarın farklı konumlarında göçme mekanizması gelişmiştir. Monotonik yüklemede ikinci kat kolonunun tepesinde plastik mafsal gelişirken, Şekil 3.14(c)'de

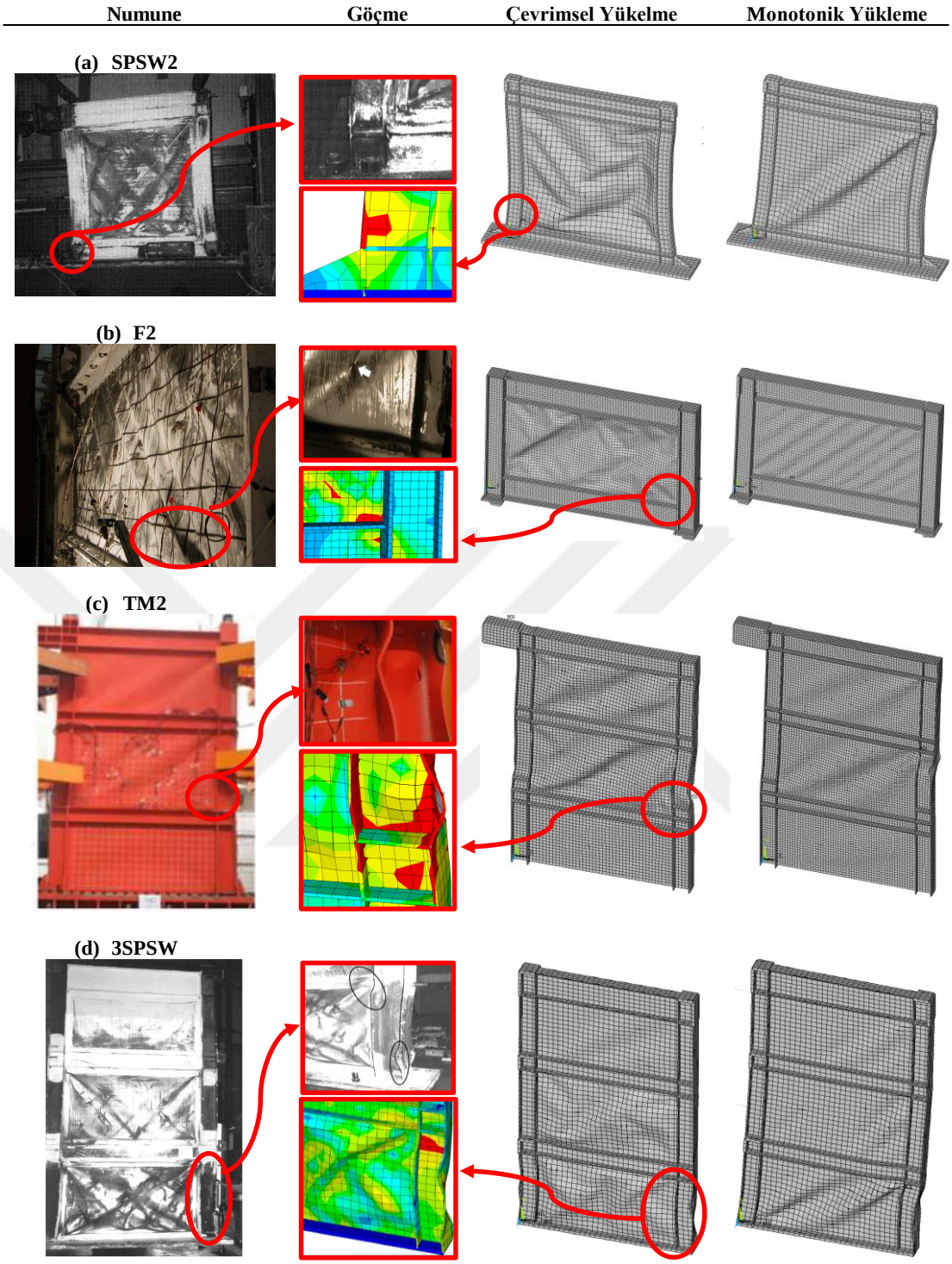
gösterildiği gibi çevrimsel yükleme altında ikinci kat kolonunun altında göçme meydana gelmiştir. Çevrimsel yüklemeye maruz kalan sonlu eleman modeli, deneysel davranışa benzer bir göçme moduna sahiptir. İkinci kat kolon tabanındaki flanş burkulması ve orta katın plaka göçmesi, sonlu eleman analizi ile yakalanmıştır.

3SPSW için, çevrimsel ve monotonik yükleme analiz sonuçları, her bir kat için ayrı ayrı olacak şekilde Şekil 3.13(f), Şekil 3.13(g) ve Şekil 3.13(h)'de gösterilmektedir. Monotonik yükleme analizinde elastik rijitlik oldukça başarılı bir şekilde yakalanmıştır, ancak ilk katta numunenin yük kapasitesi olduğundan az hesaplanmıştır. Çevrimsel analiz sonuçları genel olarak test sonuçlarıyla iyi bir uyum içindedir. Deneyde birinci kat kolon flanşında lokal burkulma gözlenmiştir. Çevrimsel yükleme durumunda deney sonucunda oluşan lokal flanş burkulmaları sonlu eleman analizi ile başarılı bir şekilde tespit edilmiştir. Şekil 3.14'(d)'de görüldüğü gibi, monotonik yükleme koşullarında birinci kat kolon tabanındaki yerel flanş burkulması gözlenmemektedir. Çevrimsel yükleme durumunda monotonik yüklemede olduğu gibi sistem kapasitesi deneyde olduğundan daha az bir değer alacak şekilde hesaplanmıştır. 3SPSW numunesi detayları daha önce verildiği gibi önceki bir deneyden alınarak ikinci defa kullanılan bir modeldi. Bu deneysel çalışmayı gerçekleştiren Behbahanifard et al. (2003) deneyde gözlemlenen akmadan sonraki dayanım artışının, önceki testler sırasında malzemelerin başlangıç rijitliklerindeki olası artıştan kaynaklanabileceğini belirtmişlerdir. Sonlu elemanlar analizi için kullanılan malzeme özellikleri doğrudan Driver et al. (1997b) çalışmasından alınarak bu ön yükleme etkileri dikkate alınmamıştır. 3SPSW numunesi göz önüne alındığında, ilk iki katlı çelik gövde plakaları tamamen akmıştır. Daha sonra sol taraf birinci kat kolonunda global bir burkulma ve birinci kat sağ kolonda global ve yerel bir burkulma gözlemlenmiştir. Şekil 3.14(d), 3SPSW modelinin göçme durumundaki Von Misses gerinim durumunu göstermektedir. Şekil 3.13(g) ve Şekil 3.13(h), deney ve sonlu eleman analizinin farklı kat ötelenmesi verileri ile karşılaştırmasını göstermektedir. Sonlu eleman analiz sonuçları deneysel verilerle karşılaştırıldığında, özellikle ikinci ve üçüncü katlar için histerezis davranışlarında iyi bir uyum gözlenmiştir. Çelik levhalı perde duvarların doğasından kaynaklanan önce alt katların hasar alması durumu göz önüne alındığında önceki 4 katlı deneyde ciddi hasar gören 1. kattan sonra bu deneyin ilk katı olan katın yüklemelerden daha fazla etkilenmiş olması beklenir.



Şekil 3.13. Deneysel yük – deplasman eğrilerinin sonlu elemanı analizi sonuçları ile karşılaştırılması (a)SPSW2, (b)F2 basitleştirilmiş kabul model, (c) F2 kiriş – mafsal modeli (d)F2 modeli kiriş – mafsal modelinin C1, C2 ve C3 çevrim tekrarlı modelleri, (e)TM2, (f)3SPSW modeli birinci kat, (g) 3SPSW modeli ikinci kat, (h) 3SPSW modeli üçüncü kat.

Bütün bu sonuçlar göz önüne alındığında ikinci ve üçüncü katlarda deneysel veriler ve sonlu elemanlar analizi sonuçlarında ihmal edilebilir farkların olmasına karşın asıl farkın birinci katta meydana gelmesi Behbahanifard et al. (2003) tarafından yapılan açıklama ile uyumludur.



Şekil 3.14. Deneysel göçme mekanizmalarının çevrimsel ve monotonik yükleme altında incelenmesi (a)SPSW2, (b)F2), (c)TM2, (d)3SPSW.

Genel sonuç olarak sonlu elemanlar analizi yönteminin çelik levhalı perde duvarlar davranışını tahmin etmek için kullanılabilecek bir araç olduğu görülmüştür. Çevrimsel davranış, çevrim sayısına dikkat edilmesi veya bağlantıları detaylı modellenmesi gibi işlemler sonucunda gerçek deney ile oldukça yakın sonuçlar

vermektedir. Sistem dayanımını ve başlangıç rijitliğini elde etmek için monotonik analiz yapılması yeterlidir. Çizelge 3.1'de bütün modellerin deneysel başlangıç rijitlikleri ve maksimum taban kesme kuvveti değerleri hem monotonik yükleme altında hem de çevrimsel yükleme altında sonlu eleman analizi ile elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Eğer sistemin göçme mekanizması hakkında veya nihai deplasman kapasitesini incelenmek isteniyorsa yükleme protokolüne uygun veya oldukça yakın prosedür izleyen çevrimsel analizlere gerek duyulmaktadır. Her modelde monotonik yükleme analizleri deneyde olduğundan daha fazla deplasman kapasitesi hesaplamıştır ve bazı modellerde deneyden farklı göçme mekanizmaları gelişmiştir.

Çizelge 3.1. Deneysel çalışmalardan ve sonlu eleman analizinden elde edilen başlangıç rijitliği ve maksimum dayanım değerleri.

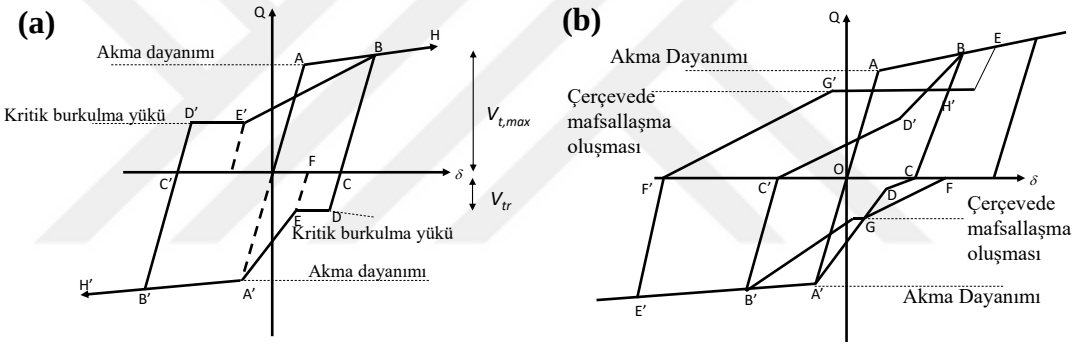
	Deney	Sonlu eleman		Deney	Sonlu eleman	
Numune	K_i (kN/mm)	K_i (kN/mm) Çevrimsel	K_i (kN/mm) Monotonik	Maksimum Dayanım (kN)	Maksimum Dayanım (kN) Çevrimsel	Maksimum Dayanım (kN) Monotonik
SPSW2	38	34.9	42	260	257.6	261
F2	106	92	93.5	645	634	644
TM2	92.5	103	106	1546	1498	1535
3SPSW	320	375	382	3313	2692	2870

3.3. Numune ölçeğinin davranış üzerindeki etkisi

Bu bölümde modelleme bölümünden elde edilen gözlemler ışığında davranışa etkisi olduğu görülen numune ölçeğinin detaylı incelemesi yer almaktadır.

Şekil 3.13(a)'da SPSW2'nin deneysel ve nümerik çevrimsel yük-deplasman eğrileri, boşaltmadan yeniden yüklemeye geçiş aşamasında farklı davranışlar ortaya koymaktadır. Görüldüğü gibi, model hedef yer değiştirmeye kadar ötelendikten ve model üzerindeki yük boşaltıldıktan sonra, kuvvet ters yönde artmaya başladığında, analiz sonuçları çelik plaka perde duvarın karşı yüke belirli bir değere kadar yaklaşık olarak boşaltma rijitliğine eşit bir rijitlik ile karşı koyduğunu göstermektedir. Bu direnç, deneysel davranıştan farklı bir davranıştır. SPSW2 üzerinde farklı araştırmacılar tarafından yapılan sonlu elemanlar analizi de burada sunulana benzer davranışlar göstermektedir (Zirakian ve Zhang 2015). Bu davranışın mekanizması aşağıdaki bölümde incelenmiştir.

Bazı araştırmacılar, 2. Bölümde anlatıldığı üzere çelik plaka perde duvarların davranışı için çevrimsel yük-deformasyon kuralları önermişlerdir (Mimura and Akiyama 1977; Sabouri-Ghomi and Roberts 1992; Tromposch and Kulak 1987). Tipik histerezis modellerinden ikisi Şekil 3.15'te gösterilmektedir. Mimura and Akiyama (1977), zıt (negatif) yönde yükleme uygulandığında, çelik levhanın elastik kayma burkulma kapasitesine ulaşılana kadar yüke elastik olarak direndiğini belirtmişlerdir. Kapasiteye ulaşıldıktan sonra diğer diyagonalde çekme alanı gelişmeye başlar. Şekil 3.15(a)'da gösterildiği gibi, maksimum kesme kuvveti $V_{t,max}$ ve yük tersine çevrildikten sonraki çelik levha direnci V_{tr} olarak gösterilmektedir. Ancak, bu modelden farklı olarak, Tromposch and Kulak'a (1987) göre çelik plakanın çekme alanı davranışı, Şekil 3.15(b)'de gösterildiği gibi, boşaltma aşamasında kuvvet sıfır olduğunda başlar. Bahsedilen noktalar Şekil 3.15(a) ve Şekil 3.15(b)'de sırasıyla D ve C olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.15. Çelik levhalı perde duvarlar için önerilen histerezis modelleri (a) Mimura and Akiyama (1977) ve (b) Tromposch and Kulak (1987).

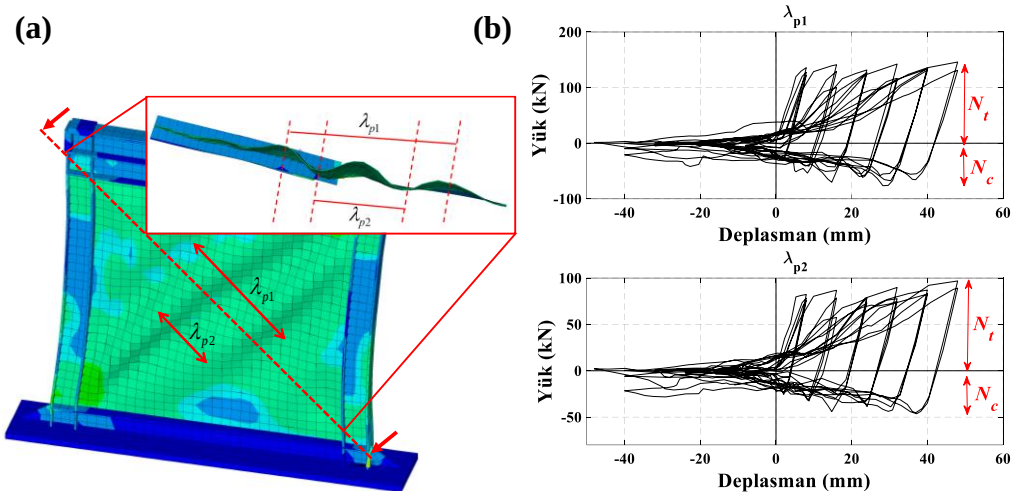
Bu histerezis modellerin mekanizmaları detaylı olarak Bölüm 2'de açıklanmıştır. Bu açıklamalar ışığında, SPSW2 modelinin sonlu eleman analizi sonucu elde edilen histerezis modeli Şekil 3.15(a)'da bulunan modele uygundur. Şekil 3.13(e)'de gösterilen TM2 modelinin sonlu eleman sonuçları göz önüne alındığında ise histerezis eğrisinin rijitliği, boşaltma aşaması sırasında anında sıfır yük (C noktasında) civarında değişir. SPSW2 numunesinin aksine, TM2 numunesi Şekil 3.15(b)'de çizilen histerezis modeline uygundur. Her iki sistem de moment taşıyıcı birleşimlere sahip çerçeveleridir ve benzer noktalardan yüklenir. İki sistem arasında iki ana fark olduğuna dikkat edilmelidir:

- Test numunelerinin ölçeği; SPSW2 küçük ölçekli bir test iken, TM2 büyük ölçekli bir test numunesidir.

- Kolon esneklik parametresi; SPSW2 modelinde yüksek TM2 modelinde ise düşüktür.

SPSW2 ve TM2 numunelerinin kolon esneklik parametresi sırasıyla 3.35 ve 1.66'dır. bu değerlere göre, SPSW2'nin deneysel modeli, CAN/CSA S16-01 (2001) ve AISC (2016) yönetmelikleri uyarınca gerekli kolon eğilme rijitliği limitlerini karşılamamaktadır. Dolayısıyla, SPSW2 modelinde çelik gövde plakasının sistem davranışı üzerinde TM2 modeline göre daha baskın olduğu sonucu çıkarılabilir. Bu duruma ölçek etkisinin eklenmesi ile plaka davranışında basınca karşı direnç oluşup oluşmadığı kontrol edilmiştir.

SPSW2 modelinde B noktasına gelindiğinde çekme alanı mekanizması çalışmaktadır. Şekil 3.16(a)'da gösterildiği gibi gövde plakası sınır elemanları arasında çekme alanları oluşan, dalgalı bir form halini almıştır. Zıt yönde yükleme başladığında bu dalgalı plaka kritik burkulma yüküne ulaşıncaya kadar bir basınç destek bölgesi etkisi gösterir. Şekil 3.16(a)'da gösterildiği gibi, SPSW2 modelinde çelik levhanın ortasında uzunlukları λ_{p1} ve λ_{p2} olan ve gerilme alanı köşegenine dik olan iki kesit seçilmiştir. Bu gerilme alanı köşegeni boyunca kesite dik olan eksenel yükün değişimi çevrimsel yükleme altında Şekil 3.16(b)'de çizilmiştir. Maksimum gerilme kuvveti N_t'den başlayarak, basınç altında kritik burkulma yüküne (N_c) ulaşılana kadar olan yerde rijitliğin yük boşaltmaya başlanılan andaki rijitliğine paralel olduğu görülebilir. Basınç altındaki diyagonal çekme-basınç destek bölgesi negatif yöndeki yüke direnç mekanizması geliştirir. Şekil 3.16(a)'da tanımlanan ve Şekil 3.16(a)'da gözlemlenen elastik burkulma kapasitesine (V_{tr}) ulaşılana kadar gövde plakası ters yöndeki yüke elastik olarak direnç gösterir.



Şekil 3.16. (a) Çekme alanına dik şekilde tanımlanan λ_{p1} ve λ_{p2} uzunlukları ve (b) seçilen kesitlerde oluşan eksenel yük değişimi.

Diyagonal çekme-basınç destek bölgesinin basınç dayanımının perde duvarın toplam elastik kesme burkulma kapasitesine (V_{tr}) katkısı, sınır çerçeve elemanlarının dayanımına ve rijitliğine olduğu gibi çekme-basınç destek bölgesinin narinliğine de bağlıdır. Bu destek bölgesinin narinliği ise numune ölçeği ile doğrudan ilişkilidir. Plaka-çerçeve etkileşiminin basınç direnci kuvveti üzerindeki etkisini araştırmak için, deneysel SPSW2 numunesine dayalı olarak bir dizi sonlu eleman modeli oluşturulmuştur.

Modeller, çelik plaka perde duvar davranışı üzerinde etkili olan üç parametreye göre oluşturulmuştur. Bu seçilen parametreler şu şekilde sıralanmaktadır:

- Ölçek (S),
- Plaka kalınlıkları (t_w) ve
- Kolon esneklik parametresi (ω_i).

Narinlik etkisini irdelemek için plaka kalınlığı olarak 1.5 ve 3 mm seçilmiştir. Bu durum 4 farklı ölçekte ve 550 ile 1650 arasında narinlik (L_p/t_w) değerlerine sahip modellerin elde edilmesini sağlamıştır. Göreceli olarak güçlü kolonlar (SC), 2.5'ten daha küçük bir kolon esneklik parametresine sahiptir. Orta rijitliğe sahip kolon kesitleri (MC) ve zayıf kolon kesitleri (WC) sırasıyla $2.5<\omega_i<3$ ve $3<\omega_i$ kolon esneklik parametrelerine sahiptir. Ölçek olarak SPSW2 numunesin ölçeği üzerinden 1, 2, 2.5 ve 3 ölçekli modeller oluşturulmuştur. Kolon ve kiriş kesitleri, plaka kalınlığı, yükseklik ve genişlik açısından

S1-t_w1.5-WC modeli SPSW2 numunesi ile aynıdır. S1-t_w1.5-SC modeli ise SPSW2 modeli ile genel olarak aynı fakat yönetmelik limitlerine (ω_i <2.5) göre seçilen farklı kolon ve kiriş kesitlerine sahiptir. Plaka kalınlığı, ölçek ve kolon esneklik parametresi dikkate alınarak Çizelge 3.2'de verilen toplam 14 adet model oluşturulmuştur.

Şekil 3.17, sonlu elemanlar analizi sonucunda oluşan, modellerin normalize edilmiş çevrimsel yük-deplasman eğrilerini göstermektedir. Şekil 3.17(a) ve Şekil 3.17(b)'den açıkça görülebildiği kolon esneklik parametresinin çelik levhalı perde duvarların kesme kuvveti dağılımına etkisi vardır. Esneklik parametresi arttığında, plaka kesme kuvveti duvar sisteminin genel davranışı üzerinde daha baskın olur. Bu durumda toplam kesme kuvvetine büyük oranda karşı koyan eleman çelik gövde levhasıdır. Çelik plaka perde duvar sistemi daha rijit kolonlara sahipse (ω_i <2.5), toplam kesme kuvveti dağılımında çerçeve katkısı artar ve gövde plakası daha esnek kolonlu sistemlere oranla daha düşük bir kuvvete karşı koyar. Modeller arasında karşılaştırma yapabilmek için yük – deplasman eğrilerinde kuvvetler maksimum kuvvete bölünerek normalize edilmiştir. Yani her eğri düşeyde maksimum 1 ve minimum -1 değerine sahiptir.

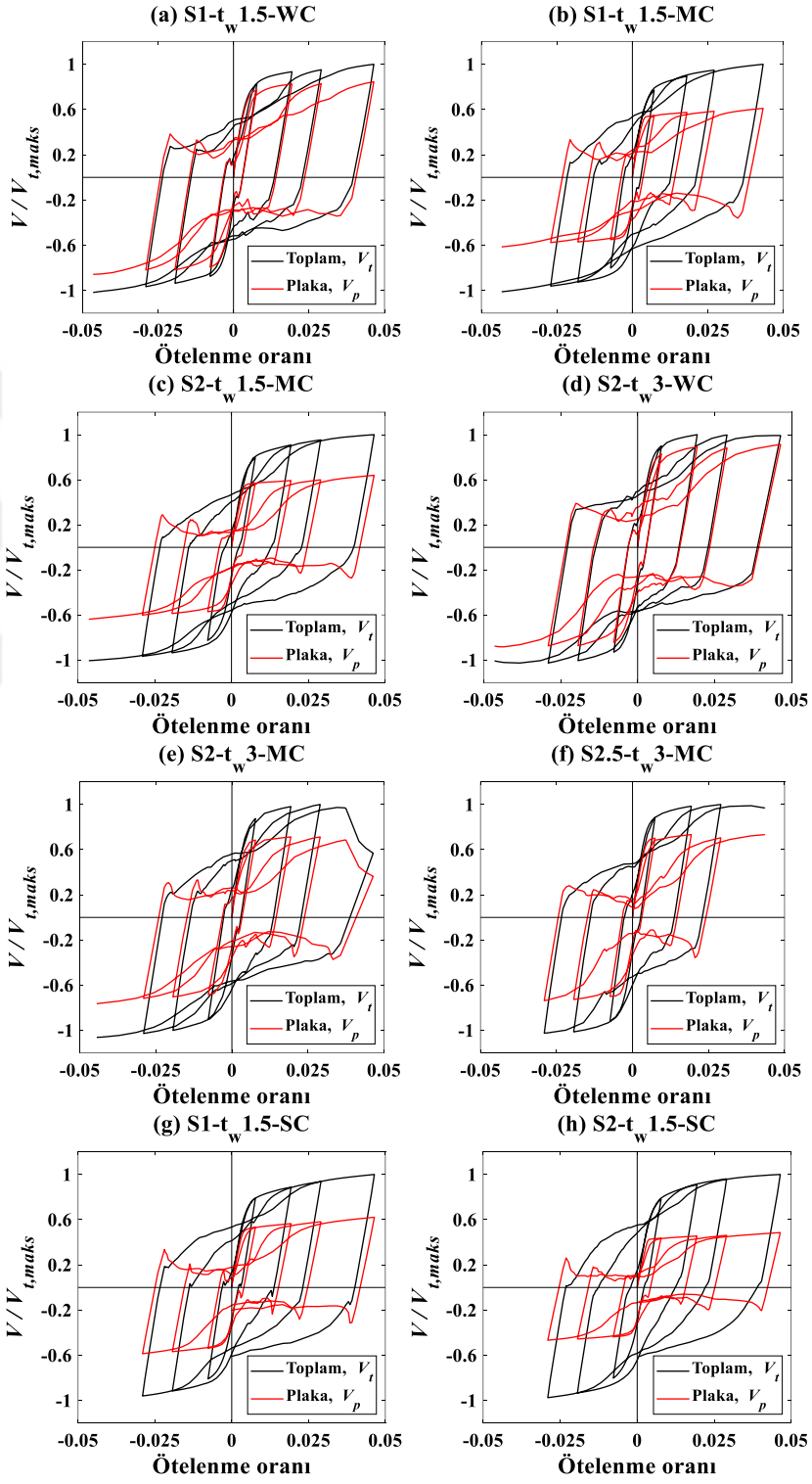
Çizelge 3.2. Parametrik çalışma için oluşturulan sonlu eleman modellerinin geometrik özellikleri.

Model	t_w (mm)	L_p (mm)	H (mm)	L_p/t_w	ω_i
S1-t_w1.5-WC	1.5	825	825	550	3.35
S1-t_w1.5-MC	1.5	825	825	550	2.66
S2-t_w1.5-MC	1.5	1650	1650	1100	2.63
S2-t_w3-WC	3.0	1650	1650	550	3.13
S2-t_w3-MC	3.0	1650	1650	550	2.64
S2.5-t_w3-MC	3.0	2100	2100	700	2.72
S3-t_w1.5-WC	3.0	2475	2475	825	3.45
S1-t_w1.5-SC	1.5	825	825	550	2.35
S2-t_w1.5-SC	1.5	1650	1650	1100	2.22
S2-t_w3-SC	3.0	1650	1650	550	2.33
S2.5-t_w3-SC	3.0	2100	2100	700	2.28
S2.5-t_w1.5-SC	1.5	2100	2100	1400	2.49
S3-t_w1.5-SC	1.5	2475	2475	1650	2.42
S3-t_w3-SC	3.0	2475	2475	825	2.06

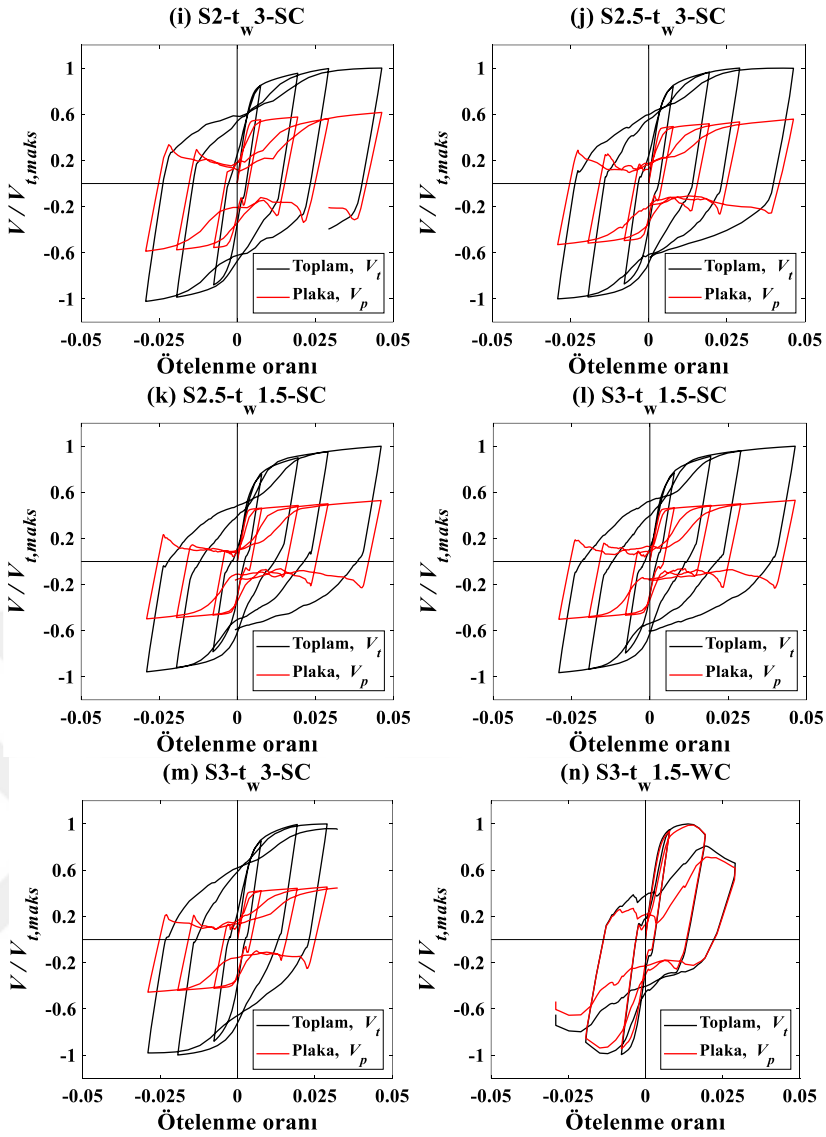
WC: Zayıf kolon, MC: Orta rijitliğe sahip kolon, SC: Güçlü kolon, t_w: Plaka kalınlığı, L_p: Plaka genişliği, h_p: Plaka yüksekliği, ω_i: Kolon esneklik parametresi

Yukarıda bahsedilen Şekil 3.17(a) ve (b)'de S1-tw1.5-WC ve S1-tw1.5-MC modelleri karşılaştırıldığında, iki model arasındaki fark sadece kolon esneklik

parametresidir. S1-tw1.5-MC modelinin sınır elemanları, S1-tw1.5-WC modeline göre daha büyük bir atalet momentine sahiptir. Diğer geometrik ve malzeme özellikleri aynıdır.



Şekil 3.17. Sonlu eleman analizlerinden elde edilen normalize edilmiş kuvvet-ötelenme oranı eğrileri.

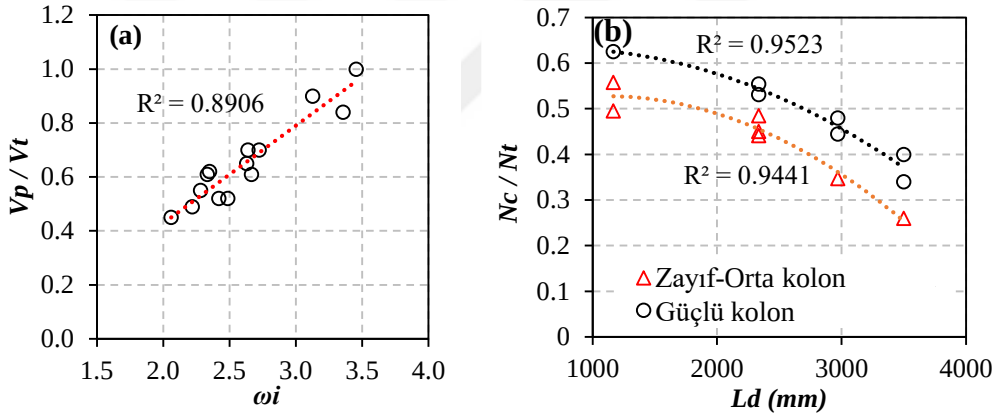


Şekil 3.17.(devam) Sonlu eleman analizlerinden elde edilen normalize edilmiş kuvvet-ötelenme oranı eğrileri.

S1-tw1.5-WC modeli yük – V/V_{maks} eğrisi incelendiğinde, son çevrimde plaka kesme yükünün toplam kesme yüküne oranı (V_p/V_t) 0.84'tür. S1-tw1.5-MC modelinde ise V_p/V_t oranı 0,61'e düşmektedir. Benzer davranış Şekil 3.17(e) ve Şekil 3.17(e)'de normalize edilmiş kuvvet ve ötelenme oranı eğrileri verilen S2-tw3-WC ve S2-tw3-MC modelleri için de gözlenmektedir. Bu modellerde V_p/V_t oranları sırasıyla 0,9 ve 0,7 şeklindedir. Kolonlar yönetmelik limitlerini karşılamadığında gövde plakaları toplam karşı koyulan kuvvetin %60'ı ve daha fazlası oranında kuvvete karşı koyar. Şekil 3.17(c-g-h-k-l-m)'de bulunan eğrilerdeki davranışlardan da gözlemlenebileceği gibi çekme – basınç destek bölgesinin narinliği arttıkça basınç direncinin gelişmesi engellendiği için V_{tr} daha küçük değerler almaktadır. V_p/V_t oranının arttığı modellerde V_{tr} daha belirgin

hale gelir. Şekil 3.17(a), kolon esneklik parametresi ile V_p/V_t oranı arasındaki ilişkiyi göstermektedir.

Plaka davranışları incelendiğinde Şekil 3.16(b)'de verilen N_c/N_t oranının çelik gövde levhası diyagonal uzunluğu L_d'ye ve kolon esneklik parametresine bağlı olduğu görülmüştür. Şekil 3.18(b)'de verilen ilişkiye göre model ölçeği ile N_c/N_t ters orantılıdır. Küçük ölçekli modellerde çelik gövde plakasının çekme alanları, daha çok basınç dayanımına sahip olan dar dalga boyuna (λ) sahip şekilde oluşmaktadır. Daha büyük ölçekli plakalarda ise daha geniş çekme alanları oluştuğu için dalgalı plaka nispeten daha az basınç dayanımına sahip olmaktadırlar. Sınır elemanlarının daha güçlü olması durumunda ise N_c/N_t oranı artmaktadır. Bunun sebebi ise plakanın sınır eleman boyunca daha homojen ve düzgün bir şekilde çekme alanları oluşturmasıdır. Eğer plaka çekme alanları oluşturulmadan önce sınır elemanlarda stabilite problemleri başlamış ise daha az sayıda çekme alanı oluşur.



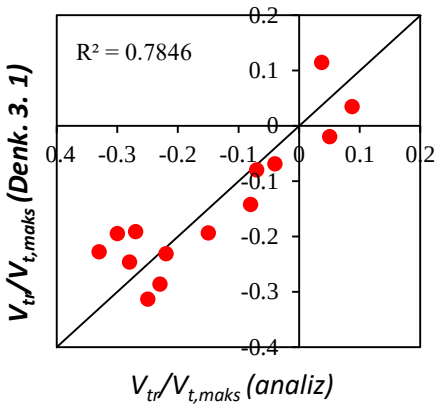
Şekil 3.18. (a) Kolon esneklik parametresi ve V_p/V_t ilişkisi, (b) N_c/N_t ile L_d ilişkisi.

Yukarıdaki tartışmada ortaya konduğu gibi, kolon esneklik parametresi, plaka diyagonalinin uzunluğu ve plaka kalınlığı V_{tr} üzerinde önemli role sahiptirler. Kolon esneklik parametresi küçük olduğunda, $V_{tr}/V_{t,max}$ oranı azalır. Plakanın köşegen uzunluğunun plaka kalınlığına oranı L_d/t_w daha büyükse, kesme kuvveti, V_{tr}, daha küçük bir değer alır. Doğrusal regresyon yöntemi kullanılarak etkin parametrelerin $V_{tr}/V_{t,max}$ oranı ile ilişkisi aşağıdaki iki denklemle ifade edilmiştir;

$$\frac{V_{tr}}{V_{t,\max}} = 2\times10^{-4}\frac{L_d}{t_w} - 0.119\omega_i - 0.072 \tag{3.1}$$

$$\frac{V_{tr}}{V_{t,\max}} = 0.27 - 0.148t_w - 0.127\omega_i + 0.104L_d \tag{3.2}$$

Her iki denklem de $V_{tr}/V_{t,max}$ oranının değerini yeterli bir doğrulukla tahmin eder. Denklem 3.1 ve 3.2 için R-kare değerleri sırasıyla 0.78 ve 0.84'tür. Denklem 3.1 ile hesaplanan $V_{tr}/V_{t,max}$ değerlerinin sonlu elemanlar analizinden hesaplanan $V_{tr}/V_{t,max}$ değerleri ile karşılaştırılması ve korelasyonu Şekil 3.19'da gösterilmektedir.



Şekil 3.19. Denklem 3.1 ile hesaplanan ve analizden gelen $V_{tr}/V_{t,max}$ ilişkisi.

Burada verilen denklem tek katlı ve moment taşıyabilen bir çerçeveye sahip model için geçerlidir. Fakat kat sayısı, gövde plakası en – boy oranı, eksenel yük, yükleme prosedürü, kolon – kiriş birleşim türü gibi değişkenler dahil edildiğinde bu farklı parametrelerin etkisini içermediği için tatmin edici sonuç vermeyebilir.

4. ÇLPD TASARIM DENKLEM LİMİTLERİ ÜZERİNE MONOTONİK YÜKLEME ALTINDA İNCELEME

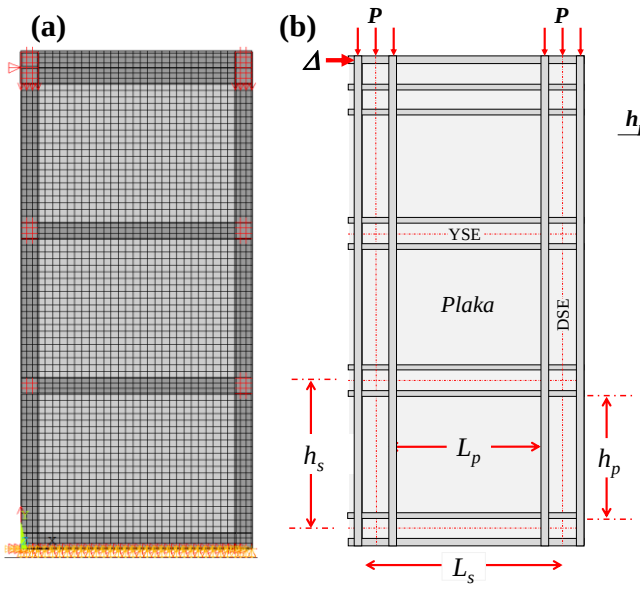
Modelleme aşamaları hakkında araştırma tamamlandıktan sonra çelik levhalı perde duvarların monotonik yükleme altındaki davranışlarının her bir tasarım parametresi açısından detaylıca incelenmiştir. Bunun için bu bölümde çelik levhalı perde duvarlar sonlu elemanlar analizi yöntemi kullanılmış ve monotonik yüklemeye maruz bırakılarak yük altındaki davranışları, bu davranışları şekillendiren parametreler ve ortaya çıkan göçme mekanizması aşamaları incelenmiştir.

4.1. Parametrik Çalışma

Çelik levhalı perde duvar davranışını monotonik yük altında incelemek için belirlenen değişkenler gövde plakası kalınlığı, kolon esneklik parametresi, gövde plakası en-boy oranı, yatay ve düşey sınır elemanları atalet momenti oranı ve düşey sınır elemanı (DSE) üzerindeki eksenel yük oranı olarak belirlenmiştir. Çalışmanın parametrelerini gösteren ve özetleyen tipik bir üç katlı çelik levhalı perde duvar sonlu eleman modeli ve kullanılan parametrelerin şematik gösterimi Şekil 4.1(a) ve (b)'de verilmiştir. Modelleme yapılırken üst kirişin plakadan gelen iç kuvvetleri daha iyi karşılayabilmesi amacıyla kiriş üst flanşı ile aynı düğüm noktalarını paylaşan ikinci bir kiriş kesiti oluşturulmuştur.

Çelik panel yüksekliği (h_p) tüm modellerde 3000 mm olarak sabit bir değere sahiptir. Seçilen plaka genişlikleri (L_p) ise 2000, 3000, 4000, 5000 ve 6000 mm'dir. Bu sayede, gövde levhası genişliğinin yüksekliğine oranı olarak tanımlanan plaka en – boy oranı (L_p/h_p) 0.67 ile 2 arasında değişen değerler alacak şekilde tasarım yapılmıştır.

Panel kalınlıkları (t_w) 3, 4, 5 ve 6 mm olarak seçilmiştir. Bu seçilen plaka kalınlığı ve plaka uzunlukları sayesinde geniş bir panel narinliği aralığını kapsayan model grubu elde edilmiştir ($300<L_p/t_w<2000$). AISC (2016) yönetmeliğine göre bu oran için herhangi bir sınır belirtilmemiş olsa da, geçmişteki araştırmalar L_p/t_w oranı 300 ile 800 arasında değişen duvarlara odaklanmıştır.



h_p (mm)	L_p (mm)	t_w (mm)	I_c / I_b	P / P_{cr}
3000	2000	2	1	0.1
	3000	3	2	0.2
	4000	4	3	0.3
	5000	5	4	
	6000	6	5	

Şekil 4.1. (a) Monotonik çevrimsel çalışmada kullanılan temsili bir ÇLPD sonlu eleman modeli ve (b) parametrelerin şematik olarak çizimi.

Bütün yatay ve düşey sınır elemanları geniş başlıklı I kesitler arasından seçilmiştir. Yatay sınır elemanlarında HE kesitler, düşey sınır elemanlarında ise HD kesitler kullanılmıştır. Sonlu eleman modellerinde malzeme özelliği olarak çelik gövde plakası için S235 (F_y=235 MPa, F_u=360 MPa), çerçeve elemanları için ise S355 (F_y=355 MPa, F_u=510 MPa) sınıfı çelik tanımlanmıştır.

Düşey sınır elemanları AISC (2016) yönetmeliğinde verilen kesitin alabileceği minimum atalet momenti değeri dikkate alınarak belirlenmiş, yönetmelik sınırları dışında kalan perde duvarların davranışını da incelemek için bazı modellerde bu limit aşılmıştır. Önce h_p, L_p ve t_w belirlendikten sonra, gerekli minimum kolon atalet momenti $I_{c,min}$ değeri Denklem 2.5 kullanılarak hesaplanmıştır. Ardından, gerekli minimum $I_{c,min}$ değeri bir K katsayısı ile çarpılarak (K= 2, 4, 6, 8, 10, 15, 30) yeni I_c değerleri elde edilmiştir. Hesaplanan bu kesit atalet momentleri kullanılarak ilgili tablolardan (HD ve HE olmak üzere) kiriş ve kolonlar için kesitler seçilmiştir. Bu seçim yapılırken her I_c değeri için başka bir değerlendirme yapılmadan o değer üzerinde kalan en yakın atalet momentine sahip kesit sınır eleman olarak seçilmiştir.

Yönetmelikteki düşey sınır eleman rijitliği koşulunu sağlamayan modellerin davranışını inceleyebilmek için kolon esneklik parametresi limiti olan 2.5 değeri esnetilmiştir ve yukarıdaki prosedür izlenerek kesitler seçilmiştir. Sonuç olarak

parametrik çalışmada kullanılan kolon esneklik parametresi (ω_i) 1.18 ile 2.7 arasında değişen geniş bir aralığa sahip değerler almıştır. Wang et al. (2015) yaptığı çalışmada 2.7 üzerinde kolon esneklik parametresine sahip modellerin çok zayıf performans gösterdiklerini bildirmiştir. Birçok değişken parametrenin olması ve bu parametre değişkenliğinin yüksek sayıda analiz sayısı gerektirmesi sonucunda kolon esneklik parametresi 2.7 üzerinde olan modeller oluşturulmamıştır.

Çelik levhalı perde duvarların sismik tasarım ilkesine göre sınır elemanları tamamen akmış bir gövde plakasının kuvvetleri altında elastik bölgede kalmalıdır. Bu aşamadan sonra sadece yatay sınır elemanlarının uçlarındaki plastik mafsalların oluşması istenir. Bu bölümde yatay sınır elemanı rijitliği I_c/I_b oranına göre seçilmiştir (I_c=DSE'nin atalet momenti, I_b=YSE'nin atalet momenti). Parametrik havuz oluşturulurken ele alınan kolon-kiriş atalet momenti oranları $1 \leq I_c/I_b \leq 5$ aralığındadır. Kolonlar ve kirişler için kesitler belirlendikten sonra, eksenel yükün kesme kapasitesi üzerindeki etkisini araştırmak için, yatay sınır elemanları kritik eksenel yükün P_{cr} 0.1, 0.2 ve 0.3 katı eksenel yük seviyelerine tabi tutulur; burada P_{cr}, yatay sınır elemanı malzemesinin akma dayanımı (F_y) ve kesit alanının (A_g) çarpımına eşittir.

Bütün bu tasarım parametrelerindeki çeşitlilik sonucunda 292 adet üç katlı ve tek açıklıklı sonlu eleman modeli oluşturulmuştur. Bu modeller monotonik yüklemeye maruz bırakılarak davranışları detaylıca incelenmiştir. Özellikle bu modellerin geliştirdiği göçme mekanizmaları üzerinden bir değerlendirme yapılmış olup parametrelerin farklı varyasyonlarda seçimi sonucu gelişebilecek olan hasar durumları gruplandırılmıştır. Bütün modellerin geometrik özellikleri, kolon ve kirişler için seçilen kesitler ve tasarım parametreleri detayları EK 3'te sunulmuştur.

Tasarım sürecinden sonra kiriş flanş genişliği-kiriş yüksekliği oranı (b_f/h_b) ve kiriş flanş genişliği- toplam flanş kalınlık oranı ($b_f/2t_f$) da değerlendirmede dikkate alınarak her model için analiz sonuçlarına etkisinin olup olmadığı incelenmiştir. $b_f/2t_f$ oranı, seçilen kesitin standartlarda belirtilen sınırlara göre kompakt kesit, kompakt olmayan kesit veya narin kesit olup olmadığını belirlemek için kullanılır. Bu parametrenin değeri ne kadar düşük olursa, kesit o kadar kompakt (sıkı) olur. Bu iki parametre genel olarak I_c/I_b oranının kiriş davranışını açıklamada yeterli olmadığı durumlarda meydana gelen

hasar veya hasarsızlık durumlarını açıklamak için kullanılmak üzere incelemeye alınmıştır.

4.2. Monotonik Yükleme Altında Yapıların Parametrelere Bağlı Davranışı

Bu bölümde analizler için çok sayıda sonlu eleman modeli olduğundan ve doğrusal olmayan çevrimsel yükleme analizlerinde aşırı çözüm süresi ve yakınsama zorlukları ve aşağıda detaylı olarak açıklanan diğer sebepler göz önüne alınarak tüm modeller monotonik artan yanal yük altında analiz edilmiştir.

Geleneksel olarak yapıların ötelenme limitleri yapının deneysel çevrimsel yükleme altında doğrusal olmayan yük-deformasyon karakteristikleri ile belirlenmelidir. Monotonik yükleme altındaki davranış çevrimsel testleri bir şekilde destekleyici olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte yapının çevrimsel davranışında ani bir dayanım kaybının olmadığı, dayanımın kademeli olarak azaldığı durumlarda nihai ötelenme limitlerinin sadece çevrimsel testler ile belirlenmesi gerekmeyebilir. Bu gibi durumlarda, monotonik ve çevrimsel verilerin bir kombinasyonundan zarf eğrisi oluşturulmasına izin verilmektedir.

Monotonik ve çevrimsel yükleme altında deney numunelerinin hesaplanan yük-deformasyon eğrilerinin karşılaştırılması yapıldığında daha önce Şekil 3.11'de gösterildiği gibi tüm deneysel modeller için monotonik yükleme altında yapıların daha yüksek ötelenme kapasitelerine sahip olduğu görülmektedir. Çevrimsel bir testin nihai deformasyonu genellikle monotonik testte yük-deplasman eğrisinde teğet rijitliğin negatif olduğu deplasman değerine karşılık gelir. Monotonik testte ulaşılan maksimum yer değiştirme, çevrimsel testte meydana gelen yer değiştirmenin yaklaşık olarak 1.5 katıdır. Yapısal bileşenlerin (kiriş-kolon birleşimleri, gövde levhası, kirişler ve kolonlar) çevrimsel yükleme altında daha şiddetli dayanım kayıplarına maruz kalabileceği de bilinmektedir. Bu nedenle zaman zaman çevrimsel yükleme protokolünün neden olduğu hasarın gerçek bir sismik yer hareketinin yapması gerekenden daha şiddetli olabileceği tartışılmaktadır. Dolayısıyla bir yapısal elemanın davranışının monotonik yükleme ile daha iyi temsil edilebildiği durumlar da oluşabilmektedir. Monotonik yükleme, tasarım ötelenme limitleri içerisinde yapının başlangıç rijitliğini ve maksimum kesme kuvvetini

başarılı bir şekilde hesaplamaktadır. Bütün modellerin monotonik yükleme altında gösterdikleri yük-ötelenme oranı davranışları EK-5'te verilmiştir.

Bu aşamada bir çelik levhalı perde duvarın istenen-öngörülen doğrusal olmayan davranışını referans davranış tipi olarak tanımlamak faydalı olacaktır. Düzgün tasarlanmış çelik levhalı perde duvarın Şekil 4.2'deki göçme mekanizması oluşma sırası şu şekilde sıralanabilir;

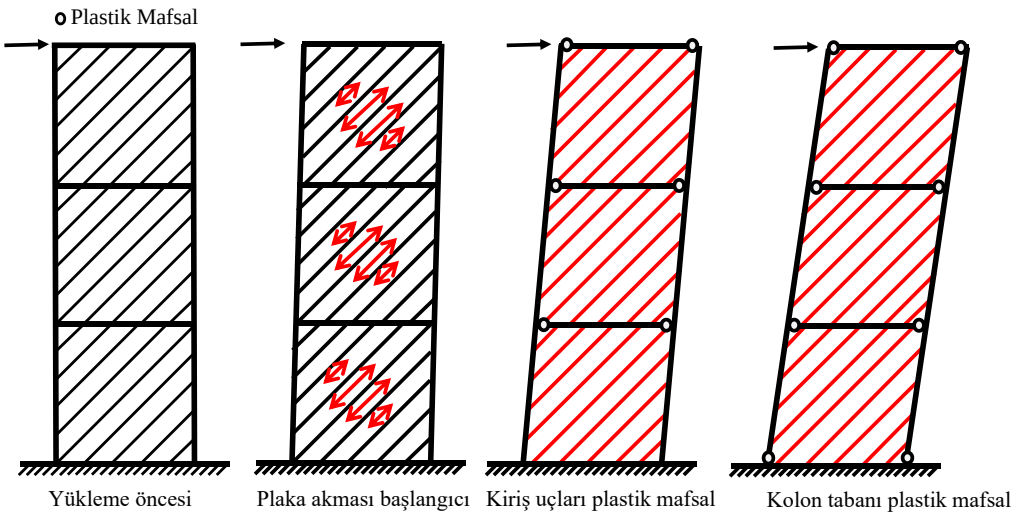
• Çelik dolgu levhasının burkulması ve yaklaşık 0,01 radyan kat öteleme oranında tam çekme alanı etkisinin oluşması (tüm gövde plakasının akması),

• Kiriş uçlarında akma başlangıcı,

• Kolon tabanında akma başlangıcı,

• Kirişin her iki ucunda plastik mafsal oluşumu,

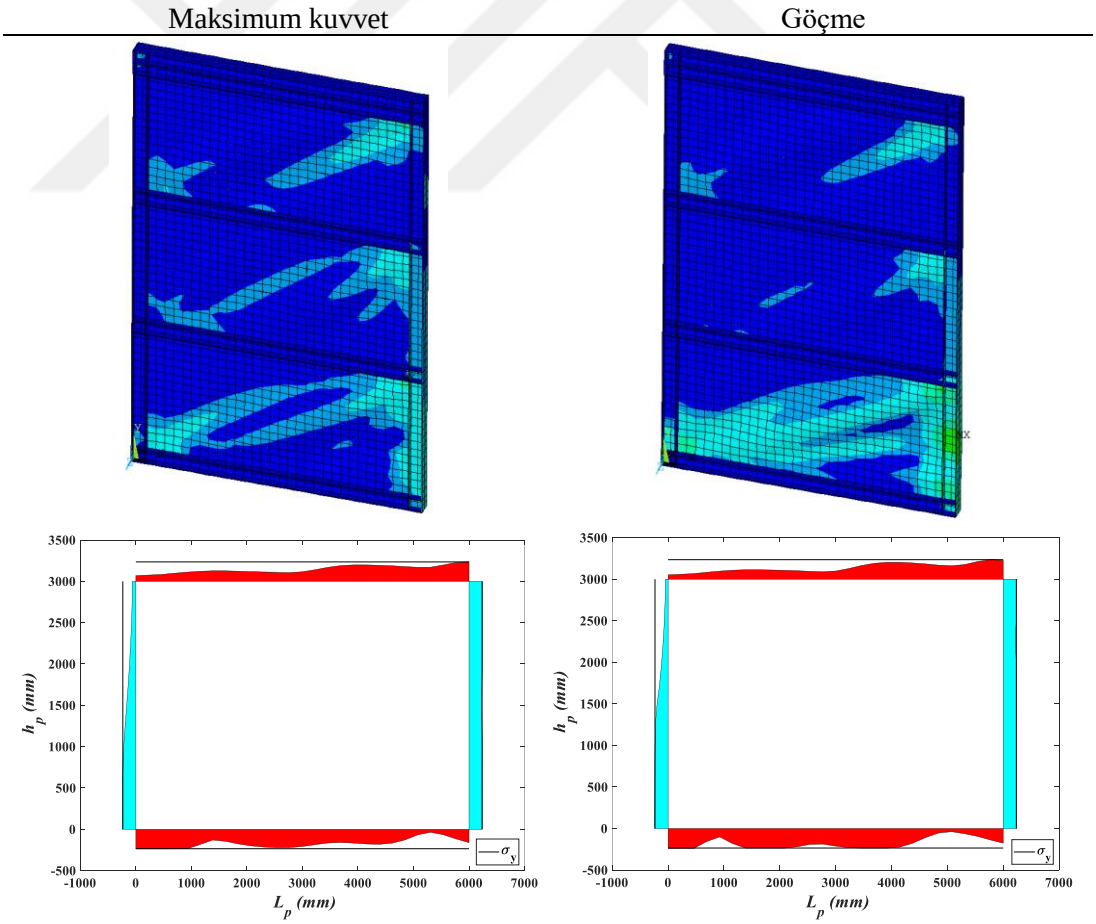
• Kolon tabanında plastik mafsal oluşumu.



Şekil 4.2. Moment taşıyabilen çerçeveye sahip çok katlı bir çelik levhalı perde duvarın istenilen göçme mekanizması aşamaları.

Parametrelerin çeşitliliği dolayısı ile model duvarlarda oluşan göçme mekanizmaları birbirinden farklılık gösterecektir. İstenilen mekanizmanın oluşmasının hangi şartlar altında gerçekleşme olasılığının daha yüksek olduğunu belirleyebilmek içim bütün modellerin oluşturdukları mekanizmalar detaylıca incelenmiştir.

Göçme mekanizmalarını tanımlayabilmek için her model yükleme başlangıcından göçme gerçekleşene kadar aşamalar halinde incelenerek davranışları not edilmiştir. Özellikle sistem yük-deplasman eğrisinde maksimum dayanıma ulaşılan deplasmanda ve göçme mekanizmasının oluştuğu aşamada plakanın çerçeve boyunca gerilme dağılımı, plastik hasar ve gerinim durumları incelenmiştir. Bunun için Şekil 4.3'te gösterildiği gibi her bir model için farklı ötelenme aşamalarında Von Misses gerinim dağılımları ve plaka gerilme durumları çizdirilmiş ve modeller arasındaki farklar incelenmiştir. Modellerin maksimum kuvvet, nihai ötelenme ve analiz sonu gerinim çizimleri EK-5'te verilmiştir.



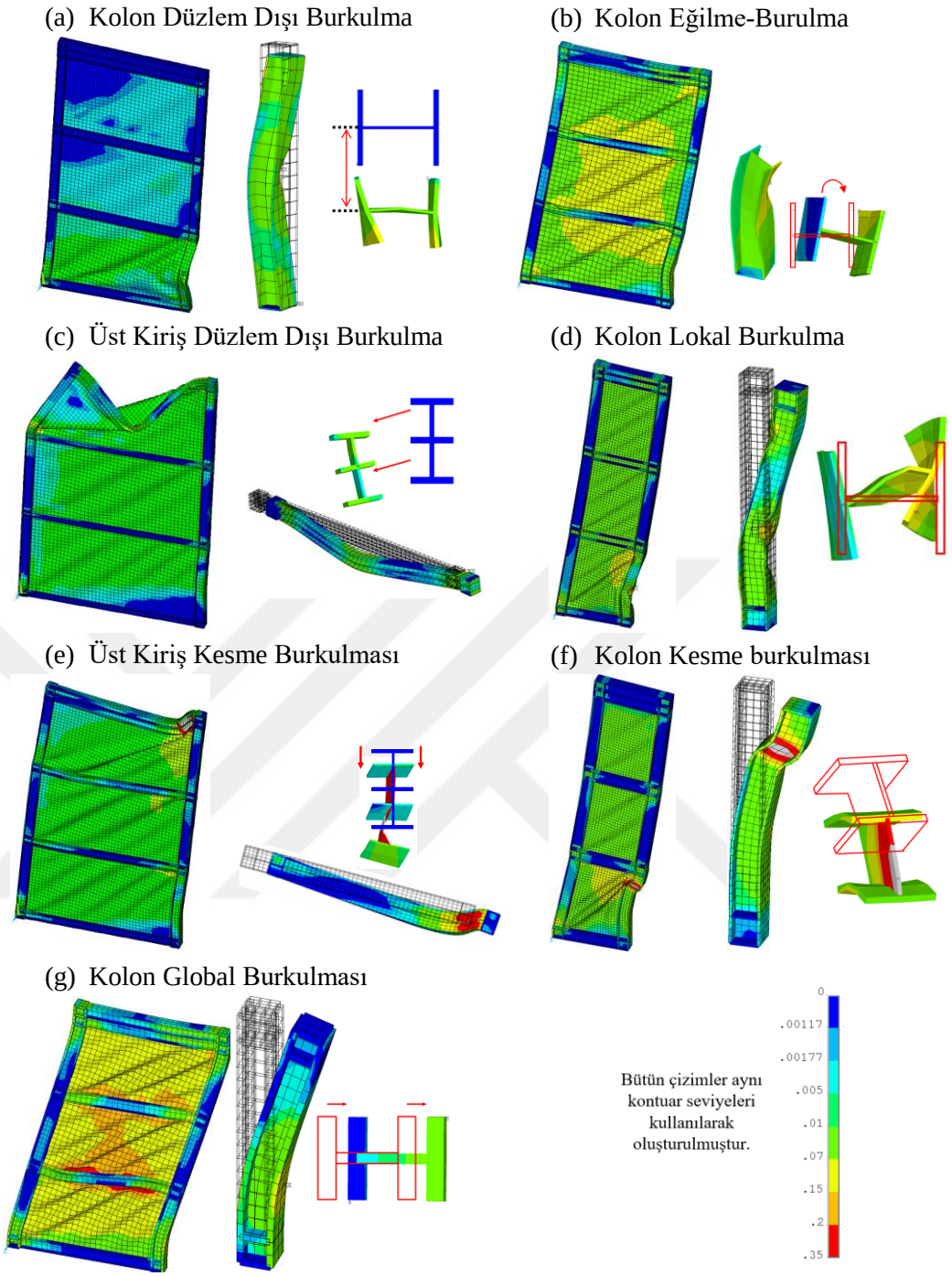
Şekil 4.3. Maksimum kuvvette ve göçme anında temsili bir modelin Von Misses gerinim şekilleri ve birinci kat plakası boyunca gerilme dağılımları.

Plaka gerilmeleri hesaplanırken gövde plakasının kiriş ve kolonlara komşu olan elemanları dikkate alınmıştır. Her bir elemanın kiriş ve kolonlara komşu olmayan en yakın düğüm noktalarındaki gerilmeler hesaplanmıştır. Bunun için önce tek tek elemanlar seçilip sonra ilgili elemandaki gerilme verisi alınacak düğüm noktası seçilmiştir. Komşu elemanların aynı düğüm noktasını paylaşması sebebi ile bu noktalarda elde edilen gerilmelerin ortalaması alınmıştır.

Modellerde gözlemlenen plaka burkulması ile başlayan göçme mekanizması aşamaları aşağıdaki gibi sıralanmıştır;

- Yatay sınır eleman uçlarında akma meydana gelmesi,
- Yatay sınır elemanında plastik mafsal oluşumu,
- Düşey sınır elemanlarında akma meydana gelmesi,
- Düşey sınır elemanında plastik mafsal oluşumu,
- Düşey sınır elemanında içe doğru belirgin bir plastik deformasyona sahip olması,
- Düşey sınır eleman üst ucunda düzlem içi eğilme-kesme göçmesi,
- Üst ankraj kirişi uçlarında düzlem içi plastik deformasyon oluşması,
- Üst ankraj kirişinde aralık içi düzlem dışı burkulma,
- Kiriş-kolon birleşim bölgelerinin akması,
- Dikey sınır elemanı açıklığı üzerinde düzlem içi global burkulma meydan gelmesi,
- Dikey sınır elemanı yüksekliği boyunca akma meydana gelmesi,
- Kolonun yüksekliği boyunca aralık içi düzlem dışı burkulma.

Gözlemlenen bu göçme mekanizması aşamaları ışığında baskın olan göçme mekanizmaları bir araya toplanmış ve toplamda yedi farklı göçme mekanizması grubu oluşturulmuştur. Bazı modellerin birden fazla grup davranışı sergiledikleri için iki veya daha fazla grup altında sınıflandırılabileceği unutulmamalıdır. 292 analiz için en yaygın şekilde karşılaşılan göçme mekanizmaları Şekil 4.4'te özetlemiştir. Şekil 4.4 ayrıca her bir spesifik göçme mekanizması için hasarın meydana geldiği kesitler üzerindeki değişimi de göstermektedir.



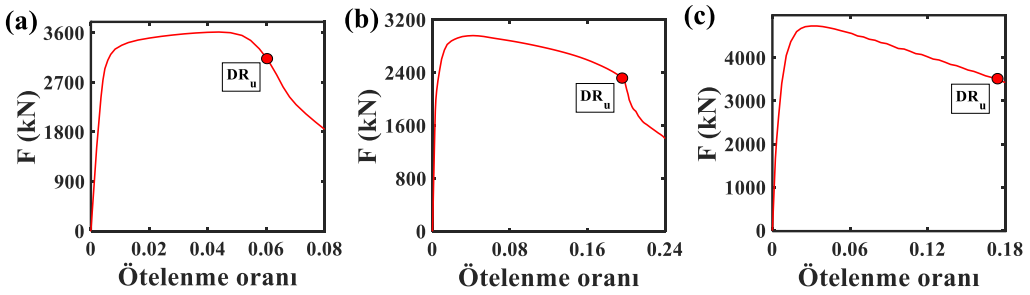
Şekil 4.4. Gözlemlenen göçme mekanizmalarının sistem ve eleman bazında göçme seviyesindeki Von Misses gerinim durumları.

Şekil 4.4'te verilen bu göçme modları detaylı olarak incelenmiş ve tasarım parametrelerinin spesifik göçme modeline ilişkin sistem yük-deformasyon özellikleri, maksimum kesme kuvveti ve yanal ötelenme kapasitesi üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Ayrıca tasarım parametreleri ile gövde plakasının karşı koyduğu kesme kuvvetinin toplam ÇLPD kesme kuvvetine (V_p/V_t) oranı arasındaki ilişki de bu

bölümde incelenmiştir. Plaka kesme kuvveti, birinci kat plakasının orta seviyesindeki düğümlerden gelen kuvvetler kullanılarak hesaplanır.

Kolonlarda artan eksenel yük oranı (P/P_{cr}) gibi bazı parametreler modellerin ötelenme kapasitesi ile belirgin korelasyonlara sahip olsa da (nihai ötelenme oranı üzerinde azaltıcı bir etkiye sahip) genel olarak parametreler ile nihai ötelenme oranı arasında zayıf ilişkiler gözlemlenmiştir. Bu sebepten dolayı tasarım parametreleri etkisi incelenirken her bir göçme mekanizma grubu kendi arasında değerlendirilmiştir.

Bu bölümde nihai ötelenme oranı (DR_u) Şekil 4.5(a)' da gösterildiği gibi çelik levhalı perde duvar yük-ötelenme oranı eğrisinde maksimum dayanımının %15 düştüğü ötelenme oranı olarak tanımlanmıştır. Ancak bazı modellerde maksimum kesme kuvveti değerinden sonra dayanım azalması çok stabil bir şekilde olmuştur. Histerezis zarf eğrisi üzerinde maksimum dayanımdan sonra belirgin bir kırılma olmayan modellerde nihai ötelenme oranı için farklı bir tanım daha yapılmıştır. Buna göre eğer bir histerezis eğrisinde maksimum kuvvetin yüzde 15'i kadar azalma olana kadar gözle görülür ani bir kırılma veya düşüş görülmüyor ise nihai ötelenme oranını belirlemek için Şekil 4.5(b)'de gösterilen durumdaki gibi eğride kırılma veya gözle görülür bir düşüş olup olmadığına bakılmıştır. Eğer var ise o seviyedeki ötelenme oranı nihai ötelenme oranı olarak belirlenmiştir. Fakat eğer Şekil 4.5(c)'deki gibi yük-ötelenme oranı eğrisinde maksimum kuvvete ulaşıldıktan sonra doğrusal bir dayanım kaybı var ise ve herhangi bir kırılma veya ani düşüş gözlemlenmiyorsa başka bir değerlendirme yapılmayıp dayanımın yüzde 50 kadar azaldığı ötelenme oranı nihai ötelenme oranı olarak kabul edilmiştir.



Şekil 4.5. Nihai öteleneme oranı belirlenmesinde kullanılan kuvvet değerleri (a) maksimum dayanımın %85'i, (b) maksimum dayanımın %85 i ile %50 si arası, (c) maksimum dayanımın %50'si.

Her bir göçme mekanizması nihai ötelenme oranı ve plaka dayanımı – toplam dayanım oranı (V_p/V_t) üzerinden incelenmiştir. Bu iki oran ile kolon esneklik parametresi ω_i, kolon ve kiriş atalet momentleri oranı I_c/I_b, kiriş flanş genişliğinin kiriş yüksekliğine oranı b_f/h_b, kiriş flanş genişliğinin flanş kalınlıkları toplamına oranı $b_f/2t_f$, gövde plakası en – boy oranı L_p/h_p ve eksenel yük oranı P/P_{cr} ilişkileri verilmiştir. Her göçme mekanizması grubunda bütün parametreler ile ilişkilere değinilmemiş olup göçme mekanizmasına yol açan, belirli bir korelasyon gösteren veya belirli limitlerde yığılma olan ilişkiler tartışılmıştır.

4.2.1. Kolon düzlem dışı burkulması

Elde edilen sonuçlara göre kolonun düzlem dışı deformasyonunu etkileyen baskın parametreler kolon esneklik parametresi (ω_i) ve eksenel yük oranıdır (P/P_{cr}). Kolonları düzlem dışı yer değiştirme yapan modellerin en düşük ω_i değeri, Şekil 4.6(a) ve (g)'de gösterildiği gibi 2.2'dir. Bu gruptaki modellerin ortalama eksenel yük seviyesi 0.21'dir ve bu ortalama değer diğer gruplar ile karşılaştırıldığında en yüksek eksenel yük değerlerindendir.

Grubun ortalama nihai ötelenme oranı 0.039'dur. Bu değer gruplar arasındaki en düşük ortalama ötelenme oranıdır. Eksenel yükün ve plaka en-boy oranının arttırılması, Şekil 4.6(e)&(f)'de gösterildiği gibi nihai ötelenme oranında azaltıcı bir etkiye sahiptir. Her iki parametrenin artması da Şekil 4.4(a)'da gösterildiği gibi kolonun düzlem dışı deformasyonunu tetikleyerek kolon göçmesine yol açar. Bu grupta, kiriş flanş genişliğinin kiriş yüksekliğine (b_f/h_b) oranı 0,07'lik düşük bir standart sapma ile 0,97'dir. Bu oranın parametrik çalışmadaki aralığı 0.34 ile 1.05 arasındadır. Dolayısıyla bu göçme mekanizması grubunda b_f/h_b oranının oldukça yüksek bir ortalamaya sahip olduğu söylenebilir. Şekil 4.6 (c) ve (i)'den görülebileceği gibi bu oran için güçlü bir kümelenme vardır. Kiriş sıkılık oranı ($b_f/2t_f$) ise geniş bir aralığa sahiptir ve bu grubun modelleri için nihai ötelenme oranı ve V_p/V_t oranı ile güçlü bir ilişkisi gözlemlenmemiştir. Bu hasar durumunun oluşumuna katkıda bulunan diğer bir parametre de nihai ötelenme ve V_p/V_t ilişkileri Şekil 4.6(b) ve (h)'de gösterildiği gibi I_c/I_b oranıdır. Bu göçme grubundaki modellerde I_c/I_b =1.0 değeri ile tasarlanan birçok model vardır ve ortalama I_c/I_b oranı 1.58'dir. Bu değer gruplar arasında ikinci en düşük orandır. Genel olarak kolon atalet

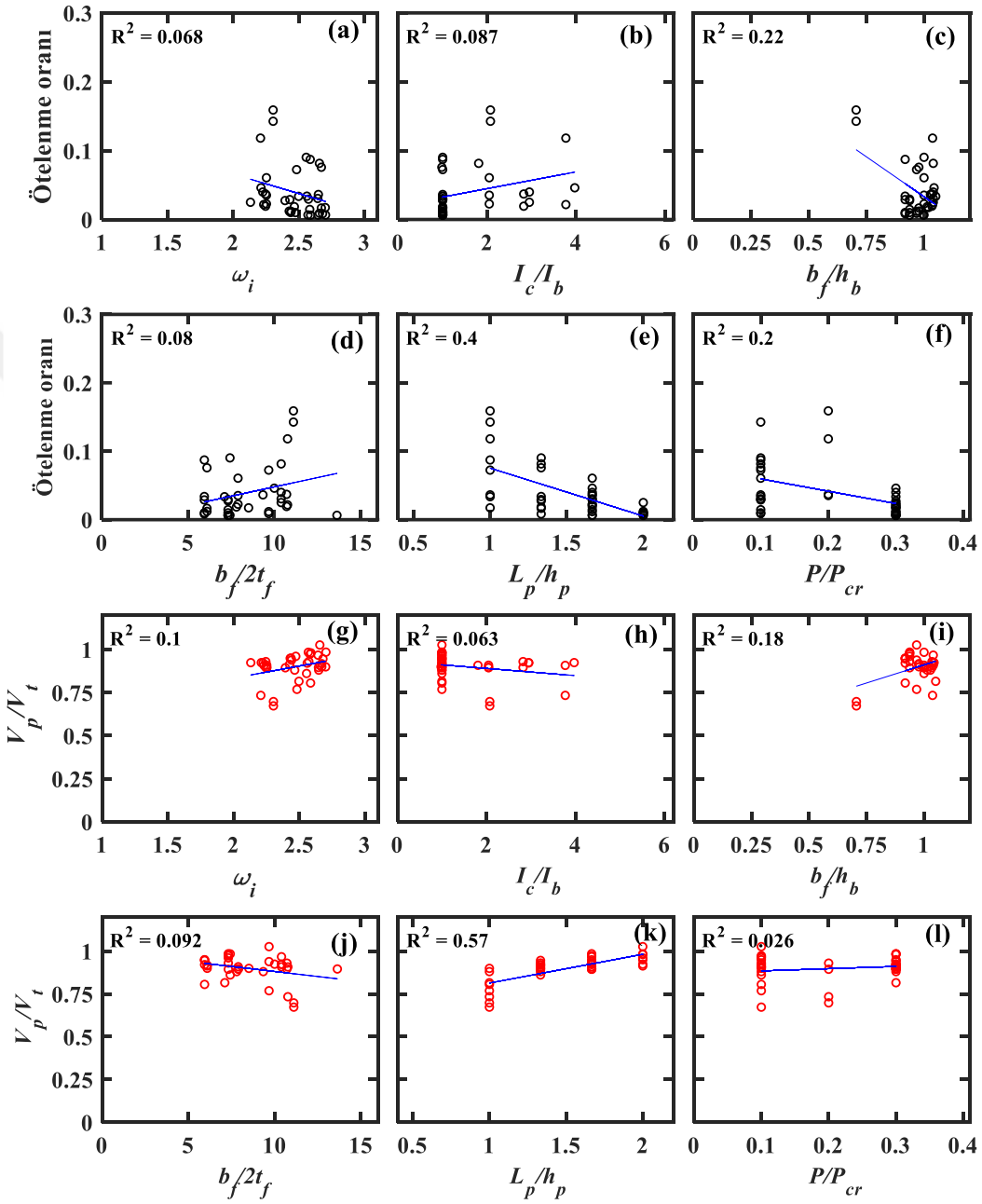
momentine göre değerlendirildiğinde bu gruptaki modellerin güçlü kirişlere sahip olduğu söylenebilir. Bu durum kirişlerden önce kolonlarda göçme meydana gelmesinin olasılığını artırmaktadır. Diğer taraftan kolonların yeterince elastik bölgede kalamamasından dolayı modellerde çelik gövde plakası tam akma durumuna gelmemiştir. Bu grupta baskın bir şekilde gözlemlenen göçme mekanizması gelişimi aşağıdaki gibidir;

- Çelik gövde plakasında kısmi akma meydana gelmesi,
- Kiriş-kolon kesişim bölgelerinin akması,
- Basınç altındaki kolonda akma başlaması,
- Kolonda düzlem dışı burkulma meydana gelmesi.

V_p/V_t oranı, Şekil 4.6(k)'de gösterildiği gibi plakanın en-boy oranı arttıkça artar. Bu gruptaki 38 modelden dördü hariç bütün modeller 0.8'den büyük V_p/V_t oranına sahiptir. Bu dört model, bu göçme mekanizması grubunun en düşük kolon esneklik parametresi ve plaka en – boy oranına sahip modelleridir. Dört modelin hepsinin plaka en – boy oranı 1'dir. Dolayısıyla bu dört model, diğer modellere kıyasla daha güçlü kolonlar ve daha düşük plaka en – boy oranı nedeniyle bu grubun en büyük deformasyon kapasitesine sahip modelleridir. Şekil 4.6(a) ve (e)'de görüldüğü gibi iki parametrenin de azalması ötelenme oranını artırmaktadır.

Özet olarak, I_c/I_b ve b_f/h_b oranlarının gösterdiği gibi nispeten güçlü kirişlerin kullanılması ve kolonların esneklik parametresi değerlerinin yüksek olması, kirişlerden önce kolonlarda plastik deformasyon oluşması olasılığını artırmaktadır. Bu parametrelere yüksek eksenel yük katıldığında düşük ötelenme oranlarında göçme meydana gelmesi kaçınılmaz olmaktadır. Eğer kolon esneklik parametresi 2.2'den yüksek ise, kirişleri daha rijit yapacak durumlardan ($I_c/I_b \leq 1.58$ ve $b_f/h_b \approx 0.97$) kaçınılmalıdır. Yüksek eksenel yükün olması bu göçme mekanizmasının olasılığını güçlendirse de düşük eksenel yük altındaki modeller de bu mekanizmaya sahip olabilir. Çelik levhalı perde duvarların tasarımında, sınır elemanlarının tüm plaka akana kadar elastik kalması beklenmektedir. Bu grupta kolon göçmesi tüm plaka akmadan önce başladığından, çerçevenin elastik

bölgede kalacak kadar rijit olmadığı ve sistem dayanımına henüz katkısı çok az iken göçmenin meydana geldiği sonucu çıkmaktadır. Bu durum da V_p/V_t oranının yukarıda belirtildiği gibi büyük değerlere ulaşmasına sebep olmaktadır.



Şekil 4.6. Kolon düzlem dışı burkulma grubu için tasarım parametrelerinin ötelenme oranı ve V_p/V_t oranı ile ilişkileri.

4.2.2. Kolon eğilme – burulma göçme durumu

Bir kolonun eğilme – burulma durumu, genellikle elemanda ani bükülmeler olduğunda meydana gelir. Burkulma Şekil 4.4(b)' de gösterildiği gibi yanal ötelenme ve bükülme şeklinde olur ve I kesitlerde görülen bu durum eğilme-burulma burkulmasının en yaygın şeklidir (Trahair 1993). Bu duruma eksantrik yüklemelerin yol açabileceği bilinmektedir. Gövde plakasında oluşan dalgalı şekil, çekme alanlarının tam oluşamaması gibi çelik levhalı perde duvarlar ile alakalı yükleme durumları kolonlardaki rijitlik zafiyeti ile birleştiğinde bu durum ortaya çıkabilmektedir.

Bu grup modeller ortalama 0,07 nihai ötelenme oranı değeri ile ikinci en düşük deplasman kapasitesine sahip modellerdir. Bu gruptaki tüm modeller, Şekil 4.7(k)'de gösterildiği gibi 1.00 ve üzeri bir plaka en – boy oranına sahiptir. Şekil 4.7(a)'da kolon esneklik parametresi ile nihai ötelenme oranı ilişkisi verilmiştir. Buna göre birinci göçme mekanizması grubunda olduğu gibi modellerin ω_i değerleri 2.2'den büyüktür. Kirişler incelendiğinde modellerin b_f/h_b oranı, Şekil 4.7(c) ve (i)'de gösterildiği gibi yine yüksek oranda kümelenmiştir. Ortalama değeri ise 0,99±0.04'tür. Bu değer bütün gruplar arasında b_f/h_b oranı için en yüksek değerdir. I_c/I_b oranı ise geniş bir aralık içerisinde değerler almıştır ve grup ortalaması 2'dir.

Gövde plakası L_p/h_p oranı ve eksenel yük oranı arttıkça Şekil 4.7(e) ve (f)'de gösterildiği gibi ötelenme oranları azalmaktadır. Yüksek eksenel yük beklenildiği gibi kolonlardaki basınç yükünü artırmanın yanı sıra P-delta etkisini de artırmakta sistemin deplasman kapasitesini etkilemektedir. Bu grupta yer alan modellerin genel olarak geliştirdikleri göçme mekanizması aşamaları aşağıdaki gibidir;

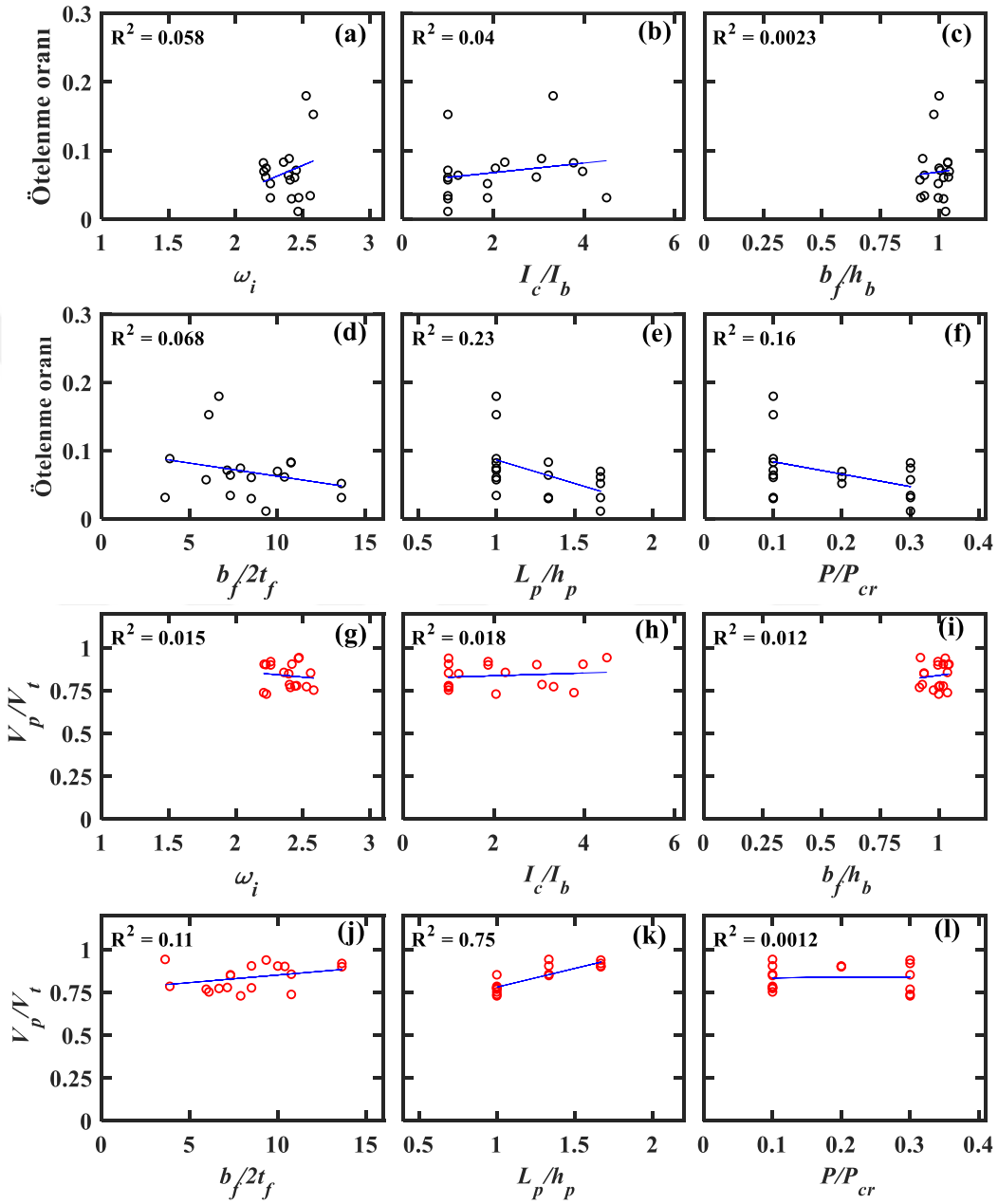
• L_p/h_p oranı 1.67 altında ise çelik gövde levhası tam akma durumu meydana gelir. En – boy oranı yüksek olan modellerde yüksek oranda akma tamamlanırken küçük bölgelerde plakada akma meydana gelmeyebilir,

• Yatay sınır eleman uçlarında akma meydana gelir,

• Düşey sınır elemanında akma başlar,

• Düşey sınır elemanı kesiti, elemanın boyuna ekseni etrafında döner,

• Düşey sınır elemanında belirgin bir içe doğru deformasyon meydana gelir ve DSE düzlem içi eğilme burkulması şeklinde göçme mekanizması tamamlanır.



Şekil 4.7. Kolon eğilme – burulma grubu için tasarım parametrelerinin ötelenme oranı ve V_p/V_t oranı ile ilişkileri.

V_p/V_t oranı tüm modellerde 0,73 ve üzerindedir. İlk grup davranışında da gözlemlendiği gibi plakanın karşı koyduğu kesme kuvvetinin toplam sistem dayanımına

oranı arttıkça nihai ötelenme oranı azalmaktadır. Plaka kesme kuvveti – toplam kuvvet oranı, Şekil 4.7(k)'de gösterildiği gibi plaka en-boy oranı ile güçlü bir ilişkiye sahiptir. L_p/h_p oranı arttıkça V_p/V_t oranı da artmaktadır. Şekil 4.7(l)'deki verilere göre V_p/V_t oranı eksenel yük seviyesine bağlı olarak bir değişim göstermemektedir.

Birinci ve ikinci grupların ortalama kolon-kiriş rijitlik oranı (I_c/I_b) sırasıyla 1.58 ve 2.0, levha en boy oranı (L_p/h_p) 1.5 ve 1.22'dir. Bu ortalama değerlere göre ikinci grup birinci gruba göre nispeten daha rijit kolonlara ve daha dar panel genişliğine sahiptir. Bu gruptaki modellerde de birinci gruptaki gibi genel olarak kirişte plastik deformasyonlar gözlenmemektedir. Kiriş davranışı açısından ilk gruptan farkı kiriş başlarında sınırlı olacak şekilde akma meydana gelmektedir. Diğer parametreler her iki grupta da benzerdir.

Bu sonuçlara göre eğer ω_i 2.2'nin üzerinde ise ve göreceli olarak rijit kirişler kullanılıyorsa (I_c/I_b<2.0) olan çelik levhalı perde duvarlarda kolonların kirişlerden önce hasar görmesini engellemek için ekstra önlemler almak gerekmektedir. Burada sistem ötelenme oranı kapasitesine eksenel yük oranının ve L_p/h_p oranının artması gibi durumlar da negatif etki edecektir.

4.2.3. Üst kiriş düzlem dışı burkulma

İlk iki çökme mekanizması grubunda kolon esneklik parametresi için davranışı temsil edebilen bir sınır değer verilebilmiştir. Fakat Şekil 4.8(a) ve (g)'de gösterildiği gibi bu çökme mekanizması grubunda kolon esneklik parametresi geniş bir aralıkta değerler almıştır. Bu grubun ortalama ötelenme oranı 0.09'dur. Şekil 4.8(a)'da gösterildiği gibi, kolon esneklik parametresi ile öteleme oranı arasında ters bir korelasyon vardır. Bu göçme mekanizması grubundaki modeller, atalet momenti açısından ilk iki gruptaki modellere göre daha rijit kolonlara sahiptir. Modellerin kolon esneklik faktörlerinin ortalaması 1,7'dir. Diğer gruplara göre eksenel yük ortalama değerinde ise belirgin bir azalma görülmektedir. Ortalama eksenel yük değeri (P/P_{cr}) bu grup için 0.14'tür. Bütün gruplar içerisinde plaka en – boy oranı ortalaması en yüksek olan grup üst kiriş düzlem dışı burkulma grubudur. Şekil 4.8(e) ve (k)'de görüldüğü gibi bu grupta sadece L_p/h_p oranı

1.67 ve 2.00 olan modeller vardır. Daha düşük L_p/h_p oranına sahip olan modellerde üst kirişte düzlem dışı burkulma görülmemiştir.

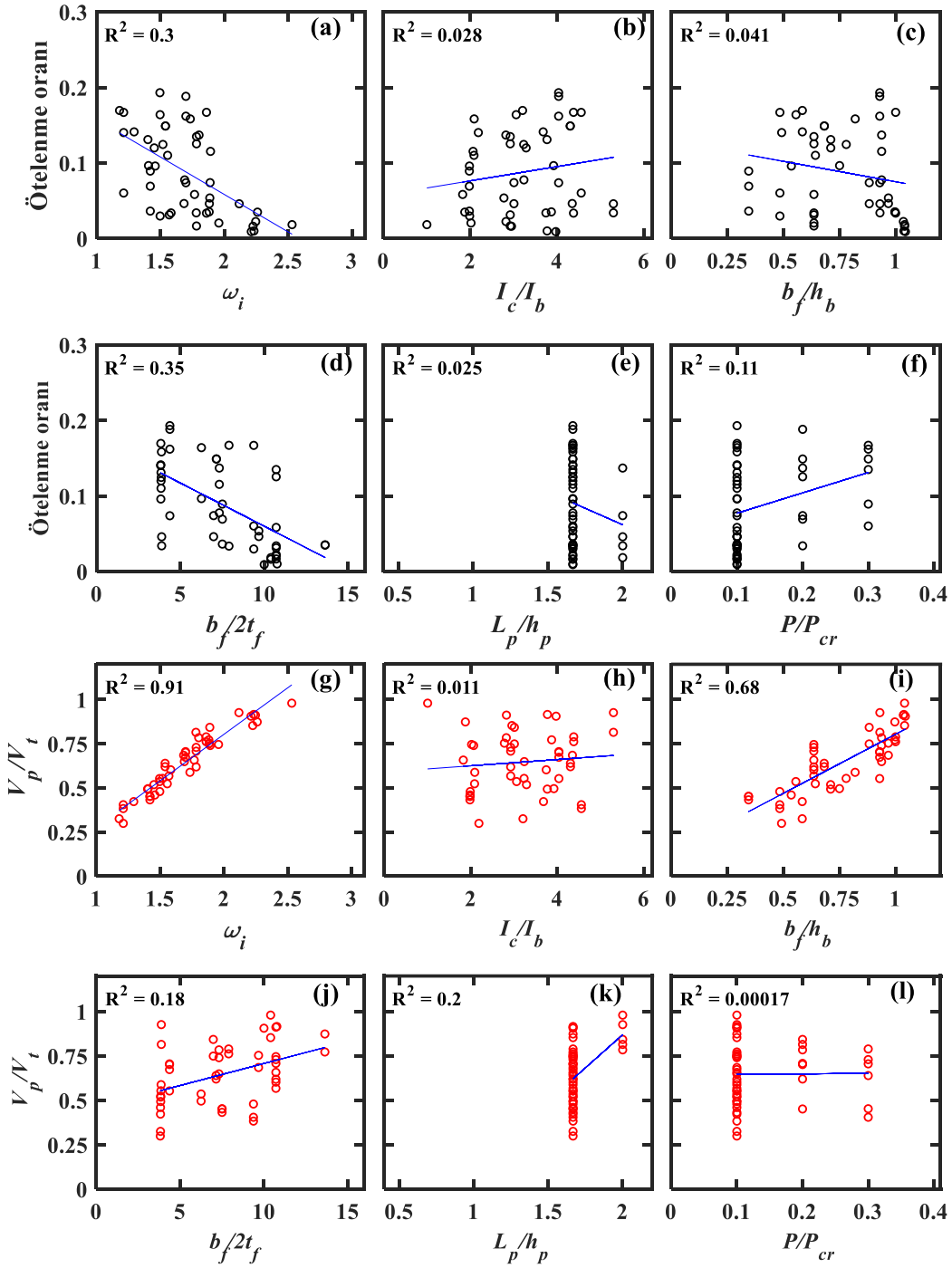
Kiriş özelliklerinde bakıldığında ise I_c/I_b oranı ortalaması 3.22 olup tüm göçme mekanizması grupları içerisinde en yüksek ortalama değerlerden biridir. Kiriş flanş genişliğinin kiriş derinliğine (b_f/h_b) oranı ortalaması 0.77'dir. Bu değer ilk iki göçme mekanizması grubundan daha düşüktür. Bu göçme mekanizmasına sahip modellerde kirişler kolonlara göre daha fazla açıklığa sahiptir ve göreceli olarak daha esnek davranabilecek kesitlerden oluşmuştur. Katlar arasında bulunan kirişlerin deformasyonu dayanımda çok ani düşüşlere sebep olmayabilir. Fakat çerçeve tepesinde çift kiriş kesiti kullanılsa dahi Şekil 4.4(c)'de gösterildiği gibi düzlem dışı burkulma meydana gelerek sistemde ani dayanım azalması meydana gelmesine sebep olmaktadır. Genel olarak bu grupta yer alan modellerin yük – deplasman eğrilerinde herhangi bir azalma eğilimi görülmeden kırılma meydana gelir. Fakat kolonlara göre daha narin kirişler kullanıldığı ve eksenel yük göreceli olarak daha az olduğu için güçlü kolon – zayıf kiriş ilkesi gerçekleşmiş olur ve kolonların daha az hasar görmesi sonucunda ilk iki gruba göre sistemin ötelenme kabiliyeti artar. Bu grubun gözlenen baskın göçme mekanizması oluşumu aşağıdaki gibidir;

- Çelik gövde levhasının tam/büyük oranda akması,
- Kiriş uçlarında akma meydana gelmesi,
- Kolon tabanında akma meydana gelmesi,
- Üst kirişin düzlem dışı burkulması.

Bazı modellerde katlar arası kirişlerin uçlarında plastik mafsal oluştuğu da gözlemlenmiştir.

V_p/V_t oranı incelendiğinde Şekil 4.8(g)'den görülebileceği gibi kolon esneklik parametresi (R-kare 0.91) ile çok güçlü bir korelasyon vardır. Bu korelasyonun bu kadar belirgin olmasının sebebi diğer göçme mekanizmalarında ω_i değerinin kümelenmesine

karşın burada korelasyon için kullanılacak geniş bir ω_i aralığı vardır. ω_i değeri 1,21 ile 2,53 arasında değişmektedir.



Şekil 4.8. Üst kiriş düzlem dışı burkulma grubu için tasarım parametrelerinin ötelenme oranı ve V_p/V_t oranı ile ilişkileri.

Sonuçlar bu göçme mekanizmasının ω_i 2.2'den büyük kolon esneklik parametresi ile temsil edilen nispeten zayıf kolonlara sahip modellerde de gelişebileceğini

göstermektedir. Bu modeller özel olarak incelendiğinde ise kiriş kesitinin $b_f/2_{tf}$ oranının hepsinde 10 ve üzerinde olduğu görülmüştür. Bu değer bütün modeller göz önüne alındığında 1.95 ile 13.64 arasında değişmektedir. Bu modeller ayrıca grup içerisinde b_f/h_b oranı en yüksek olan modellerdir. Yüksek b_f/h_b oranı düşük flanş kalınlığı (yüksek $b_f/2t_f$) ile birleşince kiriş flanşlarında yerel burkulmalar daha önce başlamakta ve göçmeye neden olmaktadır. Bu ayrışan modellerde genel olarak gövde plakası tam olarak akmamıştır. Modeller nispeten zayıf kolonlara sahip olsa bile (ω_i> 2.20), üst kiriş düzlem dışı burkulması yüksek L_p/h_p ve yüksek kiriş $b_f/2t_f$ oranlarının bir kombinasyonu ile meydana gelmektedir. Bunlara ek olarak yüksek I_c/I_b oranının da bu göçme mekanizmasının gelişmesinde etkisi olduğu açıktır.

Bu sonuçlar ışığında eğer bir çelik levhalı perde duvarda L_p/h_p oranı 1.67 ve üzerinde ise, kolon esneklik parametresinin her değeri için üst kirişin düzlem dışı burkulmasını engellemek için daha rijit kesitler veya berkitme levhaları kullanmak gibi önlemler alınmalıdır. Üst kirişlerde I_c/I_b oranının 2'den küçük olması bu göçme mekanizmasının görülme olasılığını düşürebilmektedir.

4.2.4. Kolon flanş yerel burkulması

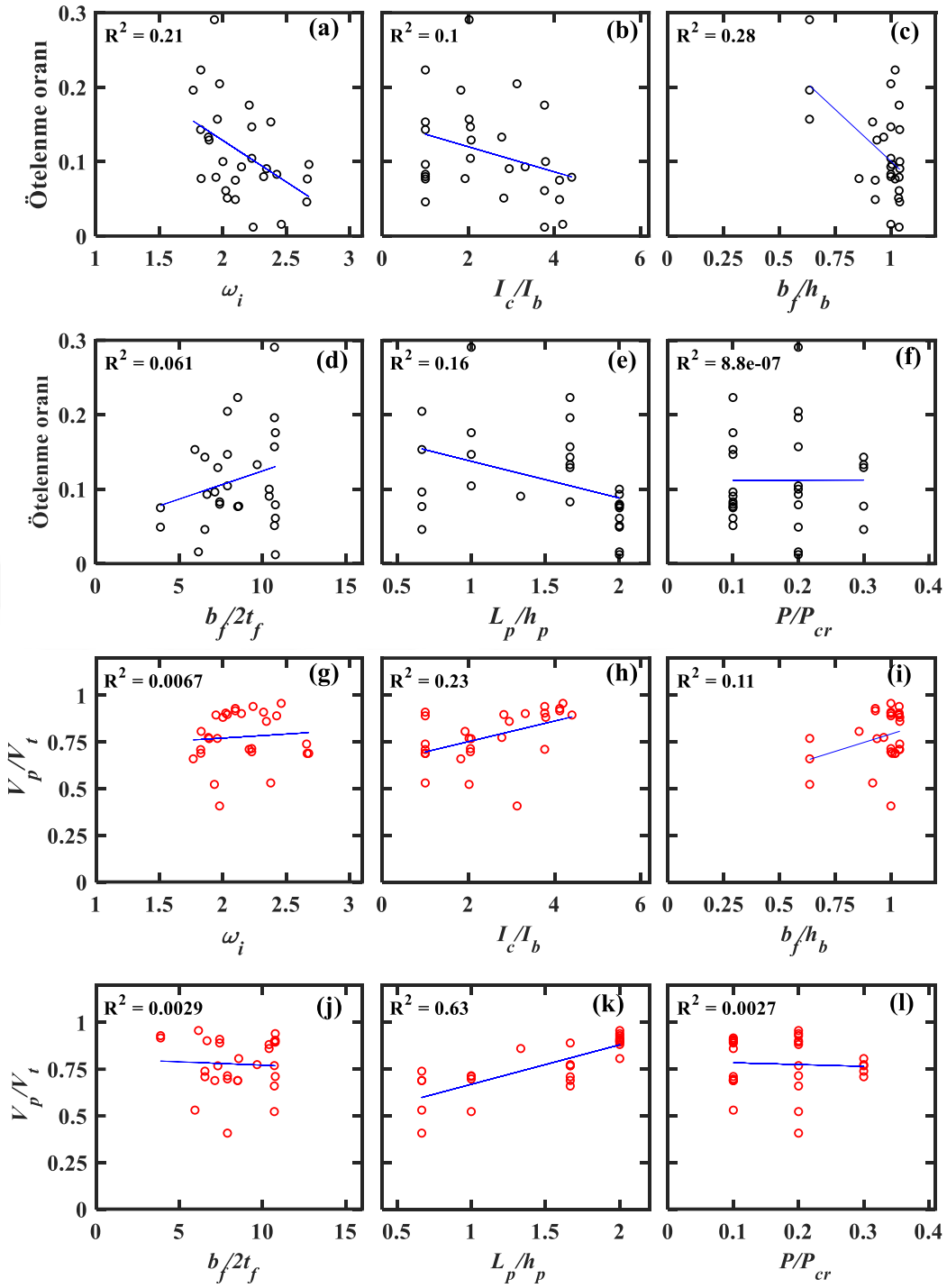
Bu gruptaki bazı modellerin deforme olmuş şekilleri aynı anda farklı göçme mekanizmasının özelliklerini gösterebildiği için iki veya daha fazla grup altında sınıflandırılabilir. Ancak bu gruptaki modellerin en baskın ortak özelliği Şekil 4.4(d)'de görülebileceği gibi göçmenin kolon flanş lokal burkulması ile başlaması ve kolonların içe doğru deforme olmasıdır. Bu grubun ortalama nihai ötelenme oranı 0.11'dir. Bu değere göre bu grupta yer alan modeller orta seviyede nihai ötelenme kapasitesine sahiptir. Kolon esneklik parametresi (ω_i) ortalaması 2.14 olup Şekil 4.9(a) ve (g)'de görüldüğü gibi aldığı en düşük değer 1.7'dir. Şekil 4.9(a)' da sunulan verilere göre ω_i değeri arttıkça nihai ötelenme oranı azalmaktadır. Ortalama eksenel yük oranı 0.18 olup nihai ötelenme ve V_p/V_t ile olan korelasyonları iyi değildir ve dağılımları Şekil 4.9(f) ve (l)'de verilmiştir. Şekil 4.9(e) incelendiğinde bu grupta genel olarak en düşük ötelenme oranına sahip modellerin en yüksek plaka en – boy (L_p/h_p) oranına sahip modeller olduğu görülmektedir. Buna rağmen, en düşük en – boy oranına sahip bir model (L_p/h_p = 0,67) çok yüksek bir kolon esneklik parametresine sahipse, düşük ötelemelerde de bu göçme

mekanizması oluşabilir. Yüksek en – boy oranına sahip modellerde genel olarak gövde plakasının tam akma aşamasını tamamlanmadan sistem maksimum dayanımına ulaşmış olur. En yüksek öteleme oranına sahip modellerde, lokal flanş burkulması genellikle kolon tabanı yakınında meydana gelir ve bu bölgede plastik bir mafsal oluşumuna yol açar. Kolon tabanında ve kiriş uçlarında plastik mafsallar oluştuğunda yapı yüksek ötelenme seviyelerine ulaşmış olur. Kolon tabanında değil de kolon açıklığında plastisite olduğunda ötelenme oranı kapasitesi azalır. Bu grup için gözlemlenen en baskın iki göçme mekanizması aşaması;

- Çelik gövde plakasının tamamen akması,
- Kiriş-kolon kesişim bölgesinde akma meydana gelmesi,
- Kiriş uçlarında akma meydana gelmesi,
- Kolon tabanında akma meydana gelmesi,
- Tabana yakın kolon lokal flanş burkulması,
- Kolon tabanında plastik mafsal oluşumu,

veya,

- Çelik gövde levhasının akması,
- Kiriş uçlarının akması,
- Kolonda akma başlaması,
- Kolonun açıklığında yerel flanş burkulması meydana gelmesi,
- Kolonun stabilitesini kaybederek içe doğru burkulması.



Şekil 4.9. Kolon flanş yerel burkulma grubu için tasarım parametrelerinin ötelenme oranı ve V_p/V_t oranı ile ilişkileri.

Şekil 4.9(k)'de gösterildiği gibi diğer gruplara benzer şekilde V_p/V_t oranı en güçlü korelasyonlarından birini plaka en-boy oranı ile oluşturur. Çelik gövde plakasının toplam sistem dayanımına katkısı L_p/h_p oranı ile birlikte artar. Bunun nedeni, kolonların yeterli kapasiteye ulaşmadan stabilite problemleri yaşamasıdır. Şekil 4.9(c) ve (i)'de görüldüğü gibi bu gruptaki modellerin b_f/h_b oranı genel olarak yüksektir. Yüksek b_f/h_b oranına sahip

modellerde kirişler henüz hasar görmemişken kolonlarda hasar başlamaktadır. Genel olarak V_p/V_t oranı 0,7'nin üzerindedir. Bu orandan düşük orana sahip modeller incelendiğinde düşük plaka en boy oranı ve göreceli olarak düşük kolon esneklik parametresine sahip modeller olduğu görülmüştür. Bu parametrelerin farklı kombinasyonları farklı davranışlara yol açabilir.

4.2.5. Üst kiriş kesme burkulması

Bu göçme mekanizmasında üst ankraj kirişi Şekil 4.4(e)'de görüldüğü gibi basınç kolonu tarafındaki uç kısmından gövde plakasına doğru düzlem içi bir plastik deformasyon yapar. Çelik gövde levhasından kaynaklanan kesme kuvvetleri üst katta başka plaka tarafından karşılanmadığı için kiriş tek taraflı kuvvetler altında bu tür bir kesme göçmesi geliştirir.

Bu grubun ortalama ω_i değeri 1.63 ile tüm göçme mekanizması grupları arasında en düşük değere sahiptir. Şekil 4.10(a) ve (g)'de verildiği gibi, tüm modellerin kolon esneklik parametresi değerleri 2'den küçüktür. Güçlü kolonlar, modellerin yüksek öteleneme oranlarına ulaşmasını sağlar. Bu grubun ortalama öteleneme oranı 0.18 olup, gruplar arasında ikinci en yüksek orandır. Şekil 4.10(a)'da verilen ilişkiye göre ω_i değeri arttıkça nihai ötelenme oranı azalır. Diğer üst kiriş göçme mekanizması olan üst kiriş düzlem dışı burkulma durumunda L_p/h_p oranı ortalama 1.7 ile en yüksek değeri alırken bu grupta L_p/h_p oranı ortalama 1.2 ile en düşük ortalamalardan birine sahiptir. Kolon ve kiriş elemanlarında burkulma yükü eleman yüksekliği ile ters orantılıdır. Bu grupta kiriş açıklığı azaldığı için burkulmaya karşı narinliği azalır ve ani düzlem dışı burkulma yapma eğilimi göstermez. Bunun yerine bu gruptaki modeller daha yüksek ötelenme oranı seviyelerine ulaşarak kesme kuvveti altında plastik deformasyonlar görülür.

Kirişler incelendiğinde ise ortalama I_c/I_b değeri 3.8 ile diğer gruplar arasında en yüksek değeri almaktadır. Bu yüksek değer yukarıda anlatıldığı gibi plaka en – boy oranının az olması dolayısı ile baskılanmıştır ve düzlem dışı burkulmalar olmadan yüksek ötelenme oranlarına kadar ulaşılmıştır. Ortalama b_f/h_b oranı 0.68'dir ki bu tüm grupların en düşük ortalama değeridir. Sadece altı modelde I_c/I_b oranı 2.14'ten azdır. Bu modellerde

kiriş rijitliği değeri nispeten büyük olmasına rağmen düşük b_f/h_b oranı ile göçme mekanizması oluşur.

Yukarıda da bahsedildiği gibi bu göçme mekanizmasının oluşumuna yol açan ana parametre kombinasyonu, kolonlar için düşük ω_i, kirişler için yüksek I_c/I_b ve düşük b_f/h_b oranlarıdır. Burada Şekil 4.10(i)'de görüldüğü gibi b_f/h_b oranı ile V_p/V_t oranının iyi bir korelasyonu vardır. b_f/h_b oranı arttıkça V_p/V_t oranı da artmaktadır. Yüksek V_p/V_t oranına sahip modeller genel olarak daha düşük ötelenme kapasitelerine sahip modellerdir. Bu korelasyon özellikle diğer kirişlere bağlı olan göçme mekanizmalarında da görülmektedir. Modellerin özel olarak incelenmesi sonucunda korelasyonun $b_f/2t_f$ oranı ile tetiklendiği görülmüştür. Bu ilişkinin gözlemlendiği bütün mekanizmalarda yüksek b_f/h_b oranına sahip modellerin hepsi grubun en yüksek $b_f/2t_f$ oranına sahip modellerindendir. $b_f/2t_f$ oranı yükseldikçe kiriş flanşının genişliği ile kalınlığının oranı artmış olur. Bu nedenle kiriş flanşı narinleşerek yerel burkulmalara karşı daha az direnç göstermektedir. Yerel burkulmalar ise genel göçme mekanizmasını başlatmaktadır. Bu göçme mekanizması için b_f/h_b oranının yüksek olduğu modellerde göçme mekanizması üst kiriş flanşının burkulması ile başlarken düşük olduğu modellerde kirişin gövdesinde başlayan burkulmalar mekanizmayı başlatmaktadır.

Bu göçme mekanizmasının oluşma aşamaları aşağıdaki gibidir;

• Çelik gövde levhasının tam akması,

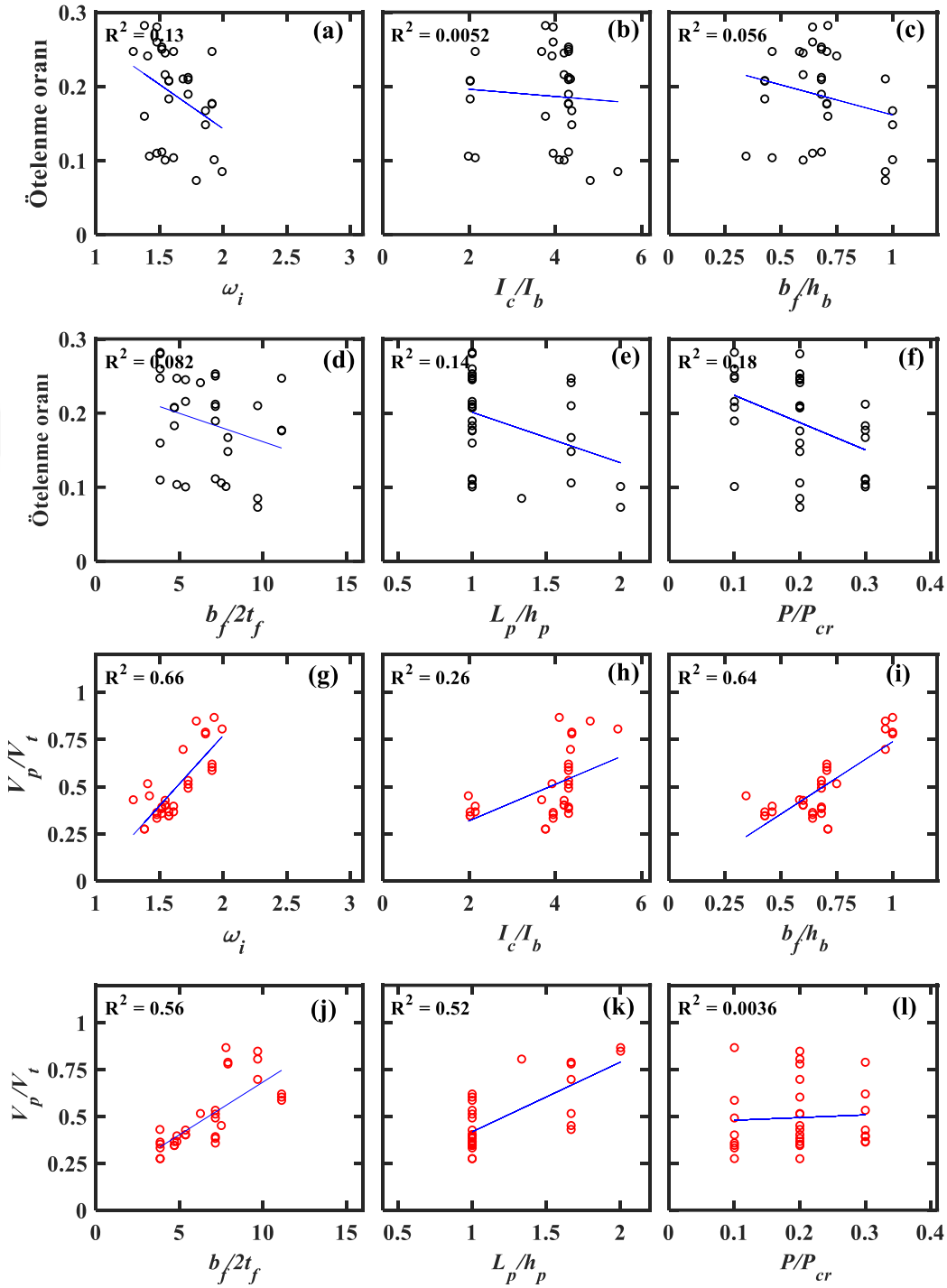
• Kiriş uçlarının akması,

• Kolon tabanında akma başlaması,

• Kiriş uçlarında plastik mafsal oluşumu,

• Üst kiriş ucunun içe doğru yüksek deformasyonu.

• Kolon tabanında plastik mafsal oluşumu veya kolonun düzlem içi global burkulması.



Şekil 4.10. Üst kiriş kesme burkulması grubu için tasarım parametrelerinin ötelenme oranı ve V_p/V_t oranı ile ilişkileri.

Genel bir sonuç olarak b_f/h_b oranının artması sistem davranışını eğer $b_f/2t_f$ oranı da yüksek ise negatif yönde etkiler. Bu iki parametre eğer b_f/h_b oranı yüksek (≈1) ama

$b_f/2t_f$ düşük olacak şekilde tanımlanırsa göçme mekanizmaları genellikle kirişlerde oluşmaz.

Burada son iki mekanizma aşaması gelişme sıralaması bazı modellerde farklılık gösterebilir. Üst kirişin daha önce hasar aldığı modellerde nihai ötelenme diğer duruma göre daha azdır.

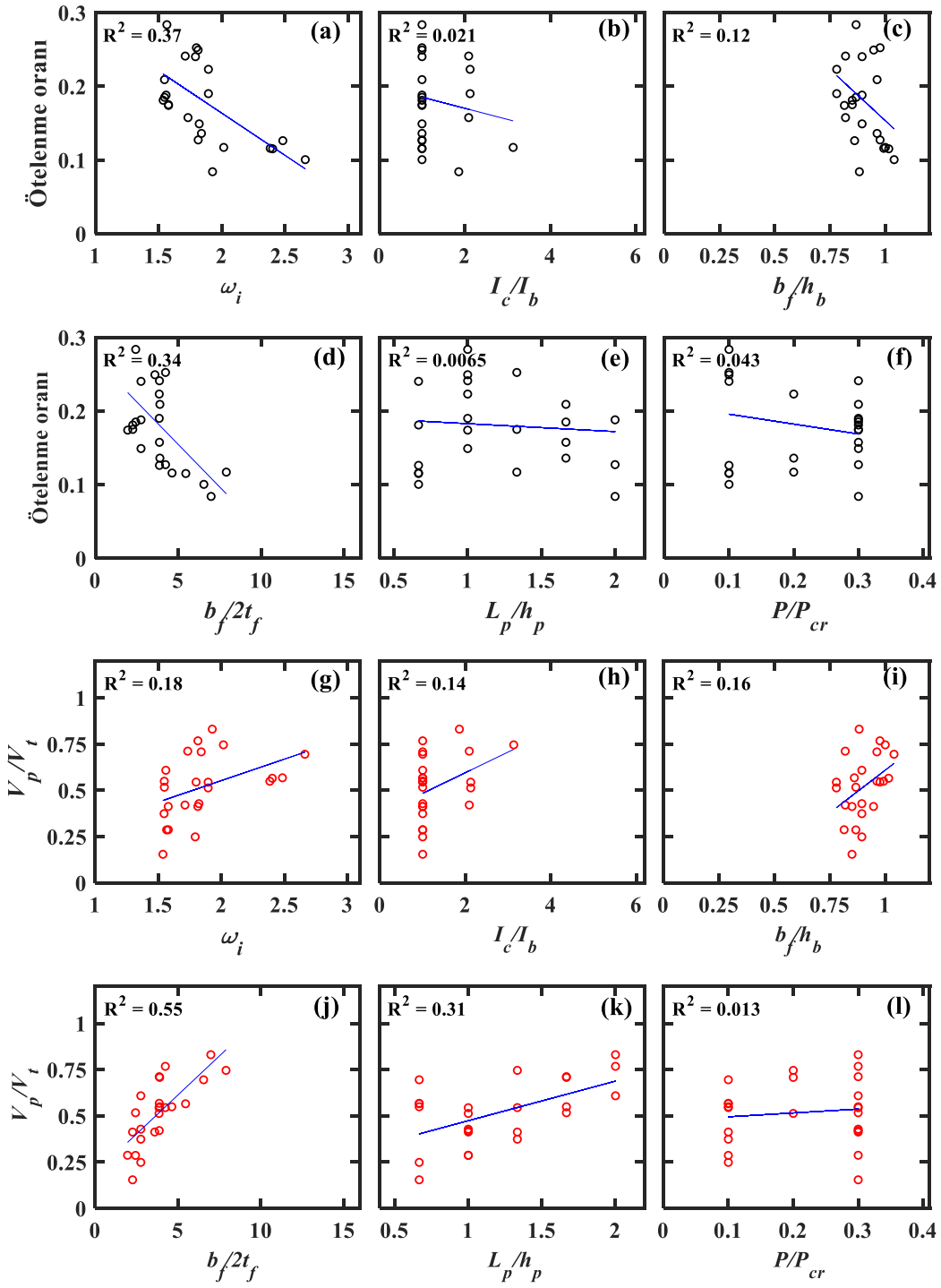
Şekil 4.10(g)'da gösterildiği gibi modellerin çoğunda V_p/V_t oranı 0.7'den azdır. Şekil 4.10(g)'deki kolon ω_i değeri ile V_p/V_t oranı arasındaki dağılıma göre bu parametreler arasında iyi bir korelasyon vardır. Diğer gruplarda da olduğu gibi ω_i değeri arttıkça V_p/V_t oranı da artmaktadır. Grup içerisinde yüksek ω_i ile karakterize edilen beş modelde V_p/V_t oranı 0,7'nin üzerindedir. Ayrıca bu beş modelin b_f/h_b oranının yaklaşık 1 olduğu görülmüştür ki bu değer grup ortalamasının (0.68) çok üzerindedir. Aynı zamanda bu modellerin L_p/h_p oranları da yüksektir. Şekil 4.10(j)'deki $b_f/2t_f$ oranına bakıldığında diğer gruplara nazaran daha iyi bir korelasyona sahip olduğu görülmektedir. Genellikle güçlü kolonlu modelleri içeren bu grupta kiriş genişliğinin kiriş kalınlığına olan oranındaki artış üst kirişin daha erken deforme olmasına neden olur.

4.2.6. Kolon kesme burkulması

Bu gruptaki modeller Şekil 4.4(f)'de gösterildiği gibi birinci kat kolonunda bir kesme deformasyonu gösterir. Göçme mekanizması sonucunda düşey sınır elemanı üzerinde belirgin deformasyon meydana gelir. Bu deformasyon düzlem içidir ve basınç altındaki kolonun kiriş – kolon birleşimine yakın olan üst ucunda oluşur.

Bu model grubunun en belirgin özelliklerinden biri düşük kolon esneklik parametresine sahip olmalarıdır. Şekil 4.11(a) ve (g)'de görüldüğü gibi sadece dört model 2.0'den büyük kolon esneklik parametresine sahiptir. Grup ortalaması ise 1.85'tir. Bu dört model en düşük plaka en boy oranına (L_p/h_p=0.67) ve en küçük I_c/I_b değerine (1.0) sahip modellerdir. Bu grupta gövde plakası en – boy oranı ortalama değeri 1.20 ile tüm gruplar arasında en düşük ortalamalardan biridir. Düşük açıklıklı ve rijitliği yüksek kirişlerin neden olduğu yüksek kesme kuvvetleri ve bu kuvvetlere zıt yönde olan çelik gövde levhasından gelen kuvvetler kolonun kesme kuvvetleri altında göçmesine yol açar. Bu

sonuç, rijit kolonlar ve ($\omega_i \leq 2.0$) yaklaşık olarak eşit atalet momentine sahip kirişler ($I_c/I_b \approx 1.0$) kullanılarak tasarım yapıldığında genel olarak kirişlerde büyük plastik deformasyonlar görülmeden göçmenin kolon üst kısmında meydana geldiğini göstermektedir.



Şekil 4.11. Kolon kesme burkulması grubu için tasarım parametrelerinin ötelenme oranı ve V_p/V_t oranı ile ilişkileri.

Kiriş elemanlarının ortalama I_c/I_b değeri 1.30 dur ve bu bütün gruplar içerisinde en düşük değerdir. Bu, kolon ve kiriş kesitlerinin atalet momenti açısından en çok bu grupta birbirine yakın olduklarını gösterir. Buna ek olarak bu gruptaki modeller düşük $b_f/2t_f$ oranına sahiptirler. Ortalama $b_f/2t_f$ açısından yine diğer gruplar arasında 3.87 ile en düşük orana bu gruptaki modeller sahiptir. Bu da modellerin yüksek derecede kompakt olduklarını gösterir. b_f/h_b ortalaması 0.9 olup Şekil 4.11(c) ve (i)'den görülebileceği gibi en düşük değer 0.78'dir.

Bu grubun ortalama nihai ötelenme oranı 0.18'dir. Bu değer en yüksek ortalama nihai ötelenme değerlerinden biridir. Bu gruptaki gibi düşük ω_i' ye sahip modeller için kolon kesme göçmesi yalnızca tüm veri setinde en düşük I_c/I_b oranına ve en düşük genişlik-kalınlık oranına $b_f/2t_f$ sahip kiriş kesitleri kullanılarak meydana gelebilmiştir. Gerçekleşen göçme mekanizması aşamaları genel olarak aşağıdaki gibi sıralanmaktadır;

• Çelik gövde plakasında tam akmanın meydana gelmesi,

• Kiriş uçlarında akma meydana gelmesi,

• Kolon tabanında akmanın başlaması ve kolon yüksekliği boyunca ilerlemesi,

• Kolon üst seviyesinde içe doğru düzlem içi plastik deformasyon meydana gelmesi.

Şekil 4.11(g-l)'de gösterildiği gibi bu gruptaki sadece iki modelin V_p/V_t oranı 0.75'in üzerindedir. Şekil 4.11(g)'de görüldüğü gibi, kolon esneklik parametresi ω_i'ye karşı çizilen V_p/V_t oranları diğer grupların çoğuna göre daha az derecede bir korelasyona sahiptir. Plaka en – boy oranı ile V_p/V_t ilişkisi ise Şekil 4.11(k)'de görüldüğü gibi diğer gruplara benzer bir korelasyona sahiptir. Plakanın en boy oranı arttıkça V_p/V_t oranı da artar. Yine $b_f/2t_f$ oranı da V_p/V_t oranı ile orantılı bir şekilde artmaktadır. En yüksek $b_f/2t_f$ oranına sahip modeller incelendiğinde bu modellerin en yüksek ω_i değerine sahip olduğunu görülmüştür. Bu durum beklenilebileceği gibi göreceli olarak daha güçlü kolonlarda daha kompakt (sıkı) olan kirişlerin kesme deformasyonuna neden olabileceği sonucunu ortaya çıkarır. Daha zayıf kolonların ve kirişlerde daha yüksek bir $b_f/2t_f$

oranının kullanılması genel olarak tüm sistemin kesme dayanımına yüzde olarak çerçeve katkısını azaltır.

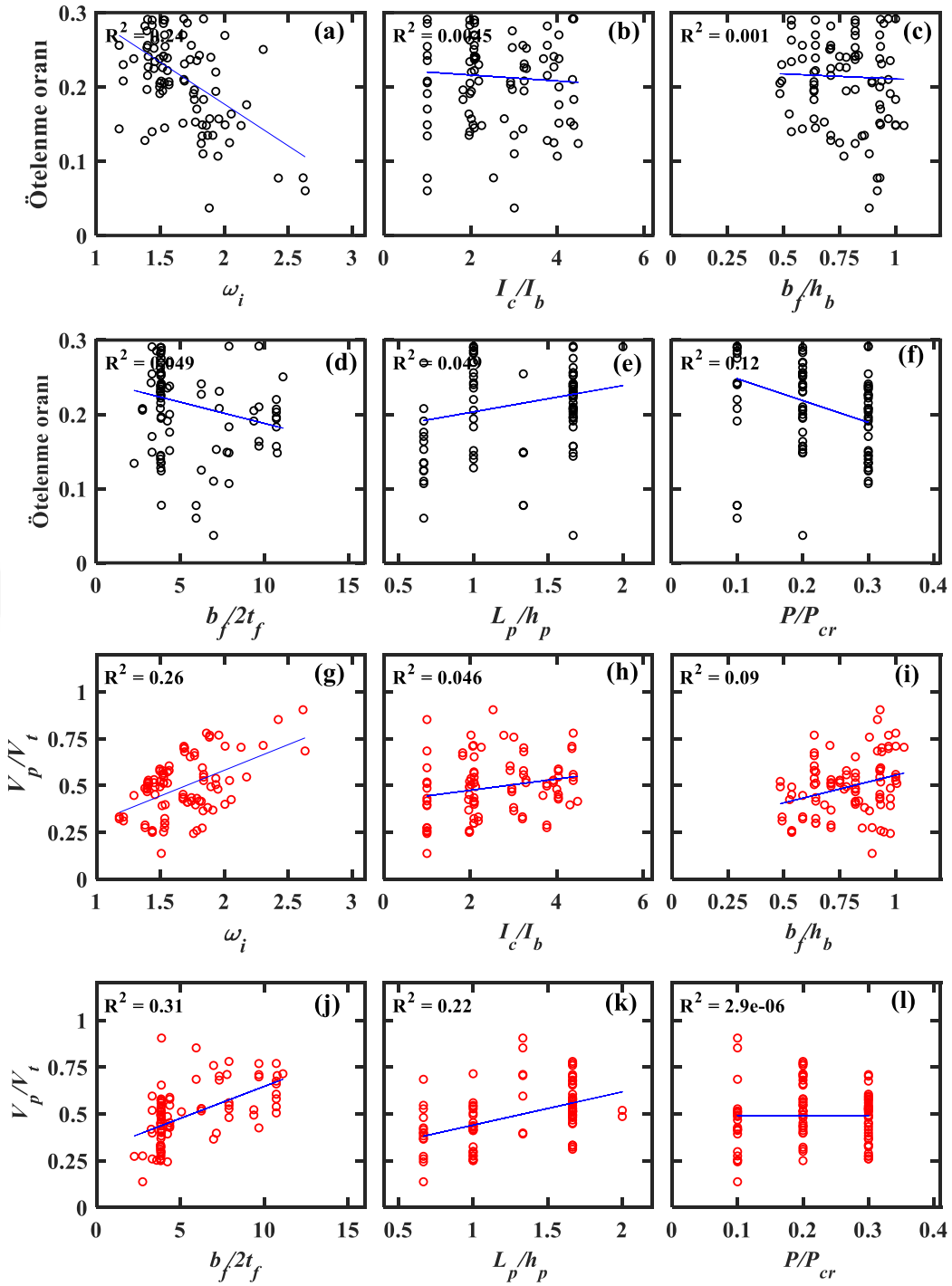
Özet olarak bu grup diğer gruplara nazaran en güçlü kiriş kesitlerine sahip modellerinden oluşur. Ayrıca düşük gövde plakası en – boy oranına sahip bu modellerde kirişlerin açıklıkları da düşüktür. Fakat kolon esneklik parametresinin 2'nin altında tutulması nihai ötelenme açısından oldukça tatmin edici sonuçlar doğurmuştur.

4.2.7. Kolon global burkulması

Kolonun global burkulma durumunda kolon Şekil 4.4(g)'de gösterildiği gibi kesit şeklini bozmadan boyuna eksen boyunca deforme olur. Ortalama eksenel yük oranı gruplar arasında en yüksek olanlardan biri olan 0.22'dir. Şekil 4.12(e) ve (k)'de L_p/h_p oranında geniş bir varyasyon görülmektedir. Dağılımı Şekil 4.12(a) ve (g)'de gösterilen kolon esneklik parametresi ortalaması ise 1.67'dir. Bu gruptaki modellerin sadece %4'ü 2.2'den büyük ω_i değerlerine sahiptir. Bu göreceli daha zayıf kolonlara sahip modellerde eksenel yük seviyesi ve plaka en – boy oranı gruptaki diğer modellere göre düşüktür.

Kiriş parametreleri incelendiğinde bu grubun ortalama I_c/I_b oranı (≈2.57) kolon kesme göçme grubundan daha yüksek, üst kiriş kesme göçme grubundan daha düşüktür. Bu sayede üst kirişler kuvvetlere karşı daha iyi performans gösterirken katlar arası kirişler kolondan önce plastik mafsallar oluşturarak nihai ötelenmenin artmasını sağlarlar. Diğer parametreler nihai ötelenme oranı ve plaka kesme oranı açısından öbür gruplarla benzer eğilimler gösterir. Bu gözlemlere dayanarak I_c/I_b oranının göçme mekanizmasının gelişimini etkileyen önemli bir parametre olduğu sonucuna varılmıştır.

Düşük kolon esneklik parametresi ile tasarlanan çelik levhalı perde duvarlar bu göçme mekanizması tipinde olduğu gibi yüksek seviyelerde eksenel yüke maruz kalsa bile yüksek ötelenme kapasitesine sahip olabilir. Parametreler ile ilişkileri Şekil 4.12(a-f)'de verilen nihai ötelenme oranı ortalaması 0.21'dir. Bu sonuç, tüm modeller içerisinde ötelenme kapasitesi açısından en başarılı göçme mekanizmasının bu gruptaki mekanizma olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.12. Kolon global burkulması grubu için tasarım parametrelerinin ötelenme oranı ve V_p/V_t oranı ile ilişkileri.

Bu grupta baskın olarak gözlemlenen göçme mekanizması oluşumu aşamaları aşağıdaki gibidir;

• Çelik gövde levhasının tamamen akması,

• Kiriş uçlarının akması,

• Kolon tabanında akma başlangıcı,

• Kiriş uçlarında plastik mafsal oluşumu,

• Kolon global burkulması.

Modellerin yaklaşık %94'ü Şekil 4.12(g-l)'de gösterildiği gibi 0.75'in altında bir V_p/V_t oranına sahiptir. Ortalama V_p/V_t oranı 0,49 olup diğer gruplar arasında en düşük oranlardan biridir. V_p/V_t oranı $b_f/2t_f$ ile iyi bir korelasyona sahiptir ve Şekil 4.12(j)'de gösterildiği gibi daha yüksek $b_f/2t_f$ oranı ile birlikte artar.

Genel olarak, bu göçme tipi üst kiriş kesme göçmesi grubuyla karşılaştırılabilir parametre ortalama değerlerine sahiptir. Nihai ötelenme oranını negatif etkileyen yüksek ω_i ve L_p/h_p için ortalama değerlerinin üst kiriş kesme göçme grubundan daha yüksek olmasına rağmen daha iyi öteleme performansının ana nedeni, bu grupta seçilen kirişlerin kolonlarına oranla daha rijit (ortalama I_c/I_b=2.57) olmasıdır.

4.2.8. Sonuçların genel değerlendirmesi

Çizelge 4.1‘de çelik levhalı perde duvarlarda farklı davranış türlerine yol açan ve göçme mekanizmalarını etkileyen parametrik ilişkiler hakkında daha iyi fikir edinmek için sonuçlar özetlenmiştir. Bu sayede, ön tasarım yönetmelik denklemlerinde ele alınmayan eksenel yük seviyesi etkileri de değerlendirilebilir. Bu çizelgede yedi grup için hesaplanan bağımlı ve bağımsız değişkenlerin ortalama değerleri verilmektedir. Çizelge 4.1'de, göçme mekanizması grupları istenmeyen göçme mekanizmasından iyi performans gösteren göçme mekanizmalarına göre sıralanmıştır. Bu sayede kolon esneklik parametresi de göçme mekanizmaları ile güçlü ilişkisinden dolayı azalan şekilde sıralanmıştır. Ayrıca ω_i ve V_p/V_t oranı arasındaki güçlü korelasyon nedeniyle, grup ortalama V_p/V_t değerleri de azalan şekilde dizilmesine sebep olmuştur. En yüksek ω_i değerine sahip ilk üç grup, kolon yerel flanş hasarlarından etkilenen göçme mekanizmaları halinde sıralanmıştır. Bu göçme mekanizmalarında L_p/h_p oranı orta şekilde

(≈1.50) karakterize olmuştur. Kolon stabilitesi problemi olan bu modeller düşük ω_i ve yüksek V_p/V_t oranına sahiplerdir. Düşük I_c/I_b oranları ve $b_f/2t_f$ oranları, yani kolonlara göre nispeten güçlü kirişler de bu göçme modlarının ortak parametrik özellikleridir.

Çizelge 4.1. Göçme mekanizmalarına göre tasarım parametrelerinin ortalama değerleri.

No	Göçme mekanizması	DR	V_p/V_t	ω_i	L_p/h_p	P/P_{cr}	I_c/I_b	b_f/h_b	$b_f/2t_f$
1	Kolon düzlem dışı burkulması	0.04	0.89	2.46	1.50	0.21	1.58	0.97	8.49
2	Kolon eğilme-burulma	0.07	0.82	2.38	1.22	0.18	2.00	0.99	8.35
3	Kolon flanş yerel burkulması	0.11	0.78	2.14	1.51	0.18	2.45	0.96	8.37
4	Üst kiriş düzlem dışı burkulması	0.09	0.65	1.70	1.70	0.14	3.22	0.77	7.56
5	Üst kiriş kesme burkulması	0.18	0.49	1.63	1.20	0.20	3.80	0.68	6.62
6	Kolon kesme burkulması	0.18	0.52	1.85	1.20	0.21	1.30	0.90	3.87
7	Kolon global burkulma	0.21	0.49	1.67	1.30	0.22	2.57	0.78	5.47

Çizelge 4.1'deki son üç göçme modu, yüksek ötelenme kapasiteli ve düşük V_p/V_t oranına sahip olup kolon ve üst kiriş düzlem içi deformasyonları ile ilgilidir. Bu davranışların ana nedenleri, düşük kolon esneklik parametresi (daha güçlü düşey sınır elemanları) ve düşük L_p/h_p oranıdır (dar ÇLPD). Ayrıca kolonların yüksek I_c/I_b oranı ve yüksek $b_f/2t_f$ oranı ile karakterize edilen, kirişlerden daha güçlü olması bu göçme modlarının ortaya çıkmasına katkı sağlamaktadır.

Çizelge 4.1'deki dördüncü ve beşinci göçme mekanizmaları ayrı ayrı değerlendirilmelidir. Yüksek en-boy oranlı çelik levhalı perde duvarlarda orta derecede esnekliğe sahip kolonlar kullanıldığında, üst kiriş düzlem dışı burkulma deneyimleme eğilimindedir. Plakanın en – boy oranı azaldığında, üst kirişteki deforme olma durumu düzlem dışından düzlem içine doğru değişir. Bu davranışın bir diğer ana bileşeni olan I_c/I_b oranı, üst kiriş kesme burkulması için en yüksek değerleri almaktadır. Çizelge 4.1'de görüldüğü gibi düşük b_f/h_b oranları üst kiriş göçme modları üzerinde diğer parametrelerin etkisini artırmaktadır.

Tüm gruplar tek tek ele alındığında, çelik levhalı perde duvarların plaka ve çerçeve elemanlarının daha iyi ötelenme kapasitesi elde edebilmesi ve daha dengeli kesme kuvveti dağılımı için kolon esneklik parametresi için sınır değer olarak 2.1 değeri ortaya çıkmaktadır. Ötelenme oranı kapasitesi açısından, en düşük ötelenme kapasitesine sahip göçme modlarının ortalama ω_i değeri bu sınırın üzerindedir. Kolon esneklik

parametresi 2.1'den büyük olan modeller diğer parametreler tarafından belirli kriterlerin karşılanması ile yüksek ötelenme seviyelerine ulaşabilirler. 2.1'nin üzerindeki kolon esneklik parametresi yüksek L_p/h_p ve P/P_{cr} oranları kullanıldığında dahi iyi seviyede kolon esnekliği sağlar. Çelik levhalı perde duvarlar 2.1'den büyük ω_i değerleri kullanılarak tasarlandığında, diğer parametrelerin katkısı ile yük-deformasyon eğrisinde ani bir dayanım düşüşüne sahip olması daha olasıdır. Gövde plakasının kısmi akması ve kiriş ve kolonların ani düzlem dışı deformasyonları gibi istenmeyen göçme modlarının bu modellerde meydana gelme olasılığı daha yüksektir.

Yüksek kolon esneklik parametresi ile yüksek gövde plakası en – boy oranı kullanılması, yukarıda tartışıldığı gibi nispeten düşük ötelenme kapasitesine sahip göçme modlarının oluşmasına sebep olur. Çizelge 4.1'de en yüksek ötelenme kapasitesine sahip göçme modları en düşük L_p/h_p ortalama oranına sahiptir. Ancak bu geniş açıklıklı çelik levhalı perde duvarların güvenli bir şekilde kullanılamayacağını göstermemektedir. Diğer parametrelerle dikkatli bir şekilde birleştirildiğinde en-boy oranı yüksek olan duvarların çok yüksek ötelenme oranları elde ettiği görülmektedir. Örneğin, kolon esneklik faktörü 1.4 olan ve en yüksek plaka en boy oranına sahip (L_p/h_p=2.0) bir modelde, kolon yüksek bir öteleme seviyesine ulaşarak global burkulma göçme mekanizmasına sahip olabilmektedir. ω_i =1.96 ve L/h =1.67 olan başka bir model yine de en yüksek ötelenme oranı kapasitelerine sahip olabilir. Veri havuzunda bu örnekler çoğaltılabilir.

Düşey sınır eleman minimum atalet momenti tasarım denklemine göre aynı yükseklik ve gövde plakası kalınlığı için açıklık arttıkça sahip olunması gereken minimum kolon atalet momenti azalır. Yönetmeliklerde verilen bu denklemde hem dar hem de geniş açıklıklı çelik levhalı perde duvarlar için kolon esneklik parametresi sınırı 2.5 olarak kabul edilmiştir. Dolayısıyla, tasarım denklemi yüksek L_p/h_p oranına sahip modeller için minimum I_c değeri daha düşük olan kolonların kullanılmasına izin verir. Ancak bu çalışmanın sonuçlarına göre L_p/h_p oranı esnek kolonlarla birlikte kullanıldığında nihai ötelenme oranı açısından daha kötü performans gösterir. Bu nedenle, geniş açıklığa sahip ($L_p/h_p \geq 1.67$) çelik plaka perde duvarlar için sınırlayıcı ω_i değerini 2.1 olarak benimsemek daha güvenli tarafta kalacaktır. Aksi halde erken kolon deformasyonlarına bağlı olarak yüksek en-boy oranlı modellerde yetersiz çekme alanı

gelişimi olur ve gerilim üniformitesi azalır. Bu durumlarda daha rijit düşey sınır elemanlar kullanılarak gövde plakasının tamamen akması sağlanmalıdır.

292 model I_c/I_b oranı dikkate alınarak değerlendirildiğinde, ortalama I_c/I_b oranı en yüksek olan iki göçme grubu için de üst kirişte göçme meydana geldiği görülmektedir. En düşük I_c/I_b oranına sahip iki gruba bakıldığında ise sonuçlar göçmenin kolonlarda meydana geldiğini göstermektedir. İyi tasarlanmış çelik levhalı perde duvarlarda plastik deformasyonların önce kirişlerde daha sonra kolonlarda oluşması istenmektedir. Bu durumda I_c/I_b oranı kolon esneklik parametresine bağlı olarak seçilmelidir. Örneğin, kolon esneklik parametresi 2,1'den yüksek olan modeller için düşük bir I_c/I_b oranına ($\leq$ 2.0) izin verilmesi kirişlerde henüz plastik deformasyonlar görülmemişken kolonlarda ani göçme ile sonuçlanabilir (kolonun düzlem dışı burkulması ve eğilme-burulma burkulması). Bu çalışmada I_c/I_b oranı için bir üst sınır önerilmemektedir. Üst kirişin rijitliği artırılarak yüksek I_c/I_b değerlerine sahip model davranışı iyileştirilebilir. I_c/I_b oranı 3.0'ın üzerinde olduğunda üst ankraj kirişi rijitliği, kolon ve gövde plakası kaynaklı kuvvetlere direnecek kadar yüksek olmalıdır.

Eksenel yük oranı gruplar özelinde değerlendirilmek istenildiğinde tartışması zor ve güçlü korelasyonları olmayan bir parametredir. Fakat genel olarak tüm grupların ortalamaları değerlendirildiğinde bazı sonuçlara ulaşılabilmektedir. Beklendiği gibi eksenel yük oranı arttıkça ötelenme oranı kapasitesi azalır. Yüksek eksenel yüke sahip modeller için, daha yüksek ötelenme seviyeleri elde etmek için düşük kolon esnekliğine sahip kolonların kullanılması gereklidir. Örneğin kiriş burkulması ve kolon kesme burkulması gruplarının ortalama eksenel yük değerleri eşit (2.21) olmasına rağmen bu grupların ortalama ötelenme oranı kapasiteleri sırasıyla 0.04 ve 0.18'dir. Burada kolon esneklik faktörü en baskın etkiyi göstermektedir. Ancak diğer parametrelerin de bu farklılığın ortaya çıkmasında etkili olduğu açıktır.

Göçme mekanizmaları sonuçlarına göre 0.75 değeri V_p/V_t oranı için belirleyici bir sınır olarak ortaya çıkmaktadır. Bu oran 0.75'in üzerinde olduğunda, gövde plakası tamamen akmadan önce sınır elemanları göçme eğilimi gösterir. Kısmen akmış plakalar çelik levhalı perde duvar tasarım felsefesine uymamakta ve düzensiz gerilme alanları oluşturarak istenmeyen sistem davranışlarına neden olmaktadır. Sınır çerçevenin toplam

kesme kuvvetine katkısı, genellikle kolon esneklik parametresi ve çelik gövde levhası en – boy oranı ile güçlü bir korelasyon gösterir. Her iki parametredeki artış, gövde plakasının yük dağılımındaki payında artışa neden olur. ω_i ve L_p/h_p oranı V_p/V_t oranındaki en etkili parametreler olsa da diğer parametrelerin de bu oran üzerinde makul bir etkisi vardır. Tasarım parametreleri kullanılarak V_p/V_t oranının tahmini için 292 analiz verilerinin tümü kullanılarak lineer regresyon analizi yapılmış ve aşağıdaki denklem türetilmiştir. Regresyon uyumunun R-kare değeri 0.96 olup oldukça yüksek güvenilirliktedir.

$$\frac{V_p}{V_t} = 0.43\omega_i + 0.025\frac{I_c}{I_b} + 0.077\frac{b_f}{h_b} + 0.0056\frac{b_f}{2t_f} + 0.29\frac{L}{h} + 0.11\frac{P}{P_{cr}} - 0.773 \qquad (4.1)$$

4.3. Yönetmelik Denklemlerinin ve Önerilerinin Değerlendirilmesi

Bu bölümde sonlu eleman analizlerinden elde edilen veriler kullanılarak ön tasarımda kullanılan bazı denklemlerin ve önerilerin yeniden değerlendirilmesi yapılmıştır. Buna göre plaka kesme kuvvetinin toplam sistem dayanımına oranı, çekme alanı eğim açısı ve toplam sistem kesme kuvveti denklemleri irdelenmiştir.

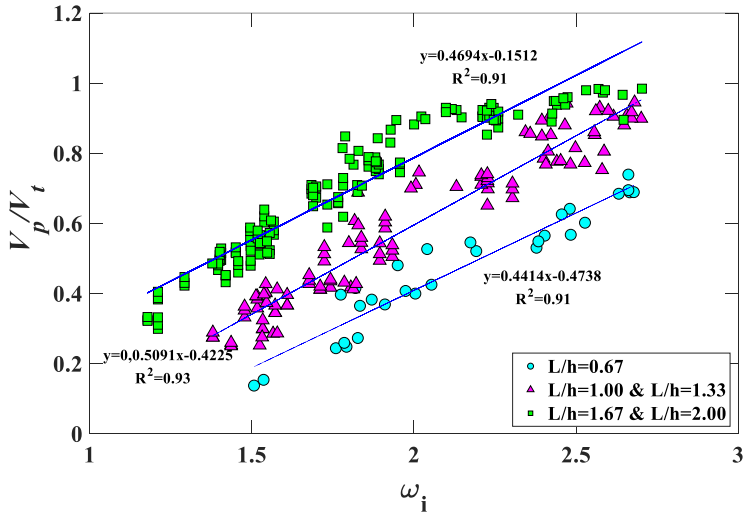
4.3.1. Plaka kesme kuvveti – toplam sistem kesme kuvveti oranı

Yönetmeliklerde bu oran için bir denklem sunulmamış olsa da AISC-2016 (2016)'da bu oranın %75 oranında olması tavsiye edilmektedir. Parametrelerin global sistem davranışı üzerindeki etkilerini daha detaylı incelemek için V_p/V_t oranı üzerinde bir çalışma yapılmıştır. Şekil 4.13'te görüldüğü gibi analizlerden elde edilen V_p/V_t oranları kolon esneklik parametresine göre çizdirilmiştir. 292 model, gövde plakası en – boy oranları dikkate alınarak üç gruba ayrılmıştır. Buna göre birinci gruptaki modellerin L_p/h_p oranları 0.67, ikinci gruptaki modellerin L_p/h_p oranları 1.00 ve 1.33, son grubun L_p/h_p oranları ise 1.67 ve 2.00'dir.

Analizlerden gelen yük – deplasman grafiklerinden elde edilen yaklaşık akma yer değiştirmesinde hesaplanan V_p/V_t oranlarının kolon esneklik parametresi ile doğru orantılı olduğu görülmüştür. Ayrıca L_p/h_p oranı arttıkça plaka tarafından taşınan kesme kuvveti yüzdesinin de arttığı görülmüştür. V_p/V_t oranını belirlemede ω_i ve L_p/h_p oranı

parametrelerinin etkisi çok fazladır. Her üç veri seti de farklı eksenel yüklere ve farklı plaka kalınlığına sahip modellerden oluşmasına rağmen oldukça iyi korelasyonlar göstermektedirler. Plaka kesme kuvvetinin toplam sisteme katkısını tahmin edebilmek için verilen denklem 4.1 basitleştirilmiştir ve aşağıdaki denklemde verilmiştir;

$$\frac{V_p}{V_t} = 0.44 \times \omega_i + 0.31 \times \frac{L}{h} - 0.64 \tag{4.2}$$

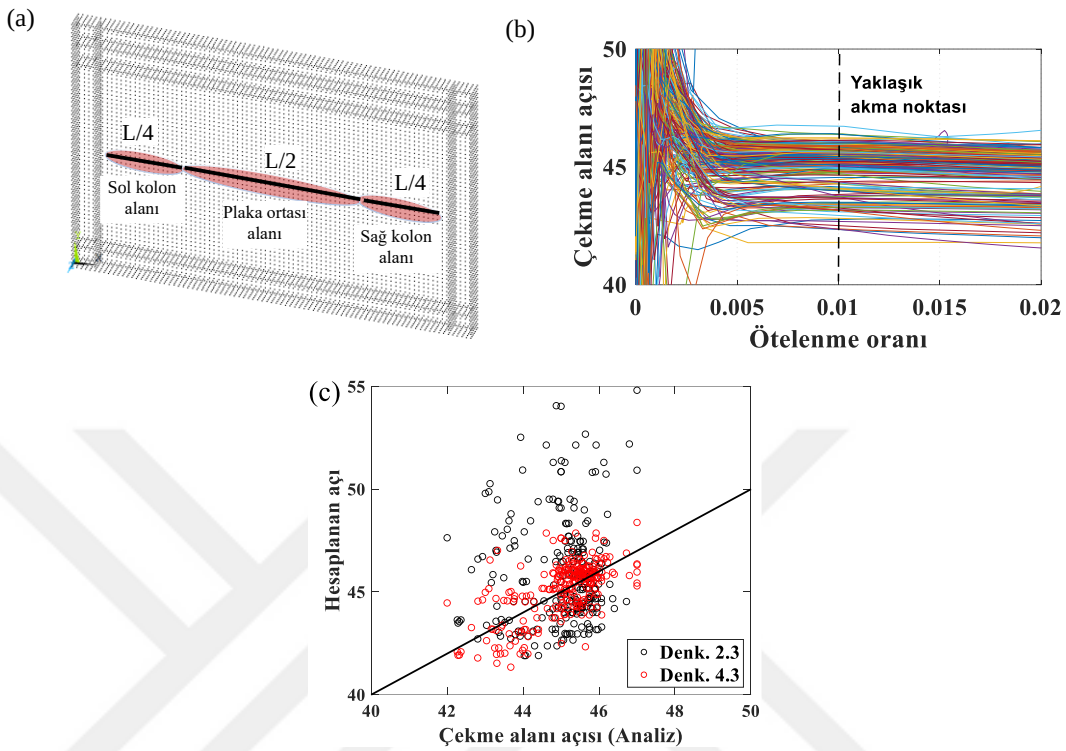


Şekil 4.13. Kolon esneklik parametresi ve V_p/V_t ilişkisi.

4.3.2. Çekme alanı eğim açısı

Bu bölümde çekme alanı eğim açısının aldığı değerler incelenmiştir. Her üç katta da çekme alanı eğim açıları hesaplanmış fakat bu bölümde sadece ilk kat eğim açıları incelenmiştir. Çekme alanı eğim açısı iki şekilde hesaplanmıştır. Birinci durumda plaka üzerinde oluşan asal gerilme açıları kullanılmıştır. İkinci durumda ise plakalarda oluşan asal gerinimler kullanılmıştır. Plaka üzerinde hesaplama yapılırken kolon elemanlarına yaklaştıkça eğim açısı çok farklı varyasyonlar göstermiştir. Kolon etkisini azaltmak ve daha doğru sonuçlar elde etmek için eğim açıları plakanın orta bölgesinde hesaplanmıştır. Şekil 4.14(a), gerilim alanı eğim açılarının hesaplandığı orta plaka bölgesini göstermektedir. Sol ve sağ kolon alanlarının genişliği $L_p/4$ ve orta plaka alanı $L_p/2$'dir. Gövde plakası çekme alanı mekanizması göz önüne alındığında asal gerilme ve düşey doğrultu arasında kalan açılar çekme alanı eğim açıları olarak hesaplanmıştır. Her iki (asal gerilme ve asal gerinim) açıları karşılaştırılmış ve asal gerinim açılarının daha stabil ve

güvenilir olduğu görülmüştür. Bütün modeller için hesaplanan birinci kat orta bölge çekme alanı eğim açıları Şekil 4.14(b)'de sunulmuştur.



Şekil 4.14. (a) Çekme alanı eğim açısı hesaplaması için kullanılan alanlar, (b) çekme alanı eğim açısı ve ötelenme oranı ilişkisi, (c) düzeltme katsayısı ve düzeltme katsayısı olmadan hesaplanan çekme alanı eğim açılarının sonlu eleman analiz sonuçları ile karşılaştırılması.

Sonuçlara göre AISC-341-2016 tarafından ön tasarımda kullanılmasına izin verilen 40° değeri konservatif bulunmuştur. Elde edilen sonuçlar 45°'lik bir açı varsayımının daha gerçekçi olduğunu ortaya koymuştur. Tüm modeller 42° ile 47° arasında bir çekme alanı eğim açısı geliştirmişlerdir. Yönetmelik denklemi ile hesaplanan açı değeri ile sonlu eleman analizinden elde edilen sonuçlar arasındaki farkın 14°'ye kadar çıkabildiği görülmektedir. Denklem 4.3'te görüldüğü gibi yönetmelikte bulunan denklem (Denklem 2.3) bir β katsayısı ile iyileştirilmiştir.

$$\tan^4 \alpha = \beta \cdot \frac{1+\dfrac{t_w L}{2A_c}}{1+t_w h\left[\dfrac{1}{A_b}+\dfrac{h^3}{360 I_c L}\right]} \tag{4.3}$$

Denklem 4.3'teki β katsayısı L_p, h_p, I_c, I_b ve ω_i parametreleri kullanılarak aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır;

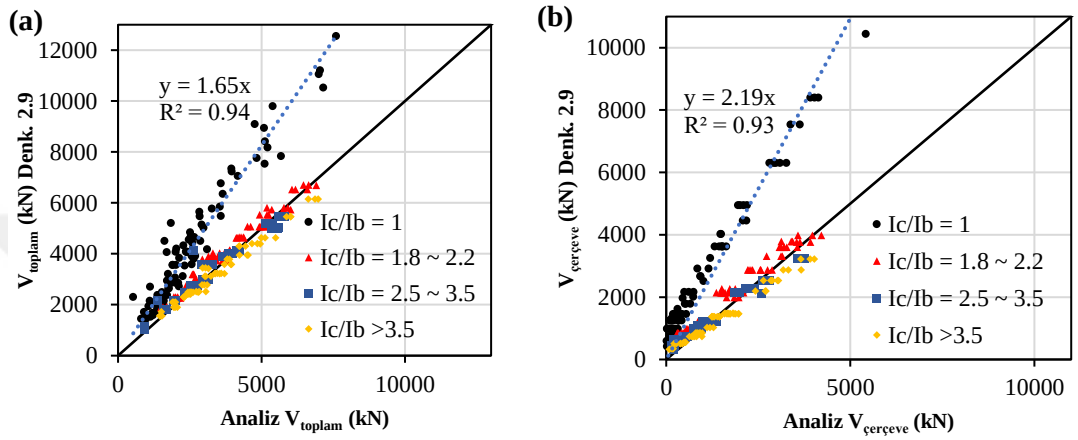
$$\beta = 2.5575 - 0.573\frac{L_p}{h_p} - 0.526\omega_i + 0.0504\frac{I_c}{I_b} \tag{4.4}$$

Düzeltme katsayısının uygulandığı formülden (Denklem 4.3) hesaplanan değerler, yönetmelik denklemi ile hesaplanan değerler ve sonlu elemanlar analizinden gelen değerlerin karşılaştırması Şekil 4.14(c)'de gösterilmiştir. Buna göre sonlu eleman analizi sonuçları ele alındığında β katsayısının tahmin kesinliğini büyük ölçüde geliştirdiği görülmüştür.

4.3.3. Sistem kesme kuvveti

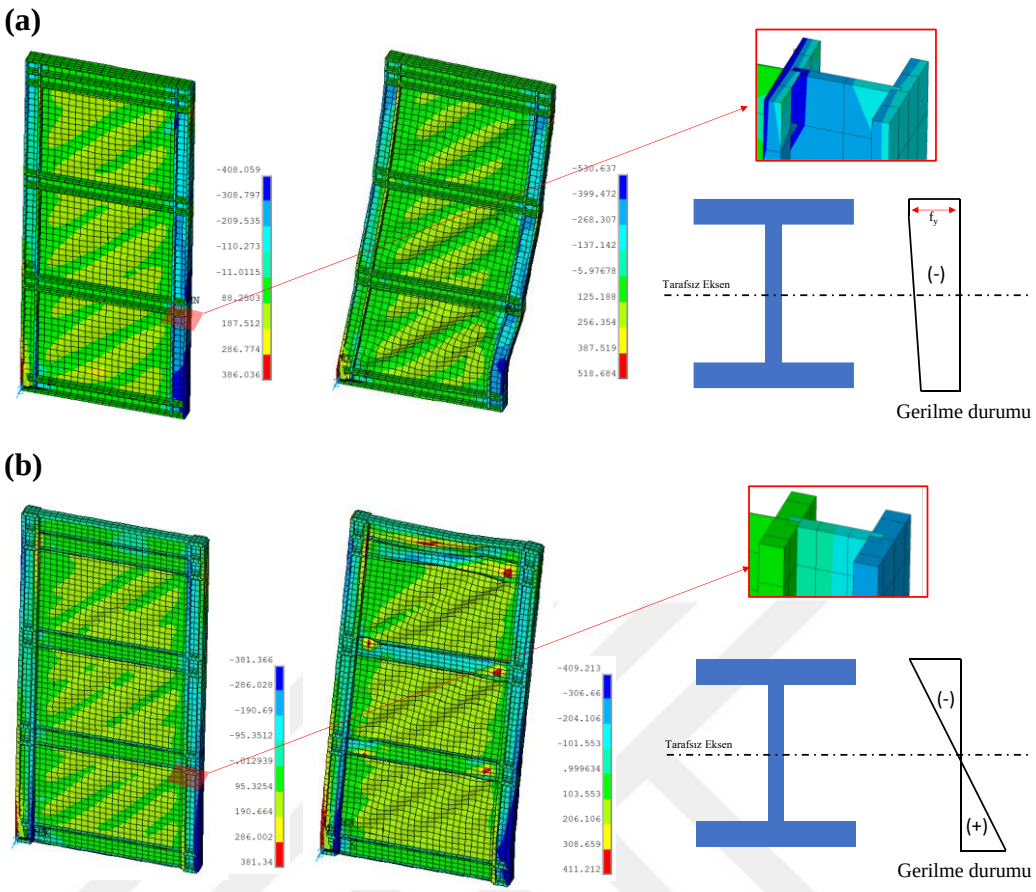
Daha önce bahsedildiği gibi, yönetmeliklerde gövde düzlemine dik alınan bir eksen etrafındaki atalet momentlerine dayalı yatay sınır elemanlarının seçimi için formüller içermesine rağmen, sabit gövde plaka kalınlıkları bu denklemleri kullanmamızı engeller. Bu bölümde tüm analiz modelleri I_c/I_b oranlarına göre belirli gruplara ayrılmıştır ve bu gruplar için denklem ile hesaplanan toplam kesme kuvveti analizden gelen kuvvetler ile karşılaştırılmıştır. Grupların I_c/I_b değerleri 1'e eşit, 1.8 ile 2.2 arası, 2.5 ile 3.5 arası ve 3.5'ten büyük olacak şekilde ayarlanmıştır. Her grup için, Denklem 2.9'dan toplam kesme kuvveti kapasiteleri hesaplanmıştır. Bu hesaplanan sonuçlar ile analizden gelen sistem maksimum dayanım verileri Şekil 4.15(a)'da karşılaştırılmıştır. Bu şekilde görüldüğü gibi, I_c/I_b =1 dışında, Denklem 2.9 ile hesaplanan kesme kapasiteleri ve sonlu eleman analizi sonuçları çok iyi bir uyum içindedir. Bu aşamada toplam kesme kuvvetindeki bu farkın plakadan mı çerçeveden mi kaynaklandığını belirleyebilmek için her modelde plaka ve yatay sınır eleman üzerindeki kuvvetler ayrı ayrı hesaplanmış ve hesaplanan değerler denklemdeki ilgili bölüm ile karşılaştırılmıştır. Çerçeve kuvvetleri üzerinden alınan sonuçlar Şekil 4.15(b)'de görülmektedir. Bu sonuçlara göre Denklem 2.9'da çerçeve kuvvetini hesaplamak için kullanılan $4M_p/h_s$ kısmının I_c/I_b oranı 1 olduğunda yaklaşık olarak 2 kat daha fazla bir kuvvet hesaplamaktadır.

Denklem 2.9'da çerçevenin çelik levhalı perde duvarların toplam kesme dayanımına katkısı, plastik mafsal mekanizmasının kolon uçlarında geliştiği yumuşak kat varsayımıyla $4M_p/h_s$ olarak hesaplanmıştır. Bu çalışmada Denklem 2.9 uygulanırken M_p değeri kiriş veya kolon kesitlerinin plastik momentlerinin küçük olanına eşit olacak şekilde hesaba katılmıştır. Bu şekilde kullanıldığında formülün I_c/I_b oranının 1'e yakın olduğu modeller haricinde başarılı bir şekilde tutarlı olduğu görülmüştür.



Şekil 4.15. (a) Denklem 2.9'dan ve analizden elde edilen toplam kesme kuvveti dağılımı karşılaştırması ve (b) Denklem 2.9 ve analizden gelen çerçeve kuvveti karşılaştırılması.

Denklemin çerçeve kesme kuvvetini olduğundan fazla tahmin ettiği durumlarda, çelik levhalı perde duvarda basınç tarafındaki kolon öncelikle eksenel kuvvetin etkisi altındadır. Kolon boyunca gerilmelerin dağılımı Şekil 4.16(a)'da gösterildiği gibi sadece kesit üzerinde küçük bir eğilme momentine sebep olur. Bu moment kolon uçlarında plastik mafsal oluşturmaya yetmez. Bu sırada artan eksenel kuvvet ve plaka kaynaklı yükleme, kolonun orta yükseklik seviyelerinde burkulmasına neden olur ve kolon üzerinde bir mafsal gelişir. $4M_p/h_s$ ifadesinde temsil edilen kolon uçlarında mafsallaşma şartı gerçekleşmez. Bu nedenle I_c/I_b değerinin 1'e yaklaştığı durumlarda kolonların toplam kesme kuvvetine katkısı yaklaşık olarak $2M_p/h_s$ olan bir değere düşer. Dolayısıyla, I_c/I_b oranı ≈1 ise Denklem 2.9'da verilen $4M_p/h_s$ ifadesi $2M_p/h_s$ olarak kullanılabilir. Şekil 4.16(b), I_c/I_b>1 olan bir model üzerindeki gerilme dağılımı gösterilmektedir. Zıt flanşlardaki çekme ve basınç kuvvetleri, kesite etki eden eğilme momentini oluşturmak için birlikte çalışır ve kolon veya kiriş kesitinde plastik moment kapasitesine ulaşılır. Dolayısı ile kolon veya kiriş uçlarında göçme meydana gelir.



Şekil 4.16. (a) I_c/I_b oranı 1'e eşit olan ve (b) I_c/I_b oranı 1'den büyük olan temsili modeller üzerinde gerilme dağılımları.

5. ÇLPD PARAMETRELERİNİN İYİLEŞTİRİLMİŞ ÇEVRİMSEL DAVRANIŞ İÇİN NÜMERİK OLARAK DEĞERLENDİRİLMESİ

Bu bölümde çelik levhalı perde duvarların çevrimsel yükleme altındaki davranışları incelenmiştir. Bunun için önceki bölümde olduğu gibi tasarım parametrelerinin değişik kombinasyonları kullanılarak birbirinden farklı sonlu eleman modelleri oluşturulmuştur. Analiz sonuçları modellerin göçme mekanizmaları, nihai ötelenme oranları ve plaka – çerçeve etkileşimleri açılarından değerlendirilmiştir.

Çelik levhalı perde duvarların, tasarım ötelenme limitlerinin üzerindeki göçme davranışı ve tasarım parametreleri arasındaki ilişki daha önceki çalışmalarda aynı çerçeve içerisinde detaylı olarak incelenmemiştir. Gövde plakası kalınlığı, gövde plakası en boy oranı, kolon esneklik parametresi, yatay sınır eleman (YSE) ve düşey sınır eleman (DSE) rijitlikleri ve uygulanan eksenel yük oranı gibi parametrelerin sistem deformasyon kapasitesi ve göçme davranışı üzerindeki etkileri araştırılmıştır.

Üç katlı ve moment taşıyabilen birleşimlere sahip sonlu eleman modeller monotonik ve çevrimsel yükleme altında analiz edilmiştir. Çelik levhalı perde duvarlar modellerin zayıf, orta ve gelişmiş yer değiştirme kapasitelerine ve enerji tüketme kapasitelerine sahip olmasını sağlayabilecek parametre kombinasyonları tasarlanmıştır. Daha sonra tasarım parametreleri kullanılarak nihai ötelenme oranlarını tahmin eden bir formül geliştirilmiştir. Ayrıca çelik gövde plakası ve çerçeve direnç kuvvetlerinin sistemin toplam kesme kuvvetine katkısı üzerine de değerlendirmeler yapılmıştır.

5.1. Parametrik Çalışma

Parametrik çalışmada kullanılan modellerin oluşturulma aşamaları önceki bölümde değerlendirilen 292 adet model ile aynıdır. Üç katlı ve tek açıklıklı modeller oluşturulmuştur. Üst kirişi çelik gövde levhasından gelen kuvvetlere karşı güçlendirmek için kiriş flanşı boyunca kaynaklı birleşime sahip kabul edilen ikinci bir kiriş modellenmiştir. Davranışı etkileyen gövde levhası kalınlığı, gövde levhası en – boy oranı, kolon esneklik parametresi, düşey ve yatay sınır elemanları atalet momentlerinin oranı ve eksenel yük seviyesi parametreleri incelenmiştir.

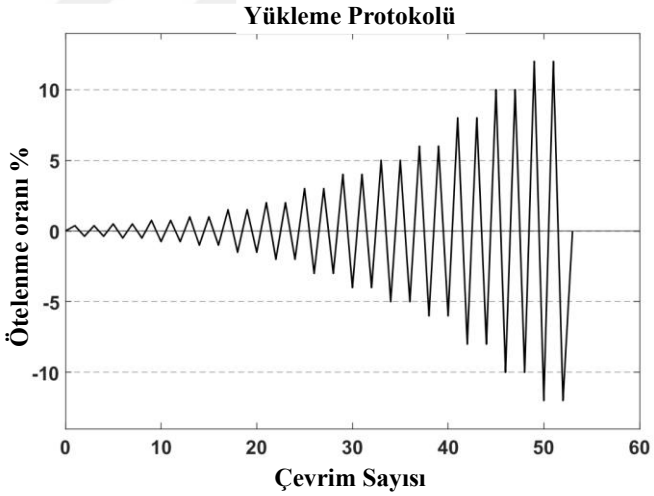
Sonlu eleman modellerinde gövde plakası en – boy oranı (L_p/h_p) 0.6 ile 2 arasında değişmektedir. Plaka kalınlıkları ise 3, 4, 5 ve 6 mm olarak seçilmiştir. AISC-341-05 (2005)'de yer alan bilgilere göre yönetmeliğin yayınlandığı tarihten önceki çalışmalarda genel olarak L_p/t_w oranı 300 ile 800 arasında değişen perde duvarlar üzerine çalışmaların yapılmıştır. Fakat yönetmelik bu parametre üzerine herhangi bir limit belirtmemiştir. Bu çalışmada, en-boy oranı gövde plakası narinlik oranının geniş bir aralığını kapsayacak şekilde 300 ile 2000 arasında seçilmiştir. Her katta kullanılan gövde plakası kalınlığı eşit alınmıştır.

Tasarımda önce plaka en – boy geometrisi ve plaka kalınlığı belirlenmiştir. Daha sonra Denklem 2.5 kullanılarak düşey sınır elemanı minimum atalet momenti hesaplanmıştır. Kolon kesiti belirlendikten sonra I_c/I_b oranına bağlı olarak kiriş kesiti belirlenmiştir. Bütün yatay ve düşey sınır elemanları geniş başlıklı I kesitler arasından seçilmiştir. Yatay sınır elemanlarında HE kesitler, düşey sınır elemanlarında ise HD kesitler kullanılmıştır. Sonlu eleman modellerinde malzeme özelliği olarak çelik gövde plakası için S235 (F_y=235 MPa, F_u=360 MPa), çerçeve elemanları için ise S355 (F_y=355 MPa, F_u=510 MPa) sınıfı çelik tanımlanmıştır. Eksenel yükün sistem davranışı üzerindeki etkilerini incelemek için, düşey sınır eleman başlarına kesitin nominal eksenel dayanımının ($P_{cr}=F_yA_g$) 0.1, 0.2 ve 0.3 katı eksenel yükler uygulanmıştır. Eksenel yük oranı için seçilen limitler, ikinci bölümde verilen deneysel veri grubunun eksenel yük oranı aralığını kapsamaktadır. Modellerin kolon esneklik parametreleri (ω_i) 1.58 ile 2.68 arasında değişecek şekilde tasarlanmıştır. Oluşturulan model detayları Çizelge 5.1'de verilmiştir. Çizelge 5.1'de görüldüğü gibi bütün modellerde plaka yüksekliği 3000 mm olacak şekilde sabittir.

Sismik tasarımda, doğrusal olmayan davranışı değerlendirmek için gerçekçi sismik hareketi tanımlayabilen çevrimsel bir yükleme protokolüne ihtiyaç vardır. Deprem hareketindeki belirsizlik, laboratuvar deneylerinde kullanılacak yükleme protokolünün seçilmesini zorlaştırmaktadır. Sismik yüklemeyi temsil etmek için yönetmelikler, standartlar ve tasarım yönergeleri farklı yükleme protokolleri önermiştir. Bunlardan bazıları SAC Basic (1997), SAC Near Fault (1997), ATC 24 (1992), JGJ-101-96 (1997) ve FEMA 461 (2007) olarak sıralanabilir. Bunlara ek olarak, bazı deneylerde yönergelerden bağımsız olarak yükleme protokolleri de kullanılabilmektedir. Yükleme

protokolleri oluşturtulurken kontrol parametreleri, hedef ötelenme limitleri ve döngü sayısı gibi çeşitli parametrelerin belirlenmesi gerekir. Bu parametrik çalışmada, yükleme protokolünün kontrol parametresi olarak tepe ötelenme oranı (yükleme uygulanan üst kiriş yatay deplasmanı ile yapı yüksekliği oranı) olarak seçilmiştir. Ötelenme seviyeleri SAC Basic (1997) yükleme protokolünden alınmıştır. Bu protokolde ilk üç yüklemede 6 adet çevrimsel hareket, 4. yüklemede 4 adet çevrim ve daha sonraki yüklemelerde iki adet çevrim yapılması önerilmiştir. Bu çalışmada ise her bir deplasman artırımında çevrim sayısı iki olmak şartıyla oluşturulan yükleme protokolü kullanılmıştır. Yükleme protokol detayları Şekil 5.1'de gösterilmektedir. Şekil 5.1'de verilen maksimum tepe ötelenme açısında göçme oluşmaması durumunda artırımlar 0.01 radyan olmak üzere göçme meydana gelene kadar yükleme devam etmiştir.

Yük adımı	Tepe ötelenme açısı (θ)	Çevrim sayısı
1	0.00375	2
2	0.005	2
3	0.0075	2
4	0.01	2
5	0.015	2
6	0.02	2
7	0.03	2



Şekil 5.1. Kullanılan yükleme protokolü.

Bu çalışmada nihai öteleme oranı (DR_u), maksimum sistem mukavemetinin %15 oranında azaldığı ötelenme oranı olarak tanımlanmıştır. Bütün modellerde göçme mekanizmalarının bu kabul edilen nihai dayanıma denk gelen ötelenme oranında oluştuğu görülmüş ve nihai ötelenme oranını belirlemek için başka bir tanım yapılmamıştır. Tüm modellerin hesaplanan nihai ötelenme oranları Çizelge 5.1'de verilmiştir. Bu modellerin daha detaylı özellikleri Ek-4'te verilmiştir.

Çevrimsel yüklemeden ayrı olarak modeller monotonik yüklemeye de tabi tutulmuştur. Monotonik ve çevrimsel yükleme analizlerinin sonuçları incelenerek, farklı

yükleme senaryoları altında yer değiştirme kapasitesi, başlangıç rijitliği, maksimum kesme kuvveti ve göçme mekanizmaları karşılaştırılmış ve tartışılmıştır.

Çizelge 5.1. Çevrimsel yükleme sonlu eleman modelleri detayları.

No	$t_w(mm)$	$L_h(mm)$	$L_p(mm)$	Kolon kesiti	Kiriş kesiti	ω_i	L_p/h_p	I_c/I_b	P/P_y	L/t_w	DR_u.	V_p/V_t
1	3	3000	3000	HD 360 x 162	HE 300 B	2.23	1.00	2.05	0.1	1000	0.056	0.69
2	3	3000	3000	HD 360 x 162	HE 280 A	2.21	1.00	3.77	0.1	1000	0.063	0.72
3	3	3000	3000	HD 360 x 162	HE 300 B	2.23	1.00	2.05	0.2	1000	0.043	0.72
4	3	3000	3000	HD 360 x 162	HE 280 A	2.21	1.00	3.77	0.2	1000	0.048	0.73
5	3	3000	3000	HD 360 x 162	HE 300 B	2.23	1.00	2.05	0.3	1000	0.033	0.72
6	3	3000	3000	HD 360 x 162	HE 280 A	2.21	1.00	3.77	0.3	1000	0.037	0.74
7	3	3000	6000	HD 400 x 262	HE 400 A	1.70	2.00	1.98	0.2	2000	0.100	0.72
8	3	3000	5000	HD 400 x 314	HE 500 AA	1.72	1.67	2.02	0.2	1670	0.099	0.64
9	3	3000	4000	HD 400 x 347	HE 400 B	1.72	1.33	2.17	0.2	1330	0.100	0.53
10	3	3000	3000	HD 400 x 421	HE 340 M	1.71	1.00	2.09	0.2	1000	0.120	0.38
11	3	3000	2000	HD 400 x 634	HE 550 B	1.70	0.67	2.01	0.2	670	0.110	0.26
12	3	3000	6000	HD 400 x 262	HE 400 A	1.70	2.00	1.98	0.3	2000	0.073	0.73
13	3	3000	4000	HD 260 x 114	HE 280 B	2.68	1.33	0.98	0.3	1330	0.015	0.90
14	5	3000	2000	HD 400 x 634	HE 550 B	1.94	0.67	2.01	0.2	402	0.083	0.37
15	6	3000	5000	HD 360 x 147	HD 360 x 147	2.47	1.67	1.00	0.3	1002	0.008	0.59
16	6	3000	6000	HD 320 x 127	HE 340 A	2.60	2.00	1.11	0.3	1000	0.007	0.97
17	4	3000	5000	HD 360 x 196	HE 320 A	2.03	1.67	2.77	0.1	1252.5	0.078	0.83
18	6	3000	5000	HD 320 x 158	HE 280 A	2.50	1.67	2.90	0.1	835	0.018	0.97
19	5	3000	5000	HD 320 x 158	HE 300 B	2.41	1.67	1.57	0.1	1002	0.029	0.94
20	4	3000	4000	HD 320 x 158	HE 240 M	2.38	1.33	1.63	0.1	997.5	0.050	0.85
21	4	3000	4000	HD 400 x 382	HE 500 AA	1.83	1.33	2.59	0.1	997.5	0.116	0.62
22	5	3000	6000	HD 320 x 300	HE 340 A	1.91	2.00	3.14	0.1	1200	0.070	0.86
23	6	3000	2000	HD 400 x 551	HE 340 M	2.03	0.67	2.96	0.1	335	0.120	0.47
24	6	3000	2000	HD 400 x 509	HE 300 M	2.06	0.67	3.45	0.2	335	0.114	0.46
25	4	3000	2000	HD 400 x 287	HE 450 A	2.30	0.67	1.56	0.2	502.5	0.071	0.53
26	4	3000	6000	HD 320 x 158	HE 280 A	2.16	2.00	2.90	0.3	1500	0.020	0.92
27	5	3000	3000	HD 400 x 314	HE 400 A	2.14	1.00	2.45	0.3	600	0.060	0.67
28	5	3000	4000	HD 400 x 287	HE 280 M	2.01	1.33	2.52	0.2	798	0.070	0.75
29	4	3000	3000	HD 400 x 287	HE 450 B	2.12	1.00	1.25	0.2	750	0.061	0.60
30	5	3000	4000	HD 400 x 287	HE 450 B	2.10	1.33	1.25	0.3	798	0.042	0.72
31	6	3000	3000	HD 320 x 300	HE 320 A	2.33	1.00	3.79	0.3	500	0.061	0.79
32	6	3000	2000	HD 400 x 287	HE 320 A	2.45	0.67	4.35	0.3	335	0.053	0.69
33	4	3000	4000	HD 320 x 158	HE 260 AA	2.36	1.33	4.97	0.2	997.5	0.051	0.90
34	5	3000	6000	HD 400 x 237	HE 300 B	1.94	2.00	3.13	0.1	1200	0.087	0.87
35	4	3000	4000	HD 320 x 245	HE 320 AA	2.09	1.33	4.14	0.2	997.5	0.080	0.79
36	4	3000	2000	HD 360 x 147	HE 260 A	2.65	0.67	4.43	0.2	502.5	0.029	0.72
37	5	3000	5000	HD 400 x 237	HE 500 AA	2.13	1.67	1.44	0.2	1002	0.047	0.83
38	5	3000	6000	HD 260 x 142	HE 360 AA	2.64	2.00	1.06	0.2	1200	0.008	0.97
39	5	3000	3000	HD 400 x 382	HE 340 B	1.98	1.00	3.85	0.2	600	0.104	0.62
40	6	3000	5000	HD 360 x 196	HE 500 AA	2.35	1.67	1.16	0.3	835	0.014	0.88
41	4	3000	4000	HD 360 x 162	HE 450 AA	2.33	1.33	1.23	0.2	997.5	0.023	0.84
42	6	3000	6000	HD 400 x 744	HE 700 M	1.58	2.00	1.04	0.1	1000	0.118	0.53

Sistem davranışında plaka ve çerçeve etkileşimini irdeleyebilmek için plakanın karşı koyduğu kesme kuvveti ile toplam kesme kuvveti oranı (V_p/V_t) parametresi nümerik olarak elde edilmiş ve bu oranlar her bir model için Çizelge 5.1'de verilmiştir.

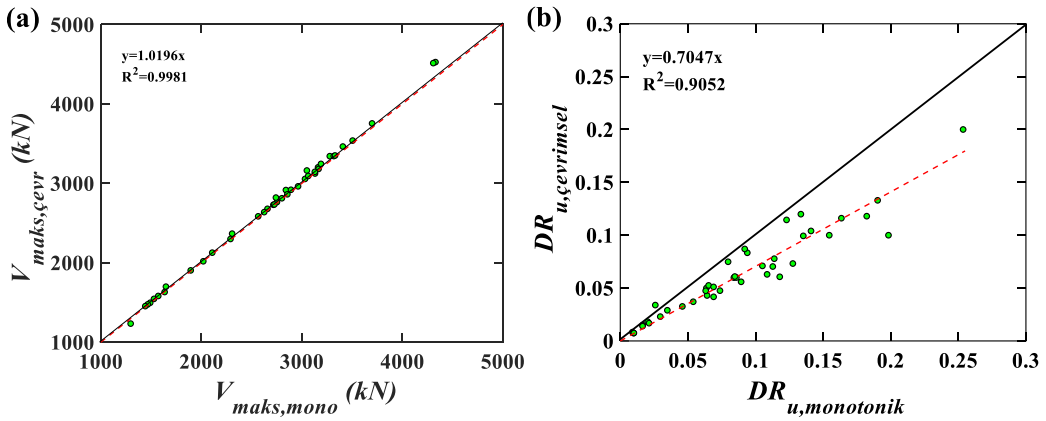
5.2. Analiz Sonuçları

ANSYS APDL programı ile çevrimsel yükleme altında lineer olmayan sonlu eleman analizleri yapmak için, 3.6 GHz Intel Core i7-4790 CPU ve 16 GB belleğe sahip bir bilgisayar kullanılmıştır. Sonuçların elde edilmesi yaklaşık olarak analiz başına 15 ila 27 saat sürmüştür ve 45 ila 122 GB depolama alanı kullanılmıştır. Analizin aldığı süre ve ihtiyacı olan depolama alanı, modellerin boyutlarına, eleman sayılarına ve oluşan göçme mekanizmasına göre farklılıklar göstermiştir. Bu analizlerin sonuçları aşağıda tartışılmıştır.

5.2.1. Monotonik ve çevrimsel yüklemenin global davranış üzerine etkileri

Monotonik ve çevrimsel analiz sonuçları arasında karşılaştırma yapılırken, yapının kapasitesi, yer değiştirme kabiliyeti ve hasar mekanizması temel parametreler olarak benimsenmiştir. Şekil 5.2(a)'da dayanım açısından monotonik ve çevrimsel yükleme koşulları altında çelik levhalı perde duvar modelleri karşılaştırılmıştır. Her iki yükleme koşulunda da yaklaşık olarak aynı değerler elde edilmiştir. Bu sonuçlar model doğrulama çalışmasında da görüldüğü üzere deneysel veriler ile de yüksek doğrulukta eşleşmektedir.

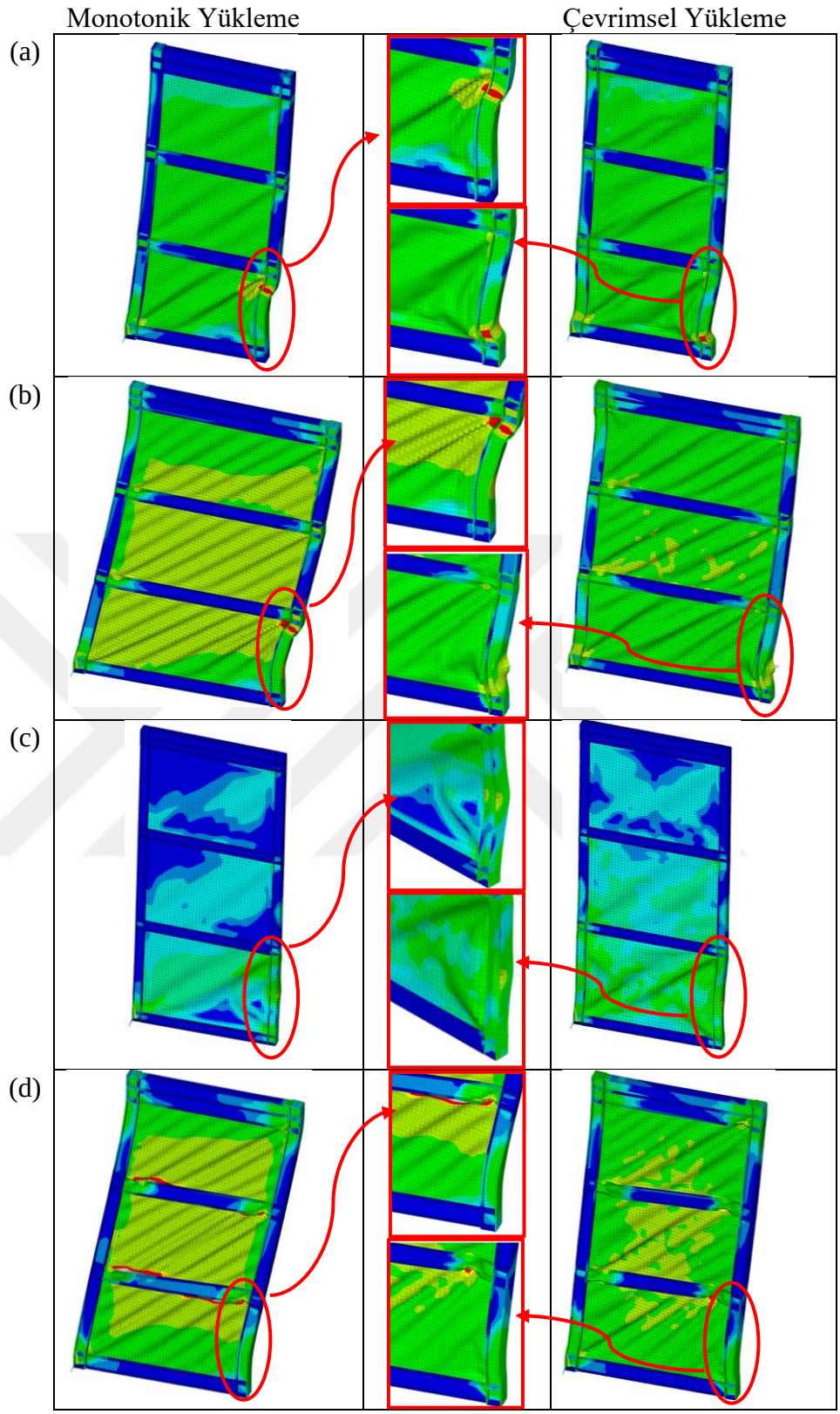
Tüm yük-deformasyon eğrilerinde, monotonik analizlerden elde edilen nihai kapasitedeki ötelenme değerleri, çevrimsel yük altındaki modellerinkinden daha büyüktür. Bu davranış deneysel doğrulama çalışmasında da görülmüştür. Modellerin monotonik ve çevrimsel yükleme altında yer değiştirme kapasitesini daha iyi incelemek için, her iki yükleme koşulunda da modellerin nihai ötelenme oranı değerleri karşılaştırılmıştır. Nihai öteleme (DR_u) karşılaştırması Şekil 5.2(b)'de sunulmuştur. Sonuçlara göre, monotonik yükleme ile çevrimsel yükleme nihai öteleme kapasiteleri arasında R kare değeri yaklaşık 0.9 olan güçlü bir ilişki vardır. Bu çalışmanın sonuçları çevrimsel yüklemeye maruz kalan modellerin nihai ötelenme oranının monotonik yüklemeye maruz kalan modellerin %70'i seviyesinde olduğunu göstermektedir. Deneysel doğrulama çalışmasında monotonik yüklemenin analiz verileri de bu ifadeyi destekleyen bir davranış göstermektedir.



Şekil 5.2. Modellerin monotonik ve çevrimsel yükleme altındaki nihai ötelenme (DR_u) oranları.

Tüm modeller, göçme mekanizması dikkate alınarak karşılaştırıldığında, monotonik ve çevrimsel yükleme altında aynı yapının farklı şekilde hasar görebileceği görülmüştür. Çelik elemanlar çevrimsel yükleme altında kümülatif olarak hasar görür. Önceki çevrimden gelen hasar çelik eleman tarafından depolanır ve yeni çevrimden gelen hasar öncekine eklenir. Ek olarak, tekrarlayan çevrimler altında bazı yapı elemanlarında gelişen çatlak yayılımı ve gerilme konsantrasyonları, monotonik yükleme altındakilerden farklı olabilir. Bu farklılıklar, aynı modelin farklı yükleme senaryolarında farklı davranmasına neden olabilir.

Şekil 5.3(a) ve Şekil 5.3(b)'de bazı modellerin monotonik ve çevrimsel yüklemeler altındaki hasarları gösterilmiştir. Bu modellere göre hasar hem boyut hem de konum açısından iki yükleme koşulu altında farklılık gösterebilir. Şekil 5.3(a)'da monotonik yüklemede basınç altındaki kolon, en büyük hasarı kolon – kiriş birleşimine yakın ucunda alırken aynı model çevrimsel yükleme altında kolon tabanına yakın ucundan burkulur. Şekil 5.3(b)'de de benzer bir durum söz konusudur.



Şekil 5.3. Temsili modellerde monotonik ve çevrimsel yükleme durumları için göçme mekanizmasını gösteren Von Misses gerinim çizimleri.

Bu çalışmada, monotonik ve çevrimsel yükleme altında yapı elemanlarının kesinlikle farklı şekilde hasar görmesi gerektiği iddia edilmemektedir. Yukarıda sayılan

tüm sebeplere rağmen, bazı modellerdeki göçme mekanizması, Şekil 5.3(c) ve (d)'de görüldüğü gibi her iki yükleme koşulunda da benzer özelliklere sahip olabilir. Bu davranış özellikle yapının bazı elemanları diğerlerinden çok daha zayıf olduğunda geçerlidir. Şekil 5.3(c)'de iki yükleme tipinde de kolon açıklık üzerinde yaklaşık olarak orta seviyede düzlem dışı deformasyon yapmıştır. Şekil 5.3(d)'de ise plastik deformasyonların büyük bir kısmı kiriş ucunda gerçekleşmiştir ve kolondaki deformasyonlar her iki yükleme altında da benzerdir. Yapının çökme mekanizması, farklı yükleme koşulları altında da olsa zayıf eleman aracılığıyla gerçekleşir.

5.2.2. Çelik levhalı perde duvarların göçme davranışı

Yapısal elemanlar ve bileşenler, öngörülen yanal yük etkisi altında önceden belirlenmiş bir davranış sergileyecek şekilde tasarlanır. Bu nedenle, çevrimsel sonlu eleman analizlerinin sonuçları modellerin nihai ötelenme kapasitelerini ve göçme davranışlarını temel alarak değerlendirilmiştir. Çevrimsel yükleme altındaki modellerin yük-ötelenme oranı davranışları ve göçme anındaki gerinim çizimleri EK-6'da verilmiştir.

Çeşitli parametrik kombinasyonlar altında, tasarım yönetmelikler tarafından önerilen belirli sınırlamalar altında gerçekleştirilse bile, tüm modellerin öngörülen ve istenilen hiyerarşik düzende göçme mekanizması oluşturması beklenmemelidir. Çelik levhalı perde duvarlar için istenilen hiyerarşik göçme mekanizması Bölüm 4.2'de açıklanmıştır. Çevrimsel yükleme altında bu göçme mekanizmasına uymayan davranışlara sahip modellerin olduğu görülmüştür. Bu göçme mekanizmaları belirlenerek bu tür sistem davranışına neden olan tasarım parametrelerinin tespit edilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla çelik levhalı perde duvar modellerinde meydana gelen hasarlar tek tek incelenerek not edilmiştir. Buna göre karşılaşılan en yaygın göçme aşamaları;

- Gövde plakasında akma meydana gelmesi,
- Kiriş uçlarında akma meydana gelmesi,
- Kiriş uçlarında plastik mafsal oluşumu,

• Kolon tabanı plastik mafsal oluşumu,

• Kolonun düzlem dışı burkulması,

• Kolon açıklığında ileri derece dengesizlik durumu (instabilite),

• Kolon yerel flanş burkulması,

• Kiriş – kolon kesişim bölgesinde akma meydana gelmesi,

• Üst kiriş uçlarında akma meydana gelmesi,

• Kiriş açıklığında akma meydana gelmesi,

• Kolon global burkulması,

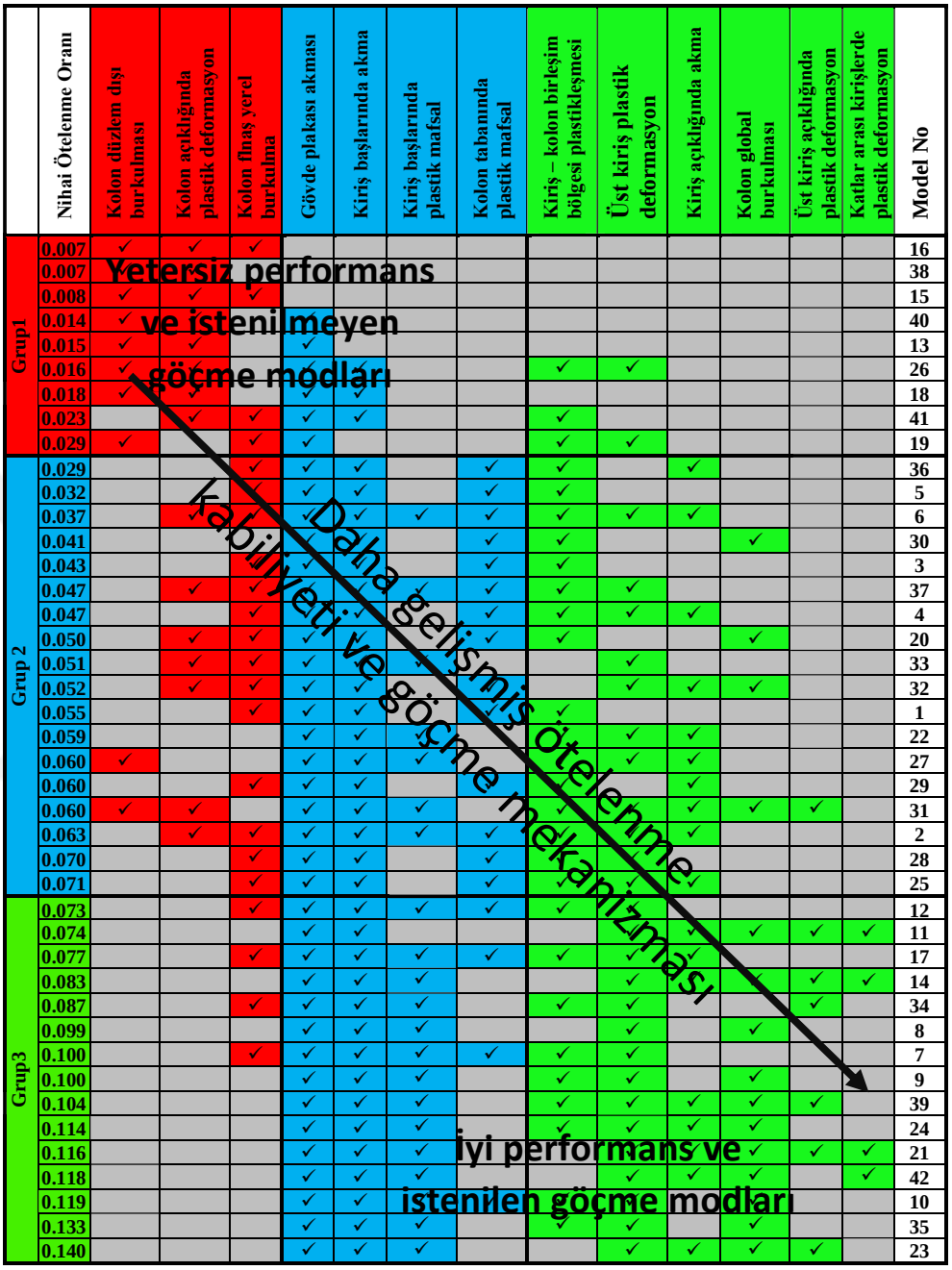
• Üst kiriş açıklığında akma meydana gelmesi,

• Katlar arası kirişlerin açıklığında meydana gelen deformasyonlar.

Her bir model için gözlemlenen bu göçme mekanizmaları ayrı ayrı incelendikten sonra modeller nihai ötelenme oranı değerlerine göre listelenmiştir. Bu listeye göre, göçme mekanizmaları ve nihai ötelenme oranı arasındaki ilişki Şekil 5.4'te görülebilir.

Listelenen göçme mekanizması aşamalarından bazılarının modelde bulunması modelin nihai ötelenme oranına olumsuz etki ederken bazılarının bulunduğu modeller oldukça yüksek nihai ötelenme oranlarına erişmişlerdir. Bu gözlemler ışığında çevrimsel yükleme altında nihai ötelenme oranları dikkate alınarak üç ana göçme grubu tanımlanmıştır. Benzer göçme mekanizmaları geliştiren modeller gruplandıktan sonra tasarım parametrelerinin çelik levhalı perde duvar davranışına etkileri incelenmiştir. Her parametre ayrı ayrı incelenerek sonuçlar yorumlanmıştır. Gruplama yapılırken bazı

modellerin birden fazla grup içine dahil edilebilecek göçme mekanizması geliştirdiği de gözlemlenmiştir.



Şekil 5.4. Bütün modeller için gözlemlenen göçme aşamaları.

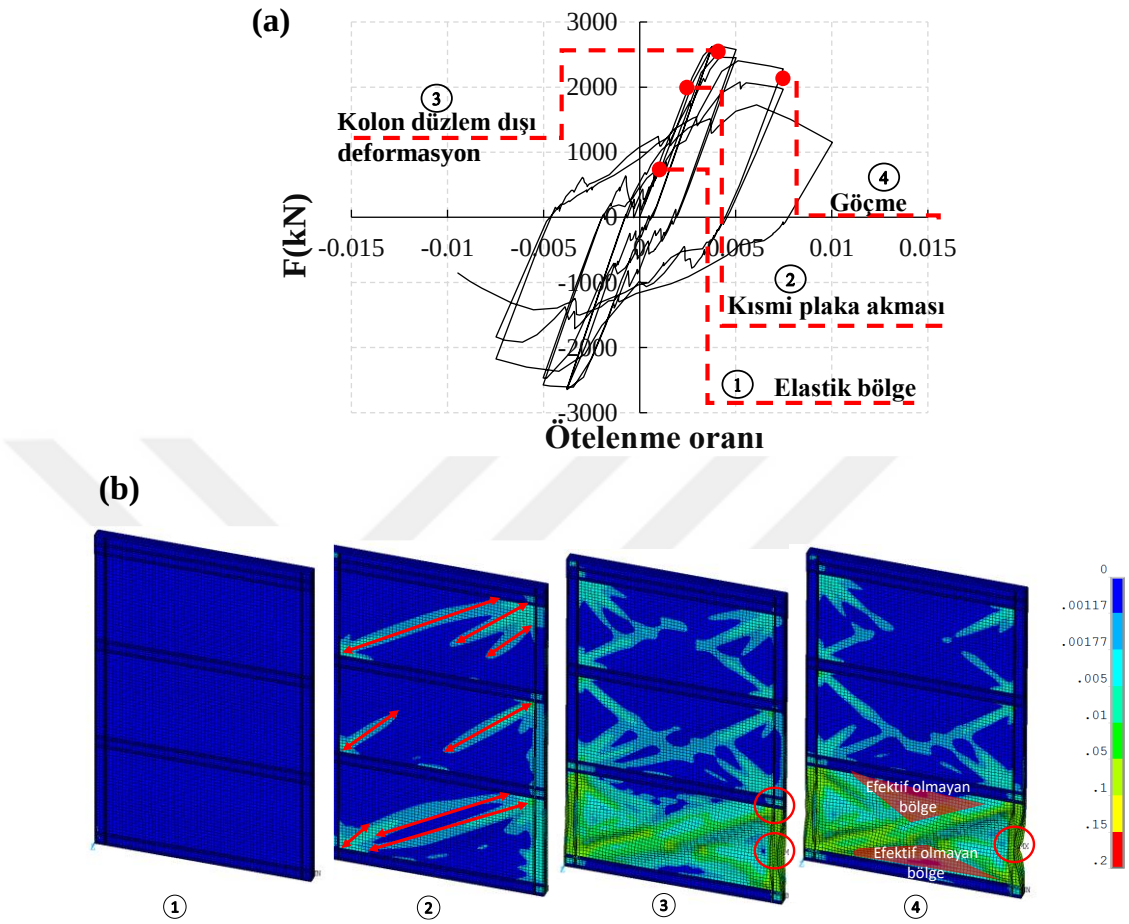
Birinci gruptaki (behavior type 1 – BT1) modellerin davranış tipine bakıldığında, modeller genellikle tasarımda öngörülen göçme mekanizması aşamalarının hiçbirini göstermemiştir. BT1 için en baskın şekilde gözlemlenen göçme mekanizmasının farklı aşamalarda Von Misses gerinim çizimi ve yük – deformasyon grafiği temsili bir model ile Şekil 5.5'te verilmiştir. Şekil 5.5(b) 2, 3 ve 4. aşamalarında görüldüğü gibi özellikle

ikinci ve üçüncü katlarda gövde plakası akması neredeyse hiç gerçekleşmemiştir. Birçok modelde ise birinci kattaki çekme alanı oluşumu sınırlı kalmıştır. Dolayısıyla gövde plakası burkulma sonrası oluşan çekme alanları dayanımı ile sistem direncine yeterince katkıda bulunamamıştır. Şekil 5.5(b) 3.ve 4. aşamalarda görüldüğü gibi gövde plakasının akma aşaması tam olarak gerçekleşmeden ve hala efektif olmayan plaka bölgeleri var iken kolonlarda plastik deformasyonlar görülmektedir. Modeller genellikle kolon açıklığı boyunca düzlem dışı deformasyon göstermektedirler. Ardından kolonda dengesizlik (instabilite) başlamakta ve çökme meydana gelmektedir. Bu aşamaların yük – ötelenme oranı eğrileri üzerinde gösterimi de Şekil 5.5(a)'da verilmiştir.

Genel olarak parametrelerin dağılımına bakıldığında grup 1, her üç grupta da en yüksek eksenel yük oranına sahiptir. BT1 grubunun ortalama eksenel yük oranı ± 0,08 standart sapma ile 0.23'tür. Bu grup aynı zamanda 2.46 ile en yüksek kolon esneklik parametresi ortalamasına sahiptir. Yüksek eksenel yük ve yüksek kolon esneklik parametresi (zayıf kolonlar) nedeniyle kolonlarda düzlem dışı burkulma ve açıklık içi instabilite gözlemlenmiştir. Gövde plakası en-boy oranı, sistem davranışını etkileyen önemli bir tasarım parametresidir. Her üç grup arasında en yüksek ortalama en – boy oranı birinci gruptadır (1.7 ± 0.24). Her ne kadar kolon esneklik parametresi 2.5'ten yüksek olan modeller olsa da bu grupta kolon esneklik parametreleri açısından yönetmeliklerin sınırlarına uygun modeller de bulunmaktadır.

Bu grubun ortalama ötelenme oranı, her üç grubun en düşüğü olan 0.016 gibi bir değere sahiptir. Bu ötelenme oranı yönetmeliklerde genellikle kullanılan %2 ötelenme oranı limitini karşılamamaktadır. Genellikle bu duruma yüksek kolon esneklik parametresi, yüksek en-boy oranı ve yüksek düşey yükün birleşimi neden olur. Kolon esneklik parametresi yüksekse (yönetmelik sınırları içinde olsa bile), yapı yüksek düşey yük ve yüksek en – boy gövde plakası oranı altında iyi performans göstermeyebilir. I_c/I_b oranına bakıldığında bu gruptaki modellerin ortalaması 1.55 ile en düşük değere sahiptir. Buna göre kiriş kesit atalet momenti değerlerinin kolonunkine yakın olmasının, diğer parametrelere bağlı olarak ($I_{c,min}$ değerine yakın göreceli olarak zayıf kolon kesitleri kullanımı gibi) istenmeyen göçme mekanizması gelişmesine neden olduğu söylenebilir. Kirişlerden kolona iletilen kesme kuvveti, eksenel yük ve gövde plakasının uyguladığı kuvvet, esneklik parametresi yüksek kolonun hasar görmesine sebep olmaktadır. Bu

durumda kirişlerde daha küçük kesitlerin kullanılması hasarın bir kısmının kirişlerde tüketilmesini sağlayabilir.

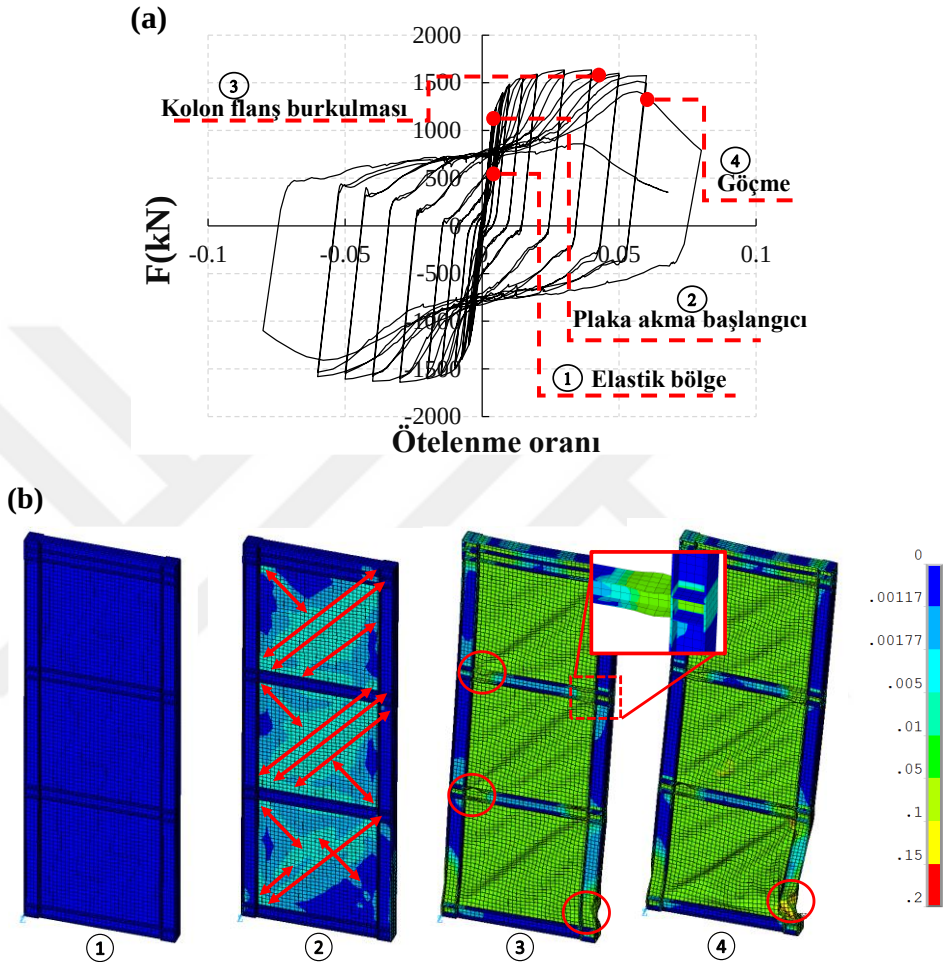


Şekil 5.5. Davranış tipi 1 (BT1): (a) yük – ötelenme oranı eğrisi ve (b) sistem tepki aşamaları ve temsili göçme mekanizması (t_w= 6 mm, ω_i =2.60, L_p/h_p =2.00, P/P_{cr}=0.1, I_c/I_b=1.11).

İkinci gruptaki (BT2) modellerin ortalama nihai ötelenme oranı 0.054'tür. Davranış tipi 2'de (BT2), gövde plakası her üç katta da tamamen akmaktadır. Bu gruptaki modellerin göçme mekanizmaları genellikle istenilen – öngörülen göçme aşamalarını tamamlayarak meydana gelir.

Göçme aşamaları sıralaması ve histerezis davranışı, temsili bir modelle Şekil 5.6(a) ve (b)'de sunulmaktadır. Şekil 5.6(a)'da yük – ötelenme oranı eğrisi üzerinde göçme mekanizmasının gelişiminde önemli noktalar gösterilmiştir. Şekil 5.6(b) 2. ve 3. aşamalarında gösterildiği gibi düşük ötelenme oranlarındaki elastik bölge geçildikten sonra tüm plakalar üç katta da akmaktadır. Şekil 5.6(b) 3. aşamaya varıldıktan sonra yatay

sınır elemanların uç bölgelerinde plastik deformasyonlar ve kolon tabanında yerel burkulmalar gözlenir. Ardından, Şekil 5.6(b) dördüncü aşamada yerel kolon flanşı burkulma mekanizması tamamlanır. Burkulma, kolon tabanında plastik mafsalların oluşmasına yol açar ve çökme mekanizması oluşur.



Şekil 5.6. Davranış tipi 2 (BT2): (a) yük – ötelenme oranı eğrisi ve (b) sistem tepki aşamaları ve temsili göçme mekanizması (t_w= 3 mm, ω_i =2.21, L_p/h_p =1.00, P/P_{cr}=0.1, I_c/I_b=3.77).

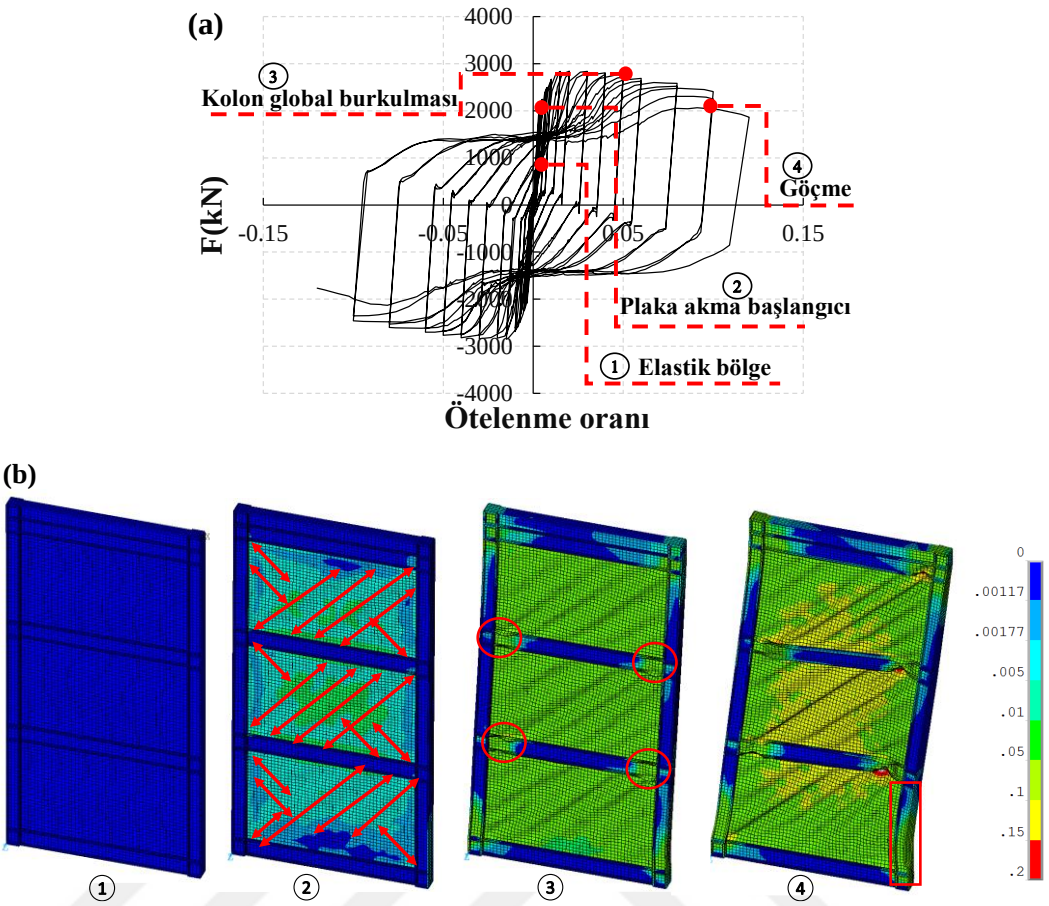
Ortalama kolon esneklik parametresi 2.25 olup 0.15'lik bir standart sapma değerine sahiptir. Eksenel yük oranı ortalaması ise 0.212±0.076'dır. Bu eksenel yük değeri BT1'den biraz daha düşük olmasına rağmen bu grupta da en yüksek eksenel yük oranına sahip birçok model yer almaktadır. Kolon esneklik parametresi, ilk iki davranış tipi arasındaki ana ayırt edici faktörlerden biridir. Daha rijit kolonlar kullanıldığında yapının daha yüksek bir ötelenme oranı kapasitesine ulaşacağı açıktır. BT2'de oluşan davranış bu durumu doğrular. Düşük ötelenme seviyelerindeki düzlem dışı deformasyonlar yerini bu grupta yüksek ötelenme seviyelerinde düzlem içi burkulmalara

bırakmaktadır. BT2'yi birinci gruptan ayıran bir diğer önemli parametre ise düşük L_p/h_p oranıdır. Bu grubun gövde plakası en – boy oranı 1.05±0.26 ile üç grup arasında en düşük değeri almaktadır. Göreceli düşük kolon esneklik parametresi ve plaka en – boy oranı kullanımı sonucunda, yüksek düşey yük etkisi azaltılmış ve modeller ilk gruptan çok daha yüksek öteleme oranı kapasiteleri elde etmiştir.

Son gruptaki modellerin ortalama nihai ötelenme oranı değeri 0.098'dir. Bu gruptaki modeller (BT3) genellikle çok tatmin edici davranış sergileyerek çok yüksek enerji tüketme kapasitesi ve yüksek yer değiştirme kapasitesi değerlerine ulaşmışlardır.

Bu davranış tipinde de istenilen – öngörülen göçme mekanizma aşamaları oluşmaktadır. Şekil 5.7(a), BT3'te baskın olarak görülen histerezis davranışı özetlemektedir. Şekil 5.7(a)'da görüldüğü gibi BT3 grubunda yük dayanımı azalması kademeli olarak azalarak stabil bir yol izler ani düşüşler genel olarak gözlemlenmemektedir. BT2 ile göçme sırası açısından temel fark, bu grupta lokal flanş burkulmasının nadiren gözlenmesi ve Şekil 5.7(b) üçüncü ve dördüncü aşamalarda gösterildiği gibi kiriş uçlarındaki plastik deformasyonların çok fazla olmasıdır. Grubun baskın davranışı, önceki tüm göçme aşamaları tamamlandıktan sonra son olarak kolonun kesitine dik eksen (boyuna eksen) boyunca, Şekil 5.7(b)'de gösterildiği gibi kesit şeklini bozmadan global burkulma deneyimlemesidir.

Üçüncü grubun ortalama kolon esneklik parametresi değeri her üç grupta da en düşük değer olan 1.85±0.15'tir. Gövde plakasının ortalama en – boy oranı 1.37±0.5 olup, 1. gruptan daha düşük, 2. gruptan daha yüksektir. Ortalama eksenel yük oranı 0.16'dır ve bu oran üç grubun en düşüğüdür. Bu ortalama değerlere göre bu gruptaki modellerin en güçlü kolonlara sahip gruplar olup eksenel yük bakımından diğer gruplara göre daha az zorlandığı sonucu çıkmaktadır.



Şekil 5.7. Davranış tipi 3 (BT3): (a) yük – ötelenme oranı eğrisi ve (b) sistem tepki aşamaları ve temsili göçme mekanizması (t_w= 3 mm, ω_i =1.72, L_p/h_p=1.67, P/P_{cr}=0.2, I_c/I_b=2.02).

5.2.3. Çelik levhalı perde duvarların nihai ötelenme oranları

Yukarıda ayrı ayrı açıklanan farklı davranış tiplerine yol açan parametrelerin, çelik levhalı perde duvarların nihai öteleneme oranını ne yönde etkilediklerinin hakkında daha açık bir inceleme yapabilmek için Çizelge 5.2'de özetlenmiştir. Çizelge 5.2 incelendiğinde nihai ötelenme oranı ile doğrudan korelasyon gösteren parametrelerin olduğu görülmektedir. ω_i değeri arttıkça nihai ötelenme oranı azalmaktadır. Benzer şekilde eksenel yük oranı arttıkça nihai ötelenme oranı düşmektedir. Bu parametrik ilişkiler beklenen ilişkilerdir. Diğer parametre etkilerini incelemek için gruplar kendi aralarında yukarıdaki tartışmalar ışığında değerlendirilmiştir.

Tasarım parametreleri ile nihai ötelenme oranı arasındaki ilişkiyi genel anlamda yorumlamak için, Şekil 5.8'deki grafikler çizilmiştir ve Çizelge 5.2 dikkate alınarak

tartışılmıştır. Tüm parametreler, yani kolon esneklik parametresi, plaka levhası kalınlığı, eksenel yük oranı, düşey ve yatay sınır elemanlarının atalet momentleri ile gövde plakasının en-boy oranı arasındaki oran ayrı ayrı tartışılmış ve belirli parametrelerde limitler önerilmiştir. Ayrıca, çevrimsel yükleme uygulanan çelik levhalı perde duvarların nihai ötelenme oranını tahmin etmek için L_p, h_p, I_c, I_b, t_w ve ω_i parametreleri kullanılarak bir formül geliştirilmiştir.

Çizelge 5.2. Davranışa etkili parametreler ve nihai ötelenmelerin ortalama değerleri.

BT	ω_i	I_c/I_b	P/P_{cr}	L_p/h_p	t_w(mm)	DR_u
BT1	2.46	1.55	0.23	1.70	5.00	0.016
BT2	2.25	2.77	0.21	1.06	4.11	0.051
BT3	1.85	2.58	0.16	1.38	4.25	0.098

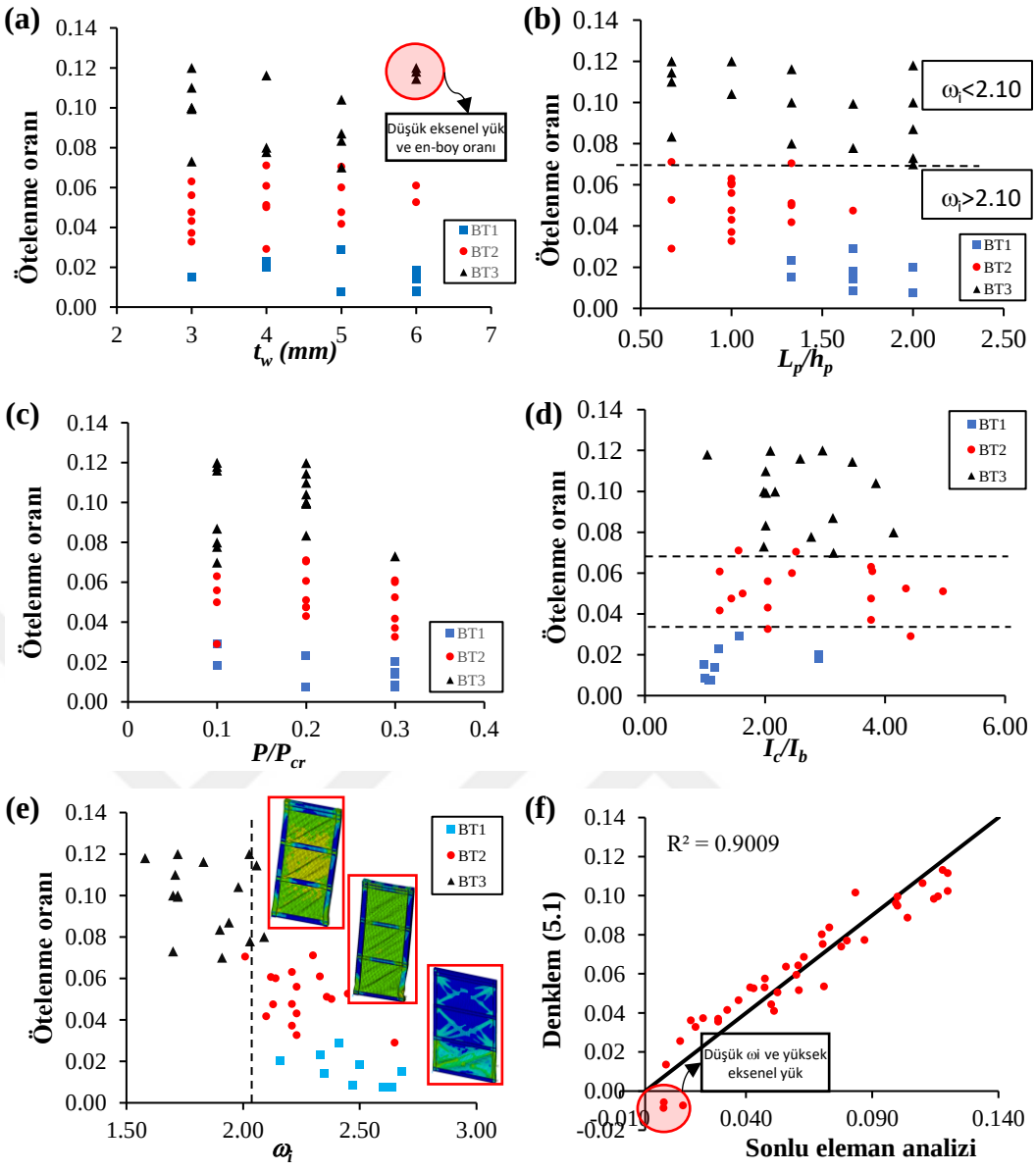
Gövde plakası kalınlığı ve nihai ötelenme oranı korelasyonu, Şekil 5.8(a)'da verilmiştir. Plaka kalınlığının nihai ötelenme kapasitesi üzerindeki etkisi, farklı davranış tiplerinde aynı değildir. Çizelge 5.2'de görüldüğü gibi tüm gruplarda en yüksek ortalamaya sahip olan BT1 için ortalama plaka kalınlığı 5 mm'dir. Buradan yüksek kalınlığa sahip plakalar kullanılmaması anlamı çıkmamaktadır. Yüksek performans elde etmek için diğer parametrelerin doğru kombinasyonu ile kalın plakalar kullanılabilmektedir. Kalın plakalar kullanıldığında, oluşan çekme alanından dolayı, gövde plakaların dikey sınır elemanları üzerinde yüksek eksenel ve eğilme talepleri oluşmaktadır. Çekme alanı kuvvetinin dikey bileşeni, ilave bir eksenel yük oluşturur ve çekme alanı kuvvetinin yatay bileşeni, kolonlar üzerinde bir kesme kuvveti uygular. Yüksek kolon esneklik parametresi kullanıldığında perde duvar sistemi beklenenden daha erken bir çökme gerçekleştirebilir. BT1, en yüksek kolon esneklik parametre ortalamasına yani en zayıf kolonlara sahiptir. Kalın levha kullanılması bu grup üzerinde olumsuz bir etkiye sahiptir, ancak bu sonuç çelik levhalı perde duvarlar için genel bir ifadeyi temsil etmemektedir. Diğer parametreler dikkatle seçildiğinde (yani düşük plaka en-boy oranı, düşük ω_i), kalın plakalar Şekil 5.8(a)'da gösterildiği gibi nihai ötelenme oranı üzerinde olumsuz bir etkiye sahip değildir.

Özet olarak, kalın gövde levhası kullanımı diğer parametrelerin kombinasyonuna da bağlıdır. BT1 grubunun yüzde 90'ı 2.3'ten büyük bir kolon esneklik parametresine sahiptir. Eğer kolon esneklik parametresi bu orandan yüksek ve bununla birlikte plaka en

– boy oranı da yüksek ise kalın plaka kullanımında daha dikkatli olunmalıdır. Kolon kesiti büyütülerek daha düşük bir kolon esneklik parametresi kullanılmalıdır. Bu durumdaki modellerde kolon esneklik parametresi üst limitinin yönetmeliklerde verilen 2.5'dan daha az olması önerilmektedir.

Nihai ötelenme oranı ve gövde levhası en – boy oranı ilişkisi Şekil 5.8(b)'de verilmiştir. Her üç davranış türü birlikte değerlendirildiğinde elde edilen kesin bir ilişki gözlemlenmemiştir. Ancak Şekil 5.8(b)'de görüldüğü gibi her grup ayrı ayrı değerlendirildiğinde en-boy oranının belirli bir seviyenin altında olumsuz etki yaptığı sonucuna varılabilir. Kolon esneklik parametresi 2.1'in üzerinde olduğunda, geniş açıklıklı çelik plaka perde duvarlar, istenmeyen göçme mekanizmalarına sahip olabilmektedir. BT1'deki tüm modellerin en boy oranı 1.33 ve üzeridir. BT1'deki modeller arasında uygun tasarlanmamış modeller bulunmaktadır. Fakat bu grupta yer alan modellerin yaklaşık yüzde 67'si yönetmeliklerde bulunan ön tasarım minimum kolon atalet momenti kriterlerine uymaktadır. Bu istenmeyen davranışlara sahip olmalarının ana nedenleri ön tasarımda eksenel yük ile ilgili bir ifade bulunmaması ve her yükseklik ve açıklık oranı için aynı kolon esneklik parametresi limitinin kullanılmasıdır. Bu araştırmanın sonuçlarına göre güvenli bir tasarıma sahip olmak için, gövde plakası en – boy oranı 1.33 veya daha yüksekse, 2.1'den düşük bir kolon esneklik parametresi tercih edilmelidir.

Şekil 5.8(c), nihai ötelenme oranı ile eksenel yük seviyesi arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Beklendiği gibi, yüksek eksenel yük ile sistemin sahip olduğu yer değiştirme kapasitesi azalır. Yanal yük, gövde plakasından doğan yükler ve yüksek eksenel yükün kombinasyonu sonucunda P-Δ etkisi artar ve düşük eksenel yük senaryolarına kıyasla sistemde göçme daha küçük yer değiştirmelerde meydana gelir.



Şekil 5.8. Nihai ötelenme oranı ile farklı parametreler arasındaki ilişkiler.

Tasarım sürecinde, katlar arası kirişlerin rijitliği, bu çalışmada daha önce belirtilen sebepler nedeniyle ön tasarımda en belirsiz konulardan biridir. Nihai ötelenme oranı ve I_c/I_b oranı ilişkisi Şekil 5.8(d)'deki grafikte verilmiştir. Yüksek ω_i'ye sahip çelik levhalı perde duvarlar tasarlandığında (BT1'deki modeller gibi), daha rijit kirişler (atalet momenti açısından) istenmeyen göçme mekanizmalarının oluşmasına yol açar. Çizelge 5.1 ve Şekil 5.8(d)'de yer alan ayrıntılar göz önüne alındığında hem BT1 hem de BT2, 2.3'ten daha yüksek ω_i değerine sahip benzer modellere sahiptir. Her iki gruptaki bu benzer modeller arasındaki temel fark I_c/I_b oranıdır. Bu oran 2'nin altında olduğunda, çelik levhalı perde duvar BT1 davranışı bölümünde tartışıldığı gibi düşük performansa

sahip bir mekanizma gösterebilir. Diğer yandan I_c/I_b oranı yeterince büyük ise sistem davranışı farklı bir mekanizma geliştirerek BT2 grubundaki gibi çok yüksek ötelenme oranlarına ulaşabilir. Bu duruma örnek olarak 33 ve 41 numaralı modeller gösterilebilir. Bu modellerin ikisi de aynı plaka kalınlığına, aynı yükseklik ve kat açıklığına sahiptirler. Kolon esneklik parametresi birbirine çok yakın değerlere sahip olup bu değerler sırasıyla 2.36 ve 2.33'tür. 33 numaralı model 0.051 nihai ötelenme oranına sahip olup göçme mekanizması BT2'de anlatıldığı gibidir. 41 numaralı model ise 0.023 nihai ötelenme oranına sahip olup birinci grupta yer almaktadır. Bütün ön tasarım parametreleri büyük benzerlik gösteren 33 ve 41 numaralı modellerin I_c/I_b oranları ise sırasıyla 4.97 ve 1.23'tür. Bu orana bağlı olarak 33 numaralı modelde hasarın bir kısmı kirişler tarafından karşılanmış, kirişlerde büyük oranda plastik deformasyonlar oluşmuştur. 41 numaralı modellerde ise kiriş başlarında henüz akma başlamışken kolonlarda plastik deformasyonlar oluşmaya başlamış ve sistem göçmüştür.

Şekil 5.8(d)'de görüldüğü gibi, I_c/I_b oranı 2 ile 4 arasında olan modellerin büyük bir kısmı iyi bir performans göstermiştir. Şekil 5.8(d)'de verilen sonuçlar ve yukarıdaki tartışma dikkate alındığında, aşağıdaki sonuçlara varılabilir;

• Kolon esneklik parametresi 2.3'e eşit veya daha yüksek ise I_c/I_b oranının 2'nin altında olması önerilmez.

• Ötelenme kabiliyeti oranı açısından I_c/I_b oranı 2 ile 4 arasında olan modellerde genel olarak iyi bir performans gözlenmiştir.

Kiriş rijitliği hakkında yapılan bu çıkarımlar I_c/I_b oranını 2 ile 4 arasında kalacak şekilde sınırlamamaktadır. En doğru çıkarım, bahsedilen tüm parametrelerin bir arada ele alınmasıyla yapılabilir. I_c/I_b oranı 2'den düşük veya 4'ten yüksek olan modeller, düşük kolon esneklik parametresi ve düşük eksenel yük ile çelik levhalı perde duvar arzu edilen doğrusal olmayan davranışa sahip olabilir.

Nihai ötelenme oranı ile en güçlü korelasyon, Şekil 5.8(e)'de gösterildiği gibi kolon esneklik parametresi ile ortaya çıkmaktadır. Genel bir gözlem olarak, kolon esneklik faktörü 2.1'in altında olan modeller, istenen göçme mekanizması aşamalarını

takip etmiş ve istisnasız olarak yüksek yer değiştirme kapasitesi göstermiştir. Bu gruptaki modeller arasında en düşük nihai ötelenmeye sahip olan model 0.07 nihai ötelenme oranına ulaşmıştır. En yüksek eksenel yük oranı ve en yüksek plaka en – boy oranı kombinasyonuna sahip olan modeller bile başarılı bir davranış sergilemiştir. Daha yüksek kolon esneklik parametresine sahip çelik levhalı perde duvarlar ise plaka en – boy oranı, plaka kalınlığı, I_c/I_b oranı ve eksenel yük seviyesi açısından daha dikkatli tasarlanmalıdır.

Bu bölümde tüm ön tasarım parametreleri kullanılarak tüm modeller için nihai ötelenme oranları incelenmiştir. Son aşama olarak tasarım parametreleri ile nihai ötelenme oranları arasında bir regresyon analizi yapılmıştır. Bu analiz sonucunda elde edilen formül;

$$DR_u = 0.3084 + 0.00474t_w - 0.10376\omega_i - 0.02342\frac{L_p}{h_p} - 0.09961\frac{P}{P_{cr}} \tag{5.1}$$

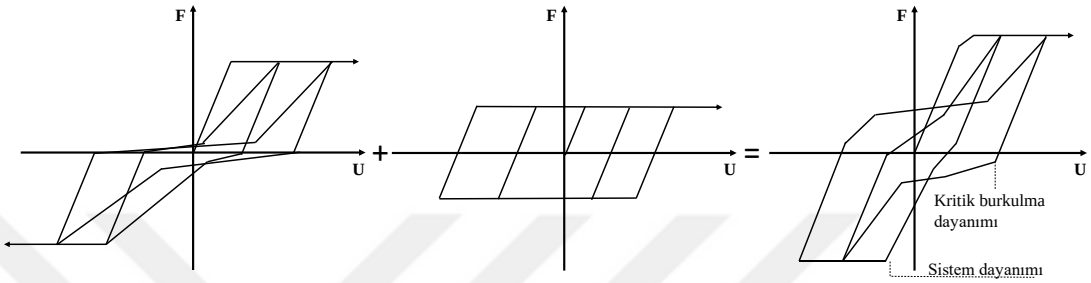
şeklindedir.

Şekil 5.8(f)'te regresyon analizinden elde edilen nihai ötelenme oranları ile sonlu eleman analizlerinden elde edilen oranlar karşılaştırılmıştır. Analizin R kare değeri yaklaşık 0.9 olup, önerilen denklemin oldukça güvenilir olduğunu göstermektedir. Bu formül kullanılarak bir çelik levhalı duvarın nihai ötelenme oranı hesaplanabilir ve ön tasarım aşamasının en başında tasarlanan duvar davranışı tahmin edilebilir.

5.2.4. Çelik levhalı perde duvarların histerezis davranışları

Histerezis döngüleri, tasarım parametrelerinin farklı kombinasyonları ile oluşan farklı gövde plakası – çerçeve kuvvet dağılımına bağlı olarak farklı davranış şekilleri izlemektedirler. Kalın veya ince plakaların kullanımı, düşük veya yüksek kolon esneklik parametresi, düşük veya yüksek gövde plakası en boy oranları gibi parametreler döngü sıkışması, enerji tüketme kapasitesi vb. histerezis davranış öğelerini etkiler. Çelik levhalı perde duvar elemanları olan gövde plakası ve çerçevenin genelleştirilmiş yük-deplasman histerezis davranışları Şekil 5.9'da verilmiştir. Gövde plakası Şekil 5.9(a)'da görüldüğü gibi daha sıkışmış bir histerezis davranışa sahipken çerçeve ise Şekil 5.9(b)'de gösterildiği gibi daha çok elasto-plastik bir davranış göstermektedir. Gövde levhası

çevrimlerinde negatif yönde yükleme başlarken belirli bir gerilme seviyesine kadar plaka burkulmaz ve basınç altında dayanım gösterir. Şekil 5.9(c)'de gösterilen kritik burkulma dayanımı plaka geometrisi ve sınır şartları tarafından şekillendirilmektedir. Güçlü kolonlar kullanıldığında kritik burkulma dayanımı azalmaktadır. Benzer şekilde yüksek gövde plakası en – boy oranı, Şekil 5.9(c)'de gösterilen kritik burkulma dayanımının artmasına neden olur.



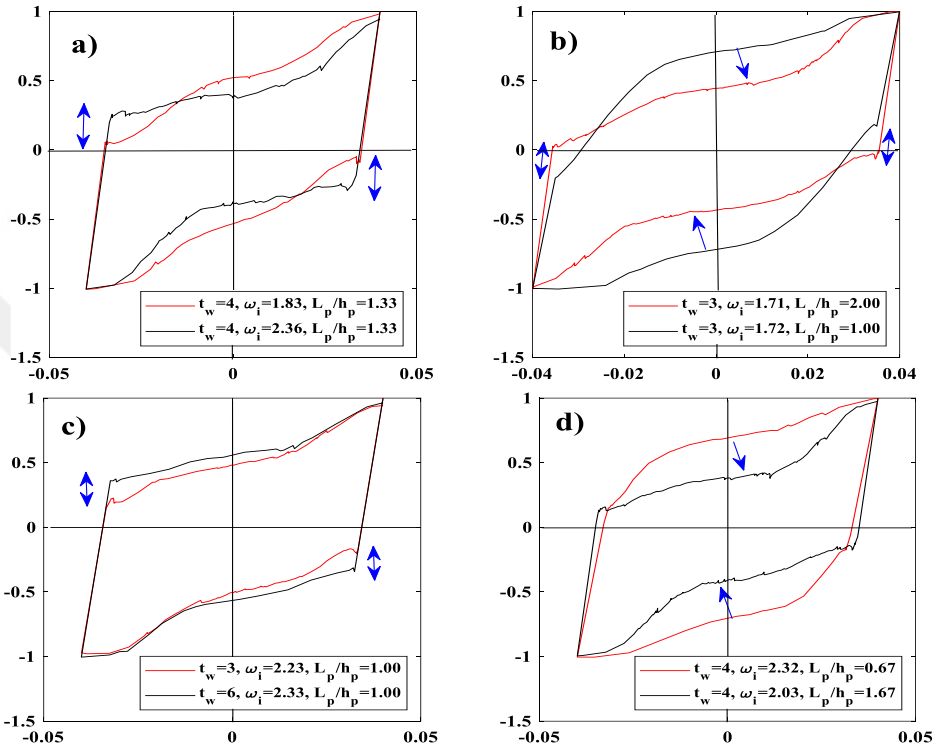
(a) Gövde plakası (b) Çerçeve (c) ÇLPD

Şekil 5.9. Genelleştirilmiş gövde plakası, çerçeve ve ÇLPD yük – deplasman histerezis modelleri.

Tasarım parametrelerinin histerezis yük modeli üzerindeki etkisini incelemek için farklı modellerin sonlu elemanlar analizi sonuçları kullanılmıştır. Modellerin aynı ötelenme oranında (0.04) tamamladığı çevrime denk gelen çevrimleri daha iyi gözlem yapabilmek için karşılaştırılmıştır. Ayrıca değerlendirmenin daha kolay yapılabilmesi için sistem maksimum kesme dayanımı kullanılarak eğrilerdeki kuvvet ekseni normalleştirilmiştir. Sonuçlar Şekil 5.10'da sunulmuştur. Sonuçlara göre histerezis davranışı üzerinde en baskın parametreler kolon esneklik parametresi, gövde plakası en – boy oranı ve gövde plakası kalınlığıdır.

Şekil 5.10(a)'da aynı plaka kalınlığı ve aynı plaka en – boy oranına sahip iki modelin çevrimleri karşılaştırılmıştır. Buna göre, yüksek kolon esneklik parametresi plakanın kritik burkulma dayanımını azaltmaktadır. Daha önceki bölümlerde basınç bölgesinde burkulma yükünün sistemdeki plaka kesme kuvveti oranından etkilendiği gösterilmişti. Güçlü kolon kullanımında çerçevenin dayanımına katkısı arttığı için bu sonuçlar önceki analizlerin sonuçları ile uyum göstermektedir. Düşük en-boy oranlarına sahip gövde plakaları kullanıldığında daha büyük histerezis döngüleri oluştuğu gözlenmiştir. Şekil 5.10(b)'de aynı plaka kalınlığına ve benzer kolon esneklik parametresine sahip iki modeli karşılaştırılmaktadır. Daha düşük en-boy oranına sahip

modelin daha geniş bir döngüye sahip olduğunu görülmektedir. Daha ince gövde plakasına sahip çelik levhalı perde duvarlar Şekil 5.10(c)'de görüldüğü gibi daha küçük kritik burkulma dayanımına sahip olma eğilimindedir. Şekil 5.10(d)'de kolon esneklik parametresinin farklılığından dolayı meydana gelen kritik plaka burkulma dayanımındaki fark farklı plaka en – boy oranı ile kapatılmıştır. Fakat yine düşük en – boy oranına sahip modelin daha geniş bir döngüye sahip olduğu görülmüştür.



Şekil 5.10. Farklı modellerin histerezis şekilleri karşılaştırması.

5.2.5. Çelik levhalı perde duvarların enerji tüketme kapasiteleri

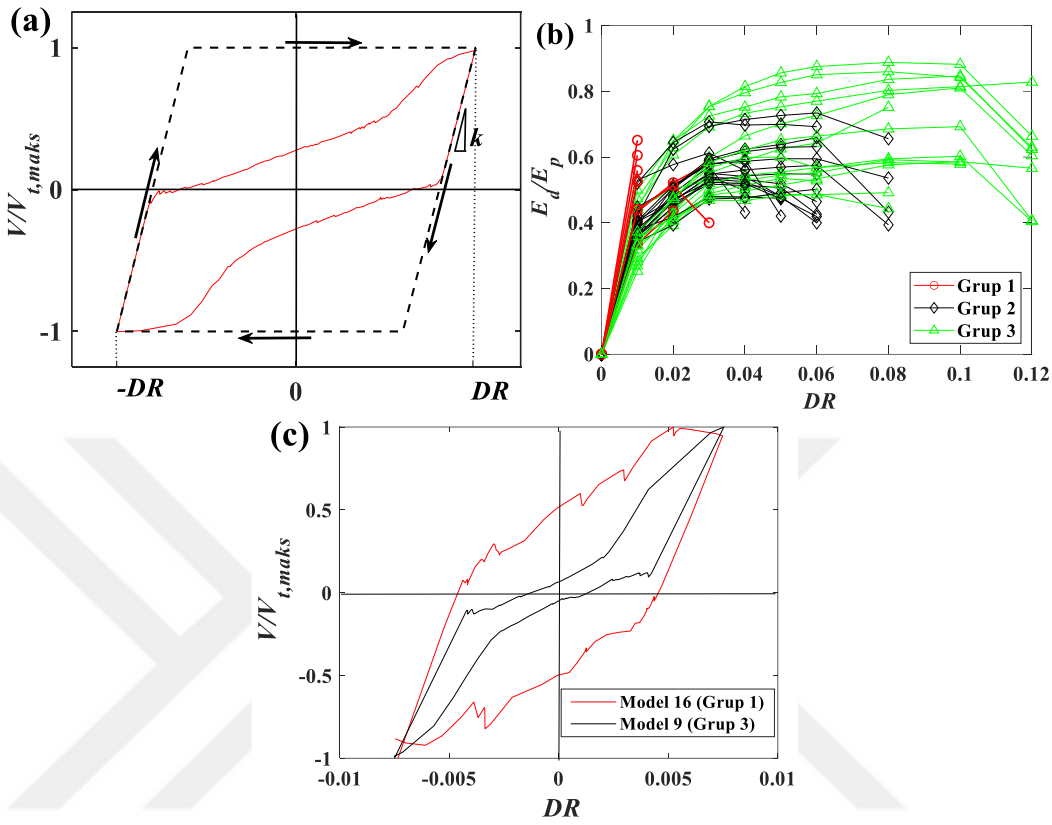
Gelişmiş yapısal analiz yöntemlerinde, çevrimsel yükleme altındaki model davranış özelliklerinin belirli bir doğrulukla tahmin edilmesi gerekmektedir. Yapının dayanımı, yer değiştirme kapasitesi, göçme mekanizması ve enerji tüketme kapasitesi, çevrimsel yükleme altındaki davranışı anlamak için en önemli parametrelerdendir. Bu çalışmada, çelik levhalı perde duvarların dayanımı, göçme mekanizmaları ve deformasyon kapasiteleri önceki bölümlerde incelenmiştir. Bu bölümde ise modellerin çevrimsel yükleme altındaki enerji tüketme kapasiteleri incelenmiştir.

Enerji tüketme kapasitesi ampirik formüller veya doğrudan deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar kullanılarak yorumlanmaktadır. Bu çalışmada, pratik karşılaştırmalar yapabilmek için yük – deplasman eğrileri normalleştirilmiştir. İlk olarak yük değerleri modelin ulaştığı maksimum taban kesme kuvvetine bölünerek histerezis döngülerinin model dayanımından bağımsız hale gelmesi sağlanmıştır. Ardından tüketilen enerjiyi hesaplayabilmek için yükleme protokolü ışığında hesaplama yapılacak deplasmanlar model yüksekliği kullanılarak ötelenme oranları haline getirilmiştir. Daha sonra, hesaplama yapılacak olan ötelenme oranı seviyesine karşılık gelen ilk çevrimin oluşturduğu kapalı alan (E_d) hesaplanmıştır. Aynı yöntemle aynı ötelenme oranı seviyesinde ideal elasto-plastik davranış sergileyen bir döngünün kapalı alanı (E_p) hesaplanmıştır. Son olarak, E_p ve E_d alanlarının oranı hesaplanarak ilgili ötelenme seviyesinde elasto-plastik döngüde tüketilen enerjiye göre sistemin ne oranda enerji tükettiği bulunmuştur. Herhangi bir ötelenme oranında E_d/E_p oranını hesaplamak için kullanılan temsili model Şekil 5.11(a)'da sunulmuştur.

Hesaplanan enerji tüketme oranları Şekil 5.11(b)'de verilmiştir. Bu grafikte E_d/E_p oranı her ötelenme seviyesindeki değişimi pratik bir şekilde gözlemleyebilmek için kümülatif olarak verilmemiştir. Beklenilebileceği gibi yüksek ötelenme kapasitesine sahip modeller toplamda en yüksek enerji tüketme seviyesine sahiptir. Grup 2, yaklaşık 0.06 ötelenme seviyelerine kadar neredeyse sabit histerezis şekillerine sahiptir. Grup 3'de ise bu ötelenme seviyesi yaklaşık olarak 0.1 seviyesine çıkmaktadır. Yüksek ω_i ve düşük L_p/h_p kullanıldığında çevrimsel yükleme histerezis davranışının elasto plastik eğriye yaklaştığı sonucu ortaya çıkmaktadır.

Grup 1 çok limitli ötelenme oranlarına sahip olmasına rağmen Şekil 5.11(b)'de görüldüğü gibi düşük ötelenme oranlarında diğer modellere göre daha yüksek hesaplanan E_d/E_p oranına sahiptir. Bunun nedeni, Grup 1'deki modeller düşük ötelenmelerdeki döngülerde genellikle yüksek plastik deformasyonlara sahipken, diğer gruplardaki modeller henüz elastik bölgeye daha yakındır. Dolayısıyla yüksek ötelenme kapasiteli modelde enerji tüketim oranı elasto-plastik çevrime göre oldukça düşüktür. Örneğin, grup 1 ve grup 3'te meydana gelen baskın çevrimsel davranışı temsil eden seçili modellerin 0,0075 ötelenme oranına karşılık gelen çevrimleri, Şekil 5.11(c)'de gösterilmektedir.

Grup 1'de bulunan modelin E_d/E_p oranı daha yüksekken daha iyi performansa sahip diğer model daha küçük E_d/E_p oranına sahiptir.

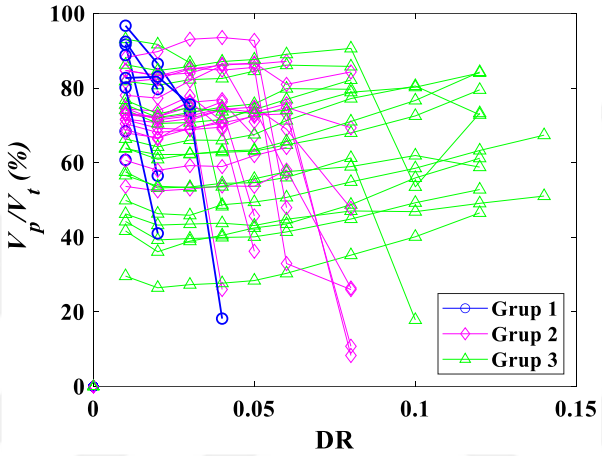


Şekil 5.11. E_d/E_p hesaplamasında kullanılan parametreler (b) bütün modellerin E_d/E_p oranları (c) 0.0075 ötelenme oranında farklı modellerin çevrimlerinin karşılaştırılması.

5.2.6. ÇLPD modellerde plaka – çerçeve kesme kuvveti dağılımı

Yönetmelikler, ön tasarımda kabul edilecek çerçeve ve gövde plakasının dayanıma katkısının dağılımı konusunda daha önceki bölümlerde anlatıldığı gibi farklı yaklaşımlara sahiptir. Özetleyecek olursak CAN\CSA (2001), ön tasarımda çelik levhalı perde duvarın gövde plakasının tüm yüke dayanacak şekilde tasarlanmasını ve çerçevesinin katkısının ihmal edilmesini önerir. AISC-341-05 (2005), gövde plakası ve sınır çerçevesi üzerindeki yük dayanımı dağılımı konusunda aynı yaklaşıma sahiptir. Mevcut AISC-341-16 (2016) yönetmeliği ise önceki yaklaşımı değiştirerek tasarımın plakaya göre yapıldıktan sonra çerçevenin sistem dayanıma katkısına bir alt sınır getirerek toplam kesme kuvvetinin %25'inden az olmamasını gerektiğini belirtmektedir.

Bu çalışmanın sonlu eleman sonuçları göz önüne alındığında, Grup 1'deki istenmeyen davranış sergileyen tüm modellerin gövde plakası kesme kuvvetinin toplam kesme kuvvetine oranının yüzde 75 ve üzerinde olduğu görülmüştür. Plaka kesme kuvveti, birinci kat plakasının orta seviyesindeki düğümlerden gelen kuvvetler kullanılarak hesaplanmıştır. Temsili V_p/V_t değeri, yük deformasyon eğrisindeki akma noktasında hesaplanmıştır. V_p/V_t oranının tüm modeller için yükleme geçmişi boyunca değişimi Şekil 5.12'de sunulmuştur. Buna göre V_p/V_t oranı göçme mekanizması gelişene kadar farklı ötelenme oranlarında çok fazla değişim göstermemektedir.



Şekil 5.12. Modellerin gövde levhası – toplam kesme kuvveti dağılımı.

Sonuçlar genel olarak değerlendirildiğinde, V_p/V_t oranı %75'in üzerinde olmasına rağmen ikinci ve üçüncü grupta yer alan modellerin olduğu görülmektedir. Buradan çıkan sonuca göre çerçeve kesme kuvvetinin toplam kesme kuvvetine oranının yüzde 25 olması istenmeyen davranışlara yol açabilir fakat iyi tasarım parametresi kombinasyonları ile göçme mekanizması istenilen hiyerarşiye ulaşabilir. Genelleme yapılırsa, çerçevenin toplam kesme kuvvetinin %25'inden fazlasını taşımaması, tasarımın bu orana göre yapılması daha iyi sonuçlar elde etme olasılığını artırmaktadır.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak çelik levhalı perde duvarların ön tasarımında kullanılan parametrelerin sistem davranışına etkisi incelenmiştir. Bunun için sonlu eleman yöntemi doğrulaması yapıldıktan sonra üç katlı ve moment taşıyabilen birleşimlere sahip sonlu eleman modeller monotonik ve çevrimsel yükleme altında analiz edilmiştir. Davranışı etkileyen gövde levhası kalınlığı, gövde levhası en – boy oranı, kolon esneklik parametresi, düşey ve yatay sınır elemanları atalet momentlerinin oranı ve eksenel yük seviyesi parametreleri nihai ötelenme oranları, göçme mekanizmaları ve gövde plakası – çerçeve kuvvet dağılımı yönünden incelenmiştir.

Yönetmeliklerde bulunan ve araştırmacılar tarafından önerilmiş olan tasarım parametreleri bağıntıları ve limitleri dikkate alınarak doğrusal olmayan analiz sonuçları değerlendirilmiştir. Bu sonuçlar aşağıdaki şekilde özetlenebilir.

Yarı – rijit birleşim modeli için bir kiriş – mafsal modeli uygulanmıştır. Moment – rotasyon ilişkisinin zarf eğrisi basitleştirilmiş bir kabuk eleman yöntemi ile elde edilmiştir. Daha sonra birleşim birbirine paralel doğrusal olmayan, farklı dayanımlara sahip kiriş elemanları ile yeniden tanımlanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre kiriş mafsal modeli histerezis eğrinin sahip olduğu sıkışma davranışını basitleştirilmiş kabuk modele göre oldukça geliştirmiş ve sistem davranışını tatmin edici düzeyde simüle etmiştir.

Yükleme protokolünde uygulanan çevrim sayısı, yük artırımının büyüklüğü gibi parametrelerin histerezis davranışı etkilediği gözlemlenmiştir. Aynı yer değiştirmede uygulanan tekrar sayısının model histerezisinde rijitlik azalmasına yol açtığı görülmüştür. Farklı yükleme geçmişine sahip aynı çelik levhalı perde duvarlarda yerel burkulma lokasyonunu değişebilmektedir.

Çekme alanı eğim açısı 292 modelin tümünde 42° ile 47° arasında değişmektedir. Ön tasarımda çekme alanı eğim açısının değerini 45° olarak kabul etmek analiz sonuçları açısından uygun olmaktadır. Sınır elemanlar belirlendikten sonra hesaplanacak çekme alanı eğim açısı hesabı için parametrelere bağlı bir düzeltme katsayısı önerilmiştir.

Monotonik yükleme altında göçme mekanizmaları sınıflandırılarak yedi farklı göçme modu tanımlanmış ve bu modların tasarım parametreleri ile ilişkileri incelenmiştir. Kolonda meydana gelen dengesizlik durumlarının nihai ötelenme oranında düşüşe sebep olduğu görülmüştür. Ayrıca bu modellerde çerçeve ve gövde plakası kuvvet dağılımında yüksek (V_p/V_t>0.75) oranlara ulaşılmıştır. Bu davranış genel olarak kolon esneklik parametresinin 2.2 üzerinde olduğu durumlarda ve yüksek eksenel yük ve plaka en – boy oranı kullanıldığında meydana gelmektedir. Bunun gibi esnek elemanlara sahip sistemlerde (ω_1>2.2 ve L_p/h_p>1.5), I_c/I_b oranının 2.0 üzerinde olması sistem performansını olumlu yönde etkilemektedir.

Kolon esneklik parametresinin 2.2 altında olduğu (güçlü kolonlara sahip) modellerde yüksek en – boy oranı (≥1.5) ve yüksek I_c/I_b oranı kullanımında üst ankraj kirişinde ani düzlem dışı burkulmalar görülmüştür. Bu durum yük – deformasyon eğrisinde bir yumuşama davranışı görülmeden ani düşüşlere sebep olmaktadır. Eğer plaka en – boy oranı 1.5 altında ise bu durumda göçme yine üst ankraj kirişinde meydana gelmekte fakat düzlem içi kesme burkulması mekanizması gelişmektedir ve ötelenme oranı kapasitesinde ciddi oranda iyileşme görülmektedir. Göreceli olarak güçlü kolon kullanımında (ω_1≤2.2) en iyi performans gösteren modeller L_p/h_p oranı 1.5'den küçük ve I_c/I_b oranı 2.5'den küçük modellerdir.

Eksenel yük seviyesi göçme mekanizmalarının kendi içerisinde güçlü korelasyonlara sahip değildir fakat göçme mekanizmasının oluşumunda önemli etkiye sahiptir. Eksenel yükün olmadığı bir yapının olması gerçeklikten uzak olduğu gibi yönetmelik limitlerinde tasarlanan çelik levhalı perde duvarlarda dahi yüksek eksenel yük erken göçme durumlarına yol açabilmektedir. Kolon dengesizlik durumlarının meydana geldiği modeller genel olarak yüksek eksenel yüklü modellerdir ve nihai ötelenme kapasiteleri bakımından en kötü performans gösteren modellerdendir.

V_p/V_t oranı için 0.75 oranı bir eşik değer olarak ortaya çıkmaktadır. Bu çalışma sonuçlarına göre çerçevenin toplam dayanımın en az %25'i kadar dayanıma sahip olması sistemin yetersiz performans gösterme olasılığını oldukça azaltmaktadır. Bu oran üzerinde gövde levhası – çerçeve dayanım dağılımına sahip modellerde düşük performans gösteren göçme mekanizmalarının oluşma olasılığı artmaktadır.

Gövde levhası ve çerçeve etkileşiminde en önemli iki parametre kolon esneklik parametresi ve plaka en – boy oranıdır. Bu dağılım özelinde eksenel yük ve plaka kalınlığının güçlü ilişkileri bulunmamaktadır. Düşük en – boy oranına sahip çelik levhalı perde duvarlarda gövde plakasının toplam dayanıma katkısı yüzde olarak azalmaktadır. Büyük kolon esneklik parametresi kullanımında gövde plakası dayanımının toplam dayanıma oranı artmaktadır.

Kalın gövde plakası kullanımında düşey sınır eleman üzerindeki yükler artmakta ve nihai ötelenme kapasitesi sınırlandırılmaktadır. Özellikle kolon esneklik parametresi 2.3 ve üzerinde olan modellerde kalın plaka ($t_w \geq 5$mm) kullanımında dikkatli olunmalıdır. Doğru parametre kombinasyonları (düşük ω_i gibi) ile kalın plaka kullanımında da önemli nihai ötelenme oranlarına ulaşılabilir.

Özellikle kolon esneklik parametresi 2.1 üzerinde ise gövde plakası en – boy oranının artması nihai ötelenme oranı üzerinde negatif bir etkiye sahiptir. Nihai ötelenme oranı ve enerji tüketme kapasitesi bakımından en kötü performansa sahip olan gruplarda bütün modellerde en – boy oranı genellikle 1.33 ve üzerindedir. Bu davranıştan dolayı plaka en – boy oranı 1.33'ten yüksek olan çelik levhalı perde duvarlar için kolon esneklik parametresi üst limitinin 2.1 olması önerilmektedir.

Kolon ve kiriş atalet momentleri oranının (I_c/I_b) göçme mekanizmasını etkilediği ve belirli durumlarda istenmeyen göçme mekanizmalarını tetiklediği görülmüştür. Her iki yükleme durumunda da benzer şekilde yüksek kolon esneklik parametresine sahip modellerde ($2.3 \leq \omega_i$) I_c/I_b oranının 2 üzerinde olması tavsiye edilmektedir. Gruplardan bağımsız olarak tüm modeller incelendiğinde en iyi performans I_c/I_b oranı 2 ile 4 arasında olduğunda elde edilmektedir.

Çelik levhalı perde duvar tasarım felsefesine göre sınır elemanların gövde plakasının tamamının akmasını sağlayabilecek kadar rijit olması gerekmektedir. Bu çalışmadaki modellerin doğrusal olmayan davranışları incelendiğinde kolon esneklik parametresinin üst limitinin 2.1 olması durumunda çoğu istenmeyen göçme mekanizması elemine edilmiş olmaktadır.

Monotonik analiz ile hesaplanan yer değiştirme kapasiteleri ile çevrimsel analiz ile hesaplananlar arasında güçlü bir korelasyon bulunmuştur. Bu korelasyona göre modellerin çevrimsel yük altında yer değiştirme kapasitesi monotonik kapasitenin yaklaşık %70'ine denk gelmektedir.

Çevrimsel yükleme altındaki modellerin nihai ötelenme oranlarını yüksek doğrulukta tahmin eden bir bağıntı önerilmiştir. Bu bağıntıdaki değişkenler yalnızca ön tasarımda kullanılan parametrelerdir.

Çelik levhalı perde duvarların histerezis davranışında en baskın olan parametreler gövde plakası kalınlığı, kolon esneklik parametresi ve gövde plakası en – boy oranıdır. Düşük kolon esneklik parametresi kullanıldığında daha düşük kritik plaka burkulma dayanımı elde edilmektedir. Histerezisteki sıkışma davranışı gövde levhası en – boy oranına güçlü bir şekilde bağlıdır. Yüksek en – boy oranına sahip modellerde daha çok sıkışma davranışı görülmektedir.

Çerçeve – gövde levhası kuvvet dağılımı göze alındığında monotonik ve çevrimsel yükleme durumlarında benzer şekilde toplam dayanımın %25'i ve daha fazlasının çerçeve tarafından karşılandığı modeller daha iyi performans göstermektedir.

Her ne kadar kolon esneklik parametresinin üst limitinin 2.1 olduğu durumlarda çok büyük olasılıkla iyi bir sistem performansı elde edilse de bu limit üzerindeki bazı modellerde de (özellikle yönetmeliklerdeki katlar arası ötelenme limitleri dikkate alındığında) çok iyi performans elde edilebilmektedir. Daha küçük kesitlerin seçiminde ekonomik olarak çok büyük kazanımlar elde edilebileceği unutulmamalıdır. Bunun için bu çalışmada detaylı olarak incelenen farklı tasarım parametrelerinin sistem davranışına etkileri göz önüne alarak iyi bir parametrik kombinasyon ortaya konulmalıdır.

KAYNAKLAR

101-96, J. 1997. Specification for seismic test method (JGJ 101-96). Beijing: China Construction Industry Press.

AISC. 2005. ANSI/AISC 341-05. Seismic Provisions for Structural Steel Buildings. American Institute of Steel Construction America.

AISC. 2016. Seismic Provisions for Structural Steel Buildings. ANSI/AISC 341, 16.

Altman, W. G., Azizinamini, A., Bradburn, J. H., and Radziminski, J. B. 1983. Moment-rotation characteristics of semi-rigid steel beam-column connections. National Technical Information Service.

Ansys, R. 2016. Academic Research Mechanical, Release 17.2, Help System; ANSYS. Inc.: Canonsburg, PA, USA.

Association, C. S. 2001. Limit states design of steel structures. Canadian Standards Association.

Astaneh-Asl, A. 2001. Seismic behavior and design of steel shear walls. Structural Steel Educational Council Moraga, CA.

Astaneh, A., Nader, M. N., and Malik, L. 1989. Cyclic behavior of double angle connections. Journal of Structural Engineering, American Society of Civil Engineers, 1155), 1101–1118.

Basler, K. 1961. Strength of Plate Girders in Shear. Journal of the Structural Division, American Society of Civil Engineers (ASCE), 87(7), 151–180.

Behbahanifard, M. R. ., Grondin, G. Y., and Elwi, A. E. 2003. Experimental and numerical ınvestigation of steel plate shear wall. Edmonton, Canada.

Berman, J., and Bruneau, M. 2003a. Plastic Analysis and design of steel plate shear walls. Journal of Structural Engineering, 166(November), 472–484.

Berman, J. W. 2011. Seismic behavior of code designed steel plate shear walls. Engineering Structures, 33(1), 230–244.

Berman, J. W., and Bruneau, M. 2003b. Experimental investigation of light-gauge steel plate shear walls for the seismic retrofit of buildings. Buffalo, New York.

Caccese, V., Elgaaly, M., and Chen, R. 1993. Experimental study of thin steel-plate shear walls under cyclic load. Journal of Structural Engineering, 119(2), 573–587.

CAN/CSA. 2001. Limit States design of steel structures.

CAN, C. S. A. 2009. CSA-S16-09 Limit states design of steel structures. Rexdale, ON: Canadian Standard Association.

Choi, I. R., and Park, H. G. 2009. Steel plate shear walls with various infill plate designs. Journal of Structural Engineering, 135(7), 785–796.

Clark, P., Frank, K., Krawinkler, H., and Shaw, R. 1997. Protocol for fabrication, inspection, testing, and documentation of beam-column connection tests and other experimental specimens. SAC Steel Project Background Document (Report No. SAC/BD-97/02).

Comitee, A. 2016. Seismic provisions for structural steel buildings, ANSI/AISC 341-10. AISC, 355–410.

Council, A. T. 1992. Guidelines for cyclic seismic testing of components of steel structures. Redwood City, California, USA.

Council, A. T., Center, M.-A. E., (US), M. C. for E. E. R., Center, P. E. E. R., Agency, U. S. F. E. M., and (US), N. E. H. R. P. 2007. Interim testing protocols for determining the seismic performance characteristics of structural and nonstructural components. Federal Emergency Management Agency.

Curkovic, I., Skejic, D., and Dzeba, I. 2017. Impact of column flexural stiffness on behaviour of steel plate shear walls. ce/papers, Wiley, 1(2–3), 3023–3032.

Dastfan, M., and Driver, R. G. 2008. Flexural stiffness limits for frame members of steel plate shear wall systems. Proc., Annual Stability Conf, 321–334.

Driver, R. G., Kulak, G. L., Elwi, A. E., and Kennedy, D. J. L. 1997a. Seismic behaviour of steel plate shear walls. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 26(10).

Driver, R. G., Kulak, G. L., Elwi, A. E., and Kennedy, D. J. L. 1998a. FE and simplified models of steel plate shear wall. Journal of Structural Engineering, American Society of Civil Engineers, 124(2), 121–130.

Driver, R. G., Kulak, G. L., Kennedy, D. J. L., and Elwi, A. E. 1998b. Cyclic test of four-story steel plate shear wall. Journal of Structural Engineering, 124(2), 112–120.

Driver, R. G., Kulak, G. L., and Laurie, K. D. J. 1997b. Seismic behavior of steel plate shear wall: structural engineering report No 215. Edmonton, AB: Department of Civil Engineering, University of Alberta.

Elgaaly, M., Caccese, V., and Du, C. 1993. Postbuckling behavior of steel-plate shear walls under cyclic loads. Journal of Structural Engineering, American Society of Civil Engineers, 119(2), 588–605.

Elgaaly, M., and Liu, Y. 1997. Analysis of Thin-Steel-Plate Shear Walls. Journal of Structural Engineering, American Society of Civil Engineers (ASCE), 123(11), 1487–1496.

Gholipour, M., and Alinia, M. M. 2016. Behavior of multi-story code-designed steel plate shear wall structures regarding bay width. Journal of Constructional Steel

Research, Elsevier Ltd, 122, 40–56.

Gorji Azandariani, M., Gholhaki, M., and Kafi, M. A. 2020. Experimental and numerical investigation of low-yield-strength (LYS) steel plate shear walls under cyclic loading. Engineering Structures, Elsevier, 203(July 2019), 109866.

Hosseinzadeh, S. A. A., and Tehranizadeh, M. 2014. Behavioral characteristics of code designed steel plate shear wall systems. Journal of Constructional Steel Research, Elsevier BV, 99, 72–84.

JGJ101-96. 1997. JGJ 101-96 Specification of Testing Methods for Earthquake Resistant Buildings.

Kristeva, N. 2010. Trimming the Fat. Modern Steel construction, (February).

Kuhn, P., Peterson, J. P., and Levin, L. R. 1952. A summary of diagonal tension Part I: methods of analysis.

Li, C. H., and Tsai, K. C. 2008. Experimental responses of four 2-story narrow steel plate shear walls. Proceedings of the 2008 Structures Congress, Vancouver, Canada.

Lubell, A. S. 1997. Performance of unstiffened steel plate shear walls under cyclic quasi-static loading. University of British Columbia.

Lubell, A. S., Prion, H. G. L., Ventura, C. E., and Rezai, M. 2000. Unstiffened steel plate shear wall performance under cyclic loading. Journal of Structural Engineering, ASCE, 126(4), 453–460.

Matteis, G. D. E., Formisano, A., and Mazzolani, F. M. 2007. Numerical analysis of slender steel shear panels for assessing design formulas. International Journal of Structural Stability and Dynamics, 7(2), 273–294.

Mimura, H., and Akiyama, H. 1977. Load-deflection relationship of earthquake–resistant steel shear walls with a developed diagonal tension field. Transactions of AIJ, 260.

Montgomery, C. J., Medhekar, M., Lubell, A. S., Prion, H. G. L., Ventura, C. E., and Rezai, M. 2001. Unstiffened steel plate shear wall performance under cyclic loading. Journal of Structural Engineering, American Society of Civil Engineers, 127(8), 973–975.

Narayanan, R., and Roberts, T. M. 1991. Structures subjected to repeated loading: Stability and strength. CRC Press.

Park, H.-G., Kwack, J.-H., Jeon, S.-W., Kim, W.-K., and Choi, I.-R. 2007. Framed steel plate wall behavior under cyclic lateral loading. Journal of Structural Engineering, 133(3), 378–388.

Purba, R., and Bruneau, M. 2015. Seismic performance of steel plate shear walls

considering two different design philosophies of infill plates. II: Assessment of collapse potential (2014 b). Journal of Structural Engineering (United States), 141(6), 1–12.

Qian, X., and Astaneh-Asl, A. 2016. Development of a high-performance steel plate shear wall system. Int. J. Earthquake and Impact Engineering, 1(1/2).

Qin, Y., Lu, J. Y., Huang, L. C. X., and Cao, S. 2017. Flexural behavior of anchor horizontal boundary element in steel plate shear wall. International Journal of Steel Structures, Korean Society of Steel Construction, 17(3), 1073–1086.

Qu, B., and Bruneau, M. 2011. Plastic moment of intermediate horizontal boundary elements of steel plate shear walls. Engineering Journal, 48(1), 49–64.

Qu, B., Guo, X., Pollino, M., and Chi, H. 2013. Effect of column stiffness on drift concentration in steel plate shear walls. Journal of Constructional Steel Research, 83, 105–116.

Rezai, M. 1999. Seismic Behaviour of Steel Plate Shear Walls By Shake Table Testing. The Universityof British Columbia.

Robalino, A. F., Zaruma, S. R., and Sánchez, T. A. 2020. Study of story drift limits in steel buildings subjected to seismic forces. Proceedings of the Annual Stability Conference Structural Stability Research Council, SSRC 2020, 1–15.

Roberts, T. M., and Ghomi, S. S. 1991. Hysteretic characteristics of unstiffened plate shear panels. Thin-Walled Structures, Elsevier, 12(2), 145–162.

Sabelli, R., and Bruneau, M. 2007. Design guide 20: steel plate shear walls. American Institute of Steel Construction.

Sabouri-Ghomi, S., and Roberts, T. M. 1992. Nonlinear dynamic analysis of steel plate shear walls including shear and bending deformations. Engineering Structures, 14(5), 309–317.

Seilie, I. F., and Hooper, J. D. 2005. Steel plate shear walls: practical design and construction. Modern Steel construction, 45(4), 37–43.

De Stefano, M., De Luca, A., and Astaneh-Asl, A. 1994. Modeling of cyclic moment-rotation response of double-angle connections. Journal of Structural Engineering, American Society of Civil Engineers, 120(1), 212–229.

Thorburn, L. J., Montgomery, C. J., and Kulak, G. L. 1983. Analysis of steel plate shear walls.

Timler, P. A., and Kulak, G. L. 1983. Experimental Study of Steel Plate Shear Walls. Structural Engineering Report.

Trahair, N. (1993). Flexural-torsional buckling of structures. CRC press.

Tromposch, E. W., and Kulak, G. L. 1987. Cyclic and Static Behaviour of Thin Panel Steel Plate Shear Walls. Structural Engineering Report.

Uang, C. M., and Bruneau, M. 2018. State-of-the-Art Review on Seismic Design of Steel Structures. Journal of Structural Engineering (United States), American Society of Civil Engineers (ASCE).

Verma, A., and Sahoo, D. R. 2016. Estimation of lateral force contribution of boundary elements in steel plate shear wall systems. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 46(7), 1081–1098.

Wagner, H. 1931. Flat sheet metal girder with very thin metal web: Part 1: General theories and assumptions. National Advisory Committee for Aeronautics.

Wang, M., Shi, Y., Xu, J., Yang, W., and Li, Y. 2015. Experimental and numerical study of unstiffened steel plate shear wall structures. Journal of Constructional Steel Research, Elsevier Ltd, 112, 373–386.

Xu, T., Shao, J. H., Zhang, J. Y., and Kaewunruen, S. 2019. Experimental performance evaluation of multi-storey steel plate shear walls designed by different Methods. International Journal of Civil Engineering, Springer International Publishing, 17(7), 1145–1154.

Yu, J. G., Feng, X. T., Li, B., Hao, J. P., Elamin, A., and Ge, M. L. 2018. Performance of steel plate shear walls with axially loaded vertical boundary elements. Thin-Walled Structures, Elsevier Ltd, 125, 152–163.

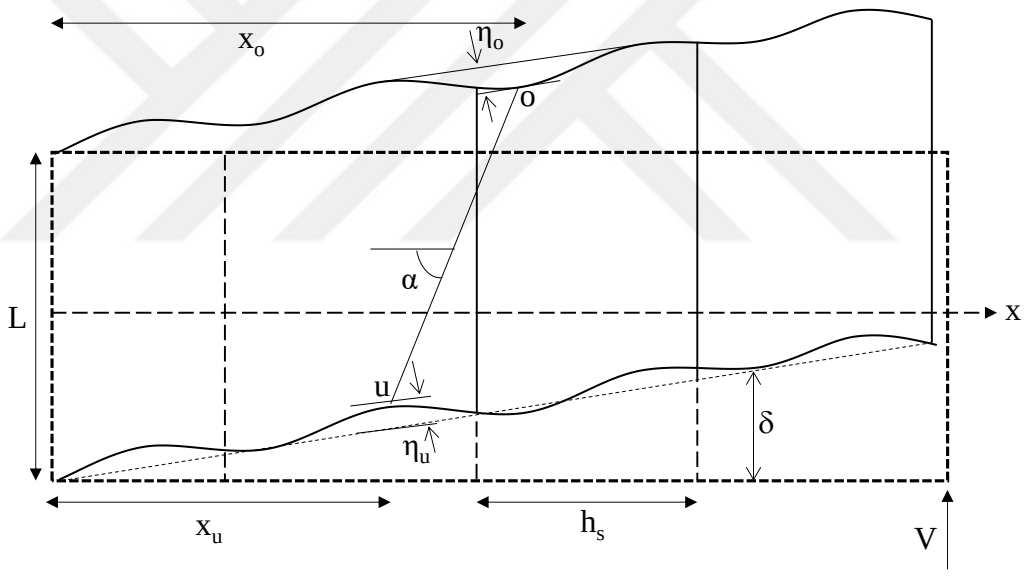
Zirakian, T., and Zhang, J. 2015. Structural performance of unstiffened low yield point steel plate shear walls. Journal of Constructional steel research, Elsevier, 112, 40–53.

EKLER

EK-1

KOLON ESNEKLİK PARAMETRESİ

Wagner (1931) yaptığı çalışmada kolon esneklik parametresini ankastre bir kiriş üzerinden hesaplamıştır. Kirişin gövdesinde oluşan çekme alanlarının üniformitesi flanşların esnekliğine bağlıdır. Şekil 7.1'de gösterilen "*uo*" çekme diyagonali dikkate alınarak deformasyonlar hesaplanmıştır. Flanşların esnek olması durumunda içe doğru deformasyonlar artar ve rijit flanşlı bir kirişe göre "*uo*" boyu azalır. Esnekliğe bağlı olarak bu çubukların kiriş boyunca uzunlukları değişebilir.



Şekil 7.1. Ankastre kiriş deformasyonu (Wagner 1931).

Wagner, kiriş flanşlarının esnekliğinden dolayı oluşacak üniformite kaybını dikkate alarak yerel flanş deformasyonlarını:

$$\frac{\partial^4(\eta_u-\eta_0)}{\partial x^4}=\left(\frac{1}{I_u}+\frac{1}{I_0}\right)t_{wi}\sin^2\alpha\varepsilon_g-\left(\frac{1}{I_u}+\frac{1}{I_0}\right)\frac{t_{wi}\sin^2\alpha}{L}(\eta_u-\eta_0) \tag{7.1}$$

şeklinde hesaplamıştır. Buna göre; L=Kiriş derinliği, α= çekme alanı eğim açısı, t_{wi}=gövde kalınlığı, ε_g= çekme alanındaki gerinim (flanşların rijit olduğu kabul edilirse),

EK-1 (devam)

η_u= gövde çekmesi dolayısıyla oluşan alt flanş deformasyonu, η_o= gövde çekmesi dolayısıyla oluşan üst kiriş deformasyonu, I_u= alt flanş atalet momenti (ÇLPD kolonunu temsil etmektedir), I_o= üst flanş atalet momenti (ÇLPD kolonunu temsil etmektedir). Sınır şartlarını 4.dereceden bir denklem olan Denklem 7.1'de yerine koyarak (η_u-η_0) için çözüm yapılırsa;

η=0 için x=0, $\frac{\partial \eta}{\partial x}$=0 için x=0,

η=0 için x=t, $\frac{\partial \eta}{\partial x}$=0 için x=t.

ve esneklik parametresi ω_t ile ifade edilirse;

$$\omega_t = h_s \sin\alpha \sqrt[4]{\left(\frac{1}{I_u}+\frac{1}{I_0}\right)\frac{t_{wi}}{4L}} \tag{7.2}$$

elde edilir. Burada h_s komşu berkitme levhaları arasındaki uzaklıktır (ÇLPD kirişlerini temsil etmektedir). Her iki flanşta da oluşan maksimum deformasyon aşağıdaki şekilde elde edilir;

$$(\eta_u-\eta_0)_{\max} = \frac{\varepsilon_g L}{\sin^2\alpha}\left(1-\frac{\sin\left(\frac{\omega_t}{2}\right)\cosh\left(\frac{\omega_t}{2}\right)+\cos\left(\frac{\omega_t}{2}\right)\sinh\left(\frac{\omega_t}{2}\right)}{\sin\left(\frac{\omega_t}{2}\right)\cos\left(\frac{\omega_t}{2}\right)+\sinh\left(\frac{\omega_t}{2}\right)\cos\left(\frac{\omega_t}{2}\right)}\right) \tag{7.3}$$

Kuhn vd. (1952) çekme alanı eğim açısı sabit olarak 45° almıştır. Gövde plakası diyagonal çekme altındaki bir kirişi dikkate alarak Wagner (1931) tarafından verilen esneklik parametresini aşağıdaki şekilde basitleştirmiştir.

$$\omega_i \approx 0.7\sqrt[4]{\frac{t_{wi}}{(I_u+I_0)L}} \tag{7.4}$$

EK-2

GÖVDE PLAKASI KESME KUVVETİ HESABI

Denge Metodu (Basit Kolon – Kiriş Birleşimleri)

Denge metodu ile plastik analiz yapılarak basit kiriş – kolon birleşimlerine sahip tek katlı bir çelik levhalı perde duvarın maksimum dayanımı bulunmuştur. Şekil 7.2'de tek katlı, kiriş uçlarında mafsallı bir ÇLPD görülmektedir. Başlangıç olarak bu model 3 bölgeye bölünmüştür. 1. ve 3. bölgelerdeki kirişten kolon elemanına doğru giden şeritler içermektedir. 2. bölge ise sadece üst ve alt kiriş arasında uzanan şeritler içermektedir. Şeritler arası şeritlere dik uzaklık s olarak belirlenmiştir. Yalnız sol üst ve sağ alt köşedeki şeritler kendilerine en yakın olan kiriş kolon birleşiminden *s/2* kadar uzaklıkta yer almaktadırlar. 1. ve 2. bölgelerde şeritlerin sol üst kiriş – kolon birleşimine kadar olan dik uzaklığı d_i olarak belirlenmiştir. 3. bölgede ise d_i, şeritlerin sağ alt kiriş-kolon birleşimine olan dik uzaklığı olarak belirlenmiştir.

Şekil 7.3'den 1. bölgeye etki eden kat kesme kuvveti, d_i uzaklığı, h_s kat yüksekliği ve F_{st} şerit kuvveti cinsinden bulunabilir. İlk olarak C noktasına göre alınan toplam moment (L = kat genişliği ve R_{by} B noktasındaki düşey reaksiyon kuvveti olmak üzere);

$$V_1 \times h_s = R_{by} \times L \tag{7.5}$$

eşitliğini verir. Daha sonra Şekil 7.3(b)'de bulunan serbest cisim diyagramı göz önüne alınarak D noktasına göre moment alınırsa;

$$R_{by} \times L = F_{st} \times d_i \tag{7.6}$$

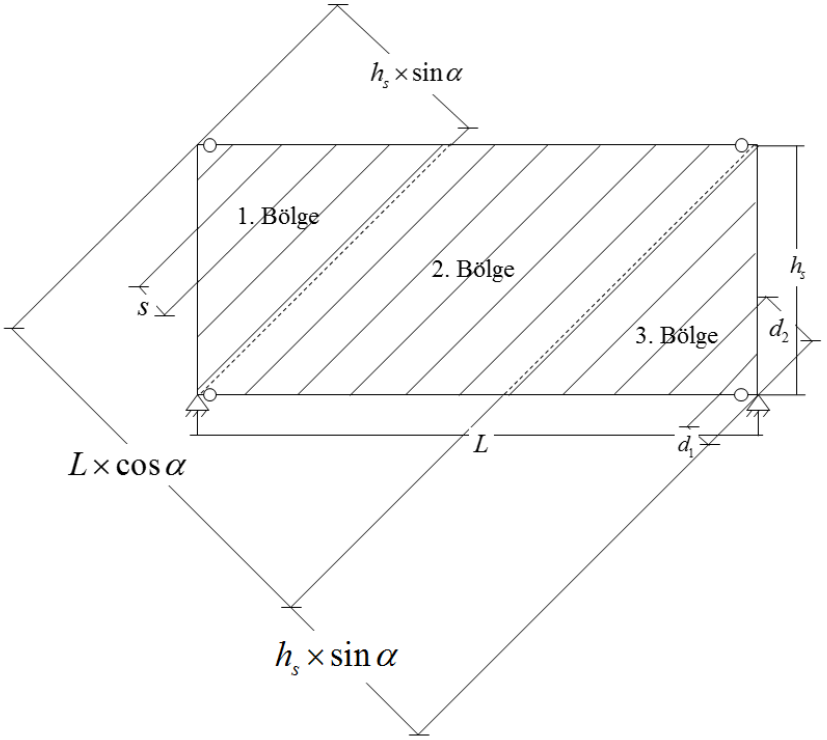
elde edilir.

Bu iki eşitlik kullanılarak elde edilecek kesme kuvveti hesaplanırken $V_1 = \frac{R_{by}\ x\ L}{h_s}$ ve $R_{by} = \frac{F_{st}\ x\ d_i}{L}$ olduğu göz önüne alınarak;

EK-2 (devam)

$$V_1 = \sum_{i=1}^{l} \frac{F_{st} \times d_i}{h_s} \tag{7.7}$$

bulunur (l= 1. bölgedeki şerit sayısı).



Şekil 7.2. Tek katlı çelik levhalı perde duvar şerit modeli.

2. bölge için ise Şekil 7.4(a)'da gösterildiği gibi yine C noktasına göre moment alındığında;

$$V_2 \times h_s = R_{by} \times L + F_{st}(\sin\alpha)h_s - F_{st} \times d_j \tag{7.8}$$

elde edilir. Şekil 7.4(b)'deki serbest cisim diyagramı ele alındığında ise D noktasına göre moment alınırsa;

$$R_{by} \times L = F_{st} \times d_j \tag{7.9}$$

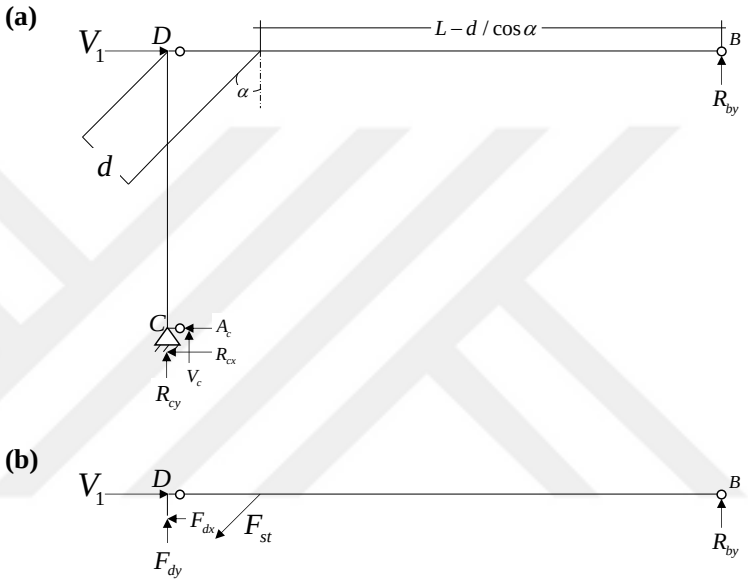
elde edilir.

EK-2 (devam)

Daha sonra 2. bölgede bulunan şeritlerden elde edilen kat kesme kuvveti ise;

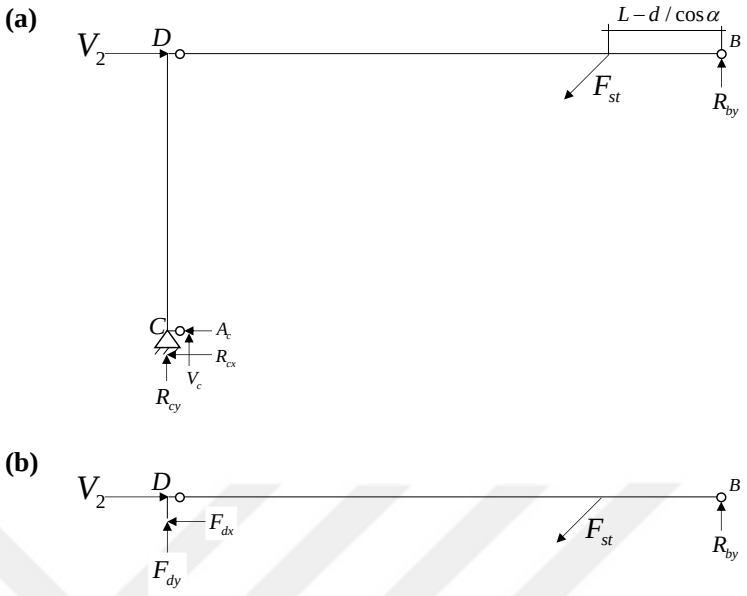
$$V_2 = \sum_{j=1}^{m} F_{st} \times \sin\alpha \qquad (7.10)$$

(m= 2. bölgedeki şerit sayısı) olarak belirlenir.



Şekil 7.3. Birinci bölge serbest cisim diyagramı.

EK-2 (devam)

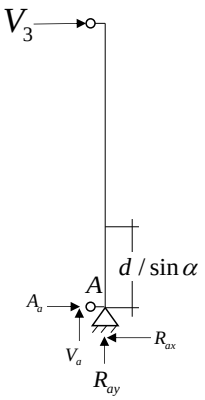


Şekil 7.4. İkinci bölge serbest cisim diyagramı

Son olarak, Şekil 7.6'te bulunan serbest cisim diyagramına bakılarak ve n 3. bölgedeki şerit sayısı olacak şekilde;

$$V_3 = \sum_{k=1}^{n} \frac{d_k \times F_{st}}{h_s} \tag{7.11}$$

elde edilir.



Şekil 7.5. Üçüncü bölge serbest cisim diyagramı

EK-2 (devam)

Daha sonra, 1. ve 3. bölgelerdeki şerit sayısı ayrı ayrı n olarak alınırsa (eşit aralıktan dolayı) her iki bölgenin kat kesme kuvvetine katkısı toplam olarak;

$$V = \sum_{i=1}^{l} \frac{d_i \times F_{st}}{h_s} + \sum_{j=1}^{m} F_{st} \times \sin\alpha + \sum_{i=1}^{n} \frac{d_i F_{st}}{h_s} \tag{7.12}$$

elde edilir.

Şekil 7.2'deki geometriden;

$$l = n = \frac{h_s \times \sin\alpha}{s} \text{ ve } m = \frac{L \times \cos\alpha - h_s \times \sin\alpha}{s} \tag{7.13}$$

olduğu görülecektir.

Sol üst ve sağ alt şeritlerin en yakın birleşimlere olan uzaklıklarının *s/2* olduğu göz önünde bulundurularak toplam d_i;

$$\sum_{i=1}^{n} d_i = \frac{n^2 \times s}{2} \tag{7.14}$$

olarak elde edilir.

Bu aşamada, F_{st} değerinin şerit alanı ($s \times t$) ve plakanın çekmede akma gerilmesi olan F_y ile çarpımı olduğu, ayrıca trigonometrik dönüşümlerden $\left[\frac{1}{2}\sin 2\alpha = \cos\alpha \times \sin\alpha\right]$ olduğu hatırlanırsa, 9. ve 10. denklemler 8. denklemde yerine konduğunda kat kesme dayanımı;

$$V = \frac{1}{2} \times F_y \times t \times L \times \sin 2\alpha \tag{7.15}$$

olarak ifade edilir.

EK-2 (devam)

Kinematik Metot

Aynı sonuçlar daha direkt olarak plastik analizin kinematik metodunu kullanılarak da elde edilebilir. Şekil 7.2'deki aynı çerçeve ele alındığında, kesme kuvveti V, üst kirişin Δ kadar yer değiştirmesine neden olmaktadır. Delta (Δ) mesafesi bütün şeritlerin akmasına yetecek bir mesafe olduğu varsayılmaktadır. Bu durumda dışsal iş $\Delta \times \mathrm{V}$ ye eşit olacaktır (Şekil 7.6). Eğer kiriş ve kolonların elastik kaldığı varsayılırsa, kiriş ve kolonların yaptıkları içsel iş şeritlerin yaptığı içsel iş ile karşılaştırıldığında yok sayılabilir. Bu yüzden ise yapılan toplam içsel iş n_b üst kirişe bağlı olan şerit sayısı olmak üzere, $(n_b \times A_{st} \times F_y \times \sin\alpha) \times \Delta$ olacaktır. Burada dikkat edilmesi gereken hususlardan birisi de sol kolona bağlı şeritlerin akma gerilmelerinin yatay bileşeni negatif iş yaparken sağ kolondaki yatay kuvvetler pozitif iş yaparlar ve bu ikisi birbirini sıfırlar. Ayrıca düşeyde bir yer değiştirme olmadığı için düşey kuvvetlerin hiçbiri içsel iş yapmazlar. Sonuç olarak içsel iş ele alındığında yalnız üst kirişe bağlı olan şerit kuvvetlerinin yatay yöndeki bileşenleri iş yapmaktadır. İçsel ve dışsal iş eşitlendiğinde;

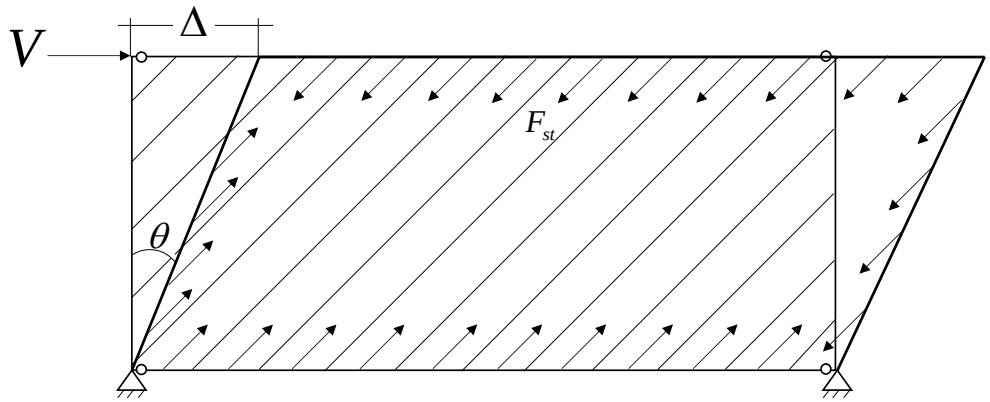
$$V = n_b \times F_{st} \times \sin\alpha \tag{7.16}$$

Yine Şekil 7.2'e bakılacak olursa, $n_b = (L \times \cos\alpha)/s$ olduğu görülecektir. Ayrıca, yine F_{st} değerinin şerit alanı ($s \times t$) ve plakanın çekmede akma gerilmesi olan F_y ile çarpımı olduğu göz önüne alınarak $\left[\frac{1}{2}\sin 2\alpha = \cos\alpha \times \sin\alpha\right]$ dönüşümü kullanılırsa elde edilecek kesme kuvveti ilişkisi;

$$V = \frac{1}{2} \times F_y \times t \times L \times \sin 2\alpha \tag{7.17}$$

olacaktır.

EK-2 (devam)



Şekil 7.6. Tek katlı model çökme mekanizması.

EK-3

MONOTONİK YÜKLEME UYGULANAN MODELLERİN GEOMETRİK DETAYLARI

Model No	Değişkenler					Hesaplanan				Seçilen								
	hp (mm)	Lp (mm)	t_w (mm)	ω_i	K	$K*I_{c,min}$ (cm^4)	$I_{c,min}$ (cm^4)	I_b(cm^4)	I_c/I_b	Kolon Kesit	I_c (cm^4)	Kiriş Kesit	I_b(cm^4)	I_c/I_b	Kiriş b_f/h_b	Kiriş $b_f/2_{tf}$	L_p/h_p	P/P_{cr}
1	3000	3000	5	2.30	2	83700	63198	41850	2	HD 320 x 300	86900	HE 450 A	41890	2.07	0.71	11.11	1.00	0.20
2	3000	3000	5	1.89	4	167400	59947	83700	2	HD 400 x 463	180200	HE 360 M	84870	2.12	0.78	3.85	1.00	0.20
3	3000	3000	3	2.23	2	50220	32786	25110	2	HD 360 x 162	51540	HE 300 B	25170	2.05	1.00	7.89	1.00	0.10
4	3000	3000	3	1.93	4	100440	39760	50220	2	HD 400 x 314	110200	HE 500 AA	54640	2.02	0.64	10.71	1.00	0.10
5	3000	3000	3	1.71	6	150660	35314	75330	2	HD 400 x 421	159600	HE 340 M	76370	2.09	0.82	3.86	1.00	0.10
6	3000	3000	3	1.53	10	251100	39172	125550	2	HD 400 x 634	274200	HE 450 M	131500	2.09	0.64	3.84	1.00	0.10
7	3000	3000	3	1.44	15	376650	43085	188325	2	HD 400 x 818	392200	HE 550 M	198000	1.98	0.53	3.83	1.00	0.10
8	3000	3000	3	2.21	2	50220	31610	12555	4	HD 360 x 162	51540	HE 280 A	13670	3.77	1.04	10.77	1.00	0.10
9	3000	3000	3	1.84	4	100440	32448	25110	4	HD 400 x 314	110200	HE 300 B	25170	4.38	1.00	7.89	1.00	0.10
10	3000	3000	3	1.68	6	150660	32594	37665	4	HD 400 x 421	159600	HE 280 M	39550	4.04	0.93	4.36	1.00	0.10
11	3000	3000	3	1.52	10	251100	37488	62775	4	HD 400 x 634	274200	HE 450 A	63720	4.30	0.68	7.14	1.00	0.10
12	3000	3000	3	1.38	15	376650	36717	94162.5	4	HD 400 x 818	392200	HE 400 M	104100	3.77	0.71	3.84	1.00	0.10
13	3000	5000	3	2.26	2	30132	20756	15066	2	HD 320 x 127	30820	HE 320 AA	16450	1.87	1.00	13.64	1.67	0.10
14	3000	5000	3	1.89	4	60264	21033	30132	2	HD 360 x 196	63630	HE 320 B	30820	2.06	0.94	7.32	1.67	0.10
15	3000	5000	3	1.77	6	90396	25059	45198	2	HD 400 x 287	99710	HE 500 AA	54640	1.82	0.64	10.71	1.67	0.10
16	3000	5000	3	1.53	10	150660	22295	75330	2	HD 400 x 421	159600	HE 340 M	76370	2.09	0.82	3.86	1.67	0.10
17	3000	5000	3	1.50	15	225990	29277	112995	2	HD 400 x 551	226100	HE 650 AA	113900	1.99	0.48	9.38	1.67	0.10
18	3000	5000	3	1.21	30	451980	28776	225990	2	HD 400 x 990	518900	HE 600 M	237400	2.19	0.49	3.81	1.67	0.10
19	3000	5000	3	2.21	2	30132	19027	7533	4	HD 320 x 127	30820	HE 240 A	7763	3.97	1.04	10.00	1.67	0.10
20	3000	5000	3	1.88	4	60264	20556	15066	4	HD 360 x 196	63630	HE 320 AA	16450	3.87	1.00	13.64	1.67	0.10
21	3000	5000	3	1.68	6	90396	20700	22599	4	HD 400 x 287	99710	HE 320 A	22930	4.35	0.97	9.68	1.67	0.10
22	3000	5000	3	1.49	10	150660	20578	37665	4	HD 400 x 421	159600	HE 280 M	39550	4.04	0.93	4.36	1.67	0.10
23	3000	5000	3	1.41	15	225990	22783	56497.5	4	HD 400 x 551	226100	HE 400 B	57680	3.92	0.75	6.25	1.67	0.10
24	3000	5000	3	1.21	30	451980	28776	112995	4	HD 400 x 990	518900	HE 650 AA	113900	4.56	0.48	9.38	1.67	0.10

EK-3 (devam)

Model No	Değişkenler					Hesaplanan				Seçilen							L_p/h_p	P/P_{cr}
	hp (mm)	Lp (mm)	t_w (mm)	ω_i	K	$K*I_{c,min}$ (cm^4)	$I_{c,min}$ (cm^4)	I_b(cm^4)	I_c/I_b	Kolon Kesit	I_c (cm^4)	Kiriş Kesit	I_b(cm^4)	I_c/I_b	Kiriş b_f/h_b	Kiriş $b_f/2_{tf}$		
25	3000	3000	5	2.30	2	83700	63198	41850	2	HD 320 x 300	86900	HE 450 AA	41890	2.07	0.71	11.11	1.00	0.10
26	3000	3000	5	1.89	4	167400	59947	83700	2	HD 400 x 463	180200	HE 360 M	84870	2.12	0.78	3.85	1.00	0.10
27	3000	3000	5	1.74	6	251100	65286	125550	2	HD 400 x 634	274200	HE 450 M	131500	2.09	0.64	3.84	1.00	0.10
28	3000	3000	5	1.61	10	418500	77912	209250	2	HD 400 x 900	450200	HE 650 B	210600	2.14	0.46	4.84	1.00	0.10
29	3000	3000	5	1.57	12	502200	81830	251100	2	HD 400 x 990	518900	HE 700 B	256900	2.02	0.43	4.69	1.00	0.10
30	3000	3000	5	2.23	2	83700	55128	20925	4	HD 320 x 300	86900	HE 320 A	22930	3.79	0.97	9.68	1.00	0.10
31	3000	3000	5	1.91	4	167400	62094	41850	4	HD 400 x 463	180200	HE 450 AA	41890	4.30	0.71	11.11	1.00	0.10
32	3000	3000	5	1.72	6	251100	62479	62775	4	HD 400 x 634	274200	HE 450 A	63720	4.30	0.68	7.14	1.00	0.10
33	3000	3000	5	1.54	10	418500	65873	104625	4	HD 400 x 900	450200	HE 500 B	107200	4.20	0.60	5.36	1.00	0.10
34	3000	3000	5	1.48	12	502200	63888	125550	4	HD 400 x 990	518900	HE 450 M	131500	3.95	0.64	3.84	1.00	0.10
35	3000	5000	5	2.25	2	50220	34269	25110	2	HD 360 x 162	51540	HE 300 B	25170	2.05	1.00	7.89	1.67	0.10
36	3000	5000	5	1.96	4	100440	41719	50220	2	HD 400 x 314	110200	HE 500 AA	54640	2.02	0.64	10.71	1.67	0.10
37	3000	5000	5	1.73	6	150660	37158	75330	2	HD 400 x 421	159600	HE 340 M	76370	2.09	0.82	3.86	1.67	0.10
38	3000	5000	5	1.56	10	251100	41433	125550	2	HD 400 x 634	274200	HE 450 M	131500	2.09	0.64	3.84	1.67	0.10
39	3000	5000	5	1.46	15	376650	45763	188325	2	HD 400 x 818	392200	HE 550 M	198000	1.98	0.53	3.83	1.67	0.10
40	3000	5000	5	1.42	23	577530	62431	288765	2	HD 400 x 1086	595700	HE 900 AA	301100	1.98	0.34	7.50	1.67	0.10
41	3000	5000	5	2.23	2	50220	33040	12555	4	HD 360 x 162	51540	HE 280 A	13670	3.77	1.04	10.77	1.67	0.10
42	3000	5000	5	1.86	4	100440	34047	25110	4	HD 400 x 314	110200	HE 300 B	25170	4.38	1.00	7.89	1.67	0.10
43	3000	5000	5	1.70	6	150660	34296	37665	4	HD 400 x 421	159600	HE 280 M	39550	4.04	0.93	4.36	1.67	0.10
44	3000	5000	4	1.58	10	200880	33087	50220	4	HD 400 x 509	204500	HE 500 AA	54640	3.74	0.64	10.71	1.67	0.10
45	3000	5000	5	1.40	15	376650	38999	94162.5	4	HD 400 x 818	392200	HE 400 M	104100	3.77	0.71	3.84	1.67	0.10
46	3000	5000	5	1.29	23	577530	42924	144382.5	4	HD 400 x 1086	595700	HE 500 M	161900	3.68	0.58	3.83	1.67	0.10
47	3000	5000	3	2.22	2	30132	19503	10044	3	HD 320 x 127	30820	HE 260 A	10450	2.95	1.04	10.40	1.67	0.10
48	3000	5000	3	1.89	4	60264	20781	20088	3	HD 360 x 196	63630	HE 320 A	22930	2.77	0.97	9.68	1.67	0.10
49	3000	5000	3	1.69	6	90396	20951	30132	3	HD 400 x 287	99710	HE 320 B	30820	3.24	0.94	7.32	1.67	0.10
50	3000	5000	3	1.57	10	150660	24912	50220	3	HD 400 x 421	159600	HE 500 AA	54640	2.92	0.64	10.71	1.67	0.10
51	3000	5000	3	1.40	15	225990	22172	75330	3	HD 400 x 551	226100	HE 340 M	76370	2.96	0.82	3.86	1.67	0.10
52	3000	5000	3	1.18	30	451980	25842	150660	3	HD 400 x 990	518900	HE 500 M	161900	3.21	0.58	3.83	1.67	0.10
53	3000	5000	5	2.25	2	50220	33855	16740	3	HD 360 x 162	51540	HE 300 A	18260	2.82	1.03	10.71	1.67	0.10
54	3000	5000	5	1.88	4	100440	35728	33480	3	HD 400 x 314	110200	HE 340 B	36660	3.01	0.88	6.98	1.67	0.10
55	3000	5000	5	1.78	6	150660	41519	50220	3	HD 400 x 421	159600	HE 500 AA	54640	2.92	0.64	10.71	1.67	0.10
56	3000	5000	5	1.52	10	251100	37617	83700	3	HD 400 x 634	274200	HE 360 M	84870	3.23	0.78	3.85	1.67	0.10

EK-3 (devam)

Model No	Değişkenler					Hesaplanan				Seçilen								L_p/h_p	P/P_{cr}
	hp (mm)	Lp (mm)	t_w (mm)	ω_i	K	$K*I_{c,min}$ (cm^4)	$I_{c,min}$ (cm^4)	I_b(cm^4)	I_c/I_b	Kolon Kesit	I_c (cm^4)	Kiriş Kesit	I_b(cm^4)	I_c/I_b	Kiriş b_f/h_b	Kiriş $b_f/2_{tf}$			
57	3000	5000	5	1.45	12	301320	39113	100440	3	HD 400 x 744	342100	HE 400 M	104100	3.29	0.71	3.84		1.67	0.10
58	3000	5000	5	1.50	13	326430	44273	108810	3	HD 400 x 744	342100	HE 550 A	111900	3.06	0.56	6.25		1.67	0.10
59	3000	2000	2	2.53	1	25110	32468	25110	1	HD 320 x 127	30820	HD 320 x 127	30820	1.00	0.94	7.32		0.67	0.10
60	3000	2000	2	1.76	5	125550	34943	125550	1	HD 400 x 382	141300	HD 400 x 382	141300	1.00	0.98	4.23		0.67	0.10
61	3000	2000	2	1.51	10	251100	36502	251100	1	HD 400 x 634	274200	HD 400 x 634	274200	1.00	0.89	2.75		0.67	0.10
62	3000	3000	2	2.58	1	16740	21639	16740	1	HD 260 x 114	18910	HD 260 x 114	18910	1.00	0.98	6.09		1.00	0.10
63	3000	3000	2	1.81	5	83700	23835	83700	1	HD 320 x 300	86900	HD 320 x 300	86900	1.00	0.83	3.26		1.00	0.10
64	3000	3000	2	1.52	10	167400	25129	167400	1	HD 400 x 463	180200	HD 400 x 463	180200	1.00	0.95	3.59		1.00	0.10
65	3000	4000	2	2.56	1	12555	16438	12555	1	HD 260 x 93.0	14920	HD 260 x 93.0	14920	1.00	1.00	7.43		1.33	0.10
66	3000	4000	2	1.83	5	62775	18334	62775	1	HD 360 x 196	63630	HD 360 x 196	63630	1.00	1.01	7.14		1.33	0.10
67	3000	4000	2	1.51	10	125550	19118	125550	1	HD 400 x 382	141300	HD 400 x 382	141300	1.00	0.98	4.23		1.33	0.10
68	3000	5000	2	2.64	1	10044	13175	10044	1	HD 260 x 68.2	10450	HD 260 x 68.2	10450	1.00	1.04	10.40		1.67	0.10
69	3000	5000	2	1.83	5	50220	14802	50220	1	HD 360 x 162	51540	HD 360 x 162	51540	1.00	1.02	8.51		1.67	0.10
70	3000	5000	2	1.52	10	100440	15328	100440	1	HD 400 x 314	110200	HD 400 x 314	110200	1.00	1.01	5.06		1.67	0.10
71	3000	6000	2	2.53	1	8370	11067	8370	1	HD 260 x 68.2	10450	HD 260 x 68.2	10450	1.00	1.04	10.40		2.00	0.10
72	3000	6000	2	1.38	15	125550	13158	125550	1	HD 400 x 382	141300	HD 400 x 382	141300	1.00	0.98	4.23		2.00	0.10
73	3000	2000	4	2.67	1	50220	67174	50220	1	HD 360 x 162	51540	HD 360 x 162	51540	1.00	1.02	8.51		0.67	0.10
74	3000	2000	4	1.79	5	251100	73003	251100	1	HD 400 x 634	274200	HD 400 x 634	274200	1.00	0.89	2.75		0.67	0.10
75	3000	3000	4	1.57	10	334800	53074	334800	1	HD 400 x 744	342100	HD 400 x 744	342100	1.00	0.87	2.43		1.00	0.10
76	3000	3000	4	2.59	1	33480	45788	33480	1	HD 320 x 158	39640	HD 320 x 158	39640	1.00	0.92	5.94		1.00	0.10
77	3000	3000	4	1.81	5	167400	50258	167400	1	HD 400 x 463	180200	HD 400 x 463	180200	1.00	0.95	3.59		1.00	0.10
78	3000	4000	4	2.57	1	25110	34873	25110	1	HD 320 x 127	30820	HD 320 x 127	30820	1.00	0.94	7.32		1.33	0.10
79	3000	4000	4	1.80	5	125550	38235	125550	1	HD 400 x 382	141300	HD 400 x 382	141300	1.00	0.98	4.23		1.33	0.10
80	3000	4000	4	1.55	10	251100	40369	251100	1	HD 400 x 634	274200	HD 400 x 634	274200	1.00	0.89	2.75		1.33	0.10
81	3000	2000	5	2.68	1	62775	84483	62775	1	HD 360 x 196	63630	HD 360 x 196	63630	1.00	1.01	7.14		0.67	0.10
82	3000	3000	5	2.65	1	41850	58796	41850	1	HD 360 x 147	46290	HD 360 x 147	46290	1.00	1.03	9.34		1.00	0.10
83	3000	4000	5	2.56	1	31387.5	44017	31387.5	1	HD 320 x 158	39640	HD 320 x 158	39640	1.00	0.92	5.94		1.33	0.10
84	3000	5000	5	2.58	1	25110	35397	25110	1	HD 320 x 127	30820	HD 320 x 127	30820	1.00	0.94	7.32		1.67	0.10
85	3000	6000	5	2.66	1	20925	29486	20925	1	HD 320 x 97.6	22930	HD 320 x 97.6	22930	1.00	0.97	9.68		2.00	0.10
86	3000	2000	6	2.66	1	75330	102001	75330	1	HD 400 x 237	78780	HD 400 x 237	78780	1.00	1.04	6.54		0.67	0.10
87	3000	4000	3	2.62	1	18832.5	22849	6277.5	3	HD 260 x 114	18910	HE 180 M	7483	2.53	0.93	3.88		1.33	0.10
88	3000	4000	3	2.66	1	18832.5	24310	9416.25	2	HD 260 x 114	18910	HE 260 A	10450	1.81	1.04	10.40		1.33	0.10

EK-3 (devam)

Model No	Değişkenler					Hesaplanan				Seçilen							L_p/h_p	P/P_{cr}
	hp (mm)	Lp (mm)	t_w (mm)	ω_i	K	$K*I_{c,min}$ (cm^4)	$I_{c,min}$ (cm^4)	I_b(cm^4)	I_c/I_b	Kolon Kesit	I_c (cm^4)	Kiriş Kesit	I_b(cm^4)	I_c/I_b	Kiriş b_f/h_b	Kiriş $b_f/2_{tf}$		
89	3000	4000	3	2.60	1	18832.5	22283	3766.5	5	HD 260 x 114	18910	HE 180 B	3831	4.94	1.00	6.43	1.33	89
90	3000	4000	3	2.67	1	18832.5	24853	18832.5	1	HD 260 x 114	18910	HD 260 x 114	19270	0.98	0.98	6.09	1.33	90
91	3000	3000	2	2.53	1	16740	19893	5580	3	HD 260 x 114	18910	HE 200 B	5696	3.32	1.00	6.67	1.00	91
92	3000	3000	3	2.23	2	50220	32786	25110	2	HD 360 x 162	51540	HE 300 B	25170	2.05	1.00	7.89	1.00	92
93	3000	3000	3	1.93	4	100440	39760	50220	2	HD 400 x 314	110200	HE 500 AA	54640	2.02	0.64	10.71	1.00	93
94	3000	3000	3	1.71	6	150660	35314	75330	2	HD 400 x 421	159600	HE 340 M	76370	2.09	0.82	3.86	1.00	94
95	3000	3000	3	1.53	10	251100	39172	125550	2	HD 400 x 634	274200	HE 450 M	131500	2.09	0.64	3.84	1.00	95
96	3000	3000	3	1.44	15	376650	43085	188325	2	HD 400 x 818	392200	HE 550 M	198000	1.98	0.53	3.83	1.00	96
97	3000	3000	3	2.21	2	50220	31610	12555	4	HD 360 x 162	51540	HE 280 A	13670	3.77	1.04	10.77	1.00	97
98	3000	3000	3	1.84	4	100440	32448	25110	4	HD 400 x 314	110200	HE 300 B	25170	4.38	1.00	7.89	1.00	98
99	3000	3000	3	1.68	6	150660	32594	37665	4	HD 400 x 421	159600	HE 280 M	39550	4.04	0.93	4.36	1.00	99
100	3000	3000	3	1.52	10	251100	37488	62775	4	HD 400 x 634	274200	HE 450 A	63720	4.30	0.68	7.14	1.00	100
101	3000	3000	3	1.38	15	376650	36717	94162.5	4	HD 400 x 818	392200	HE 400 M	104100	3.77	0.71	3.84	1.00	101
102	3000	5000	3	2.26	2	30132	20756	15066	2	HD 320 x 127	30820	HE 320 AA	16450	1.87	1.00	13.64	1.67	102
103	3000	5000	3	1.89	4	60264	21033	30132	2	HD 360 x 196	63630	HE 320 B	30820	2.06	0.94	7.32	1.67	103
104	3000	5000	3	1.77	6	90396	25059	45198	2	HD 400 x 287	99710	HE 500 AA	54640	1.82	0.64	10.71	1.67	104
105	3000	5000	3	1.53	10	150660	22295	75330	2	HD 400 x 421	159600	HE 340 M	76370	2.09	0.82	3.86	1.67	105
106	3000	5000	3	1.50	15	225990	29277	112995	2	HD 400 x 551	226100	HE 650 AA	113900	1.99	0.48	9.38	1.67	106
107	3000	5000	3	1.21	30	451980	28776	225990	2	HD 400 x 990	518900	HE 600 M	237400	2.19	0.49	3.81	1.67	107
108	3000	5000	3	2.21	2	30132	19027	7533	4	HD 320 x 127	30820	HE 240 A	7763	3.97	1.04	10.00	1.67	108
109	3000	5000	3	1.88	4	60264	20556	15066	4	HD 360 x 196	63630	HE 320 AA	16450	3.87	1.00	13.64	1.67	109
110	3000	5000	3	1.68	6	90396	20700	22599	4	HD 400 x 287	99710	HE 320 A	22930	4.35	0.97	9.68	1.67	110
111	3000	5000	3	1.49	10	150660	20578	37665	4	HD 400 x 421	159600	HE 280 M	39550	4.04	0.93	4.36	1.67	111
112	3000	5000	3	1.41	15	225990	22783	56497.5	4	HD 400 x 551	226100	HE 400 B	57680	3.92	0.75	6.25	1.67	112
113	3000	5000	3	1.21	30	451980	28776	112995	4	HD 400 x 990	518900	HE 650 AA	113900	4.56	0.48	9.38	1.67	113
114	3000	3000	5	2.30	2	83700	63198	41850	2	HD 320 x 300	86900	HE 450 AA	41890	2.07	0.71	11.11	1.00	114
115	3000	3000	5	1.89	4	167400	59947	83700	2	HD 400 x 463	180200	HE 360 M	84870	2.12	0.78	3.85	1.00	115
116	3000	3000	5	1.74	6	251100	65286	125550	2	HD 400 x 634	274200	HE 450 M	131500	2.09	0.64	3.84	1.00	116
117	3000	3000	5	1.61	10	418500	77912	209250	2	HD 400 x 900	450200	HE 650 B	210600	2.14	0.46	4.84	1.00	117
118	3000	3000	5	1.57	12	502200	81830	251100	2	HD 400 x 990	518900	HE 700 B	256900	2.02	0.43	4.69	1.00	118
119	3000	3000	5	2.23	2	83700	55128	20925	4	HD 320 x 300	86900	HE 320 A	22930	3.79	0.97	9.68	1.00	119
120	3000	3000	5	1.91	4	167400	62094	41850	4	HD 400 x 463	180200	HE 450 AA	41890	4.30	0.71	11.11	1.00	120

EK-3 (devam)

Model No	Değişkenler					Hesaplanan				Seçilen							L_p/h_p	P/P_{cr}
	hp (mm)	Lp (mm)	t_w (mm)	ω_i	K	$K*I_{c,min}$ (cm^4)	$I_{c,min}$ (cm^4)	I_b(cm^4)	I_c/I_b	Kolon Kesit	I_c (cm^4)	Kiriş Kesit	I_b(cm^4)	I_c/I_b	Kiriş b_f/h_b	Kiriş $b_f/2_{tf}$		
121	3000	3000	5	1.72	6	251100	62479	62775	4	HD 400 x 634	274200	HE 450 A	63720	4.30	0.68	7.14	1.00	0.20
122	3000	3000	5	1.54	10	418500	65873	104625	4	HD 400 x 900	450200	HE 500 B	107200	4.20	0.60	5.36	1.00	0.20
123	3000	3000	5	1.48	12	502200	63888	125550	4	HD 400 x 990	518900	HE 450 M	131500	3.95	0.64	3.84	1.00	0.20
124	3000	5000	5	2.25	2	50220	34269	25110	2	HD 360 x 162	51540	HE 300 B	25170	2.05	1.00	7.89	1.67	0.20
125	3000	5000	5	1.96	4	100440	41719	50220	2	HD 400 x 314	110200	HE 500 AA	54640	2.02	0.64	10.71	1.67	0.20
126	3000	5000	5	1.73	6	150660	37158	75330	2	HD 400 x 421	159600	HE 340 M	76370	2.09	0.82	3.86	1.67	0.20
127	3000	5000	5	1.56	10	251100	41433	125550	2	HD 400 x 634	274200	HE 450 M	131500	2.09	0.64	3.84	1.67	0.20
128	3000	5000	5	1.46	15	376650	45763	188325	2	HD 400 x 818	392200	HE 550 M	198000	1.98	0.53	3.83	1.67	0.20
129	3000	5000	5	1.42	23	577530	62431	288765	2	HD 400 x 1086	595700	HE 900 AA	301100	1.98	0.34	7.50	1.67	0.20
130	3000	5000	5	2.23	2	50220	33040	12555	4	HD 360 x 162	51540	HE 280 A	13670	3.77	1.04	10.77	1.67	0.20
131	3000	5000	5	1.86	4	100440	34047	25110	4	HD 400 x 314	110200	HE 300 B	25170	4.38	1.00	7.89	1.67	0.20
132	3000	5000	5	1.70	6	150660	34296	37665	4	HD 400 x 421	159600	HE 280 M	39550	4.04	0.93	4.36	1.67	0.20
133	3000	5000	5	1.54	10	251100	39652	62775	4	HD 400 x 634	274200	HE 450 A	63720	4.30	0.68	7.14	1.67	0.20
134	3000	5000	5	1.40	15	376650	38999	94162.5	4	HD 400 x 818	392200	HE 400 M	104100	3.77	0.71	3.84	1.67	0.20
135	3000	5000	5	1.29	23	577530	42924	144382.5	4	HD 400 x 1086	595700	HE 500 M	161900	3.68	0.58	3.83	1.67	0.20
136	3000	5000	3	2.22	2	30132	19503	10044	3	HD 320 x 127	30820	HE 260 A	10450	2.95	1.04	10.40	1.67	0.20
137	3000	5000	3	1.89	4	60264	20781	20088	3	HD 360 x 196	63630	HE 320 A	22930	2.77	0.97	9.68	1.67	0.20
138	3000	5000	3	1.69	6	90396	20951	30132	3	HD 400 x 287	99710	HE 320 B	30820	3.24	0.94	7.32	1.67	0.20
139	3000	5000	3	1.57	10	150660	24912	50220	3	HD 400 x 421	159600	HE 500 AA	54640	2.92	0.64	10.71	1.67	0.20
140	3000	5000	3	1.40	15	225990	22172	75330	3	HD 400 x 551	226100	HE 340 M	76370	2.96	0.82	3.86	1.67	0.20
141	3000	5000	3	1.18	30	451980	25842	150660	3	HD 400 x 990	518900	HE 500 M	161900	3.21	0.58	3.83	1.67	0.20
142	3000	5000	5	2.25	2	50220	33855	16740	3	HD 360 x 162	51540	HE 300 A	18260	2.82	1.03	10.71	1.67	0.20
143	3000	5000	5	1.88	4	100440	35728	33480	3	HD 400 x 314	110200	HE 340 B	36660	3.01	0.88	6.98	1.67	0.20
144	3000	5000	5	1.78	6	150660	41519	50220	3	HD 400 x 421	159600	HE 500 AA	54640	2.92	0.64	10.71	1.67	0.20
145	3000	5000	5	1.52	10	251100	37617	83700	3	HD 400 x 634	274200	HE 360 M	84870	3.23	0.78	3.85	1.67	0.20
146	3000	5000	5	1.45	12	301320	39113	100440	3	HD 400 x 744	342100	HE 400 M	104100	3.29	0.71	3.84	1.67	0.20
147	3000	3000	3	2.23	2	50220	32786	25110	2	HD 360 x 162	51540	HE 300 B	25170	2.05	1.00	7.89	1.00	0.30
148	3000	3000	3	1.93	4	100440	39760	50220	2	HD 400 x 314	110200	HE 500 AA	54640	2.02	0.64	10.71	1.00	0.30
149	3000	3000	3	1.71	6	150660	35314	75330	2	HD 400 x 421	159600	HE 340 M	76370	2.09	0.82	3.86	1.00	0.30
150	3000	3000	3	1.53	10	251100	39172	125550	2	HD 400 x 634	274200	HE 450 M	131500	2.09	0.64	3.84	1.00	0.30
151	3000	3000	3	1.44	15	376650	43085	188325	2	HD 400 x 818	392200	HE 550 M	198000	1.98	0.53	3.83	1.00	0.30
152	3000	3000	3	2.21	2	50220	31610	12555	4	HD 360 x 162	51540	HE 280 A	13670	3.77	1.04	10.77	1.00	0.30

EK-3 (devam)

Model No	Değişkenler					Hesaplanan				Seçilen							L_p/h_p	P/P_{cr}
	hp (mm)	Lp (mm)	t_w (mm)	ω_i	K	$K*I_{c,min}$ (cm^4)	$I_{c,min}$ (cm^4)	I_b(cm^4)	I_c/I_b	Kolon Kesit	I_c (cm^4)	Kiriş Kesit	I_b(cm^4)	I_c/I_b	Kiriş b_f/h_b	Kiriş $b_f/2_{tf}$		
153	3000	3000	3	1.84	4	100440	32448	25110	4	HD 400 x 314	110200	HE 300 B	25170	4.38	1.00	7.89	1.00	0.30
154	3000	3000	3	1.68	6	150660	32594	37665	4	HD 400 x 421	159600	HE 280 M	39550	4.04	0.93	4.36	1.00	0.30
155	3000	3000	3	1.52	10	251100	37488	62775	4	HD 400 x 634	274200	HE 450 A	63720	4.30	0.68	7.14	1.00	0.30
156	3000	3000	3	1.38	15	376650	36717	94162.5	4	HD 400 x 818	392200	HE 400 M	104100	3.77	0.71	3.84	1.00	0.30
157	3000	5000	3	2.26	2	30132	20756	15066	2	HD 320 x 127	30820	HE 320 AA	16450	1.87	1.00	13.64	1.67	0.30
158	3000	5000	3	1.89	4	60264	21033	30132	2	HD 360 x 196	63630	HE 320 B	30820	2.06	0.94	7.32	1.67	0.30
159	3000	5000	3	1.77	6	90396	25059	45198	2	HD 400 x 287	99710	HE 500 AA	54640	1.82	0.64	10.71	1.67	0.30
160	3000	5000	3	1.53	10	150660	22295	75330	2	HD 400 x 421	159600	HE 340 M	76370	2.09	0.82	3.86	1.67	0.30
161	3000	5000	3	1.50	15	225990	29277	112995	2	HD 400 x 551	226100	HE 650 AA	113900	1.99	0.48	9.38	1.67	0.30
162	3000	5000	3	1.21	30	451980	28776	225990	2	HD 400 x 990	518900	HE 600 M	237400	2.19	0.49	3.81	1.67	0.30
163	3000	5000	3	2.21	2	30132	19027	7533	4	HD 320 x 127	30820	HE 240 A	7763	3.97	1.04	10.00	1.67	0.30
164	3000	5000	3	1.88	4	60264	20556	15066	4	HD 360 x 196	63630	HE 320 AA	16450	3.87	1.00	13.64	1.67	0.30
165	3000	5000	3	1.68	6	90396	20700	22599	4	HD 400 x 287	99710	HE 320 A	22930	4.35	0.97	9.68	1.67	0.30
166	3000	5000	3	1.49	10	150660	20578	37665	4	HD 400 x 421	159600	HE 280 M	39550	4.04	0.93	4.36	1.67	0.30
167	3000	5000	3	1.41	15	225990	22783	56497.5	4	HD 400 x 551	226100	HE 400 B	57680	3.92	0.75	6.25	1.67	0.30
168	3000	5000	3	1.21	30	451980	28776	112995	4	HD 400 x 990	518900	HE 650 AA	113900	4.56	0.48	9.38	1.67	0.30
169	3000	3000	5	2.30	2	83700	63198	41850	2	HD 320 x 300	86900	HE 450 AA	41890	2.07	0.71	11.11	1.00	0.30
170	3000	3000	5	1.89	4	167400	59947	83700	2	HD 400 x 463	180200	HE 360 M	84870	2.12	0.78	3.85	1.00	0.30
171	3000	3000	5	1.74	6	251100	65286	125550	2	HD 400 x 634	274200	HE 450 M	131500	2.09	0.64	3.84	1.00	0.30
172	3000	3000	5	1.61	10	418500	77912	209250	2	HD 400 x 900	450200	HE 650 B	210600	2.14	0.46	4.84	1.00	0.30
173	3000	3000	5	1.57	12	502200	81830	251100	2	HD 400 x 990	518900	HE 700 B	256900	2.02	0.43	4.69	1.00	0.30
174	3000	3000	5	2.23	2	83700	55128	20925	4	HD 320 x 300	86900	HE 320 A	22930	3.79	0.97	9.68	1.00	0.30
175	3000	3000	5	1.91	4	167400	62094	41850	4	HD 400 x 463	180200	HE 450 AA	41890	4.30	0.71	11.11	1.00	0.30
176	3000	3000	5	1.72	6	251100	62479	62775	4	HD 400 x 634	274200	HE 450 A	63720	4.30	0.68	7.14	1.00	0.30
177	3000	3000	5	1.54	10	418500	65873	104625	4	HD 400 x 900	450200	HE 500 B	107200	4.20	0.60	5.36	1.00	0.30
178	3000	3000	5	1.48	12	502200	63888	125550	4	HD 400 x 990	518900	HE 450 M	131500	3.95	0.64	3.84	1.00	0.30
179	3000	5000	5	2.25	2	50220	34269	25110	2	HD 360 x 162	51540	HE 300 B	25170	2.05	1.00	7.89	1.67	0.30
180	3000	5000	5	1.96	4	100440	41719	50220	2	HD 400 x 314	110200	HE 500 AA	54640	2.02	0.64	10.71	1.67	0.30
181	3000	5000	5	1.73	6	150660	37158	75330	2	HD 400 x 421	159600	HE 340 M	76370	2.09	0.82	3.86	1.67	0.30
182	3000	5000	5	1.56	10	251100	41433	125550	2	HD 400 x 634	274200	HE 450 M	131500	2.09	0.64	3.84	1.67	0.30
183	3000	5000	5	1.46	15	376650	45763	188325	2	HD 400 x 818	392200	HE 550 M	198000	1.98	0.53	3.83	1.67	0.30
184	3000	5000	5	1.42	23	577530	62431	288765	2	HD 400 x 1086	595700	HE 900 AA	301100	1.98	0.34	7.50	1.67	0.30

EK-3 (devam)

Model No	Değişkenler					Hesaplanan				Seçilen								L_p/h_p	P/P_{cr}
	hp (mm)	Lp (mm)	t_w (mm)	ω_i	K	$K*I_{c,min}$ (cm^4)	$I_{c,min}$ (cm^4)	I_b(cm^4)	I_c/I_b	Kolon Kesit	I_c (cm^4)	Kiriş Kesit	I_b(cm^4)	I_c/I_b	Kiriş b_f/h_b	Kiriş $b_f/2_{tf}$			
185	3000	5000	5	2.23	2	50220	33040	12555	4	HD 360 x 162	51540	HE 280 A	13670	3.77	1.04	10.77		1.67	0.30
186	3000	5000	5	1.86	4	100440	34047	25110	4	HD 400 x 314	110200	HE 300 B	25170	4.38	1.00	7.89		1.67	0.30
187	3000	5000	5	1.70	6	150660	34296	37665	4	HD 400 x 421	159600	HE 280 M	39550	4.04	0.93	4.36		1.67	0.30
188	3000	5000	5	1.54	10	251100	39652	62775	4	HD 400 x 634	274200	HE 450 A	63720	4.30	0.68	7.14		1.67	0.30
189	3000	5000	5	1.40	15	376650	38999	94162.5	4	HD 400 x 818	392200	HE 400 M	104100	3.77	0.71	3.84		1.67	0.30
190	3000	5000	5	1.29	23	577530	42924	144383	4	HD 400 x 1086	595700	HE 500 M	161900	3.68	0.58	3.83		1.67	0.30
191	3000	5000	3	2.22	2	30132	19503	10044	3	HD 320 x 127	30820	HE 260 A	10450	2.95	1.04	10.40		1.67	0.30
192	3000	5000	3	1.89	4	60264	20781	20088	3	HD 360 x 196	63630	HE 320 A	22930	2.77	0.97	9.68		1.67	0.30
193	3000	5000	3	1.69	6	90396	20951	30132	3	HD 400 x 287	99710	HE 320 B	30820	3.24	0.94	7.32		1.67	0.30
194	3000	5000	3	1.57	10	150660	24912	50220	3	HD 400 x 421	159600	HE 500 AA	54640	2.92	0.64	10.71		1.67	0.30
195	3000	5000	3	1.40	15	225990	22172	75330	3	HD 400 x 551	226100	HE 340 M	76370	2.96	0.82	3.86		1.67	0.30
196	3000	5000	3	1.18	30	451980	25842	150660	3	HD 400 x 990	518900	HE 500 M	161900	3.21	0.58	3.83		1.67	0.30
197	3000	5000	5	2.25	2	50220	33855	16740	3	HD 360 x 162	51540	HE 300 A	18260	2.82	1.03	10.71		1.67	0.30
198	3000	5000	5	1.88	4	100440	35728	33480	3	HD 400 x 314	110200	HE 340 B	36660	3.01	0.88	6.98		1.67	0.30
199	3000	5000	5	1.78	6	150660	41519	50220	3	HD 400 x 421	159600	HE 500 AA	54640	2.92	0.64	10.71		1.67	0.30
200	3000	5000	5	1.52	10	251100	37617	83700	3	HD 400 x 634	274200	HE 360 M	84870	3.23	0.78	3.85		1.67	0.30
201	3000	5000	5	1.45	12	301320	39113	100440	3	HD 400 x 744	342100	HE 400 M	104100	3.29	0.71	3.84		1.67	0.30
202	3000	2000	3	2.63	1	37665	49080	37665	1	HD 320 x 158	39640	HD 320 x 158	39640	1.00	0.92	5.94		0.67	0.30
203	3000	2000	3	1.79	5	188325	53615	188325	1	HD 400 x 509	204500	HD 400 x 509	204500	1.00	0.93	3.32		0.67	0.30
204	3000	2000	3	1.54	10	376650	56406	376650	1	HD 400 x 818	392200	HD 400 x 818	392200	1.00	0.85	2.25		0.67	0.30
205	3000	3000	3	2.56	1	25110	34033	25110	1	HD 320 x 127	30820	HD 320 x 127	30820	1.00	0.94	7.32		1.00	0.30
206	3000	3000	3	1.79	5	125550	37071	125550	1	HD 400 x 382	141300	HD 400 x 382	141300	1.00	0.98	4.23		1.00	0.30
207	3000	3000	3	1.53	10	251100	38992	251100	1	HD 400 x 634	274200	HD 400 x 634	274200	1.00	0.89	2.75		1.00	0.30
208	3000	4000	3	2.67	1	18832.5	24853	18832.5	1	HD 260 x 114	18910	HD 260 x 114	18910	1.00	0.98	6.09		1.33	0.30
209	3000	4000	3	1.82	5	94162.5	28058	94162.5	1	HD 400 x 287	99710	HD 400 x 287	99710	1.00	1.02	5.45		1.33	0.30
210	3000	4000	3	1.54	10	188325	29497	188325	1	HD 400 x 509	204500	HD 400 x 509	204500	1.00	0.93	3.32		1.33	0.30
211	3000	5000	3	2.65	1	15066	20831	15066	1	HD 320 x 74.2	16450	HD 320 x 74.2	16450	1.00	1.00	13.64		1.67	0.30
212	3000	5000	3	1.82	5	75330	22561	75330	1	HD 400 x 237	78780	HD 400 x 237	78780	1.00	1.04	6.54		1.67	0.30
213	3000	5000	3	1.55	10	150660	23590	150660	1	HD 400 x 421	159600	HD 400 x 421	159600	1.00	0.96	3.89		1.67	0.30
214	3000	6000	3	2.57	1	12555	16780	12555	1	HD 260 x 93.0	14920	HD 260 x 93.0	14920	1.00	1.00	7.43		2.00	0.30
215	3000	6000	3	1.40	15	188325	20345	188325	1	HD 400 x 509	204500	HD 400 x 509	204500	1.00	0.93	3.32		2.00	0.30
216	3000	2000	6	2.66	1	75330	102001	75330	1	HD 400 x 237	78780	HD 400 x 237	78780	1.00	1.04	6.54		0.67	0.30

EK-3 (devam)

Model No	Değişkenler					Hesaplanan				Seçilen								L_p/h_p	P/P_{cr}
	hp (mm)	Lp (mm)	t_w (mm)	ω_i	K	$K*I_{c,min}$ (cm^4)	$I_{c,min}$ (cm^4)	I_b(cm^4)	I_c/I_b	Kolon Kesit	I_c (cm^4)	Kiriş Kesit	I_b(cm^4)	I_c/I_b	Kiriş b_f/h_b	Kiriş $b_f/2_{tf}$			
217	3000	2000	6	1.83	5	376650	112812	376650	1	HD 400 x 818	392200	HD 400 x 818	392200	1.00	0.85	2.25		0.67	0.30
218	3000	3000	6	2.70	1	50220	70808	50220	1	HD 360 x 162	51540	HD 360 x 162	51540	1.00	1.02	8.51		1.00	0.30
219	3000	3000	6	1.82	5	251100	77983	251100	1	HD 400 x 634	274200	HD 400 x 634	274200	1.00	0.89	2.75		1.00	0.30
220	3000	3000	6	1.58	10	502200	83214	502200	1	HD 400 x 990	518900	HD 400 x 990	518900	1.00	0.81	1.95		1.00	0.30
221	3000	4000	6	2.68	1	37665	52820	37665	1	HD 320 x 158	39640	HD 320 x 158	39640	1.00	0.92	5.94		1.33	0.30
222	3000	4000	6	1.83	5	188325	58994	188325	1	HD 400 x 509	204500	HD 400 x 509	204500	1.00	0.93	3.32		1.33	0.30
223	3000	4000	6	1.58	10	376650	62829	376650	1	HD 400 x 818	392200	HD 400 x 818	392200	1.00	0.85	2.25		1.33	0.30
224	3000	5000	6	2.70	1	30132	42477	30132	1	HD 320 x 127	30820	HD 320 x 127	30820	1.00	0.94	7.32		1.67	0.30
225	3000	5000	6	1.84	5	150660	47180	150660	1	HD 400 x 421	159600	HD 400 x 421	159600	1.00	0.96	3.89		1.67	0.30
226	3000	5000	6	1.55	10	301320	50651	301320	1	HD 400 x 744	342100	HD 400 x 744	342100	1.00	0.87	2.43		1.67	0.30
227	3000	6000	6	2.59	1	25110	35756	25110	1	HD 320 x 127	30820	HD 320 x 127	30820	1.00	0.94	7.32		2.00	0.30
228	3000	6000	6	1.81	5	125550	39475	125550	1	HD 400 x 382	141300	HD 400 x 382	141300	1.00	0.98	4.23		2.00	0.30
229	3000	6000	6	1.56	10	251100	41847	251100	1	HD 400 x 634	274200	HD 400 x 634	274200	1.00	0.89	2.75		2.00	0.30
230	3000	2000	2	2.38	1.25	31387.5	32720	31387.5	1	HD 320 x 158	39640	HD 320 x 158	39640	1.00	0.92	5.94		0.67	0.10
231	3000	3000	2	2.48	1.25	20925	22484	20925	1	HD 320 x 97.6	22930	HD 320 x 97.6	22930	1.00	0.97	9.68		1.00	0.10
232	3000	4000	2	2.41	1.4	17577	16569	4394.25	4	HD 260 x 114	18910	HD 260 x 114	18910	1.00	0.98	6.09		1.33	0.10
233	3000	5000	2	2.42	1.25	12555	13313	2511	5	HD 260 x 93.0	14920	HD 260 x 93.0	14920	1.00	1.00	7.43		1.67	0.10
234	3000	6000	2	2.32	1.25	10462.5	11186	1743.75	6	HD 260 x 93.0	14920	HD 260 x 93.0	14920	1.00	1.00	7.43		2.00	0.10
235	3000	2000	4	2.48	1.3	65286	66917	9326.57	7	HD 320 x 245	68130	HD 320 x 245	68130	1.00	0.86	3.86		0.67	0.10
236	3000	3000	4	2.44	1.4	46872	47205	5859	8	HD 360 x 162	51540	HD 360 x 162	51540	1.00	1.02	8.51		1.00	0.10
237	3000	4000	4	2.42	1.5	37665	35214	4185	9	HD 320 x 158	39640	HD 320 x 158	39640	1.00	0.92	5.94		1.33	0.10
238	3000	2000	5	2.40	1.5	94162.5	85847	9416.25	10	HD 400 x 287	99710	HD 400 x 287	99710	1.00	1.02	5.45		0.67	0.10
239	3000	3000	5	2.45	1.5	62775	59428	5706.82	11	HD 360 x 196	63630	HD 360 x 196	63630	1.00	1.01	7.14		1.00	0.10
240	3000	4000	5	2.42	1.5	47081.25	45485	3923.44	12	HD 360 x 162	51540	HD 360 x 162	51540	1.00	1.02	8.51		1.33	0.10
241	3000	5000	5	2.43	1.5	37665	35759	2897.31	13	HD 320 x 158	39640	HD 320 x 158	39640	1.00	0.92	5.94		1.67	0.10
242	3000	6000	5	2.47	1.4	29295	29797	2092.5	14	HD 320 x 127	30820	HD 320 x 127	30820	1.00	0.94	7.32		2.00	0.10
243	3000	2000	6	2.38	1.5	112995	104118	7533	15	HD 400 x 347	124900	HD 400 x 347	124900	1.00	0.99	4.62		0.67	0.10
244	3000	4000	3	2.34	1.4	26365.5	24018	8788.5	3	HD 320 x 127	30820	HE 260 A	10450	2.95	1.04	10.40		1.33	0.10
245	3000	4000	3	2.36	1.4	26365.5	24614	13182.8	2	HD 320 x 127	30820	HE 280 A	13670	2.25	1.04	10.77		1.33	0.10
246	3000	4000	3	2.47	1.2	22599	22066	4519.8	5	HD 320 x 97.6	22930	HE 160 M	5098	4.50	0.92	3.61		1.33	0.10
247	3000	4000	3	2.39	1.3	24482.25	26155	24482.3	1	HD 320 x 127	30820	HD 320 x 127	25170	1.22	0.94	7.32		1.33	0.10
248	3000	3000	2	2.40	1.2	20088	19641	6696	3	HD 320 x 97.6	22930	HE 180 M	7483	3.06	0.93	3.88		1.00	0.10

EK-3 (devam)

Model No	Değişkenler					Hesaplanan				Seçilen								L_p/h_p	P/P_{cr}
	hp (mm)	Lp (mm)	t_w (mm)	ω_i	K	$K*I_{c,min}$ (cm^4)	$I_{c,min}$ (cm^4)	I_b(cm^4)	I_c/I_b	Kolon Kesit	I_c (cm^4)	Kiriş Kesit	I_b(cm^4)	I_c/I_b	Kiriş b_f/h_b	Kiriş $b_f/2_{tf}$			
249	3000	2000	3	2.48	1.3	48964.5	50380	48964.5	1	HD 360 x 162	51540	HD 360 x 162	51540	1.00	1.02	8.51	0.67	0.30	
250	3000	3000	3	2.41	1.3	32643	34341	32643	1	HD 320 x 158	39640	HD 320 x 158	39640	1.00	0.92	5.94	1.00	0.30	
251	3000	4000	3	2.39	1.3	24482.25	26155	24482.3	1	HD 320 x 127	30820	HD 320 x 127	30820	1.00	0.94	7.32	1.33	0.30	
252	3000	5000	3	2.44	1.3	19585.8	21023	19585.8	1	HD 320 x 97.6	22930	HD 320 x 97.6	22930	1.00	0.97	9.68	1.67	0.30	
253	3000	6000	3	2.43	1.4	17577	16923	17577	1	HD 260 x 114	18910	HD 260 x 114	18910	1.00	0.98	6.09	2.00	0.30	
254	3000	2000	6	2.46	1.4	105462	103487	105462	1	HD 400 x 314	110200	HD 400 x 314	110200	1.00	1.01	5.06	0.67	0.30	
255	3000	3000	6	2.50	1.4	70308	71505	70308	1	HD 400 x 216	71140	HD 400 x 216	71140	1.00	1.05	7.11	1.00	0.30	
256	3000	4000	6	2.47	1.4	52731	54792	52731	1	HD 360 x 179	57440	HD 360 x 179	57440	1.00	1.01	7.80	1.33	0.30	
257	3000	5000	6	2.47	1.4	42184.8	44229	42184.8	1	HD 360 x 147	46290	HD 360 x 147	46290	1.00	1.03	9.34	1.67	0.30	
258	3000	6000	6	2.44	1.3	32643	36132	32643	1	HD 320 x 158	39640	HD 320 x 158	39640	1.00	0.92	5.94	2.00	0.30	
259	3000	2000	4	2.00	3	150660	66502	75330	2	HD 400 x 421	159600	HE 340 M	76370	2.09	0.82	3.86	0.67	0.20	
260	3000	2000	4	2.05	3.5	175770	82810	87885	2	HD 400 x 463	180200	HE 600 AA	91900	1.96	0.53	9.68	0.67	0.20	
261	3000	2000	4	1.91	4	200880	70332	100440	2	HD 400 x 509	204500	HE 400 M	104100	1.96	0.71	3.84	0.67	0.30	
262	3000	2000	4	1.87	4	200880	64536	66960	3	HD 400 x 509	204500	HE 320 M	68130	3.00	0.86	3.86	0.67	0.30	
263	3000	2000	2	2.19	2	50220	30728	16740	3	HD 360 x 162	51540	HE 300 A	18260	2.82	1.03	10.71	0.67	0.20	
264	3000	2000	2	1.97	3	75330	30894	25110	3	HD 400 x 237	78780	HE 300 B	25170	3.13	1.00	7.89	0.67	0.20	
265	3000	2000	2	1.83	4	100440	32162	33480	3	HD 400 x 314	110200	HE 340 B	36660	3.01	0.88	6.98	0.67	0.30	
266	3000	2000	6	2.17	2	150660	92069	37665	4	HD 400 x 421	159600	HE 280 M	39550	4.04	0.93	4.36	0.67	0.20	
267	3000	2000	6	2.04	3	225990	101246	56497.5	4	HD 400 x 551	226100	HE 400 B	57680	3.92	0.75	6.25	0.67	0.30	
268	3000	2000	6	1.82	4	301320	96838	75330	4	HD 400 x 744	342100	HE 340 M	76370	4.48	0.82	3.86	0.67	0.30	
269	3000	2000	4	1.77	5	251100	70187	62775	4	HD 400 x 634	274200	HE 450 A	63720	4.30	0.68	7.14	0.67	0.20	
270	3000	2000	4	1.95	3.5	175770	67255	43942.5	4	HD 400 x 463	180200	HE 400 A	45070	4.00	0.77	7.89	0.67	0.30	
271	3000	4000	2	2.01	3	37665	16573	18832.5	2	HD 320 x 158	39640	HE 280 B	19270	2.06	1.00	7.78	1.33	0.20	
272	3000	4000	2	2.13	2	25110	16410	12555	2	HD 320 x 127	30820	HE 280 A	13670	2.25	1.04	10.77	1.33	0.20	
273	3000	4000	4	2.02	3	75330	33574	25110	3	HD 400 x 237	78780	HE 300 B	25170	3.13	1.00	7.89	1.33	0.20	
274	3000	4000	6	1.99	3	112995	50662	22599	5	HD 400 x 347	124900	HE 320 A	22930	5.45	0.97	9.68	1.33	0.20	
275	3000	6000	2	2.15	2	16740	10372	5580	3	HD 260 x 114	18910	HE 200 B	5696	3.32	1.00	6.67	2.00	0.20	
276	3000	6000	2	2.46	1	8370	9891	2092.5	4	HD 260 x 68.2	10450	HE 160 B	2492	4.19	1.00	6.15	2.00	0.20	
277	3000	6000	2	1.78	4	33480	10270	6696	5	HD 320 x 158	39640	HE 180 M	7483	5.30	0.93	3.88	2.00	0.20	
278	3000	6000	3	1.83	5	62775	18382	31387.5	2	HD 360 x 196	63630	HE 360 A	33090	1.92	0.86	8.57	2.00	0.30	
279	3000	6000	3	2.13	2	25110	16417	8370	3	HD 320 x 127	30820	HE 260 A	10450	2.95	1.04	10.40	2.00	0.30	
280	3000	6000	3	2.00	3	37665	16391	9416.25	4	HD 320 x 158	39640	HE 260 A	10450	3.79	1.04	10.40	2.00	0.20	

EK-3 (devam)

Model No	Değişkenler					Hesaplanan				Seçilen							L_p/h_p	P/P_{cr}
	hp (mm)	Lp (mm)	t_w (mm)	ω_i	K	$K*I_{c,min}$ (cm^4)	$I_{c,min}$ (cm^4)	I_b(cm^4)	I_c/I_b	Kolon Kesit	I_c (cm^4)	Kiriş Kesit	I_b(cm^4)	I_c/I_b	Kiriş b_f/h_b	Kiriş $b_f/2_{tf}$		
281	3000	6000	4	1.93	4	66960	24267	33480	2	HD 320 x 245	68130	HE 340 B	36660	1.86	0.88	6.98	2.00	0.30
282	3000	6000	4	1.80	5	83700	23632	27900	3	HD 320 x 300	86900	HE 320 B	30820	2.82	0.94	7.32	2.00	0.20
283	3000	6000	4	2.02	3	50220	22278	12555	4	HD 360 x 162	51540	HE 280 A	13670	3.77	1.04	10.77	2.00	0.10
284	3000	6000	4	2.12	2	33480	20541	6696	5	HD 320 x 158	39640	HE 180 M	7483	5.30	0.93	3.88	2.00	0.10
285	3000	6000	4	2.04	3	50220	22828	16740	3	HD 360 x 162	51540	HE 300 A	18260	2.82	1.03	10.71	2.00	0.10
286	3000	6000	5	1.93	3.5	73237.5	28119	18309.4	4	HD 400 x 237	78780	HE 280 B	19270	4.09	1.00	7.78	2.00	0.10
287	3000	6000	5	1.79	5	104625	29076	20925	5	HD 400 x 314	110200	HE 320 A	22930	4.81	0.97	9.68	2.00	0.20
288	3000	6000	3	2.10	2	25110	15430	6277.5	4	HD 320 x 127	30820	HE 180 M	7483	4.12	0.93	3.88	2.00	0.20
289	3000	6000	3	2.10	2	25110	15430	6277.5	4	HD 320 x 127	30820	HE 180 M	7483	4.12	0.93	3.88	2.00	0.10
290	3000	6000	6	1.89	4	100440	36173	33480	3	HD 400 x 314	110200	HE 340 B	36660	3.01	0.88	6.98	2.00	0.20
291	3000	6000	6	2.24	2	50220	33417	12555	4	HD 360 x 162	51540	HE 280 A	13670	3.77	1.04	10.77	2.00	0.20
292	3000	6000	4	1.95	3.5	58590	22264	11718	5	HD 400 x 187	60180	HE 280 A	13670	4.40	1.04	10.77	2.00	0.20

EK-4

ÇEVRİMSEL YÜKLEME UYGULANAN MODELLERİN GEOMETRİK DETAYLARI

Model No	Değişkenler					Hesaplanan				Seçilen							L_p/h_p	P/P_{cr}
	hp (mm)	Lp (mm)	t_w (mm)	ω_i	K	$K*I_{c,min}$ (cm^4)	$I_{c,min}$ (cm^4)	I_b(cm^4)	I_c/I_b	Kolon Kesit	I_c (cm^4)	Kiriş Kesit	I_b(cm^4)	I_c/I_b	Kiriş b_f/h_b	Kiriş $b_f/2_{tf}$		
1	3000	3000	3	2.23	2	50220	32786	25110	2	HD 360 x 162	51540	HE 300 B	25170	2.05	1.00	8.51	1.00	0.10
2	3000	3000	3	2.21	2	50220	31610	12555	4	HD 360 x 162	51540	HE 280 A	13670	3.77	1.04	8.51	1.00	0.10
3	3000	3000	3	2.23	2	50220	32786	25110	2	HD 360 x 162	51540	HE 300 B	25170	2.05	1.00	8.51	1.00	0.20
4	3000	3000	3	2.21	2	50220	31610	12555	4	HD 360 x 162	51540	HE 280 A	13670	3.77	1.04	8.51	1.00	0.20
5	3000	3000	3	2.23	2	50220	32786	25110	2	HD 360 x 162	51540	HE 300 B	25170	2.05	1.00	8.51	1.00	0.30
6	3000	3000	3	2.21	2	50220	31610	12555	4	HD 360 x 162	51540	HE 280 A	13670	3.77	1.04	8.51	1.00	0.30
7	3000	6000	3	1.70	7	87885	19230	43942.5	2	HD 400 x 262	89410	HE 400 A	45070	1.98	0.77	9.34	2.00	0.20
8	3000	5000	3	1.72	7	105462	25032	52731	2	HD 400 x 314	110200	HE 500 AA	54640	2.02	0.64	5.98	1.67	0.20
9	3000	4000	3	1.72	6	112995	28200	56497.5	2	HD 400 x 347	124900	HE 400 B	57680	2.17	0.75	5.06	1.33	0.20
10	3000	3000	3	1.71	6	150660	35314	75330	2	HD 400 x 421	159600	HE 340 M	76370	2.09	0.82	4.62	1.00	0.20
11	3000	2000	3	1.70	7	263655	59703	131828	2	HD 400 x 634	274200	HE 550 B	136700	2.01	0.55	3.89	0.67	0.20
12	3000	6000	3	1.70	7	87885	19230	43942.5	2	HD 400 x 262	89410	HE 400 A	45070	1.98	0.77	2.75	2.00	0.30
13	3000	4000	3	2.68	1	18832.5	25221	18832.5	1	HD 260 x 114	18910	HE 280 B	19270	0.98	1.00	5.98	1.33	0.30
14	3000	2000	5	1.94	4	251100	99505	135730	1.85	HD 400 x 634	274200	HE 550 B	136700	2.01	0.55	6.09	0.67	0.20
15	3000	5000	6	2.47	1.4	42184.8	44229	42184.8	1	HD 360 x 147	46290	HD 360 x 147	46290	1.00	1.03	2.75	1.67	0.30
16	3000	6000	6	2.60	1.1	27621	36189	27621	1	HD 320 x 127	30820	HE 340 A	27690	1.11	0.91	7.32	2.00	0.30
17	3000	5000	4	2.03	3	60264	27708	20088	3	HD 360 x 196	63630	HE 320 A	22930	2.77	0.97	7.14	1.67	0.10
18	3000	5000	6	2.50	1.1	33145.2	39900	13258.1	2.5	HD 320 x 158	39640	HE 280 A	13670	2.90	1.04	5.94	1.67	0.10
19	3000	5000	5	2.41	1.5	37665	34487	25110	1.5	HD 320 x 158	39640	HE 300 B	25170	1.57	1.00	5.94	1.67	0.10
20	3000	4000	4	2.38	1.4	35154	32743	23436	1.5	HD 320 x 158	39640	HE 240 M	24290	1.63	0.92	5.94	1.33	0.10
21	3000	4000	4	1.83	5	125550	40805	50220	2.5	HD 400 x 382	141300	HE 500 AA	54640	2.59	0.64	4.23	1.33	0.10

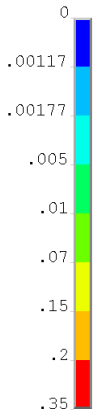
EK-4 (devam)

Model No	Değişkenler					Hesaplanan				Seçilen							L_p/h_p	P/P_{cr}
	hp (mm)	Lp (mm)	t_w (mm)	ω_i	K	$K*I_{c,min}$ (cm^4)	$I_{c,min}$ (cm^4)	I_b(cm^4)	I_c/I_b	Kolon Kesit	I_c (cm^4)	Kiriş Kesit	I_b(cm^4)	I_c/I_b	Kiriş b_f/h_b	Kiriş $b_f/2_{tf}$		
22	3000	6000	5	1.91	4	83700	29897	25363.6	3.3	HD 320 x 300	86900	HE 340 A	27690	3.14	0.91	3.26	2.00	0.10
23	3000	2000	6	2.03	3	225990	98534	75330	3	HD 400 x 551	226100	HE 340 M	76370	2.96	0.82	3.09	0.67	0.10
24	3000	2000	6	2.06	2.5	188325	94633	58851.6	3.2	HD 400 x 509	204500	HE 300 M	59200	3.45	0.91	3.32	0.67	0.20
25	3000	2000	4	2.30	1.8	90396	72563	60264	1.5	HD 400 x 287	99710	HE 450 A	63720	1.56	0.68	5.45	0.67	0.20
26	3000	6000	4	2.16	2	33480	22398	11544.8	2.9	HD 320 x 158	39640	HE 280 A	13670	2.90	1.04	5.94	2.00	0.30
27	3000	3000	5	2.14	2.4	100440	60225	43669.6	2.3	HD 400 x 314	110200	HE 400 A	45070	2.45	0.77	5.06	1.00	0.30
28	3000	4000	5	2.01	3	94162.5	42353	37665	2.5	HD 400 x 287	99710	HE 280 M	39550	2.52	0.93	5.45	1.33	0.20
29	3000	3000	4	2.12	2.8	93744	51774	78120	1.2	HD 400 x 287	99710	HE 450 B	79890	1.25	0.67	5.45	1.00	0.20
30	3000	4000	5	2.10	3	94162.5	49986	78468.8	1.2	HD 400 x 287	99710	HE 450 B	79890	1.25	0.67	5.45	1.33	0.30
31	3000	3000	6	2.33	1.6	80352	66153	20088	4	HD 320 x 300	86900	HE 320 A	22930	3.79	0.97	3.26	1.00	0.30
32	3000	2000	6	2.45	1.2	90396	93300	22599	4	HD 400 x 287	99710	HE 320 A	22930	4.35	0.97	5.45	0.67	0.30
33	3000	4000	4	2.36	1.3	32643	31714	7772.14	4.2	HD 320 x 158	39640	HE 260 AA	7981	4.97	1.07	5.94	1.33	0.20
34	3000	6000	5	1.94	3.5	73237.5	28812	24412.5	3	HD 400 x 237	78780	HE 300 B	25170	3.13	1.00	6.54	2.00	0.10
35	3000	4000	4	2.09	2.7	67797	33777	15066	4.5	HD 320 x 245	68130	HE 320 AA	16450	4.14	1.00	3.86	1.33	0.20
36	3000	2000	4	2.65	0.9	45198	58620	10044	4.5	HD 360 x 147	46290	HE 260 A	10450	4.43	1.04	9.34	0.67	0.20
37	3000	5000	5	2.13	3	75330	41867	50220	1.5	HD 400 x 237	78780	HE 500 AA	54640	1.44	0.64	6.54	1.67	0.20
38	3000	6000	5	2.64	1.1	23017.5	30689	23017.5	1	HD 260 x 142	24330	HE 360 AA	23040	1.06	0.88	5.00	2.00	0.20
39	3000	3000	5	1.98	3	125550	56468	34397.3	3.65	HD 400 x 382	141300	HE 340 B	36660	3.85	0.88	4.23	1.00	0.20
40	3000	5000	6	2.35	2	60264	50315	50220	1.2	HD 360 x 196	63630	HE 500 AA	54640	1.16	0.64	7.14	1.67	0.30
41	3000	4000	4	2.33	2	50220	39100	41850	1.2	HD 360 x 162	51540	HE 450 AA	41890	1.23	0.71	8.51	1.33	0.20
42	3000	6000	6	1.58	12	301320	54580	327522	0.92	HD 400 x 744	342100	HE 700 M	329300	1.04	0.42	2.43	2.00	0.10

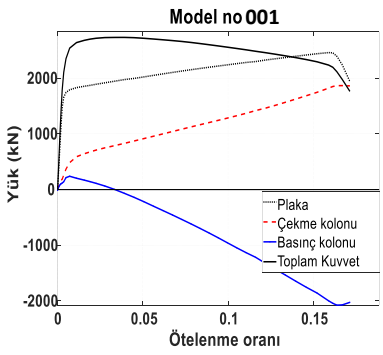
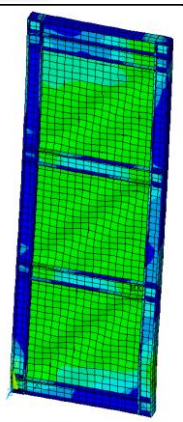
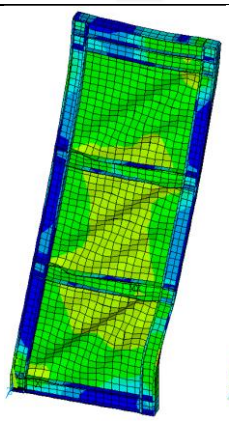
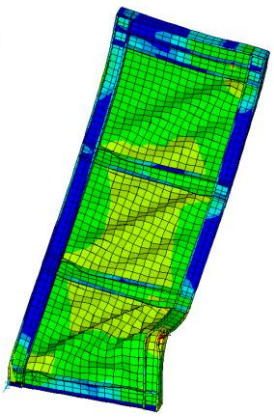
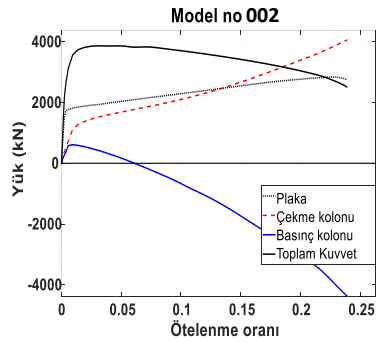
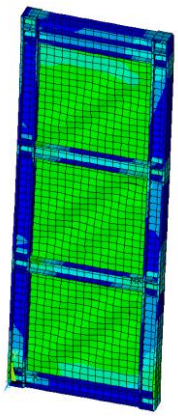
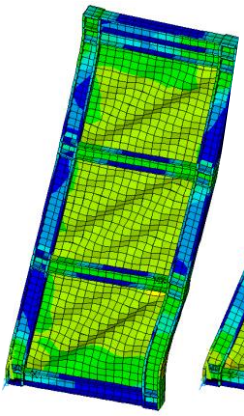
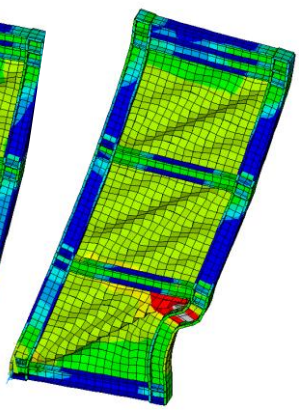
EK-5

MONOTONİK YÜKLEME ALTINDAKİ MODELLERİN YÜK-ÖTELENME ORANI EĞRİLERİ VE ÇEŞİTLİ ÖTELEMELERDE GERİNİM ÇİZİMLERİ

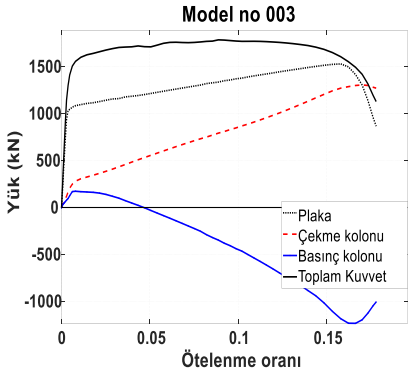
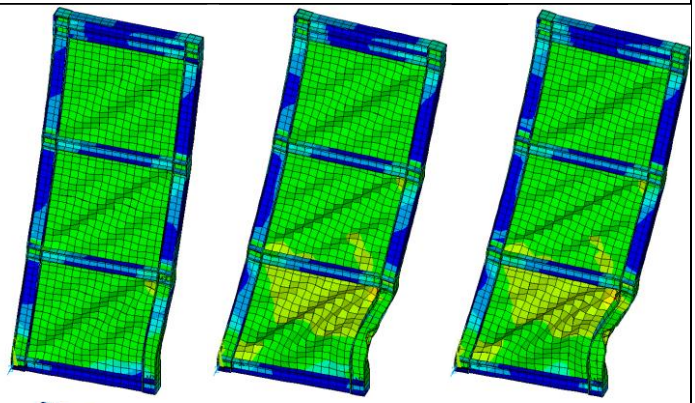
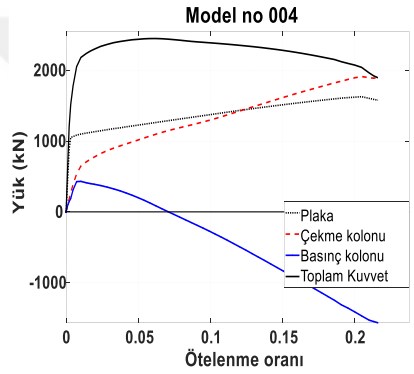
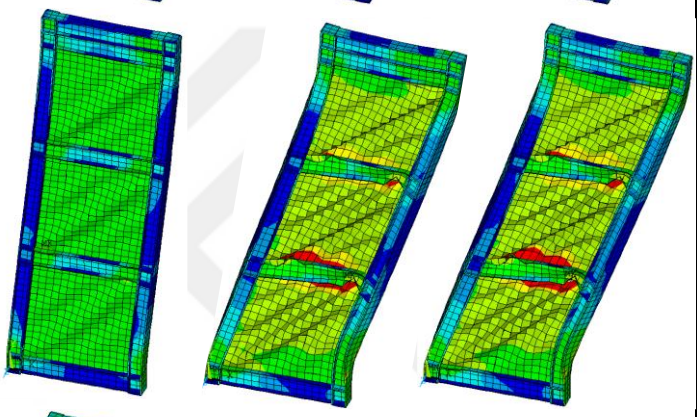
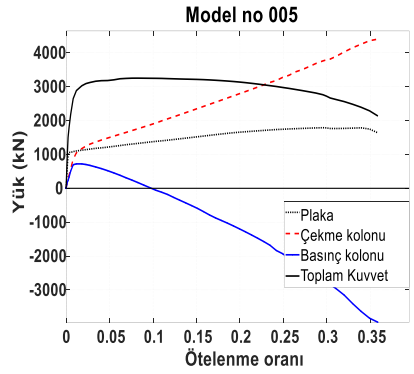
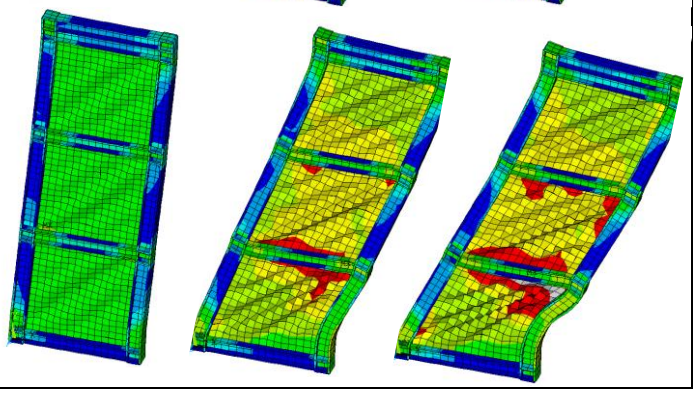
Kolon esneklik parametresi 2.5 üzerinde olan veya eksenel yükleme altında kolon kesiti kompakt olmayan modeller * işareti ile belirtilmiştir. Monotonik yükleme altındaki modellerin hepsi Şekil 7.7'de verilen aynı gerinim skalasında çizdirilmiştir.



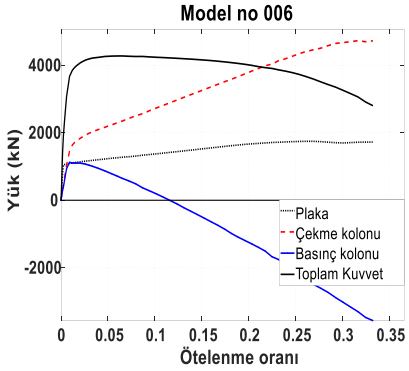
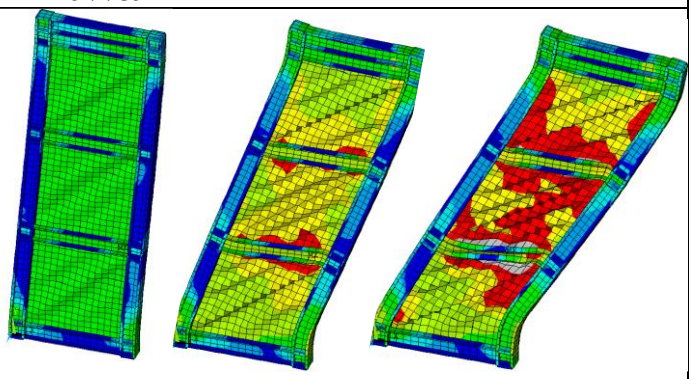
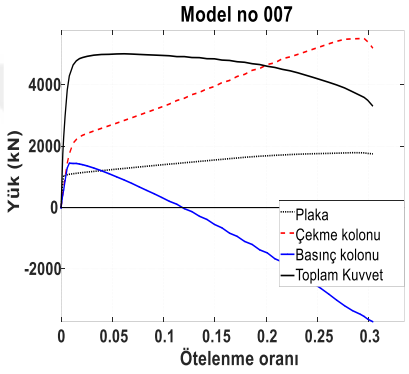
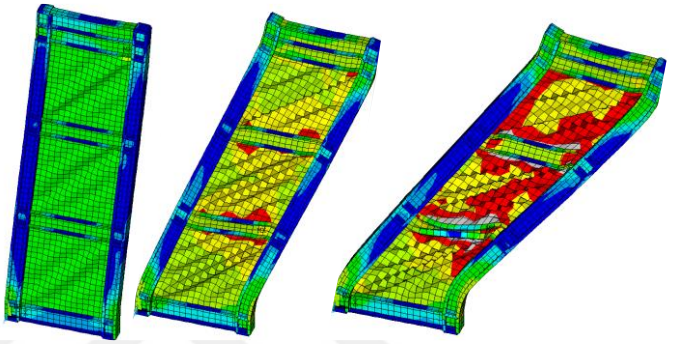
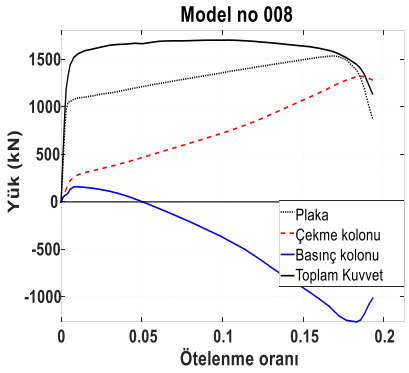
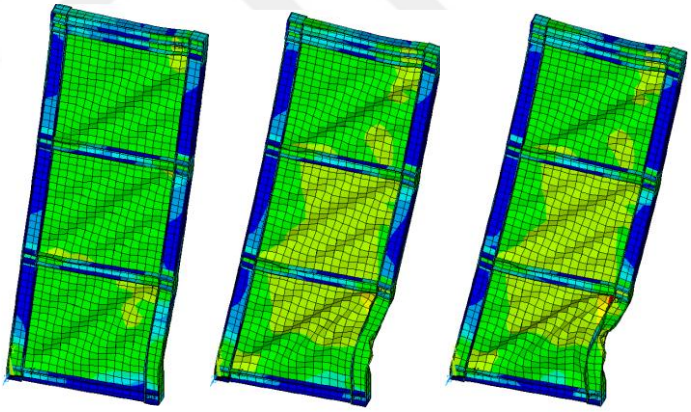
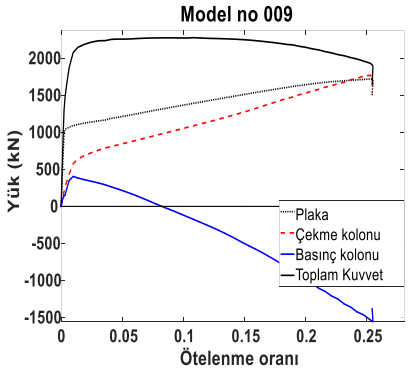
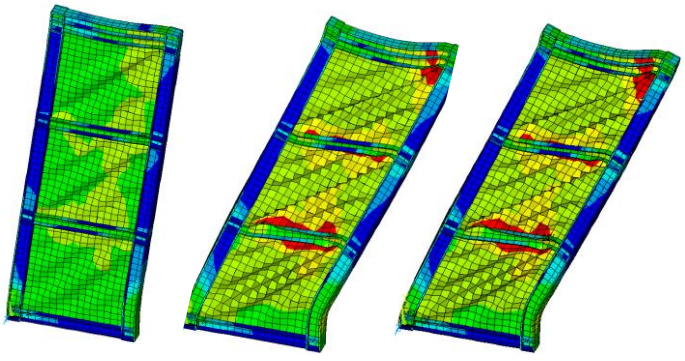
Şekil 7.7. Modellerin hasar durumunu incelemek için kullanılan gerinim skalası.

Yük – Öelenme Oranı Eğrisi	Maksimum Kuvvet	Nihai Ötelenme	Analiz Sonu
			
			

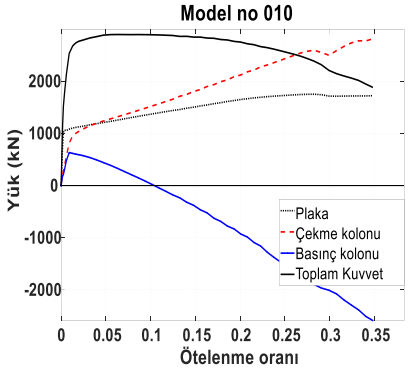
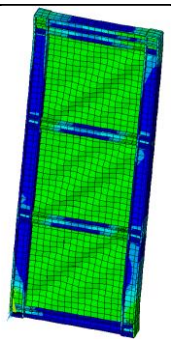
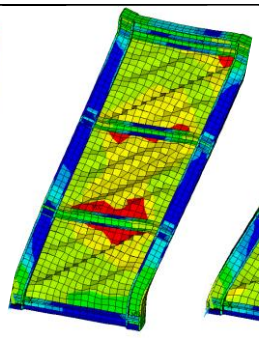
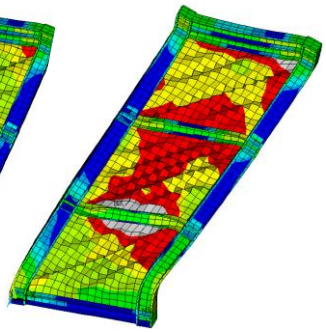
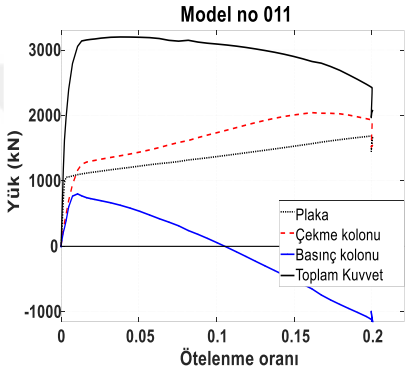
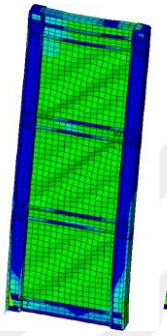
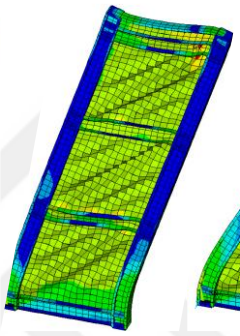
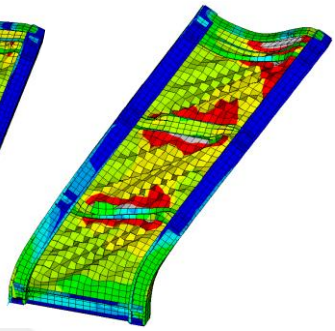
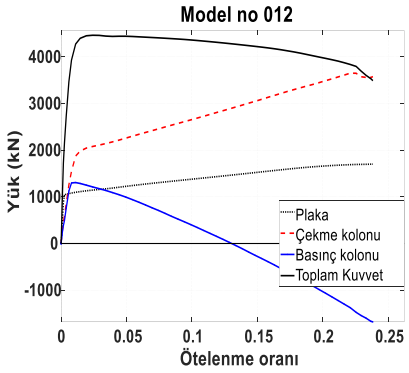
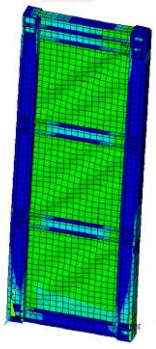
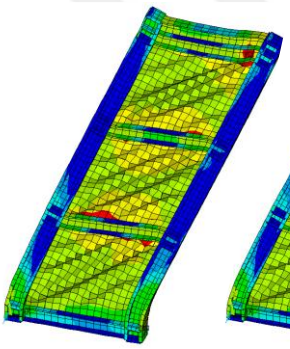
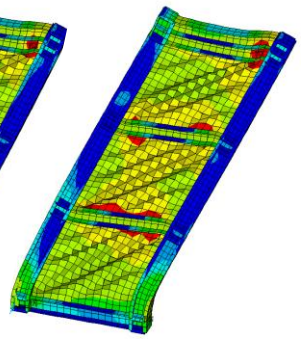
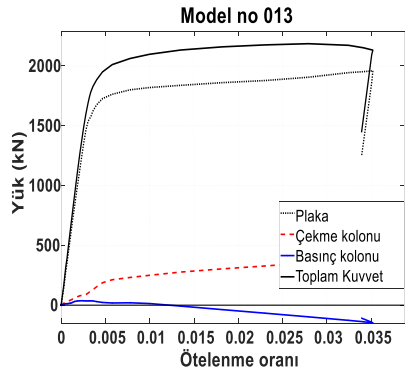
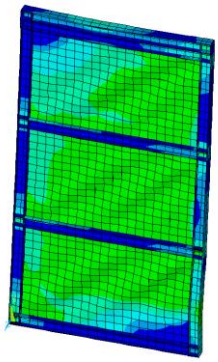
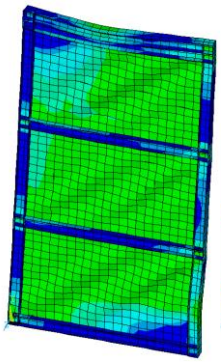
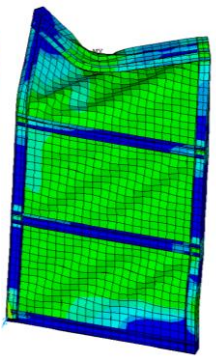
EK-5 (devam)

Yük – Öelenme Oranı Eğrisi	Maksimum Kuvvet	Nihai Ötelenme	Analiz Sonu
			
			
			

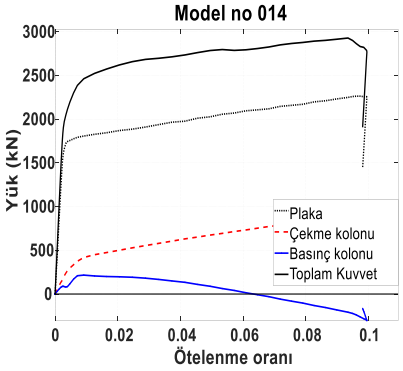
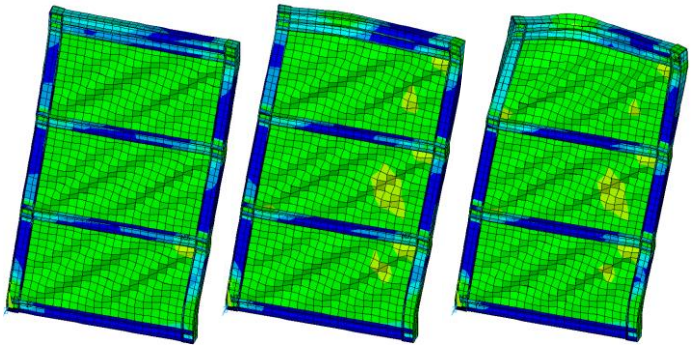
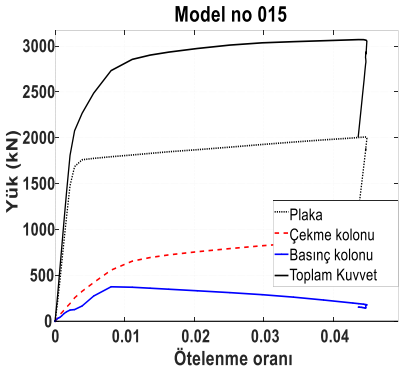
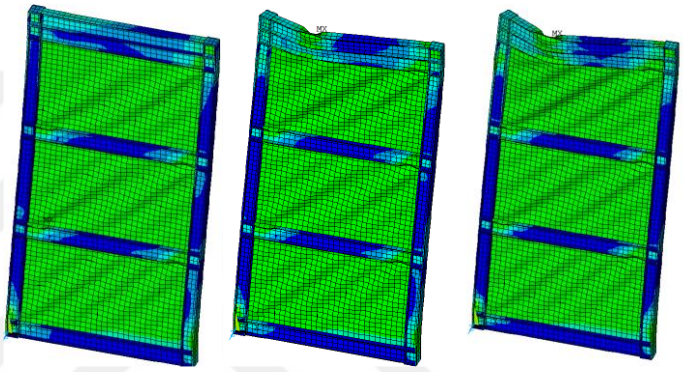
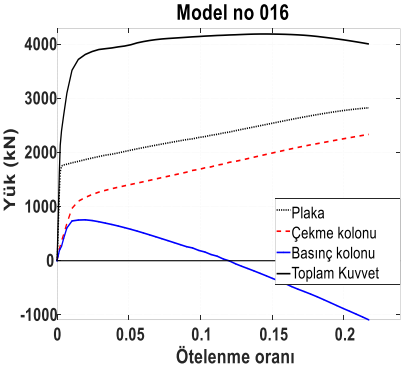
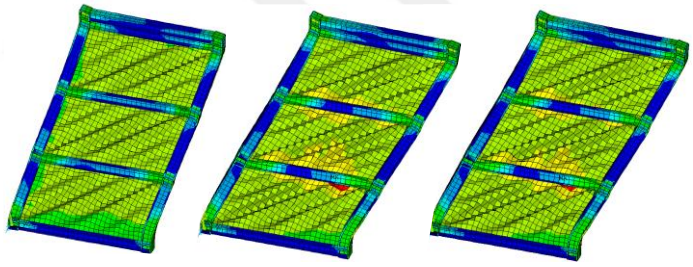
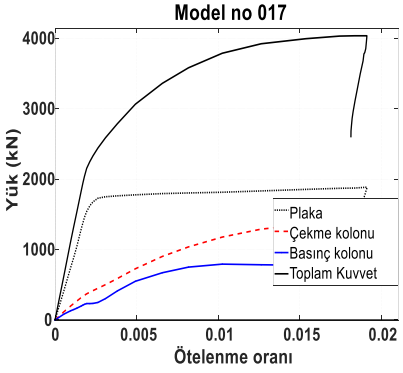
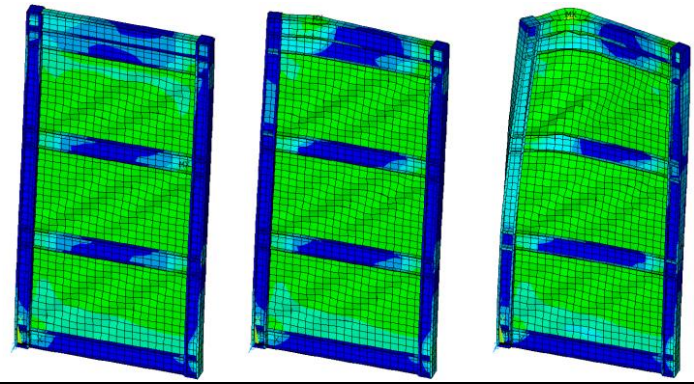
EK-5 (devam)

Yük – Öelenme Oranı Eğrisi	Maksimum Kuvvet	Nihai Ötelenme	Analiz Sonu
			
			
			
			

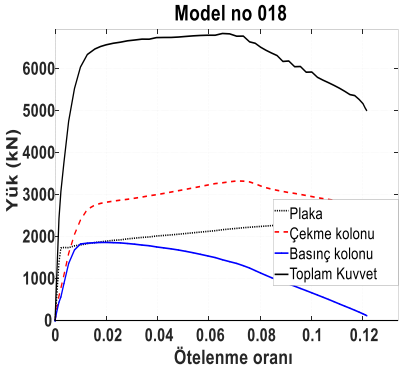
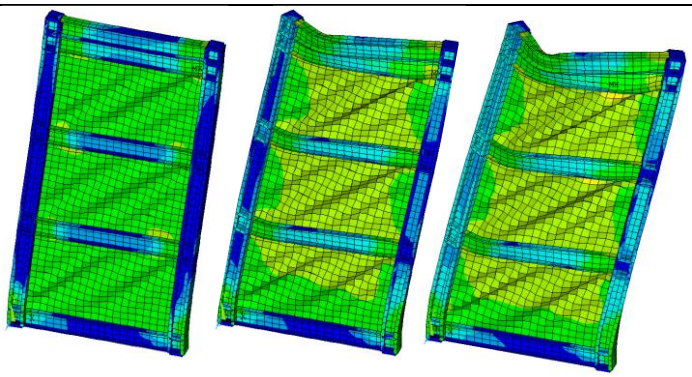
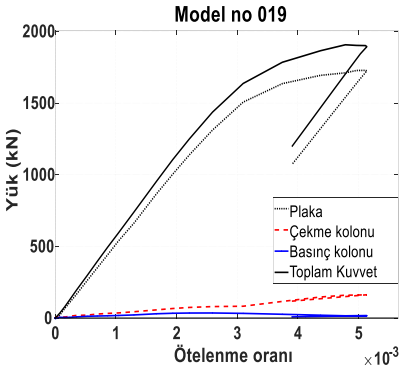
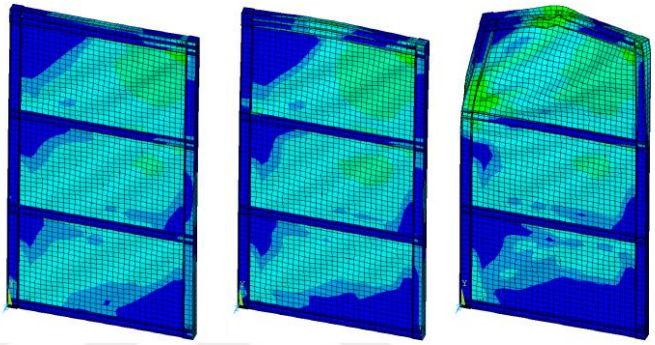
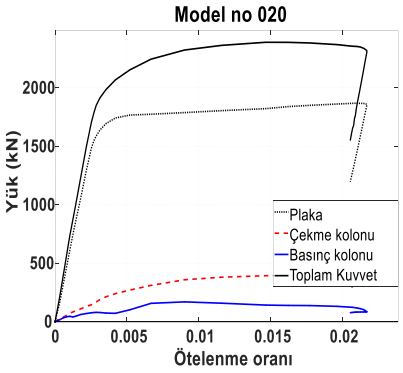
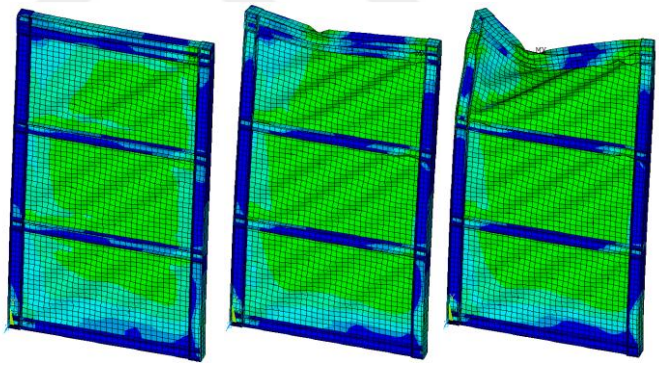
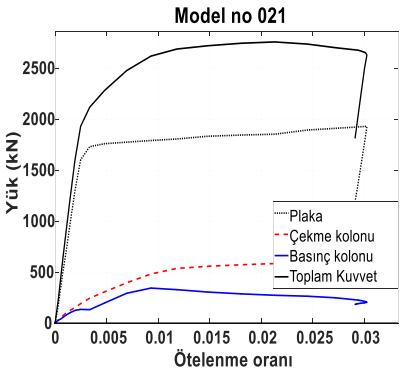
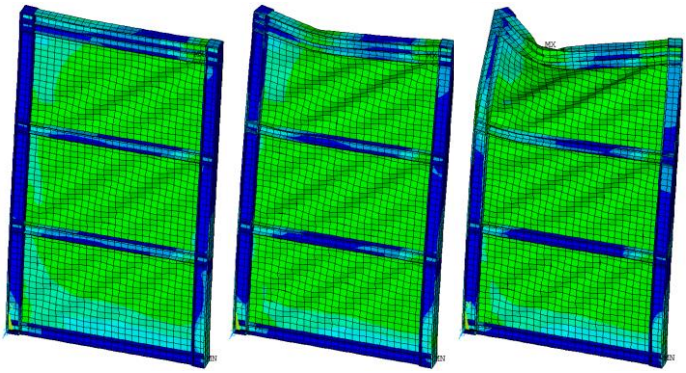
EK-5 (devam)

Yük – Öelenme Oranı Eğrisi	Maksimum Kuvvet	Nihai Ötelenme	Analiz Sonu
			
			
			
			

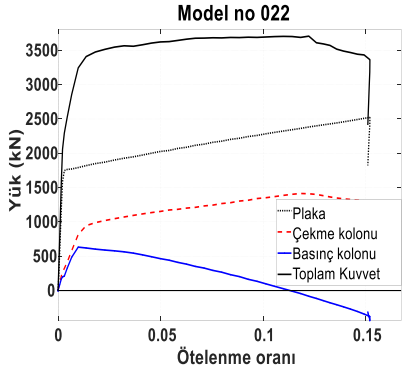
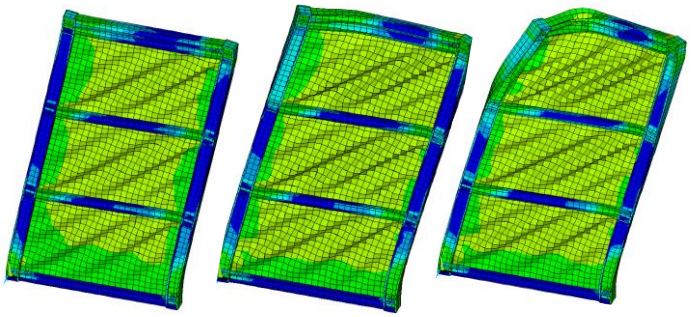
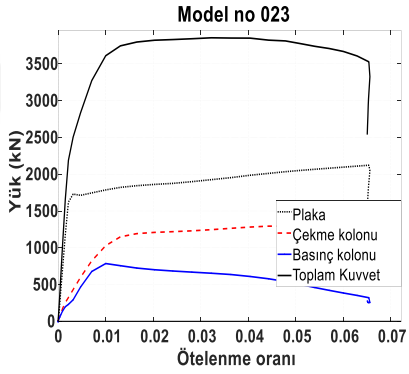
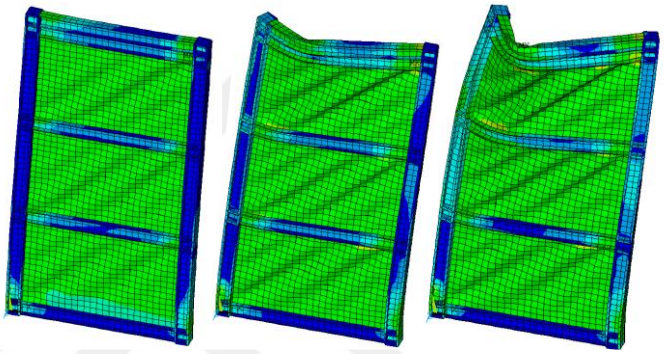
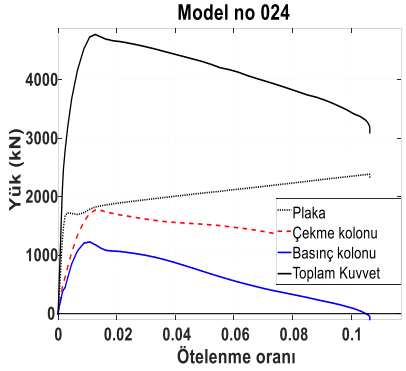
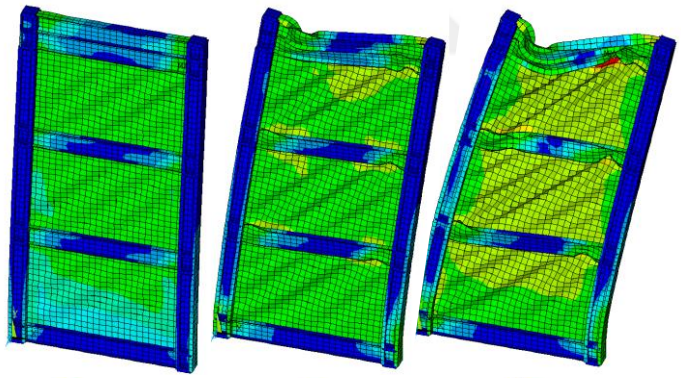
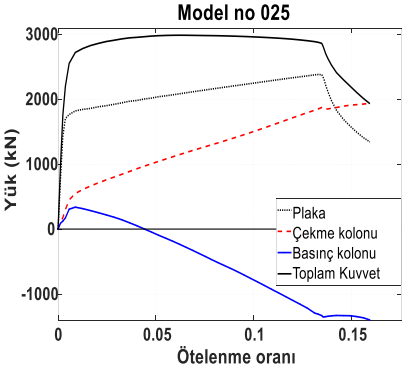
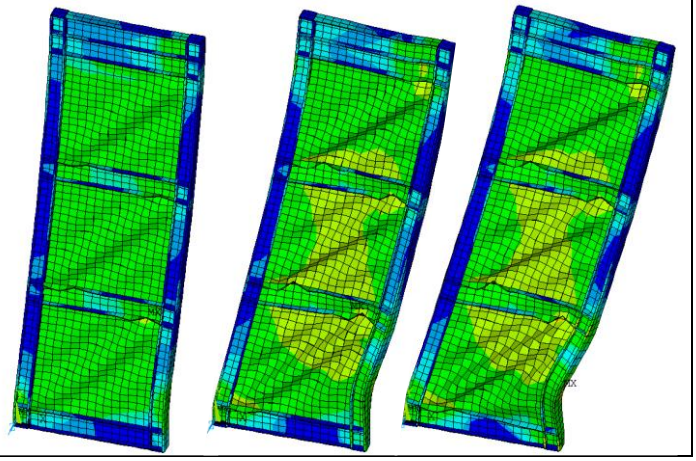
EK-5 (devam)

Yük – Öelenme Oranı Eğrisi	Maksimum Kuvvet	Nihai Ötelenme	Analiz Sonu
			
			
			
			

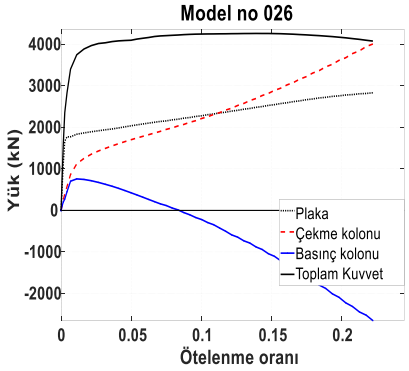
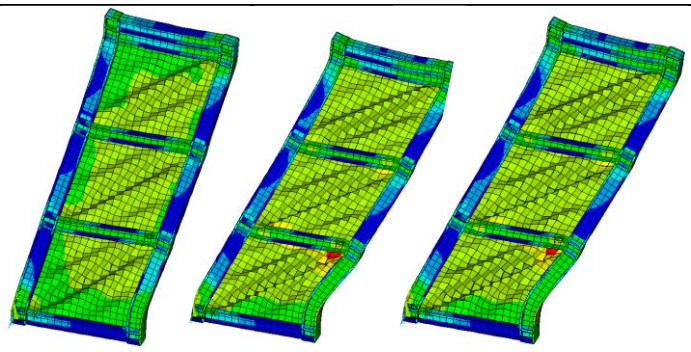
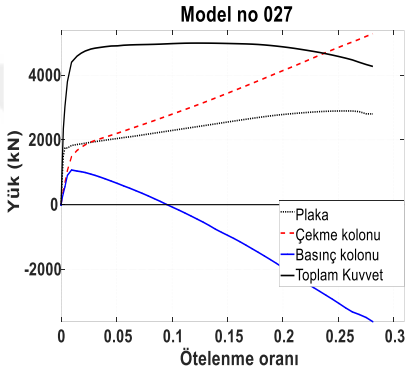
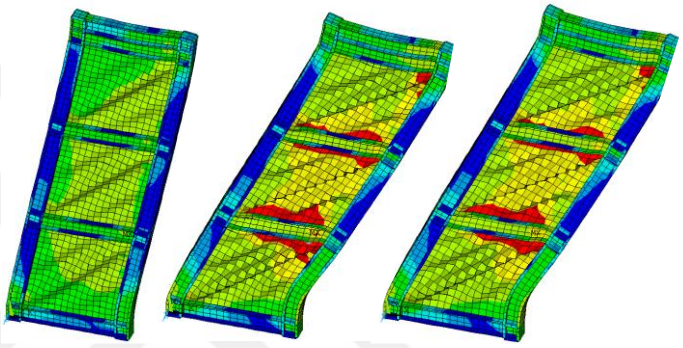
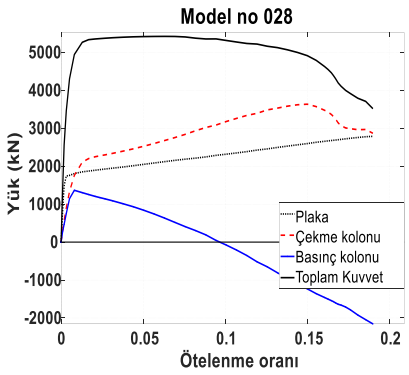
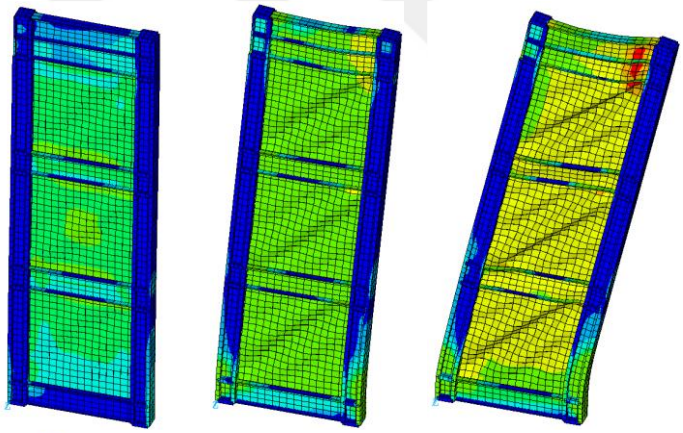
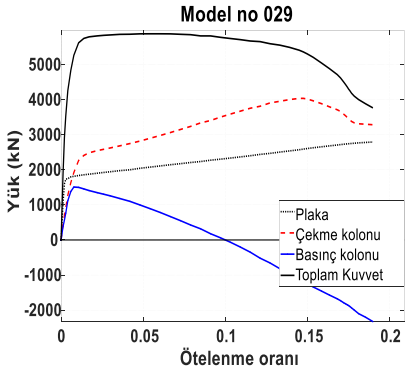
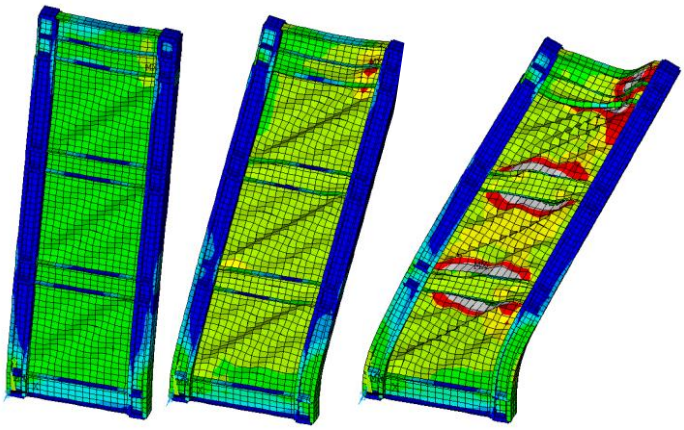
EK-5 (devam)

Yük – Öelenme Oranı Eğrisi	Maksimum Kuvvet	Nihai Ötelenme	Analiz Sonu
			
			
			
			

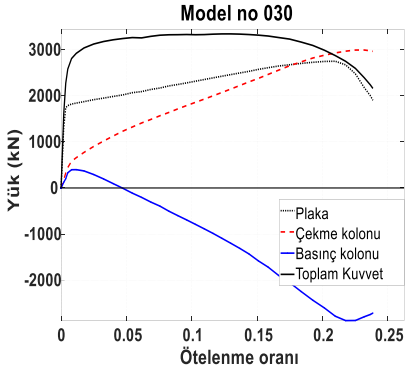
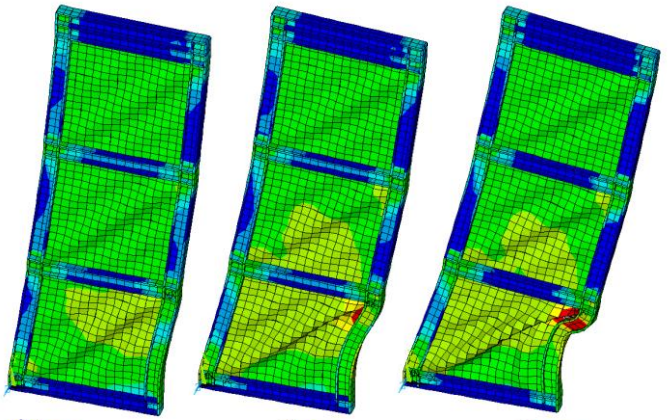
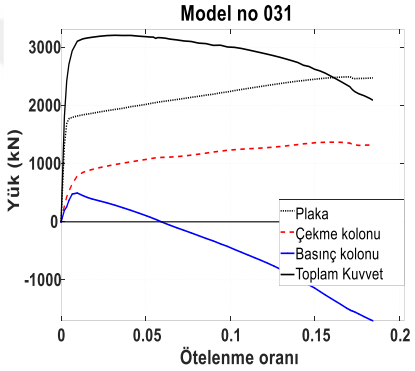
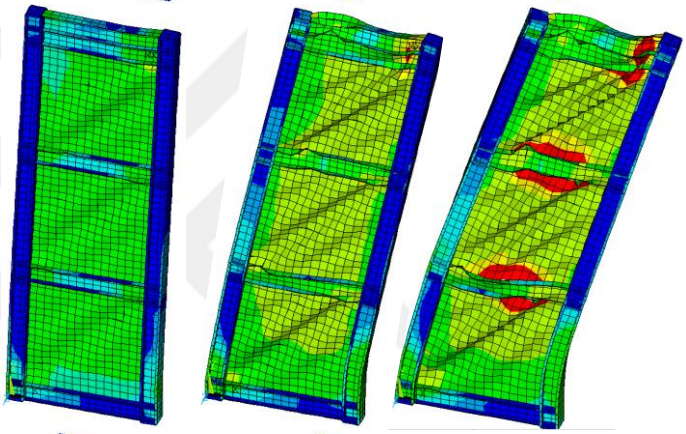
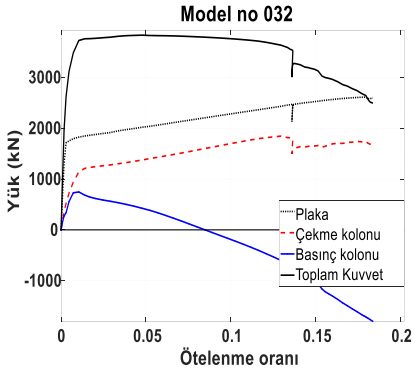
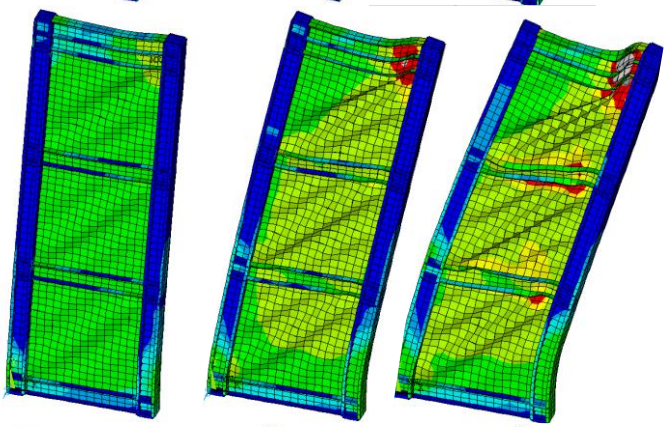
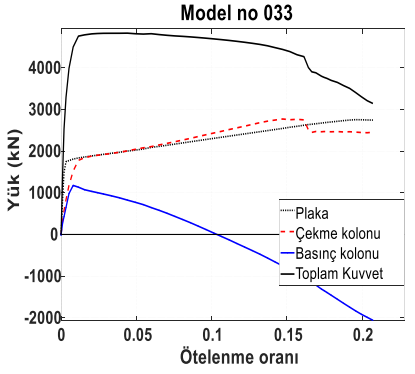
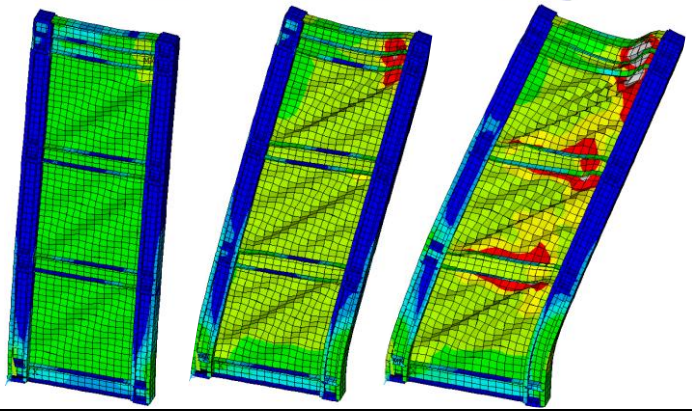
EK-5 (devam)

Yük – Öelenme Oranı Eğrisi	Maksimum Kuvvet	Nihai Ötelenme	Analiz Sonu
			
			
			
			

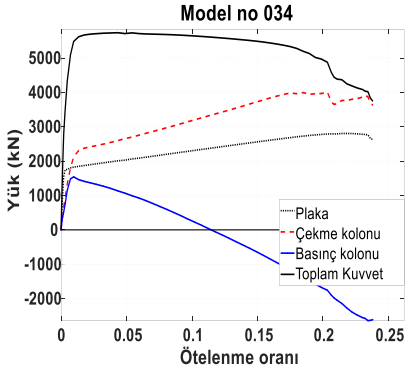
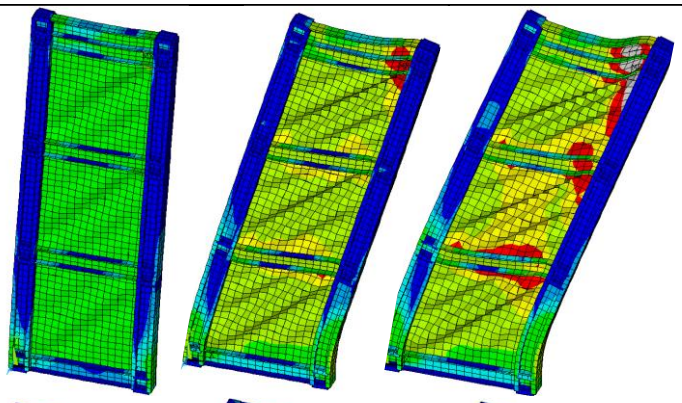
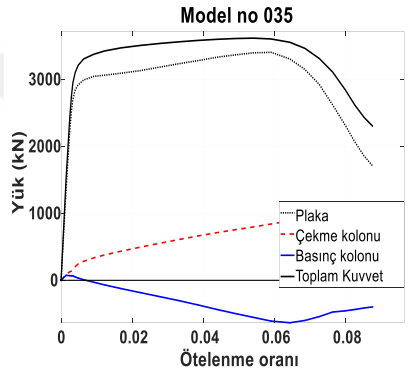
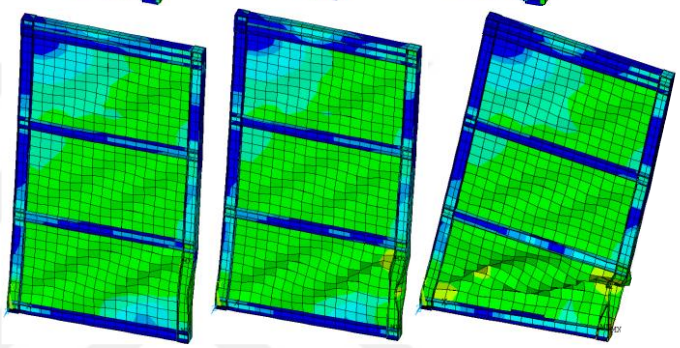
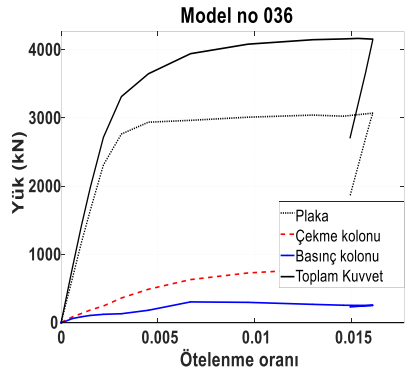
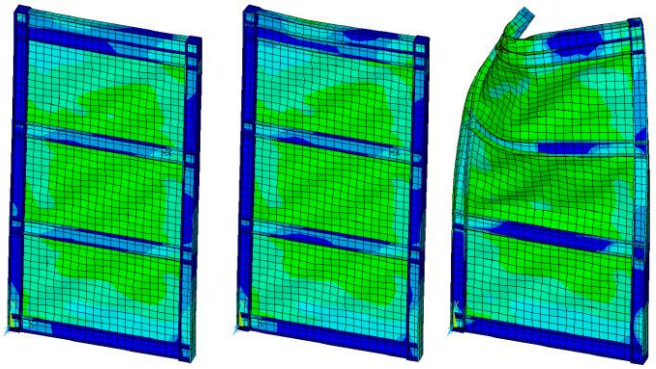
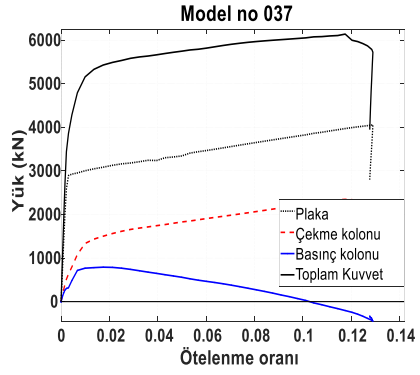
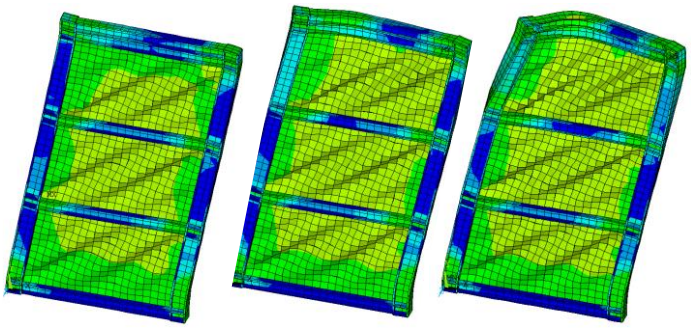
EK-5 (devam)

Yük – Öelenme Oranı Eğrisi	Maksimum Kuvvet	Nihai Ötelenme	Analiz Sonu
			
			
			
			

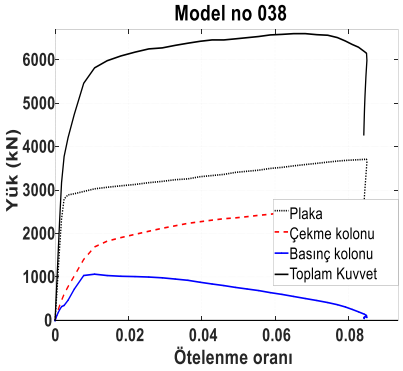
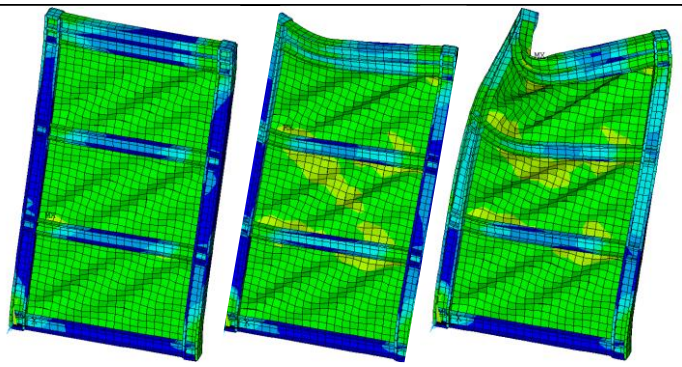
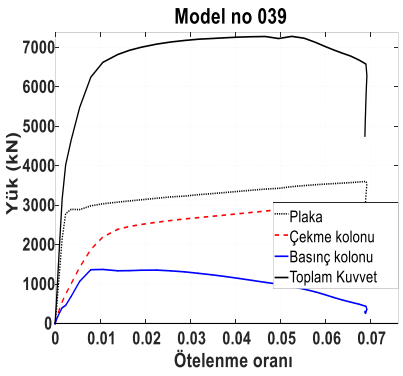
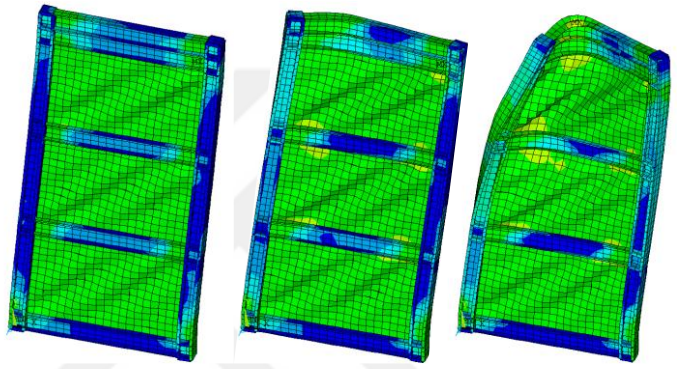
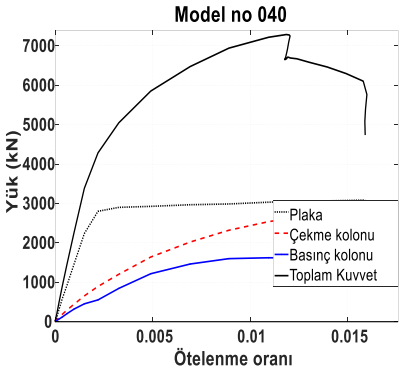
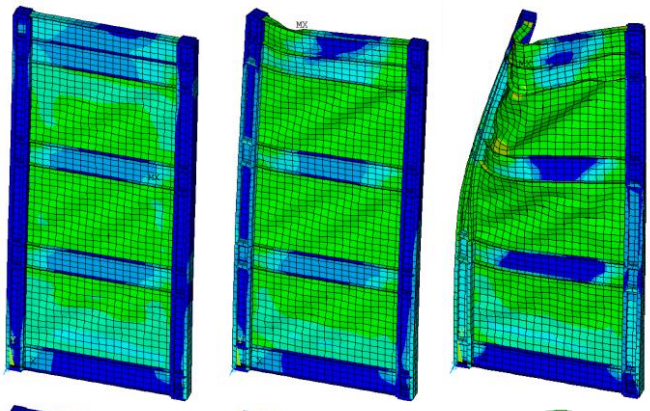
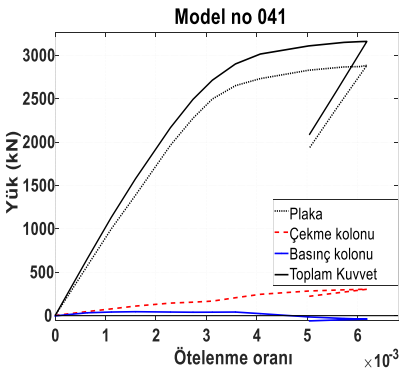
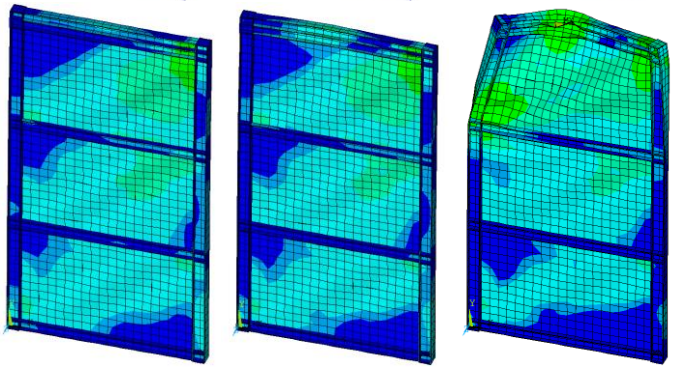
EK-5 (devam)

Yük – Öelenme Oranı Eğrisi	Maksimum Kuvvet	Nihai Ötelenme	Analiz Sonu
			
			
			
			

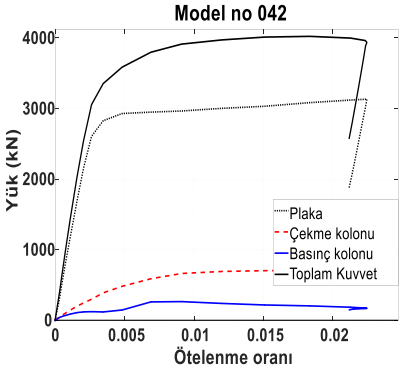
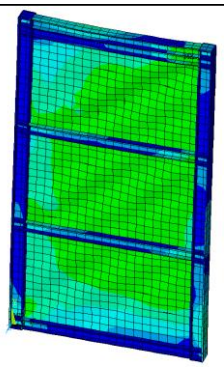
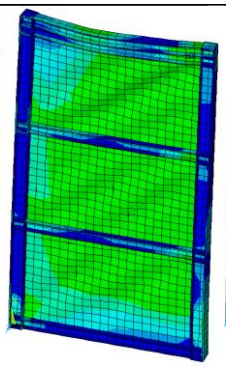
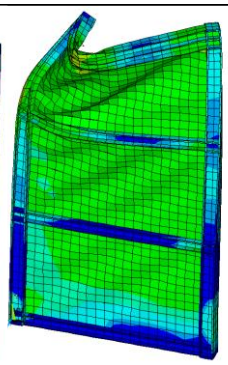
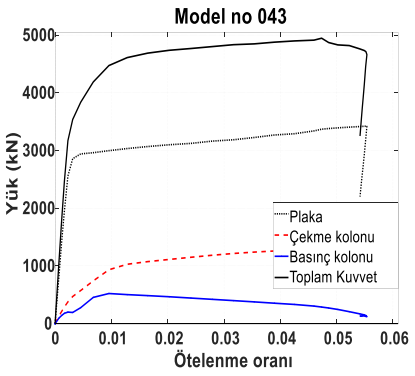
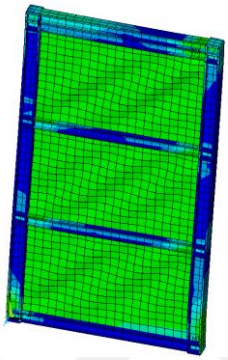
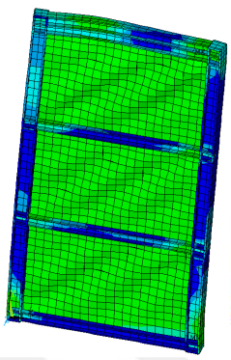
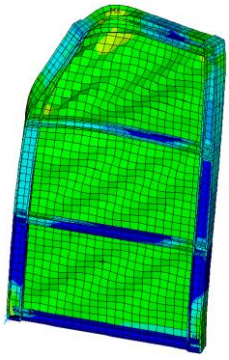
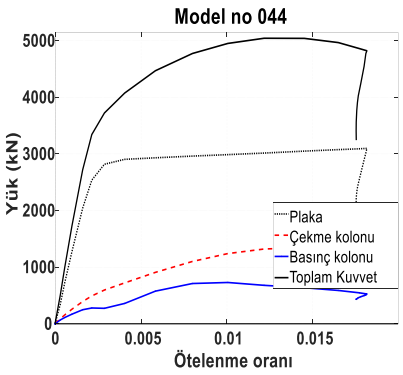
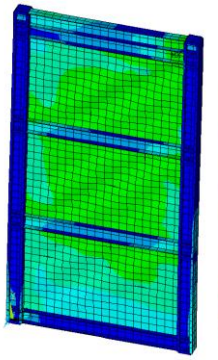
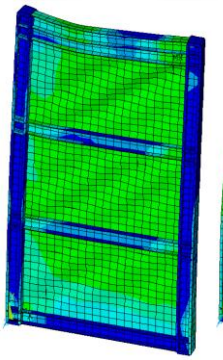
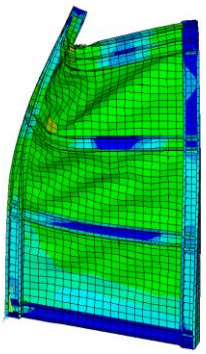
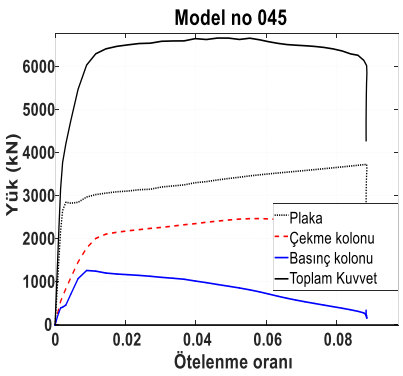
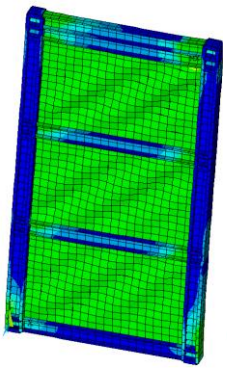
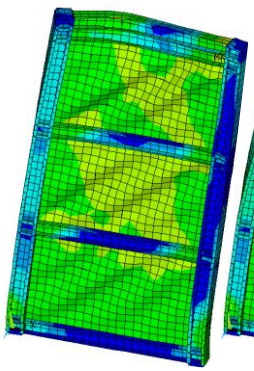
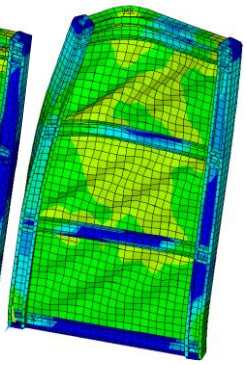
EK-5 (devam)

Yük – Öelenme Oranı Eğrisi	Maksimum Kuvvet	Nihai Ötelenme	Analiz Sonu
			
			
			
			

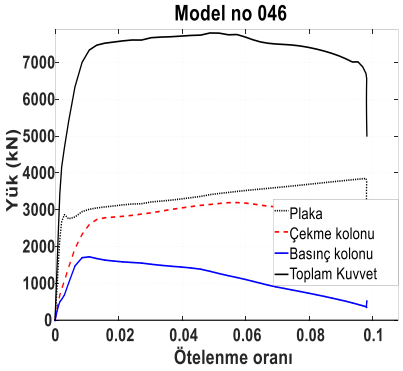
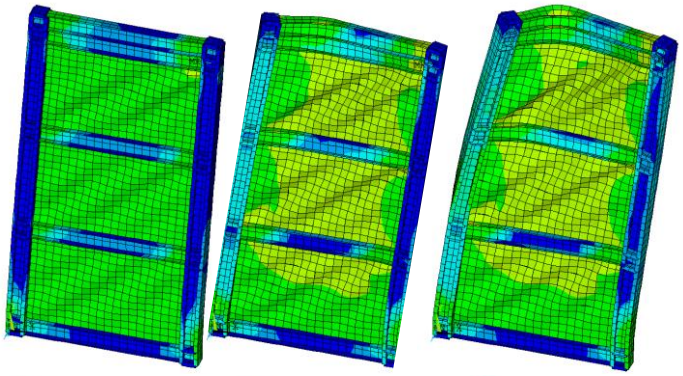
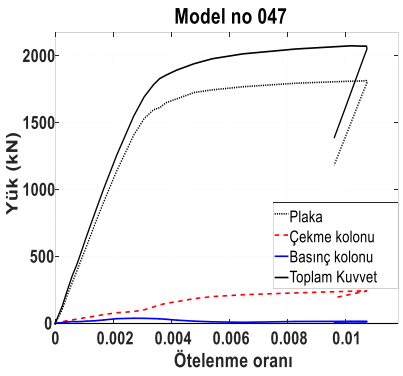
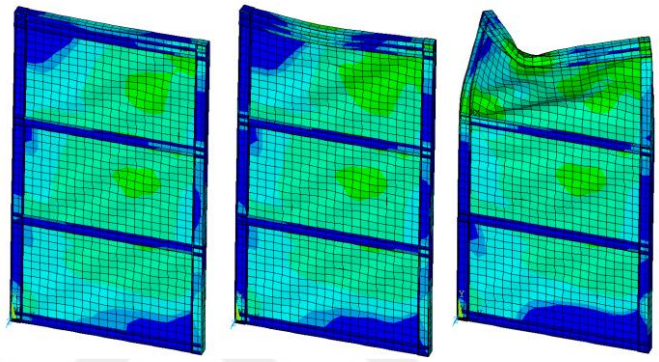
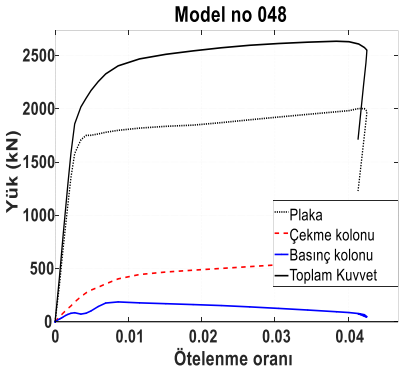
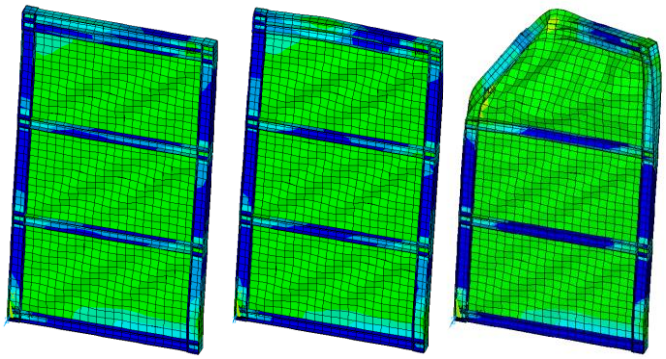
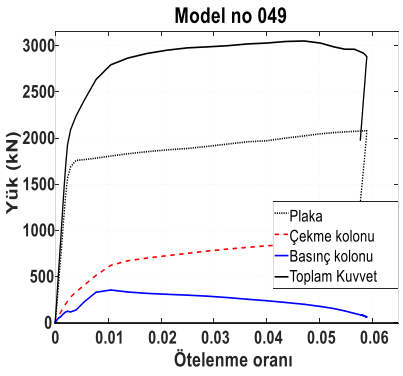
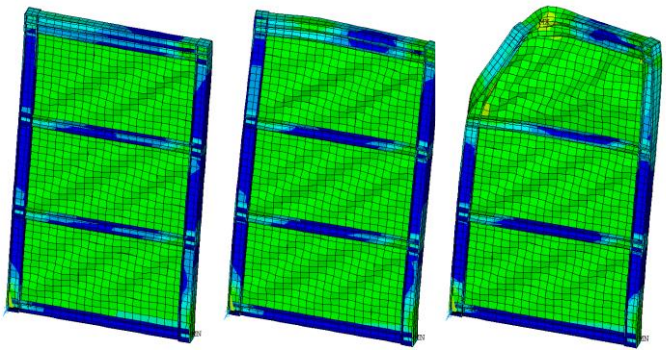
EK-5 (devam)

Yük – Öelenme Oranı Eğrisi	Maksimum Kuvvet	Nihai Ötelenme	Analiz Sonu
			
			
			
			

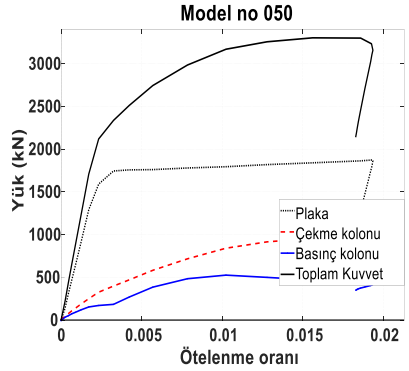
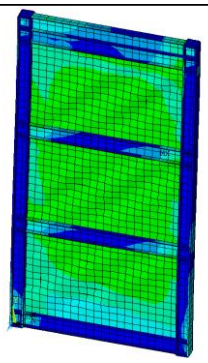
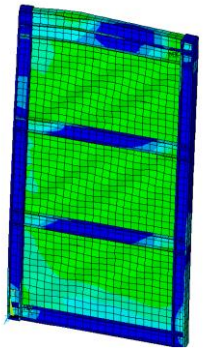
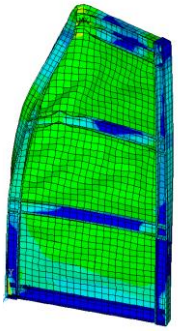
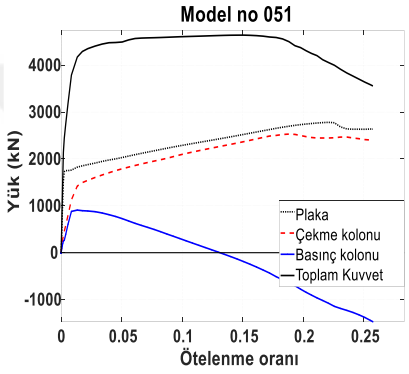
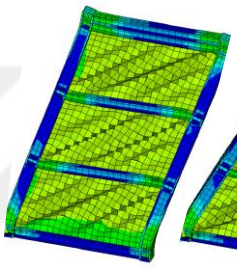
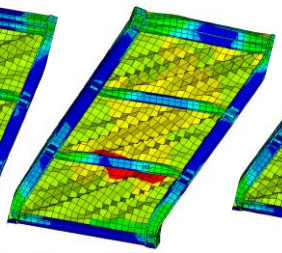
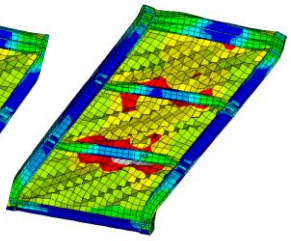
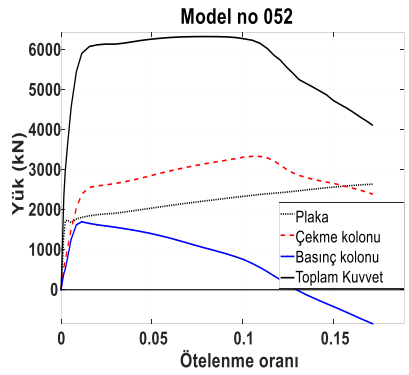
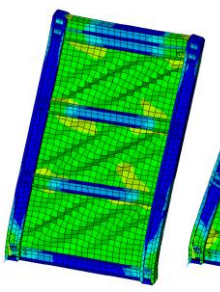
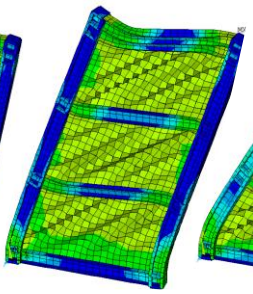
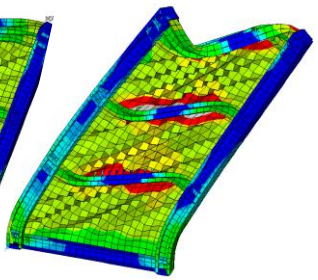
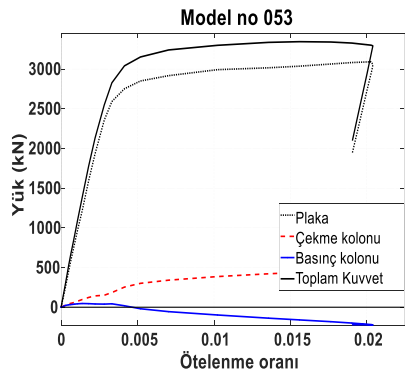
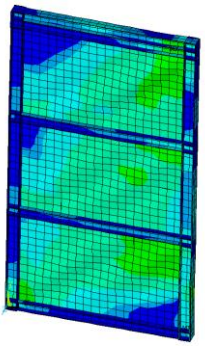
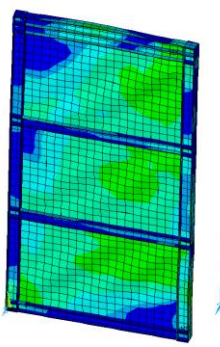
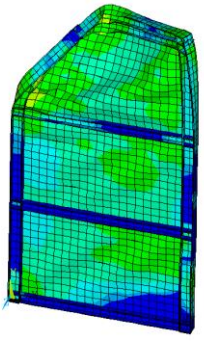
EK-5 (devam)

Yük – Öelenme Oranı Eğrisi	Maksimum Kuvvet	Nihai Ötelenme	Analiz Sonu
			
			
			
			

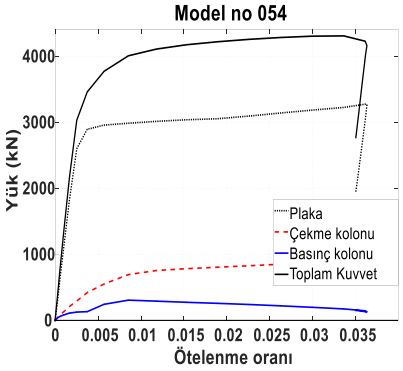
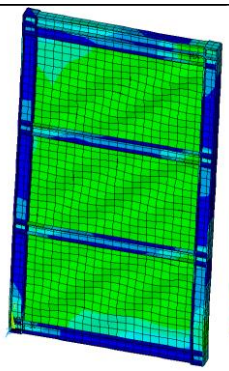
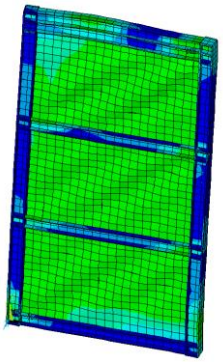
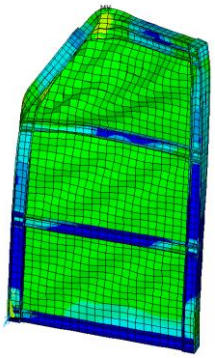
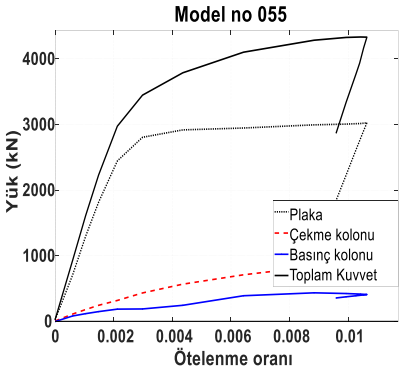
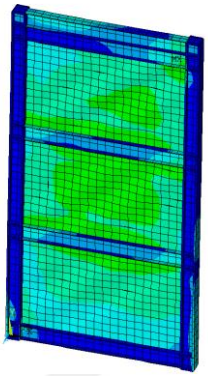
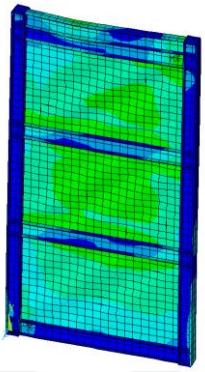
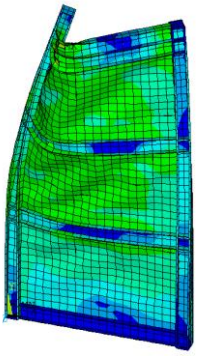
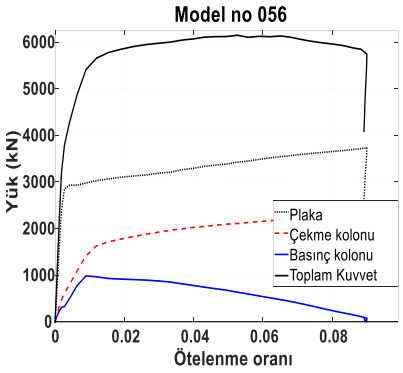
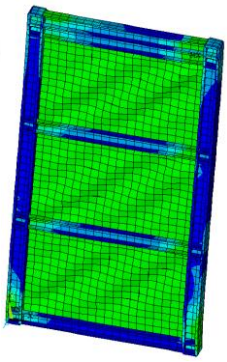
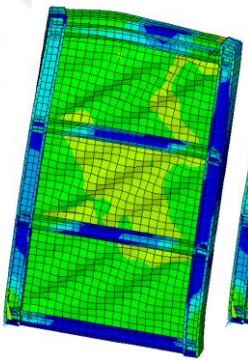
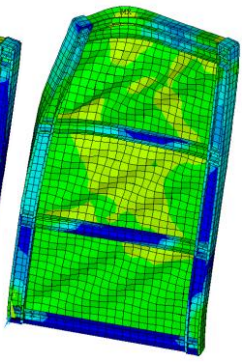
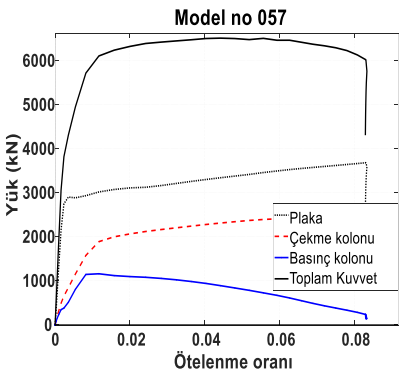
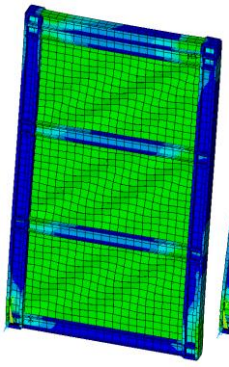
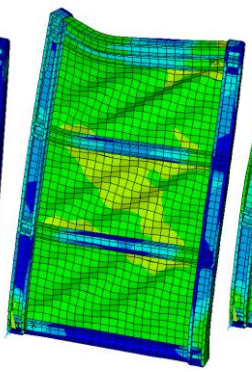
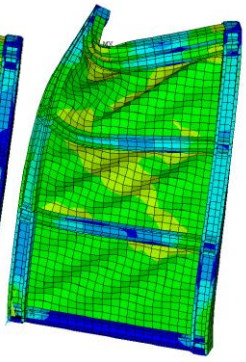
EK-5 (devam)

Yük – Öelenme Oranı Eğrisi	Maksimum Kuvvet	Nihai Ötelenme	Analiz Sonu
			
			
			
			

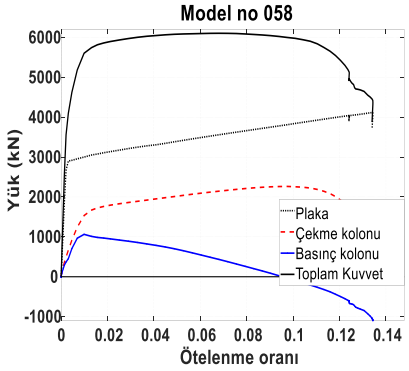
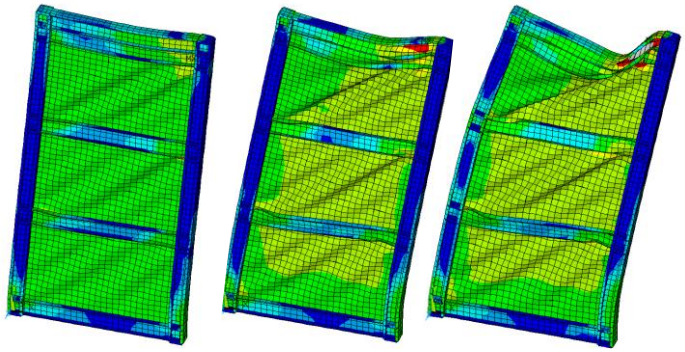
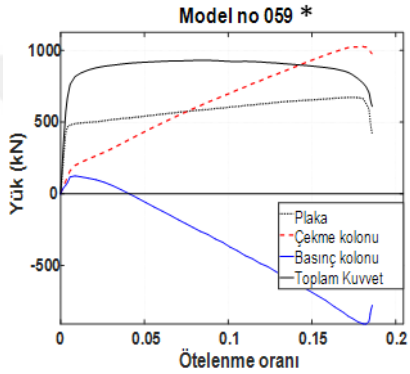
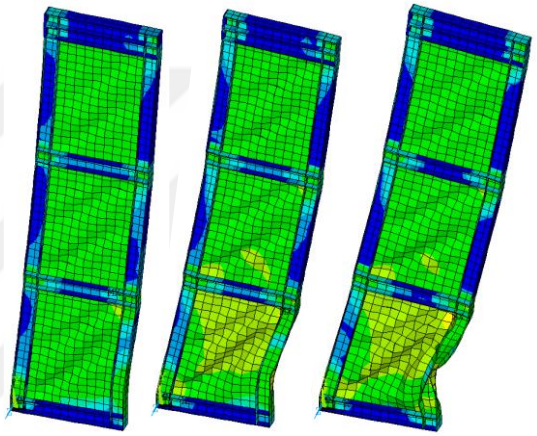
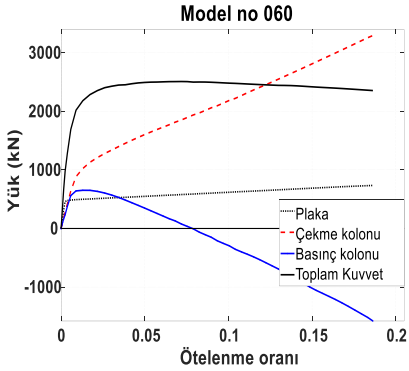
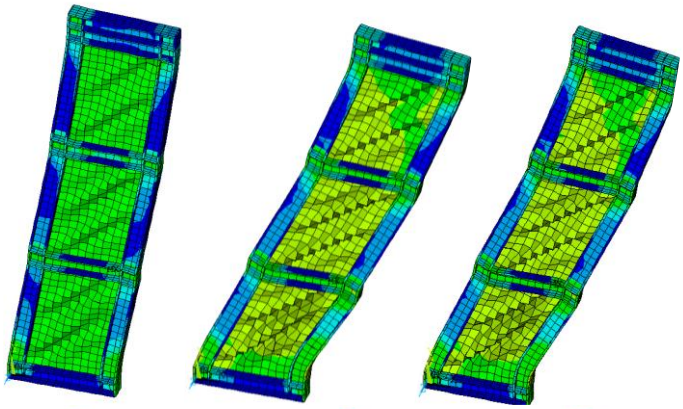
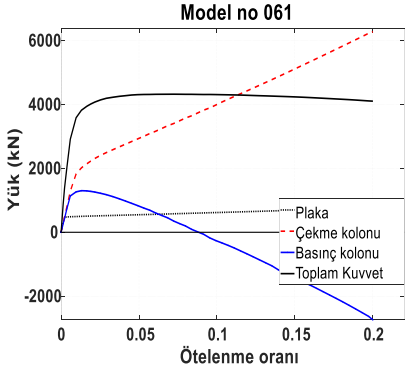
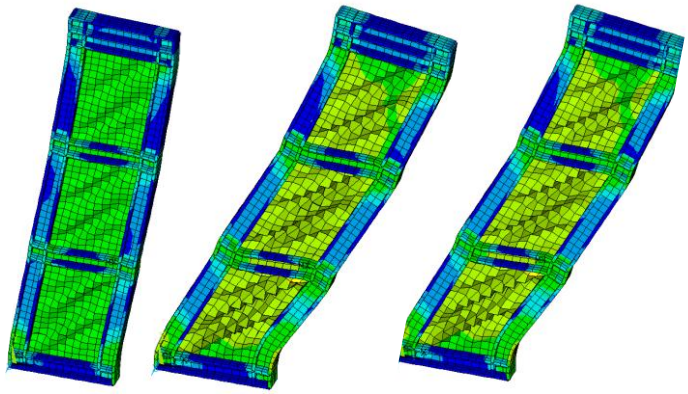
EK-5 (devam)

Yük – Öelenme Oranı Eğrisi	Maksimum Kuvvet	Nihai Ötelenme	Analiz Sonu
			
			
			
			

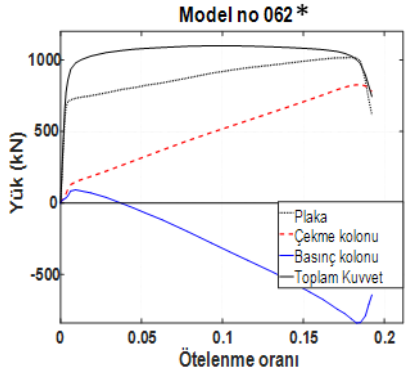
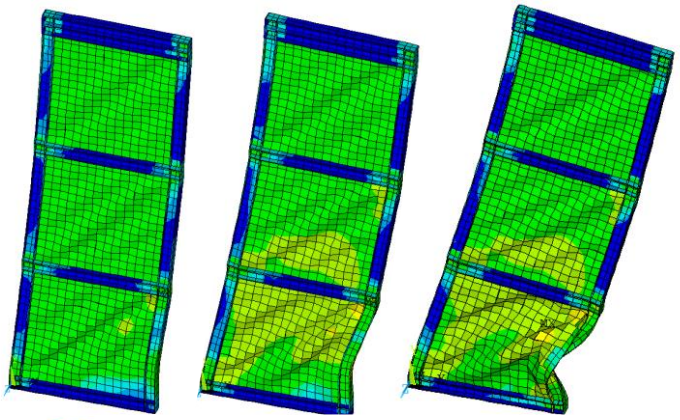
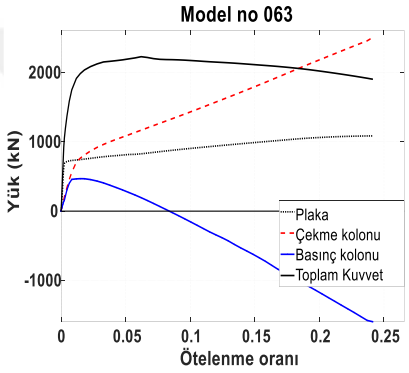
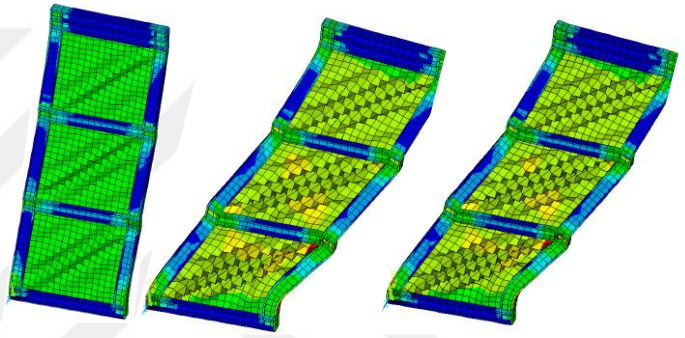
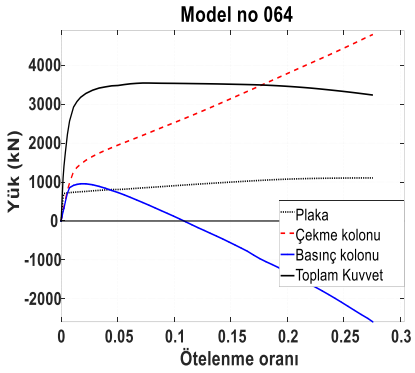
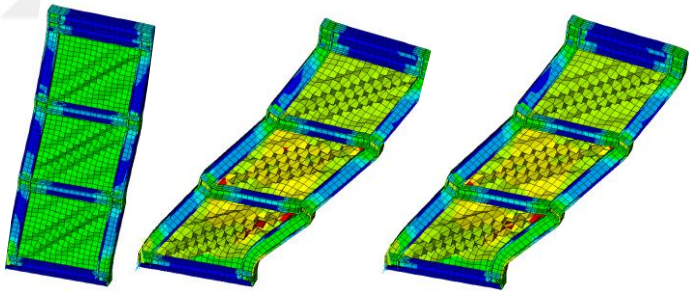
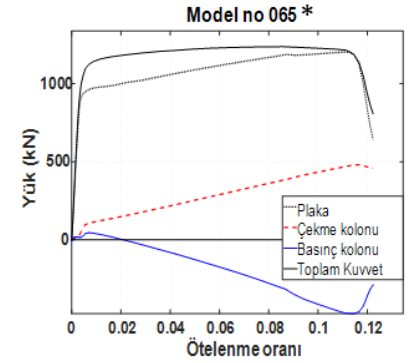
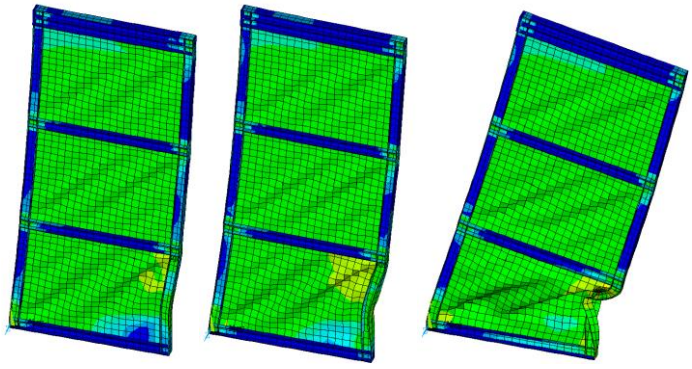
EK-5 (devam)

Yük – Öelenme Oranı Eğrisi	Maksimum Kuvvet	Nihai Ötelenme	Analiz Sonu
			
			
			
			

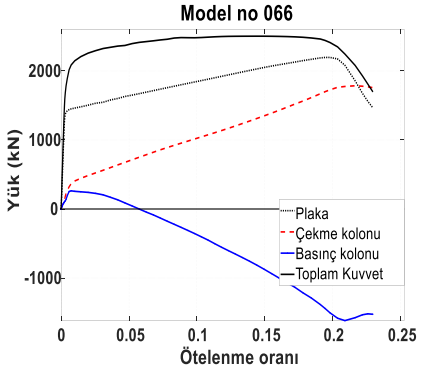
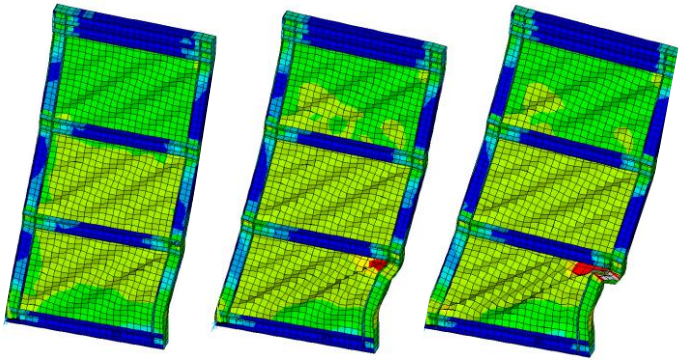
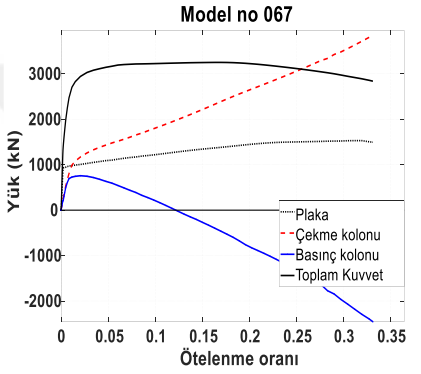
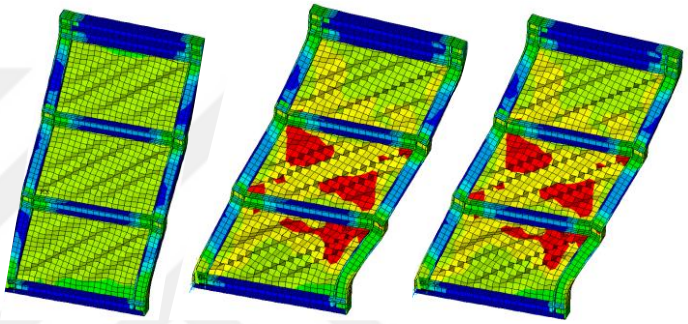
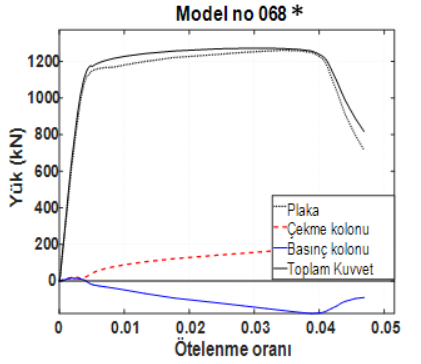
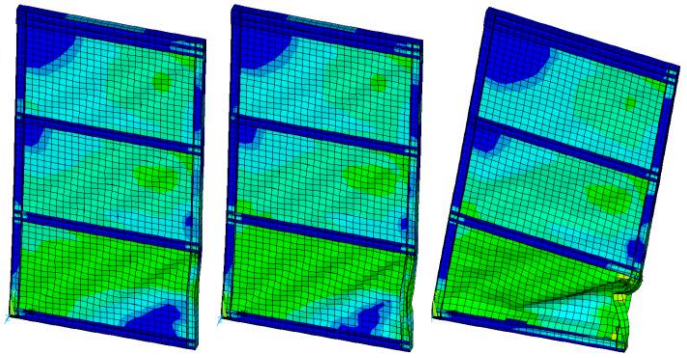
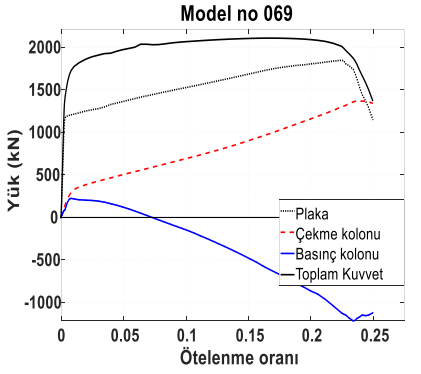
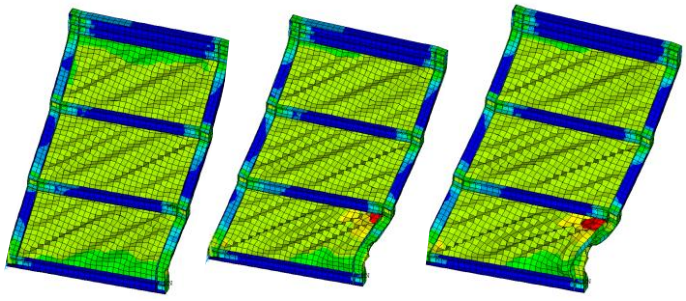
EK-5 (devam)

Yük – Öelenme Oranı Eğrisi	Maksimum Kuvvet	Nihai Ötelenme	Analiz Sonu
			
			
			
			

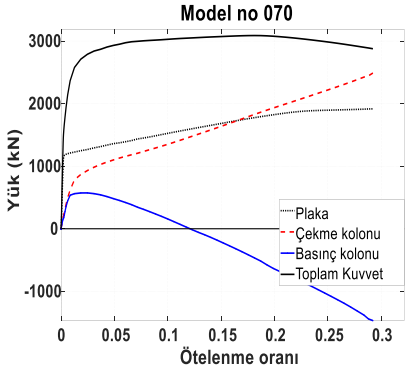
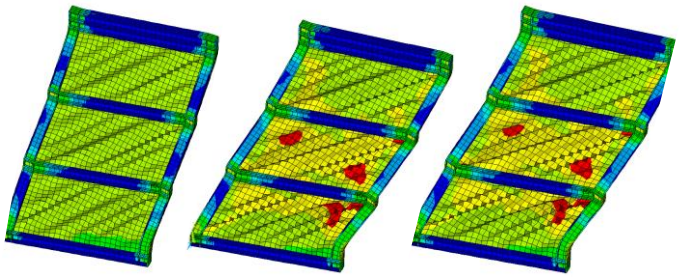
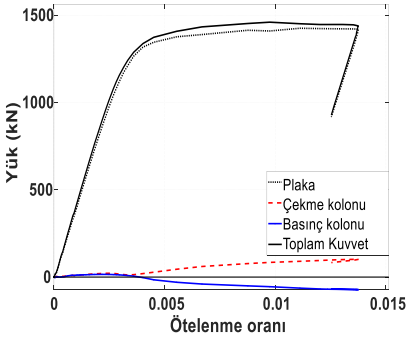
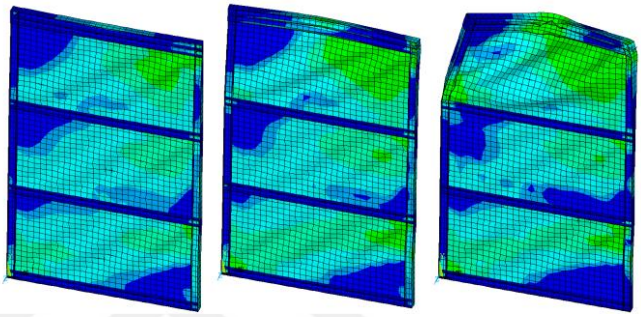
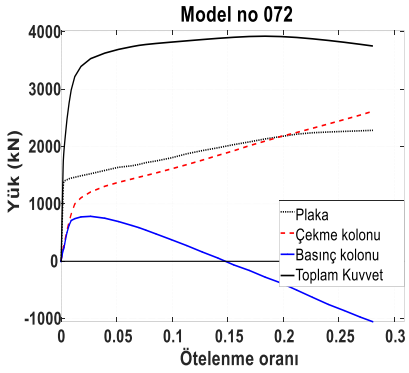
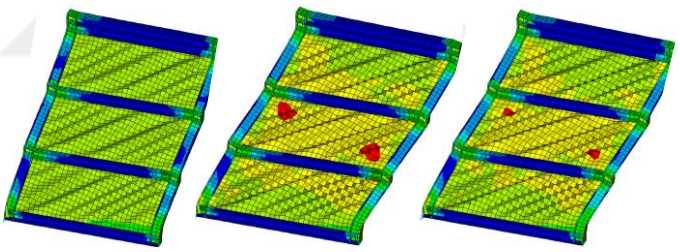
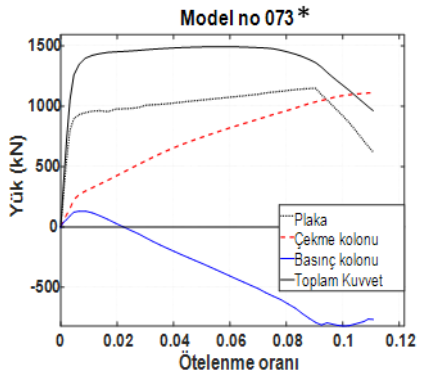
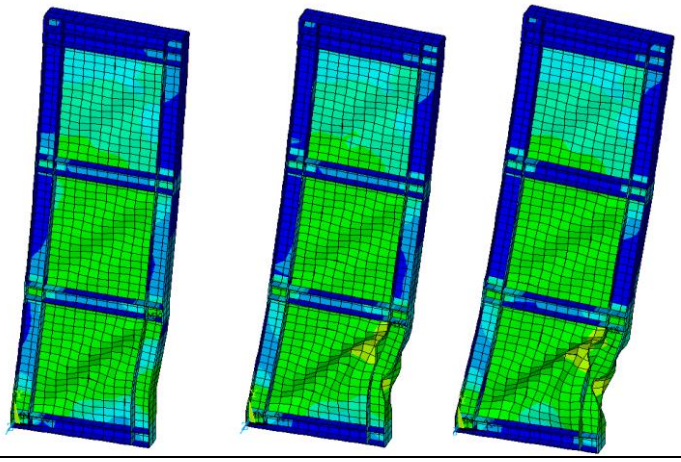
EK-5 (devam)

Yük – Öelenme Oranı Eğrisi	Maksimum Kuvvet	Nihai Ötelenme	Analiz Sonu
			
			
			
			

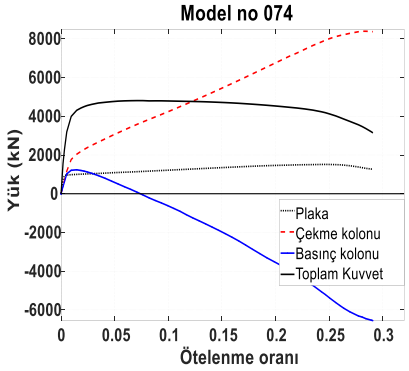
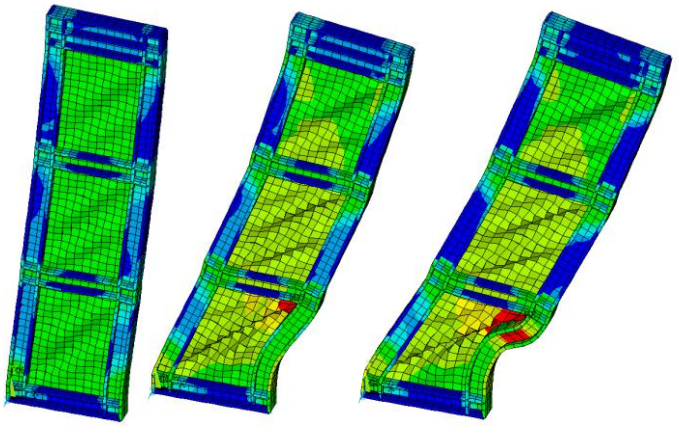
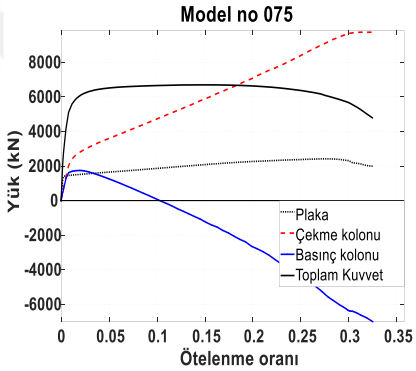
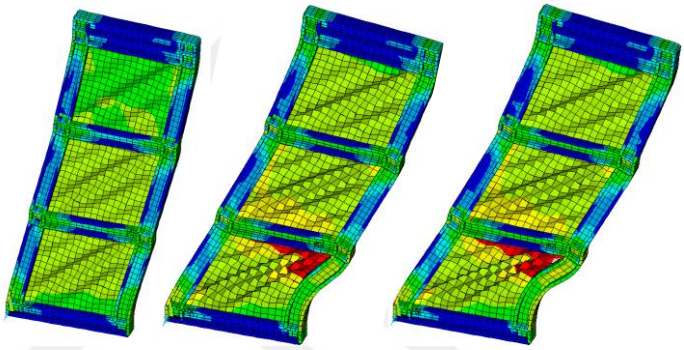
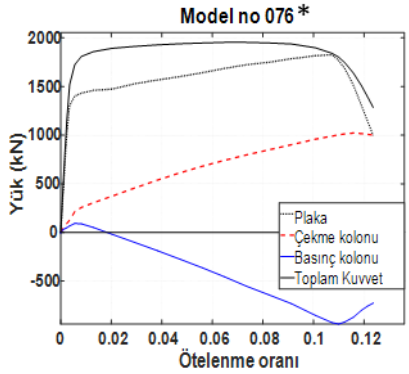
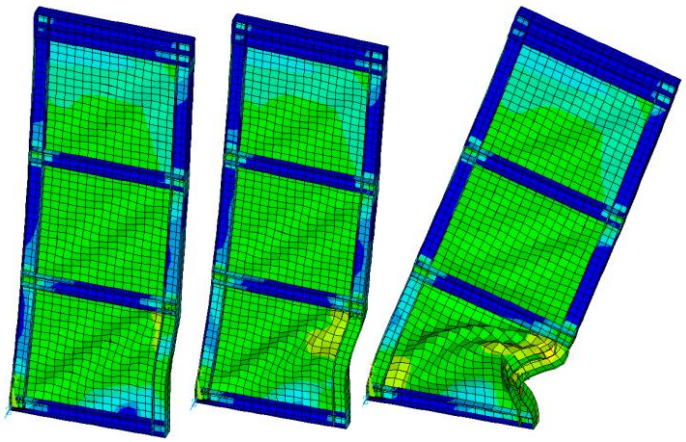
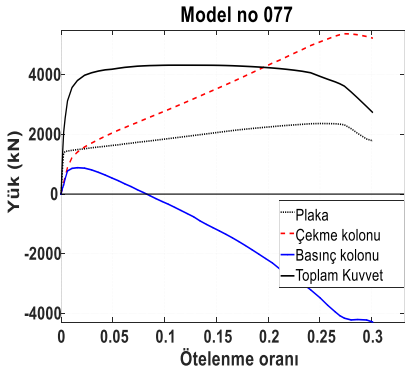
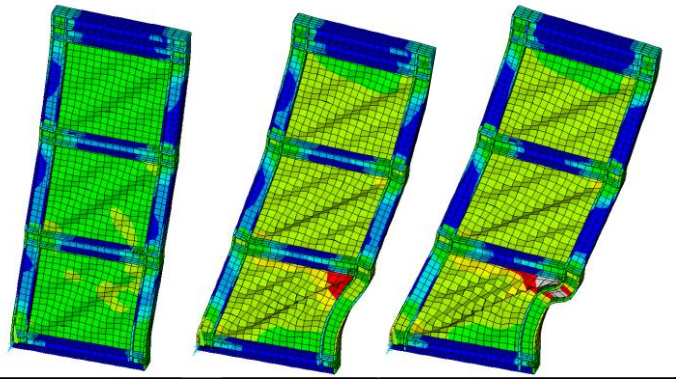
EK-5 (devam)

Yük – Öelenme Oranı Eğrisi	Maksimum Kuvvet	Nihai Ötelenme	Analiz Sonu
			
			
			
			

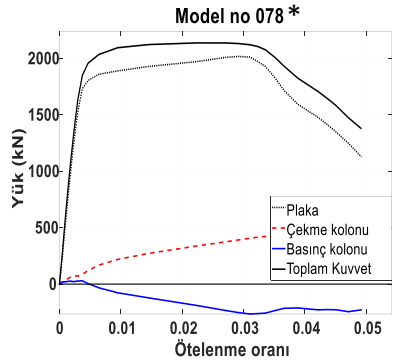
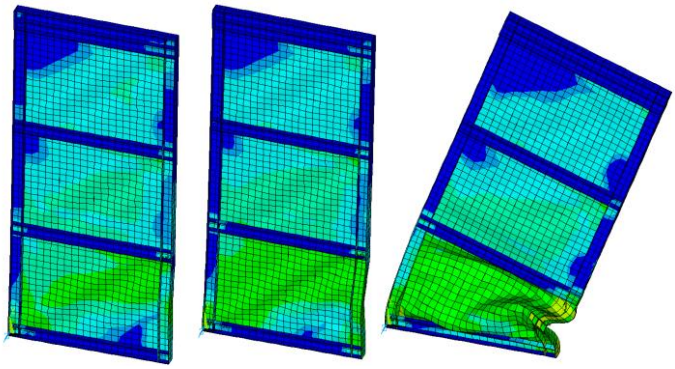
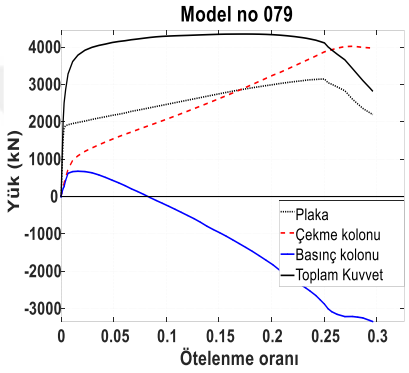
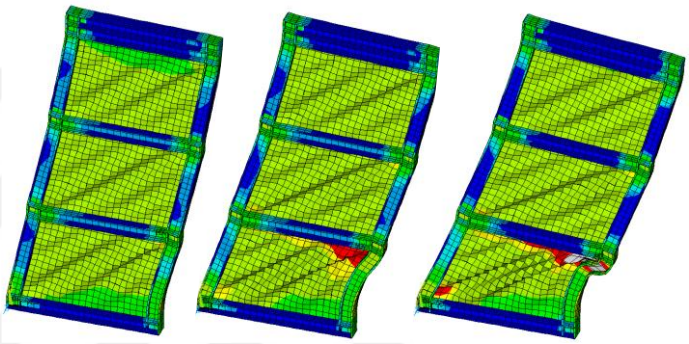
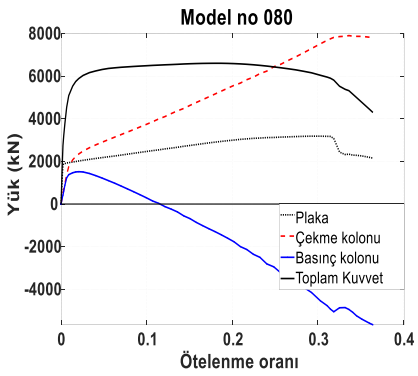
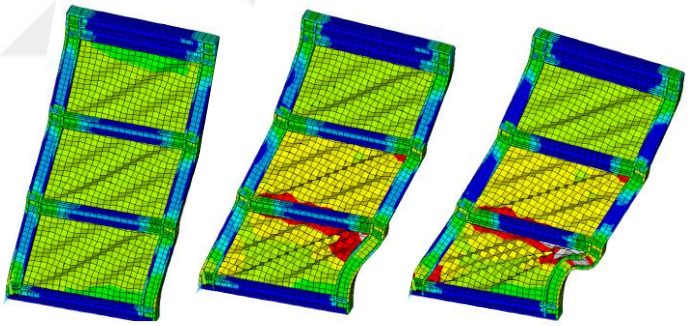
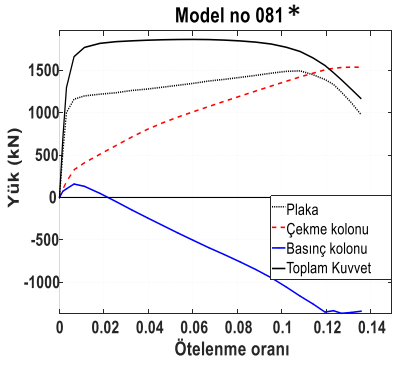
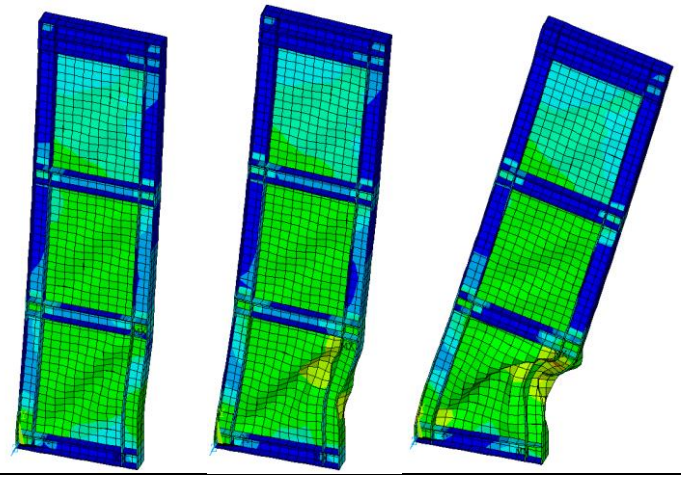
EK-5 (devam)

Yük – Öelenme Oranı Eğrisi	Maksimum Kuvvet	Nihai Ötelenme	Analiz Sonu
			
			
			
			

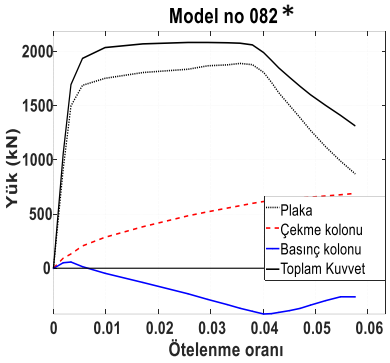
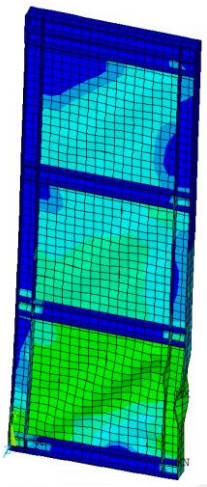
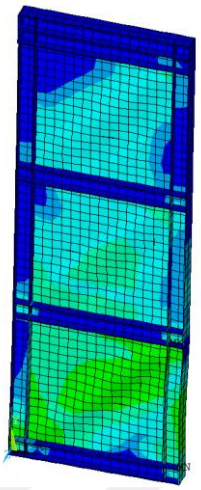
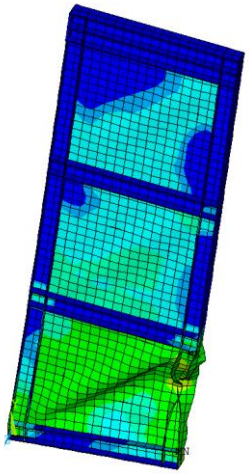
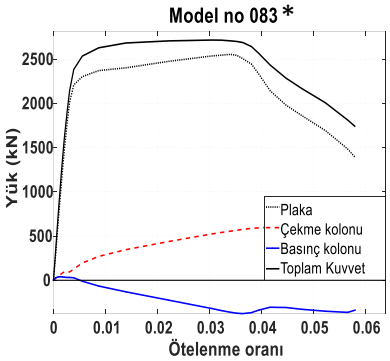
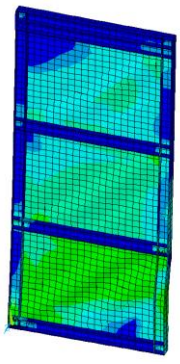
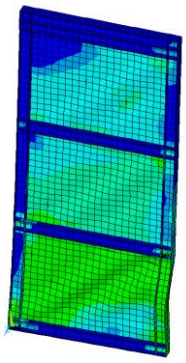
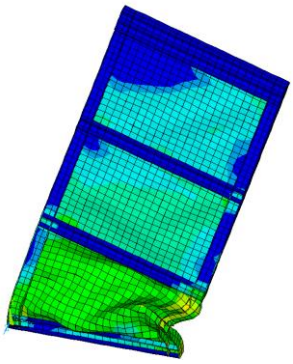
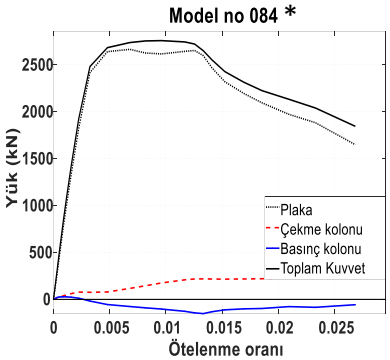
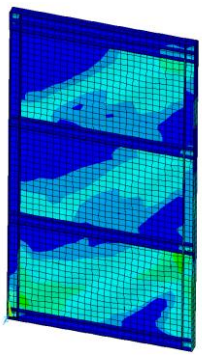
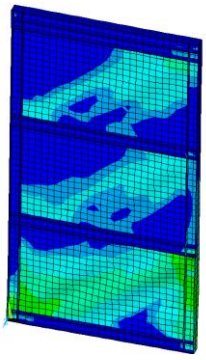
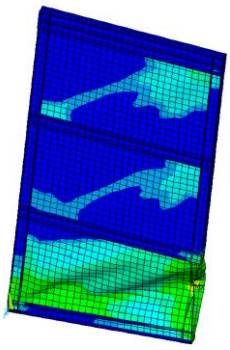
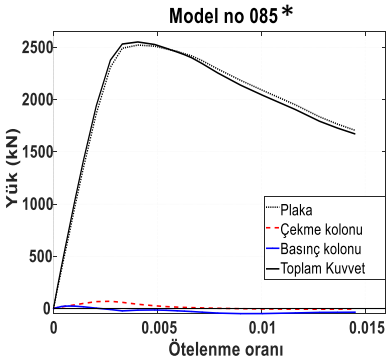
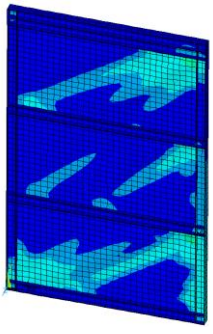
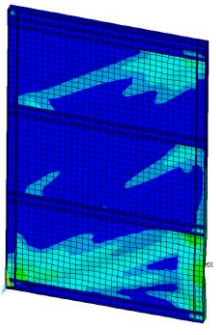
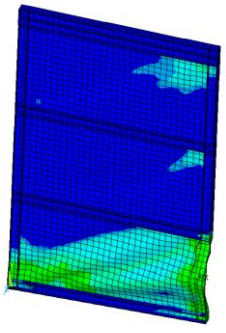
EK-5 (devam)

Yük – Öelenme Oranı Eğrisi	Maksimum Kuvvet	Nihai Ötelenme	Analiz Sonu
			
			
			
			

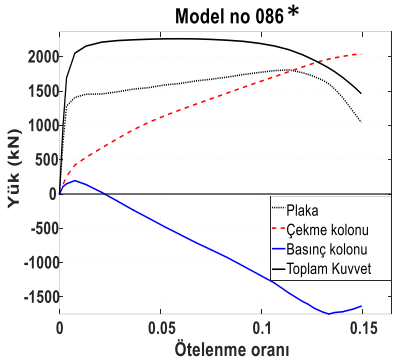
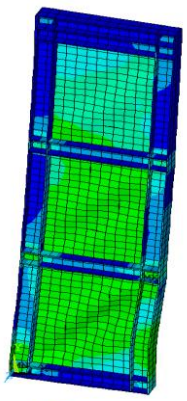
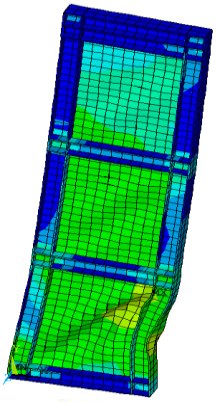
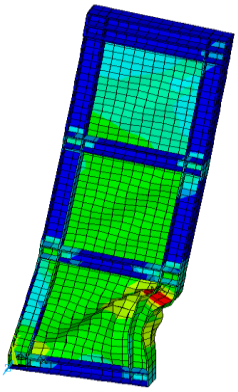
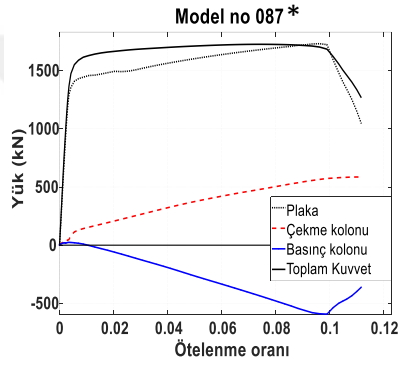
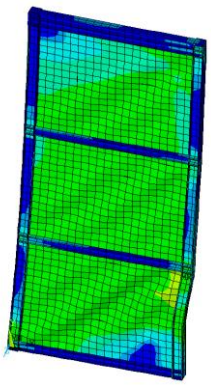
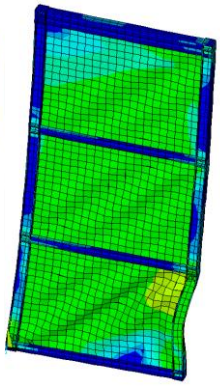
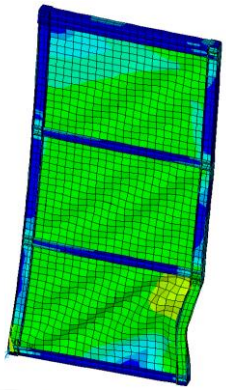
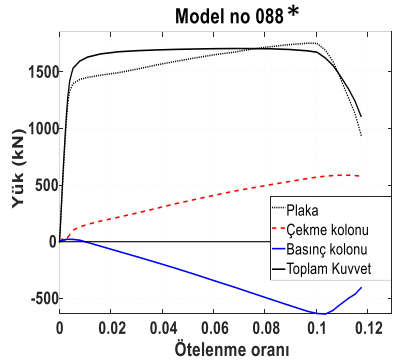
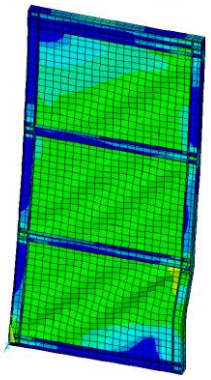
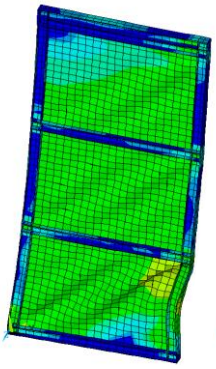
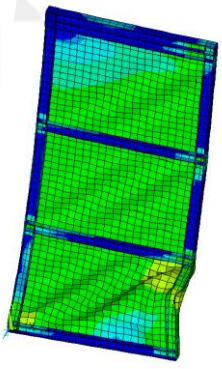
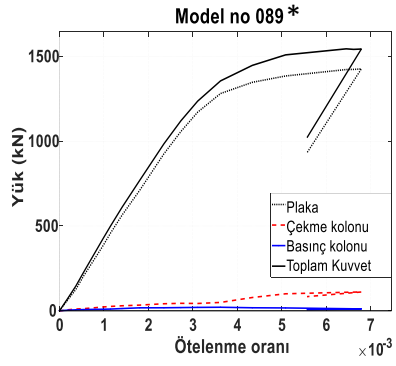
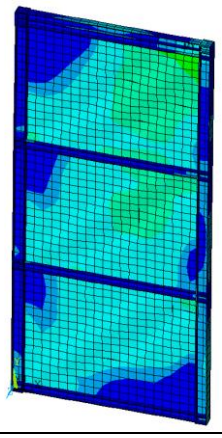
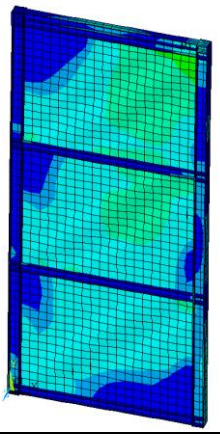
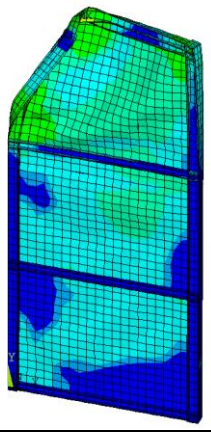
EK-5 (devam)

Yük – Öelenme Oranı Eğrisi	Maksimum Kuvvet	Nihai Ötelenme	Analiz Sonu
			
			
			
			

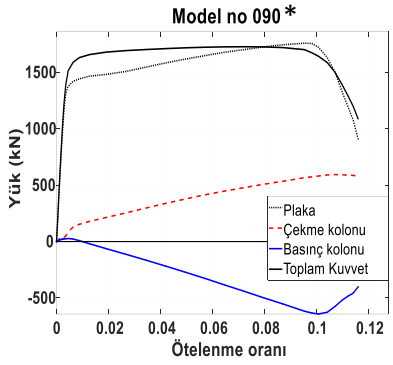
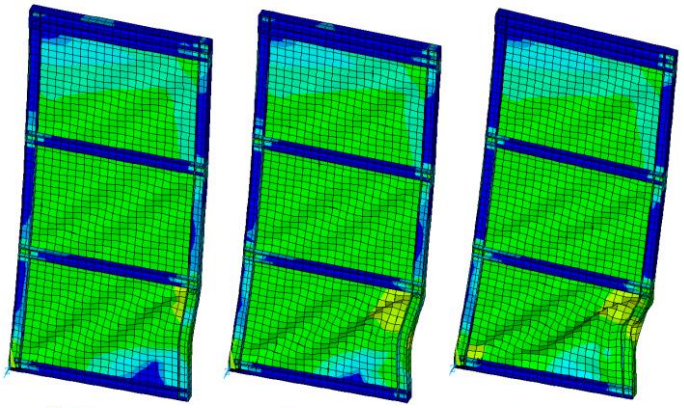
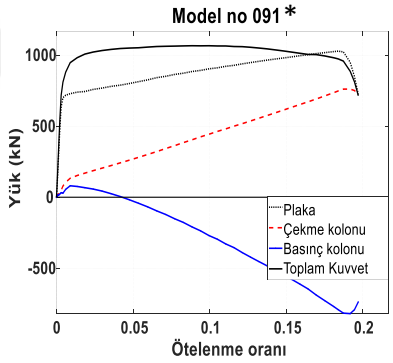
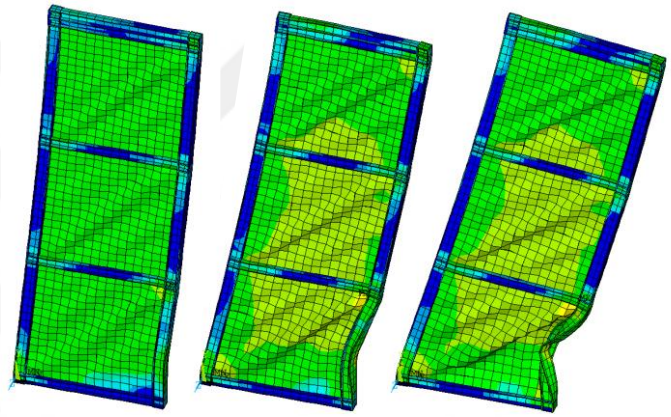
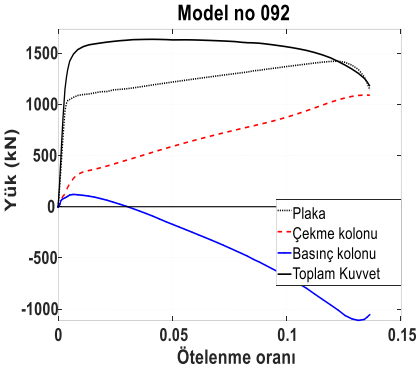
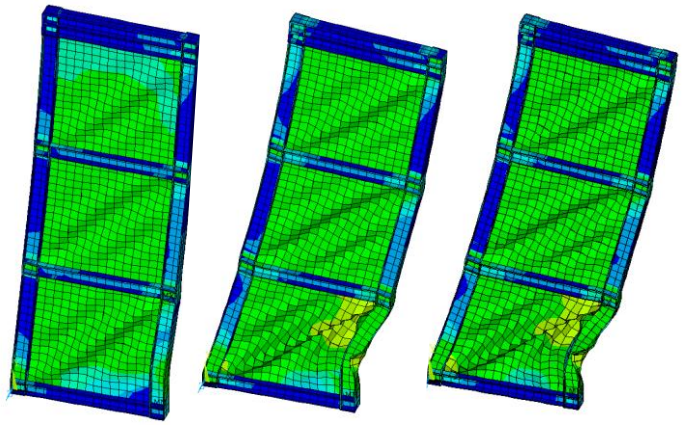
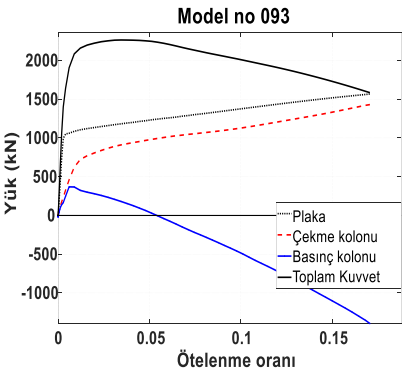
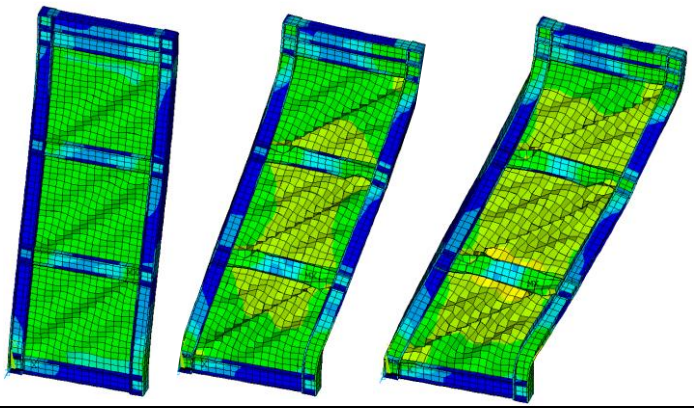
EK-5 (devam)

Yük – Öelenme Oranı Eğrisi	Maksimum Kuvvet	Nihai Ötelenme	Analiz Sonu
			
			
			
			

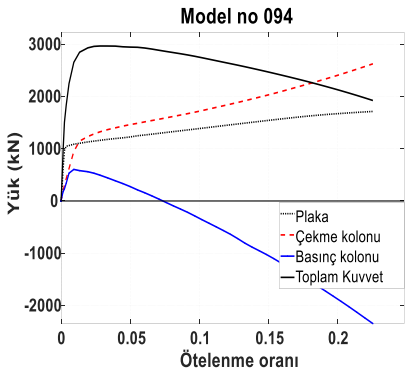
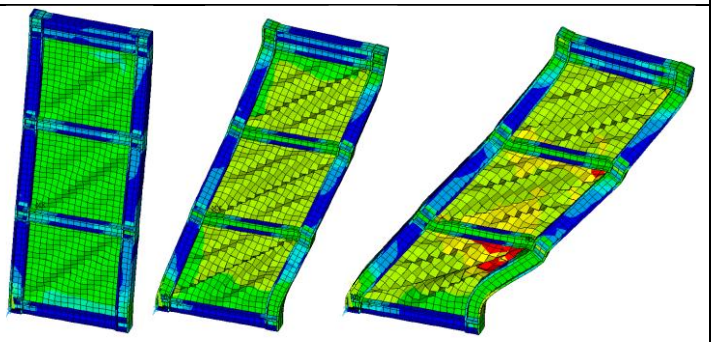
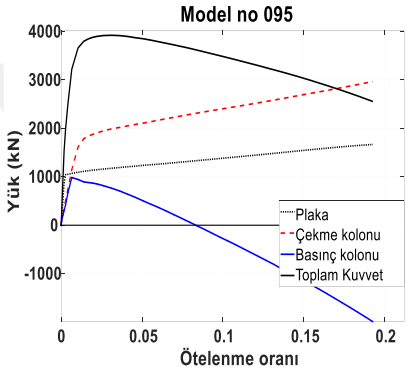
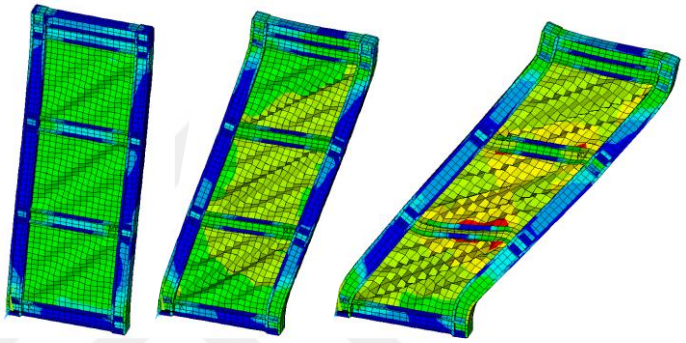
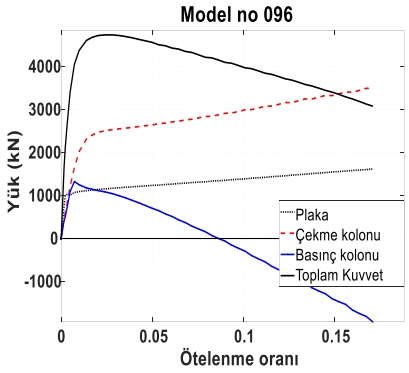
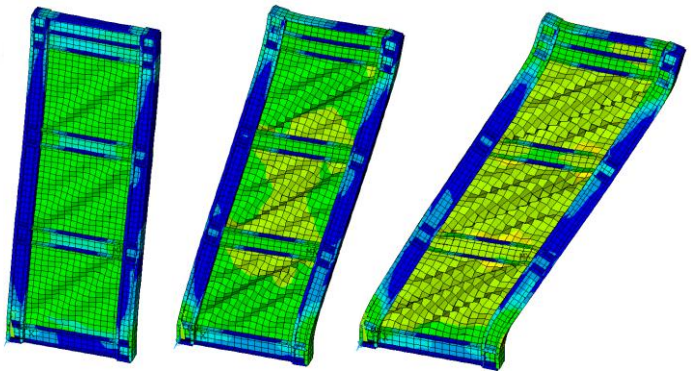
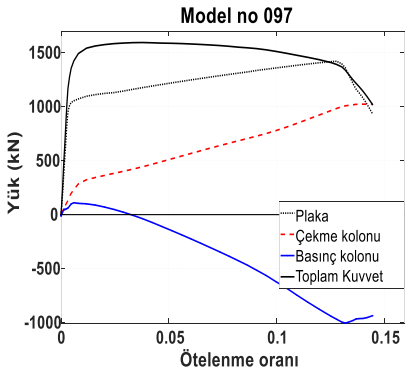
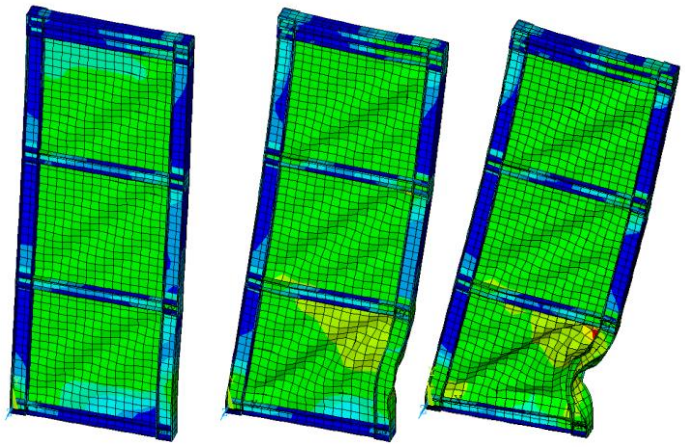
EK-5 (devam)

Yük – Öelenme Oranı Eğrisi	Maksimum Kuvvet	Nihai Ötelenme	Analiz Sonu
			
			
			
			

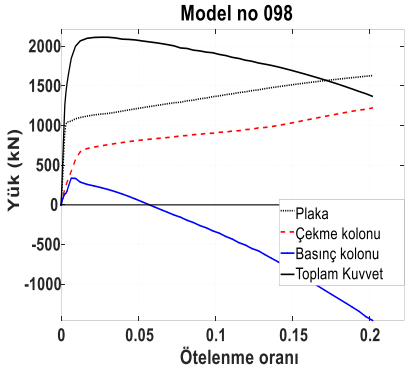
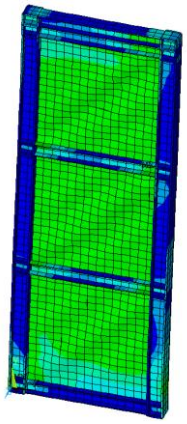
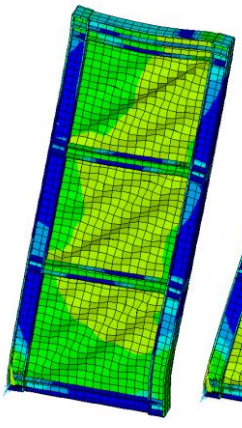
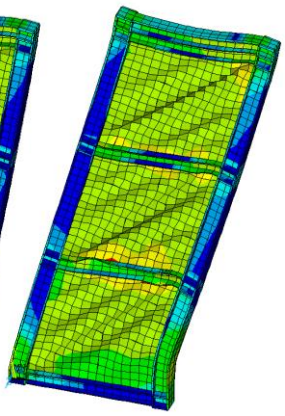
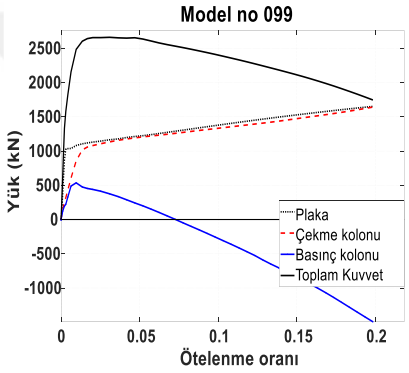
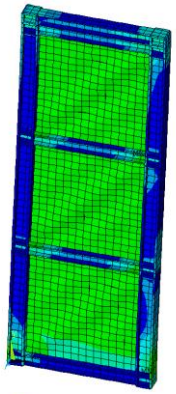
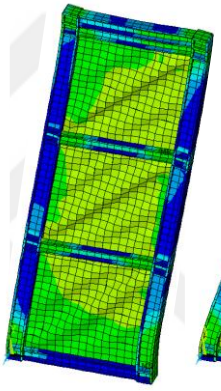
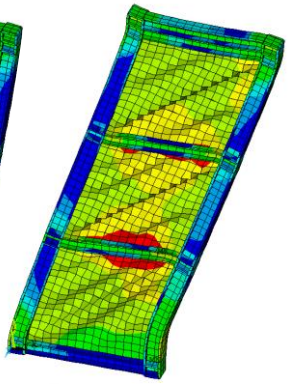
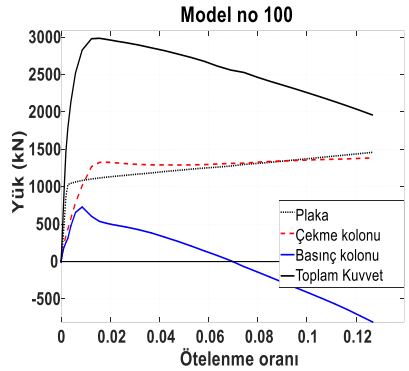
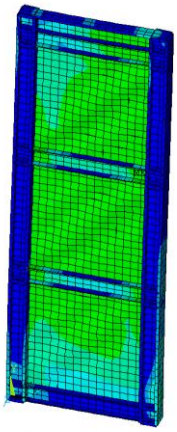
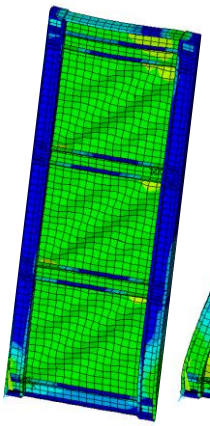
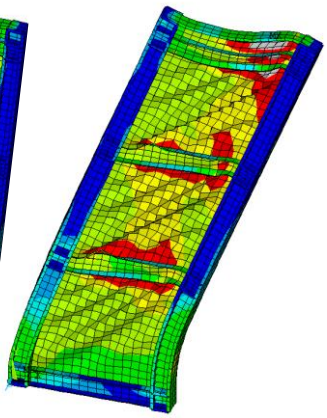
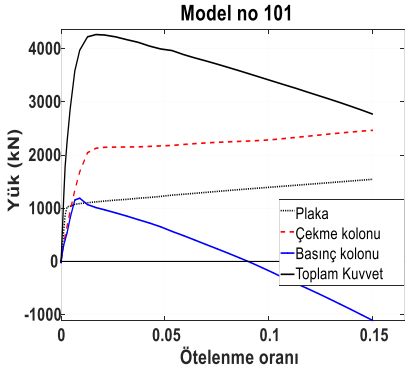
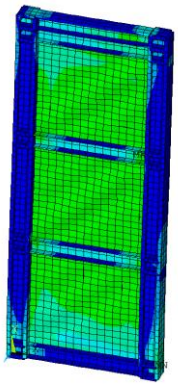
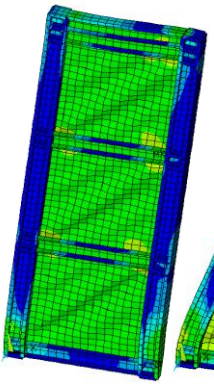
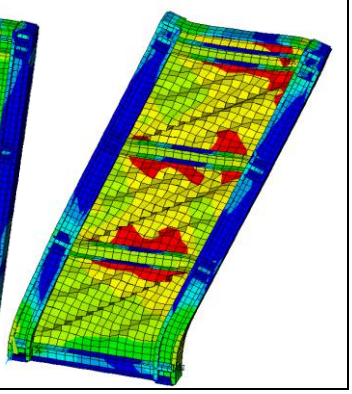
EK-5 (devam)

Yük – Öelenme Oranı Eğrisi	Maksimum Kuvvet	Nihai Ötelenme	Analiz Sonu
			
			
			
			

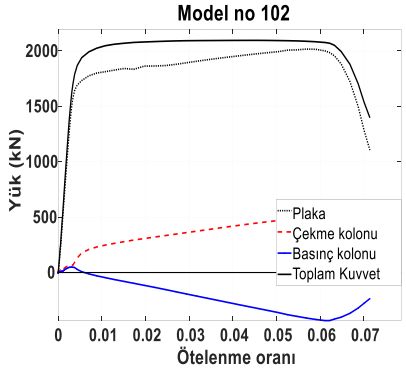
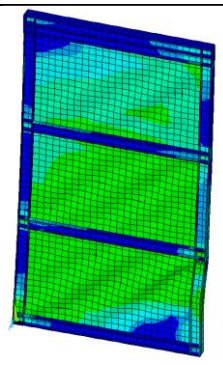
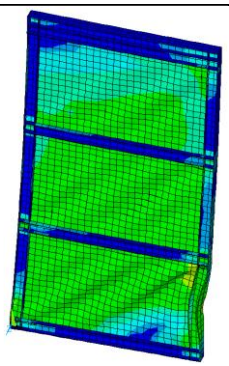
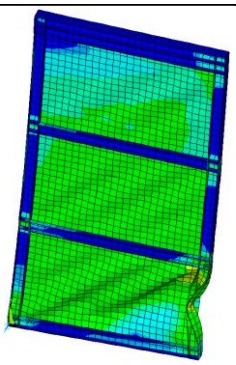
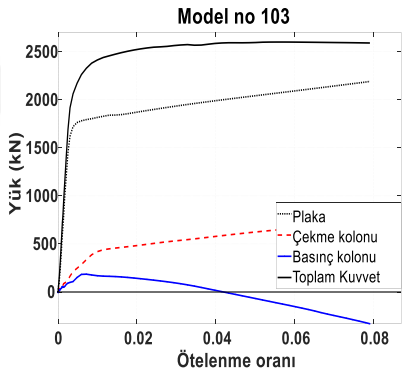
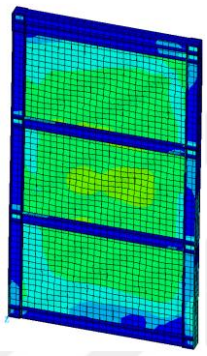
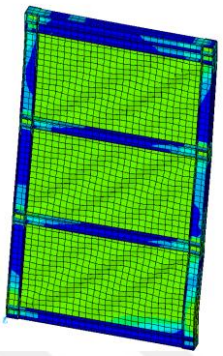
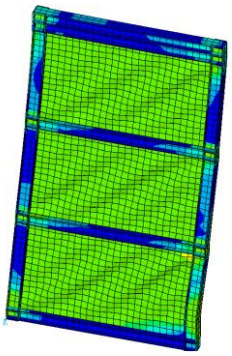
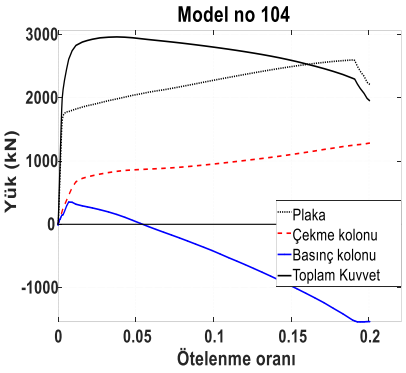
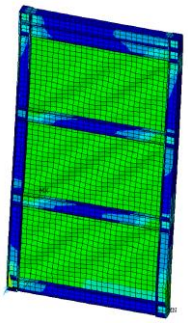
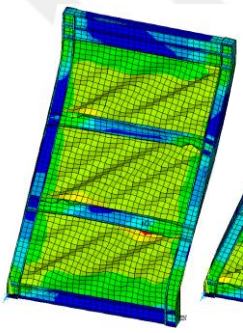
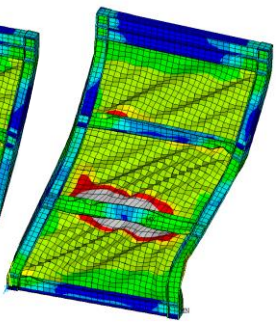
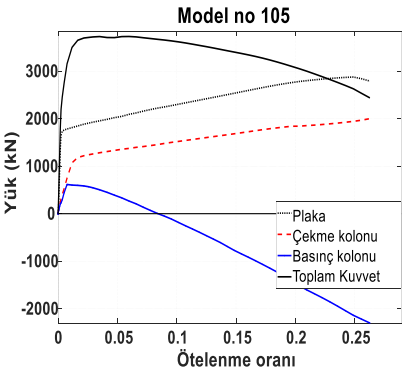
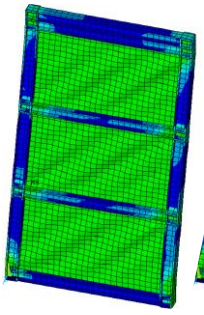
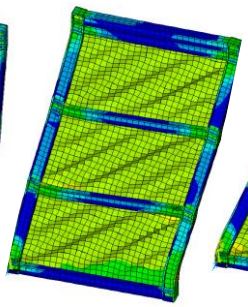
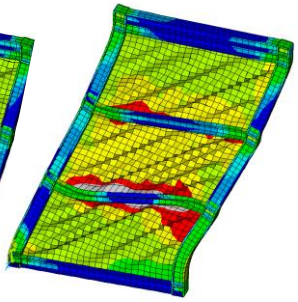
EK-5 (devam)

Yük – Öelenme Oranı Eğrisi	Maksimum Kuvvet	Nihai Ötelenme	Analiz Sonu
			
			
			
			

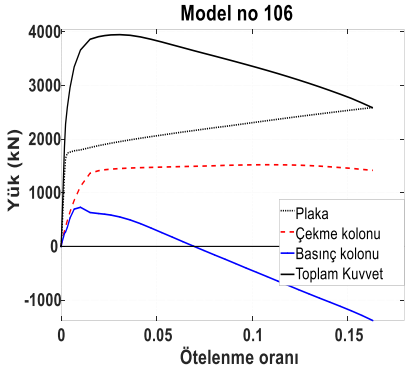
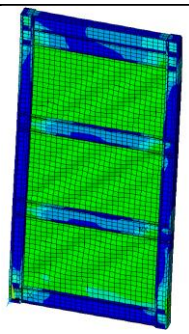
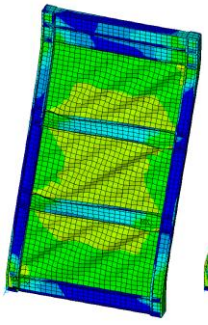
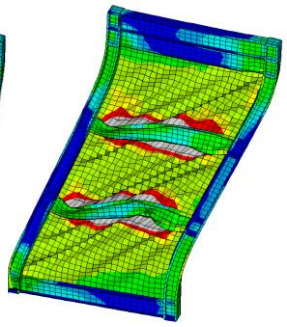
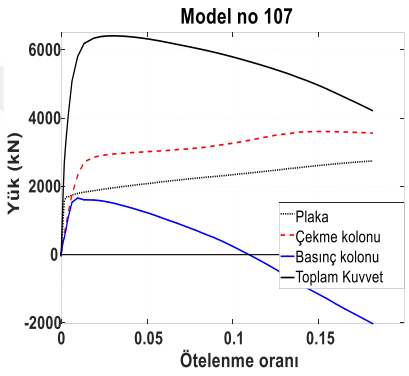
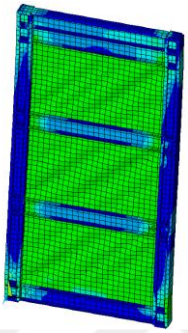
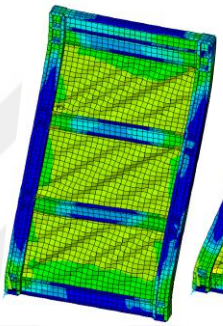
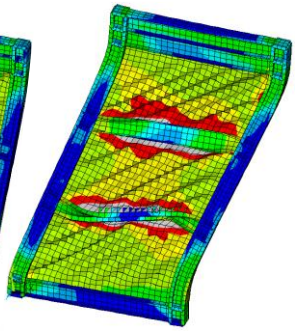
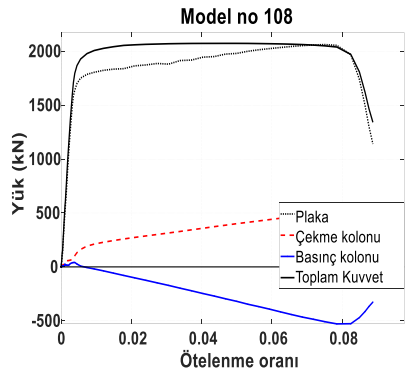
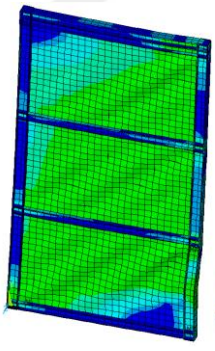
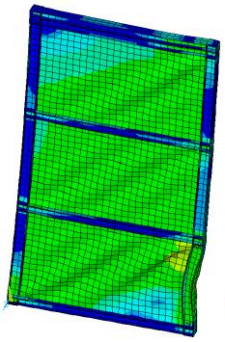
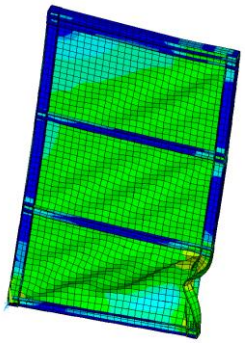
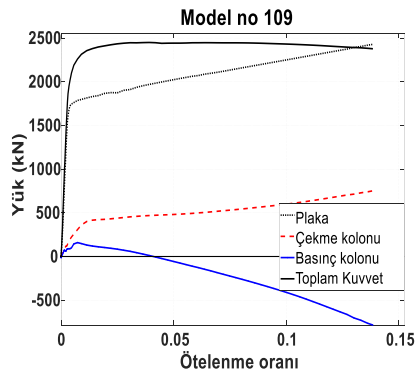
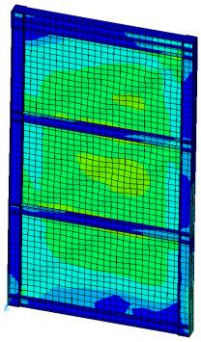
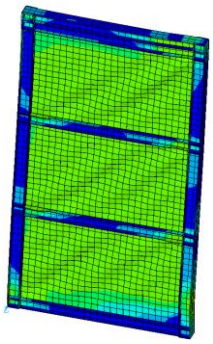
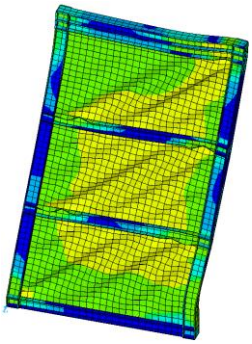
EK-5 (devam)

Yük – Öelenme Oranı Eğrisi	Maksimum Kuvvet	Nihai Ötelenme	Analiz Sonu
			
			
			
			

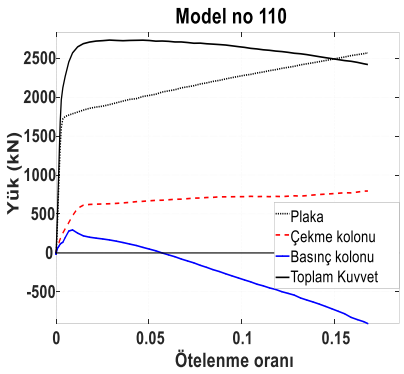
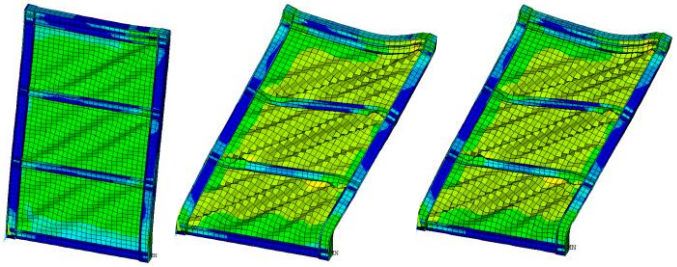
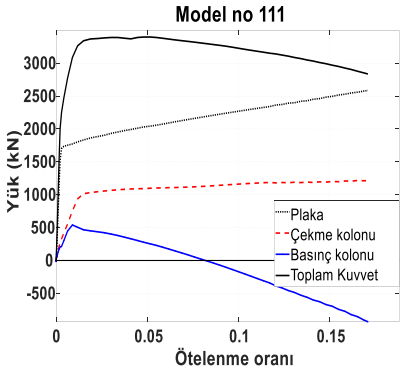
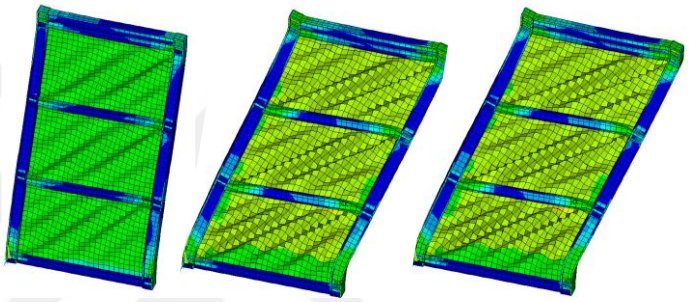
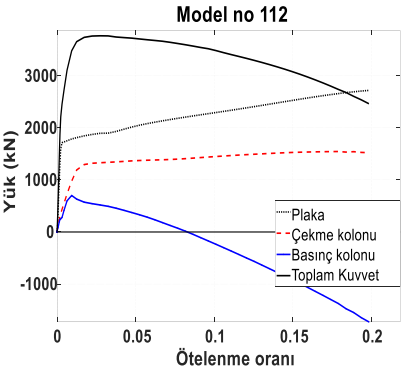
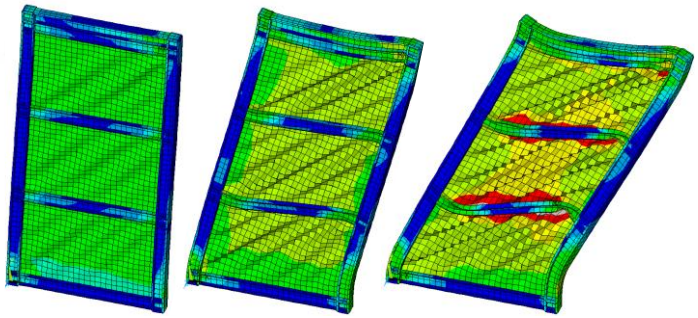
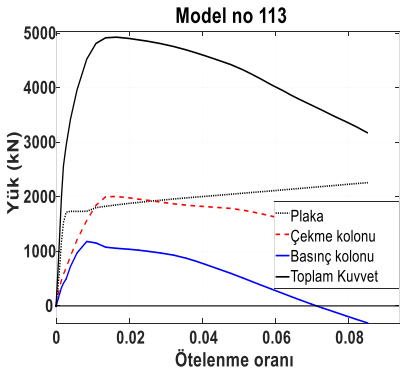
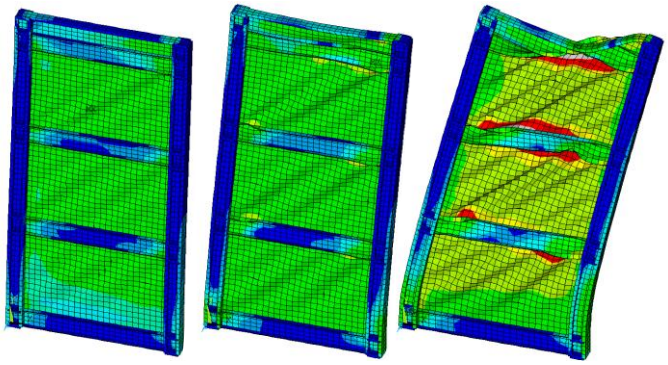
EK-5 (devam)

Yük – Öelenme Oranı Eğrisi	Maksimum Kuvvet	Nihai Ötelenme	Analiz Sonu
			
			
			
			

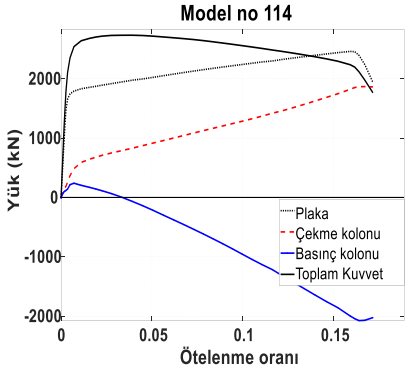
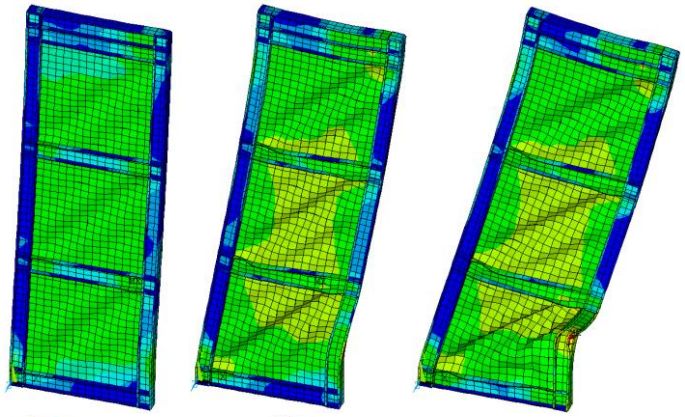
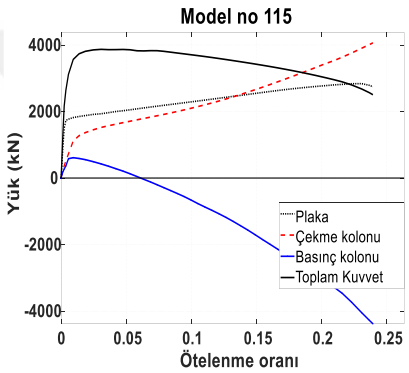
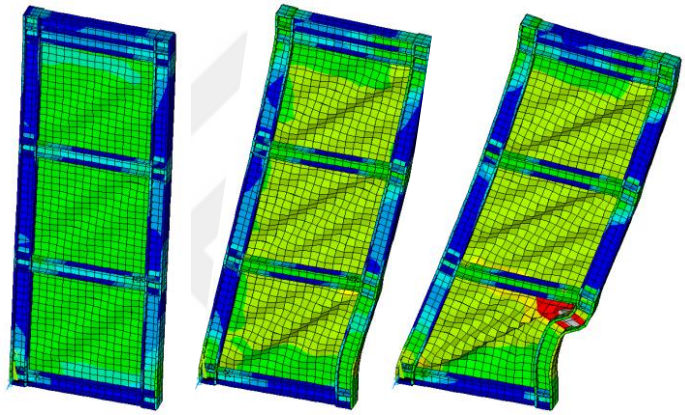
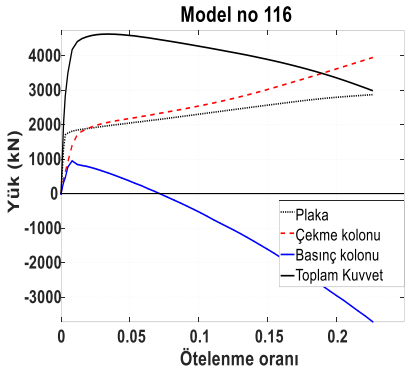
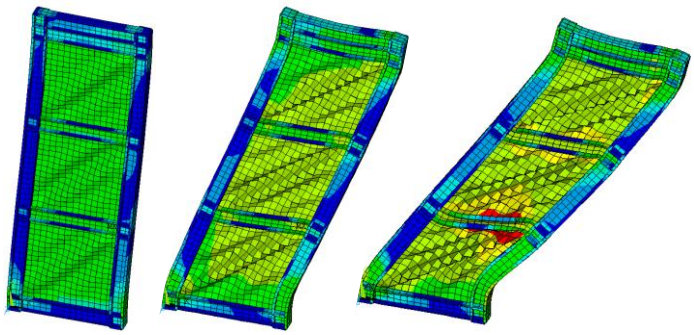
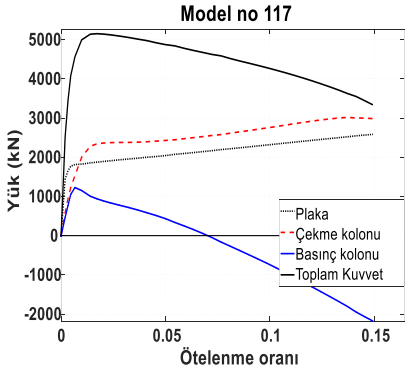
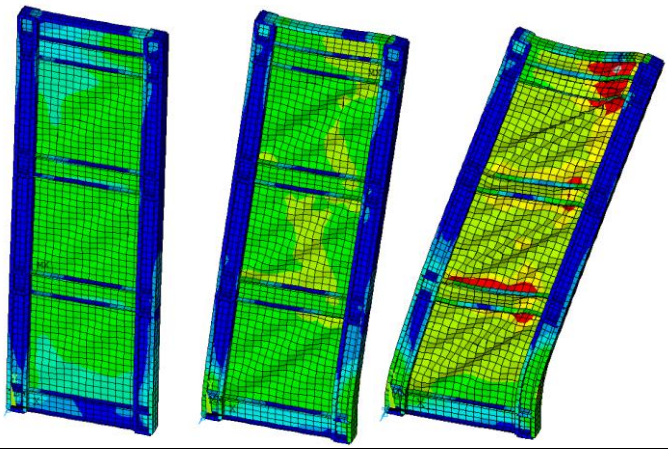
EK-5 (devam)

Yük – Öelenme Oranı Eğrisi	Maksimum Kuvvet	Nihai Ötelenme	Analiz Sonu
			
			
			
			

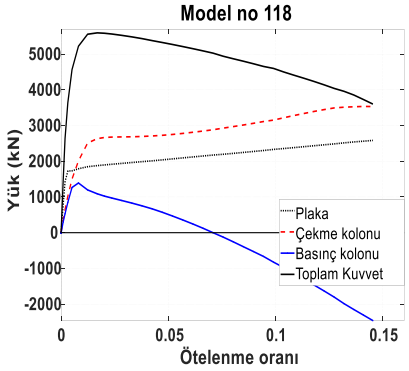
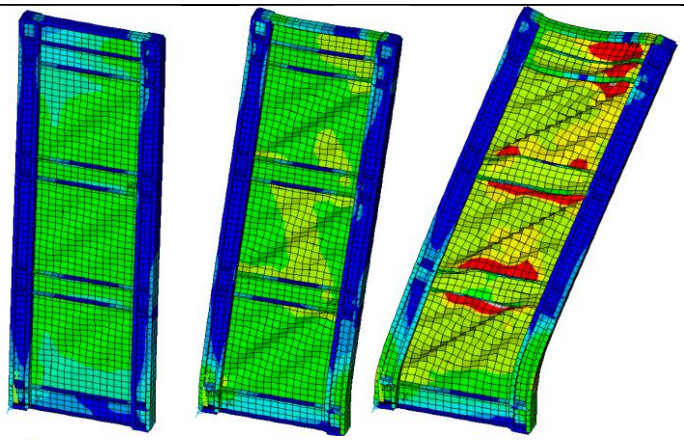
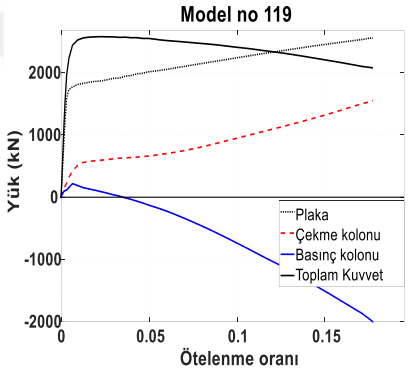
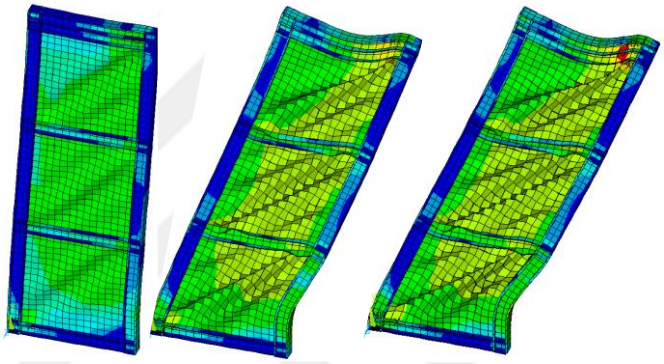
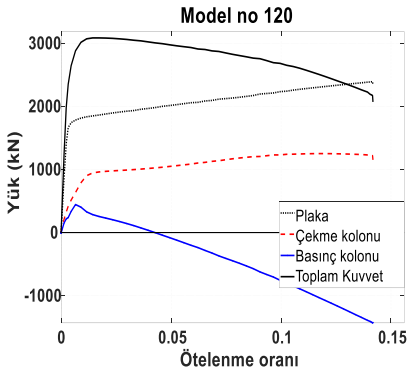
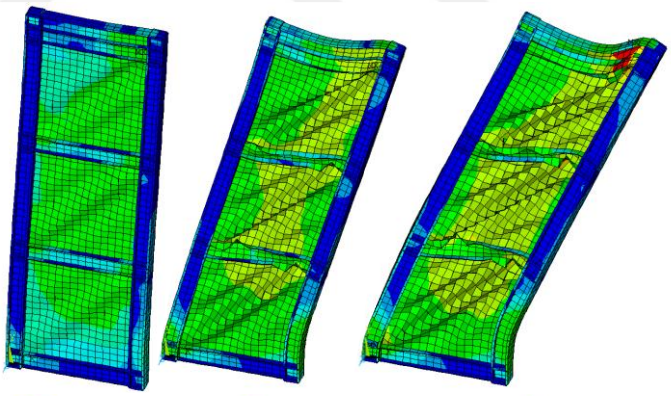
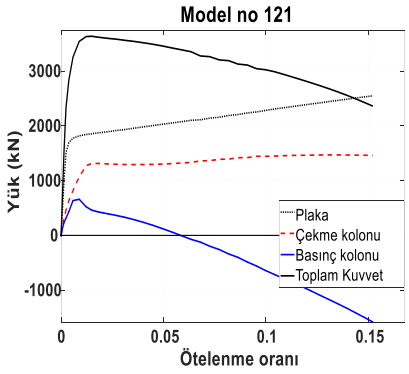
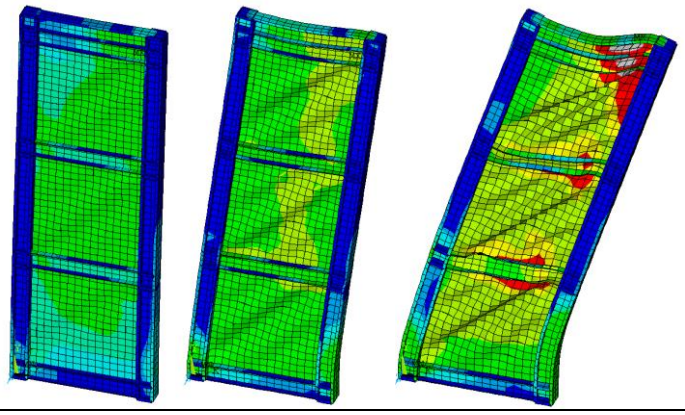
EK-5 (devam)

Yük – Öelenme Oranı Eğrisi	Maksimum Kuvvet	Nihai Ötelenme	Analiz Sonu
			
			
			
			

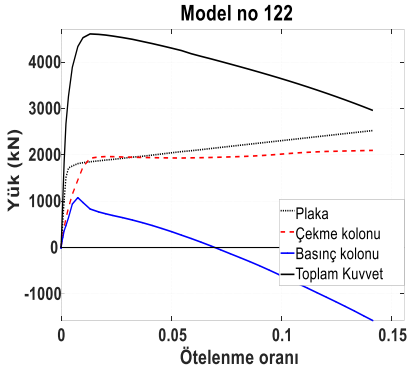
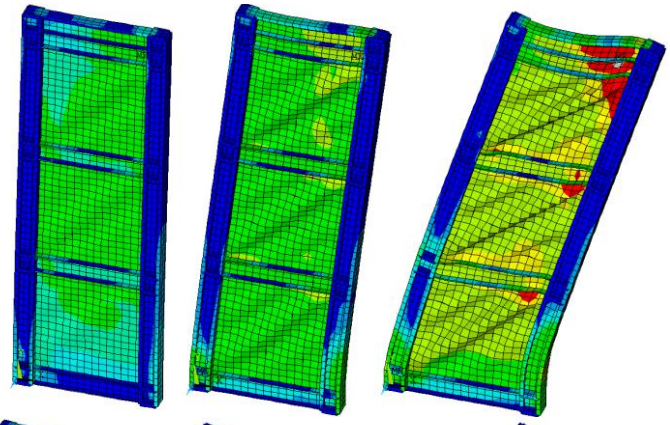
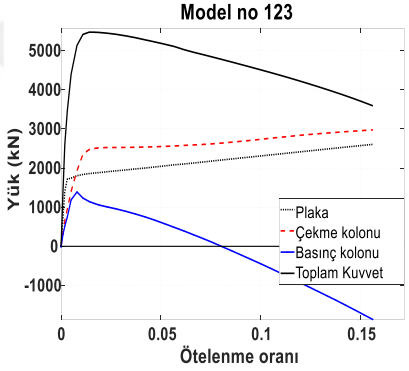
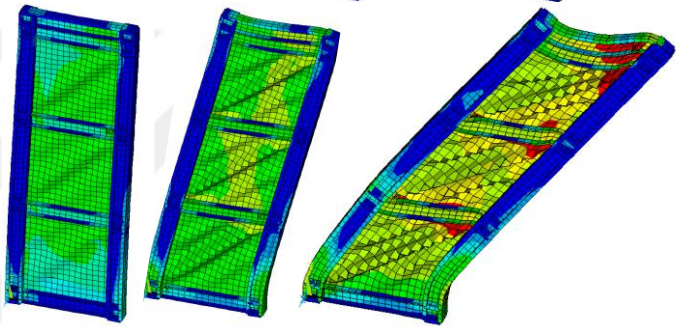
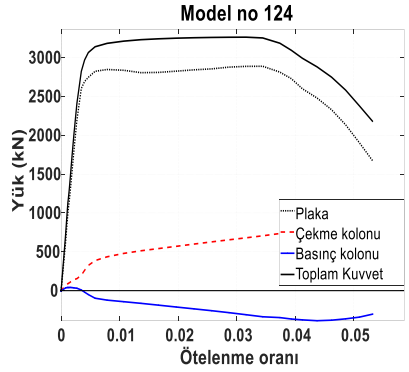
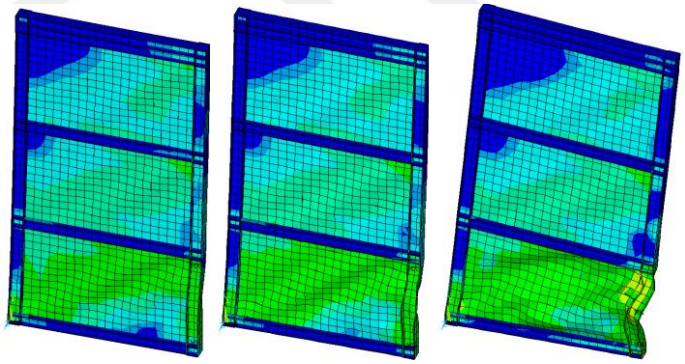
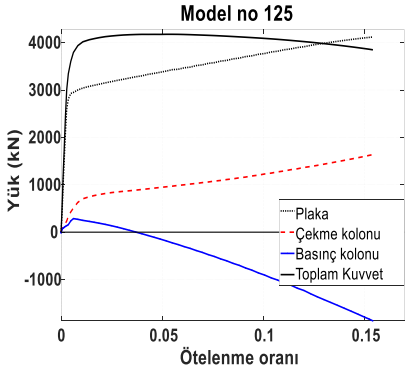
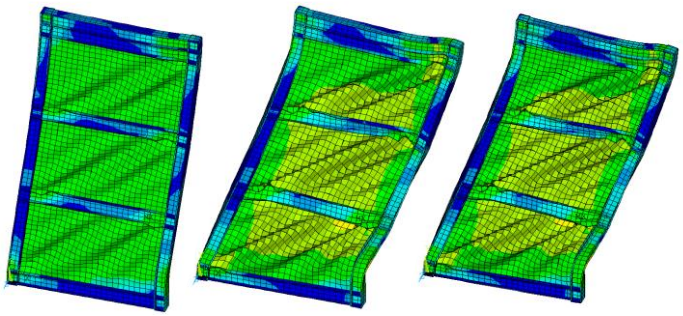
EK-5 (devam)

Yük – Öelenme Oranı Eğrisi	Maksimum Kuvvet	Nihai Ötelenme	Analiz Sonu
			
			
			
			

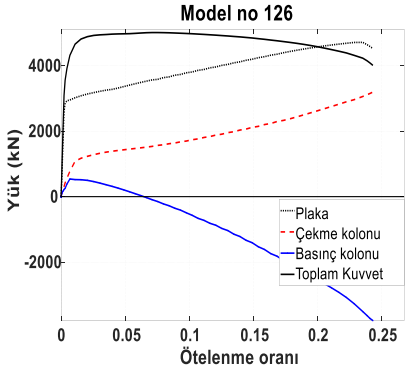
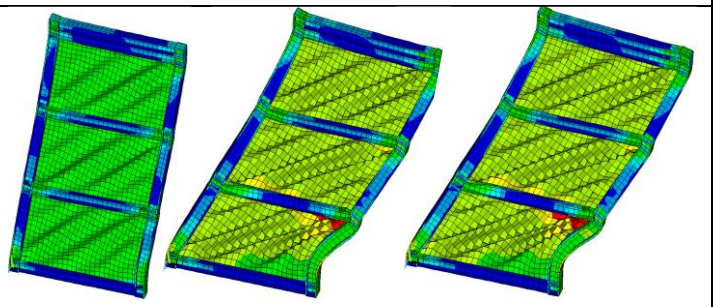
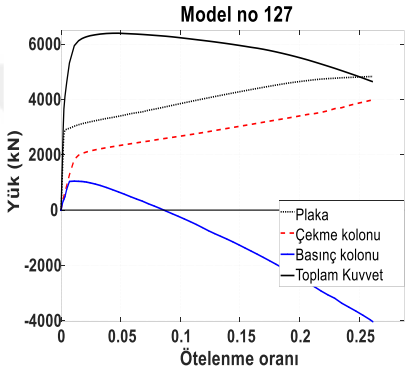
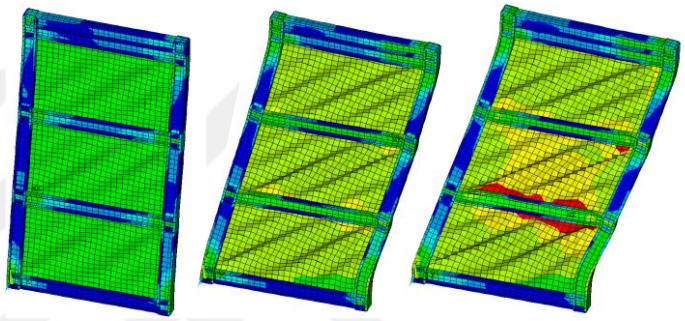
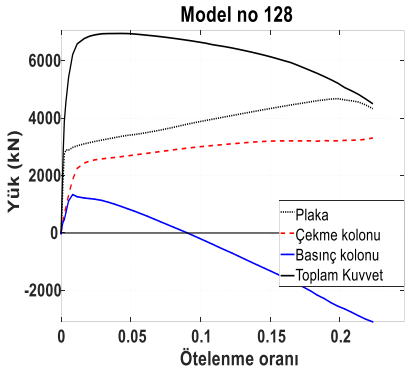
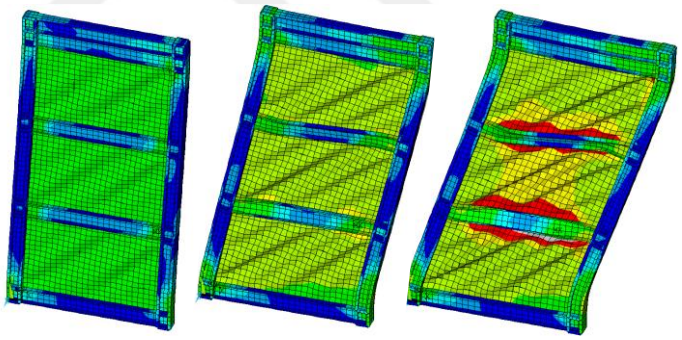
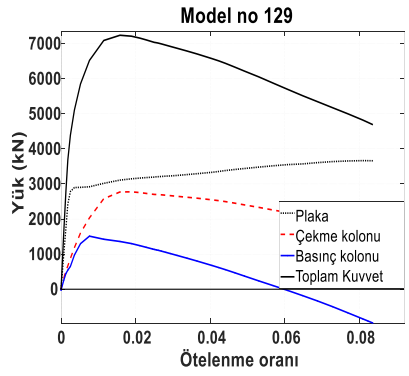
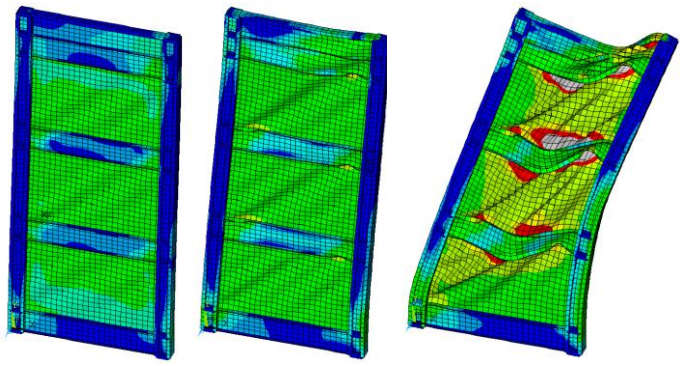
EK-5 (devam)

Yük – Öelenme Oranı Eğrisi	Maksimum Kuvvet	Nihai Ötelenme	Analiz Sonu
			
			
			
			

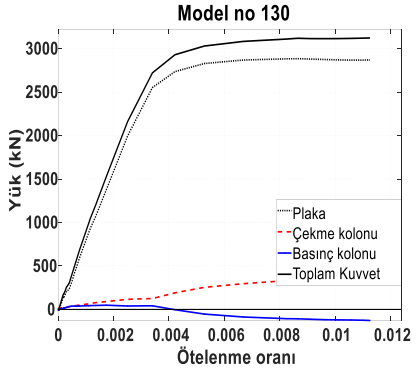
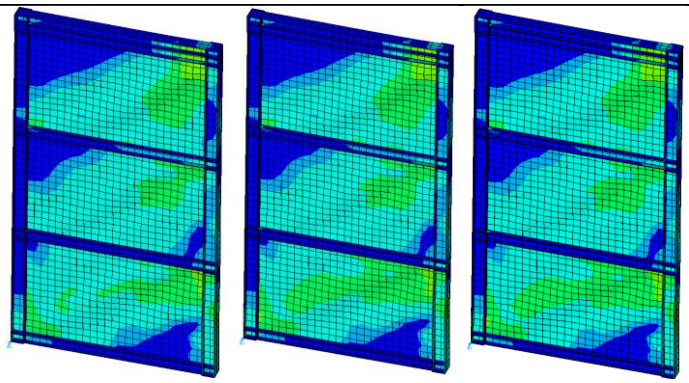
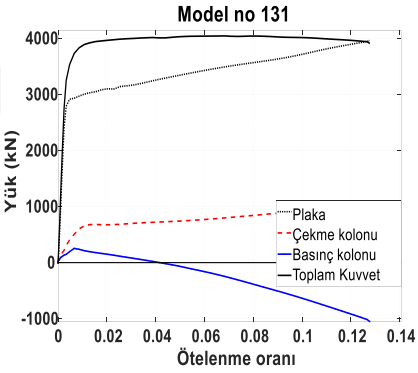
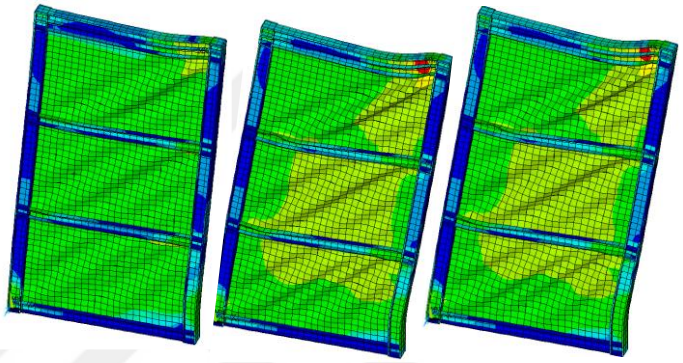
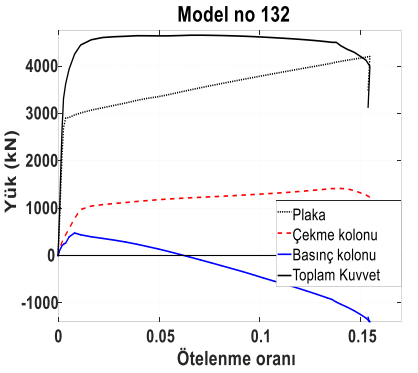
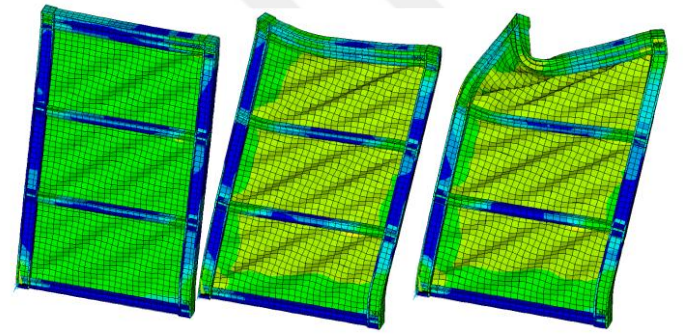
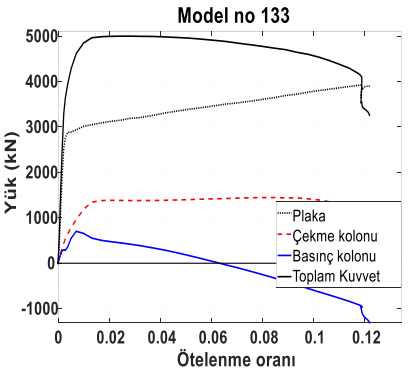
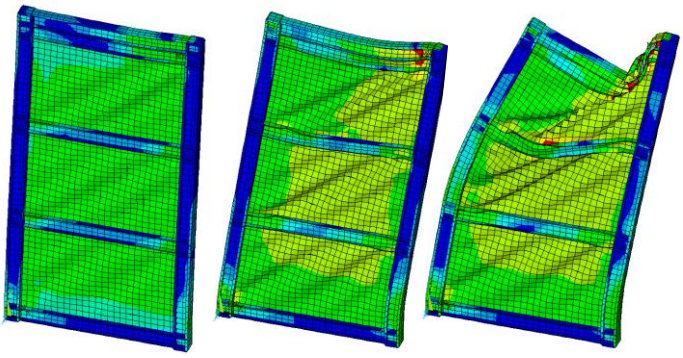
EK-5 (devam)

Yük – Öelenme Oranı Eğrisi	Maksimum Kuvvet	Nihai Ötelenme	Analiz Sonu
			
			
			
			

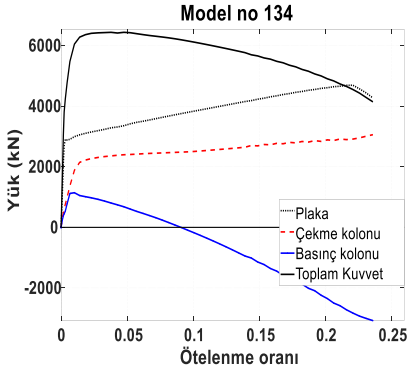
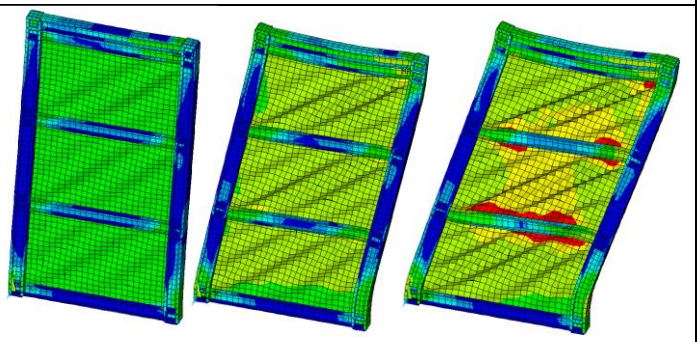
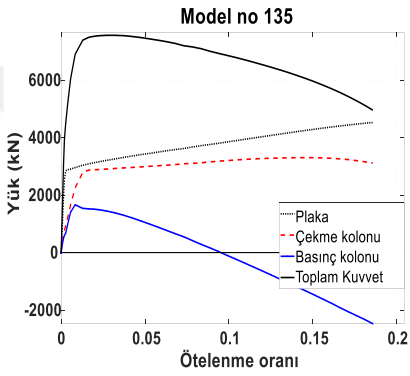
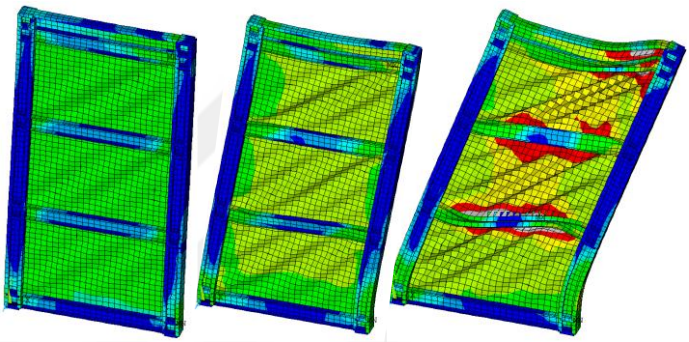
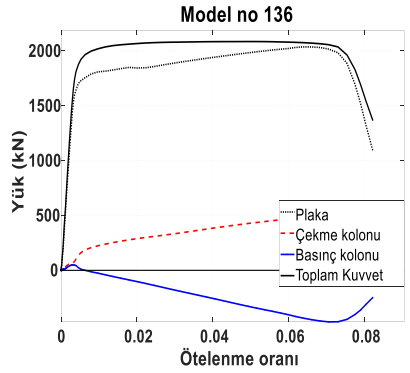
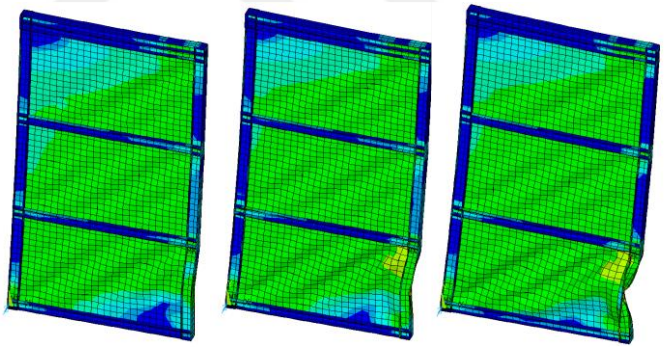
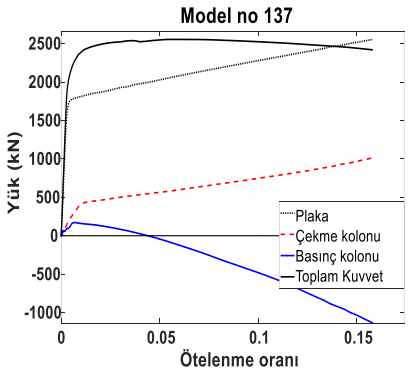
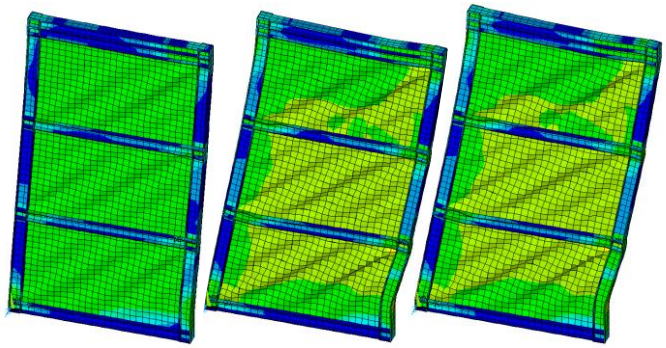
EK-5 (devam)

Yük – Öelenme Oranı Eğrisi	Maksimum Kuvvet	Nihai Ötelenme	Analiz Sonu
			
			
			
			

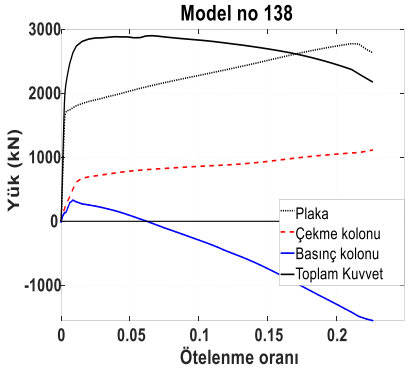
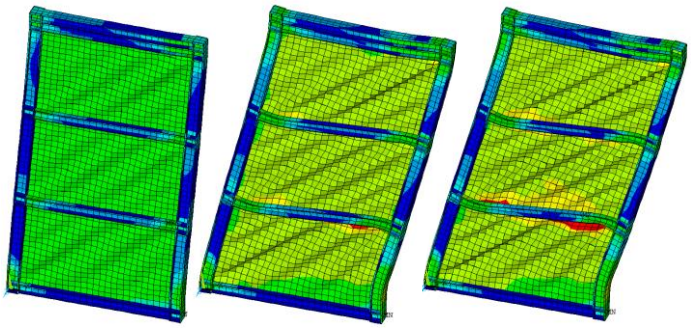
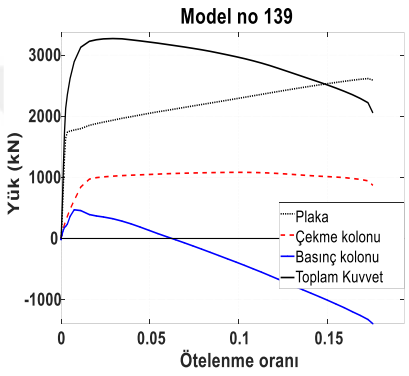
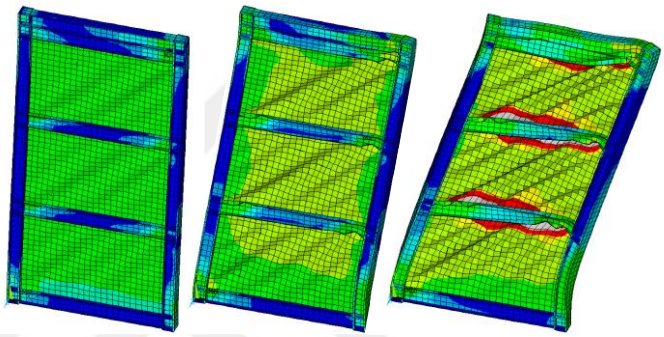
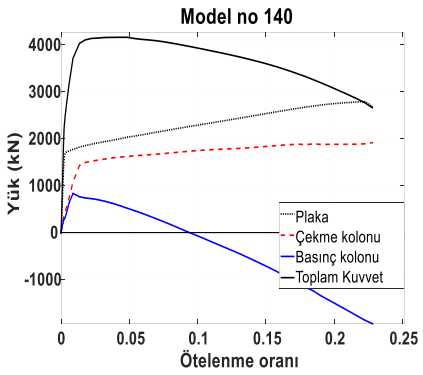
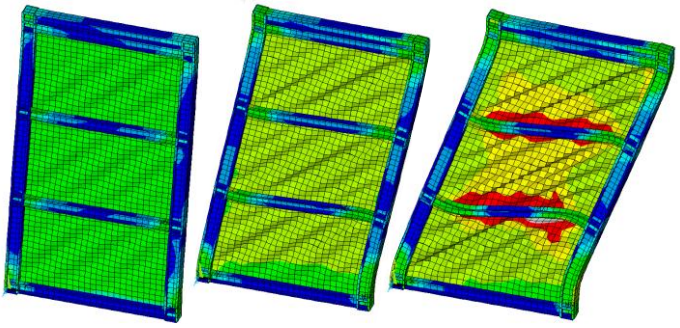
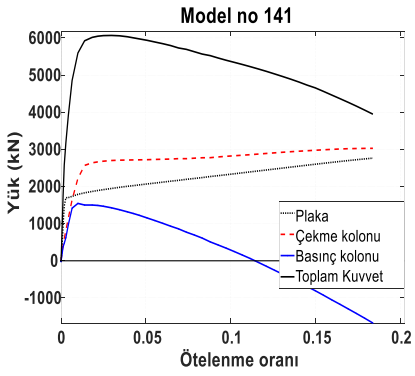
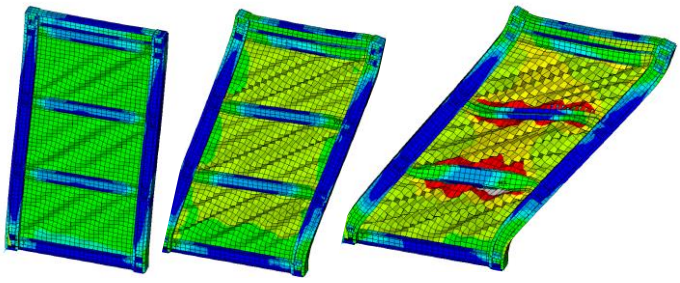
EK-5 (devam)

Yük – Öelenme Oranı Eğrisi	Maksimum Kuvvet	Nihai Ötelenme	Analiz Sonu
			
			
			
			

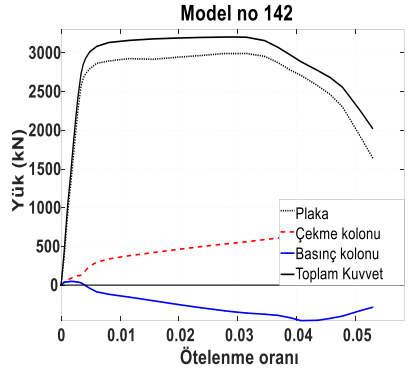
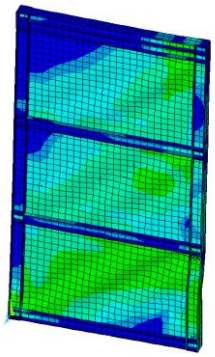
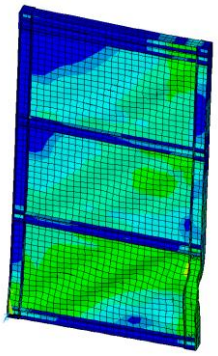
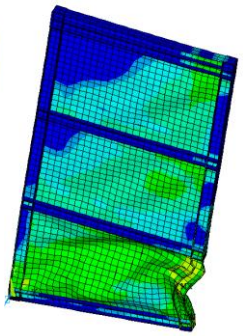
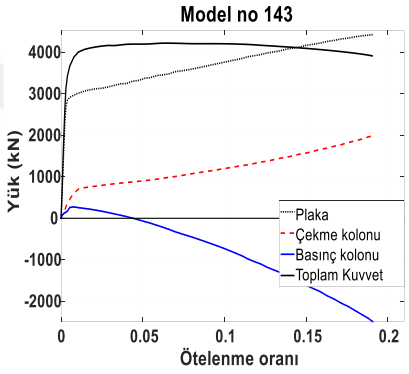
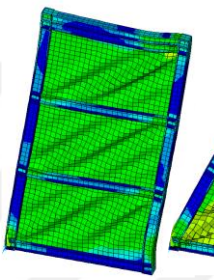
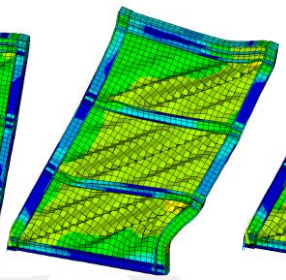
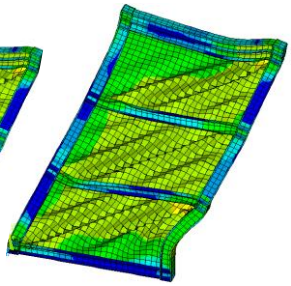
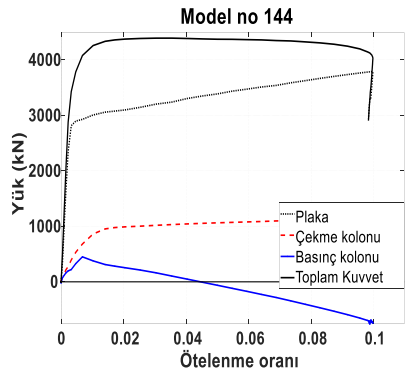
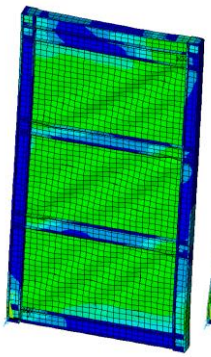
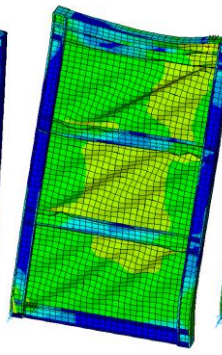
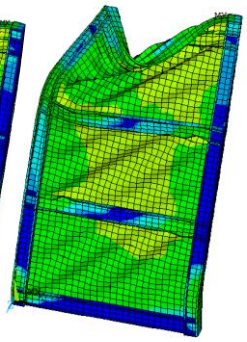
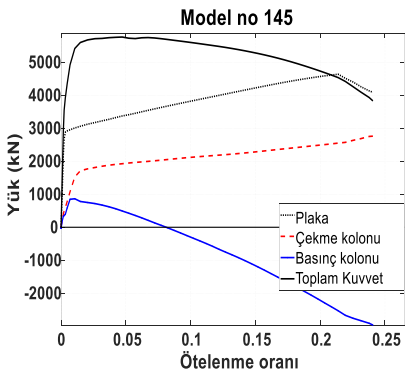
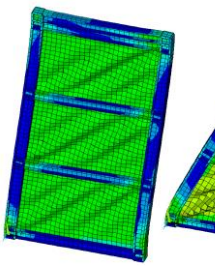
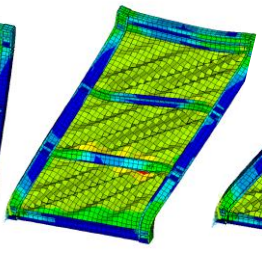
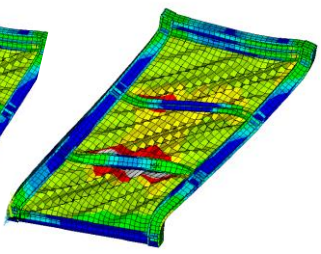
EK-5 (devam)

Yük – Öelenme Oranı Eğrisi	Maksimum Kuvvet	Nihai Ötelenme	Analiz Sonu
			
			
			
			

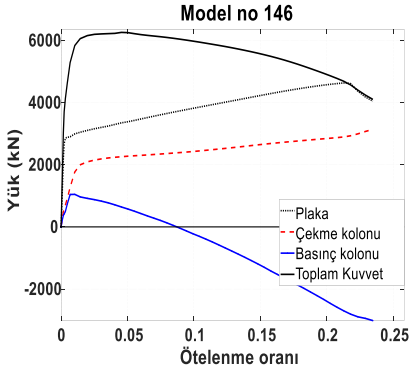
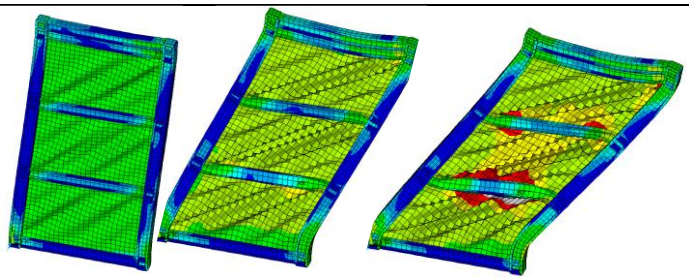
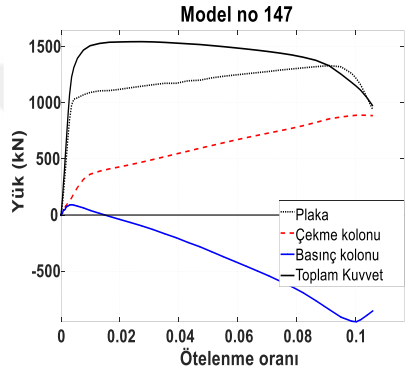
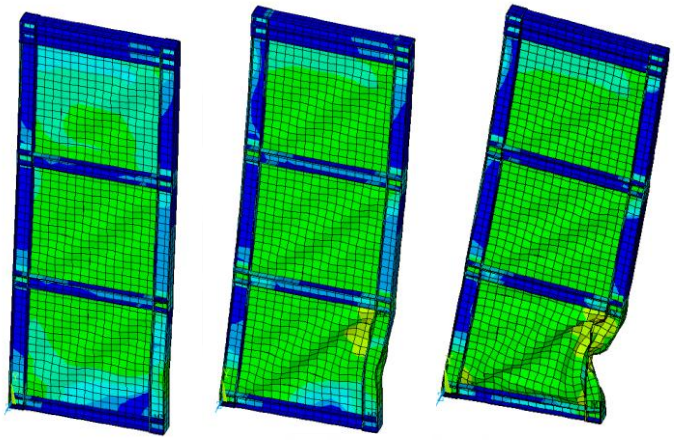
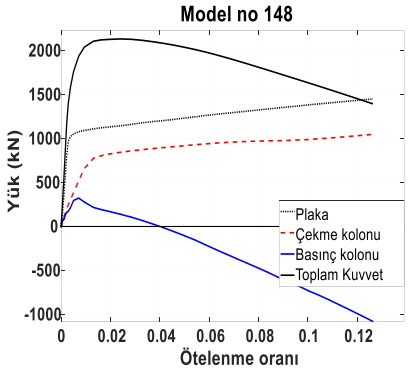
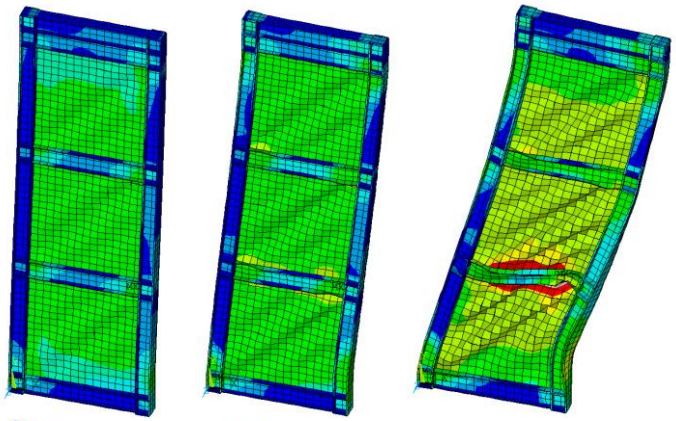
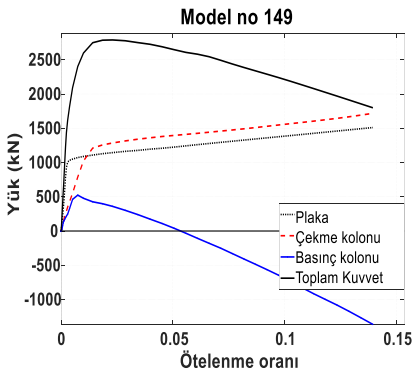
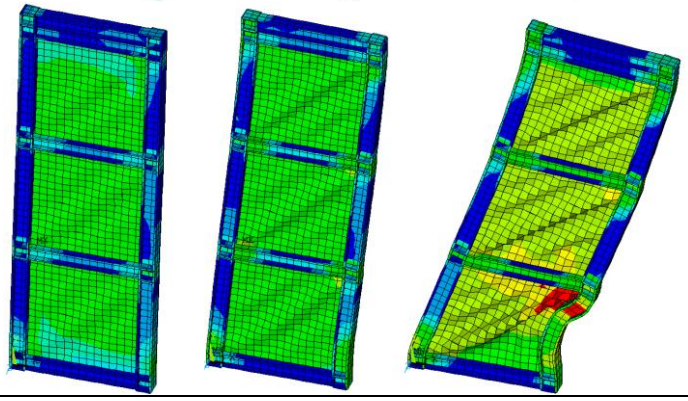
EK-5 (devam)

Yük – Öelenme Oranı Eğrisi	Maksimum Kuvvet	Nihai Ötelenme	Analiz Sonu
			
			
			
			

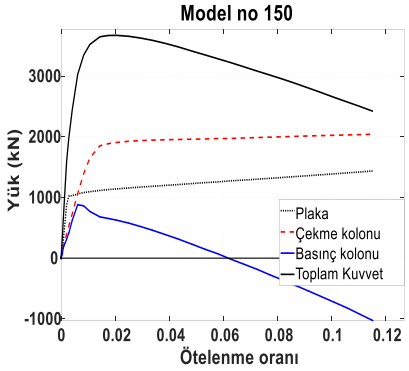
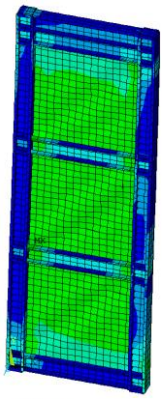
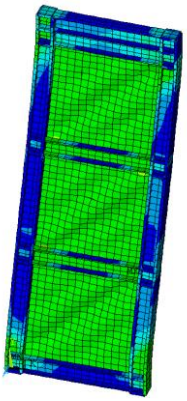
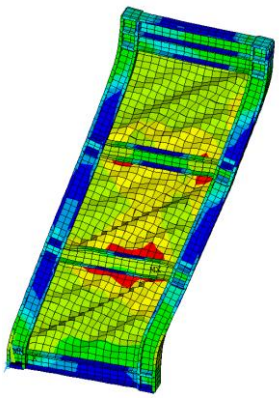
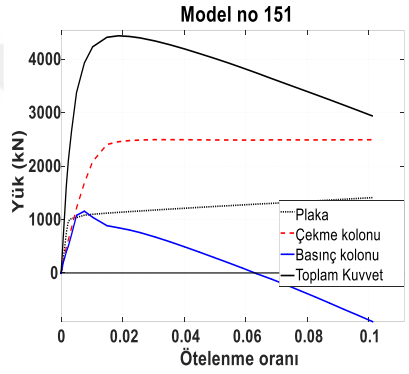
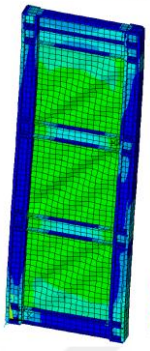
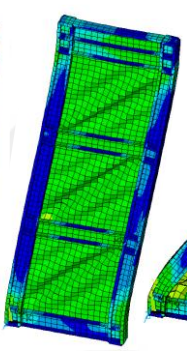
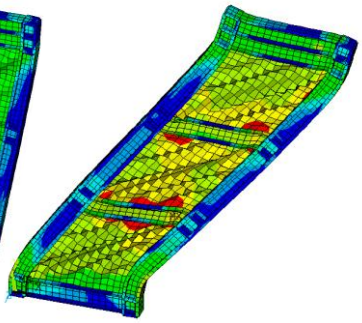
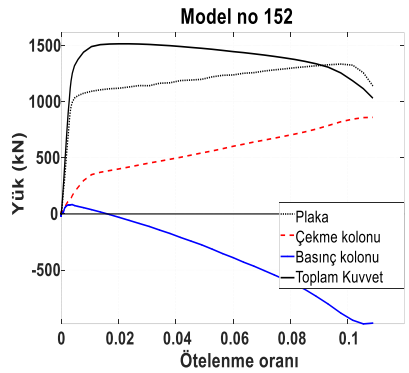
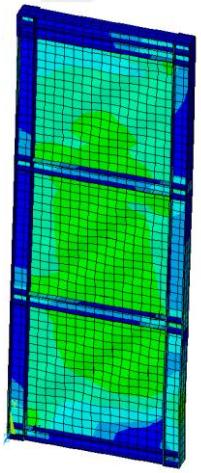
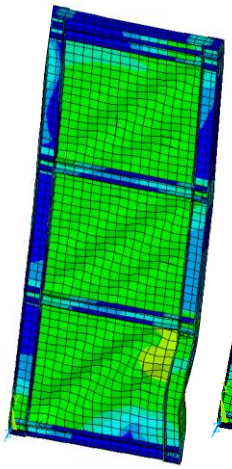
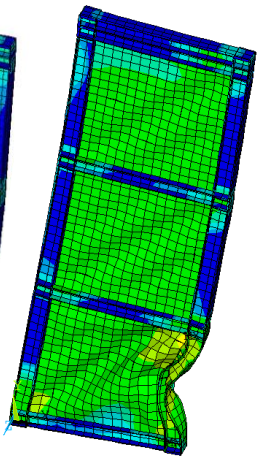
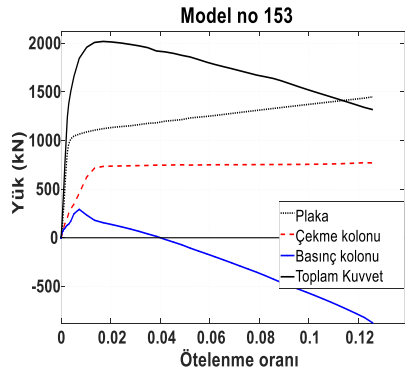
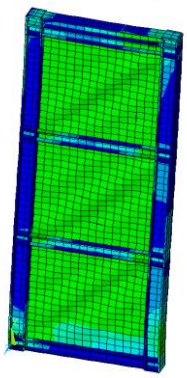
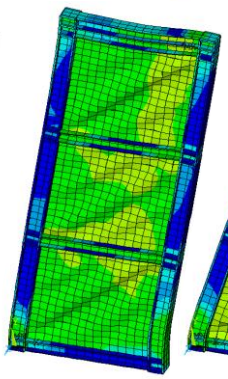
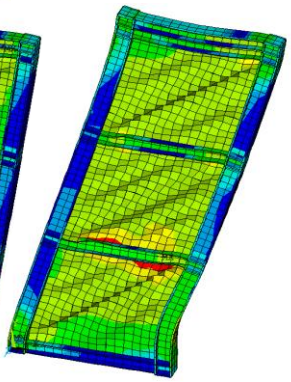
EK-5 (devam)

Yük – Öelenme Oranı Eğrisi	Maksimum Kuvvet	Nihai Ötelenme	Analiz Sonu
			
			
			
			

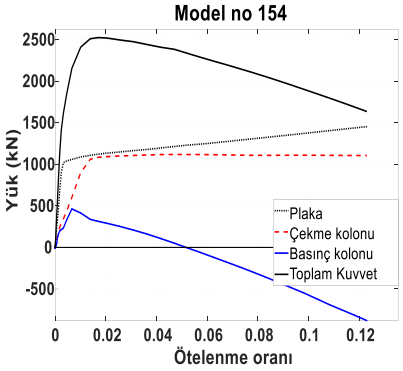
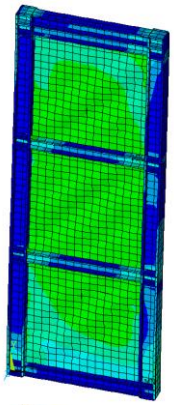
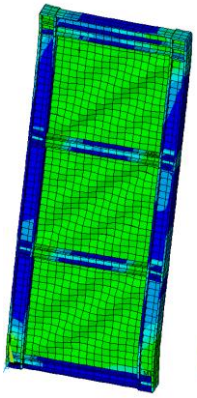
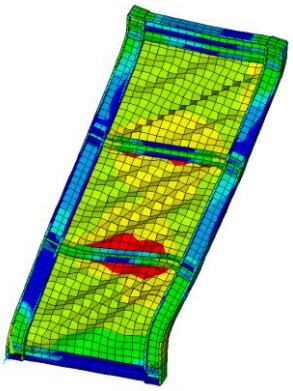
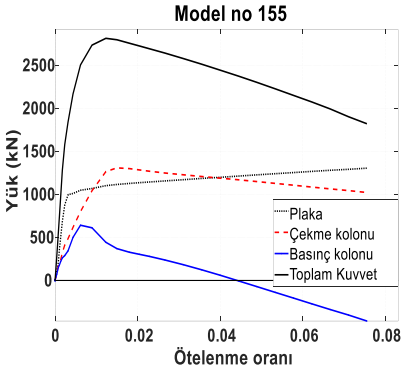
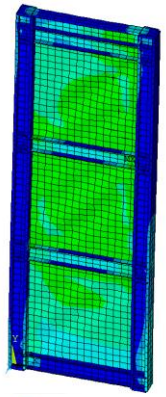
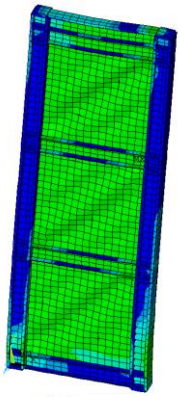
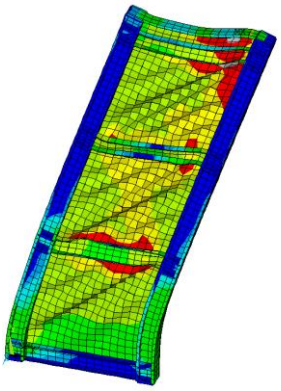
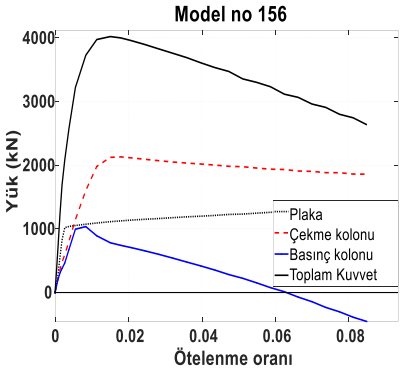
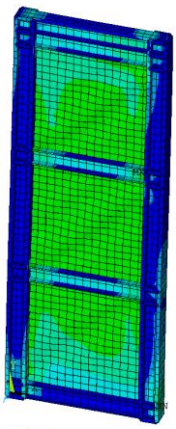
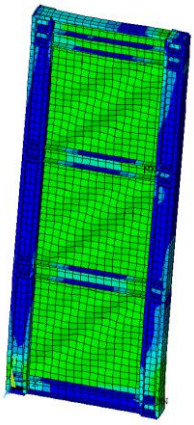
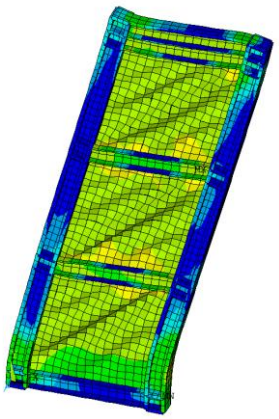
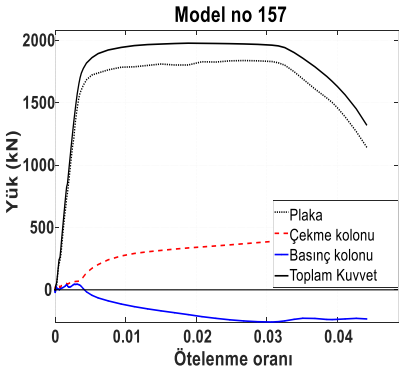
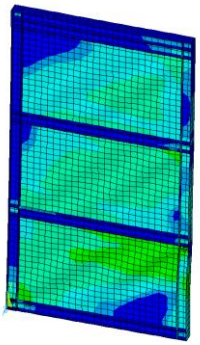
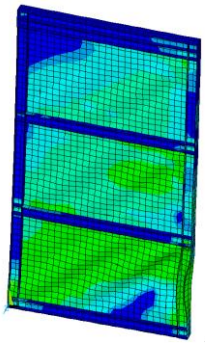
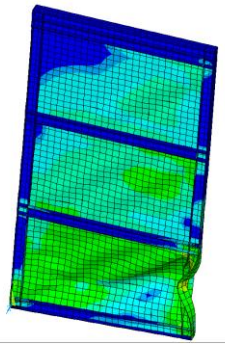
EK-5 (devam)

Yük – Öelenme Oranı Eğrisi	Maksimum Kuvvet	Nihai Ötelenme	Analiz Sonu
			
			
			
			

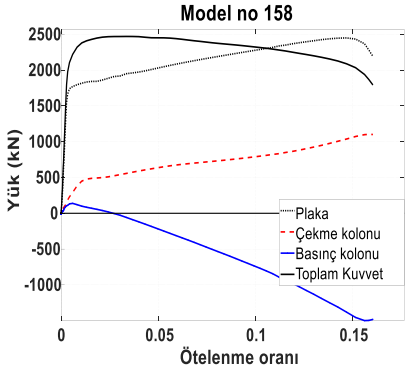
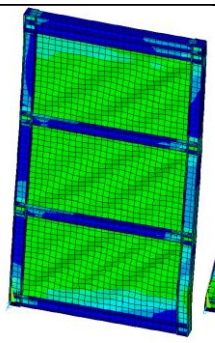
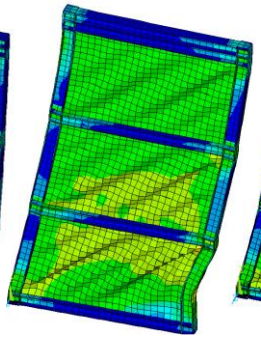
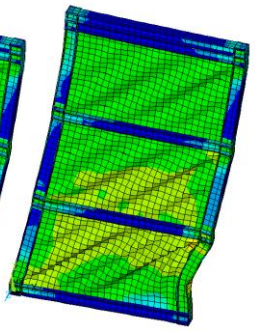
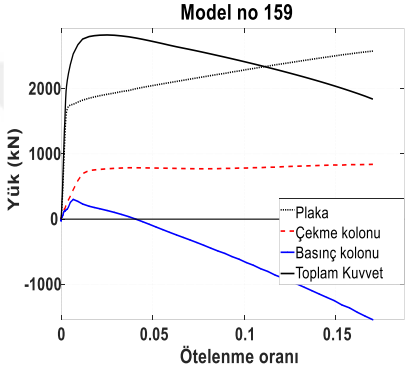
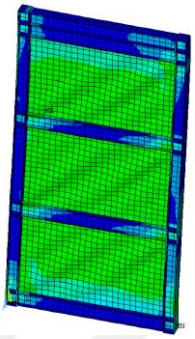
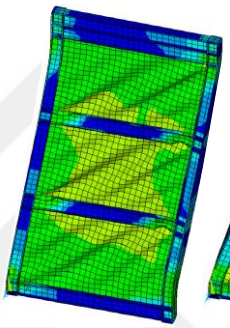
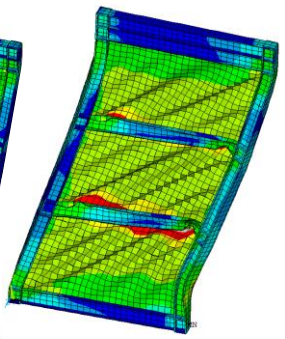
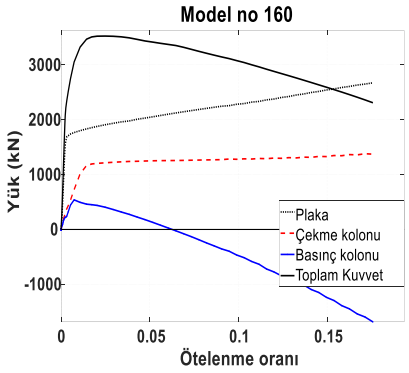
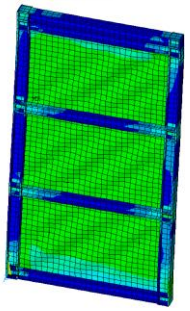
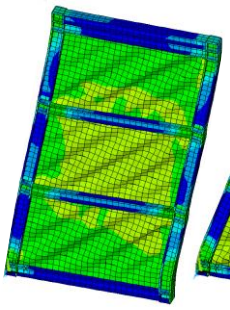
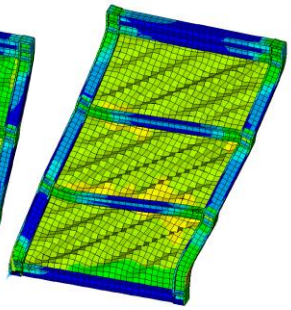
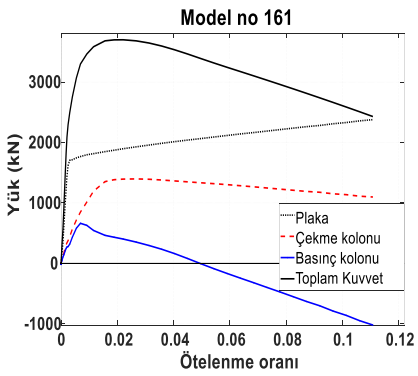
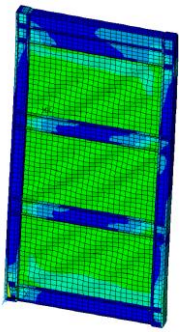
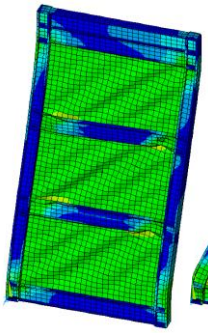
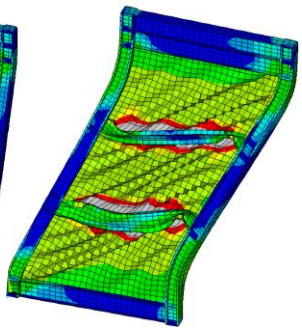
EK-5 (devam)

Yük – Öelenme Oranı Eğrisi	Maksimum Kuvvet	Nihai Ötelenme	Analiz Sonu
			
			
			
			

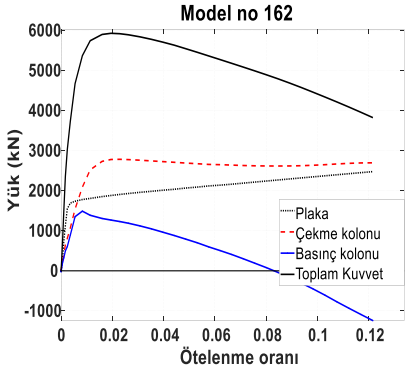
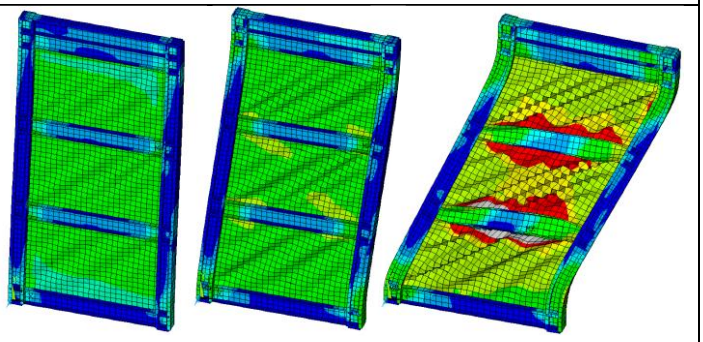
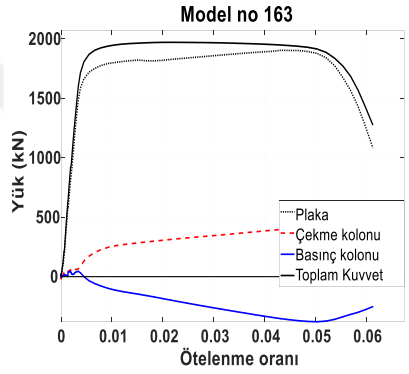
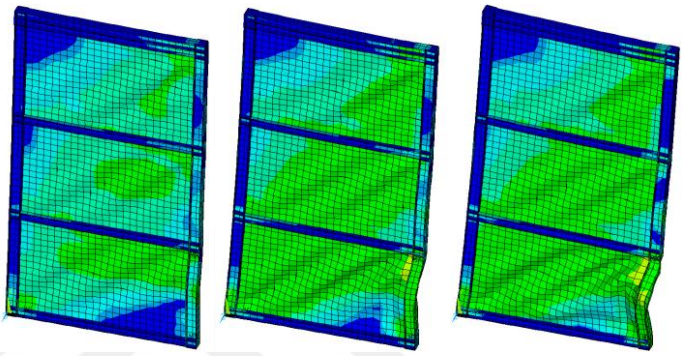
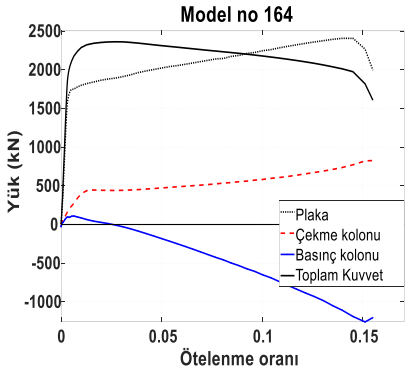
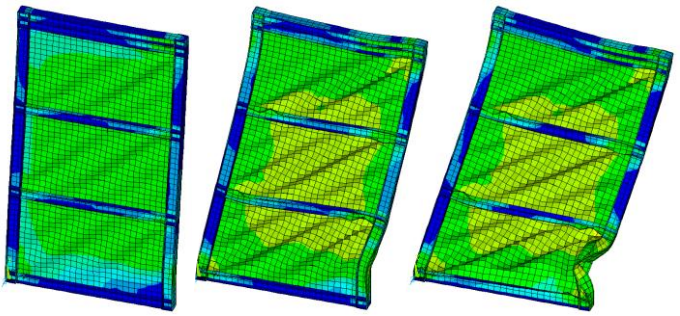
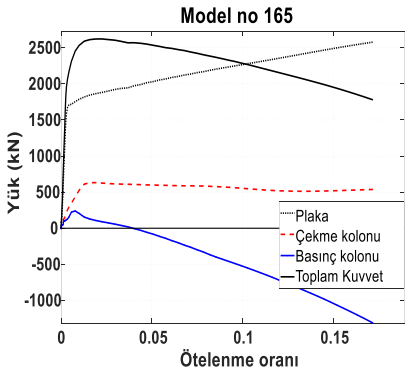
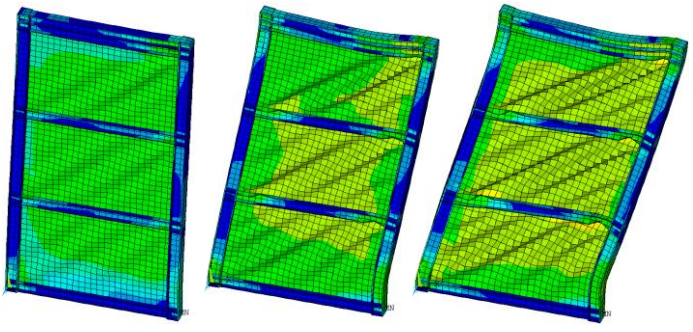
EK-5 (devam)

Yük – Öelenme Oranı Eğrisi	Maksimum Kuvvet	Nihai Ötelenme	Analiz Sonu
			
			
			
			

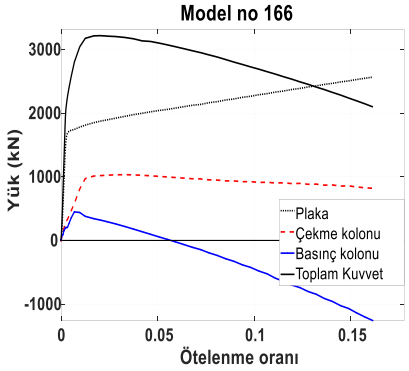
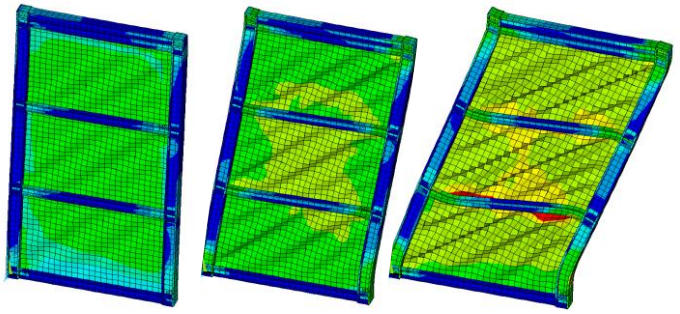
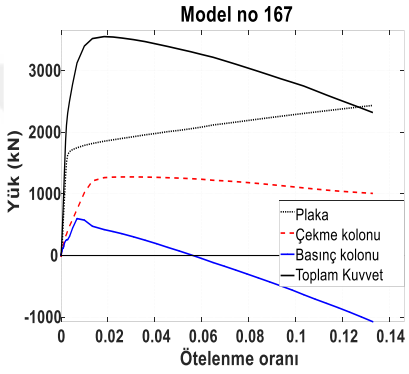
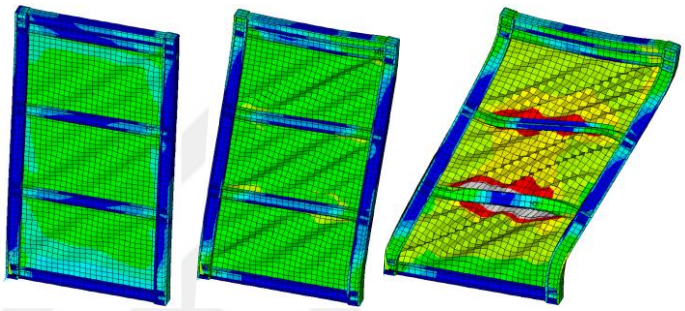
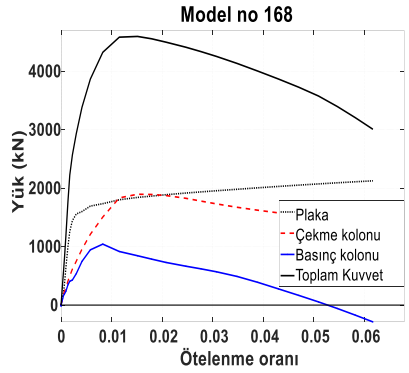
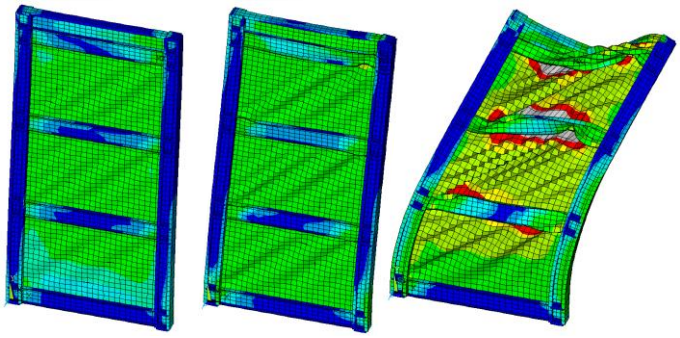
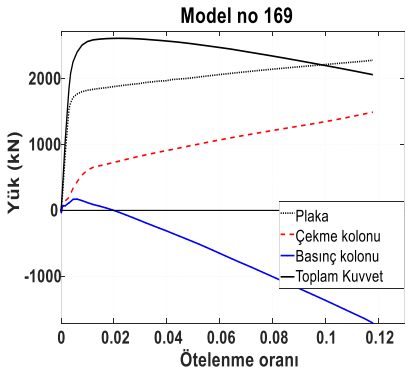
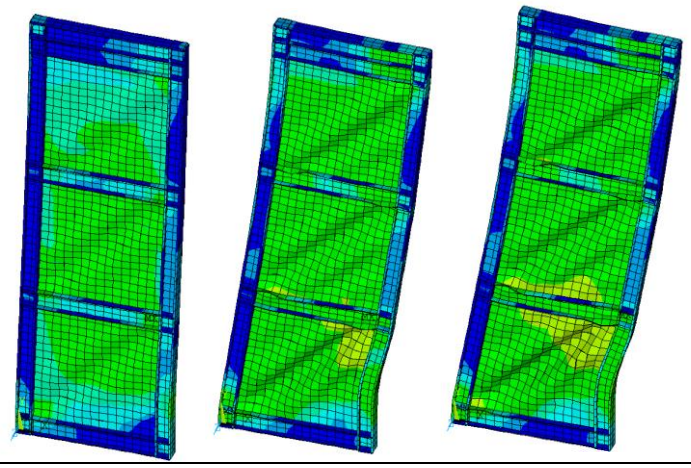
EK-5 (devam)

Yük – Öelenme Oranı Eğrisi	Maksimum Kuvvet	Nihai Ötelenme	Analiz Sonu
			
			
			
			

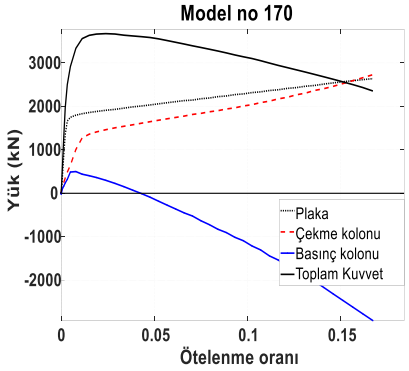
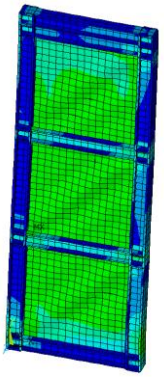
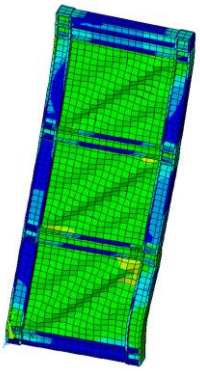
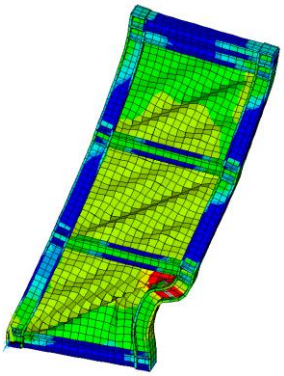
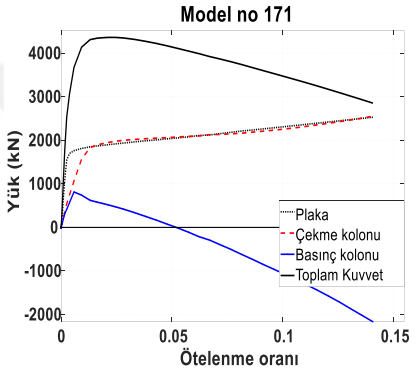
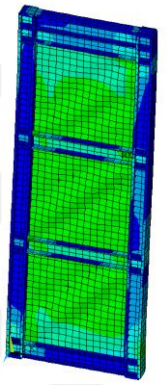
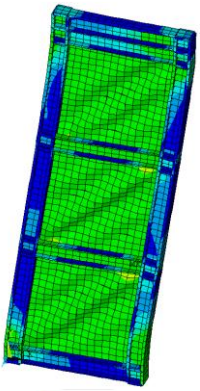
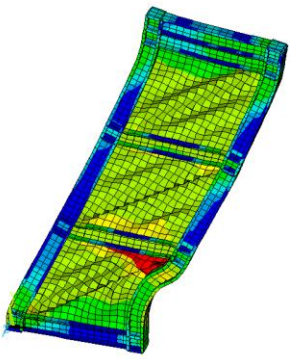
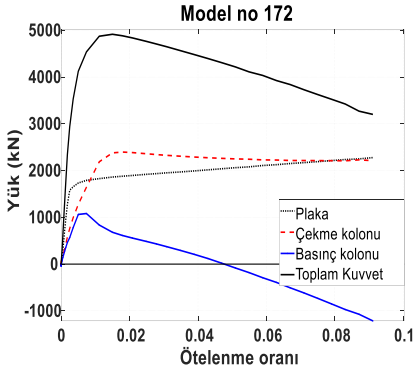
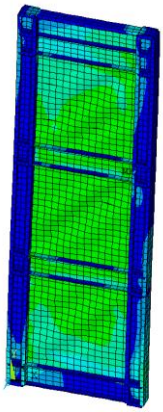
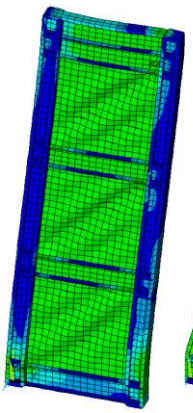
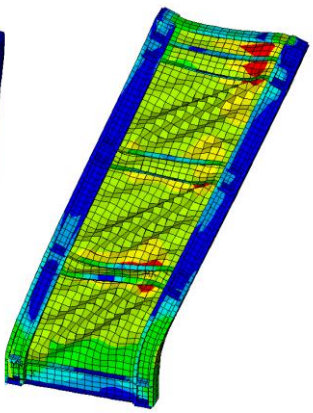
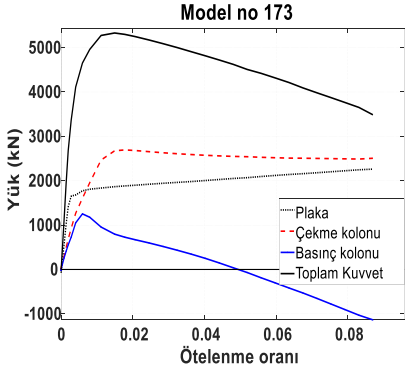
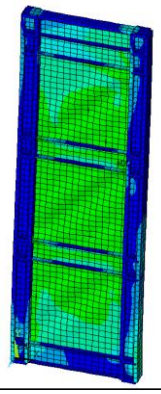
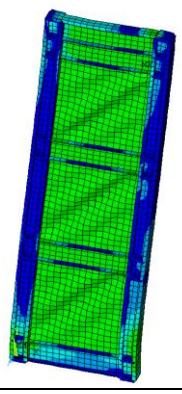
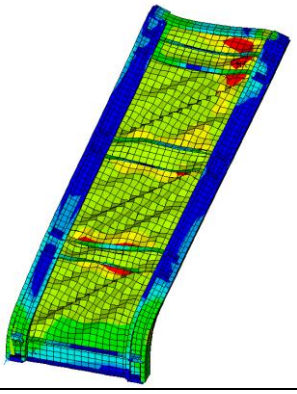
EK-5 (devam)

Yük – Öelenme Oranı Eğrisi	Maksimum Kuvvet	Nihai Ötelenme	Analiz Sonu
			
			
			
			

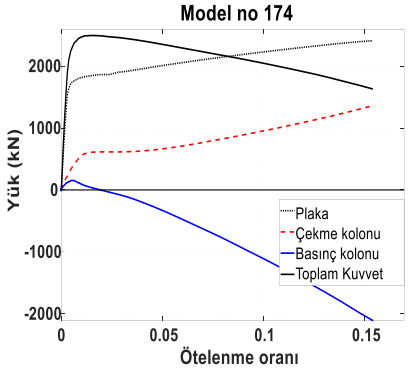
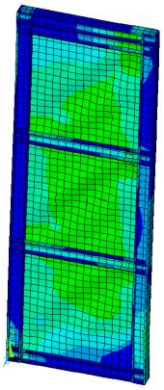
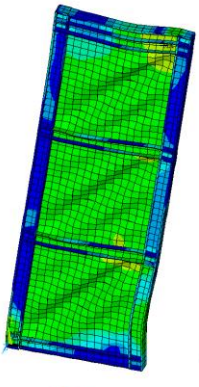
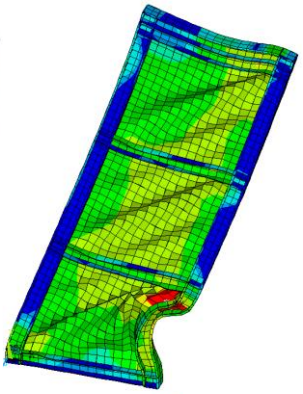
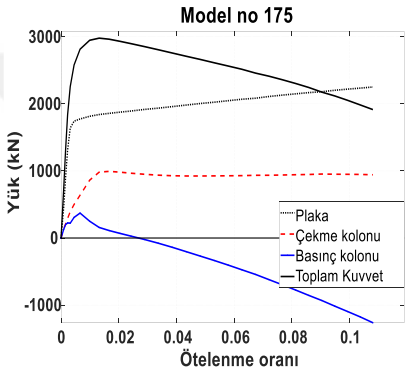
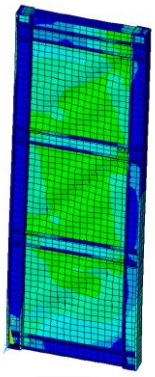
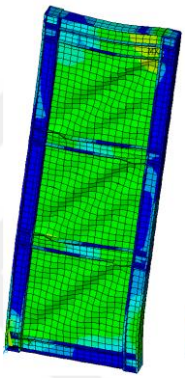
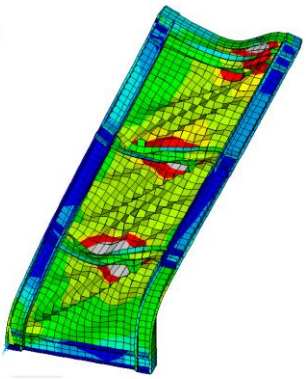
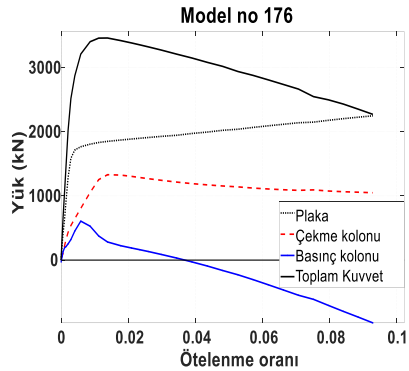
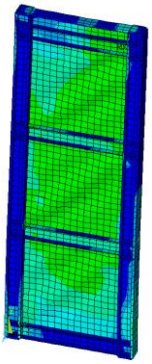
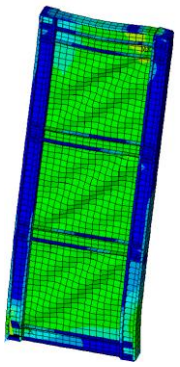
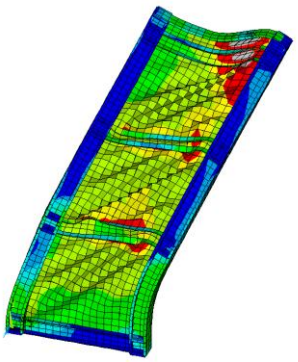
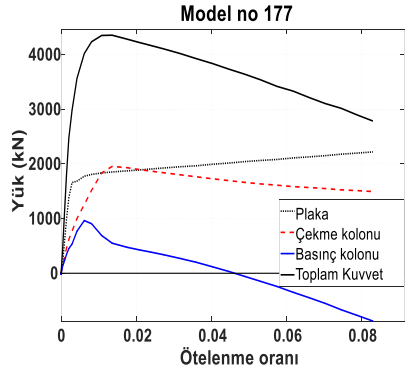
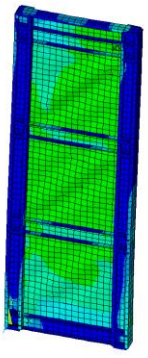
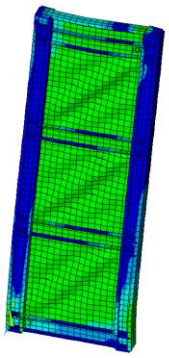
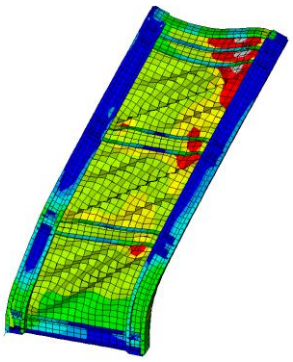
EK-5 (devam)

Yük – Öelenme Oranı Eğrisi	Maksimum Kuvvet	Nihai Ötelenme	Analiz Sonu
			
			
			
			

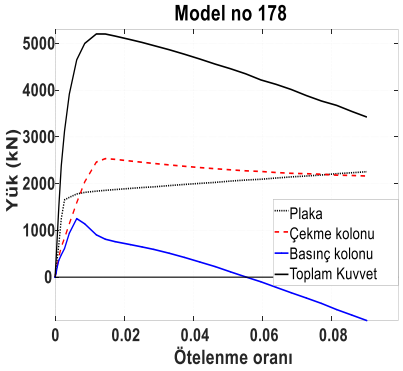
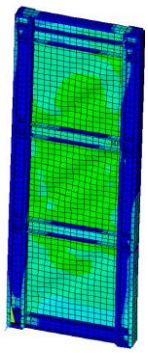
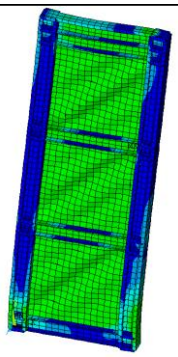
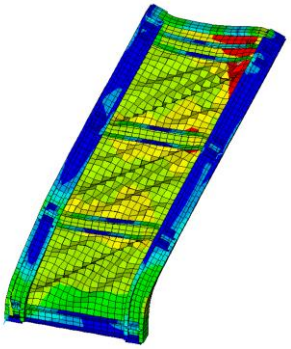
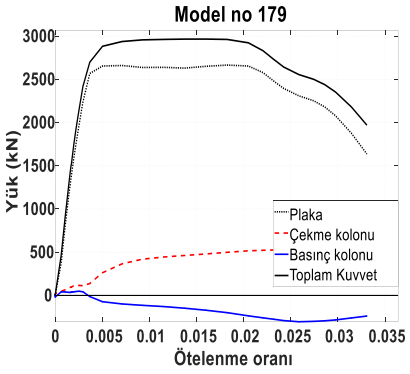
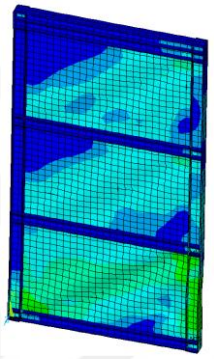
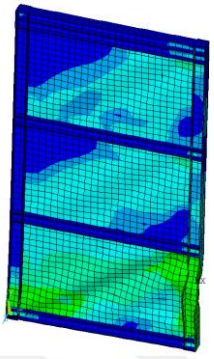
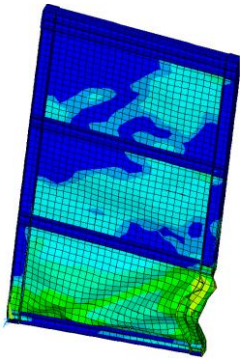
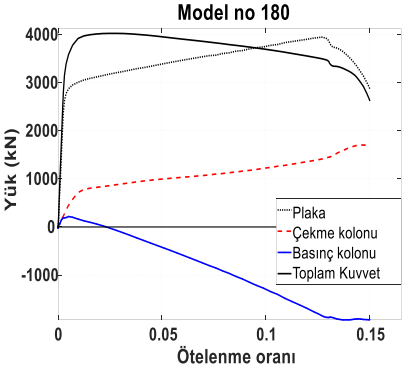
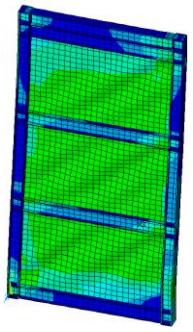
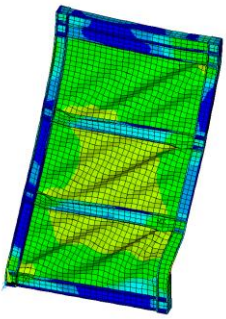
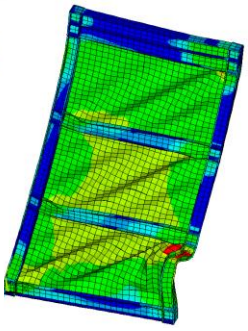
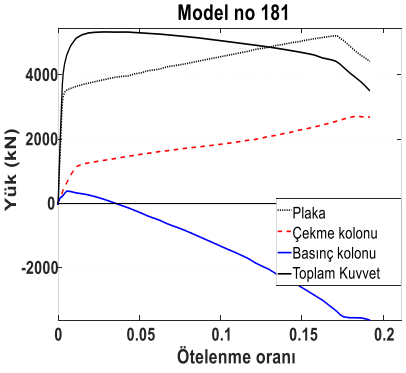
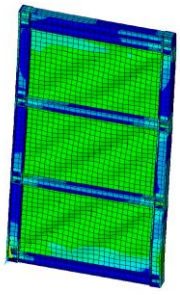
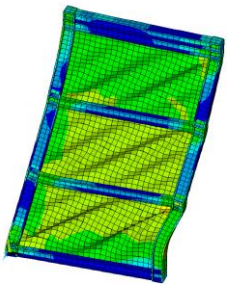
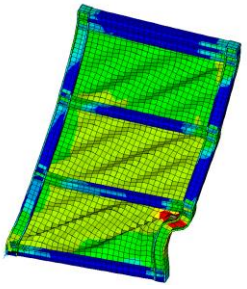
EK-5 (devam)

Yük – Öelenme Oranı Eğrisi	Maksimum Kuvvet	Nihai Ötelenme	Analiz Sonu
			
			
			
			

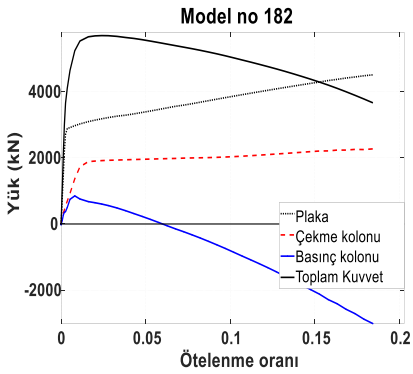
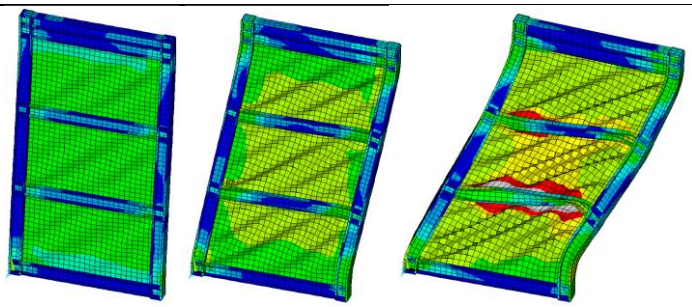
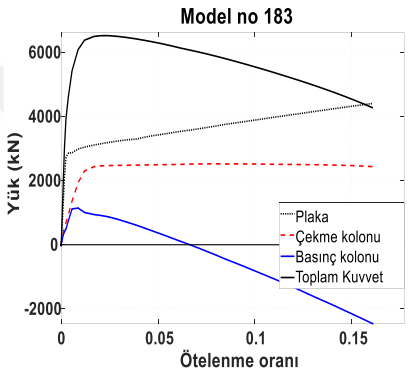
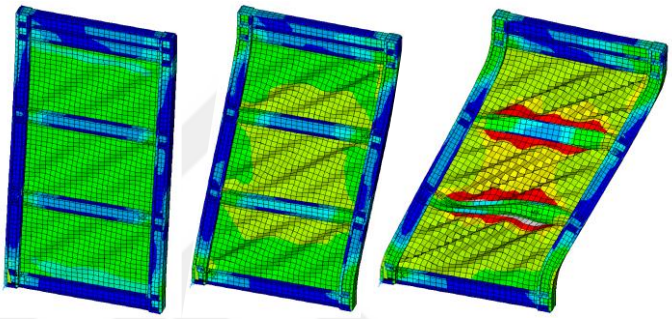
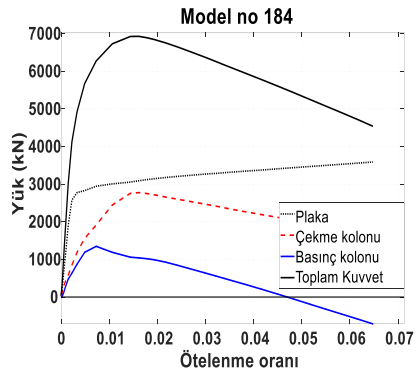
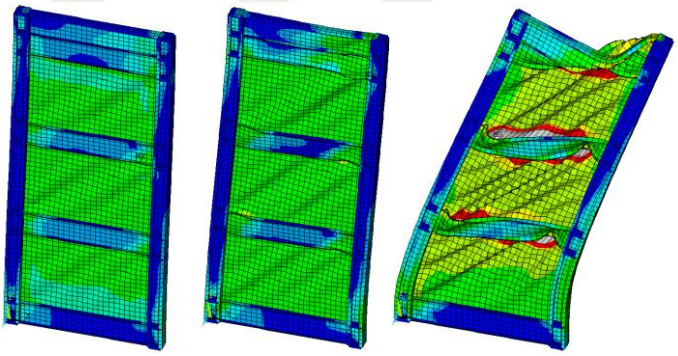
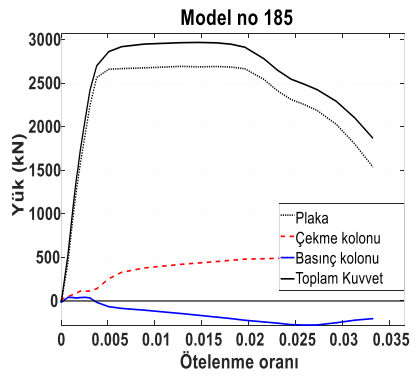
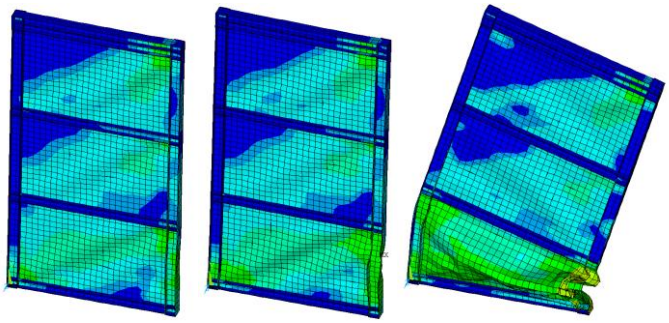
EK-5 (devam)

Yük – Öelenme Oranı Eğrisi	Maksimum Kuvvet	Nihai Ötelenme	Analiz Sonu
			
			
			
			

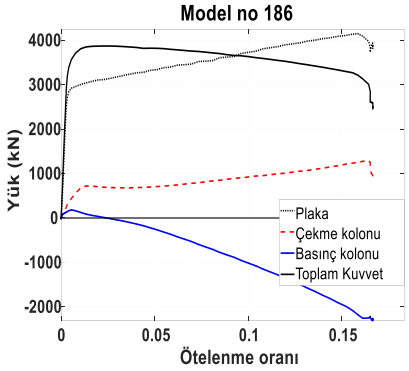
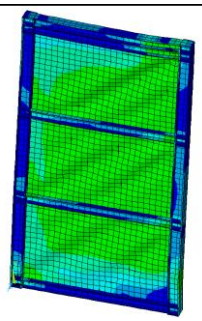
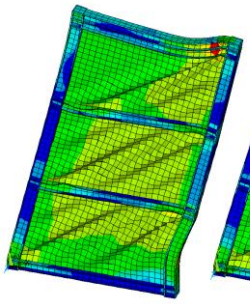
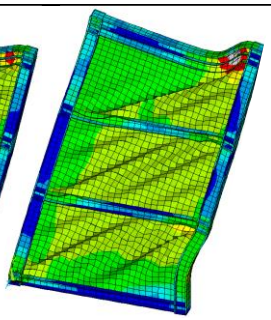
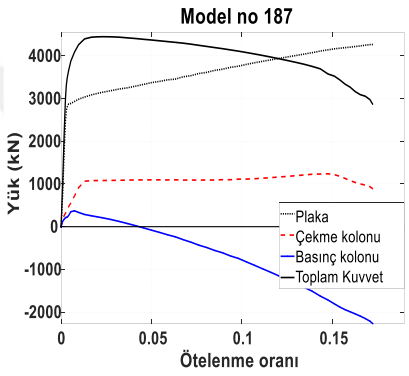
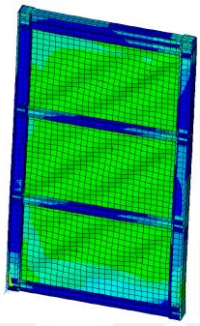
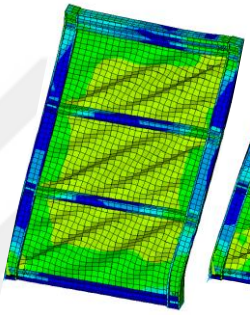
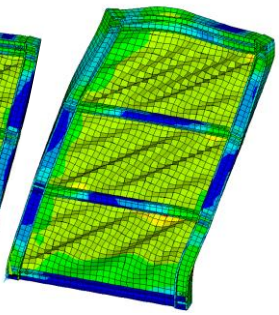
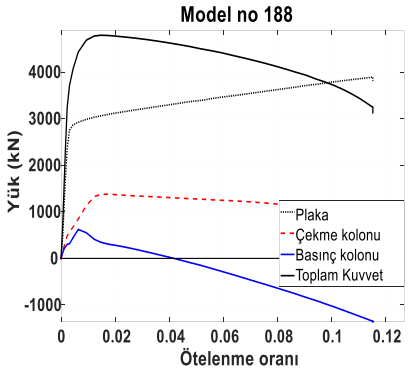
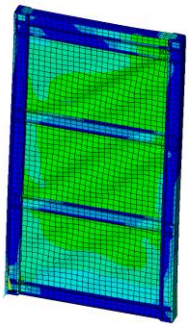
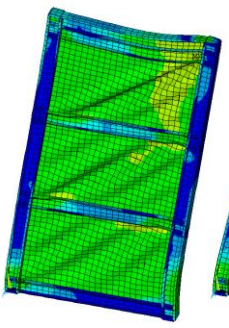
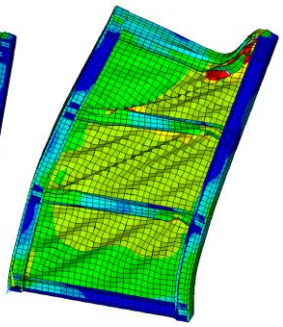
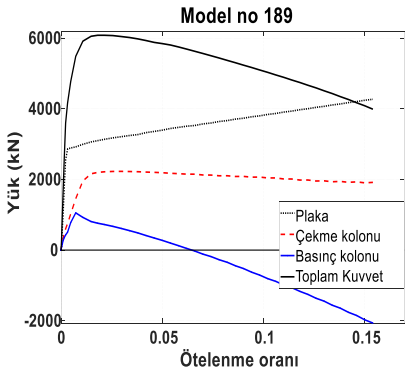
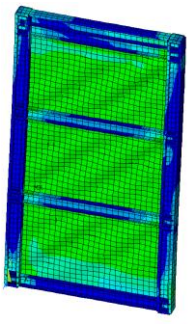
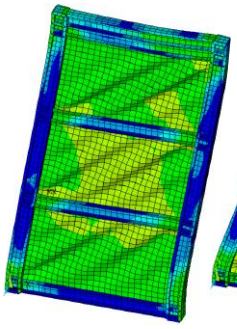
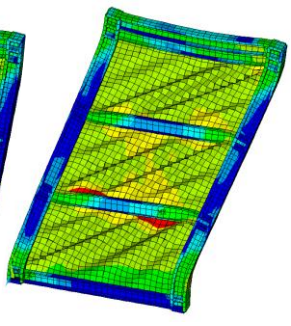
EK-5 (devam)

Yük – Öelenme Oranı Eğrisi	Maksimum Kuvvet	Nihai Ötelenme	Analiz Sonu
			
			
			
			

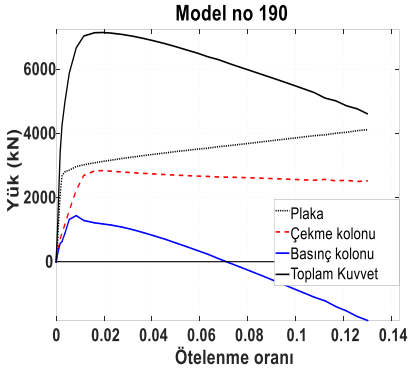
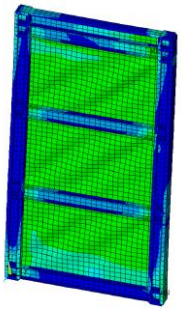
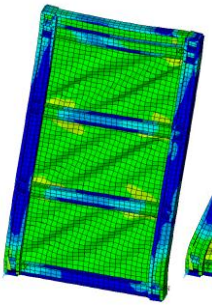
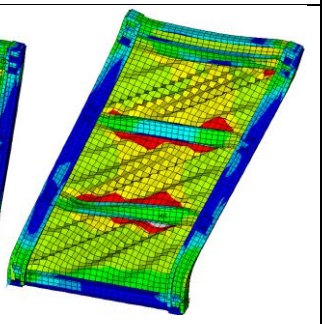
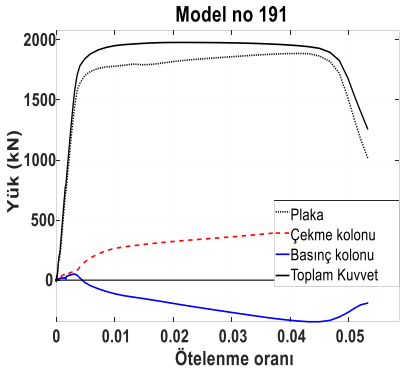
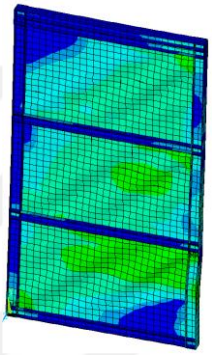
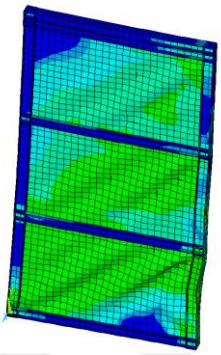
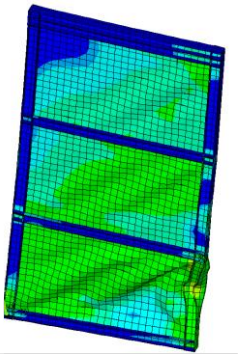
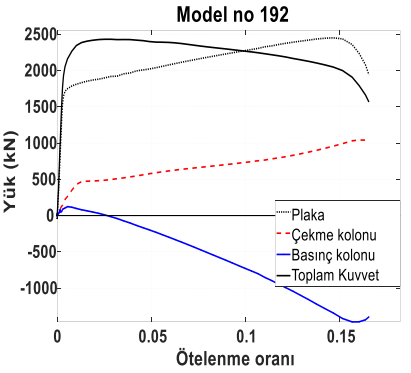
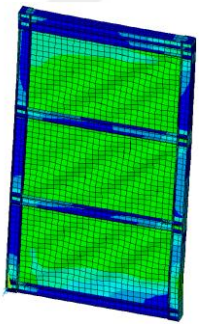
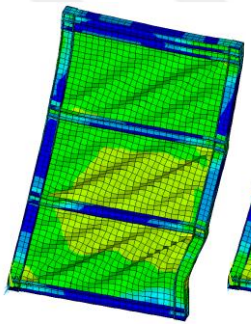
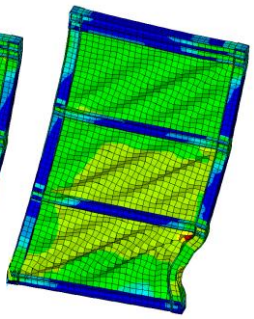
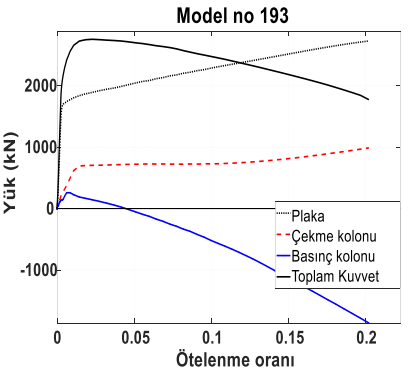
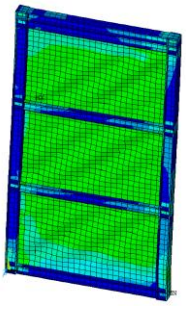
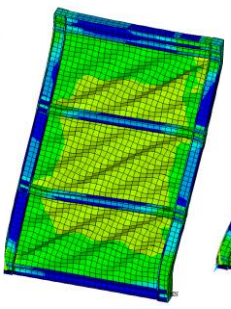
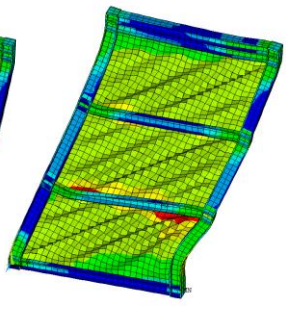
EK-5 (devam)

Yük – Öelenme Oranı Eğrisi	Maksimum Kuvvet	Nihai Ötelenme	Analiz Sonu
			
			
			
			

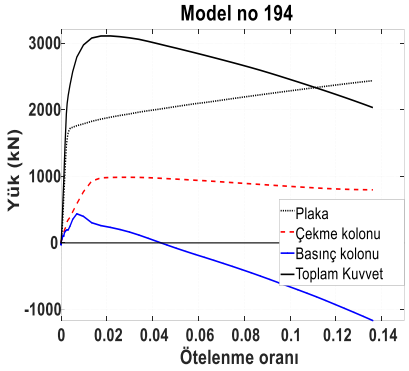
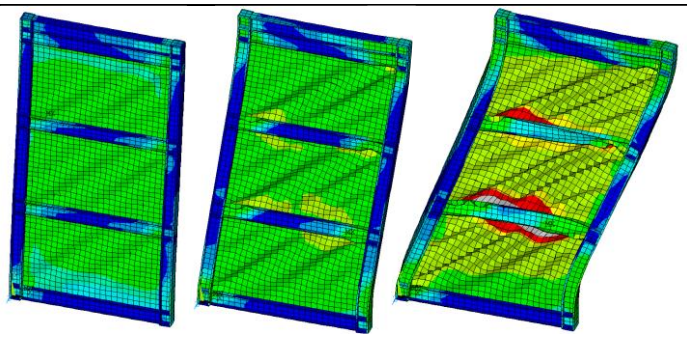
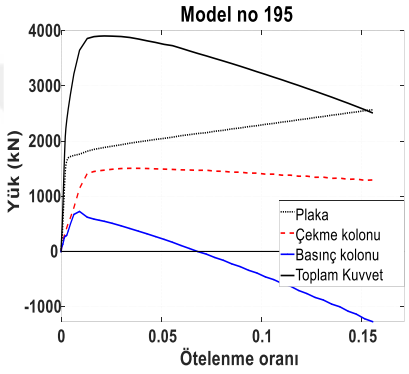
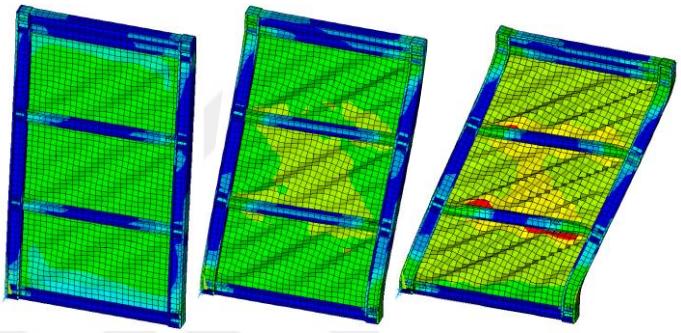
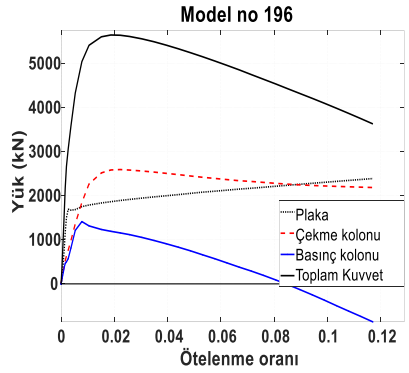
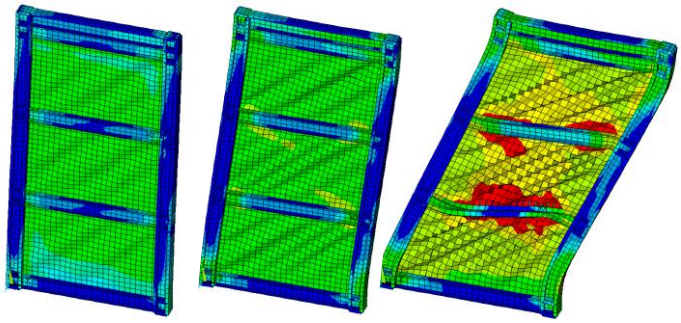
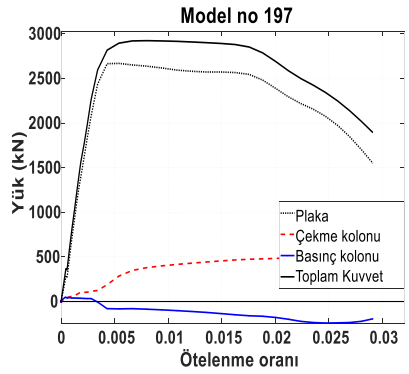
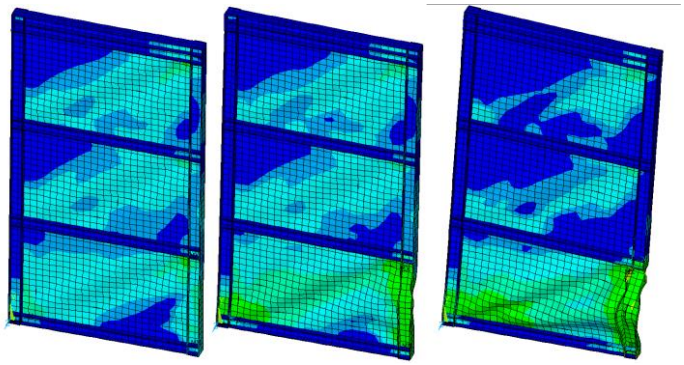
EK-5 (devam)

Yük – Öelenme Oranı Eğrisi	Maksimum Kuvvet	Nihai Ötelenme	Analiz Sonu
			
			
			
			

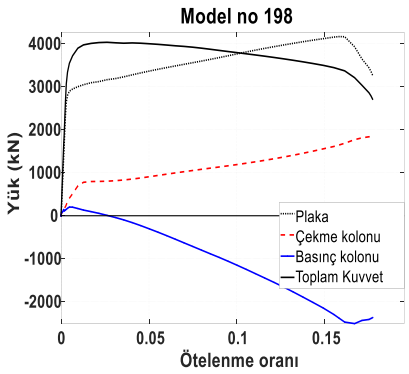
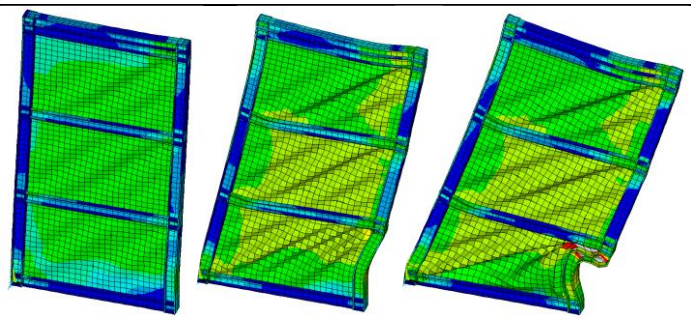
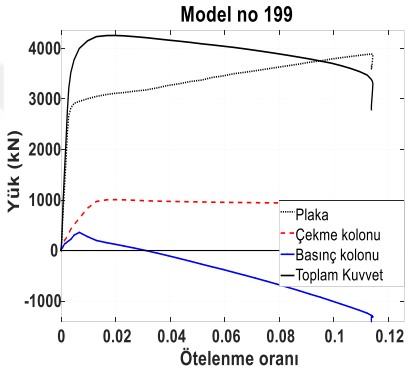
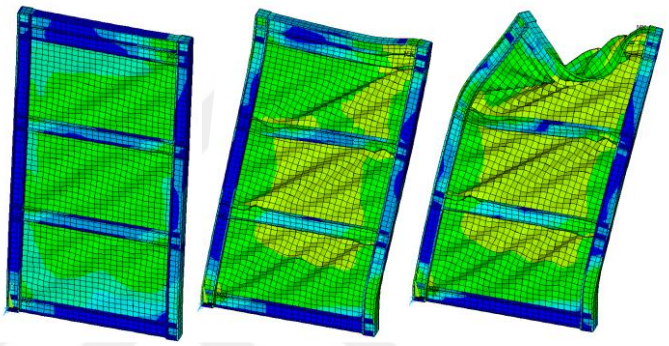
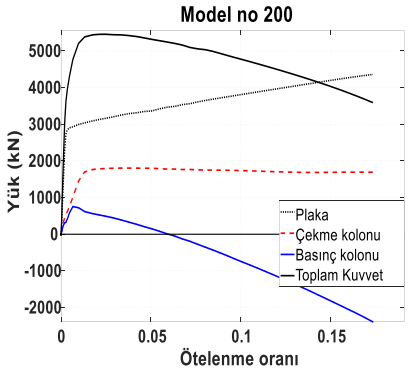
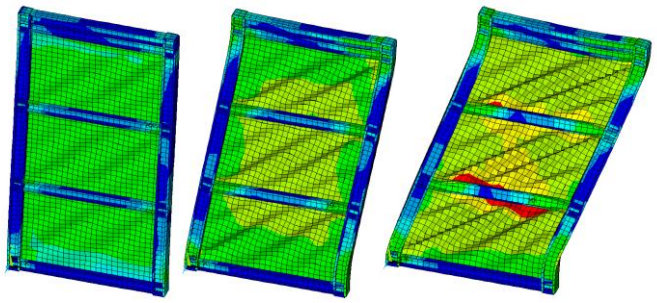
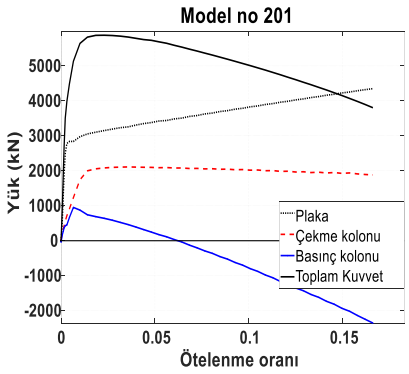
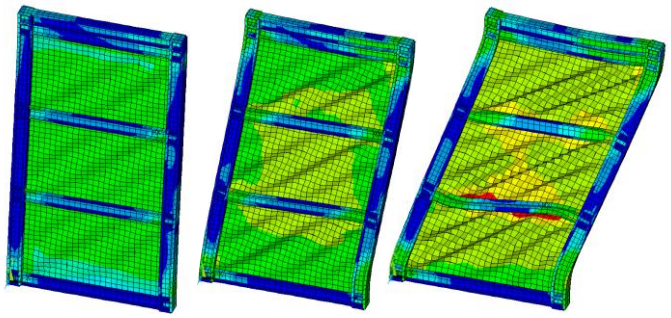
EK-5 (devam)

Yük – Öelenme Oranı Eğrisi	Maksimum Kuvvet	Nihai Ötelenme	Analiz Sonu
			
			
			
			

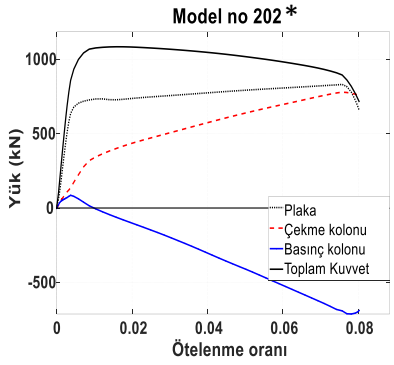
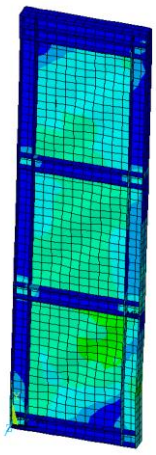
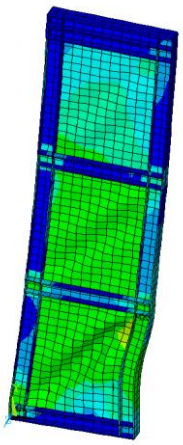
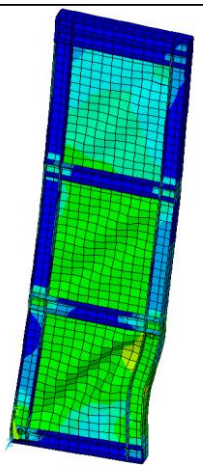
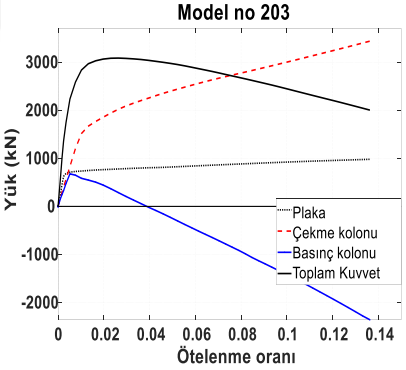
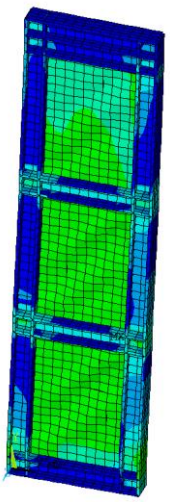
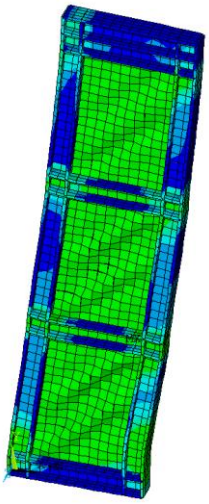
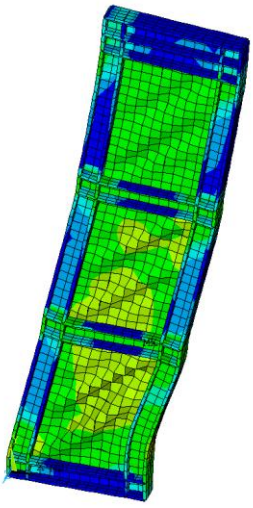
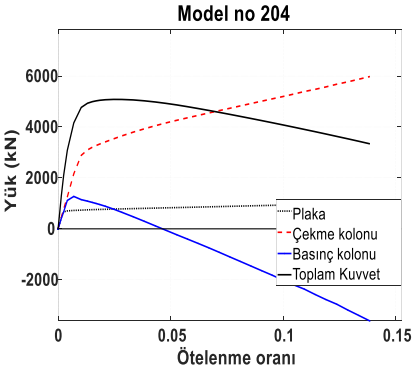
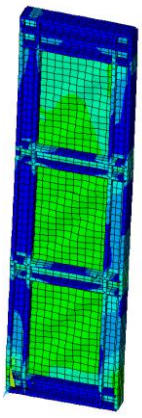
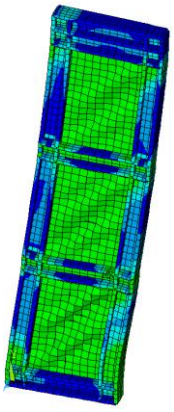
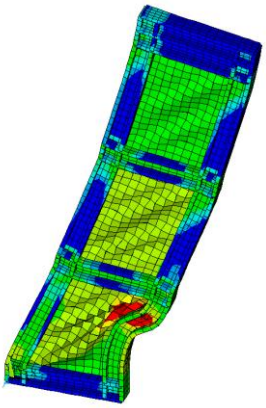
EK-5 (devam)

Yük – Öelenme Oranı Eğrisi	Maksimum Kuvvet	Nihai Ötelenme	Analiz Sonu
			
			
			
			

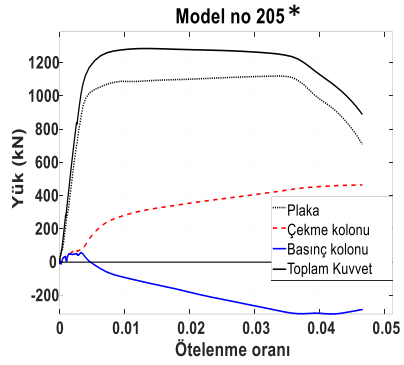
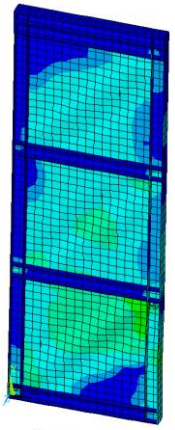
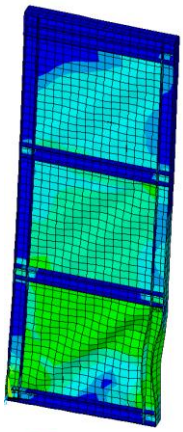
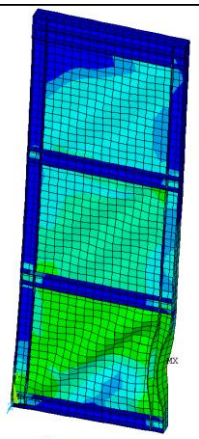
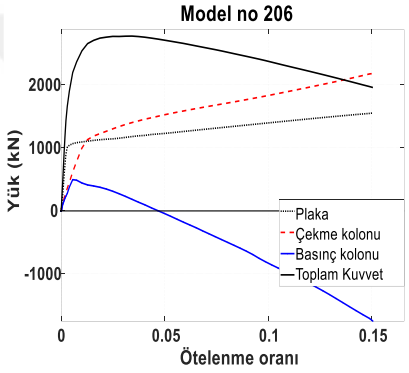
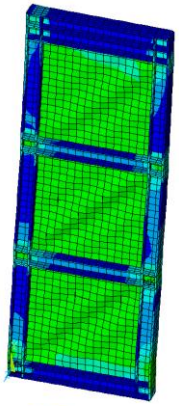
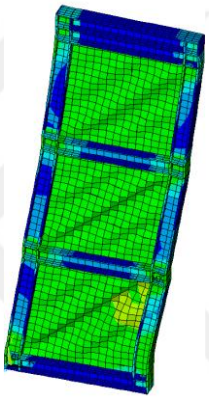
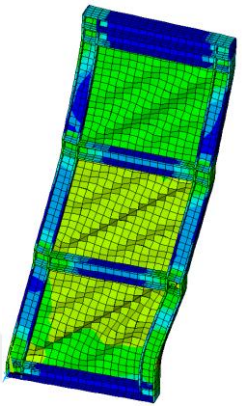
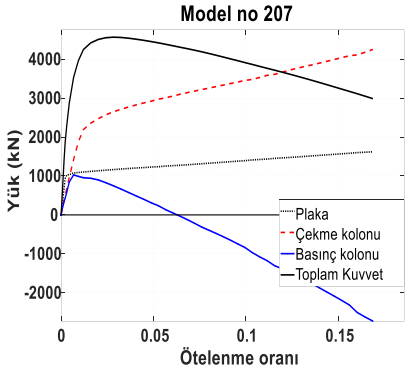
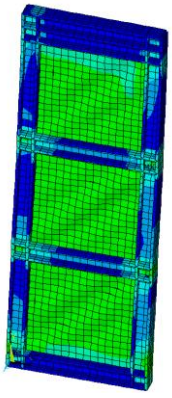
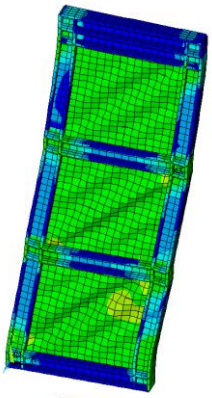
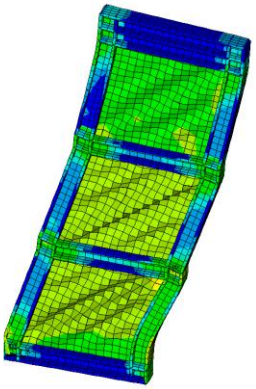
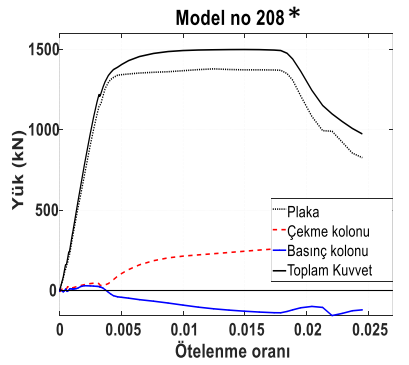
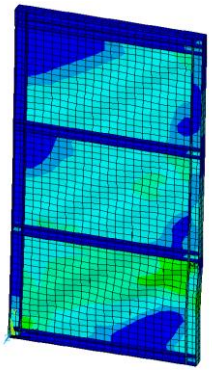
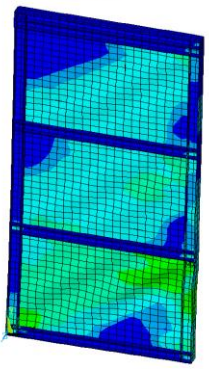
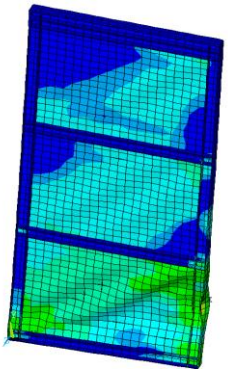
EK-5 (devam)

Yük – Öelenme Oranı Eğrisi	Maksimum Kuvvet	Nihai Ötelenme	Analiz Sonu
			
			
			
			

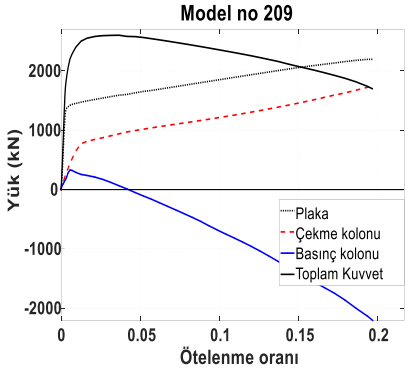
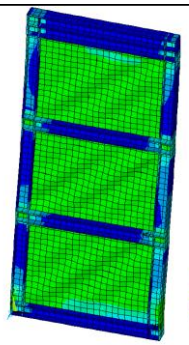
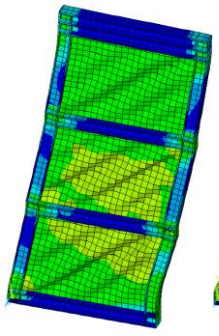
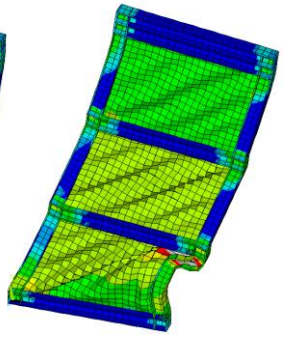
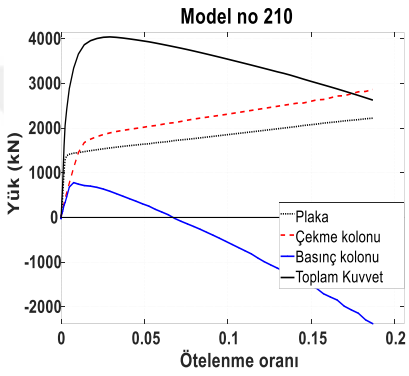
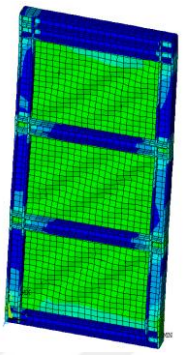
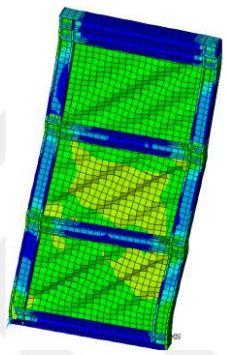
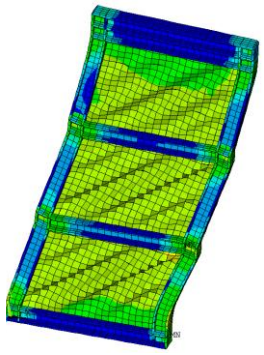
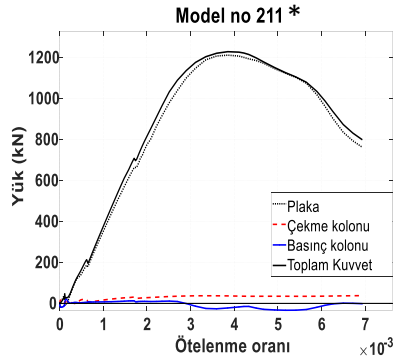
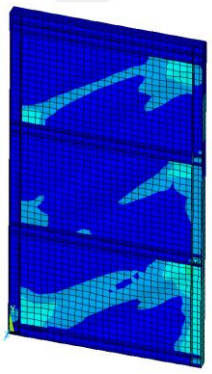
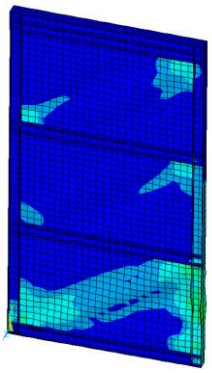
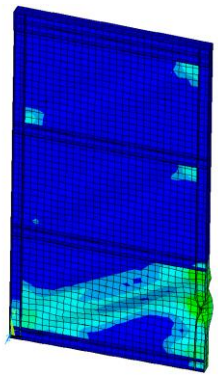
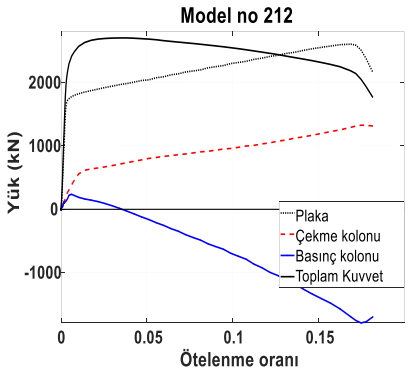
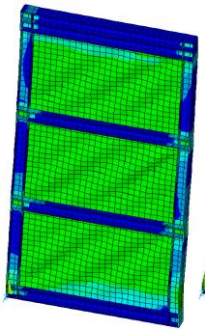
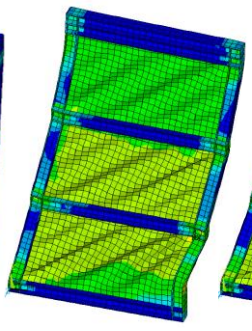
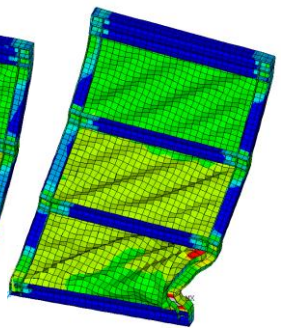
EK-5 (devam)

Yük – Öelenme Oranı Eğrisi	Maksimum Kuvvet	Nihai Ötelenme	Analiz Sonu
			
			
			

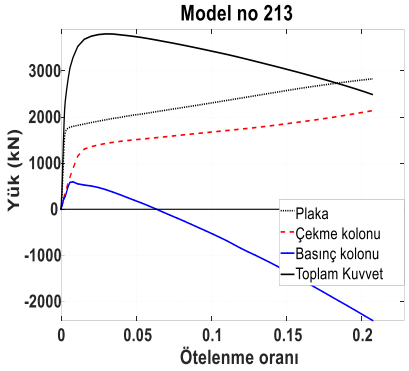
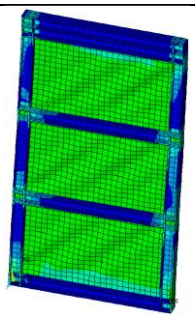
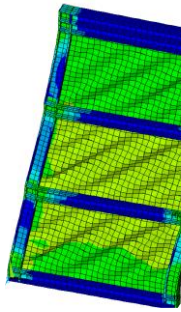
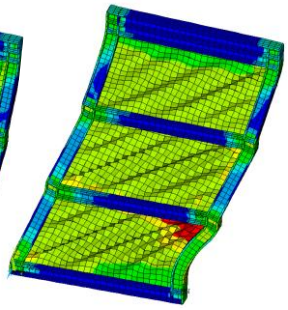
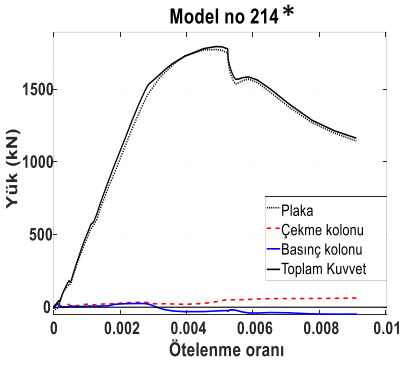
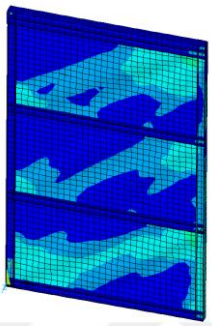
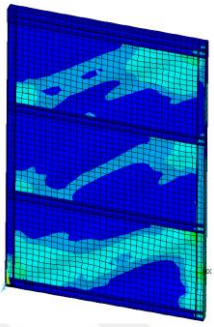
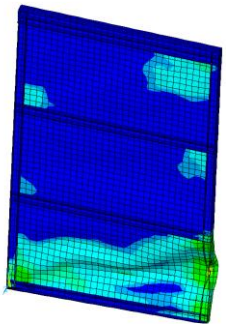
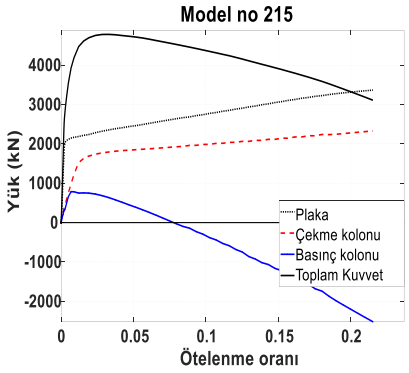
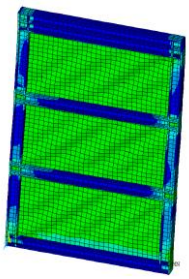
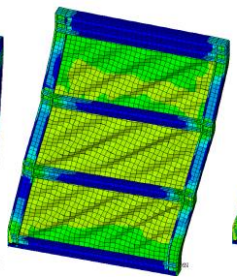
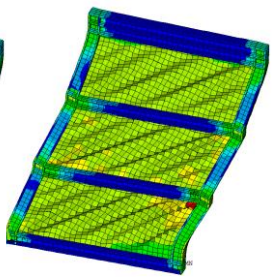
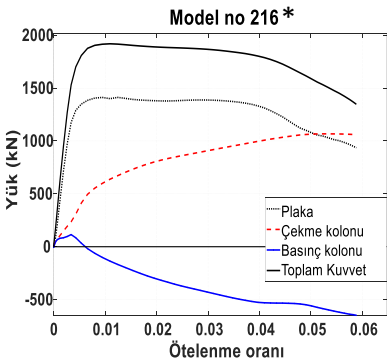
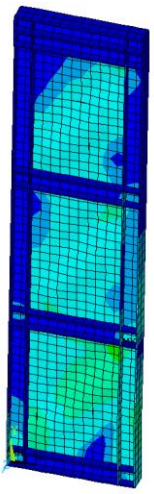
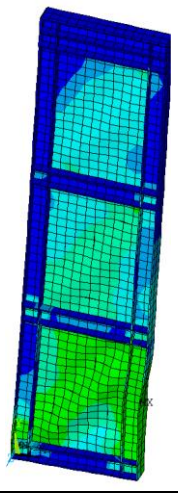
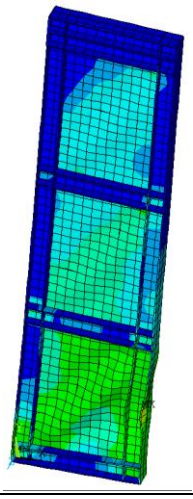
EK-5 (devam)

Yük – Öelenme Oranı Eğrisi	Maksimum Kuvvet	Nihai Ötelenme	Analiz Sonu
			
			
			
			

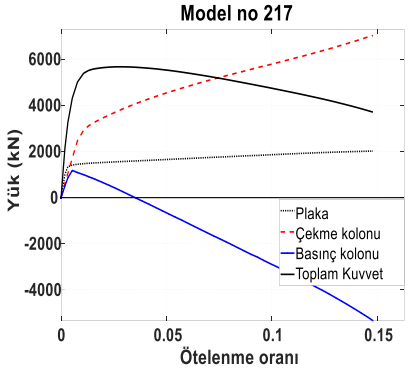
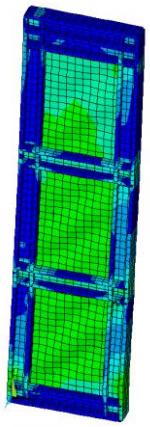
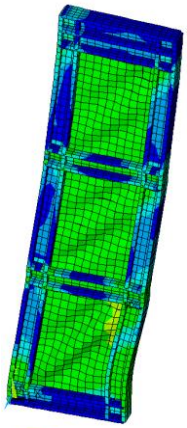
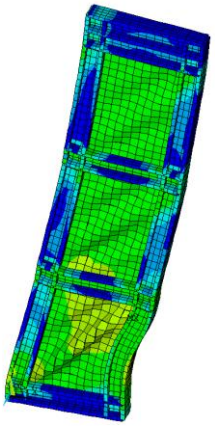
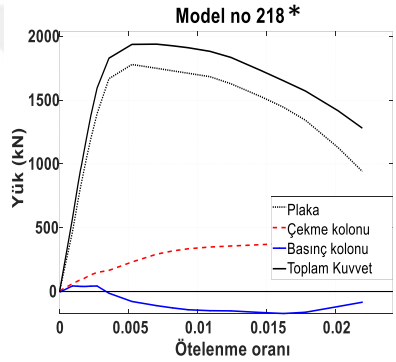
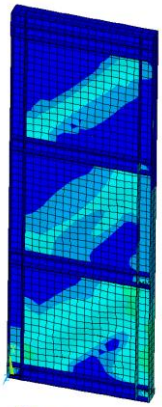
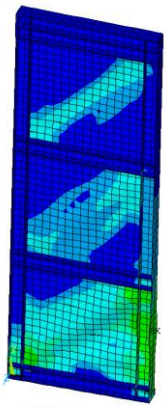
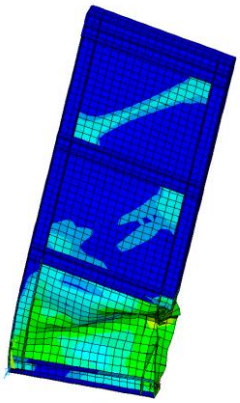
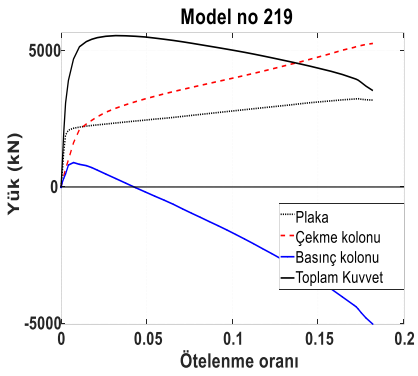
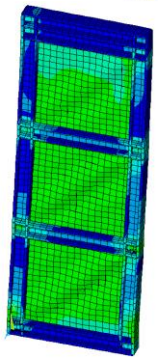
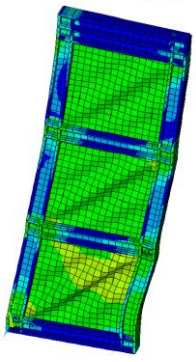
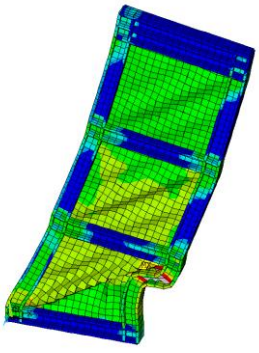
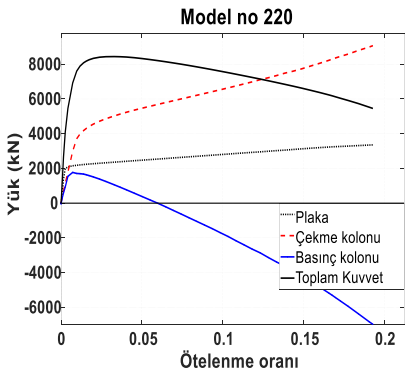
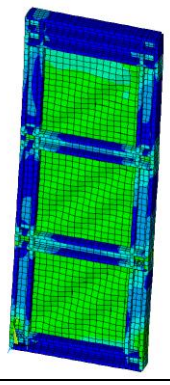
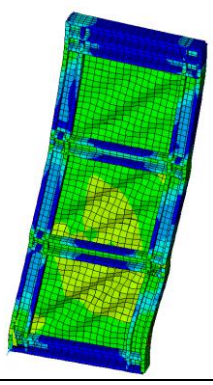
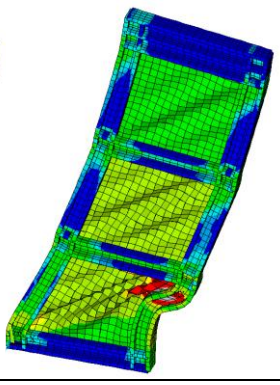
EK-5 (devam)

Yük – Öelenme Oranı Eğrisi	Maksimum Kuvvet	Nihai Ötelenme	Analiz Sonu
			
			
			
			

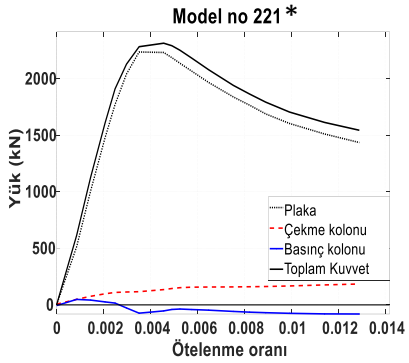
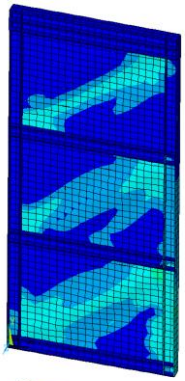
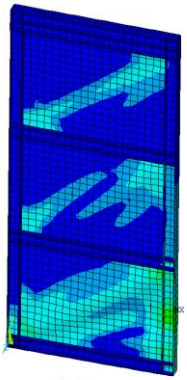
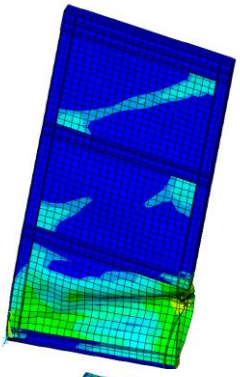
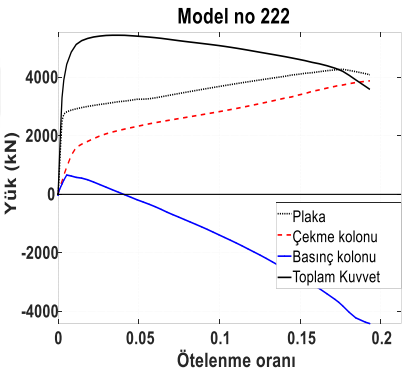
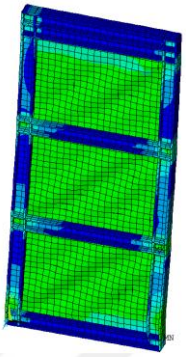
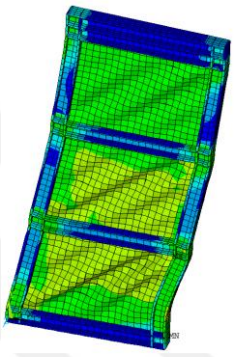
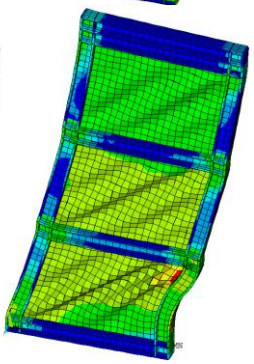
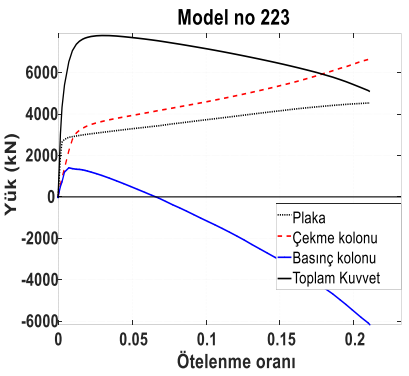
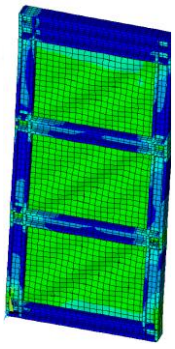
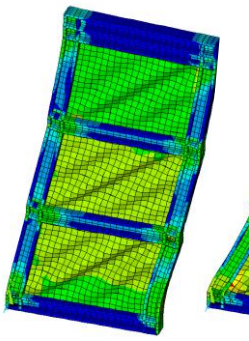
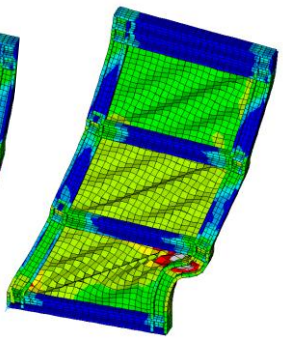
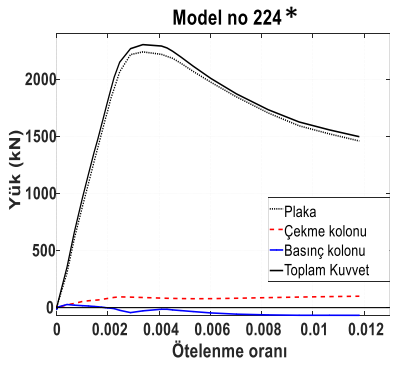
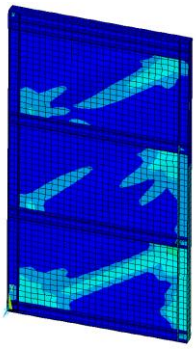
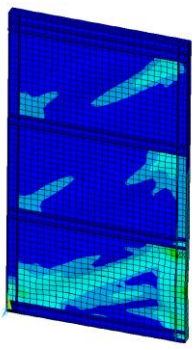
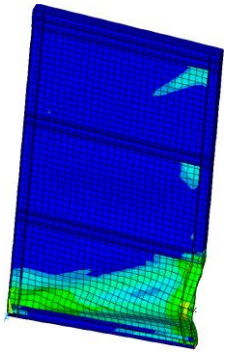
EK-5 (devam)

Yük – Öelenme Oranı Eğrisi	Maksimum Kuvvet	Nihai Ötelenme	Analiz Sonu
			
			
			
			

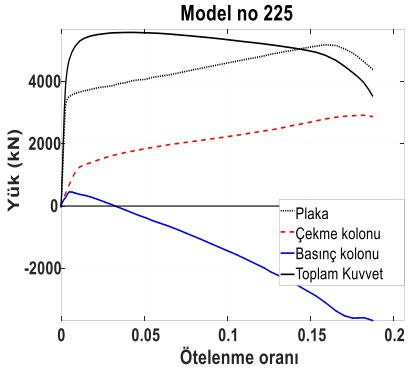
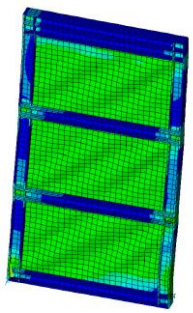
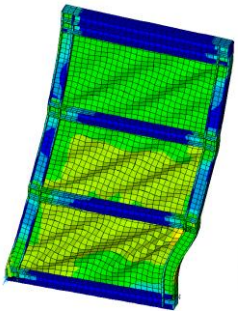
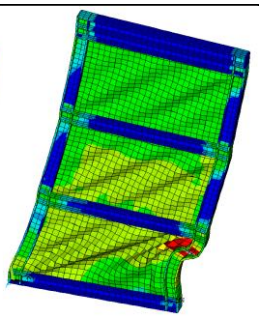
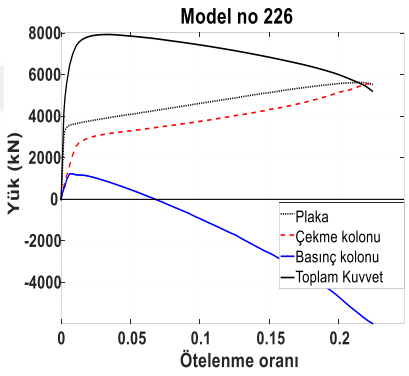
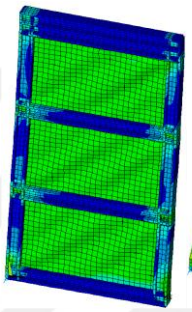
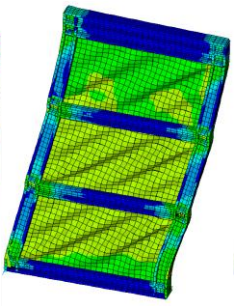
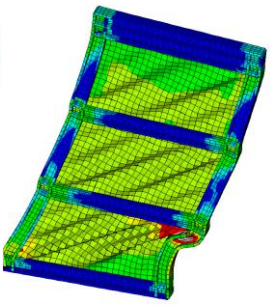
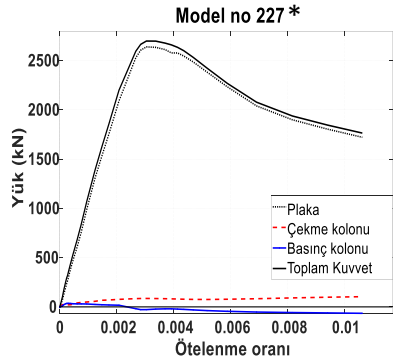
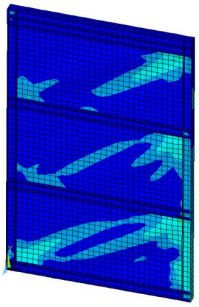
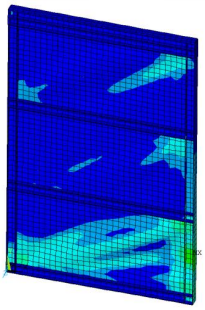
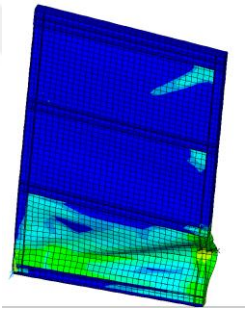
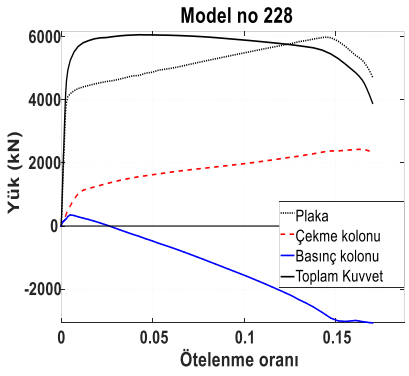
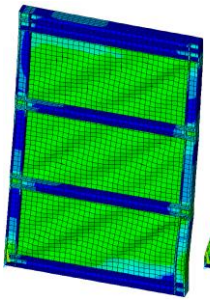
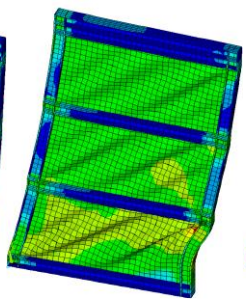
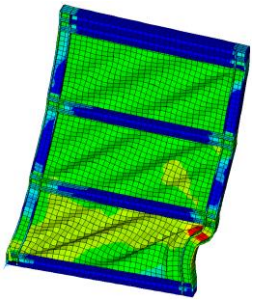
EK-5 (devam)

Yük – Öelenme Oranı Eğrisi	Maksimum Kuvvet	Nihai Ötelenme	Analiz Sonu
			
			
			
			

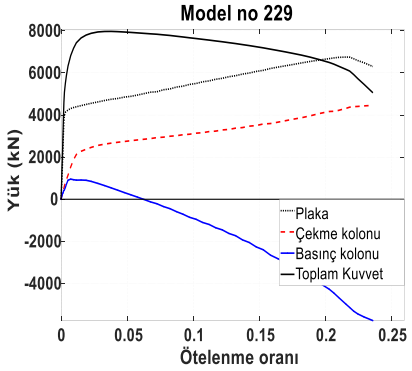
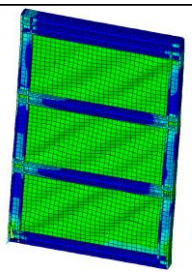
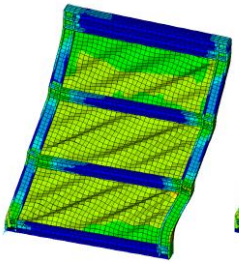
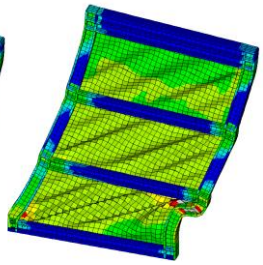
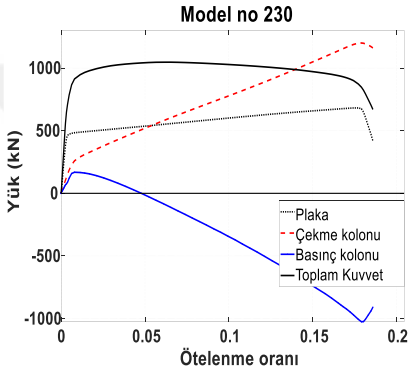
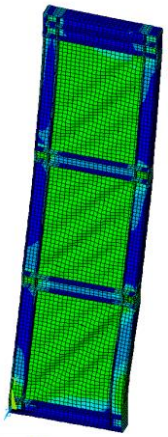
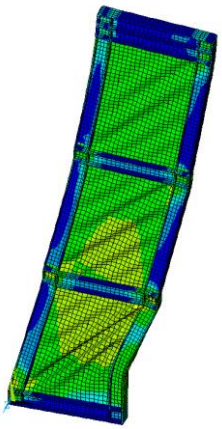
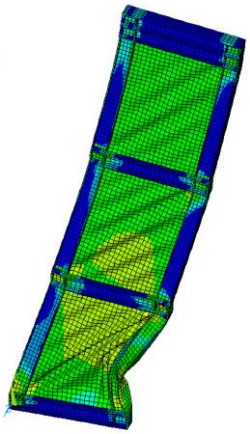
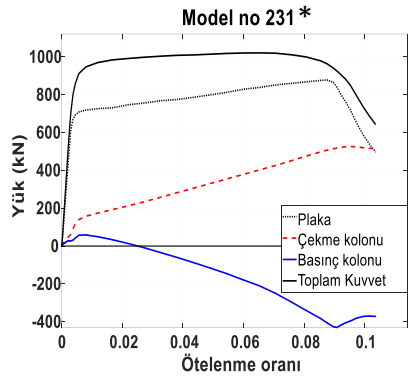
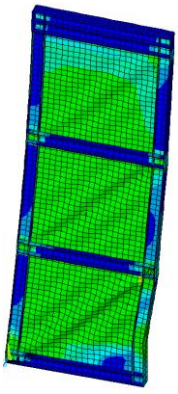
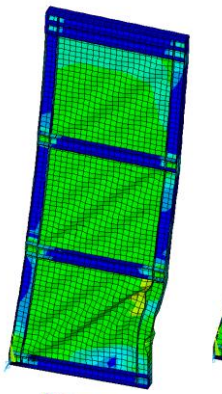
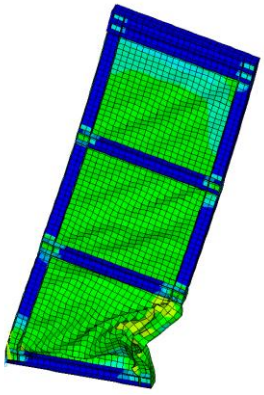
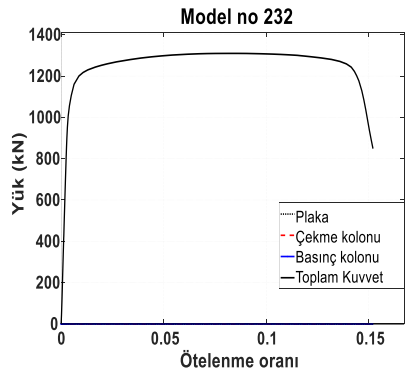
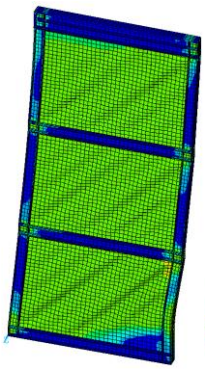
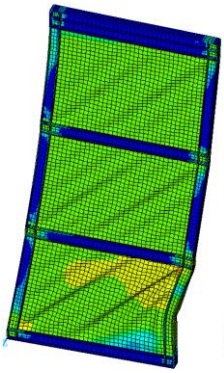
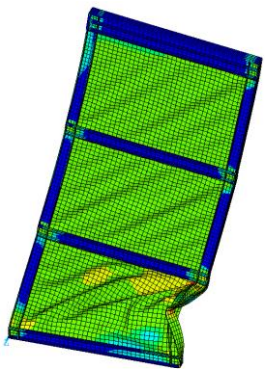
EK-5 (devam)

Yük – Öelenme Oranı Eğrisi	Maksimum Kuvvet	Nihai Ötelenme	Analiz Sonu
			
			
			
			

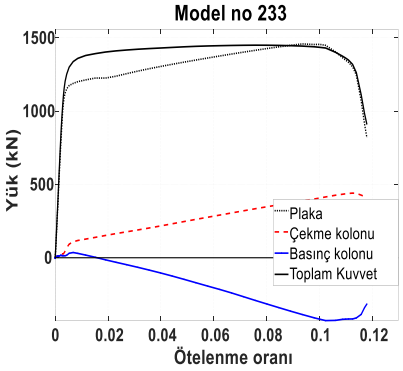
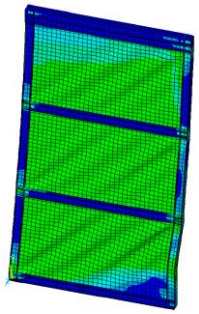
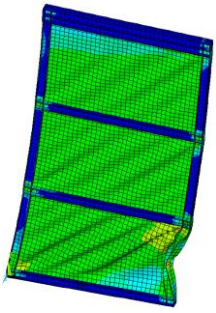
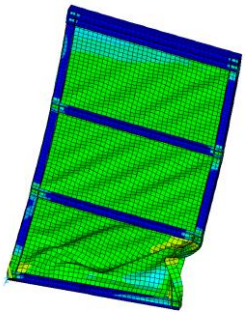
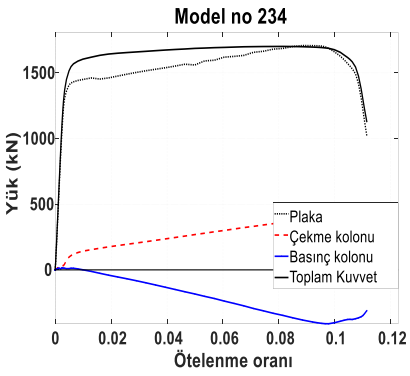
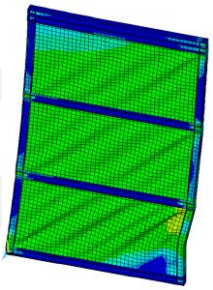
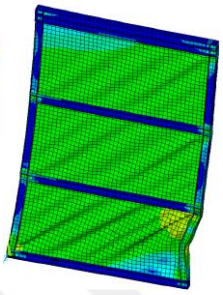
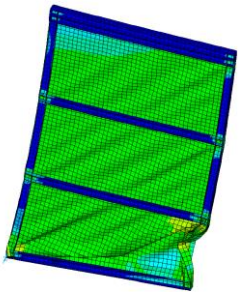
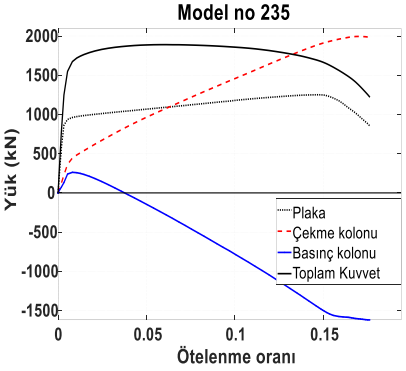
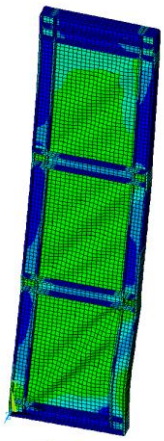
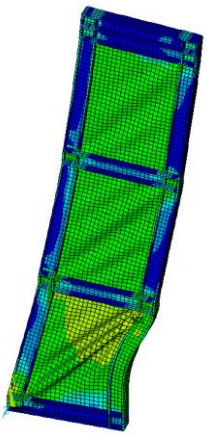
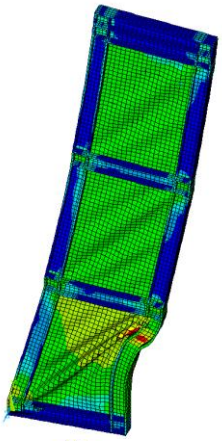
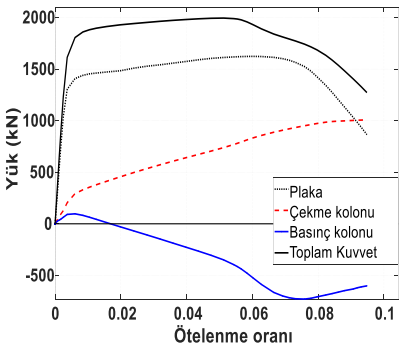
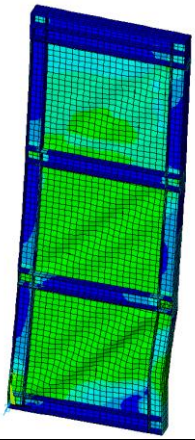
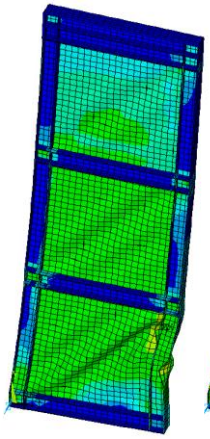
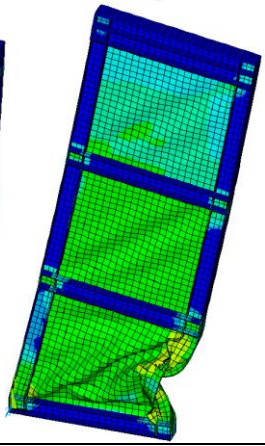
EK-5 (devam)

Yük – Öelenme Oranı Eğrisi	Maksimum Kuvvet	Nihai Ötelenme	Analiz Sonu
			
			
			
			

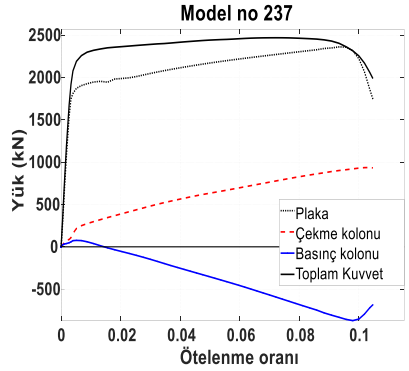
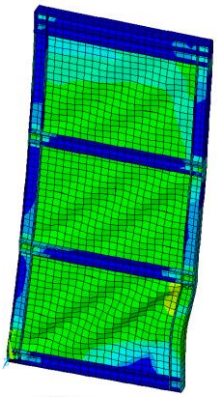
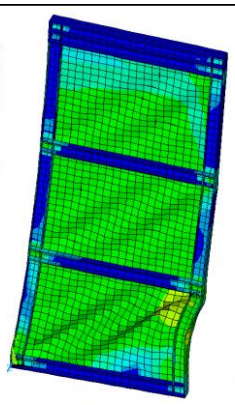
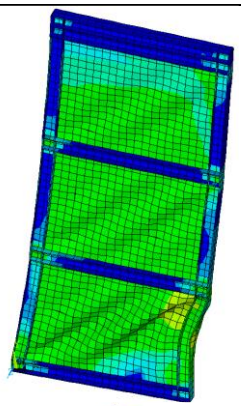
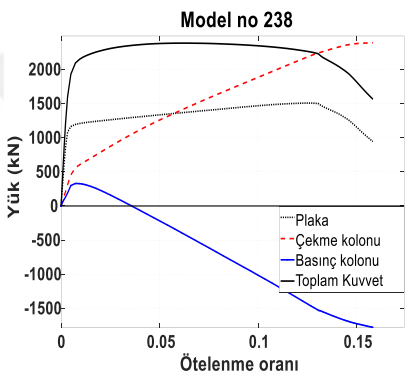
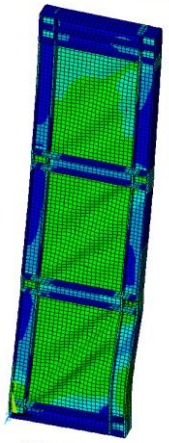
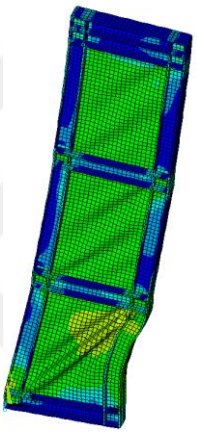
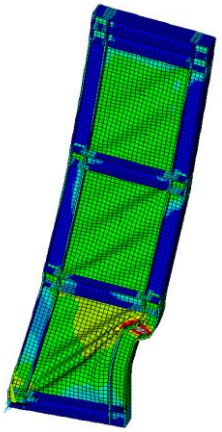
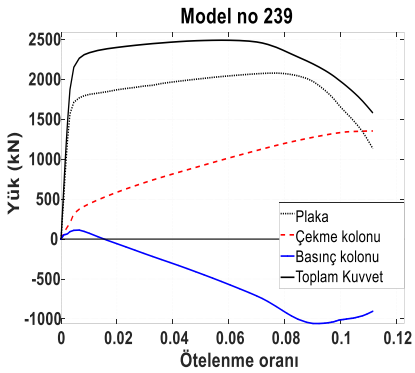
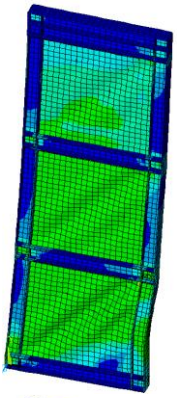
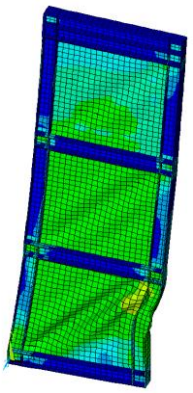
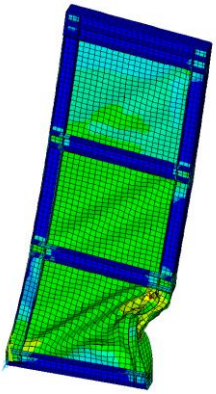
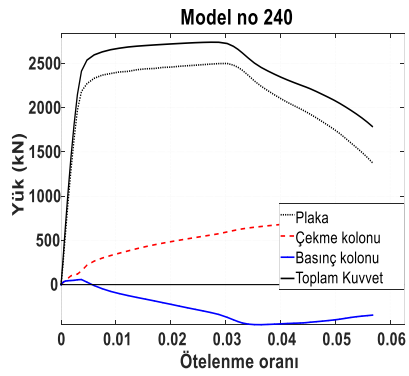
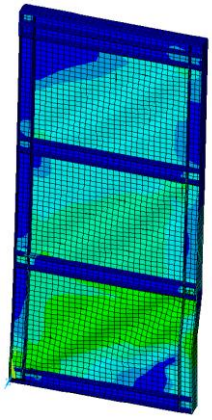
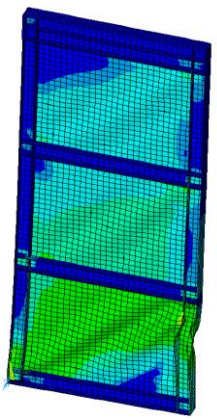
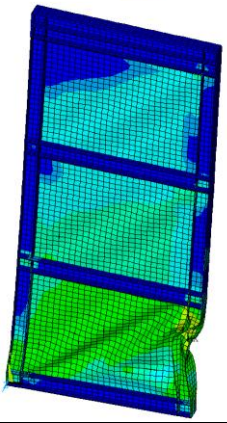
EK-5 (devam)

Yük – Öelenme Oranı Eğrisi	Maksimum Kuvvet	Nihai Ötelenme	Analiz Sonu
			
			
			
			

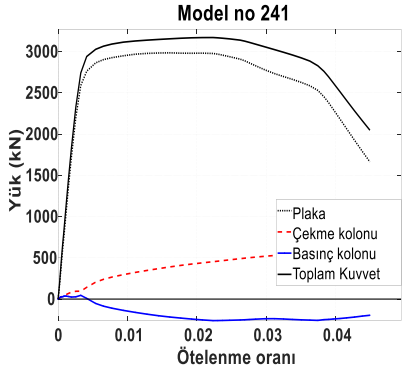
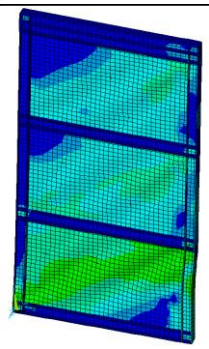
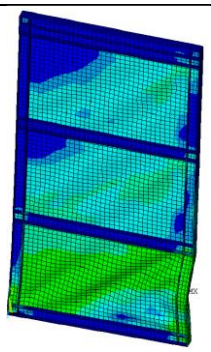
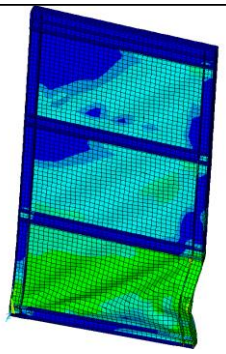
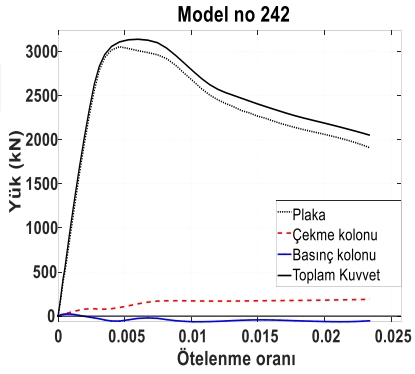
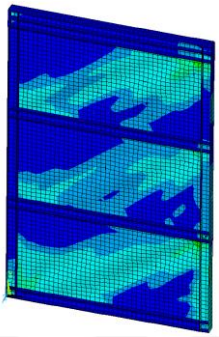
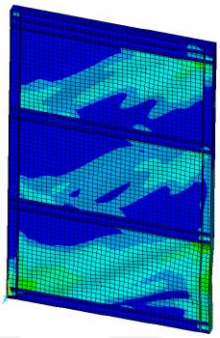
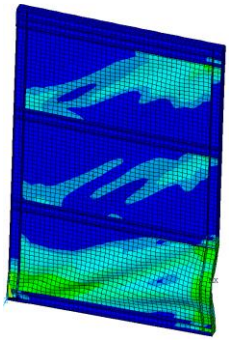
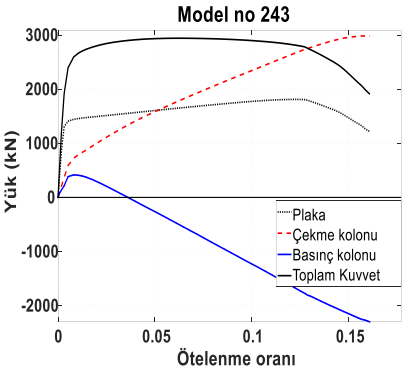
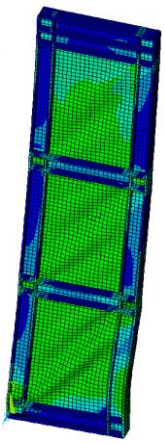
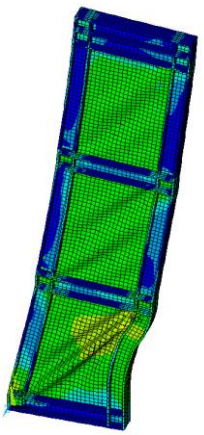
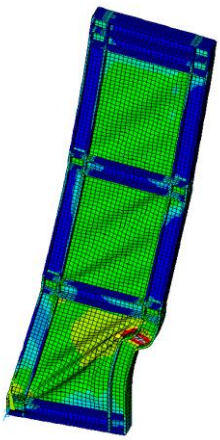
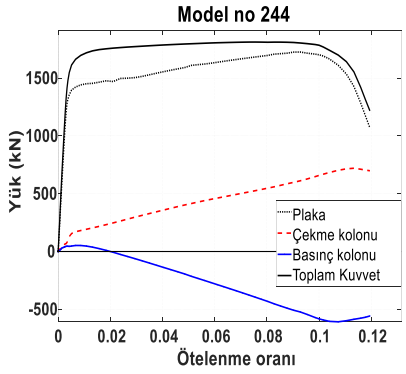
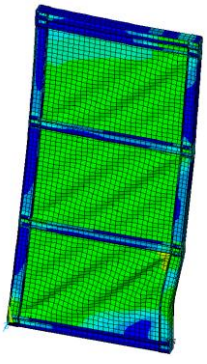
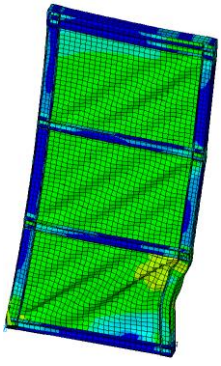
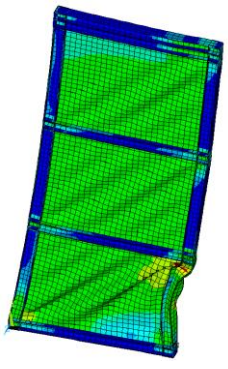
EK-5 (devam)

Yük – Öelenme Oranı Eğrisi	Maksimum Kuvvet	Nihai Ötelenme	Analiz Sonu
			
			
			
			

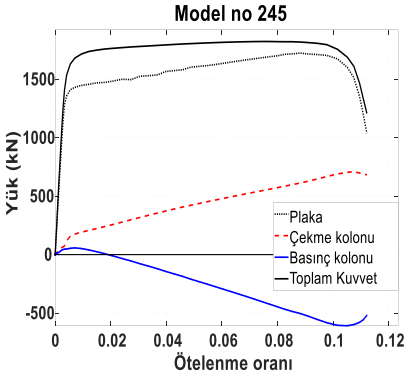
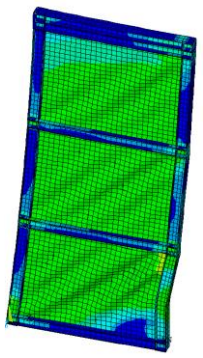
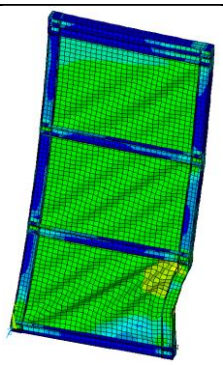
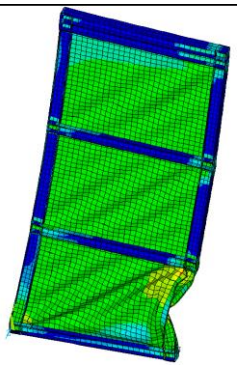
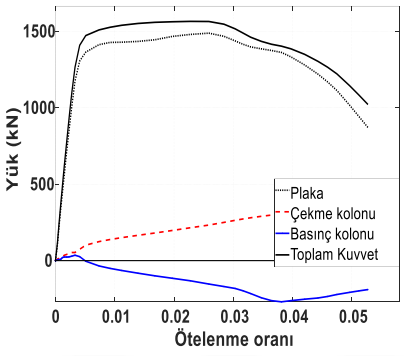
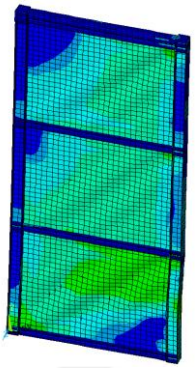
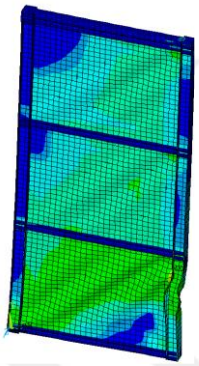
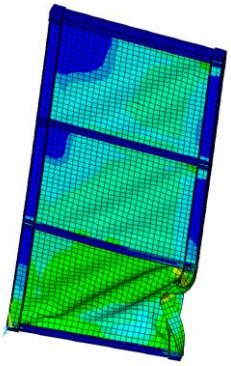
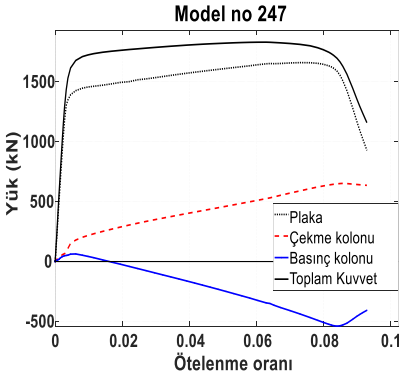
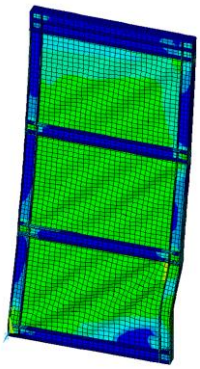
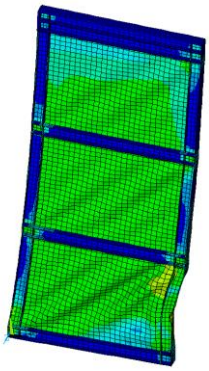
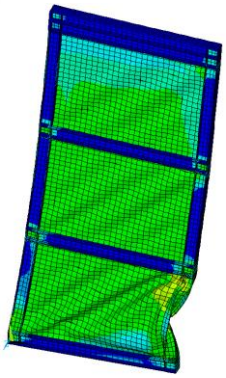
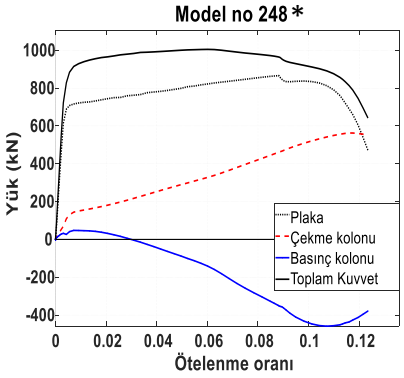
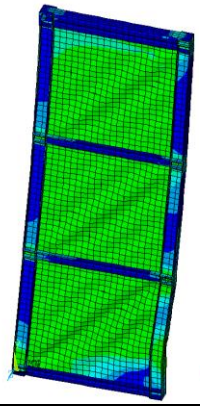
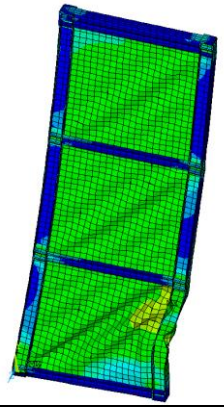
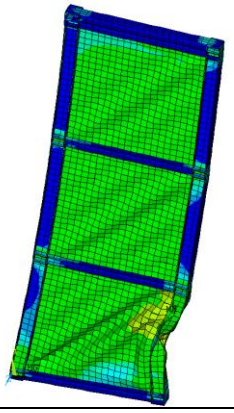
EK-5 (devam)

Yük – Öelenme Oranı Eğrisi	Maksimum Kuvvet	Nihai Ötelenme	Analiz Sonu
			
			
			
			

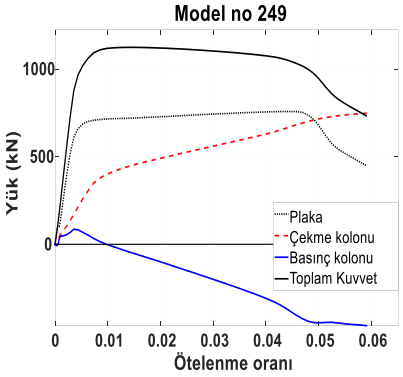
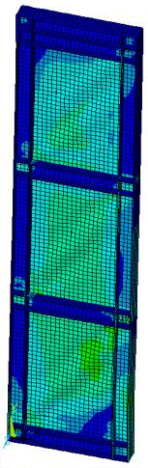
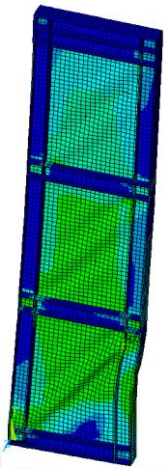
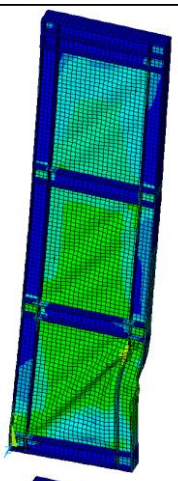
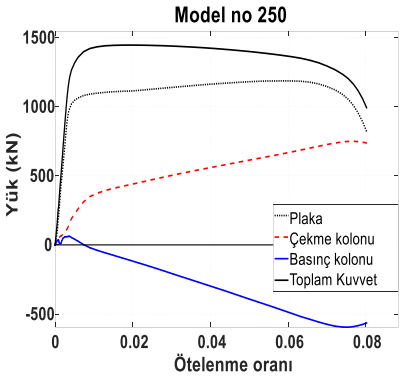
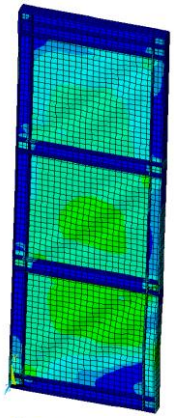
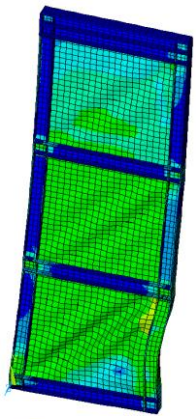
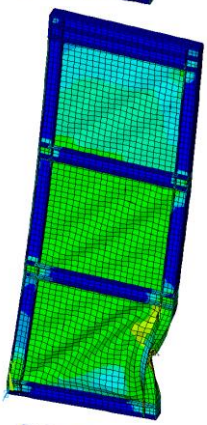
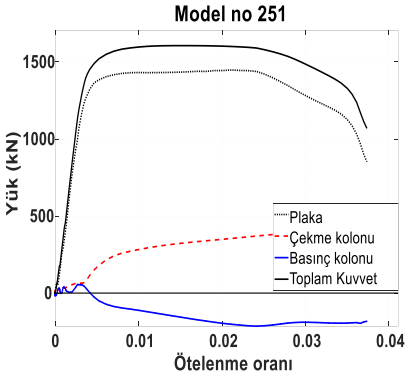
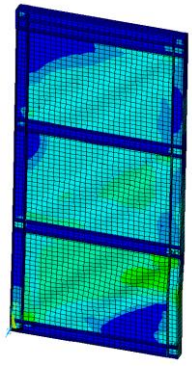
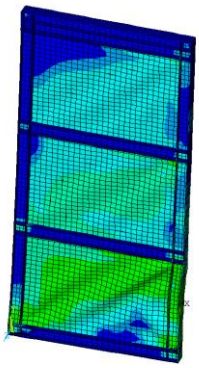
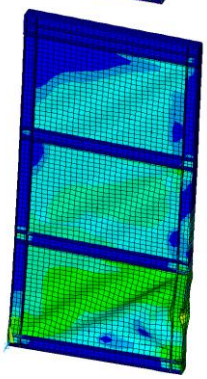
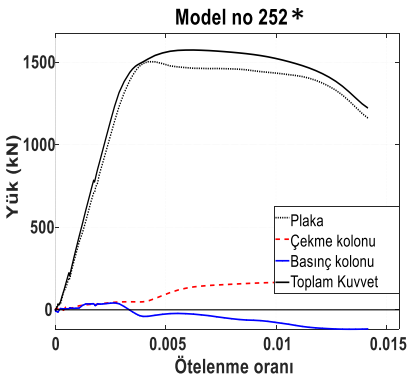
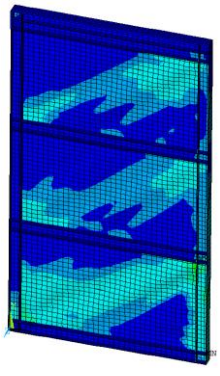
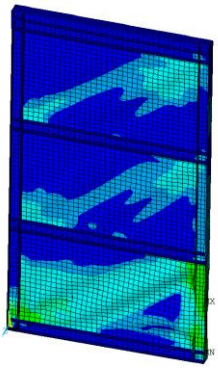
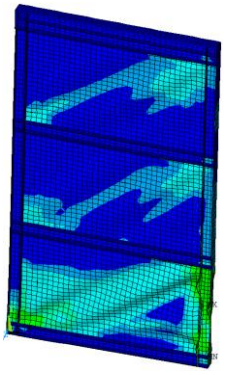
EK-5 (devam)

Yük – Öelenme Oranı Eğrisi	Maksimum Kuvvet	Nihai Ötelenme	Analiz Sonu
			
			
			
			

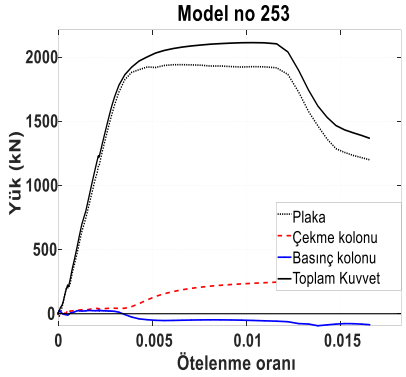
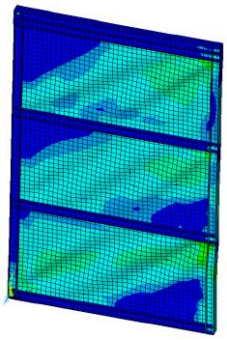
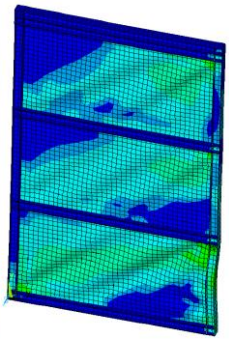
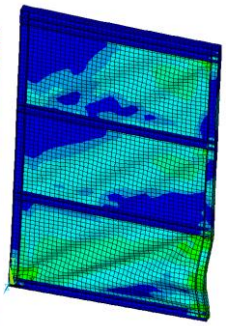
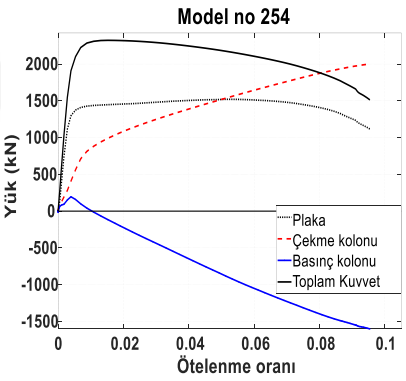
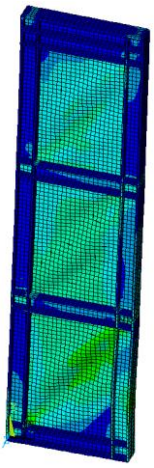
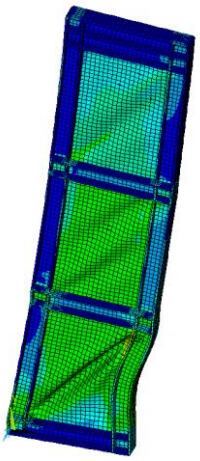
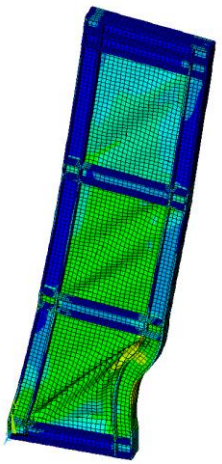
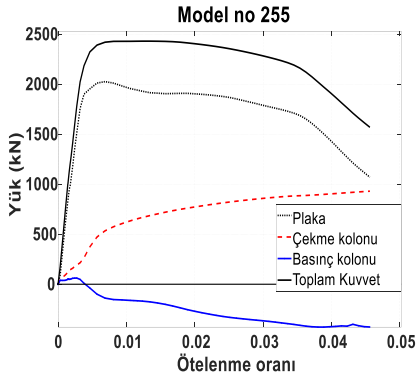
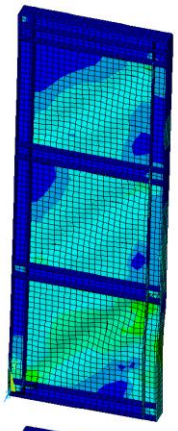
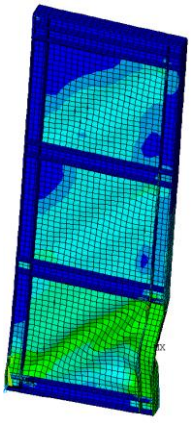
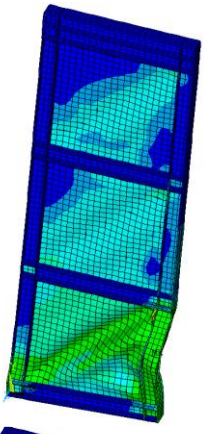
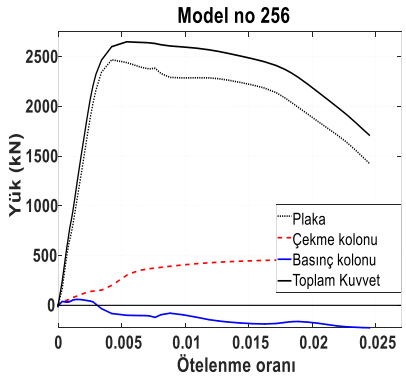
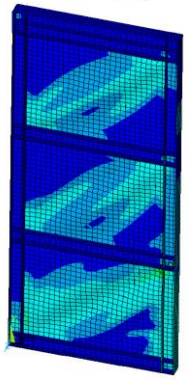
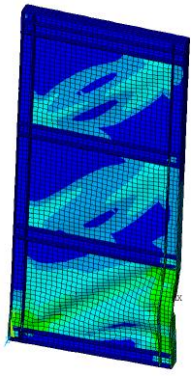
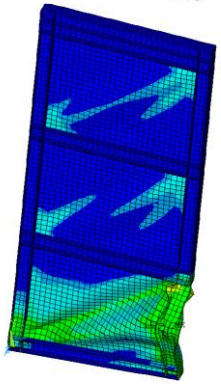
EK-5 (devam)

Yük – Öelenme Oranı Eğrisi	Maksimum Kuvvet	Nihai Ötelenme	Analiz Sonu
			
			
			
			

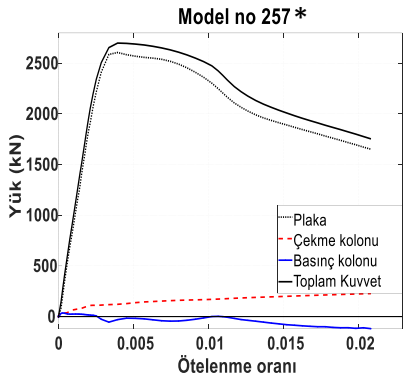
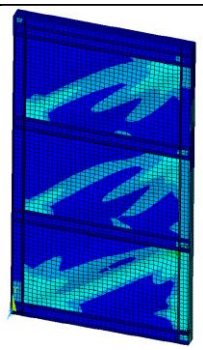
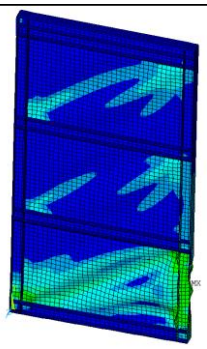
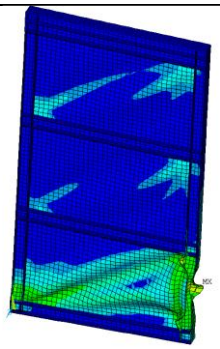
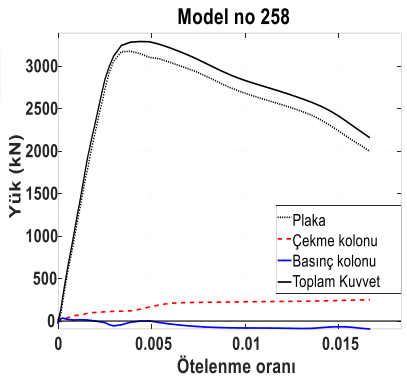
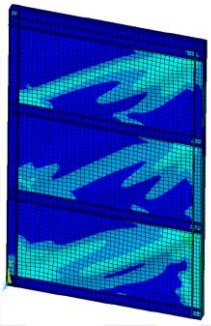
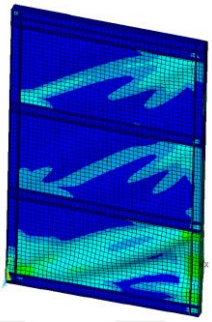
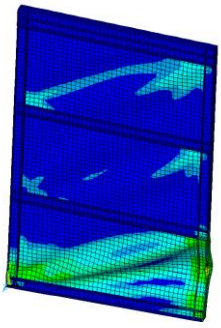
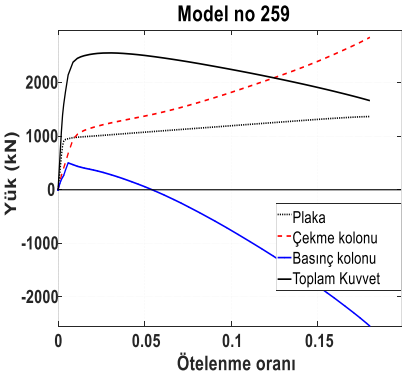
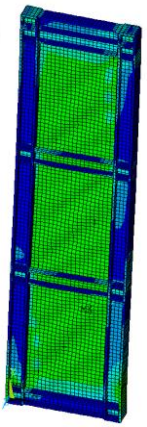
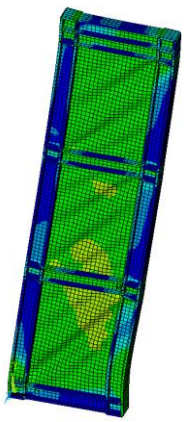
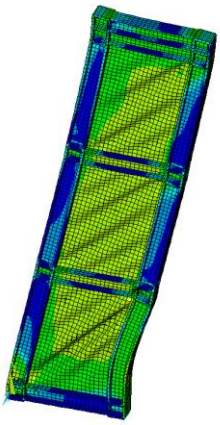
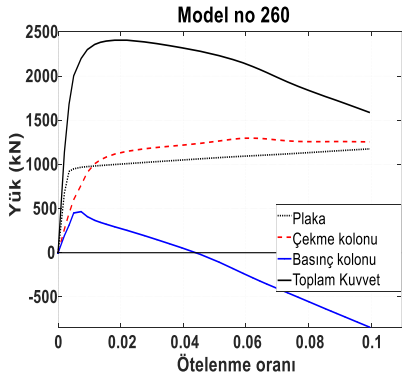
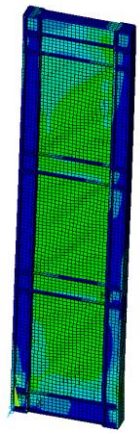
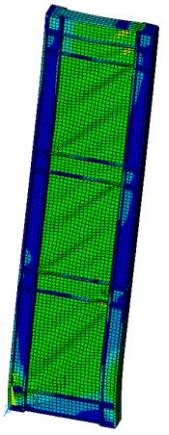
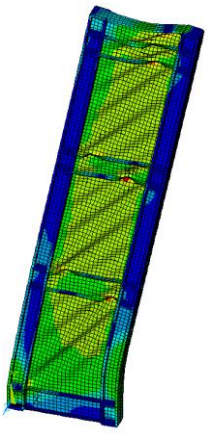
EK-5 (devam)

Yük – Öelenme Oranı Eğrisi	Maksimum Kuvvet	Nihai Ötelenme	Analiz Sonu
			
			
			
			

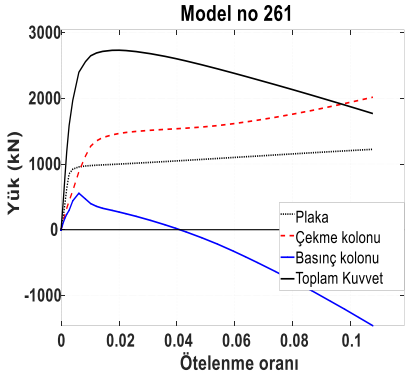
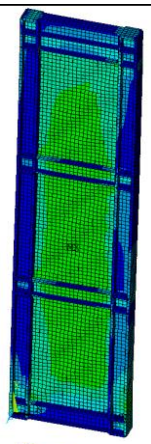
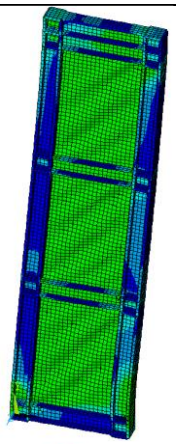
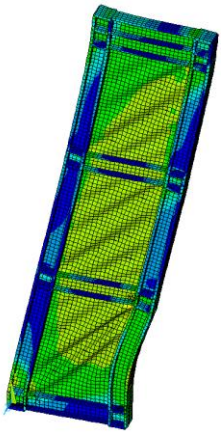
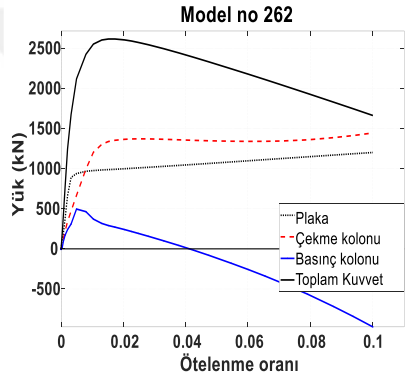
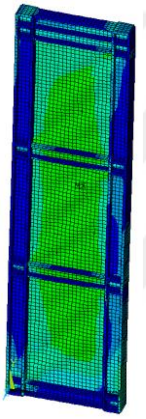
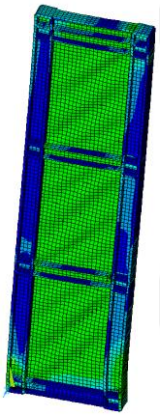
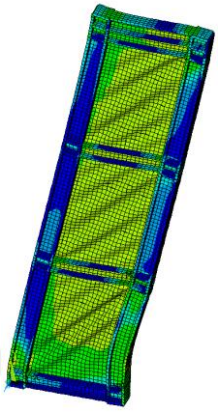
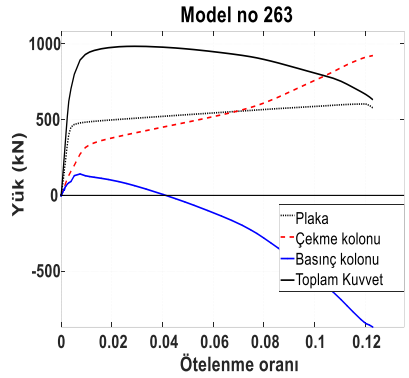
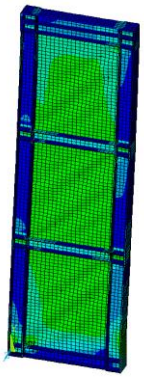
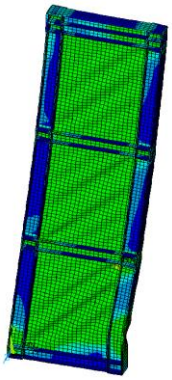
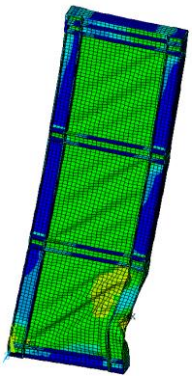
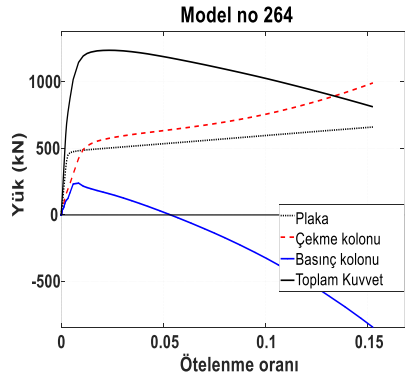
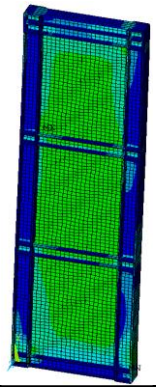
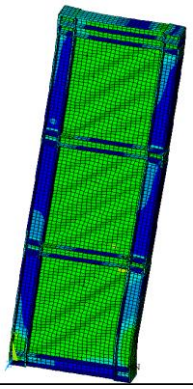
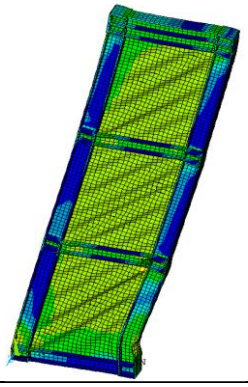
EK-5 (devam)

Yük – Öelenme Oranı Eğrisi	Maksimum Kuvvet	Nihai Ötelenme	Analiz Sonu
			
			
			
			

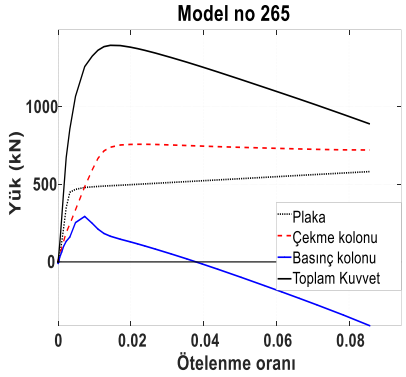
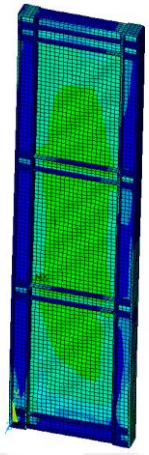
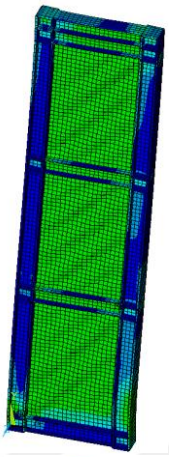
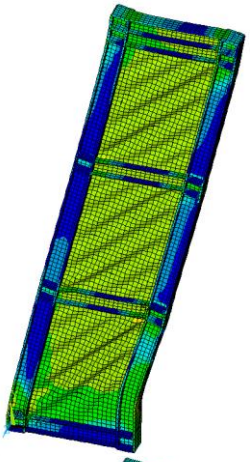
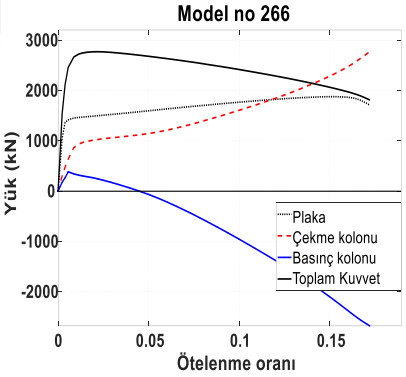
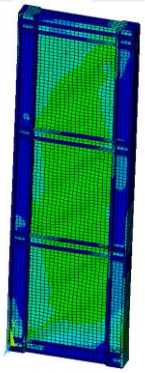
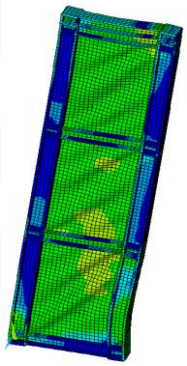
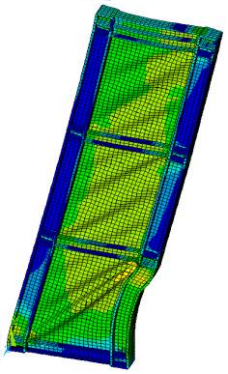
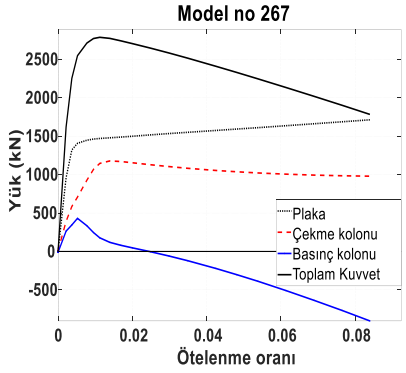
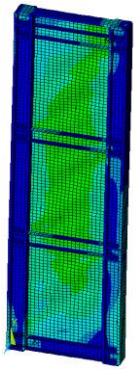
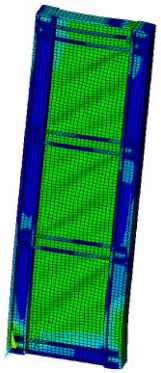
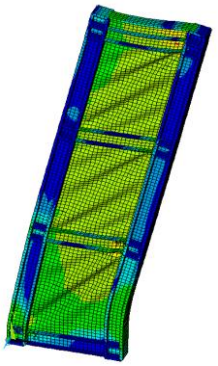
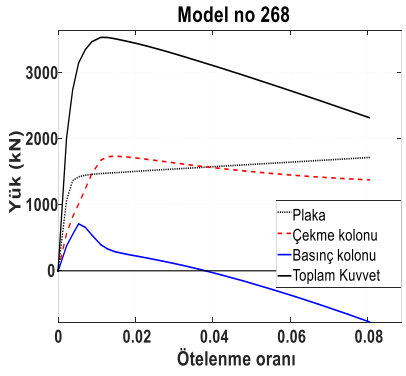
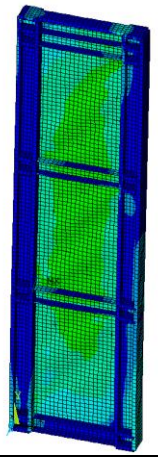
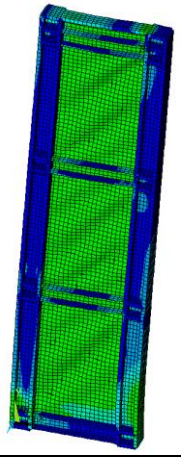
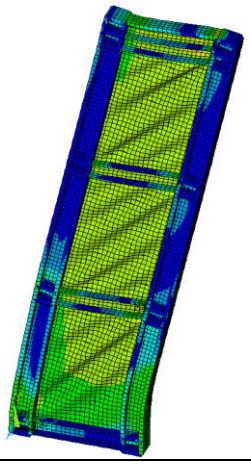
EK-5 (devam)

Yük – Öelenme Oranı Eğrisi	Maksimum Kuvvet	Nihai Ötelenme	Analiz Sonu
			
			
			
			

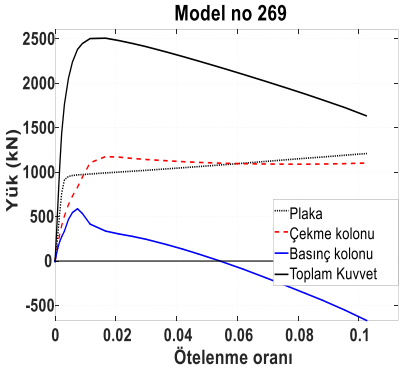
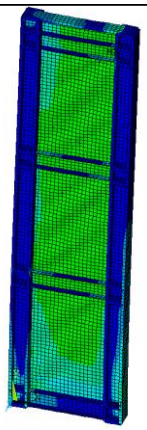
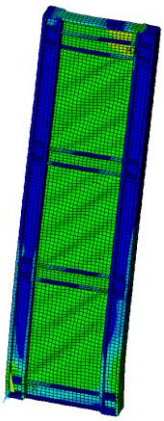
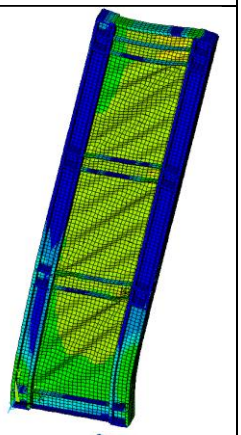
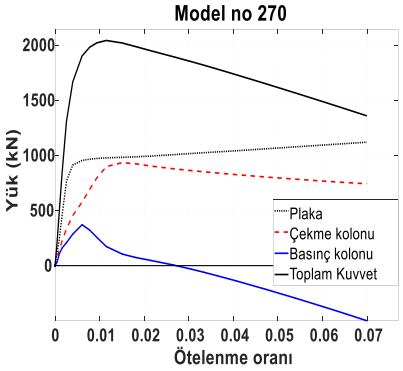
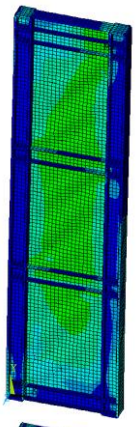
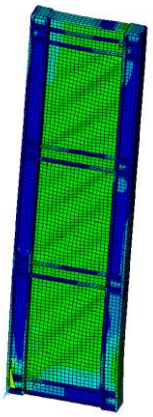
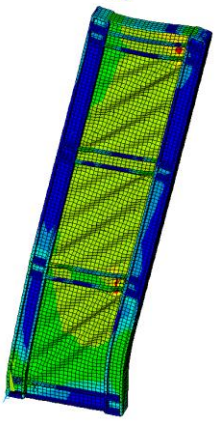
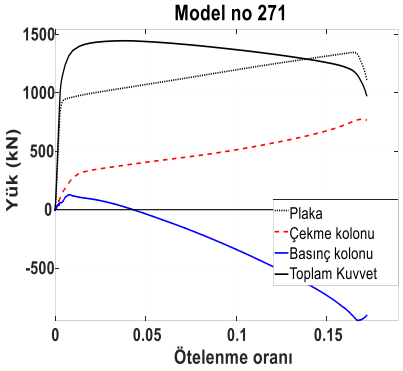
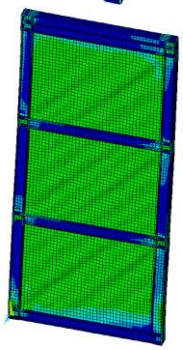
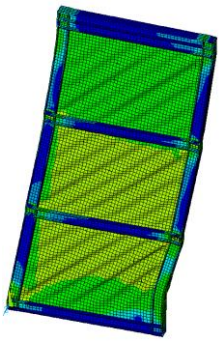
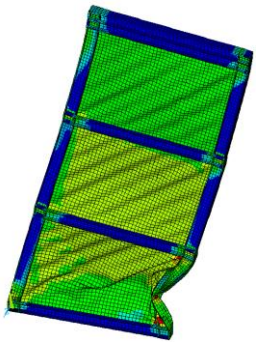
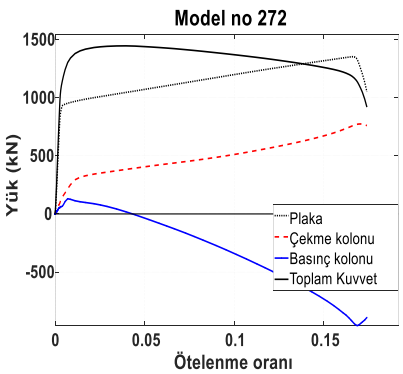
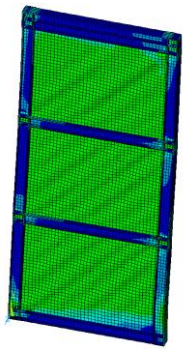
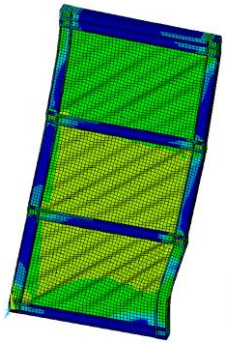
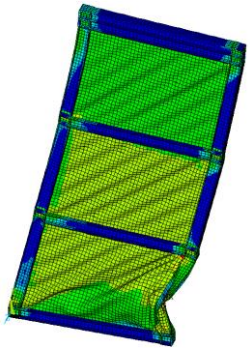
EK-5 (devam)

Yük – Öelenme Oranı Eğrisi	Maksimum Kuvvet	Nihai Ötelenme	Analiz Sonu
			
			
			
			

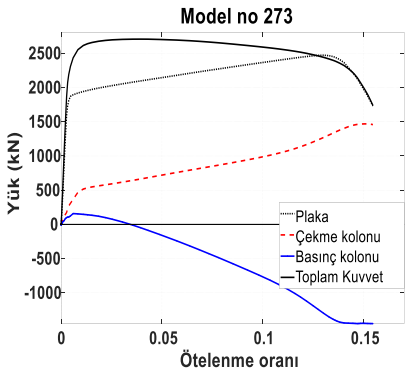
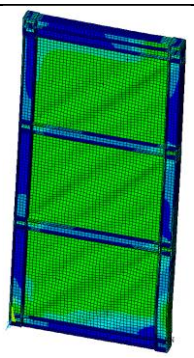
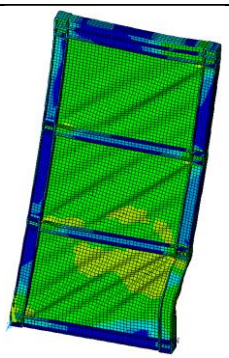
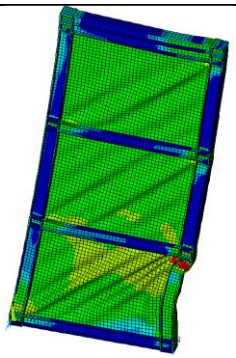
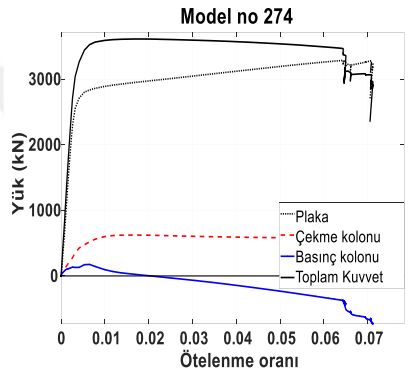
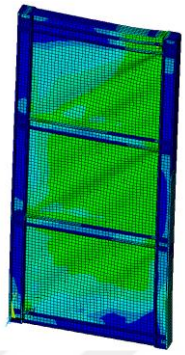
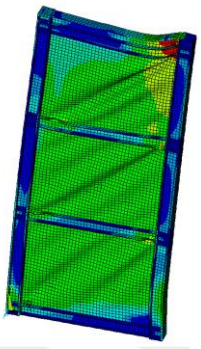
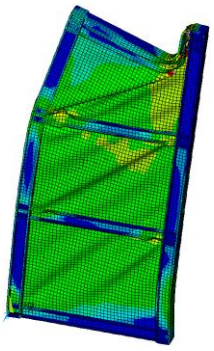
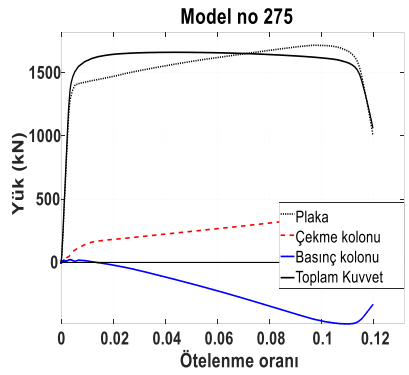
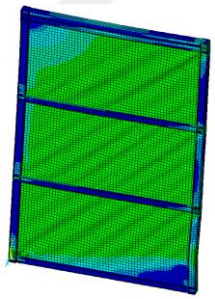
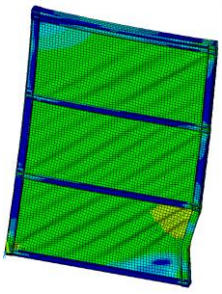
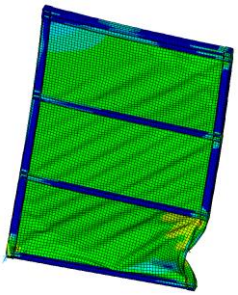
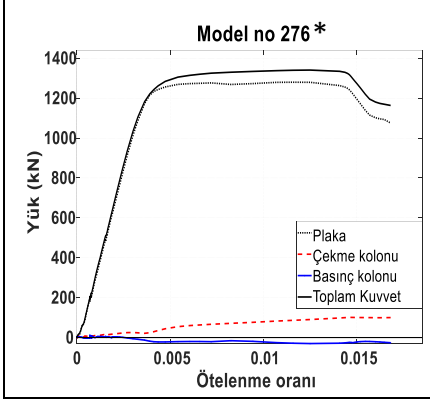
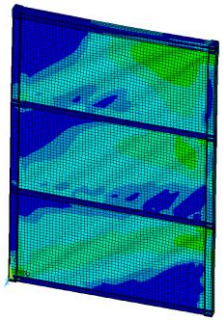
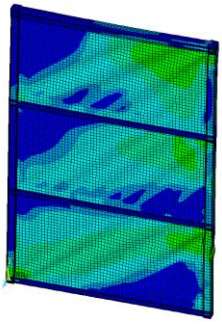
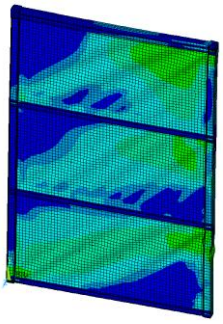
EK-5 (devam)

Yük – Öelenme Oranı Eğrisi	Maksimum Kuvvet	Nihai Ötelenme	Analiz Sonu
			
			
			
			

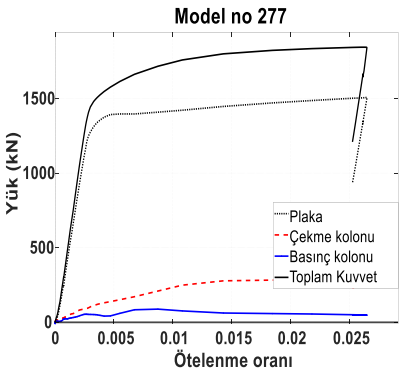
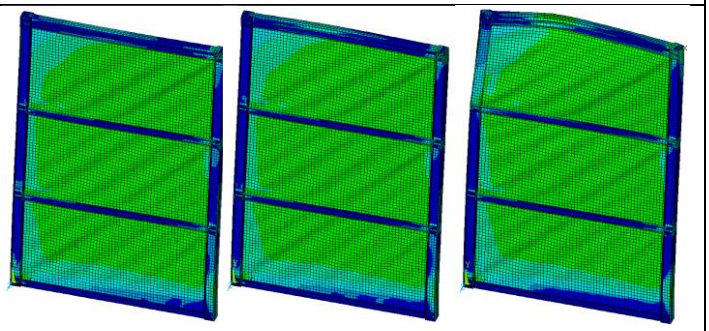
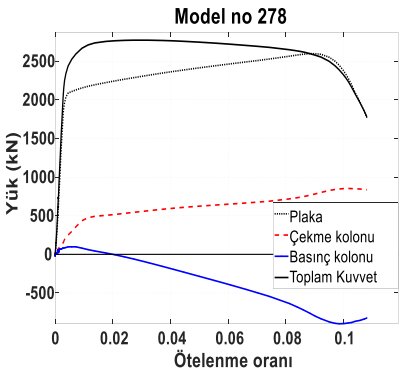
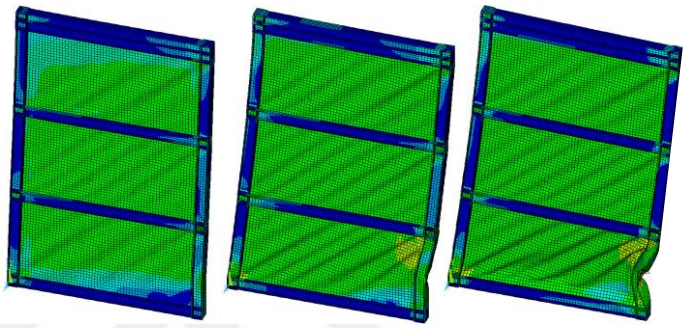
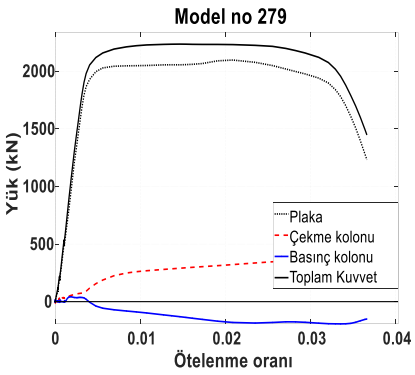
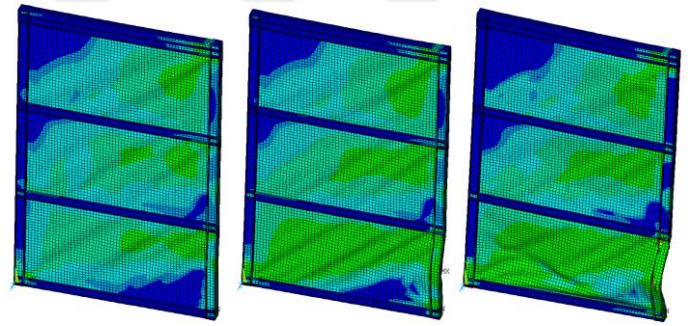
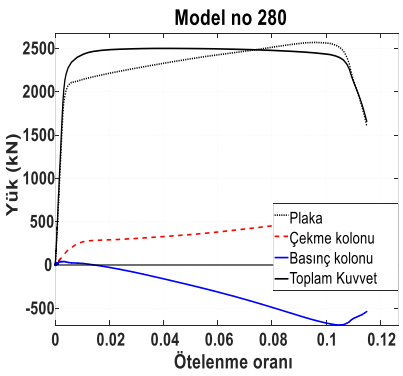
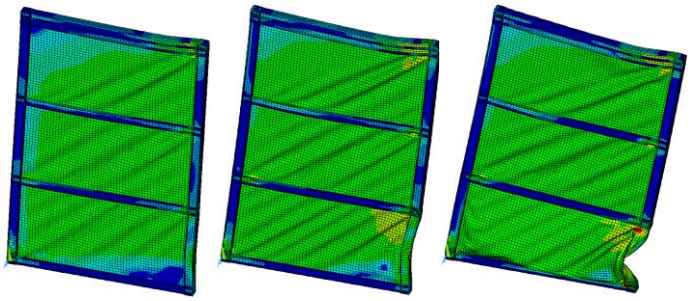
EK-5 (devam)

Yük – Öelenme Oranı Eğrisi	Maksimum Kuvvet	Nihai Ötelenme	Analiz Sonu
			
			
			
			

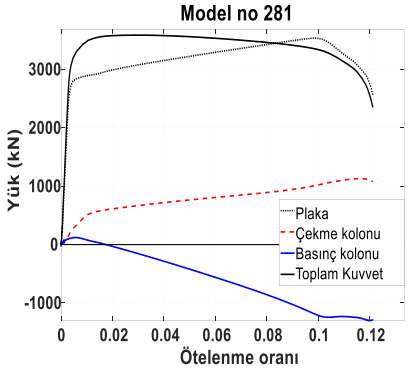
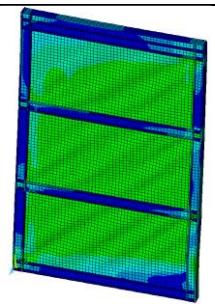
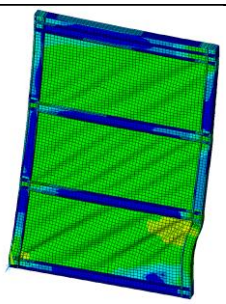
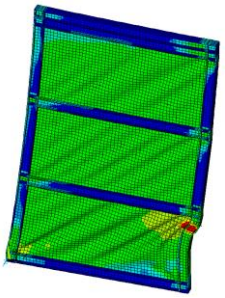
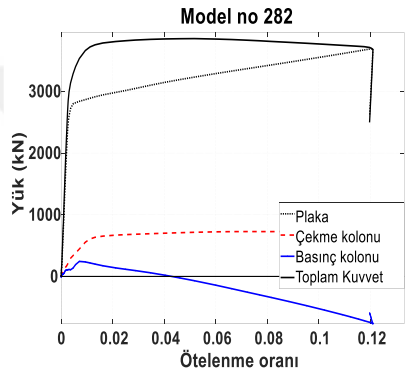
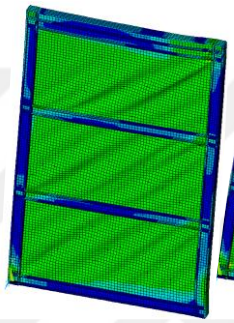
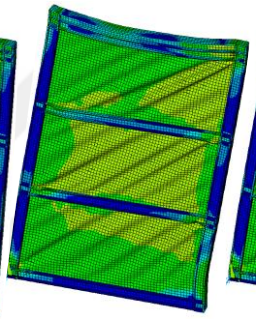
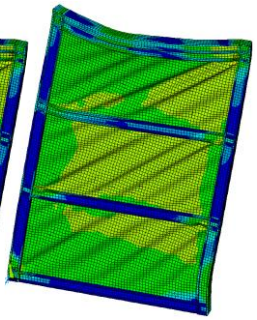
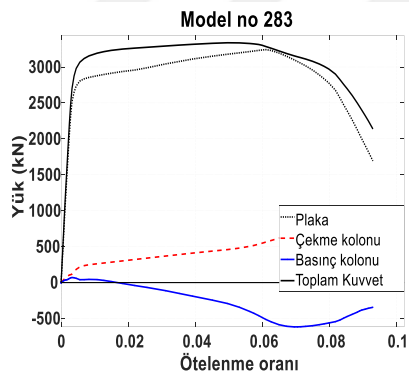
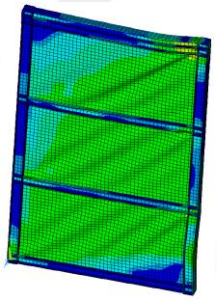
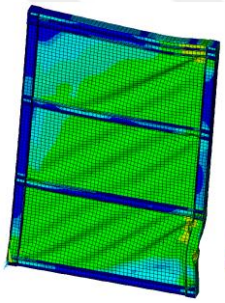
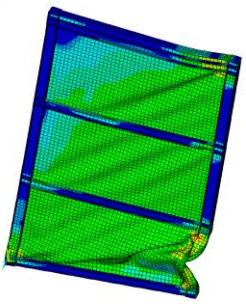
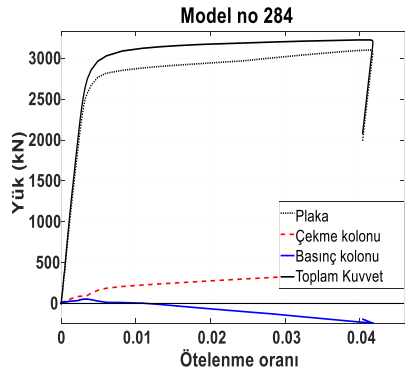
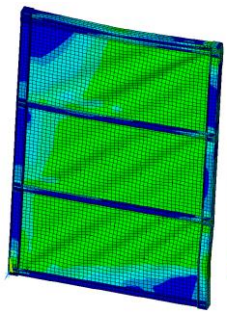
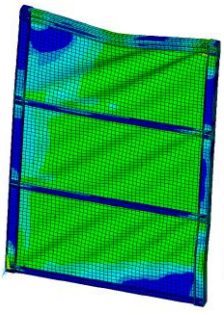
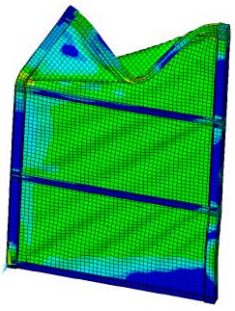
EK-5 (devam)

Yük – Öelenme Oranı Eğrisi	Maksimum Kuvvet	Nihai Ötelenme	Analiz Sonu
			
			
			
			

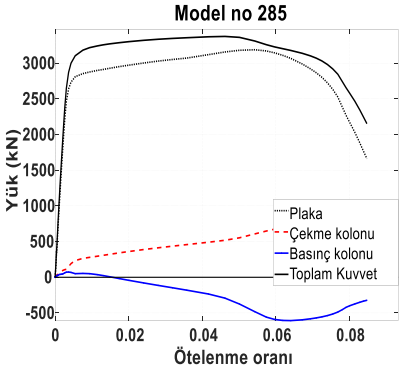
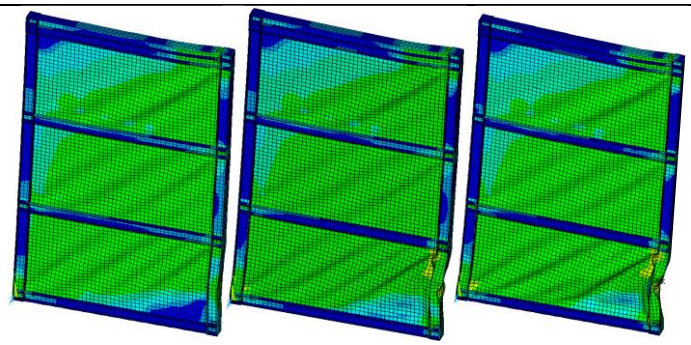
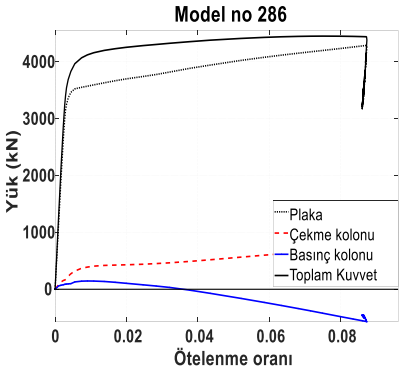
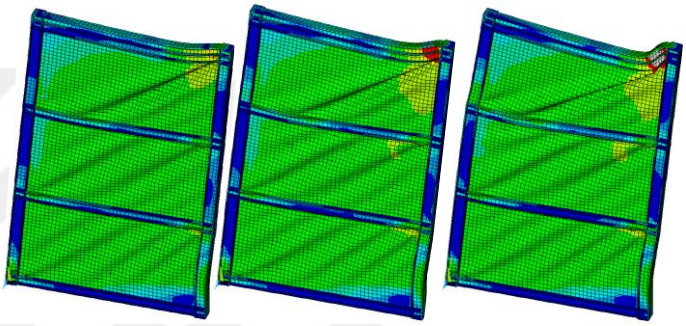
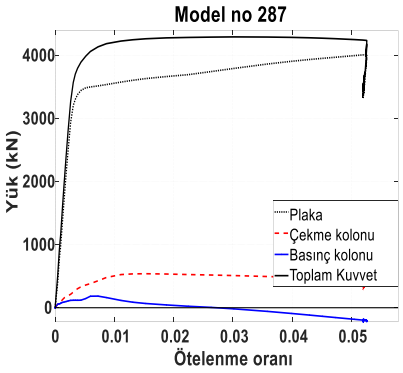
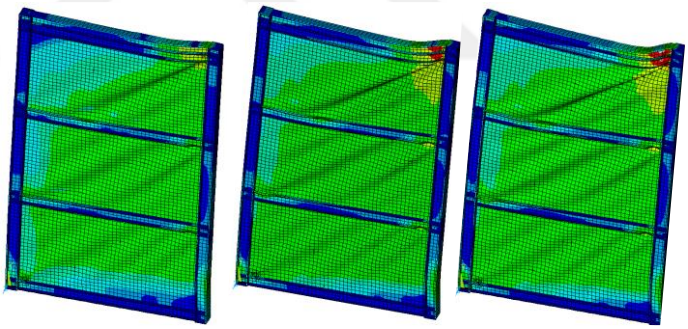
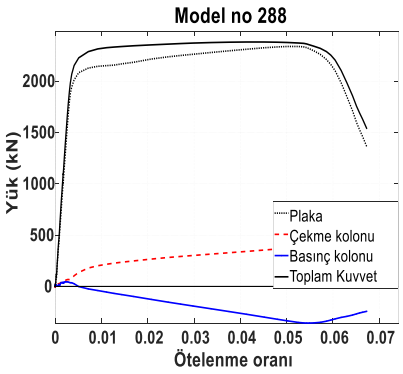
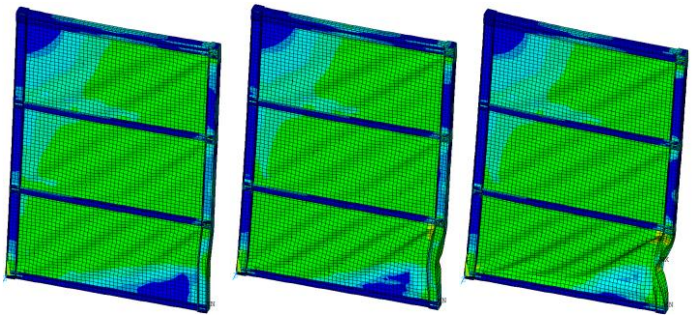
EK-5 (devam)

Yük – Öelenme Oranı Eğrisi	Maksimum Kuvvet	Nihai Ötelenme	Analiz Sonu
			
			
			
			

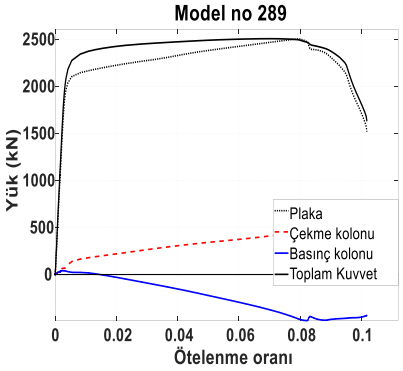
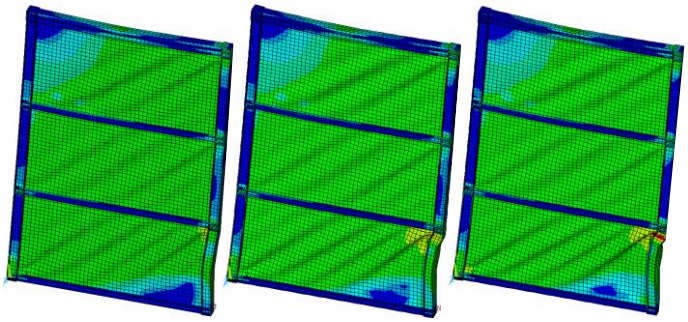
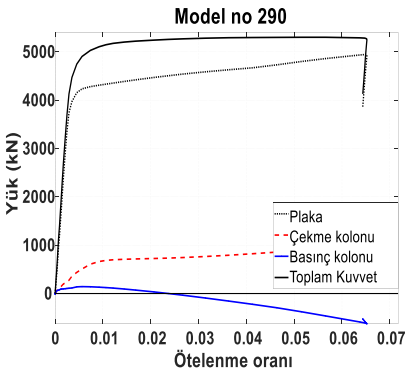
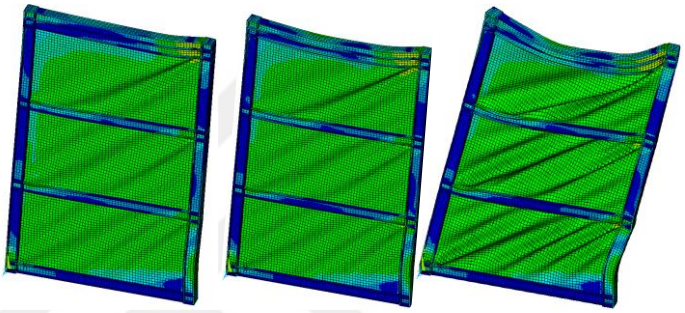
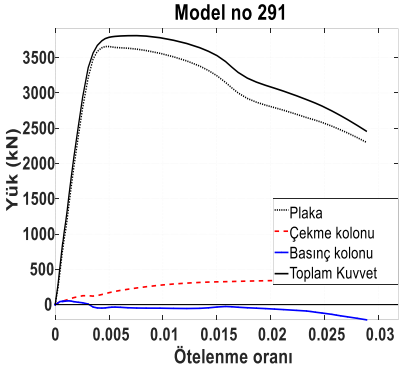
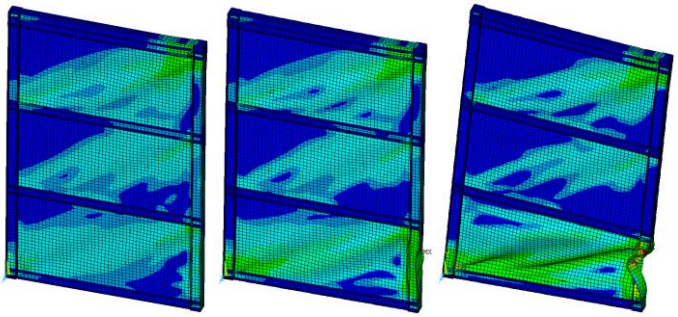
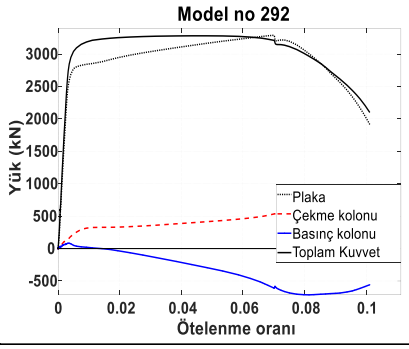
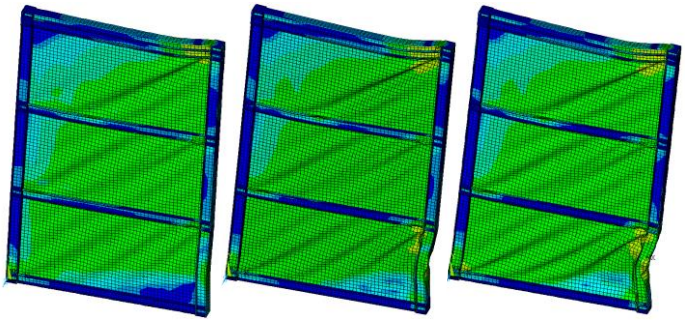
EK-5 (devam)

Yük – Öelenme Oranı Eğrisi	Maksimum Kuvvet	Nihai Ötelenme	Analiz Sonu
			
			
			
			

EK-5 (devam)

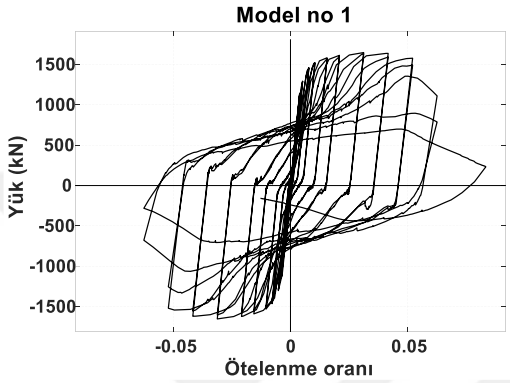
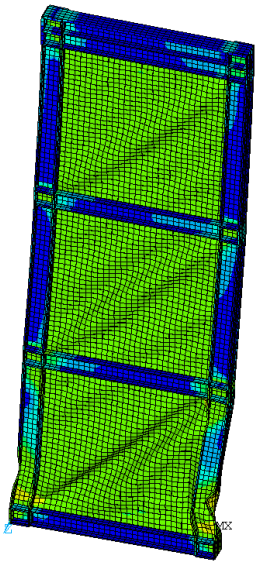
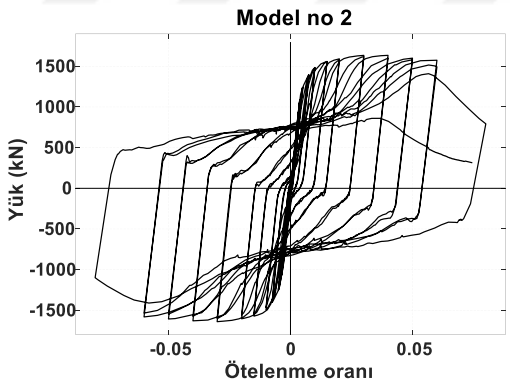
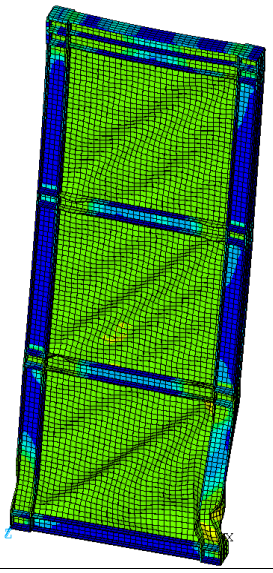
Yük – Öelenme Oranı Eğrisi	Maksimum Kuvvet	Nihai Ötelenme	Analiz Sonu
			
			
			
			

EK-5 (devam)

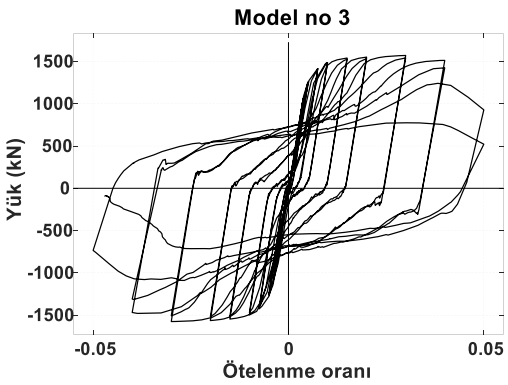
Yük – Öelenme Oranı Eğrisi	Maksimum Kuvvet	Nihai Ötelenme	Analiz Sonu
			
			
			
			

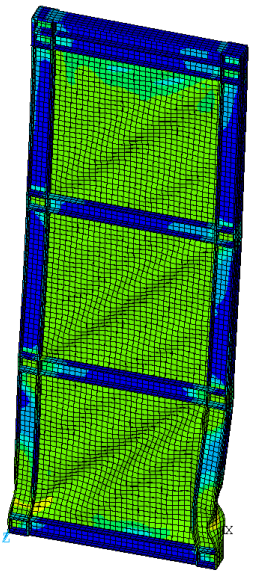
EK-6

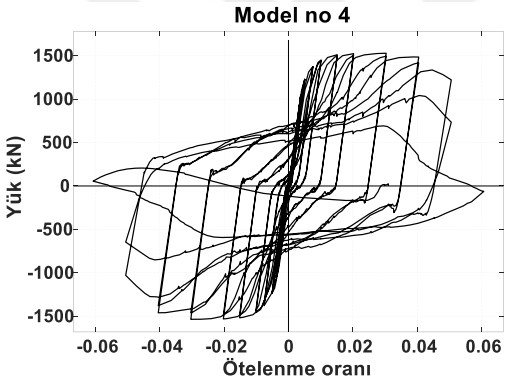
ÇEVRİMSEL YÜKLEME ALTINDAKİ MODELLERİN YÜK-ÖTELENME EĞRİLERİ VE NİHAİ ÖTELENMEDE GERİNİM ÇİZİMLERİ

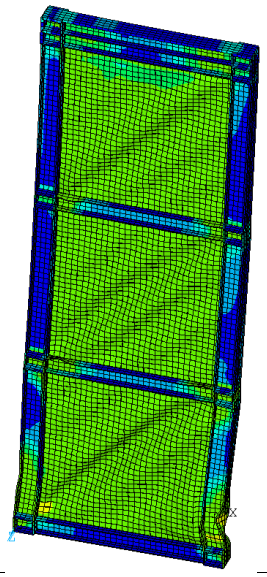
Yük – Öteleneme Oranı eğrisi	Nihai ötelenmede gerinim durumu
	
	

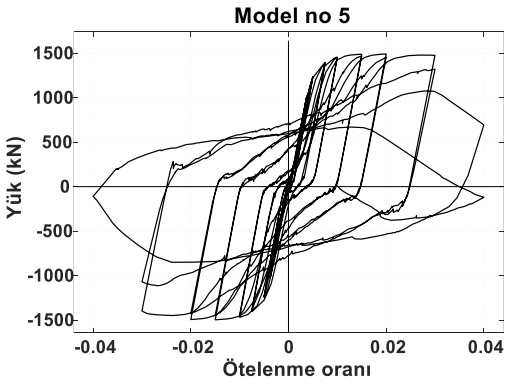
EK-6 (devam)

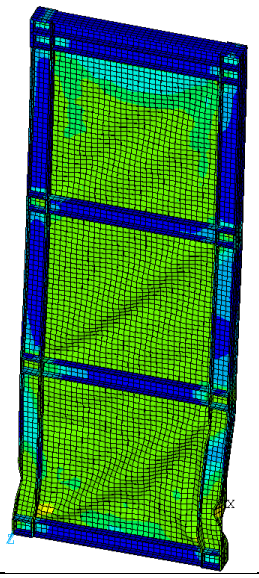

Model no 3
Yük (kN)
1500
1000
500
0
-500
-1000
-1500
-0.05
0
0.05
Ötelenme oranı



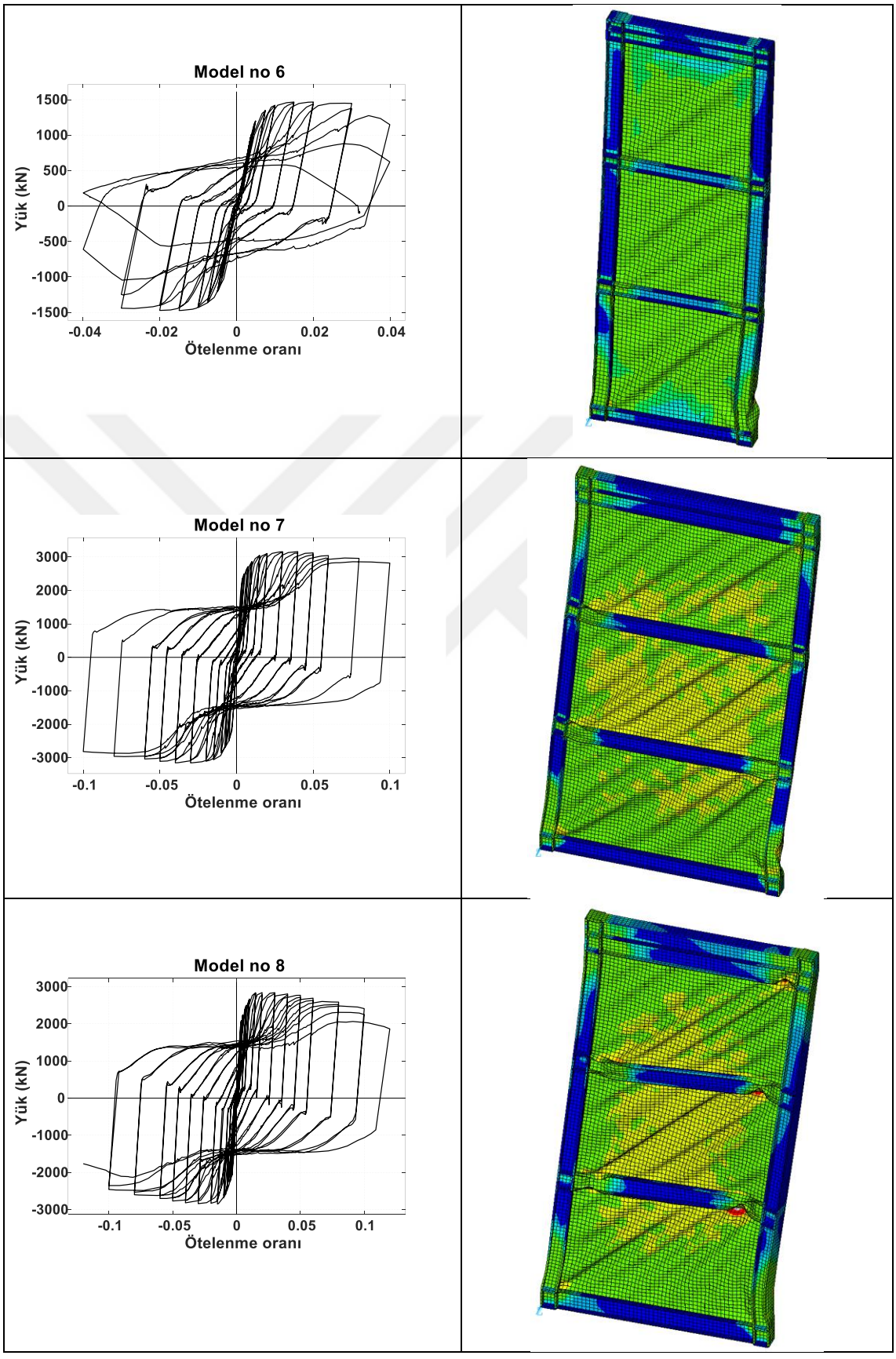

Model no 4
Yük (kN)
1500
1000
500
0
-500
-1000
-1500
-0.06
-0.04
-0.02
0
0.02
0.04
0.06
Ötelenme oranı



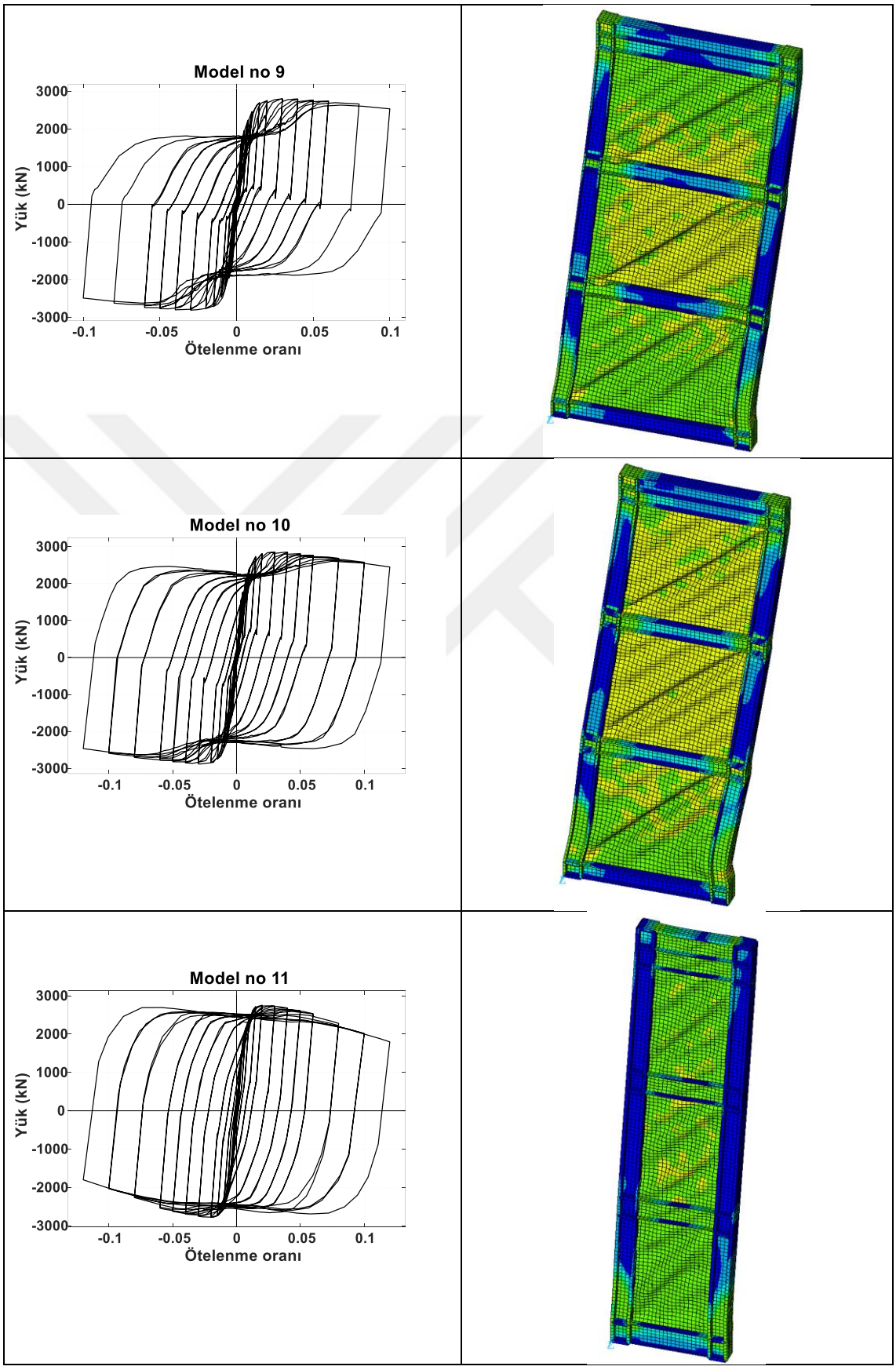

Model no 5
Yük (kN)
1500
1000
500
0
-500
-1000
-1500
-0.04
-0.02
0
0.02
0.04
Ötelenme oranı



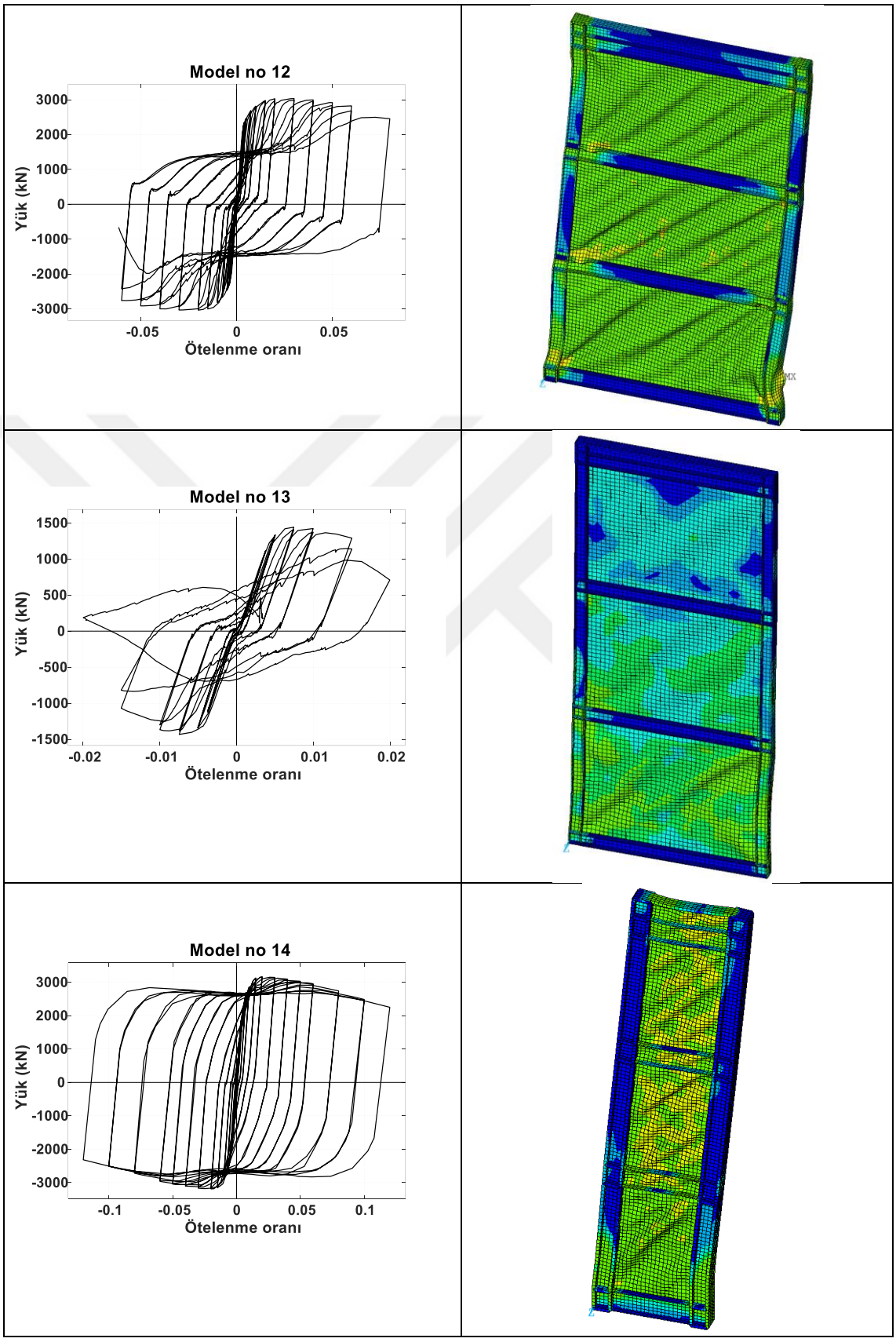
EK-6 (devam)


Model no 6
Yük (kN)
1500
1000
500
0
-500
-1000
-1500
-0.04
-0.02
0
0.02
0.04
Ötelenme oranı
Model no 7
Yük (kN)
3000
2000
1000
0
-1000
-2000
-3000
-0.1
-0.05
0
0.05
0.1
Ötelenme oranı
Model no 8
Yük (kN)
3000
2000
1000
0
-1000
-2000
-3000
-0.1
-0.05
0
0.05
0.1
Ötelenme oranı

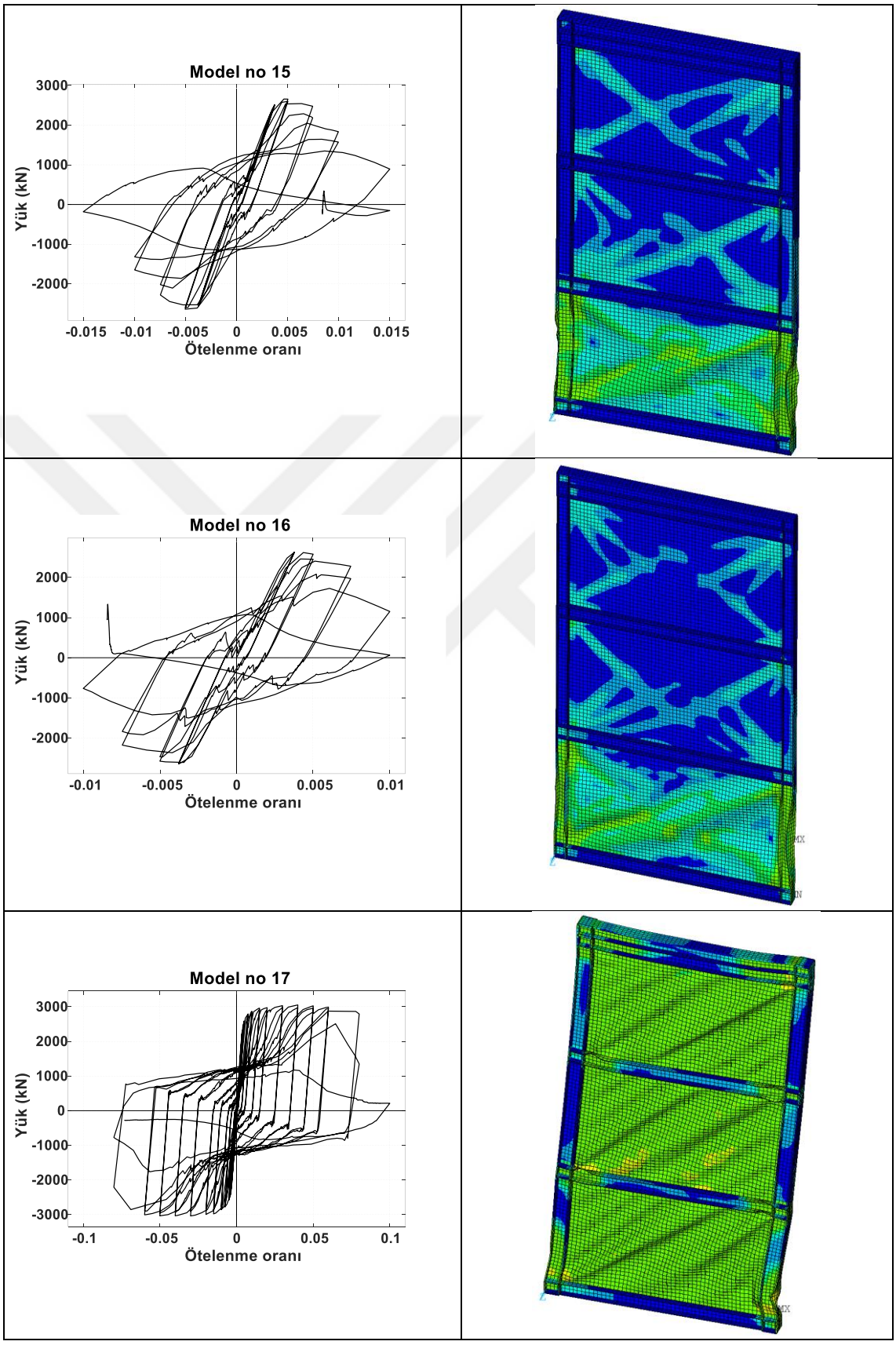
EK-6 (devam)


Model no 9
Yük (kN)
Ötelenme oranı
Model no 10
Yük (kN)
Ötelenme oranı
Model no 11
Yük (kN)
Ötelenme oranı

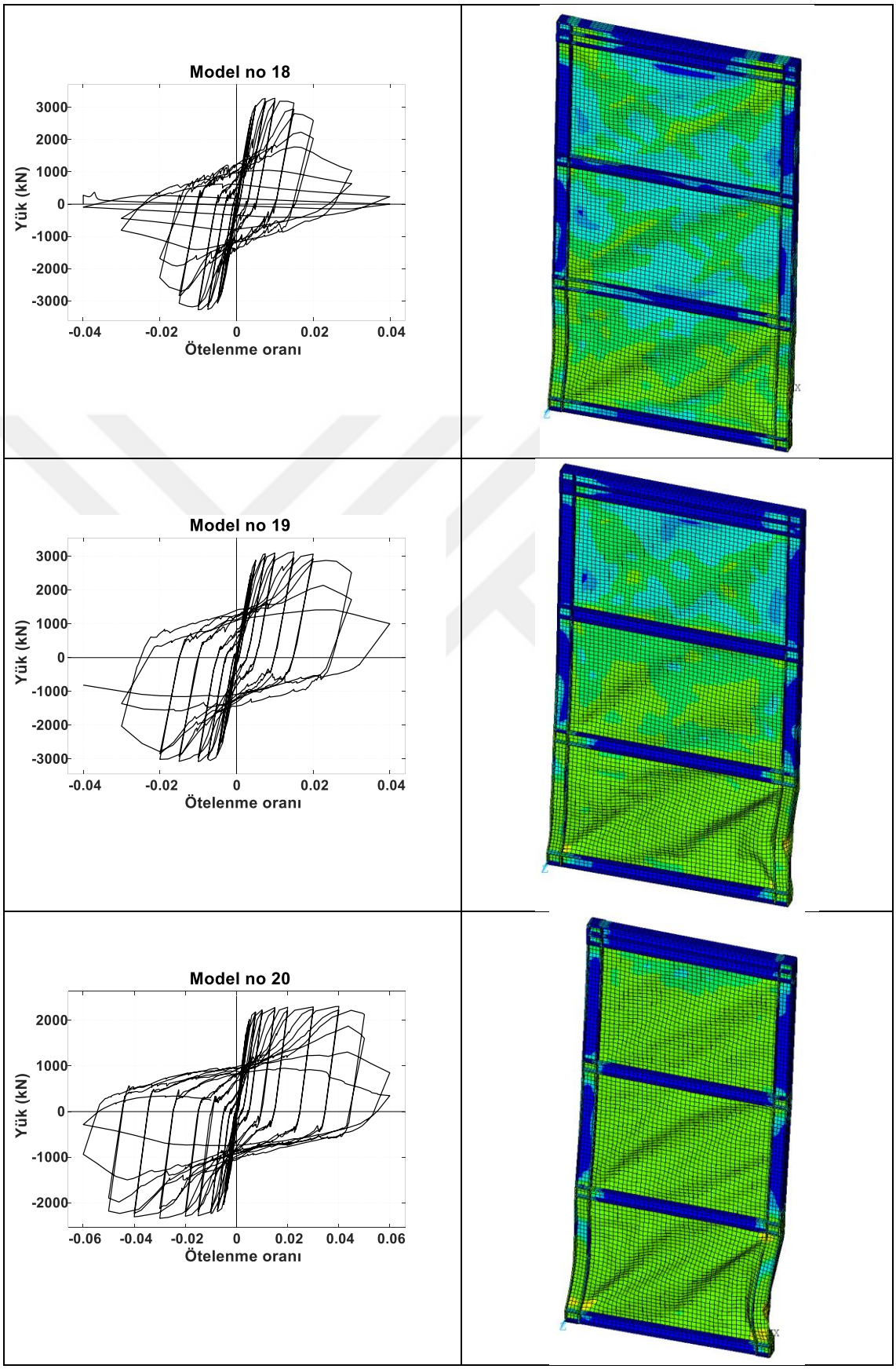
EK-6 (devam)


Model no 12
Yük (kN)
3000
2000
1000
0
-1000
-2000
-3000
-0.05
0
0.05
Ötelenme oranı
Model no 13
Yük (kN)
1500
1000
500
0
-500
-1000
-1500
-0.02
-0.01
0
0.01
0.02
Ötelenme oranı
Model no 14
Yük (kN)
3000
2000
1000
0
-1000
-2000
-3000
-0.1
-0.05
0
0.05
0.1
Ötelenme oranı

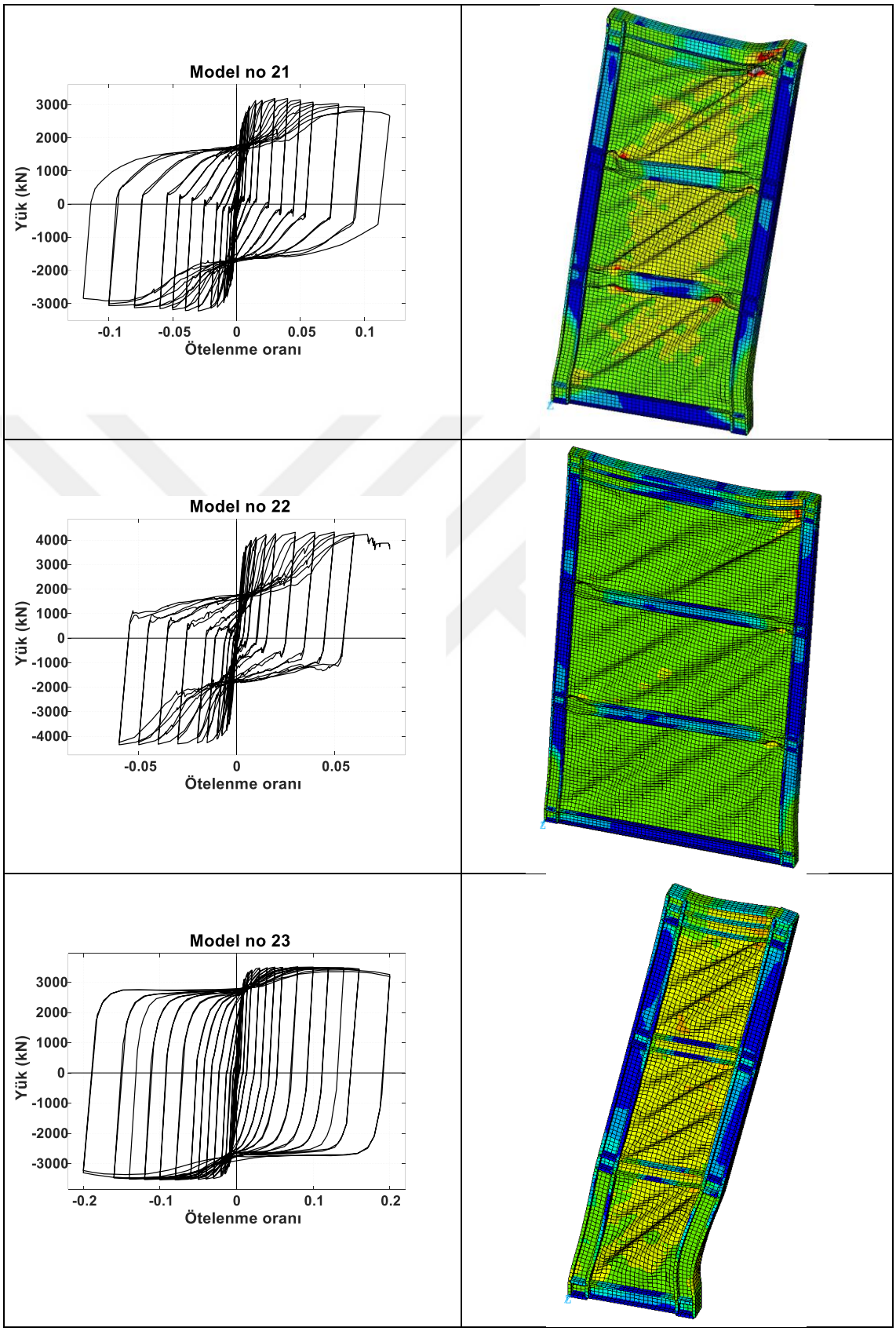
EK-6 (devam)


Model no 15
Yük (kN)
Ötelenme oranı
Model no 16
Yük (kN)
Ötelenme oranı
Model no 17
Yük (kN)
Ötelenme oranı

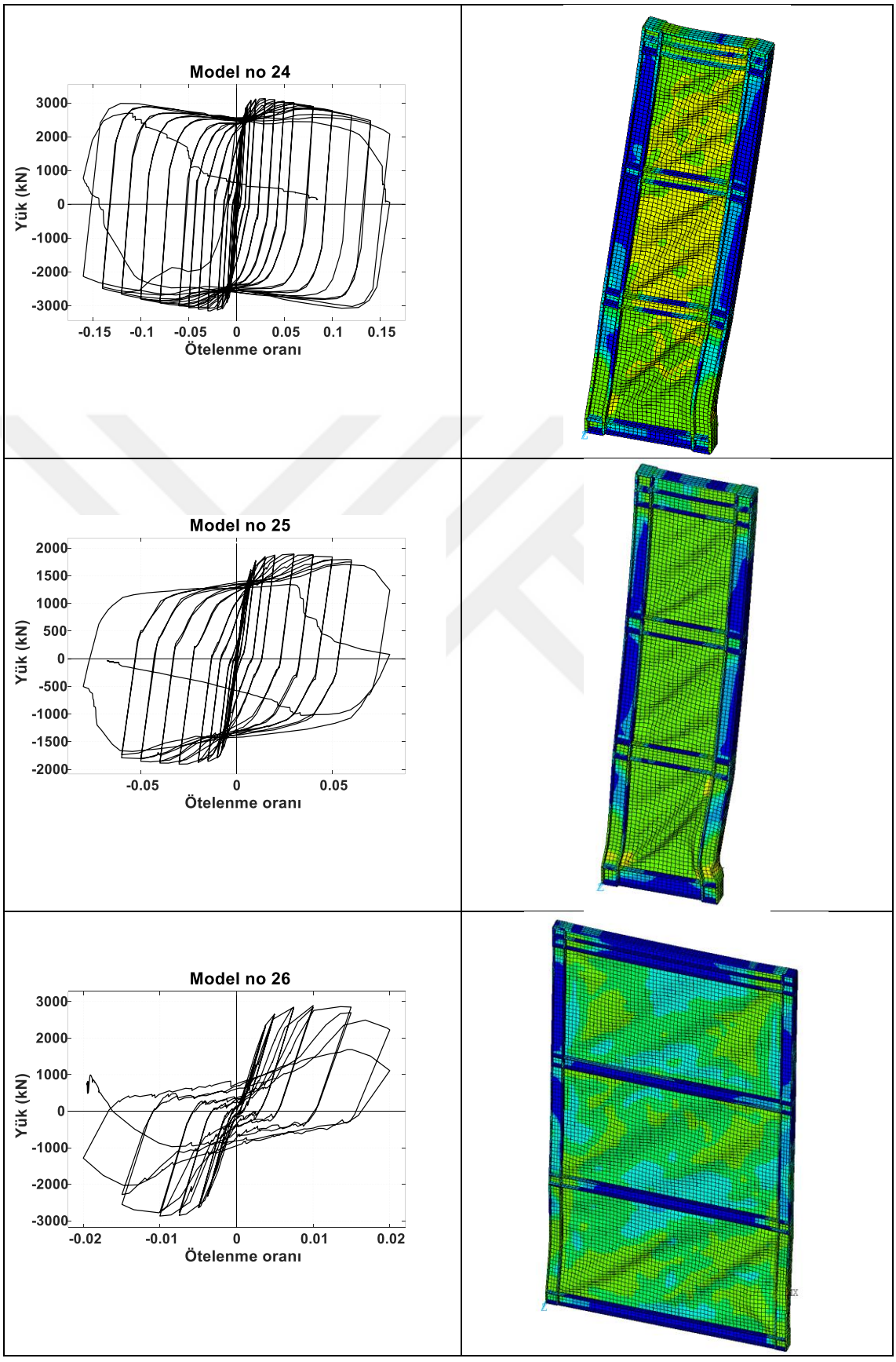
EK-6 (devam)


Model no 18
Yük (kN)
3000
2000
1000
0
-1000
-2000
-3000
-0.04
-0.02
0
0.02
0.04
Ötelenme oranı
Model no 19
Yük (kN)
3000
2000
1000
0
-1000
-2000
-3000
-0.04
-0.02
0
0.02
0.04
Ötelenme oranı
Model no 20
Yük (kN)
2000
1000
0
-1000
-2000
-0.06
-0.04
-0.02
0
0.02
0.04
0.06
Ötelenme oranı

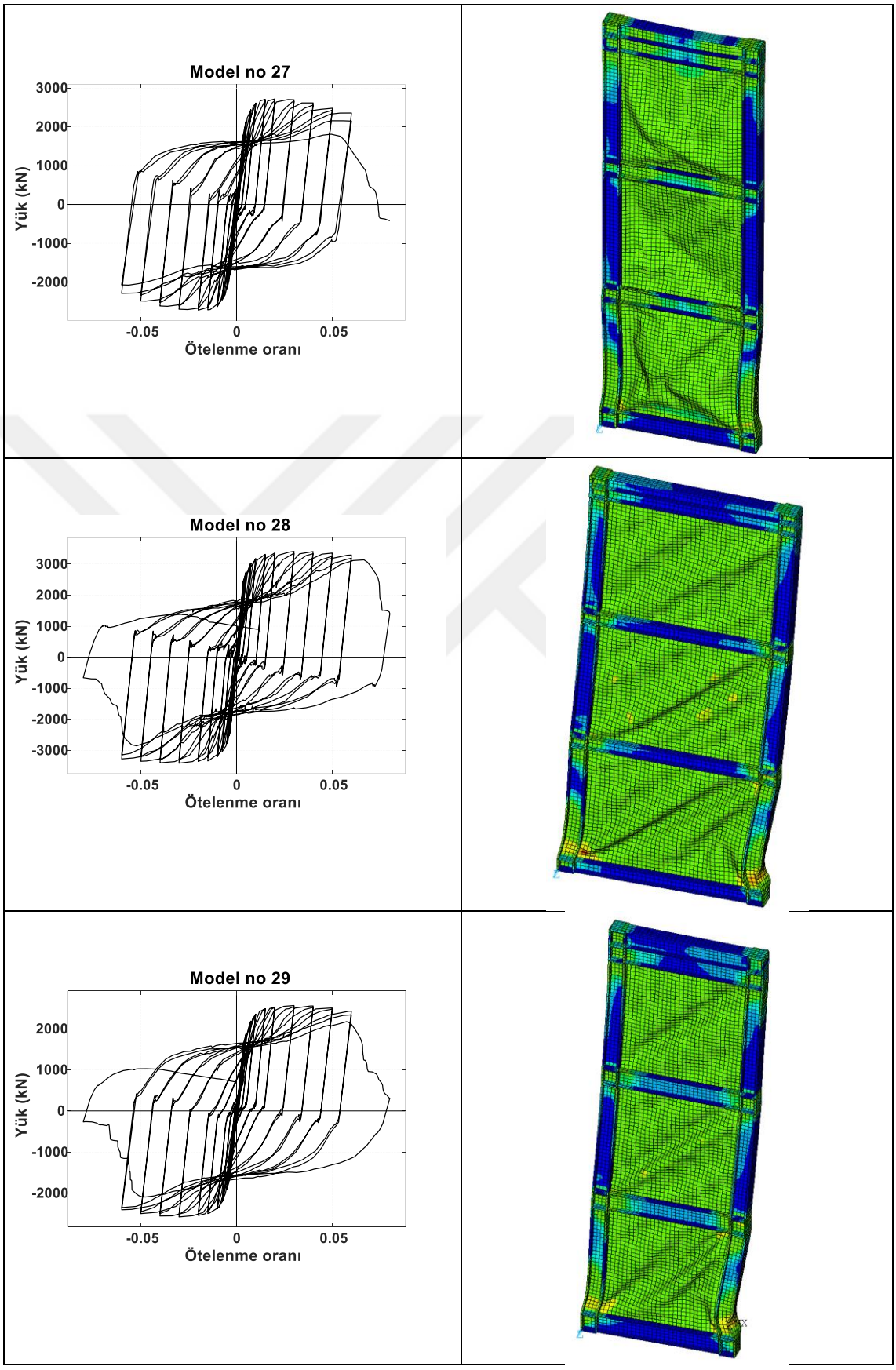
EK-6 (devam)


Model no 21
Yük (kN)
3000
2000
1000
0
-1000
-2000
-3000
-0.1
-0.05
0
0.05
0.1
Ötelenme oranı
Model no 22
Yük (kN)
4000
3000
2000
1000
0
-1000
-2000
-3000
-4000
-0.05
0
0.05
Ötelenme oranı
Model no 23
Yük (kN)
3000
2000
1000
0
-1000
-2000
-3000
-0.2
-0.1
0
0.1
0.2
Ötelenme oranı

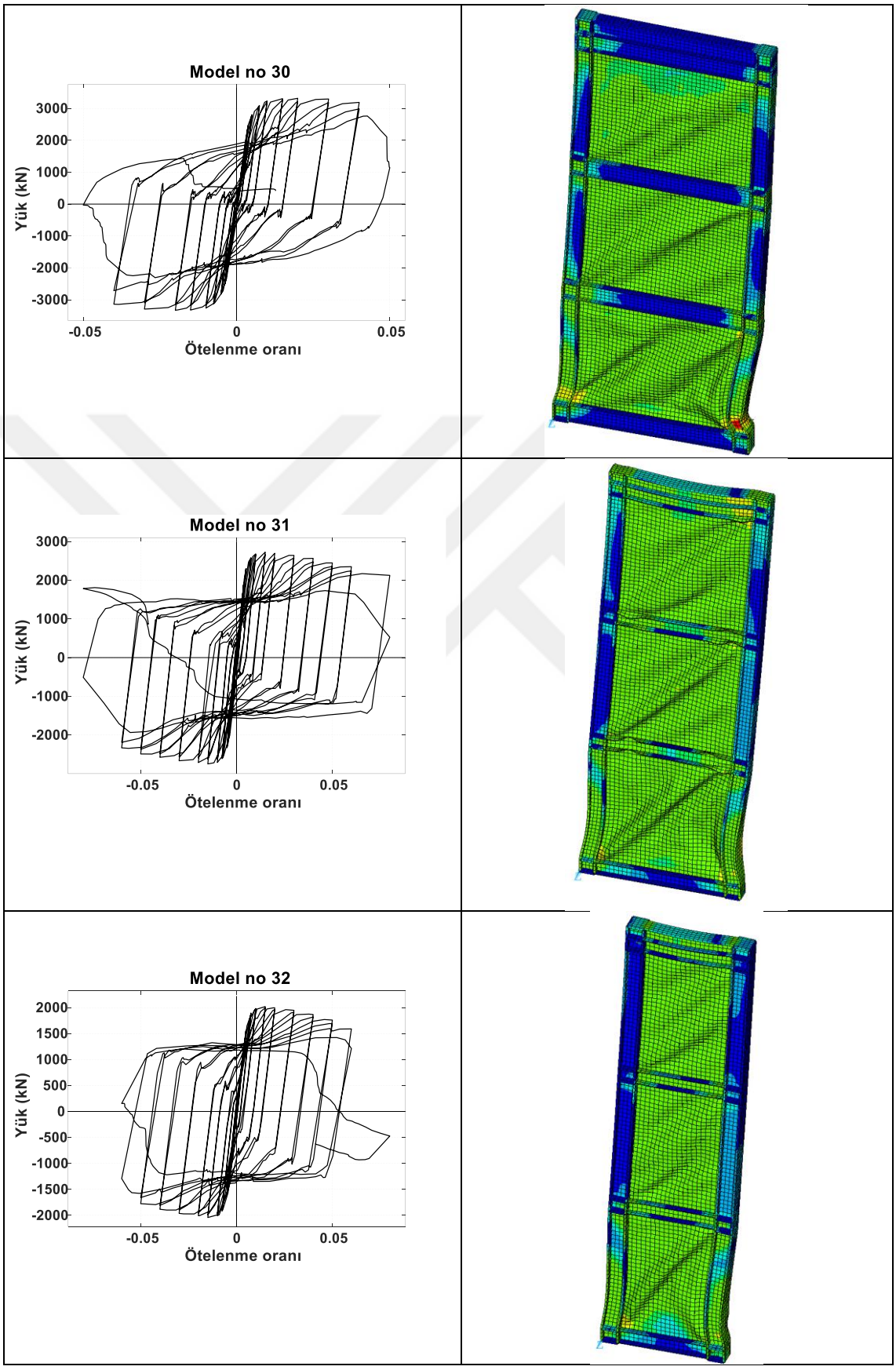
EK-6 (devam)


Model no 24
Yük (kN)
3000
2000
1000
0
-1000
-2000
-3000
-0.15 -0.1 -0.05 0 0.05 0.1 0.15
Ötelenme oranı
Model no 25
Yük (kN)
2000
1500
1000
500
0
-500
-1000
-1500
-2000
-0.05 0 0.05
Ötelenme oranı
Model no 26
Yük (kN)
3000
2000
1000
0
-1000
-2000
-3000
-0.02 -0.01 0 0.01 0.02
Ötelenme oranı

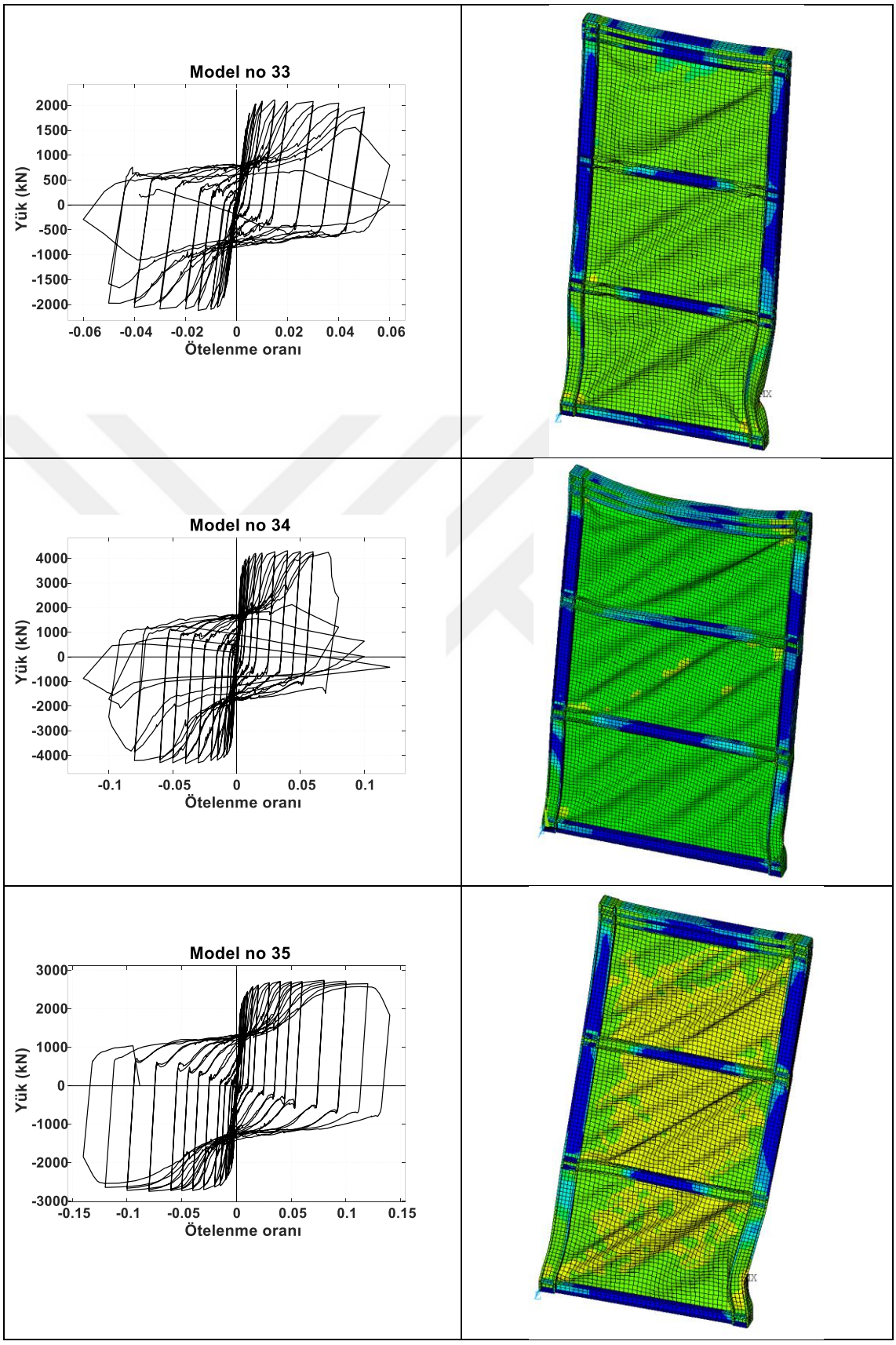
EK-6 (devam)


Model no 27
Yük (kN)
3000
2000
1000
0
-1000
-2000
-0.05
0
0.05
Ötelenme oranı
Model no 28
Yük (kN)
3000
2000
1000
0
-1000
-2000
-3000
-0.05
0
0.05
Ötelenme oranı
Model no 29
Yük (kN)
2000
1000
0
-1000
-2000
-0.05
0
0.05
Ötelenme oranı

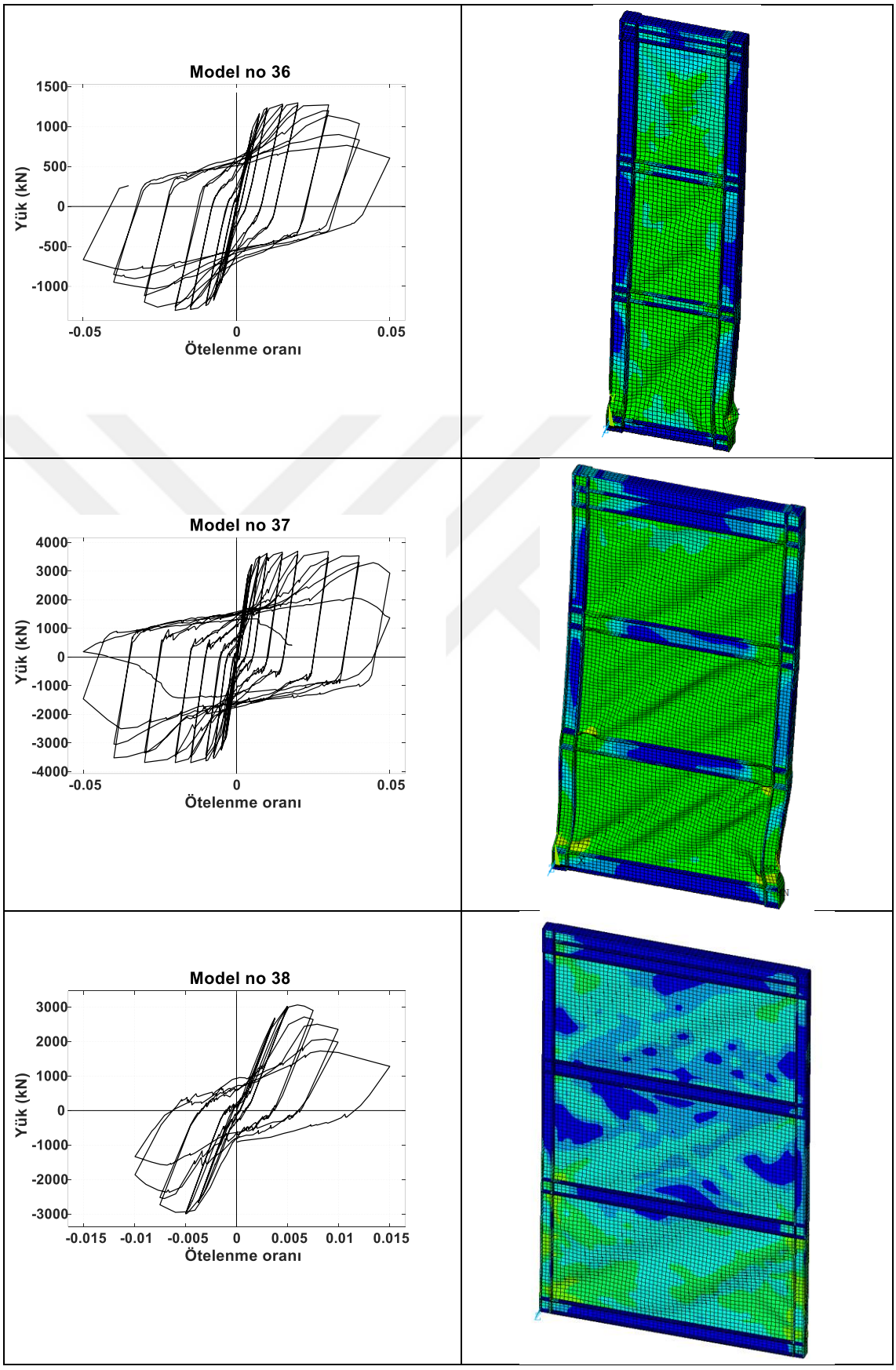
EK-6 (devam)


Model no 30
Yük (kN)
3000
2000
1000
0
-1000
-2000
-3000
-0.05
0
0.05
Ötelenme oranı
Model no 31
Yük (kN)
3000
2000
1000
0
-1000
-2000
-0.05
0
0.05
Ötelenme oranı
Model no 32
Yük (kN)
2000
1500
1000
500
0
-500
-1000
-1500
-2000
-0.05
0
0.05
Ötelenme oranı

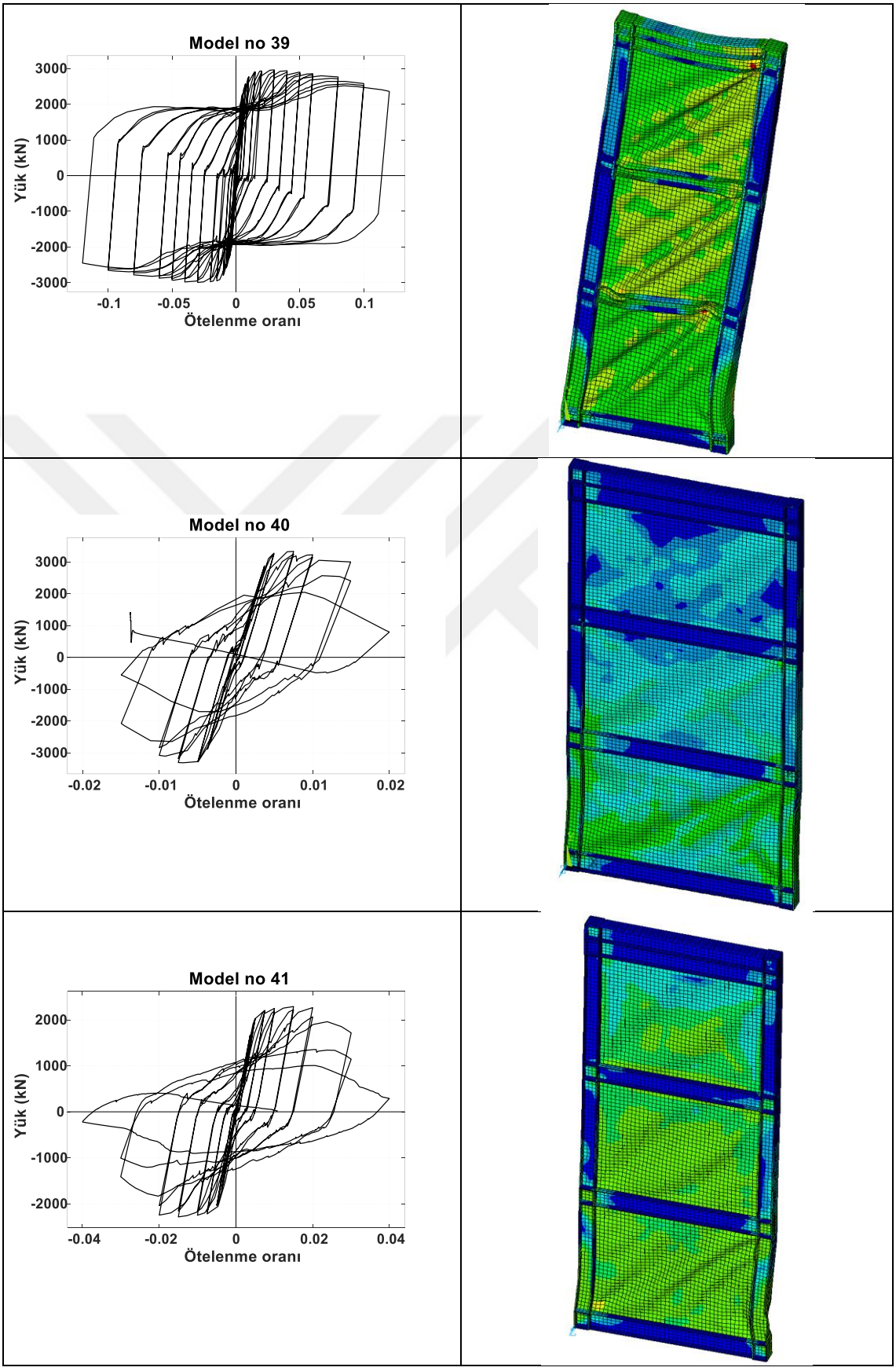
EK-6 (devam)


Model no 33
Yük (kN)
Ötelenme oranı
Model no 34
Yük (kN)
Ötelenme oranı
Model no 35
Yük (kN)
Ötelenme oranı

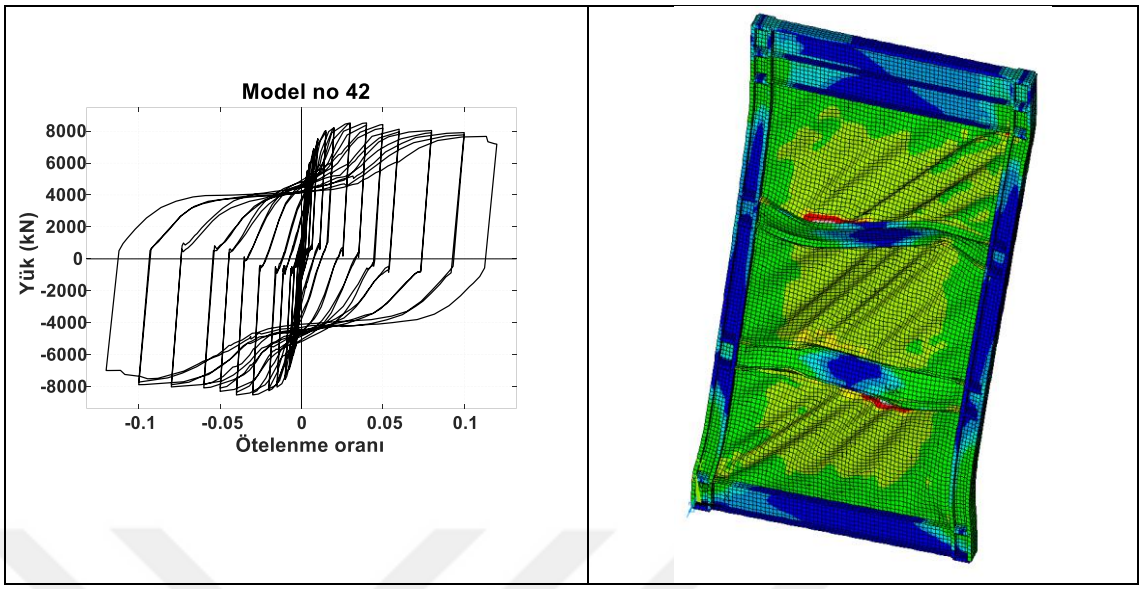
EK-6 (devam)


Model no 36
Yük (kN)
1500
1000
500
0
-500
-1000
-0.05
0
0.05
Ötelenme oranı
Model no 37
Yük (kN)
4000
3000
2000
1000
0
-1000
-2000
-3000
-4000
-0.05
0
0.05
Ötelenme oranı
Model no 38
Yük (kN)
3000
2000
1000
0
-1000
-2000
-3000
-0.015
-0.01
-0.005
0
0.005
0.01
0.015
Ötelenme oranı

EK-6 (devam)


Model no 39
Yük (kN)
Ötelenme oranı
Model no 40
Yük (kN)
Ötelenme oranı
Model no 41
Yük (kN)
Ötelenme oranı

EK-6 (devam)


Model no 42
8000
6000
4000
2000
0
-2000
-4000
-6000
-8000
Yük (kN)
-0.1
-0.05
0
0.05
0.1
Ötelenme oranı