

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**U-ŞEKLİ ÇELİK SÖNÜMLEYİCİLERİN HİSTERETİK
DAVRANIŞLARININ MODELLENMESİ VE DÜŞÜK SÖNÜMLÜ KAÇUK
MESNETLERLE BİRLİKTE SİSMİK İZOLATÖR OLARAK KULLANILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Kurtuluş ATASEVER

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yapı Mühendisliği Programı

ARALIK 2015

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**U-ŞEKLİ ÇELİK SÖNÜMLEYİCİLERİN HİSTERETİK
DAVRANIŞLARININ MODELLENMESİ VE DÜŞÜK SÖNÜMLÜ KAÇUK
MESNETLERLE BİRLİKTE SİSMİK İZOLATÖR OLARAK KULLANILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Kurtuluş ATASEVER
501131060**

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yapı Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Ercan YÜKSEL

ARALIK 2015

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 501131060 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Kurtuluş ATASEVER, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “U-ŞEKİLLİ ÇELİK SÖNÜMLEYİCİLERİN HİSTERETİK DAVRANIŞLARININ MODELLENMESİ VE DÜŞÜK SÖNÜMLÜ KAUÇUK MESNETLERLE BİRLİKTE SİSMİK İZOLATÖR OLARAK KULLANILMASI” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Doç. Dr. Ercan YÜKSEL**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Engin ORAKDÖĞEN**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Meltem ŞAHİN
Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi

Teslim Tarihi : 27 Kasım 2015
Savunma Tarihi : 25 Aralık 2015

Figen'e

ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasını, akademik hayatta attığım ilk somut adım olarak nitelendiriyorum. İnsanlığın en temel sorunlarından biri olan deprem ile ilgilenmem ve bu çalışmanın, çözüme katkı olma umudu beni mutlu ediyor. Tez süresi boyunca desteğini esirgemeyen değerli danışmanım Doç. Dr. Ercan YÜKSEL'e, birlikte çalışmaktan mutluluk duyduğum sevgili hocalarım Yrd. Doç. Dr. Meltem ŞAHİN ve Yrd. Doç. Dr. Fevzi DANSIK'a, çalıştığım süre boyunca manevi olarak hep yanımda hissettiğim arkadaşlarım Arş. Gör. Ayşe Müge ÖZ , Arş. Gör. Faruk BÜYÜKYORAN ve saygıdeğer yapı mühendisliği kürsüsü hocalarıma teşekkürlerimi sunarım. Bilimsel düşünmenin temelini oluşturan etik, sorgulama ve araştırma kavramlarını özümsememe olanak sağlayan, yoluma ışık tutan sevgili hocalarım Prof. Dr. Serap KAHRAMAN ve Prof. Dr. Türkay BARAN'a teşekkürü borç bilirim. İyi bir mühendis, iyi bir akademisyen olma yolunda beni yönlendiren, bilgisinden ve tecrübesinden faydalanmaktan onur duyduğum sevgili hocam Prof. Dr. Oğuz Cem ÇELİK'e verdiği emekten ötürü ne kadar teşekkür etsem azdır. Hayatımın her alanında başardıklarımın en büyük ortağı olan aileme ve dünyamıza yeni bir umut getiren varlığıyla bizi mutlu eden pek sevgili yeğenim Doğu Çağan'a en içten sevgilerimi sunarım. Bu tez çalışmasını, tez boyunca kahrımı çeken, yorulduğumda elimden tutan, düştüğümde ayağa kaldıran, birlikte uykusuz kalıp, birlikte dinlendiğimiz eşim, dostum, sevgilim Figen ATASEVER'e ithaf etmekten büyük mutluluk duyarım.

Kasım 2015

Kurtuluş ATASEVER
(İnşaat Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
SEMBOLLER	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xv
ŞEKİL LİSTESİ.....	xvii
ÖZET.....	xxiii
SUMMARY	xxvii
1. GİRİŞ	1
1.1 Motivasyon.....	1
1.2 Kapsam.....	2
2. SİSMİK İZOLASYON VE ENERJİ SÖNÜMLEYİCİ SİSTEMLER.....	5
2.1 Sismik İzolasyon Kavramı	5
2.2 Sismik İzolasyon Sistemleri	5
2.2.1 Düşük sönümlü kauçuk mesnet.....	5
2.2.2 Kurşun çekirdekli kauçuk mesnet	6
2.2.3 Yüksek sönümlü kauçuk mesnet	6
2.2.4 Sürtünmeli sarkaç sistemler	6
2.3 Pasif Enerji Sönümleyiciler.....	7
2.3.1 Metalik sönümleyiciler	7
2.3.2 Sürtünme tipi sönümleyiciler	7
2.3.3 Visko-elastik sönümleyiciler.....	8
2.3.4 Viskoz akışkanlı sönümleyiciler	8
2.4 Sismik İzolasyon ve Enerji Sönümleyicilerin Karşılaştırılması.....	8
3. DÜŞÜK SÖNÜMLÜ KAÜÇUK MESNET (LDR) VE U-ŞEKLİ ÇELİK ENERJİ SÖNÜMLEYİCİDEN (UD) OLUŞTURULAN SİSMİK İZOLASYON SİSTEMİ.....	13
3.1 Düşük Sönümlü Kauçuk Mesnet (LDR)	13
3.1.1 Mekanik özellikler	14
3.1.1.1 Kesme kuvveti etkisi altında davranış.....	14
3.1.1.2 Basınç kuvveti etkisi altında davranış.....	15
3.1.1.3 Çekme kuvveti etkisi altında davranış	15
3.1.2 Mekanik özellikleri etkileyen faktörler	15
3.1.2.1 Sıcaklık etkisi	15
3.1.2.2 Yük geçmişinin etkisi.....	16
3.1.2.3 Yükleme hızı	16
3.1.2.4 Yaşlanma ve çevre koşulları	16
3.2 U Şekli Çelik Enerji Sönümleyici (UD)	17
3.2.1 Mekanik özelliklerini etkileyen parametreler	17
3.2.1.1 Yükleme doğrultusunun etkisi	17
3.2.1.2 Sıcaklık etkisi	17

3.2.1.3 Yükleme hızının etkisi	18
3.3 U Şekilli Çelik Enerji Sönümleyicinin Düşük Sönümlü Kauçuk İzolatörle Kullanılması	18
3.4 Literatür Araştırması	18
4. U ŞEKLİ ÇELİK SÖNÜMLEYİCİNİN SONLU ELEMANLAR MODELİNİN KURULMASI	23
4.1 Analiz Düzenegi ve Sınır Koşullar	23
4.2 Yükleme Protokolü.....	25
4.3 Malzeme Modeli.....	27
4.3.1 Birleşik doğrusal olmayan izotropik kinematik pekleşme modeli	28
4.3.2 Kullanılan malzeme özellikleri	31
4.3.3 Sonlu elemanlara bölme işlemi	33
4.4 Analiz Süreleri ve Bilgisayar Özellikleri	34
5. SONLU ELEMANLAR MODELİNİN DENEYSEL VERİLERLE KARŞILAŞTIRILMASI.....	37
5.1 UD40 Sönümleyici	37
5.1.1 UD'nin histeretik davranışı	39
6. SAYISAL ÖRNEKLER.....	43
6.1 Geometri Seçimi	43
6.1.1 UDK isimli sönümleyiciler	43
6.1.2 UDF isimli sönümleyiciler	48
6.2 Sonlu Elemanlar Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması.....	49
7. ZAMAN TANIM ALANINDA ANALİZ.....	59
7.1 Analiz Düzenegi	59
7.2 Analiz Metodu	60
7.3 Sismik İzolasyon Sistemi Tasarımı	62
7.4 İzolasyon Sistemi Boyutlandırılması.....	64
7.4.1 LDR'nin boyutlandırılması	64
7.4.2 UD sönümleyicinin boyutlandırılması	64
7.5 Zaman Tanım Alanında Çözüm Sonuçları	65
7.5.1 Taban kesme kuvvetleri	66
7.5.2 Kat ötelenmeleri ve oranları	68
7.5.3 ULB histeresisleri.....	68
8. SONUÇLAR	71
8.1 Genel Sonuçlar	71
8.2 Gelecekte Yapılacak Çalışmalar İçin Öneriler	73
9. KAYNAKLAR.....	75
EKLER.....	79
ÖZGEÇMİŞ.....	177

KISALTMALAR

ADAS	: Added Damping And Stiffness
ASCE	: American Society of Civil Engineers
FNA	: Hızlı doğrusal olmayan analiz yöntemi
FD	: Sürtünme tipi sönümleyiciler
FPS	: Sürtünmeli sarkaç izolatör
HDRB	: Yüksek sönümlü kauçuk mesnet
LDR	: Düşük sönümlü kauçuk mesnet
LRB	: Kurşun çekirdekli kauçuk mesnet
MD	: Metalik sönümleyiciler
PEEQ	: Eşdeğer plastik birim şekildeğiştirme
TADAS	: Triangular Added Damping and Stiffness
UD	: U-şekilli çelik sönümleyici
ULB	: Düşük sönümlü kauçuk izolatör ve U-şekilli çelik sönümleyicinin birbirine monte edilmesi ile oluşan sistem
USGS	: The U.S. Geological Survey
VFD	: Viskoz akışkanlı sıvı sönümleyici
VSD	: Viskoelastik katı sönümleyici

SEMBOLLER

A	: Genlik
A_{LDR}	: LDR'nin kesit alanı
B_M, B_D	: Efektif sönüm katsayısı
b	: Çevrimsel deneylerle güncellenebilecek malzeme parametresi
C	: Malzeme parametresi
D_I	: LDR'nin iç çapı
D_M	: Tasarım deplasmanı
D_0	: LDR'nin dış çapı
E_p	: Sönümlenen enerji
$E_{p,loop}$	: Bir çevrimde sönümlenen enerji
F	: Yatay kuvvet
G	: Kayma modülü
g	: Yer çekimi ivmesi
H_d	: Damperin yüksekliği
$K_{d,toplam LDR}$	: İhtiyaç duyulan rijitlik
K_{req}	: İhtiyaç duyulan efektif rijitlik
K_M	: Toplam efektif rijitlik
k	: Gerilme yoğunluk katsayısı
k_{eff}	: Efektif rijitlik
L	: İki delik merkez arası mesafe
L_d	: Damperin boy doğrultusu
n_R	: LDR'nin levha sayısı
$Q_{d,total}$	: Toplam akma dayanımı
Q_∞	: Çevrimsel deneylerle güncellenebilecek malzeme parametresi
R	: Delik yarıçapı
S_{M_1}	: Maks deprem etkisinde 1 sn periyodundaki zemin tepki spektrumu
T_M	: Efektif toplam periyot
T_{LDR}	: LDR'nin periyodu
t	: Zaman
t_d	: Damperin kalınlık doğrultusu
t_R	: LDR'nin kalınlığı
$t_{S,in}$	: LDR'nin iç levha kalınlığı
$t_{S,end}$	: LDR'nin son levha kalınlığı
t_1, t_2, t_3, t_4	: Delik aralıkları
W	: Sismik ağırlık
w_d	: Damperin genişlik doğrultusu
w_L	: Levha genişliği
w_1	: Damper başlığına yakın taraf genişliği
w_2	: Damper uç taraf genişliği
Y	: Akma başlangıcı
α	: Geri gerilme (back stress) tensörü
α_k	: Adım adım geri gerilme (back stress) tensör değişimi
β_M, β_D	: Efektif sönüm değeri

δ^+	: Pozitif yöndeki yatay deplasman
δ^-	: Negatif yöndeki yatay deplasman
φ	: Başlangıç fazı
ω	: Açısal frekans
ε	: Şekil değiştirme
σ	: Gerilme
σ_{maks}	: Ulaşılan maksimum gerilme
σ^0	: Değişen akma yüzeyi
$\sigma _0$	: Plastik şekil değişiminin sıfır olduğu andaki akma yüzeyinin boyutu
$\bar{\varepsilon}^{pl}$	: Eşdeğer plastik birim şekildeğiştirme
$\dot{\varepsilon}^{pl}$	: Adım adım eşdeğer plastik birim şekil değişimi
γ	: Malzeme parametresi
ξ_{eff}	: Efektif sönüm

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : İzolatör sistemlerin karşılaştırılması	10
Çizelge 2.2 : Sönümleyici sistemlerin karşılaştırılması.....	11
Çizelge 4.1 : İzotropik ve kinematik pekleşme parametreleri	33
Çizelge 4.2 : İzotropik ve kinematik pekleşme parametreleri	34
Çizelge 4.3 : Sonlu Eleman Analizi Süreleri, Eleman ve Nokta Sayıları.....	35
Çizelge 6.1 : UDK ve UD40 alan ve hacim değerleri	47
Çizelge 6.2 : UDF ve UD40 alan ve hacim değerleri	48
Çizelge 6.3 : Sönümlenen enerji miktarı (kNm).....	49
Çizelge 6.4 : Efektif rijitlik değerleri (N/mm).....	51
Çizelge 6.5 : Efektif sönüm oranları.....	51
Çizelge 6.6 : Maksimum kuvvetler (kN)	52
Çizelge 6.7 : Sönümlenen enerji (kNm)	52
Çizelge 6.8 : Efektif rijitlik (N/mm)	54
Çizelge 6.9 : Sönüm oranları	54
Çizelge 6.10 : Maksimum kuvvetler (kN)	54
Çizelge 6.11 : Sönümleyicilerin özelliklerinin karşılaştırılması (0° 7 Çevrim).....	56
Çizelge 7.1 : Yapı elemanları boyutları.....	59
Çizelge 7.2 : Sönüm katsayısı.....	63
Çizelge 7.3 : LDR boyutları.....	64
Çizelge 7.4 : Maksimum taban kesme kuvvetleri (kN)	66

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1	: (a) Tasarım yöntemleri sismik performans-yükseklik ilişkisi. (b) Depremsellik ve dünya şehirleri haritasından bir kesit.	1
Şekil 2.1	: Periyot-ivme grafiği-Spektral ivme azalması a) Periyot artışı. b) Sönüm artışı.	5
Şekil 3.1	: Düşük sönümlü kauçuk: a) Mesnet. b) Kesit.	13
Şekil 3.2	: Yatay kuvvet-deplasman grafiği: a) Kayma şekil değiştirmesi, %75. b) Kayma şekil değiştirmesi, %175.....	14
Şekil 3.3	: Yatay kuvvet-deplasman grafiği: a) Sıcaklık 20°C. b) Sıcaklık -26°C.	16
Şekil 3.4	: 4 adet U-şekilli damper	17
Şekil 3.5	: ULB	18
Şekil 4.1	: Analiz düzeneği ve yükleme yönleri: (a) Düzenek ve yükleme noktası. (b) +0° yükleme. (c) +90° yükleme. (d) +45° yükleme.	23
Şekil 4.2	: Sonlu elemanlar modeli sınır koşulları	24
Şekil 4.3	: Referans noktası ve yükün uygulandığı yüzey.....	24
Şekil 4.4	: Tip A yükleme protokolü	25
Şekil 4.5	: Tip B yükleme protokolü	26
Şekil 4.6	: Tip C yükleme protokolü	26
Şekil 4.7	: Elastik malzeme modeli: (a) Doğrusal. (b) Doğrusal olmayan.	27
Şekil 4.8	: Rijit malzeme modeli: (a) Rijit doğrusal pekleşen. (b) Rijit tam plastik.	27
Şekil 4.9	: Elasto-plastik malzeme modeli: (a) İdeal. (b) Pekleşen.	28
Şekil 4.10	: İzotropik pekleşme modeli: (a) Tek eksenli. (b) Çift eksenli.....	29
Şekil 4.11	: Kinematik pekleşme modeli: (a) Tek eksenli gerilme şekil değiştirme. (b) Çift eksenli akma yüzeyi.....	30
Şekil 4.12	: Pekleşme modelleri: (a)İzotropik pekleşme. (b)Kinematik pekleşme. (c) Birleşik pekleşme.	30
Şekil 4.13	: Doğrusal olmayan izotropik-kinematik modelin tek eksenli gösterimi	31
Şekil 4.14	: SN490B malzeme modeli	32
Şekil 4.15	: Q235 malzeme modeli	33
Şekil 4.16	: Tipik UD sönümleyicinin meshlenmiş modeli	34
Şekil 5.1	: (a) ULB. (b) UD.	37
Şekil 5.2	: (a) Üç boyutlu model. (b) Sonlu elemanlar modeli.....	38
Şekil 5.3	: UD40 boyutları-yükleme yönü: (a) 0° yönü. (b) 90° yönü.	38
Şekil 5.4	: (a) Yükleme grafiği. (b) SN490 malzeme modeli	38
Şekil 5.5	: 0 derece: (a) Kopma noktası. (b) Eşdeğer plastik şekil değiştirmeler.	39
Şekil 5.6	: 0° yönü: (a) Kuramsal histeretik eğrileri. (b) Deneysel histeretik eğrileri.....	40

Şekil 5.7	: 90 derece: (a) Kopma noktası. (b) Eşdeğer plastik şekil değiştirmeler.	40
Şekil 5.8	: 90° yönü: (a) Kuramsal histeretik eğrileri (b) Deneysel histeretik eğrileri.....	41
Şekil 6.1	: K isimli sönümleyicilerin tipik geometrisi (mm).....	43
Şekil 6.2	: UDK1 sönümleyici delik yerleşim düzeni	45
Şekil 6.3	: UDK2 sönümleyici delik yerleşim düzeni	45
Şekil 6.4	: UDK3 sönümleyici delik yerleşim düzeni	46
Şekil 6.5	: UDK4 sönümleyici delik yerleşim düzeni	46
Şekil 6.6	: UDK5 sönümleyici delik yerleşim düzeni	47
Şekil 6.7	: UDF isimli sönümleyicilerin tipik geometrisi.....	48
Şekil 6.8	: UD40 ve UDF isimli sönümleyicilerin histeretik eğrileri.....	50
Şekil 6.9	: UD40 ve UDK isimli sönümleyicilerin histeretik eğrileri	53
Şekil 6.10	: Tüm histeretik eğrilerin karşılaştırılması	58
Şekil 7.1	: (a) Çerçeve planı. (b) Öngörünüş.	59
Şekil 7.2	: (a) Yavaş. (b) Hızlı doğrusal olmayan analiz.	60
Şekil 7.3	: Deprem ivme kayıtları: a) El Centro. b) Northridge. c) Helena Montana. d) Kocaeli.	61
Şekil 7.4	: UD'nin: (a) Geometrisi. (b) Modeli.	64
Şekil 7.5	: UD'nin a) Histeretik eğrisi. b) Bilinear modeli.....	65
Şekil 7.6	: (a)ULB biliner modeli. b) tasarlanan (ULB_{tot}) ve ihtiyaç duyulan bilinear model (ULB_{req}).	65
Şekil 7.7	: Sonlu elemanlar modeli: a) Taban izolasyonlu. b) Ankastre mesnetli.	66
Şekil 7.8	: Taban kesme kuvveti grafiği: a) El Centro. b) Northridge. c) Helena Montana. d) Kocaeli.	67
Şekil 7.9	: Maksimum kat ötelemeleri: a) El Centro. b) Northridge. c) Helena Montana. d) Kocaeli.	68
Şekil 7.10	: ULB histeretik eğrileri: a)El Centro. b) Northridge. c) Helena Montana. d) Kocaeli.	69
Şekil A.1	: Üç boyutlu model	79
Şekil A.2	: a) UD40 boyutları – Yükleme yönü. (b) Malzeme özellikleri.	79
Şekil A.3	: İlk çevrime ilişkin gerilme ve yer değiştirme durumları.....	80
Şekil A.4	: (a) Kuramsal. (b) Deneysel histeretik eğrileri.	80
Şekil A.5	: İlk çevrime ilişkin gerilme ve yer değiştirme durumları	81
Şekil A.6	: Gerçek gerilme değerleri (MPa).....	81
Şekil A.7	: a) Efektif rijitlik. b) Efektif sönüm. c) 250 mm'deki yatay kuvvet. d) Histeretik enerji. e) Yükleme grafiği.	82
Şekil A.8	: Üç boyutlu model.	83
Şekil A.9	: a) UD40 boyutları – Yükleme yönü. (b) Malzeme özellikleri.	83
Şekil A.10	: İlk çevrime ilişkin gerilme ve yer değiştirme durumları.....	84
Şekil A.11	: (a) Kuramsal. (b) Deneysel histeretik eğrileri.	84
Şekil A.12	: İlk çevrime ilişkin gerilme ve yer değiştirme durumları.....	85
Şekil A.13	: Gerçek gerilme değerleri (MPa).....	85
Şekil A.14	: a) Efektif rijitlik. b) Efektif sönüm. c) 250 mm'deki yatay kuvvet. d) Histeretik enerji. e) Yükleme grafiği.	86
Şekil A.15	: Üç boyutlu model	87
Şekil A.16	: a) UD40 boyutları – Yükleme yönü (b) Malzeme özellikleri.	87
Şekil A.17	: Son çevrime ilişkin gerilme ve yer değiştirme durumları	88

Şekil A.18	: Son çevrime ilişkin gerilme ve yer değiştirme durumları.....	89
Şekil A.19	: (a) Histeretik eğrisi (b) Gerçek gerilme değerleri (MPa).....	89
Şekil A.20	: a) Efektif rijitlik. b) Efektif sönüm. c) Maksimum deplasmandaki yatay kuvvet. d) Kümülatif histeretik enerji. e) Yükleme grafiği.	90
Şekil A.21	: Üç boyutlu model.....	91
Şekil A.22	: a) UD40 boyutları – Yükleme yönü. (b) Malzeme özellikleri.	91
Şekil A.23	: Son çevrime ilişkin gerilme ve yer değiştirme durumları.....	92
Şekil A.24	: Son çevrime ilişkin gerilme ve yer değiştirme durumları.....	93
Şekil A.25	: (a) Histeretik eğrisi (b) Gerçek gerilme değerleri (MPa).....	93
Şekil A.26	: a) Efektif rijitlik. b) Efektif sönüm. c) Maksimum deplasmandaki yatay kuvvet. d) Kümülatif histeretik enerji. e) Yükleme grafiği.	94
Şekil A.27	: Üç boyutlu model.....	95
Şekil A.28	: a) UD40 boyutları – Yükleme yönü. (b) Malzeme özellikleri.	95
Şekil A.29	: Son çevrime ilişkin gerilme ve yer değiştirme durumları.....	96
Şekil A.30	: Son çevrime ilişkin gerilme ve yer değiştirme durumları.....	97
Şekil A.31	: (a) Histeretik eğrisi. (b) Gerçek gerilme değerleri (MPa).....	97
Şekil A.32	: a) Efektif rijitlik. b) Efektif sönüm. c) Maksimum deplasmandaki yatay kuvvet. d) Kümülatif histeretik enerji. e) Yükleme grafiği.	98
Şekil A.33	: Üç boyutlu model.....	99
Şekil A.34	: a) Sönümleyici boyutları – Yükleme yönü (b) Malzeme özellikleri	99
Şekil A.35	: Son çevrime ilişkin gerilme ve yer değiştirme durumları.....	100
Şekil A.36	: Son çevrime ilişkin gerilme ve yer değiştirme durumları.....	101
Şekil A.37	: (a) Histeretik eğrisi. (b) Gerçek gerilme değerleri (MPa).	101
Şekil A.38	: a) Efektif rijitlik. b) Efektif sönüm. c) Maksimum deplasmandaki yatay kuvvet. d) Kümülatif histeretik enerji. e) Yükleme grafiği. ...	102
Şekil A.39	: Üç boyutlu model.....	103
Şekil A.40	: a) Sönümleyici boyutları –Yükleme yönü (b) Malzeme özellikleri	103
Şekil A.41	: Son çevrime ilişkin gerilme ve yer değiştirme durumları.....	104
Şekil A.42	: Son çevrime ilişkin gerilme ve yer değiştirme durumları.....	105
Şekil A.43	: (a) Histeretik eğrisi. (b) Gerçek gerilme değerleri (MPa).	105
Şekil A.44	: a) Efektif rijitlik. b) Efektif sönüm. c) Maksimum deplasmandaki yatay kuvvet. d) Kümülatif histeretik enerji. e) Yükleme grafiği. ...	106
Şekil A.45	: Üç boyutlu model.....	107
Şekil A.46	: a) Sönümleyici boyutları–Yükleme yönü (b) Malzeme özellikleri	107
Şekil A.47	: Son çevrime ilişkin gerilme ve yer değiştirme durumları.....	108
Şekil A.48	: Son çevrime ilişkin gerilme ve yer değiştirme durumları.....	109
Şekil A.49	: (a) Histeretik eğrisi. (b) Gerçek gerilme değerleri (MPa).	109
Şekil A.50	: a) Efektif rijitlik. b) Efektif sönüm. c) Maksimum deplasmandaki yatay kuvvet. d) Kümülatif histeretik enerji. e) Yükleme grafiği	110
Şekil A.51	: Üç boyutlu model.....	111
Şekil A.52	: a) Sönümleyici boyutları–Yükleme yönü (b) Malzeme özellikleri	111
Şekil A.53	: Son çevrime ilişkin gerilme ve yer değiştirme durumları.....	112
Şekil A.54	: Son çevrime ilişkin gerilme ve yer değiştirme durumları.....	113
Şekil A.55	: (a) Histeretik eğrisi. (b) Gerçek gerilme değerleri (MPa).	113
Şekil A.56	: a) Efektif rijitlik. b) Efektif sönüm. c) Maksimum deplasmandaki yatay kuvvet. d) Kümülatif histeretik enerji. e) Yükleme grafiği. ...	114
Şekil A.57	: Üç boyutlu model.....	115
Şekil A.58	: a) Sönümleyici boyutları–Yükleme yönü (b) Malzeme özellikleri	115
Şekil A.59	: Son çevrime ilişkin gerilme ve yer değiştirme durumları.....	116

Şekil A.60	: Son çevrime ilişkin gerilme ve yer değiştirme durumları	117
Şekil A.61	: (a) Histeretik eğrisi. (b) Gerçek gerilme değerleri (MPa).	117
Şekil A.62	: a) Efektif rijitlik. b) Efektif sönüm. c) Maksimum deplasmandaki yatay kuvvet. d) Kümülatif histeretik enerji. e) Yükleme grafiği. ...	118
Şekil A.63	: Üç boyutlu model	119
Şekil A.64	: a) Sönümleyici boyutları–Yükleme yönü (b) Malzeme özellikleri	119
Şekil A.65	: Son çevrime ilişkin gerilme ve yer değiştirme durumları	120
Şekil A.66	: Son çevrime ilişkin gerilme ve yer değiştirme durumları	121
Şekil A.67	: (a) Histeretik eğrisi. (b) Gerçek gerilme değerleri (MPa).	121
Şekil A.68	: a) Efektif rijitlik. b) Efektif sönüm. c) Maksimum deplasmandaki yatay kuvvet. d) Kümülatif histeretik enerji. e) Yükleme grafiği. ...	122
Şekil A.69	: Üç boyutlu model	123
Şekil A.70	: a) Sönümleyici boyutları–Yükleme yönü (b) Malzeme özellikleri	123
Şekil A.71	: Son çevrime ilişkin gerilme ve yer değiştirme durumları	124
Şekil A.72	: Son çevrime ilişkin gerilme ve yer değiştirme durumları	125
Şekil A.73	: (a) Histeretik eğrisi. (b) Gerçek gerilme değerleri (MPa).	125
Şekil A.74	: a) Efektif rijitlik. b) Efektif sönüm. c) Maksimum deplasmandaki yatay kuvvet. d) Kümülatif histeretik enerji. e) Yükleme grafiği	126
Şekil A.75	: Üç boyutlu model	127
Şekil A.76	: a) Sönümleyici boyutları–Yükleme yönü (b) Malzeme özellikleri	127
Şekil A.77	: Son çevrime ilişkin gerilme ve yer değiştirme durumları	128
Şekil A.78	: Son çevrime ilişkin gerilme ve yer değiştirme durumları	129
Şekil A.79	: (a) Histeretik eğrisi. (b) Gerçek gerilme değerleri (MPa).	129
Şekil A.80	: a) Efektif rijitlik. b) Efektif sönüm. c) Maksimum deplasmandaki yatay kuvvet. d) Kümülatif histeretik enerji. e) Yükleme grafiği	130
Şekil A.81	: Üç boyutlu model	131
Şekil A.82	: a) Sönümleyici boyutları–Yükleme yönü (b) Malzeme özellikleri	131
Şekil A.83	: Son çevrime ilişkin gerilme ve yer değiştirme durumları	132
Şekil A.84	: Son çevrime ilişkin gerilme ve yer değiştirme durumları	133
Şekil A.85	: (a) Histeretik eğrisi. (b) Gerçek gerilme değerleri (MPa).	133
Şekil A.86	: a) Efektif rijitlik. b) Efektif sönüm. c) Maksimum deplasmandaki yatay kuvvet. d) Kümülatif histeretik enerji. e) Yükleme grafiği. ..	134
Şekil A.87	: Üç boyutlu model	135
Şekil A.88	: a) Sönümleyici boyutları–Yükleme yönü (b) Malzeme özellikleri	135
Şekil A.89	: Son çevrime ilişkin gerilme ve yer değiştirme durumları	136
Şekil A.90	: Son çevrime ilişkin gerilme ve yer değiştirme durumları	137
Şekil A.91	: (a) Histeretik eğrisi. (b) Gerçek gerilme değerleri (MPa).....	137
Şekil A.92	: a) Efektif rijitlik. b) Efektif sönüm. c) Maksimum deplasmandaki yatay kuvvet. d) Kümülatif histeretik enerji. e) Yükleme grafiği	138
Şekil A.93	: Üç boyutlu model	139
Şekil A.94	: a) Sönümleyici boyutları–Yükleme yönü (b) Malzeme özellikleri	139
Şekil A.95	: Son çevrime ilişkin gerilme ve yer değiştirme durumları	140
Şekil A.96	: Son çevrime ilişkin gerilme ve yer değiştirme durumları	141
Şekil A.97	: (a) Histeretik eğrisi. (b) Gerçek gerilme değerleri (MPa).	141
Şekil A.98	: a) Efektif rijitlik. b) Efektif sönüm. c) Maksimum deplasmandaki yatay kuvvet. d) Kümülatif histeretik enerji. e) Yükleme grafiği. ..	142
Şekil A.99	: Üç boyutlu model	143
Şekil A.100	: a) Sönümleyici boyutları–Yükleme yönü (b) Malzeme özellikleri	143
Şekil A.101	: Son çevrime ilişkin gerilme ve yer değiştirme durumları	144
Şekil A.102	: Son çevrime ilişkin gerilme ve yer değiştirme durumları	145

Şekil A.103	: (a) Histeretik eğrisi. (b) Gerçek gerilme değerleri (MPa).	145
Şekil A.104	: a) Efektif rijitlik. b) Efektif sönüm. c) Maksimum deplasmandaki yatay kuvvet. d) Kümülatif histeretik enerji. e) Yükleme grafiği. ..	146
Şekil A.105	: Üç boyutlu model.....	147
Şekil A.106	: a) Sönümleyici geometrisi–Yükleme yönü (b) Malzeme özellikleri	147
Şekil A.107	: a) Efektif rijitlik. b) Efektif sönüm. c) Maksimum deplasmandaki yatay kuvvet. d) Kümülatif histeretik enerji. e) Yükleme grafiği. f) Histeretik eğrisi.	148
Şekil A.108	: Üç boyutlu model.....	149
Şekil A.109	: a) Sönümleyici geometrisi–Yükleme yönü (b) Malzeme özellikleri	149
Şekil A.110	: a) Efektif rijitlik. b) Efektif sönüm. c) Maksimum deplasmandaki yatay kuvvet. d) Kümülatif histeretik enerji. e) Yükleme grafiği. f) Histeretik eğrisi.	150
Şekil A.111	: Üç boyutlu model.....	151
Şekil A.112	: a) Sönümleyici boyutları–Yükleme yönü (b) Malzeme özellikleri. .	151
Şekil A.113	: a) Efektif rijitlik. b) Efektif sönüm. c) Maksimum deplasmandaki yatay kuvvet. d) Kümülatif histeretik enerji. e) Yükleme grafiği. f) Histeretik eğrisi.	152
Şekil A.114	: Üç boyutlu model.....	153
Şekil A.115	: a) Sönümleyici boyutları–Yükleme yönü (b) Malzeme özellikleri	153
Şekil A.116	: a) Efektif rijitlik. b) Efektif sönüm. c) Maksimum deplasmandaki yatay kuvvet. d) Kümülatif histeretik enerji. e) Yükleme grafiği. f) Histeretik eğrisi.	154
Şekil A.117	: Üç boyutlu model.....	155
Şekil A.118	: a) Sönümleyici boyutları–Yükleme yönü (b) Malzeme özellikleri	155
Şekil A.119	: a) Efektif rijitlik. b) Efektif sönüm. c) Maksimum deplasmandaki yatay kuvvet. d) Kümülatif histeretik enerji. e) Yükleme grafiği. f) Histeretik eğrisi.	156
Şekil A.120	: a) Efektif rijitlik. b) Lejant.	157
Şekil A.121	: a) Efektif sönüm oranı. b) Lejant.	157
Şekil A.122	: a) Maksimum deplasmandaki yatay kuvvet b) Lejant.	158
Şekil A.123	: a) Kümülatif histeretik enerji b) Lejant.....	158
Şekil A.124	: Tüm histeretik eğrilerin karşılaştırılması	159
Şekil A.125	: Üç boyutlu model.....	160
Şekil A.126	: (a) UDS1 boyutları – Yükleme yönü. (b) Malzeme özellikleri.	160
Şekil A.127	: Son çevrime ilişkin gerilme ve yerdeğiştirme durumları.	161
Şekil A.128	: (a) Deneysel. (b) Kuramsal histeretik eğrileri.....	162
Şekil A.129	: Son çevrime ilişkin gerilme ve yerdeğiştirme durumları.	162
Şekil A.130	: a) Efektif rijitlik. b) Efektif sönüm. c) 250 mm’deki yatay kuvvet. d) Histeretik enerji. e) Yükleme grafiği.	163
Şekil A.131	: Üç boyutlu model.....	164
Şekil A.132	: (a) UDS2 boyutları – Yükleme yönü. (b) Malzeme özellikleri.	164
Şekil A.133	: Son çevrime ilişkin gerilme ve yerdeğiştirme durumları.	165
Şekil A.134	: (a) Deneysel. (b) Kuramsal histeretik eğrileri.....	166
Şekil A.135	: Son çevrime ilişkin gerilme ve yerdeğiştirme durumları.	166
Şekil A.136	: a) Efektif rijitlik. b) Efektif sönüm. c) 250 mm’deki yatay kuvvet. d) Histeretik enerji. e) Yükleme grafiği.	167
Şekil A.137	: Üç boyutlu model.....	168

Şekil A.138	: (a) UDS3 boyutları – Yükleme yönü. (b) Malzeme özellikleri.....	168
Şekil A.139	: Son çevrime ilişkin gerilme ve yerdeğiştirme durumları.	169
Şekil A.140	: (a) Deneysel. (b) Kuramsal histeretik eğrileri.	170
Şekil A.141	: Son çevrime ilişkin gerilme ve yerdeğiştirme durumları.	170
Şekil A.142	: a) Efektif rijitlik. b) Efektif sönüm. c) 250 mm’deki yatay kuvvet. d) Histeretik enerji. e) Yükleme grafiği.	171
Şekil A.143	: Üç boyutlu model	172
Şekil A.144	: (a) UDS4 boyutları – Yükleme yönü. (b) Malzeme özellikleri.....	172
Şekil A.145	: Son çevrime ilişkin gerilme ve yerdeğiştirme durumları.	173
Şekil A.146	: (a) Deneysel. (b) Kuramsal histeretik eğrileri.	174
Şekil A.147	: Son çevrime ilişkin gerilme ve yerdeğiştirme durumları.	174
Şekil A.148	: a) Efektif rijitlik. b) Efektif sönüm. c) 250 mm’deki yatay kuvvet. d) Histeretik enerji. e) Yükleme grafiği.	175

**U-ŞEKİLLİ ÇELİK SÖNÜMLEYİCİLERİN HİSTERETİK
DAVRANIŞLARININ MODELLENMESİ VE DÜŞÜK SÖNÜMLÜ KAUKUK
MESNETLERLE BİRLİKTE SİSMİK İZOLATÖR OLARAK
KULLANILMASI**

ÖZET

Yapılar yaşamları boyunca kar, rüzgâr, deprem vs. gibi yüklere birçok kez maruz kalmaktadırlar. Deprem etkileri çoğunlukla yapı tasarımı için en olumsuz koşulları yaratmaktadır. Bunun nedeni, yapısal elemanlara ulaşan deprem enerjisinin çatlaklara ve diğer önemli hasar türlerine ulaşmasıdır.

Birçok depreme dayanıklı yapı tasarımı yaklaşımı bulunmaktadır. Geleneksel yöntemlerde yapı, elemanların boyutlarını arttırmak yoluyla dayanım esaslı, elastik ötesi davranış iyileştirilerek süneklik esaslı tasarım yapılmaktadır. Her iki durumda da depremin enerjisi doğrudan yapısal elemanlar tarafından karşılanmaktadır. Oysa modern yaklaşım sismik enerjilerin yapısal elemanlara ulaşmadan sönmölenmesini amaçlamaktadır.

Sismik izolasyon sistemleri yapının periyodunu öteleyerek/uzatarak yapıya etkiyen yükleri azaltırken, enerji sönmöleyici sistemler ise sismik enerjinin sönmölenmesine olanak sağlar. Her iki yaklaşımın da birlikte kullanıldığı yapı tasarım anlayışı, sismik etkileri yapısal elemanlara ulaşmadan azaltıp, sönmölenmesi nedeni ile modern tasarım anlayışı ile uyumaktadır.

Özellikle 1995 Kobe Depremi sonrası performansını kanıtlayan sismik izolasyon sistemlerine olan güven artmıştır. Günümüzde Japonya başta olmak üzere Amerika, Çin, Yeni Zelanda, İtalya ve Türkiye gibi deprem etkisi altındaki ölkelerde uygulamaları yaygınlaşmaya başlamıştır.

Bölüm 1’de motivasyon ve tezin kapsamı incelenmekle birlikte bu çalışma sekiz ana bölümden oluşmaktadır. 2. Bölümde ilk olarak sismik izolasyon ve enerji sönmöleyici sistemlerden uygulamada en çok kullanılanları incelenmiştir. Bu sistemlere ilişkin üstünlükler ve sakıncalar belirlenmiştir. Sismik izolasyon sistemleri ve enerji sönmöleyici sistemler karşılaştırıldığında herbirinin kendine özgün üstünlükleri olduğu görölmüştür. Bu sistemler arasından yerel koşullarda üretilebilirlik kriteri göz önüne alınarak en uygun olan düşük sönmömlü kauçuk mesnet (LDR) ve U-şekilli metalik enerji sönmöleyici (UD) detaylı olarak incelenmek üzere seçilmiştir.

Hem LDR’nin hem de UD’nin özellikleri detaylı olarak açıklanmıştır. LDR’nin tek başına kullanılması durumunda en büyük sakıncası ilave sönmö ihtiyaçının olması iken, UD’nin en büyük sakıncası düşey rijitliğinin düşük olmasıdır. Ancak iki bileşen bir arada kullanılınca birbirinin zayıflıklarını kapatan yeni bir taban izolasyon sistemi (ULB) ortaya çıkmaktadır. UD, LDR’nin ihtiyaç duyduğu sönmöü sağlarken, LDR’de yüksek düşey rijitliği ile yapının yatayda hareket etmesine olanak vermektedir.

İzolasyon sisteminin seçilmesinin ardından sonraki aşama ULB’nin yatay yükler altında histeretik davranışını belirlemek olmuştur. Bu amaçla hem UD’nin hem de LDR’nin histeretik davranışının modellenmesi gerekmektedir. Yapılan literatür

taraması sonrası düşük sönümlü kauçuk izolatörlerin davranışının lineer olarak kolayca modellenebileceği görülmüştür. Bu nedenle, bu tez çalışmasında doğrusal olmayan davranış gösteren metalik enerji sönümleyici UD'nin histeretik davranışını modellemek üzerine yoğunlaşmıştır.

UD ile ilgili yapılmış çalışmalar taranıp 3. Bölümde sunulmuştur. Sonrasında 4. Bölümde ABAQUS programı ile yatay yükler altında davranışını temsil eden sonlu elemanlar modeli kurulmuştur. Kurulan sonlu elemanlar modeli UD40 isimli sönümleyiciye ilişkin deneysel çalışmaya uyarlanıp sonuçların tutarlılığı 5. Bölümde karşılaştırılmıştır. UD40'da meydana gelen kalıcı deformasyonların ve yatay yükler altındaki histeretik davranışının deneysel bulgularla uyumlu olduğu gözlenmiştir. UD40 sönümleyici 0° yükleme yönünde daha çok üst ve alt kollarda eğilmeye zorlanırken, 90° yükleme yönünde burulma ve eksenel deformasyonlar ön plana çıkmıştır.

UD sönümleyicilerin farklı geometrilerde tasarlanması durumunda histeretik eğrilerinin değiştiği bilinmektedir. Bu durum, UD'nin boyutlarında değişikliğe giderek istenen sismik performansın elde edilmesine olanak sağlamaktadır. 6. Bölümde açıklandığı üzere çalışmada UD40 sönümleyicisine eşdeğer hacimlerde iki farklı tip olmak üzere toplamda 10 adet yeni sönümleyici oluşturulmuş bu sönümleyicilerin histeretik eğrileri seçilen yükleme protokolleri altında elde edilerek karşılaştırılmıştır. UDF isimli sönümleyiciler üst ve alt kollar bükülerek geliştirilmiş, bu şekilde üst ve alt kolların daha fazla eksenel kuvvet etkisinde kalması amaçlanmıştır. UDK isimli sönümleyicilerde ise çelik kolların üzerlerine açılan dairesel delikler ile plastik deformasyonların kollar üstünde daha da yaygınlaşması amaçlanmıştır. UDF sönümleyicilerin çoğunun aynı çevrim sayısında UD40'a göre daha fazla enerji sönümledikleri görülmüştür. UDK sönümleyicilerin ise UD40 sönümleyicilere göre ilk rijitlikleri azalmıştır; bu azalma tasarım ölçütlerine göre tercih edilebilecek bir durum olduğundan olumludur. UD sönümleyicilerin tamamına ilişkin sönüm oranları %50'nin üzerindedir.

UD sönümleyicilerin davranışı büyük oranda yükleme yönünden bağımsızdır. Ancak uygulamada bu sönümleyiciler tek başına kullanılmak yerine genelde 2'li, 4'lü, 6'lı ve 8'li olarak kullanılmaktadırlar. Bu nedenle bu çalışmada aynı zamanda çoklu sönümleyiciler de modellenmiş, farklı doğrultularındaki yüklemeler altındaki davranışları incelenmiştir.

UD sönümleyicilerin yatay yükler altında histeretik davranışının belirlenmesi ile ULB taban izolasyon sistemine ilişkin davranış modeli de elde edilmiş olmaktadır. Taban izolasyon sisteminin gerçek deprem ivmesi altındaki davranışı Bölüm 7'de , 4 adet deprem ivmesi kullanılarak elde edilmiştir. Bu amaçla SAP2000 programı ile hem ankastre mesnetli hem de taban izolasyonlu iki farklı yapı modellenip, ULB'nin performansı incelenmiştir. Kullanılan deprem ivmeleri 18 Mayıs 1940 El Centro, 17 Ocak 1994 Northridge, 31 Ekim 1935 Helena Montana ve 17 Ağustos 1999 Kocaeli depremleridir. Yapılan hızlı doğrusal olmayan analiz (FNA) sonucunda büyük deplasmanlarda ankastre mesnetli yapıya göre maksimum taban kesme kuvvetlerinde %85~%89 aralığında , kat ötelemelerinde ise %88~%90 aralığında azalma görülmüştür. Helena Montana depreminde ise ULB'de meydana gelen deplasman elastik sınırın gerisinde kalarak yalnızca maksimum taban kesme kuvvetinde azalma sağlamış yapının sönümünü arttıramamıştır. Rüzgâr gibi yatay yükler nedeni ile izolasyon sisteminin ilk rijitliğinin belli bir seviyeden aşağı düşürülemediği için böyle bir sonucun ortaya çıkması beklenmektedir.

Bu alışma kapsamında UD yalnızca taban izolasyon sisteminde kullanılmış olsa da çeşitli düzenlemelerle yapıda başlı başına enerji sönümleyici olarak da kullanılabilir. Yapılan analizler sonucunda UD'nin histeretik davranışlarının kararlı olduğu ve uygulandığı yapıda sismik performansı büyük oranda iyileştirdiği görülmektedir. Bunun yanısıra kolayca retililebilir olması ve maliyetinin dşk olması sismik izolasyon ve enerji sönümleyici sistemlerin yaygınlaşması iim önemli bir fırsattır.

MODELLING HYSTERETIC BEHAVIOUR OF U-SHAPED STEEL DAMPERS AND USING SUCH DAMPERS WITH LOW DAMPING RUBBER BEARINGS AS SEISMIC ISOLATOR

SUMMARY

Building structures are subjected to variable loads (wind, earthquake, snow etc.) many times during their lifetime. Among these effects, earthquake loading usually creates the worst conditions for structures, because during an earthquake input energy, which reaches structural elements, may cause cracks and other types of the heavy structural damage.

Conventional approach to earthquake resistant building design (ERBD) relies upon strength, stiffness and inelastic deformation capacity, which are great enough to withstand a given level of earthquake effects. However, modern approach in today's designs aims to reduce/mitigate seismic energy before the input energy reaches the structural elements.

As a structural and damage control technology for buildings, seismic isolation systems reduce forces, by shifting the natural period of structure away from the dominant period of earthquake excitation. On the other hand, energy-dissipating systems provide damping for seismic input energy. A design approach, uses both of the systems together, is known as the modern design approach.

Especially after the 1995 Kobe earthquake, satisfactory performance of seismic isolated buildings accelerated the implementation of seismic isolation systems in new constructions. Nowadays, seismic isolation devices are used in many big project in earthquake prone countries like Japan, USA, China, New Zealand, Italy and Turkey etc.

Common seismic isolation and energy dissipating devices are investigated then the advantages and disadvantages are summarized on a table given in Section 2. Each device has its own benefits. According to the criteria of producibility, low damping rubber bearing (LDR) and U-shaped steel damper (UD) have been chosen in this thesis to investigate in detail from between these devices. Section 3 includes a literature review on UD dampers and mechanical properties of LDR and UD. Factors affecting mechanical properties (temperature, load velocity, load direction etc.) are given detailed in this section.

The biggest disadvantage of LDR is insufficient damping ratio while UD has low vertical stiffness. However, when these devices come together, a new base isolation device (ULB) eliminating both disadvantages is obtained. In other words, ULB device has high damping ratio provided by UD, and high vertical stiffness provided by LDR.

After choosing an appropriate base isolation system, next step is to determine hysteretic behavior of ULB under lateral simulated loads. To that end, hysteretic

behavior of UD and LDR must be numerically modelled. It is known that behavior of LDR can be easily modelled as the behavior is almost linear. Therefore, this thesis focuses on modelling of the metallic damper's (UD's) behavior, which is highly nonlinear.

In order to simulate hysteretic behavior under lateral loads, a 3D finite element model (FEM) of UD is developed with ABAQUS in Section 4. Two type of steel material Q235 and SN490B are used and UD dampers analyzed under three different load protocol. Section 5, this FEM model was adopted for UD40 damper, which has an experimental study on it. This opportunity made it possible to compare experimental and FEM results. It was observed that both permanent deformations and hysteretic behavior under lateral loads, which were determined from FEM analysis, are similar to experimental results. Deformations on UD40 under 0 degree was mainly caused by cyclic bending in the dampers, which was concentrated mostly in the middle part of the upper and lower arms. However, the deformations on UD40 under 90 degrees cyclic loading was mostly caused by the torsion and concentrated at the end of the damper arm near the connections.

It is known that hysteretic behavior of UD devices varies with changing geometry of the damper. For this reason, designing UD damper's geometry for any seismic demand would be quite important. In Section 6, a total of 10 new dampers (two different types) are geometrically designed and their hysteretic behaviors are compared. UDF is formed by bending of upper and lower arms to obtain axial forces by minimizing bending effects. UDK is formed by opening holes along the arms. At same cycle number, UDF mostly dissipated more energy than UD40. Plastic deformations on UDF dampers concentrated between bended arms and curved plate. UDK had lower first effective stiffness than UD40. Deformations on UDK dampers concentrated around biggest hole and this hole controlled behavior of UDK dampers. Therefore, it must be chosen around 20 mm ($R/t=0.28$) hole diameter in order to distribute plastic deformations. All UD damper's effective damping ratio was determined more as 50 percent or above.

UD dampers have similar hysteretic behavior under any loading direction. In practice, these dampers are used as a combined system instead of a single part. Therefore, in this study hysteretic behavior of UD systems are also investigated under different loading directions.

Hysteretic behavior of ULB was obtained after determining the behavior of UD. To further investigate real behavior of ULB as base isolation system under real ground motions, four earthquake ground motion data were used. To this end, in Section 7, a two-story structural system was modelled with structural analysis program SAP2000, as fixed base and isolated base. 18 May 1940 El Centro, 17 January 1994 Northridge, 31 October 1935 Helena Montana and 17 August 1999 Kocaeli ground motions were used for this analysis model. According to fast nonlinear analysis (FNA) results, under large displacements of the structure implementation of ULB resulted in a large decrease in maximum base shear forces and story drifts. When 31 October 1935 Helena Montana earthquake acceleration data were used since the displacements developed within the elastic limit in ULB, no additional damping has been obtained. Considering minor lateral loads like wind effects, first elastic stiffness and elastic limit is always required for ULB.

Although UD was used just as base isolation system, UD can be used as energy dissipation device with different bracing configuration. This use is outside the scope

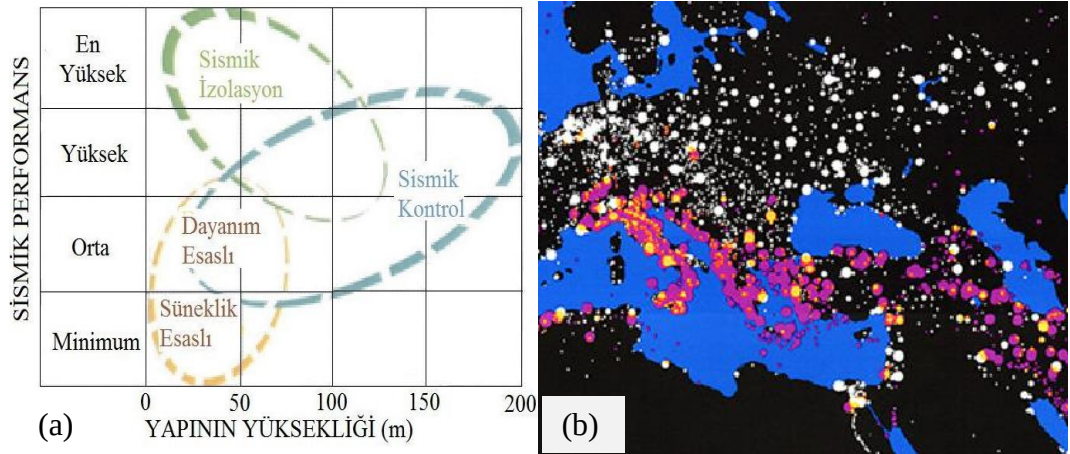
of this thesis; however, a potential forthcoming work can be structured on this specific investigation. According to the analysis results obtained here stable hysteretic behavior can be achieved for UD and this would improve largely the seismic performances of structures. In addition to this, as this system seems a low-cost seismic device, it is possible to manufacture such devices with the help of local producers in Turkey. This would result in a widespread use of seismic isolation systems in existing and new buildings located seismically vulnerable areas.

1. GİRİŞ

1.1 Motivasyon

İnsanlık tarih öncesi çağlardan bu yana barınma ve çeşitli ihtiyaçlarını giderecek yapılar inşa etmektedir. Yapıların inşası ile birlikte deprem, insanlık için en ölümcül sorunlardan birisi olmuştur. Deprem, bu denli eski problemlerden birisi olmasına ve literatürde yapılan yoğun araştırmalara karşın pek çok bilinmeyi içermektedir. Öyle ki son yüzyılda depremlerden dolayı 2 milyondan fazla insan yaşamını kaybetmiştir (USGS, 2014).

Depreme dayanıklı yapı tasarımı anlamında birçok yaklaşım bulunmaktadır. Geleneksel yöntemlerde yapı, elemanların boyutlarını arttırarak dayanım arttırılmakta ya da yapının elastik ötesi davranışı ve sünekliği arttırılarak sismik etkilere karşı yapının korunması amaçlanmaktadır (Şekil 1.1). Sismik izolasyon ve enerji sönümleme sistemleri ise yapıya hasar vermesi beklenen etkilerin diğer yapısal elemanlara ulaşmadan azaltılmasını ve sönümlenmesini amaçlamaktadır (Naeim ve Kelly, 1999).



Şekil 1.1 : (a) Tasarım yöntemleri sismik performans–yükseklik ilişkisi (Wada ve Mori, 2008). (b) Depremsellik ve dünya şehirleri haritasından bir kesit (USGS, 1991).

İlk sismik izolasyon planı patenti 1909’da alındığından beri uzun yıllar çok az yapının bu konseptte uygun olarak yapıldığı anlaşılmaktadır. Bu kavram son yıllarda

enerji sönümleyici sistemlerin ve kauçuk izolatörlerin gelişmesi ile birlikte yeniden önem kazanmıştır (Naeim ve Kelly, 1999).

Özellikle 1995 Kobe Depremi sonrası performansını kanıtlayan sismik izolasyon sistemlerine olan güven artmıştır (Nakashima ve Chusilp, 2003). Günümüzde Japonya başta olmak üzere Amerika, Çin, Yeni Zelanda, İtalya gibi deprem etkisi altındaki ülkelerde uygulamaları yaygınlaşmaya başlamıştır. Ülkemizde ise çoğunluğu yüksek bütçeli projelerde olmak üzere sismik izolasyon ve enerji sönümleyici sistemi kullanılan yapı sayısı henüz 100'ü aşmamaktadır (Yenidoğan ve Erdik, 2014). Ancak milyonlarca insanın deprem tehlikesi altında yaşadığı düşünülürse geleneksel yöntemlere göre pek çok üstünlüğü bulunan sismik izolasyon ve enerji sönümleme yöntemlerinin yakın gelecekte daha da yaygınlaşması beklenmektedir.

1.2 Kapsam

U-şekilli çelik sönümleyicilerin sayısal modellenmesine odaklanan bu çalışma sekiz bölümden oluşmaktadır.

Giriş bölümünde çalışmanın motivasyonu ve kapsamı özetlenmiştir.

Sismik izolasyon ve enerji sönümleyici sistemler kavramsal olarak açıklanmış, uygulamada en çok kullanılan izolatörler ve sönümleyici elemanlar tanıtılmıştır. Bu elemanların üstünlükleri ve sakıncaları bir tablo halinde sunulmuş, bu tez kapsamında incelenmek üzere Türkiye’de henüz uygulama olanağı bulunmayan, pek araştırılmayan, üretilebilirlik ve performans bakımından daha uygun olan metalik sönümleyici ve düşük sönümlü kauçuk mesnet seçilmiştir.

Seçilen metalik sönümleyici ve düşük sönümlü kauçuk izolatör hakkında üçüncü bölümde detaylı açıklama yapılmış, bu elemanların mekanik özelliklerinden söz edilmiştir. Bölümün sonunda U-şekilli metalik sönümleyicilere ilişkin literatür taraması yapılmış bu konuda yapılmış çalışmalara kısaca yer verilmiştir.

U-şekilli çelik sönümleyicinin sismik etkiler altındaki davranışını belirlemek için sonlu elemanlar modelinin oluşturulması esaslarına dördüncü bölümde yer verilmiştir. Sonlu elemanlar modeline ilişkin analiz düzeneği, malzeme özellikleri, yükleme tipleri ve diğer varsayımlar bu bölümde kapsamlı olarak açıklanmıştır.

Beşinci bölüm, dördüncü bölümde geliştirilen sonlu eleman modelinin güvenilirliğini test etmek için daha önce yapılmış deneysel çalışma ile karşılaştırmaya ayrılmıştır. 0 derece ve 90 derece yönlerinde sinüsoidal yükleme etkisindeki U-şekilli sönümleyicinin sonlu elemanlar modeli kurulup histeretik eğri ve oluşan deformasyonlar karşılaştırılmıştır.

Altıncı bölümde Japonya’da varolanla birlikte alternatif geometrilerde 10 adet U-şekilli sönümleyici tasarlanmıştır. Öngörülen çevrimsel yerdeğiştirme yükleme protokolü altında oluşturulan sönümleyicilere ilişkin histeretik eğriler ve bu eğrilere bağlı sönüm oranı, etkin rijitlik, ulaşılan maksimum kuvvet ve sönümlenen enerji parametreleri bu bölümde karşılaştırılmıştır. Bunun dışında bu çalışmada toplamda 15 adet tekli, 5 adet çoklu olmak üzere toplamda 20 adet sönümleyici oluşturulmuş ve bu sönümleyicilere ilişkin detaylı sonuçları EK-A’da verilen toplamda 26 adet histeretik eğri elde edilmiştir.

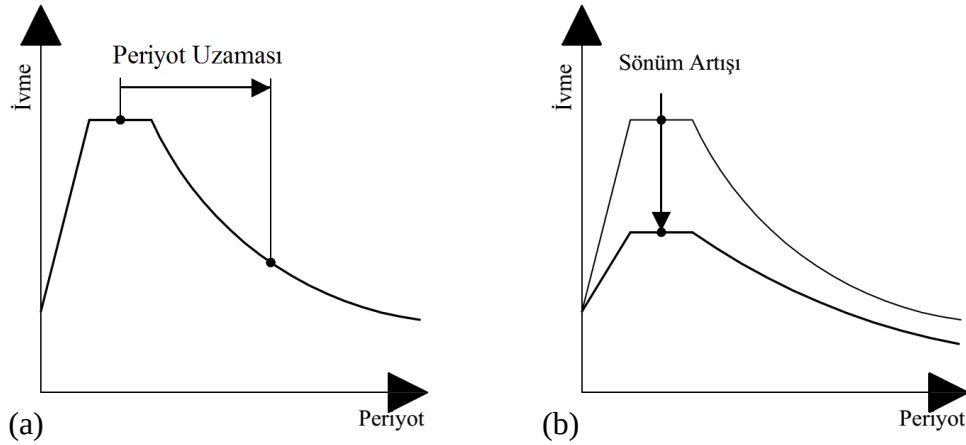
Önceki bölümlerde bileşen olarak incelenen U-şekilli sönümleyicinin seçilen örnek bir yapıda tümsel davranışa etkisinin belirlenmesi amacı ile 4 adet deprem ivme kaydı altında zaman tanım alanında analizi yedinci bölümde yapılmıştır. Bu amaçla seçilen yapının sonlu elemanlar modeli kurulup hem ankastre temelli (yalıtımsız) hem de düşük sönümlü kauçuk izolatör ve U-şekilli sönümleyici yerleştirilmiş modeli ayrı ayrı çözülüp sayısal bir karşılaştırma yapılmıştır.

Sekizinci bölümde, yapılan çalışmanın sonuçları üzerinde durulmuş, bu çalışma esas alınarak ileride yapılabilecek çalışmalardan sözedilmiştir.

2. SİSMİK İZOLASYON VE ENERJİ SÖNÜMLEYİCİ SİSTEMLER

2.1 Sismik İzolasyon Kavramı

Sismik izolasyon yapıyı, temel ya da katlar arasına yatay rijitliği düşük elemanlar koyarak deprem hareketinin yatay bileşenlerinden ayırmak olarak tanımlanmaktadır (Naeim ve Kelly, 1999). Bu sayede yapının periyodu uzayarak daha düşük bir deprem kuvvetinin etkimesi sağlanmaktadır (Şekil 2.1) (Skinner ve diğ, 1993).



Şekil 2.1 : Periyot-ivme grafiği–Spektral ivme azalması a) Periyot uzaması b) Sönüm artışı

Sismik izolasyon sistemleri Japonya başta olma üzere dünyanın çeşitli ülkelerinde kamu ve özel sektör projelerinde uzun yıllardır uygulanmaktadır. Ülkemizde çoğunluğu önem katsayısı yüksek ($I > 1.0$) yapıların bulunduğu projelerde olmak üzere şu ana kadar sismik izolasyon yapılmış yapı sayısı 100'ü aşmamaktadır (Yenidoğan ve Erdik, 2014). Her geçen gün sismik izolasyon ilkesi ile çalışan bir çok sismik cihazın patenti alınmaktadır.

2.2 Sismik İzolasyon Sistemleri

2.2.1 Düşük sönümlü kauçuk mesnet (LDR)

Düşük sönümlü kauçuk mesnet (LDR), vulkanize edilmiş kauçuğun iki kalın çelik levha arasına yerleştirilmesiyle üretilir (Çizelge 2.1). Kauçuk bloğun arasına ince

elik levhalar/tabakalar yerleřtirilerek dűşey rijitlięi arttırılır. Bűylece, dűşeyde yűksek rijitlik yatayda yapının hareketine izin vermesi için dűřűk rijitlik elde edilmiř olur (Naeim ve Kelly, 1999).

Dűřűk sűnűmlű kauçuk mesnet, űretim ve modelleme kolaylıęı nedeni ile sıklıa kullanılan bir sismik izolasyon cihazıdır. Bűyűk depremlerden dolayı çok fazla deplasman yapması dolayısı ile sűnűmleyici sistemlerle (űrneęin bu çalıřmada incelenen metalik sűnűmleyici) birlikte kullanılması gerekmektedir.

2.2.2 Kurşun ekirdekli kauçuk mesnet (LRB)

Kurřun ekirdekli kauçuk mesnet (izelge 2.1) 1970’lerde Yeni Zelanda’da űretilmiřtir. űretim yűntemi dűřűk sűnűmlű kauçuk mesnet ile aynı olmakla birlikte tek farkı içerisinde bir ya da daha fazla kurřun çekirdek bulundurmasıdır (Naeim ve Kelly, 1999).

Mesnet yanal yűkler etkisinde hareket ettikçe içerisindeki kurřun çekirdek plastik řekildeęiřtirme yapmakta bu sayede sűnűm oranı artmaktadır. Kurřun ekirdekli kauçuk mesnet hem sűnűmleme hem de yalıtım saęlayabilen en ekonomik sistemlerden biridir.

2.2.3 Yűksek sűnűmlű kauçuk mesnet (HDRB)

Yűksek sűnűmlű kauçuk mesnet (izelge 2.1) Malezya Kauçuk űreticileri Birlięi tarafından 1982’de kauçuęun sűnűmű, karbon blokları, reçineler, yaęlar ve dięer dolgu maddelerinin eklenmesi ile arttırıldıęında ortaya çıkmıřtır (Naeim ve Kelly, 1999).

Yűksek sűnűmlű kauçuk mesnet yatay deplasman yaptıęında sűrtűnmeye baęlı olarak ısı açıęa çıkar. Bu űzellik enerji yutarak sűnűműn %20 mertebelerine kadar çıkmasına olanak saęlar. Hem sismik yalıtım hem de enerji sűnűmlemeye olanak veren sistemlerden birisidir.

2.2.4 Sűrtűnmeli sarkaç sistemler (FPS)

Çizelge 2.2’de gűrűldűęű gibi sűrtűnmeli sarkaç sistemi konkav elik levha űzerinde sűrtűnme katsayısı dűřűk bir kayıcının yerleřtirilmesi ile oluřur. Bu kayıcı űst yapının yatay deplasman yapmasına izin vermektedir.

Sürtünmeli sarkacın küresel geometrisinden dolayı yapı deplasman yaptığı zaman yükselmekte, dinamik etki bittiğinde başlangıç konumuna gelmesi için gerekli kuvvet oluşmaktadır.

Sürtünmeli sarkaç sistem sismik yalıtımın yanı sıra çelik levha ile kayıcının sürtünmesi ile bir miktar enerji de sönmlemektedir (Patil ve Reddy, 2012).

2.3 Pasif Enerji Sönmleyiciler

Yapıların enerji yutma kapasitesinin artırılması için kullanılan bu cihazlar hem yeni yapıların tasarımında hem de mevcut yapıların depreme karşı güçlendirilmesi amacı ile kullanılabilir. Bu cihazların kullanım amacı depremin enerjisini yapısal elemanlara ulaşmadan sönmlemektir.

Yüksek yapılarda rüzgâr enerjisini sönmlemek ve salınımı kontrol etmek amacı ile de kullanılmaktadır.

2.3.1 Metalik sönmleyiciler (MD)

Metalin (çelik, alüminyum vb.) plastik deformasyonu ile depremden dolayı ortaya çıkan enerjinin sönmlenmesi için en etkili mekanizmalardan birisidir (Soong ve Dargush, 1997). Kelly ve diğ. (1972) ve Skinner ve diğ. (1974)'in kavramsal ve deneysel çalışmaları ile birlikte metalik sönmleyiciler sismik enerjinin büyük bölümünü tüketmek amacıyla kullanılmaya başlanmıştır. Birçok farklı geometrideki metaller bu amaçla kullanılmaktadır. Analizi zaman almasına karşın, uygulanması en ekonomik sistemlerden biridir.

2.3.2 Sürtünme tipi sönmleyiciler (FD)

Sürtünme tipi sönmleyiciler katıların sürtünmesi mekanizmasını kullanarak yapının üzerine gelen enerjinin sönmlenmesini amaçlamaktadır. İki katı cisim birbirini üzerinde hareket ettiğinde sürtünmeden dolayı hareketin yönüne ters yönde bir tepki kuvveti oluşmaktadır. Bu sayede dinamik etkiler azalmaktadır (Soong ve Dargush, 1997).

2.3.3 Visko-elastik katı sönümleyiciler (VSD)

Viskoelastik sönümleyiciler, uçaklarda 1950'lerde kullanılmaya başlansa da binalardaki ilk uygulaması 1969'da Dünya Ticaret Merkezinin ikiz kulelerinde yapılmıştır.

Yapı uygulamalarında kullanılan viskoelastik malzeme genelde kopolimerden ve camsı maddelerden üretilir. Viskoelastik tabaka iki çelik levha arasına yerleştirilir. Üst ve alt levhanın göreceli hareketinden dolayı enerji tüketilmesi sağlanır (Soong ve Dargush, 1997).

2.3.4 Viskoz akışkanlı sönümleyiciler (VFD)

Otomotiv ve askeri uygulamalarda sıkça kullanılan viskoz akışkanlı sönümleyiciler yapılarda deprem ve rüzgâr kuvvetlerinin yapısal elemanlarda oluşacak zararı engellemek amacı ile kullanılır.

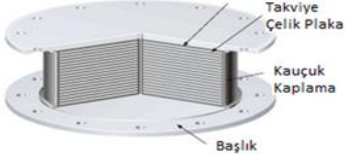
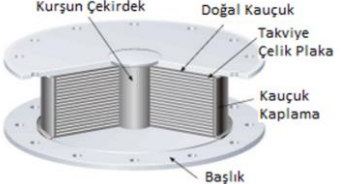
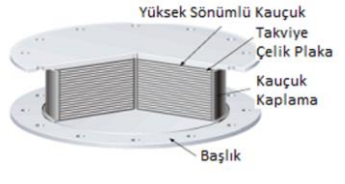
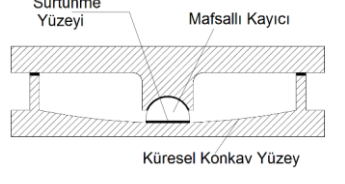
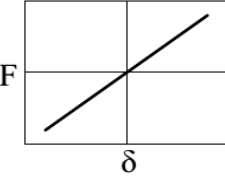
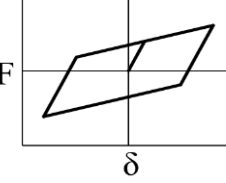
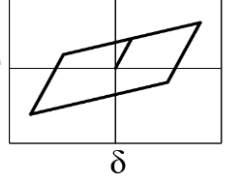
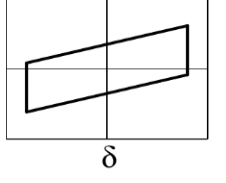
Sönümleyicinin uçları gerekli rölatif deplasman yaptığında içerisindeki metal sıvıyı kanallardan geçmeye zorlar. Bu nedenle hıza bağlı sönüm ortaya çıkar ve enerji yutulur (Spencer ve Nagarajaiah, 2003).

2.4 Sismik İzolasyon ve Enerji Sönümleyici Sistemlerin Karşılaştırılması

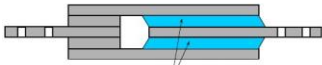
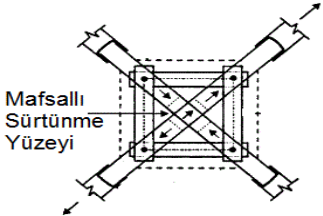
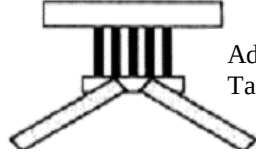
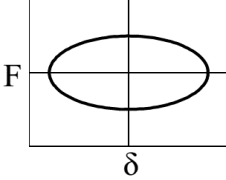
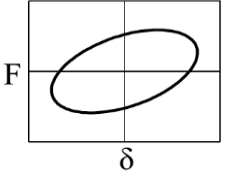
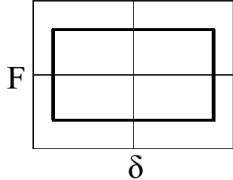
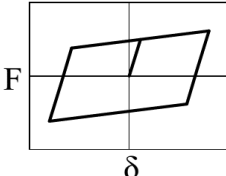
Bölüm 2.3'te bu çalışmada ele alınan sismik izolatörlerin özelliklerinin ve farklılıklarının daha iyi ortaya konabilmesi amacıyla, uygulamada sıkça kullanılan sismik izolasyon ve enerji sönümleyici sistemler kısaca tanıtılmıştır. Bu alt bölümde ise tüm sistemlerin karşılaştırılabilir özellikleri Çizelge 2.1 ve 2.2'de verilmiştir. Her sistemin kendine özgün üstünlükleri ve sakıncaları gösterilmektedir. Örneğin; düşük sönümlü kauçuk izolatörün üretiminin ve modellenmesinin daha kolay olmasının yanında mekanik davranışı zamandan çok etkilenmemekte, ancak sönüm oranı diğerlerine göre çok düşük kalmaktadır. Viskoz sıvı sönümleyicinin küçük deplasmanlarda çalışmaya başlaması bir üstünlük iken göreceli olarak maliyetli olması ve deprem esnasında sıvı kaybı olasılığı sakınca olarak karşımıza çıkmaktadır (Symans ve diğ., 2008). Bu nedenle, en iyi izolasyon ve sönümleyici sistemi belirlemek yerine kullanım alanına göre en uygun olanına karar vermek daha yerinde ve anlamlı olacaktır.

Bu çalışmada incelenmek üzere sismik izolasyon ve sönümleyici sistemler arasından düşük sönümlü kauçuk mesnet (LDR) ve metalik sönümleyici seçilmiştir. İki elemanın seçilmesinin temel nedeni retilabilirliğinin kolay olması, Türkiye’de bu konuda ortaya çıkan açığı yerel olanaklarla giderebilecek olma olanağı ve yapıya uygulandığı takdirde uzun süre kalıcı performans göstermesidir. LDR’nin ek sönüm gereksiniminin metalik sönümleyiciler ile karşılanarak, bu sayede üretimi kolay ve efektif bir taban izolasyon sistemi oluşturulması amaçlanmıştır.

Çizelge 2.1 : İzolatör sistemlerin karşılaştırması

	Düşük Sönümlü Kauçuk İzolatör	Kurşun Çekirdekli Kauçuk İzolatör	Yüksek Sönümlü Kauçuk İzolatör	Sürtünmeli Sarkaç İzolatör
Genel Yapı				
İdeal Histerik Davranış				
Kullanım Amacı	İzolasyon	İzolasyon ve Enerji Sönütleme	İzolasyon ve Enerji Sönütleme	İzolasyon ve Enerji Sönütleme
Sıcaklığın Etkisi	Orta	Az	Orta	Az
Sönüm Oranı	% 2-3	% 15 ~ 30	% 15 ~ 20	% 5 ~ 40
Maliyet	Az	Orta	Fazla	Az
Üstünlükler	•Üretimi kolay •Modellemesi kolay •Yaşlanma, ve yükleme geçmişinden çok etkilenmez. •Mekanik davranışı frekanstan bağımsızdır.	•Uygulanma sıklığı, •İzolasyon sağlayıp aynı zamanda enerji sönütleme özelliğine sahip en ekonomik sistemlerden birisidir.	•İlk ve son rijitliği fazladır, bu sayede rüzgar gibi küçük ve güçlü deprem gibi büyük yatay kuvvetlere etkili reaksiyon gösterebilir.	•Yapının ağırlığına bağlı olmadan titreşim periyodunu ayarlamak mümkündür. •Cihazın maliyetinin düşüklüğünün yanında yapıya uygulanması da ekonomiktir. •Cihazın dayanıklılığı nedeni ile uzun süre kararlı bir performans gösterir. •Yalnızca görsel bir kontrol gerektirdiği için bakımı kolaydır.
Sakıncalar	•Ek Sönüme ihtiyaç duyar •Düşük sıcaklık, mekanik özelliklerini etkiler.	•Deprem sonrası içerisindeki kurşun çekirdeğin zarar görüp görmediğinin belirlenmesi.	•Görece pahalıdır. •Zamanla mekanik özellikleri değişebilmektedir.	•Sürtünme katsayısının sıcaklığa bağlı olması

Çizelge 2.2 : Sönümleyici sistemlerin karşılaştırması

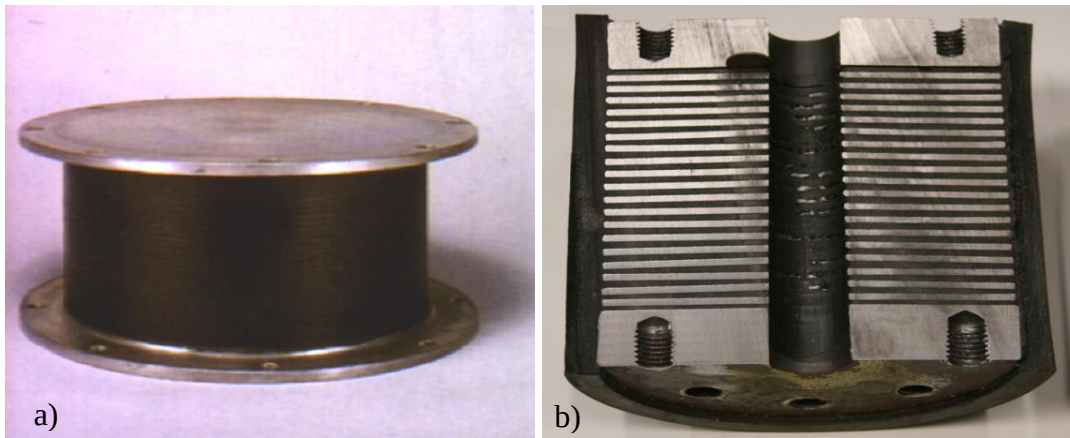
	Viskoz Sıvı Sönümleyici	Viskoelastik Katı Sönümleyici	Sürtünme Tipi Sönümleyici	Metalik Sönümleyici (ADAS,TADAS)
Genel Yapı		 Viskoelastik Katı Malzeme	 Mafsallı Sürtünme Yüzeyi	 Adas, Tadas
İdeal Histerik Davranış				
Kullanım Amacı	Enerji Sönümleme	Enerji Sönümleme	Enerji Sönümleme	Enerji Sönümleme
Sıcaklığın Etkisi	Az	Çok	Çok Az	Çok Az
Sönüm Oramı	% 5~ 30	%15 ~ 20	%50	%50'den fazla
Maliyet	Çok	Orta	Az	Çok Az
Üstünlükler	• Küçük deplasmanlarda çalışmaya başlar, • Askeri uygulamalarda kanıtlanmış performans kayıtlarının olması, • Yüksek kuvvet deplasman kapasitesi • Üretici çokluğu • Düşük frekanslarda ek rijitlik sağlamaz	• Küçük deplasmanlarda çalışmaya başlar, düzleme kuvveti oluşturur(restoring force)	• Büyük enerji yutma kapasitesi • Uygulama kolaylığı	• Üretim için ileri teknoloji gerektirmemesi • Kolayca uygulanabilir olup depremde kararlı bir davranış gösterirler. • Çevresel faktörler performanslarını etkilemezler. • Enerji sönüm kapasitesinin yanında ek rijitlik sağlar. • Deprem sonrası kolayca değiştirilebilirler.
Sakıncalar	• Sıvı kaybı olasılığı	• Sınırlı deformasyon kapasitesi, • Sistemin yırtılması olasılığı • Düşük kuvvet deplasman kapasitesi	• Kalıcı hasar ile sürtünme yüzeyi zamanla ayrılabilir, • Yüksek nonlineer davranış • Ek rijitlik	• Analiz uzunluğu • Yüksek doğrusal olmayan davranış • Ek rijitlik sağlar • Büyük deprem sonrası değişmesi gerekebilir.

3. DÜŞÜK SÖNÜMLÜ KAÇUK MESNET (LDR) VE U-ŞEKİLLİ ÇELİK ENERJİ SÖNÜMLEYİCİDEN (UD) OLUŞTURULAN SİSMİK İZOLASYON SİSTEMİ

Bu bölümde, izolasyon ve sönümleyici sistemlerinin üstünlükleri ve sakıncaları ortaya çıkarılıp, bu sistemler arasından Türkiye'deki uygulama olanağı yüksek olanları (maliyet, projelendirme kolaylığı bakım vs. nedenlerle) seçilmiştir. Uygunluk kriteri olarak sismik izolasyon ve sönüm ihtiyacının karşılanması yanı sıra mevcut koşullarda yerel olanaklarla üretilebilir olması da göz önüne alınmıştır. Bu nedenle seçilen (ULB) taban izolasyon sistemi düşük sönümlü kauçuk izolatör (LDR) ve U-şekilli çelik sönümleyici (UD) elemanın birlikte kullanılması ile oluşmaktadır.

3.1 Düşük Sönümlü Kauçuk Mesnet (LDR)

Şekil 3.1'de kesiti görülebilen düşük sönümlü kauçuk mesnet, vulkanize edilmiş kauçuğun iki kalın çelik levha arasına yerleştirilmesiyle üretilir. Kauçuk bloğun arasına ince çelik tabakalar yerleştirilerek düşey rijitliği artırılır. Böylece düşeyde yüksek rijitlik yatayda yapının hareketine izin vermesi için düşük rijitlik elde edilmiş olur (Naeim ve Kelly, 1999).



Şekil 3.1 : Düşük sönümlü kauçuk: a) Mesnet (Warn ve Ryan, 2012). b) Kesit (Kumar, 2012).

LDR'nin sönüm oranı % 2~3 mertebelerindedir, bu nedenle ek sönüm gereksinimi doğmaktadır. Düşük sönümlü kauçuk malzeme %100 kayma şekildeğiştirmesinin üzerinde lineer/doğrusal davranış göstermektedir. Bu durum analizde çok kolaylık sağlamaktadır.

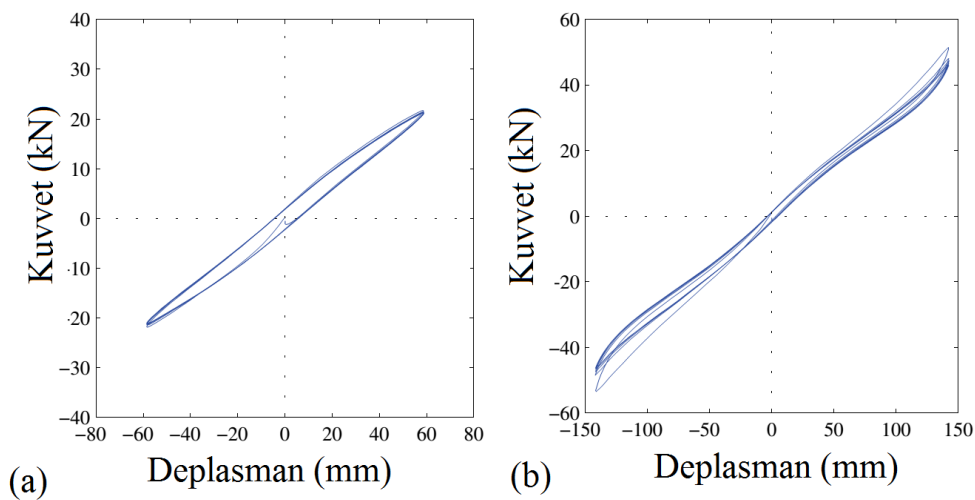
3.1.1 Mekanik özellikler

Bu bölümde LDR'nin kesme, basınç ve çekme kuvvetleri altında davranışları detaylı olarak incelenecektir.

3.1.1.1 Kesme kuvveti etkisi altında davranış

Şekil 3.2'de LDR'nin yatay kuvvet - yatay deplasman ilişkisi iki farklı düzeyde görülmektedir. Şekil 3.2a kayma şekildeğiştirmesinin %75, Şekil 3.2b ise %175 olduğu durumdaki deneysel sonuçları göstermektedir. Her ne kadar yüksek kayma şekildeğiştirmesinde yatay rijitlik az miktarda artsa da her iki durumda da LDR'nin lineer elastik davrandığı söylenebilir. Genelde LDR kayma deformasyonu %200'den büyük durumlarda rijitleşmektedir (McVitty ve Constantinou, 2015). Bu nedenle, kayma deformasyonu %200'den az olduğunda LDR lineer elastik olarak modellenebilir. % 100 kayma deformasyonunda LDR'nin kayma modülü 0,45~0,70 MPa aralığındadır.

Kuvvet-deplasman (histeretik çevrim) alanı, sönüm oranını öngörmek amacı ile kullanılabilir. Şekil 3.2'de LDR'nin histeretik çevrim alanı küçük olduğundan sönüm oranının düşük olduğu sonucu çıkartılabilir.



Şekil 3.2 : Yatay kuvvet–deplasman grafiği: a) Kayma şekil değiştirmesi, %75.
b) Kayma şekildeğiştirmesi, %175 (Constantinou ve diğ, 2007).

3.1.1.2 Basınç kuvveti etkisi altında davranış

Kauçuk tek başına basınç altında şişme (bulking) yapmaktadır. Ancak, içerisindeki ince çelik levhalarla güçlendirilmesi sonucu basınç etkisi altında oldukça yüksek düşey rijitliğe sahiptir (Stojadinovic, 2011).

3.1.1.3 Çekme kuvveti etkisi altında davranış

LDR küçük çekme kuvvetlerinde gerekli rijitliği gösterebilmekte ancak çekme kuvveti 1,5~2,5 MPa düzeyine çıktığında kauçukta küçük çatlaklar oluşmaktadır. Çatlaklar bir kere oluştuğu zaman bütünlük bozulmakta ve mesnet rijitliği önemli derecelerde azalmaktadır (Constantinou ve diğ, 2007). Bu nedenle elastomerik mesnetler çekme kuvvetlerine maruz kalmayacak şekilde tasarlanırlar.

3.1.2 Mekanik özelliklerine etkiyen faktörler

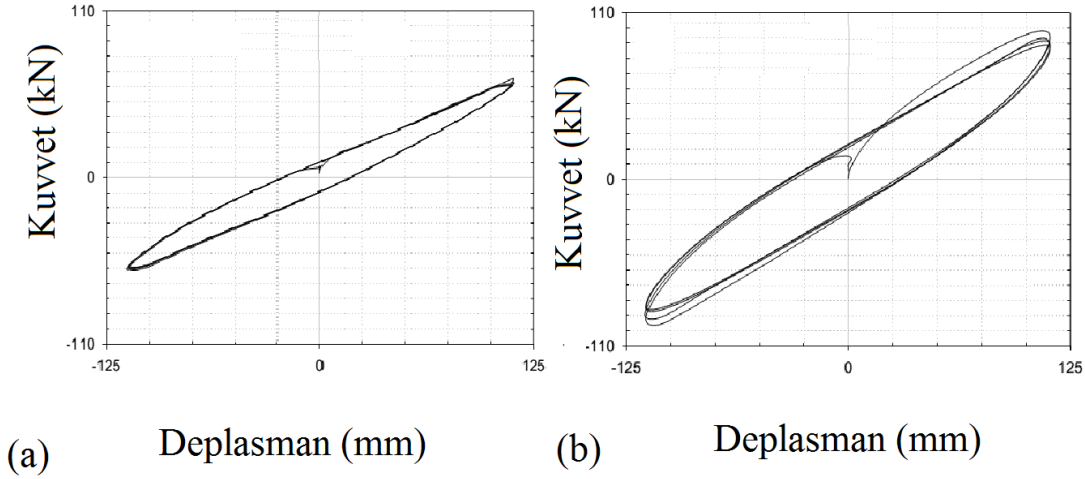
LDR'nin mekanik özellikleri birçok parametreden etkilenmektedir. Aşağıda önemli olan parametrelerden sözedilmiştir.

3.1.2.1 Sıcaklık etkisi

Düşük izolatör sıcaklık rijitliği, dayanımı ve sönümü önemli derecede arttırmaktadır. Şekil 3.3a normal ortam sıcaklığı 20°C, Şekil 3.3b ise -26°C'deki kuvvet-deformasyon ilişkisini göstermektedir. Sıcaklığın düşmesi ile birlikte hem rijitlik hem de sönüm %50~60 mertebelerinde artmaktadır (Constantinou ve diğ, 2007). Doğal kauçuk camlaşma sıcaklığının altına düştüğünde (-55 °C) malzeme gevrek olmakta ve hem mekanik hem de fiziksel özellikleri olumsuz yönde önemli ölçüde değişmektedir.

LDR'nin düşük sıcaklığa maruz kalma süresi de rijitliği ve sönümü üzerinde etkilidir. Maruz kalma süresi arttıkça rijitlik ve sönüm de artmaktadır.

Constantinou ve diğ. (2007) tarafından yapılan testler yüksek sıcaklığın sönüm ve rijitlik üzerinde önemli bir etkisinin olmadığını, yalnızca küçük azalmalar mertebesinde etkilediğini göstermiştir.



Şekil 3.3 : Yatay kuvvet–deplasman grafiği: a) Sıcaklık 20°C. b) Sıcaklık -26°C (Constantinou ve diğ, 2007).

3.1.2.2 Yük geçmişinin etkisi

Genel olarak elastomerik mesnetler ilk kez test edildiklerinde rijitlikleri ve dayanımları daha yüksek çıkmaktadır. Birkaç çevrimsel test sonucunda daha düşük ama kararlı değerler elde edilmektedir.

Constantinou ve diğ. (2007) tarafından yapılan testler yükleme geçmişinin LDR'nin mekanik davranışı üzerinde önemli bir etkisinin olmadığını göstermiştir.

3.1.2.3 Yükleme hızı

Yükleme hızı LDR'nin mekanik özelliklerini önemli ölçüde etkilemez.

3.1.2.4 Yaşlanma ve çevre koşulları

Doğal kauçuğun vulkanize olduğu sürece rijitliği bununla birlikte etkili kayma modülü artabilir. Bu artışın büyüklüğü üretim sırasında içsel vulkanizasyonun bitmesine ve servis süresindeki ortam sıcaklığı gibi faktörlere bağlıdır (McVitty ve Constantinou, 2015). Eğer LDR tam olarak kür edilmiş ise yaşlanmaya bağlı rijitlik değişimi az olacaktır.

Buna ek olarak oksijen ve ozona maruz kaldıkça mekanik özellikleri bozulabilir. Bunun önlemek için genelde dış yüzeyleri koruyucu tabaka ile kaplı olarak üretilirler.

3.2 U Şekilli Çelik Enerji Sönümleyici (UD)

U şekilli çelik sönümleyici (UD) çeliğin soğuk şekil verme yöntemi ile U şeklinde bükülmesi ile elde edilir. Bu tarz üretim yöntemi hem malzemenin verimli kullanılması açısından hem de üretimin kolaylığı açısından üstünlük sağlamaktadır. Depremi çok doğrultulu etkisi nedeniyle sönümleyiciyi tek başına kullanmak yerine birçok eleman bir araya getirilerek kullanılması gerekmektedir (Şekil 3.4). Ancak UD tek başına kullanıldığında dahi histeretik eğrisinin yönden bağımsız olduğu gözlenmiştir (Suzuki ve Saeki, 2005).



Şekil 3.4 : 4 adet U-şekilli damper (Jiao ve diğ, 2014).

3.2.1 Mekanik özelliklerini etkileyen parametreler

UD'nin mekanik özellikleri doğrudan kullanılan çeliğin özelliklerine bağlıdır. Burada malzemenin karakteristik özelliklerinin hangi parametrelere bağlı olduğu açıklanmıştır.

3.2.1.1 Yükleme doğrultusunun etkisi

UD'nin histeretik davranışının 0 derece ile 90 derece arasında yapılan yüklemelerde kararlı olduğu gözlenmiştir. Bunun yanı sıra kendi doğrultusunda yapılan yüklemelerde eğilmeden dolayı, 90 derece yapılan yüklemelerde ise burulma ve eksenel deformasyonlardan dolayı kapasitesini yitirdiği söylenebilir. Buna bağlı olarak kritik yükleme yönünün 0 derece olduğu söylenebilir (Jiao ve diğ, 2015).

3.2.1.2 Sıcaklık etkisi

Suzuki ve Saeki (2005) tarafından yapılan deneyde sıcaklığın 20° C'den -10° C'ye düşmesi histeretik davranışı +%3 mertebesinde etkilemiştir. Bu durumda sıcaklığın sönümleyici üzerinde küçük bir etkisi olduğu söylenebilir.

3.2.1.3 Yükleme hızının etkisi

Yükleme hızının UD'nin histeretik davranışına etkisi düşüktür.

3.3 U-Şekilli Çelik Enerji Sönümleyicinin Düşük Sönümlü Kauçuk İzolatörle Kullanılması (ULB)

ULB yukarıda tek tek özelliklerine değinilen düşük sönümlü kauçuk izolatör ve U-şekilli çelik sönümleyicinin birbirine monte edilmesi ile oluşmaktadır (Şekil 3.5).

Düşük sönümlü kauçuk izolatörün düşey rijitliği yüksek yatay rijitliği düşüktür. Bu nedenle ekstrem depremlerden dolayı oluşabilecek büyük deplasmanların önleme ihtiyacı doğmaktadır. Çelik sönümleyici ise yapının yükünü karşılayacak düşey rijitliğe sahip değildir.

İki eleman birlikte kullanıldığı takdirde düşey yükler kauçuk mesnet tarafından karşılanırken yatayda etkiyen enerji UD'nin plastik şekil değiştirme yapması sebebi ile sönümlenecektir. Böylelikle ULB'nin yatayda deplasman yapabilen yüksek sönümlü izolasyon sistemi olması amaçlanmıştır.



Şekil 3.5 : ULB (Terashima ve diğ, 2014).

3.4 Literatür Araştırması

Suzuki ve Saeki (2005), yükleme yönünün, kullanım sıcaklığının ve yükleme hızının U-şekilli çelik sönümleyicinin performansına etkisini deneysel olarak incelemişlerdir. UD'nin yukarıdaki tüm koşullarda kararlı histeretik davranış gösterdiği görülmüştür. Sıcaklığın 20°C ve -10°C arasında değişimi histeretik davranışını yüzde %3 etkilemiştir. Yükleme hızındaki değişimin ilk rijitlik üzerindeki etkisi ise % 2~3 civarındadır.

S. Oh ve diğ. (2013), UD'nin taban izolasyon sistemi ile birlikte kullanımını incelemişlerdir. Sarsma tablasında çelik çerçeveli 3 ayrı yapı test edilmiştir:

- Ankastre temelli bir yapı,
- Kauçuk izolatör ve normal çelikten üretilmiş UD'li bir yapı,
- Kauçuk izolatör ve yüksek dayanımlı çelikten üretilmiş UD'li bir yapı.

Çalışmadan şu sonuçlar çıkarılmıştır: UD'nin boşluklu üretilmesi elemanın deformasyon kapasitesini arttırmış, normal dayanımlı çeliğin de enerji sönümleyici olarak kullanılmasının mümkün olduğu ortaya çıkmıştır. Sarsma tablası deney sonucunda ankastre temelli yapının ağır yapısal hasar aldığı gözlenmiştir. Ancak sismik sönümleyici ve izolatör kullanılan diğer yapılarda hasar beklendiği üzere UD'de yoğunlaşmış, yapı önemli bir hasar almamıştır.

Jiao ve diğ. (2014)'nin yaptıkları sarsma tablası deneyinde ilk sıcaklığın ve yükleme hızının UD'nin histeretik davranışını çok az etkilediği gözlenmiştir.

S.-H. Oh ve diğ. (2012), taban izolasyonu ile birlikte kullanılan UD davranışı sarsma tablasında deneysel olarak incelemiştir. Düşük ve orta yükseklikteki binalar için ankastre temelli yapı ile taban izolasyonlu ve UD'li yapı karşılaştırılmıştır. Ankastre temelli yapıda hasar ilk katta meydana gelirken, taban izolasyonlu ve UD'li yapıda hasar UD'de yoğunlaşmıştır. Test sonuçları periyodun uzaması, enerjinin UD'ler tarafından sönümlenmesi ve deplasmanın izolasyon katında yoğunlaşması nedeni ile sismik istemin sınırlanabileceğini göstermiştir.

Konishi ve diğ. (2012) 9 büyüklüğündeki Büyük Doğu Japonya Depremi sonrasında UD'li ve izolasyonlu hastane yapısından sökülüp alınan UD'nin artık yorulma ömrünü değerlendirmek üzere bir dizi döngüsel test uygulamışlardır. Bu testler sonucunda UD'nin yalnızca % 5'lik bir yorulma düzeyine ulaştığı, % 95'lik kapasitesinin olduğu, bu nedenle değiştirilmesine ihtiyaç duyulmadığı belirtilmiştir.

Jiao ve diğ. (2015), UD ile bir dizi dinamik yükleme testi yapmıştır. Yükleme yönü, yükleme hızı, ilk sıcaklık ve sönümleyici boyutunun değişimi gibi parametreler gözönüne alınmıştır. Yüklemede kritik yönün UD'ye 0° açıda olduğu, yükleme hızının, ilk sıcaklığın ve sönümleyici boyutlarındaki değişimin histeretik davranışa etkisinin çok az olduğu sonuçları çıkarılmıştır.

9 büyüklüğündeki Büyük Doğu Japon Depremi'nin 130 km uzağında göçmeden ayakta kalan Ishinomaki Kızılhaç Hastanesi'nin izolasyon sisteminde bulunan UD'ler Terashima ve diğ. (2014) tarafından kapsamlı olarak incelemiştir. Çalışma sonucunda UD'nin büyük bir sarsıntıdan sonra bile yorulma kapasitesinin küçük bir bölümünü kullandığı, işlevine devam etmesi için gerekli yorulma kapasitesini koruduğu anlaşılmıştır.

Kawamura ve diğ. (2014), büyük depremlerden sonra UD'nin artık kapasitesini belirleme metotlarını geliştirilmeye çalışmışlardır.

Köprüler için iki adet UD'nin üstten ve alttan iki adet çelik plaka ile birleştirilmesi ile yeni bir sönümleyici sistem Deng, Pan, ve Wang (2013) tarafından geliştirilmiştir. Bu sistem, hem fiziki ortamda hem de sonlu elemanlar yöntemi ile test edilmiştir. Histeretik davranışın kararlı olduğu görülüp, yüksekliğin ve kalınlığın enerji yutma performansını etkilediği anlaşılmıştır.

Kato ve diğ. (2005) J-şekilli çelik sönümleyicinin malzeme ve geometri bakımından nonlinear analizini yapan bir sonlu eleman programı geliştirmişlerdir. Sönümleyicinin performansı hakkında bilgi sahibi olmak için kafes sistem ile betonarme bir altyapı arasındaki izolasyon sistemine yerleştirilmesiyle elde edilen model analiz edilmiştir. J sönümleyicinin sismik enerjiyi yutarak deprem etkilerini azalttığı sonucu çıkartılmıştır.

Kato ve Kim (2006), hazırlanan bir sonlu elemanlar programını kullanarak J sönümleyici ile ilgili kapsamlı bir analiz yapmışlar, şu sonuçları çıkarmışlardır: J sönümleyicinin mekanik davranışı kalınlığına, çapına ve genişliğine bağlıdır. Yumuşak çelikten yapılmış J sönümleyicinin tasarımı için hazırlanan bağıntılar ile histeretik davranış, elastik rijitlik, akma dayanımı ve boyutsuz pekleşme oranı belirlenebilir.

Ene ve diğ. (2012), Ene ve diğ. (2014) ve Kishiki ve diğ. (2014), UD'nin 2 boyutlu yükleme geçmişinin deformasyon kapasitesine ve histeretik davranışına etkisini incelemişlerdir.

İlk olarak sabit enkesitli U-şekilli enerji sönümleyicinin, doğrusal plaka boylarına ve yarıçapına bağlı olarak optimum boyutları Aguirre ve Sánchez (1992) tarafından belirlenmiştir. UD'nin çevrimsel deformasyon süresince sıcaklık değişimi gözlenip, histeretik eğrinin hızdan önemli düzeyde etkilenmediği farklı frekans değerlerinde

yapılan yükleme deneyleri ile ortaya konmuştur. Bununla birlikte birçok tekil sönümleyiciden oluşan sönümleyici sistem üretilip denenmiş ve yapıda olası kullanım bölgeleri üzerinde durulmuştur. Son olarak kalınlığa bağlı olarak histeretik model oluşturulmuştur.

Deng ve diğ. (2015), UD'nin çift yönlü yerdeğiştirmeler altındaki histeretik davranışını kararlı duruma getirmek için boyut optimizasyonu yapmışlardır. Bu amaçla, UD çift yönlü yerdeğiştirmeler altında deneysel olarak incelenmiş, ABAQUS programı yardımıyla sonlu elemanlar modeli kurulmuştur. Sönümleyicilerin doğrusal parçalarının boyutları ve şekli değiştirilerek optimizasyon yapma yoluna gidilmiştir.

Tagawa ve Gao (2012), UD sönümleyicinin çapraz elemanlar ile birlikte kullanılması durumunu incelemişlerdir. Çapraz elemanlar yalnızca çekme kuvveti altında çalışırken, UD eğilme deformasyonu yapmaktadır. Çapraz elemanlar burkulmadan UD'nin plastik deformasyon yapması sağlanarak enerjinin sönümlenmesi amaçlanmıştır.

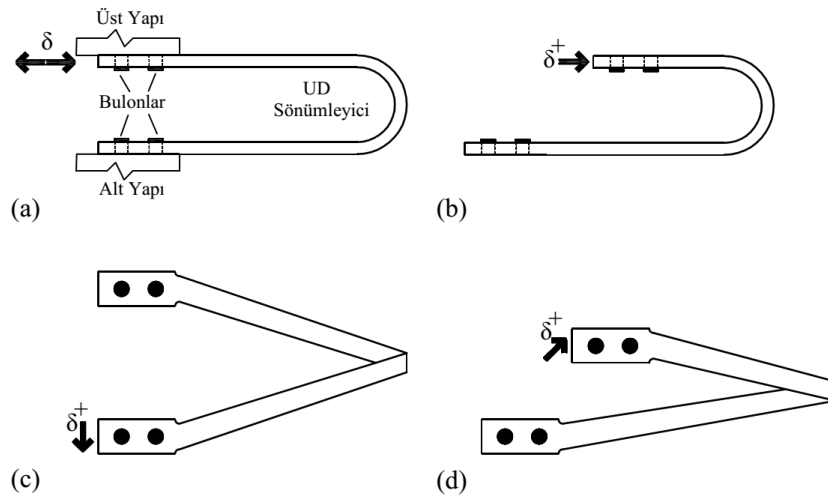
4. U-ŞEKLİ ÇELİK SÖNÜMLEYİCİNİN SONLU ELEMENLAR MODELİNİN OLUŞTURULMASI

Seçilen izolasyon sistemi ULB'nin histeretik davranışını tanımlamak için kullanılan sönümleyici UD'nin ve izolatör LDR'nin histeretik davranışlarını elde etmek gerekmektedir. LDR'nin histeretik davranışı lineer olarak kolayca ifade edilebildiği için bu bölümde özellikle UD'nin modellenmesi üzerinde durulacaktır. Bu amaçla bir sonlu elemanlar yazılımı olan ABAQUS 6.14 programından yararlanılmıştır.

UD'nin histeretik davranışı incelenirken literatürde yer alan deney düzenekleri incelenmiş, yatay yüklerin (deprem, rüzgâr vb.) sönümleyici üzerindeki etkisi benzetilmeye çalışılmıştır.

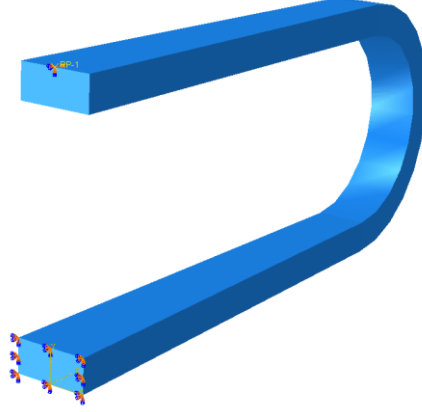
4.1 Analiz Düzeneği ve Sınır Koşullar

Bölüm 3.2'de sözü edildiği gibi UD sönümleyici genelde bir çok U elemanın birlikte monte edilmesi şeklinde kullanılır. Ancak sönümleyicinin davranışını belirlemek için bir modülün incelenmesi yeterlidir.



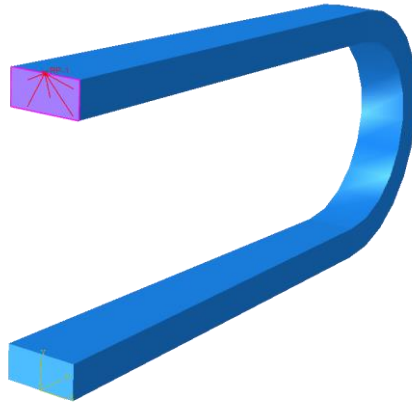
Şekil 4.1 : Analiz düzeneği ve yükleme yönleri: (a) Düzenek ve yükleme noktası. (b)+0° yükleme. (c) +90° yükleme. (d) +45° yükleme.

Şekil 4.1’de sönümleyici düzeneği ve sonlu eleman analizlerinde kullanılan yükleme yönleri gösterilmiştir. Şekil 4.1a’da UD’nin altyapı ve üstyapıya bulonlarda monte edildiği görülmektedir. Uygulamada alt ve üstyapı ile UD arasında çelik levhalar bulunmaktadır. Şekil 4.1b’de UD’nin başlığı doğrultusunda diğer bir deyişle $+0^\circ$ yönünde yatay deplasman (δ^+) uygulandığı görülmektedir. Şekil 4.1c’de $+90^\circ$, Şekil 4.1d’de ise $+45^\circ$ üst başlığa yatay deplasman uygulanmaktadır.



Şekil 4.2 : Sonlu elemanlar modeli sınır koşulları.

Sonlu elemanlar modelinde bulonların ve çelik levhaya kadar olan bölümün histeretik davranışa katkısı olmadığı için modellenmemiştir. Bu bölümün şekil değiştirmesi beklenen bölgeden çok daha rijit olması nedeniyle Şekil 4.2’de görüldüğü gibi alt başlık kesiti ankastre olarak kabul edilmiştir.



Şekil 4.3 : Referans noktası ve yükün uygulandığı yüzey.

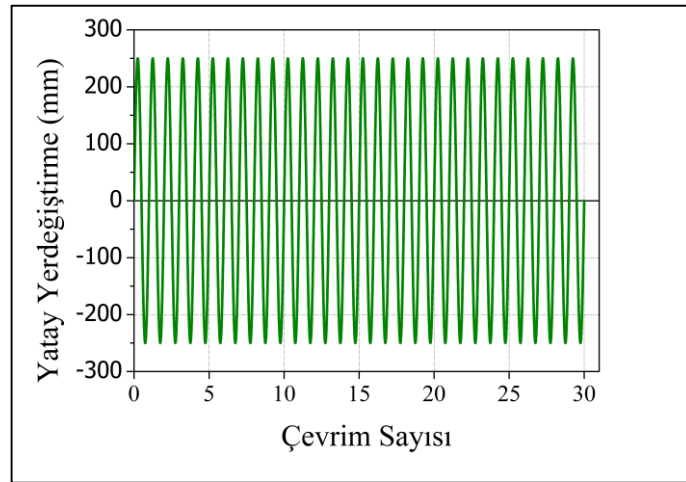
Yükleme üst başlıkta tanımlanan referans noktasına noktasal olarak yapılmış olup, referans noktası da Şekil 4.3’te gösterilen üst başlık kesitine kenetlenmiş (coupling),

tüm serbestlik derecelerinde birlikte hareket etmesi sağlanmıştır. Bununla birlikte referans noktasının yalnızca yük yönünde hareketine izin verilmiştir. Bu işlemler sonucunda deprem etkisinde düşük sönümlü kauçuk izolatörle (LDR) birlikte çalışan UD'nin yatay deplasman hareketi modellenmiştir.

4.2 Yükleme Protokolü

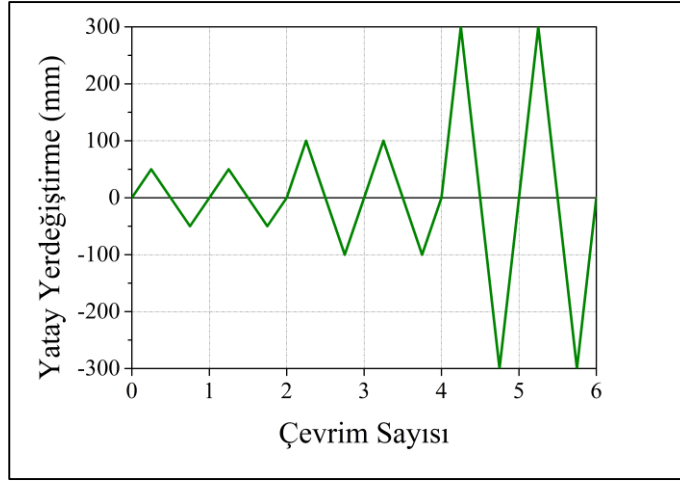
Sismik izolasyon ve sönümleyici sistemlerinin temel amacı deprem etkilerini yapısal elemanlara ulaşmadan olabildiğince azaltmaktır. Bu nedenle, yapıya gelen yükü tanımlamak için yükleme protokolü büyük önem taşımaktadır.

Bu çalışmada üç farklı yükleme protokolü kullanılmıştır. Yapılan sonlu elemanlar analizinin doğrulanması amacı ile 2 adet, yapılan parametrik çalışma için ise 1 adet olmak üzere toplamda 3 adet yükleme protokolü kullanılmıştır.



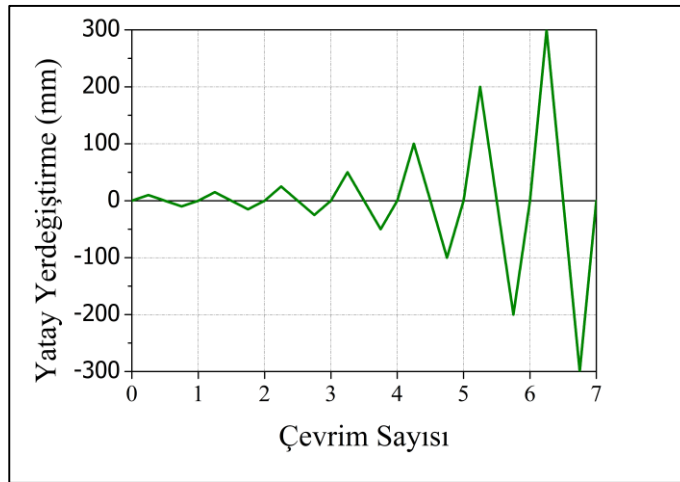
Şekil 4.4 : Tip A yükleme protokolü.

Şekil 4.4'te görülen sinüs dalgası yüklemesi genellikle izolatör ve sönümleyici sistemlerin mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla kullanılmaktadır. Jiao ve diğ. (2015) tarafından yapılan deneysel çalışmanın, kurulan sonlu elemanlar modeli ile karşılaştırılması amacı ile sinüs dalgası fonksiyonu $y(t) = A \sin(\omega t + \varphi)$ kullanılmıştır. Bu fonksiyonda A genliği, ω açısal frekansı, t zamanı, φ başlangıç fazını ifade etmektedir. Çalışmada yapılan yükleme verisine göre A, ω , φ sırasıyla 250, $\pi/2$ rad/sn ve 0 olarak alınmıştır. Yükleme, periyodu 4 sn, maksimum deplasman ± 250 mm olmakla birlikte statik olarak 30 çevrime kadar yapılmıştır.



Şekil 4.5 : Tip B yükleme protokolü.

Şekil 4.5'te görülen B tipi yükleme protokolü sonlu elemanlar analizinin sağlanması amacıyla Deng ve diğ. (2013) tarafından yapılan çalışmaya uygun olarak hazırlanmıştır. Çin mühendislik pratiğine göre bu tip sönümleyicilerde maksimum deplasman talebi 200~300 mm olarak öngörülmektedir (Deng ve diğ, 2013). Bu nedenle, bu yükleme protokolünde iki çevrim 50 mm, iki çevrim 100 mm ve son olarak 2 çevrim 300 mm olmak üzere 6 çevrim doğrusal olarak değişen statik yükleme yapılmıştır.



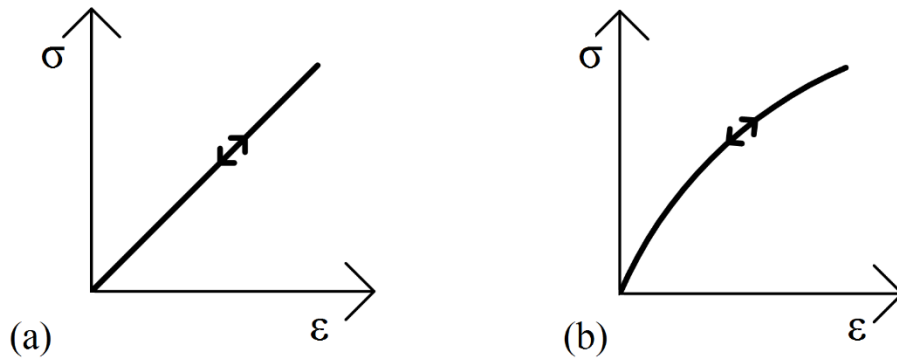
Şekil 4.6 : Tip C yükleme protokolü.

Şekil 4.6'da verilen Tip C yükleme protokolü farklı UD sönümleyici örneklerin oluşturulması amacı ile kullanılmıştır. Bu protokol Japonya'da, Suzuki ve Saeki (2005) tarafından yapılan deneysel çalışmada UD'nin özelliklerini belirlemek amacıyla kullanılmıştır. Büyük deprem etkisinde, yapı tabanında meydana gelen deformasyonları dikkate almaktadır. Önceki analizlerde UD'nin histeretik eğrisinin

tekrarlayan deplasmanlarda kararlı olduğu gözlemlendiği için her deplasman miktarından birer adet çevrim yeterli görölmüştür. Yükleme hızı 10 mm/sn olmakla birlikte 10 mm, 15 mm, 25 mm, 50 mm, 100 mm, 200 mm ve 300 mm deplasmanlarda 7 çevrim quasi-statik yükleme yapılmıştır.

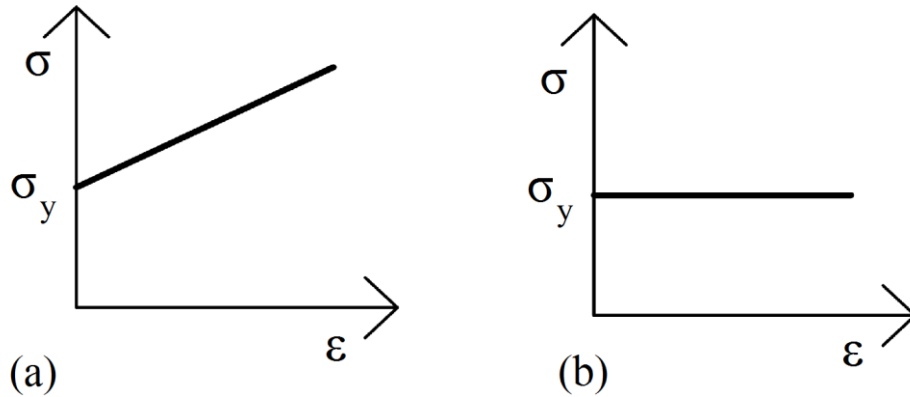
4.3 Malzeme Modeli

Malzeme modelinin doğru seçilmesi çeliğin çevrimsel yükler altındaki davranışını belirlemek adına büyük önem taşımaktadır. Bu nedenle, mühendislik problemlerinin çözümünde kullanılan birçok model bu çalışma kapsamında gözden geçirilmiştir.



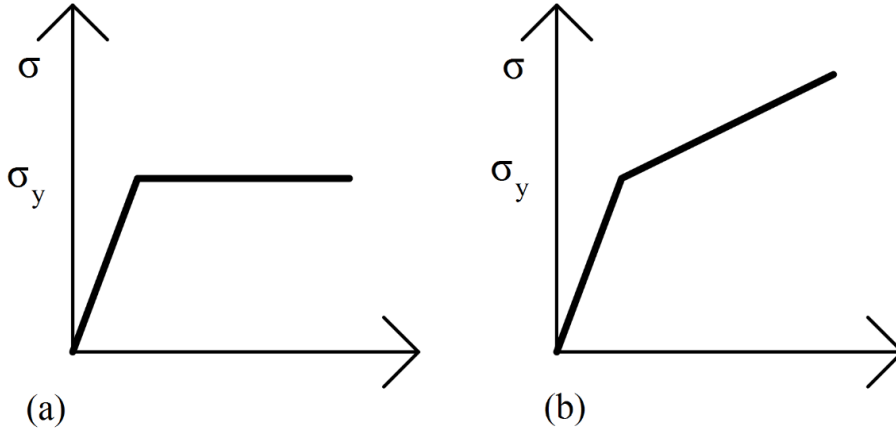
Şekil 4.7 : Elastik malzeme modeli: (a) Doğrusal. (b) Doğrusal olmayan.

Elastik Malzeme Modelleri: Gerilme birim şekildeğiştirme eğrileri doğrusal ya da doğrusal olmayan bir şekilde modellenebilir (Şekil 4.7). Ancak, bu modelde yalnızca küçük deplasmanlar altındaki ve üzerindeki yük kaldırılınca ilkö durumuna dönen malzemenin davranışını doğru tanımlanmaktadır.



Şekil 4.8 : Rijit malzeme modeli: (a) Rijit doğrusal pekleşen. (b) Rijit tam plastik.

Rijit Malzeme Modelleri: Bu modelde malzemede elastik şekil değişimi oluşmamaktadır. Gerilme akma sınırının üzerine çıktığında malzemede kalıcı deformasyon oluşmaktadır (Şekil 4.8).



Şekil 4.9 : Elasto-plastik malzeme modeli: (a) İdeal. (b) Pekleşen.

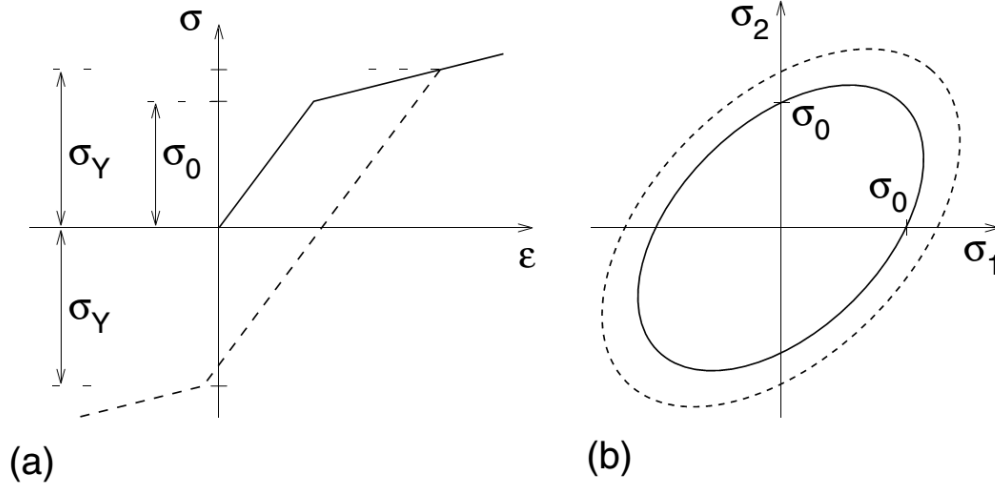
Elasto-Plastik Malzeme Modelleri: Bu malzeme modelinde malzeme elastik davranışının sonunda akmaya ulaşmakta, ancak bu noktadan sonra malzemede kalıcı şekil değiştirme oluşmaktadır. Elasto-plastik malzeme modeli hem elastik hem de plastik bölgeyi tanımlayabildiği için metallerin davranışını tanımlamakta önemli rol oynamaktadır. Şekil 4.9’da sırasıyla a) ideal ve b) pekleşen elasto-plastik malzeme modelleri verilmiştir. İdeal elasto-plastik malzeme modelinde malzeme akmaya ulaştıktan sonra gerilmede bir artış olmaksızın plastik şekil değiştirme meydana gelmektedir (Hodge, 1981). Pekleşen malzeme modelinde ise akma sonrası daha düşük bir rijitlikte pekleşme başlamakta ve kalıcı deformasyonlar oluşmaktadır. Bu çalışmada pekleşme etkisi dikkate alınmış olup daha gerçekçi sonuçlar elde etmek için doğrusal olmayan malzeme modeli kullanılmıştır. Malzemenin doğrusal olmayan davranışı nonlinear izotropik ve kinematik pekleşme özellikleri dikkate alınarak modellenmiştir. Pekleşme modeli Lemaître ve Chaboche modeline göre tanımlanmıştır (Lemaître ve Chaboche, 1990).

4.3.1 Birleşik doğrusal olmayan izotropik kinematik pekleşme modeli

Bu çalışmada kullanılan birleşik doğrusal olmayan izotropik-kinematik pekleşme modeli Frederick ve Armstrong, (2007) tarafından üretilmiş, daha sonra da Lemaître

ve Chaboche, (1990) tarafından modifiye edilmiştir. Bu model izotropik ve kinematik olarak ayrılan iki pekleşme bileşeninin birlikte kullanılması ile elde edilir.

İzotropik pekleşme akma yüzeyinin şeklini değiştirmeden gerilmenin artışına bağlı olarak büyümesi olarak tanımlanmaktadır.



Şekil 4.10 : İzotropik pekleşme modeli: (a) Tek eksenli. (b) Çift eksenli (Jirásek ve Bazant, 2002).

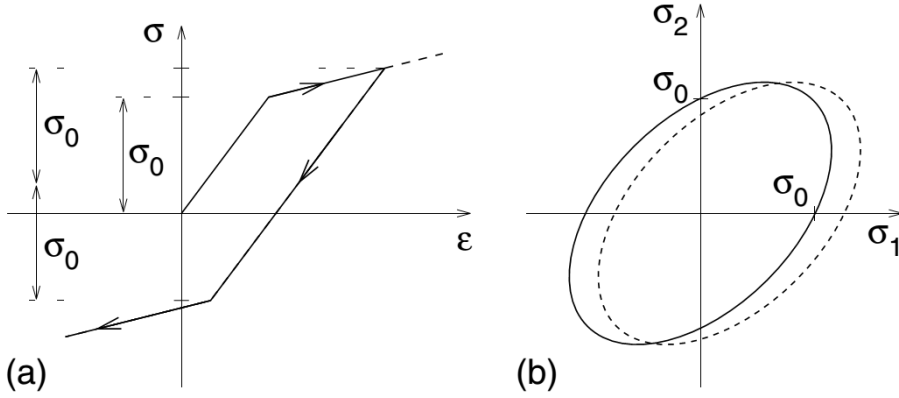
Şekil 4.10’da izotropik pekleşmenin (a) tek eksenli gerilme-şekildeğiştirme ve (b) çift akma yüzeyi diyagramı görülmektedir. Şekil 4.10b’de görüldüğü gibi akma yüzeyinin merkezi sabit kalmakta buna bağlı, olarak akma yüzeyi büyümektedir.

Akma yüzeyinin boyutu izotropik pekleşme bileşkesinde aşağıdaki bağıntı 4.1 ile tanımlanmıştır.

$$\sigma^0 = \sigma|_0 + Q_\infty(1 - \exp(-b\bar{\epsilon}^p)) \quad (4.1)$$

Bu bağıntıda σ^0 değişen akma yüzeyini, $\sigma|_0$ plastik şekildeğişiminin sıfır olduğu andaki akma yüzeyinin boyutunu tanımlamaktadır. Q_∞ ve b çevrimsel deneylerle güncellenebilecek malzeme parametrelerini ifade etmektedir. $\bar{\epsilon}^p$ ise eşdeğer plastik birim şekildeğiştirmedir.

Kinematik pekleşme ise akma yüzeyinin boyutunun aynı kalmak koşulu ile konumunun (merkez noktasının) gerilmeye bağlı olarak değişmesidir. Kinematik pekleşme çevrimsel yük altındaki metallerde sıklıkla gözlenen Bauschinger Etkisi’ni tanımlamak için gereklidir (Jirásek ve Bazant, 2002).



Şekil 4.11 : Kinematik pekleşme modeli: (a) Tek eksenli gerilme şekil değiştirme. (b) Çift eksenli akma yüzeyi (Jirásek ve Bazant, 2002).

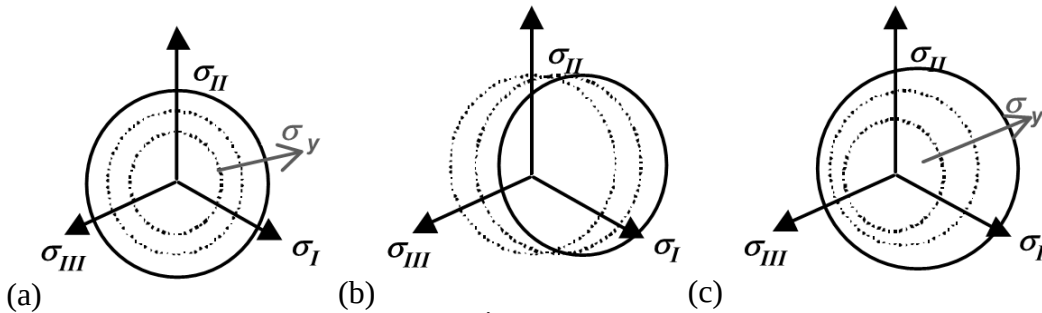
Şekil 4.11’de kinematik pekleşmenin (a) tek eksenli gerilme şekil değiştirme ve (b) çift akma yüzeyi diagramı görülmektedir. Şekil 4.11b’den de anlaşılacağı üzere izotropik pekleşmenin aksine akma yüzeyi boyutu değişmemiş, yalnızca rijit bir yapı gibi ötelenmiştir.

Gerilme yüzeyi boyunca akma yüzeyinin konumu temel Ziegler yasası ve gevşeme terimi $\gamma \alpha \dot{\bar{\epsilon}}^{pl}$ ile ifade edilmektedir.

$$\dot{\alpha}_k = C_k \frac{1}{\sigma_0} (\sigma - \alpha) \dot{\bar{\epsilon}}^{pl} - \gamma_k \alpha_k \dot{\bar{\epsilon}}^{pl} \quad (4.2)$$

4.2’de α geri gerilme (back stress) tensörü, $\dot{\bar{\epsilon}}^{pl}$ adım adım eşdeğer plastik birim şekil değişimi, α_k adım adım geri gerilme (back stress) tensör değişimi γ ve C ise malzeme parametreleridir. Bununla birlikte, bu bağıntı birden fazla kinematik pekleşme bileşeni ile 4.3’te olduğu gibi süperpoze edilebilir.

$$\alpha = \sum_{k=1}^N \alpha_k \quad (4.3)$$



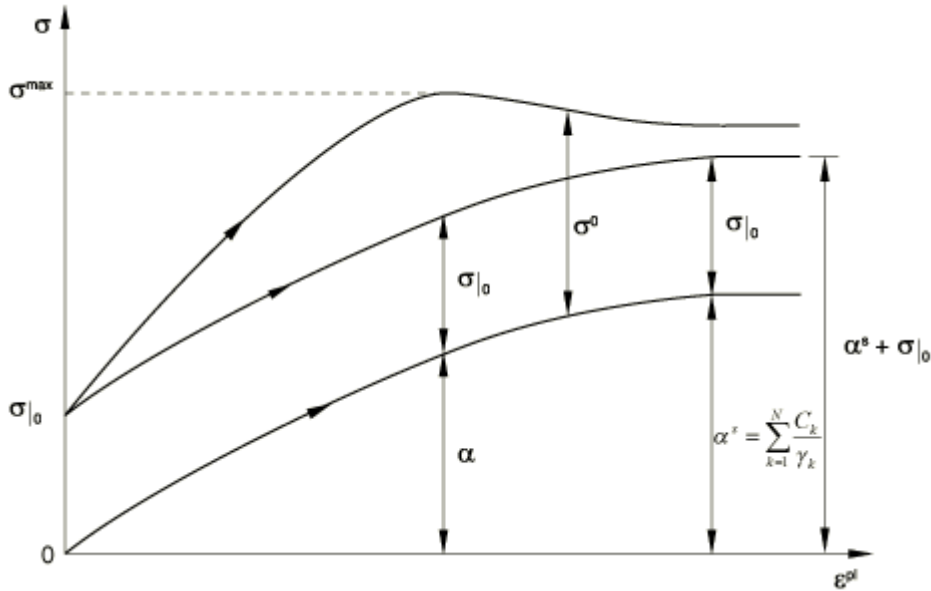
Şekil 4.12 : Pekleşme modelleri: (a) İzotropik pekleşme. (b) Kinematik pekleşme. (c) Bileşik pekleşme (Brogiato, Campana ve Cortese, 2008).

Şekil 4.12’de ise bileşik pekleşme modelinin (combined hardening) kinematik ve izotropik pekleşme davranışlarının toplamı olduğu görülebilir. Başka bir deyişle gerilme altında akma yüzeyinin boyutu artmakla kalmamakta aynı zamanda bu modelde akma yüzeyinin konumu da değişmekte, ötelenmektedir (Myers ve diğ. 2009).

Tek eksenli gerilme ve monotonik yükleme durumunda tensör bağıntısı α başlangıçta 0 varsayılarak 4.4’deki bağıntıya indirgenebilir.

$$\alpha_k = \frac{C_k}{\gamma_k} (1 - e^{-\gamma_k \epsilon^p}) \quad (4.4)$$

Şekil 4.13’te bir eksenli ve monotonik yükleme etkisindeki malzemenin kinematik ve izotropik pekleşme bileşenleri gösterilmektedir (ABAQUS Manual 6.14, 2014).



Şekil 4.13 : Doğrusal olmayan izotropik-kinematik modelin tek eksenli gösterimi (ABAQUS Manual 6.14, 2014).

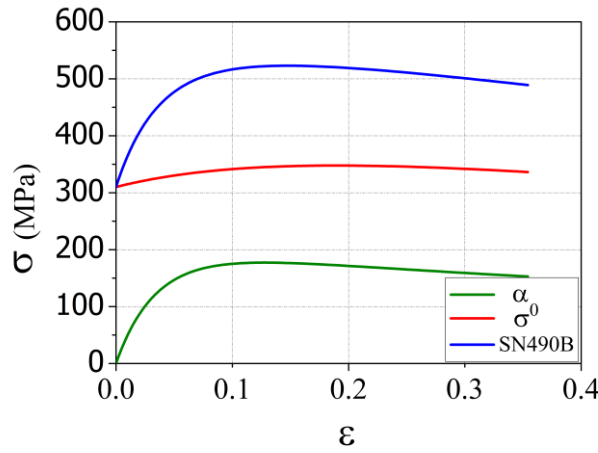
4.3.2 Kullanılan malzeme özellikleri

Bu çalışmada çelik malzeme olarak Q235 ve SN490B olmak üzere iki adet farklı malzeme kullanılmıştır. Malzemelerden Q235, sonlu elemanlar modelinin sağlaması amacı ile Deng ve diğ. (2013) tarafından yapılan makaledeki verilere dayanarak üretilmiş, SN490B ise hem deneysel çalışmanın sonlu elemanlar modelinin kurulması hem de yeni oluşturulacak sönümleyicilerin analiz edilmesi amacıyla kullanılmıştır.

Çizelge 4.1 : İzotropik ve kinematik pekleşme parametreleri.

Malzeme	C_k (MPa)	γ_k	Q_∞ (MPa)	b	$\sigma _0$ (MPa)
SN490B	5792	28	207	4	310

Çizelge 4.1’de SN490B malzemesine ilişkin pekleşme parametreleri görülmektedir. Deneysel çalışmada malzemenin detaylı özellikleri verilmediği için, sözkonusu parametreler aynı malzeme sınıfının kullanıldığı Myers ve diğ. (2009) çalışmasından alınmıştır.



Şekil 4.14 : SN490B malzeme modeli.

Şekil 4.14’te SN490B malzemesinin sonlu elemanlar modelinde kullanılan izotropik σ^0 , kinematik α ve bileşik pekleşme modeli görülmektedir. Myers ve diğ. (2009), yaptıkları tek eksenli çekme deneyinde, akma dayanımını 345 MPa, çekme dayanımını ise 524 MPa olarak hesaplanmıştır.

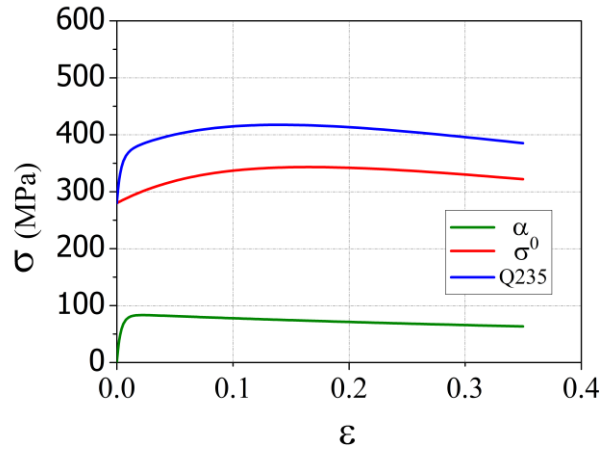
Çizelge 4.2 : İzotropik ve kinematik pekleşme parametreleri

	C ₁ (MPa)	γ ₁	C ₂ (MPa)	γ ₂	C ₃ (MPa)	γ ₃	Q _∞ (MPa)	b	σ ₀ (MPa)
Q235	7000	250	15000	400	4000	200	170	8	280

Ancak karşılaştırılan deneysel çalışmada yapılan kupon testlerinde akma dayanımı 378 MPa çekme dayanımı ise 544 MPa olarak bulunmuştur. Aradaki farkın kabul edilebilir olması nedeniyle pekleşme modeli üzerinde değişiklik yapılmasına gerek

duyulmamıştır. Ancak, histeretik eğriler değerlendirilirken bu fark gözönüne alınmıştır.

Çizelge 4.2’de Deng ve diğ. (2013) yaptıkları çalışmaya ilişkin malzeme parametreleri verilmiştir. Bu parametrelere ilişkin izotropik σ^0 , kinematik α ve bileşik pekleşme modeli Şekil 4.15’te görülmektedir.



Şekil 4.15 : Q235 malzeme modeli.

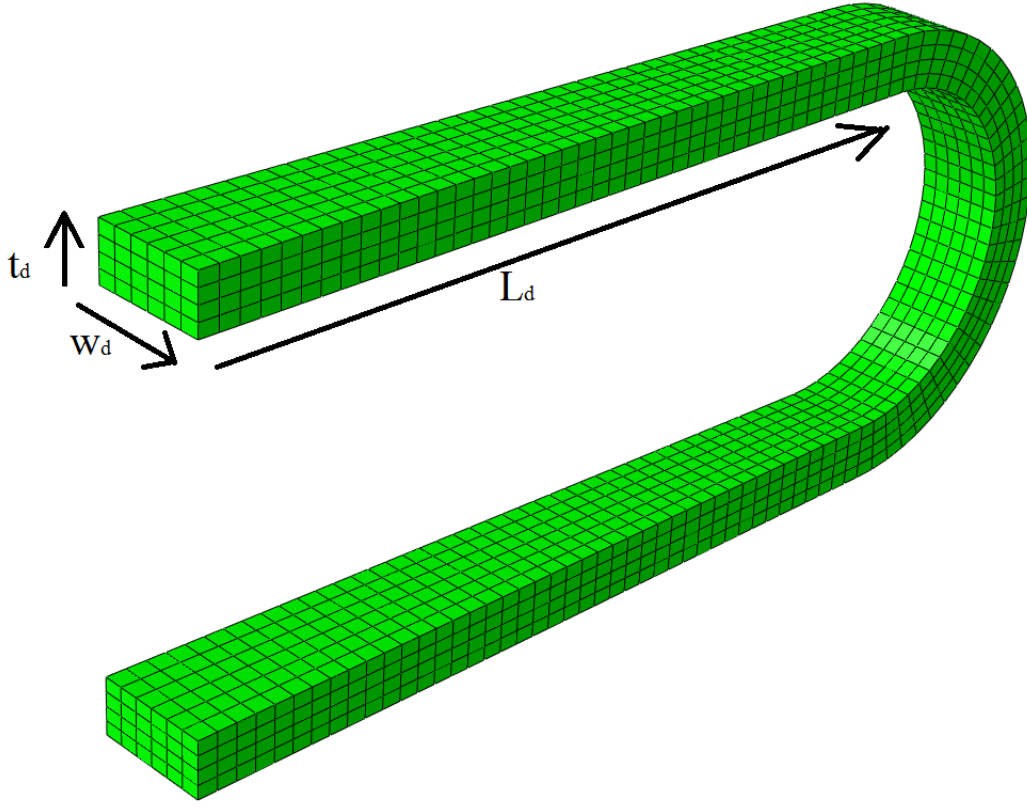
Sonlu elemanlar analizine katılan Q235 malzemesinin akma dayanımı 280 MPa , çekme dayanımı ise 418 MPa’dır.

4.3.3 Sonlu elemanlara bölme işlemi

Bir doğru parçasında sonsuz sayıda nokta bulunmaktadır. Meshleme işlemi ile modellenecek yapının geometrisi sonlu noktayla bölünerek sonlu elemanlara indirgenmektedir.

Modelin elemanlara bölünmesi analiz sonucunu doğrudan etkilemektedir. Çok büyük elemanlardan oluşan sistem doğru sonucu vermeyebileceği gibi çok küçük elemanlara ayırmak da analiz sürelerinin çok uzamasına neden olabilir. Bu çalışmada eleman boyutuna yapılan deneysel çalışma sonuçları baz alınarak deneme-yanılma yöntemi ile karar verilmiştir.

Sonlu elemanlar analizinde eleman tipi 3 boyutlu 8 noktalı katı eleman C3D8R (8-node brick element, reduced integration, hourglass control) olarak modellenmiştir.



Şekil 4.16 : Tipik bir UD sönümleyicinin sonlu eleman modeli.

Şekil 4.16’da tipik bir UD sönümleyicinin sonlu eleman modeli görülmektedir. Bu modelde t_d sönümleyicin kalınlık doğrultusunu, w_d genişlik doğrultusunu, L_d ise boy doğrultusunu ifade etmektedir. Yapılan birçok analiz sonrasında eleman boyutları w_d ve L_d boyunca 10 mm seçilmiştir. Sönümleyici kalınlığı t_d boyunca ise boyuta bakılmaksızın 4 adet elemana bölünmüştür.

4.4 Analiz Süreleri ve Bilgisayar Özellikleri

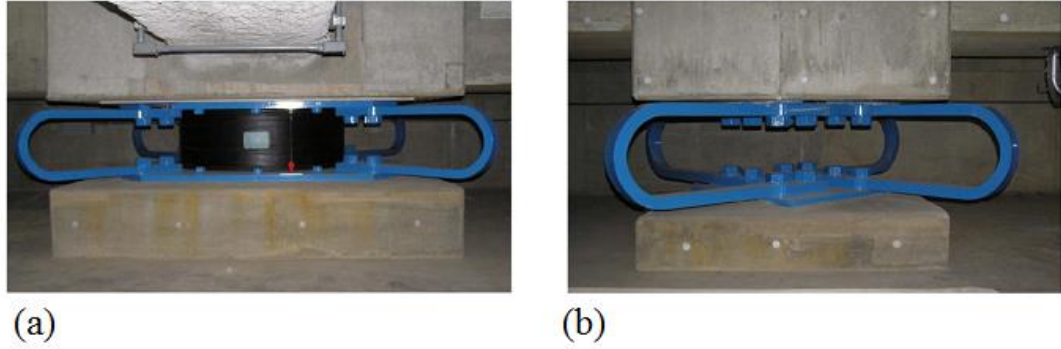
Sonlu elemanlar modelinin kurulduğu bilgisayar Intel(R) Core(TM) i7-4770 CPU 3.40GHz, 3401 Mhz, 4 Çekirdek, 8 Mantıksal İşlemciye, 8.00 GB Yüklü Fiziksel Belleğe (RAM) sahiptir. Bu bilgisayarla yapılan analizlerin süreleri ve analizlerde kullanılan eleman ve nokta sayıları yapılan her bir model için Çizelge 4.3’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.3 : Sonlu elemanlar analizi süresi eleman ve nokta sayıları

	Yükleme	Eleman Sayısı	Nokta Sayısı	Analiz Süresi (sn)
UD40	0°-Tip C	2760	4061	1054
UDF1	0°-Tip C	2520	3811	914
UDF2	0°-Tip C	2760	4061	1102
UDF3	0°-Tip C	2760	4061	1108
UDF4	0°-Tip C	2340	3541	973
UDF5	0°-Tip C	2760	4061	1182
UDK1	0°-Tip C	2960	4576	1254
UDK2	0°-Tip C	4532	6901	1741
UDK3	0°-Tip C	3020	4726	1303
UDK4	0°-Tip C	3040	4711	2771
UDK5	0°-Tip C	2916	4556	1223
ULB	0°-Tip C	5952	9401	2253
UD40	45°-Tip C	2760	4061	944
UD40	90°-Tip C	2760	4061	749
UD40	0°-Tip A	2760	4061	6426
UD40	90°-Tip A	2760	4061	4839
UDF2	45°-Tip C	2760	4061	1055
UDF2	90°-Tip C	2760	4061	740
UDS1	0°-Tip B	5610	10147	2241
UDS2	0°-Tip B	5582	10105	1924
UDS3	0°-Tip B	5514	9974	2201
UDS4	0°-Tip B	6186	11185	2265

5. SONLU ELEMANLAR MODELİNİN DENEYSEL VERİLERLE KARŞILAŞTIRILMASI

UD sönümleyicinin sonlu elemanlar modelinin kurulması ve geometrik özelliklerinin değiştirilerek yeni bir sönümleyici önerilmesi amacıyla Bölüm 3.4'te bu konuda yapılmış çalışmalar incelenmiştir. İlk olarak Jiao ve diğ. (2015) tarafından deneysel olarak incelenen ve Japonya'da geliştirilmiş UD40 isimli sönümleyicinin sonlu elemanlar modeli kurulmuştur.

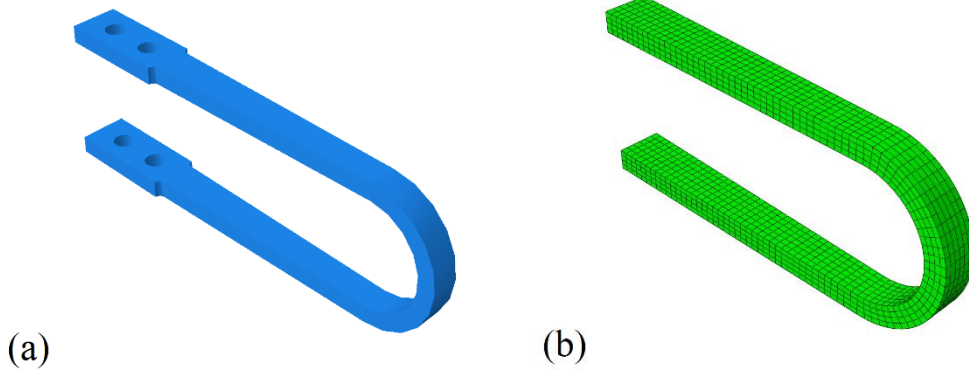


Şekil 5.1 : (a) ULB. (b) UD (Jiao ve diğ, 2015).

UD sönümleyiciler hem izolatörlü (Şekil 5.1a) hem de izolatörsüz (Şekil 5.1b) olarak kullanılabilirler. Belirlenen tasarım özelliklerine göre kullanılacak birim UD sayısı değişkenlik gösterebilir. Bu nedenle birim UD sönümleyicileri farklı yönlerden gelen kuvvetlere göre incelemek çoklu kullanılan durumdaki histeretik davranışı belirlemeye olanak sağlayacaktır.

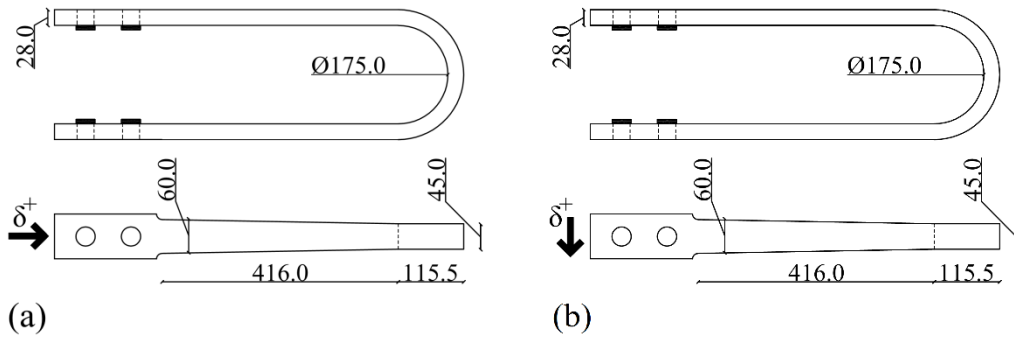
5.1 UD40 Sönümleyici

Şekil 5.2a'da UD40 sönümleyicisinin 3 boyutlu modeli görülmektedir. Bu modelde yeralan başlıkların histeretik davranışa katkısı olmadığı için ve diğer bölümlere göre çok rijit olmaları nedeniyle sonlu elemanlar modeline (Şekil 5.2b) aktarılmamıştır.

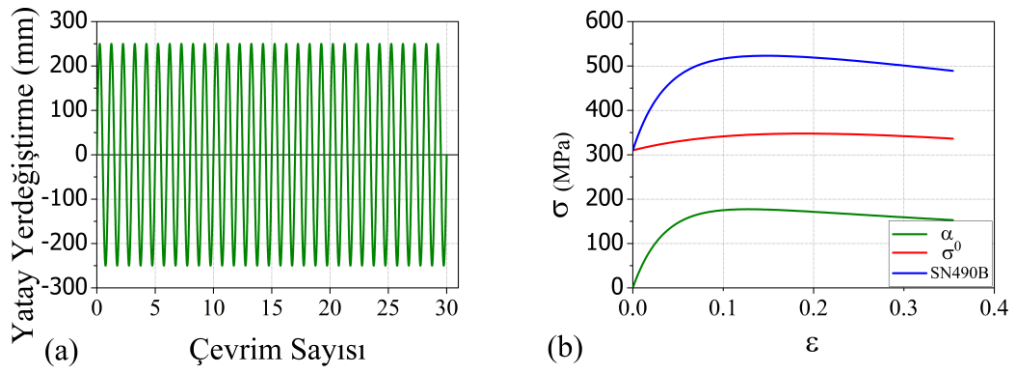


Şekil 5.2 : (a) Üç boyutlu (3B) model. (b) Sonlu elemanlara ayrılmış modeli.

UD40 sönümleyicinin sonlu elemanlar modeline dahil edilen boyutları, L alt ve üst kolların uzunluğu 416 mm, t_d sönümleyici kalınlığı 28 mm, H_d yüksekliği 231 mm, w_1 başlığa yakın taraf genişliği 60 mm, w_2 uç taraf genişliği 45 mm olup Şekil 5.2’de gösterilmiştir. Deneysel çalışmada olduğu gibi hem (Şekil 5.3a) 0° hem de (Şekil 5.3b) 90° doğrultularında Tip A yüklemesi (Şekil 5.4a) uygulanmıştır. Malzeme SN490B tipi çeliktir, pekleşme modeli gerekli hesaplar yapıldıktan sonra Şekil 5.4b’de verilmiştir.



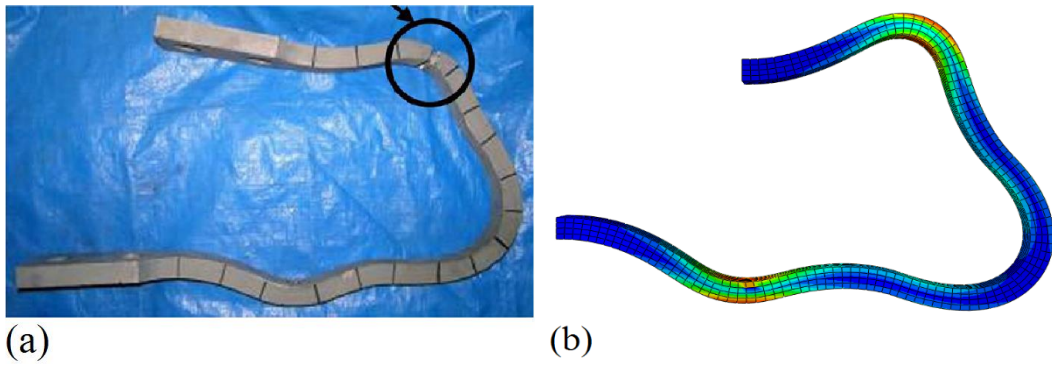
Şekil 5.3 : UD40 boyutları–yükleme yönü: (a) 0° yönü. (b) 90° yönü.



Şekil 5.4 : (a) Yükleme grafiği. (b) SN490 malzeme modeli.

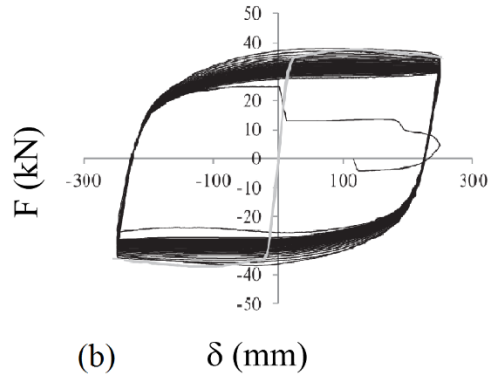
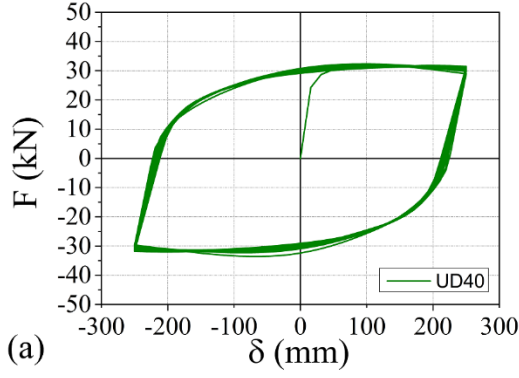
5.1.1 UD'nin histeretik davranışı

0 derece yönünde statik çevrimsel yükleme sonucunda her iki kolda da sünek yırtılmalar oluşmuş ve UD'yi kopmaya kadar götürmüştür. Bu yönde hasarın ana nedeni üst ve alt kolların ortasında oluşan eğilmedir (Jiao ve diğ, 2015). Şekil 5.5a'da söz konusu deneysel çalışma sonucunda kopma noktası görülmektedir. Sonlu elemanlar hesabı sonucunda da (Şekil 5.5b) deneysel davranışa paralel olarak yine kolların ortasında eğilme deformasyonlarının yoğunlaştığı ve kopmanın deneysel çalışmaya benzer bölgede olacağı beklenmektedir. Burada kurulan sayısal model malzemenin yırtılarak kopmasını içermemektedir.



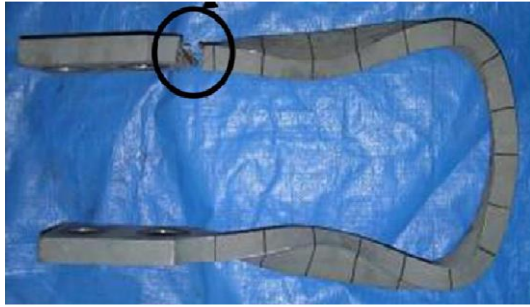
Şekil 5.5 : 0 derece: (a) Kopma noktası (Jiao ve diğ, 2015). (b) Eşdeğer plastik şekildeğişirmeler.

Histeretik eğriler karşılaştırıldığında ise eğrilerin tiplerinin oldukça benzer olmasına karşın kuramsal sonuçların (Şekil 5.6a) deneysel sonuçlara (Şekil 5.6b) göre bir miktar daha düşük çıktığı görülmektedir. Malzeme verisinin farklılığı gözönüne alındığında ulaşılan maksimum yatay kuvvetteki bu küçük fark olağan karşılanmıştır. Sonlu elemanlar modeli sonuçlarına göre ulaşılan maksimum yatay kuvvet pozitif yönde 32,3 kN negatif yönde 33,6 kN'dur. Histeretik eğrinin son çevrimlerde dahi kararlı olduğu görülmektedir. Bu tür sönümleyicilerin en büyük üstünlüklerinden biri de budur.

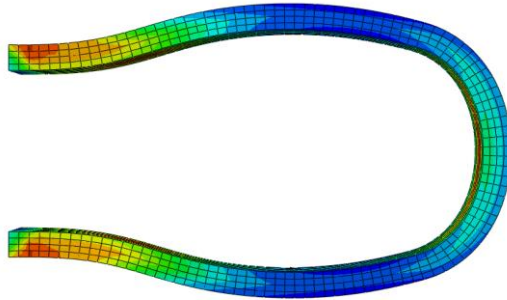


Şekil 5.6 : 0° yönü: (a) Kuramsal histeretik eğrileri (Jiao ve diğ, 2015).
(b)Deneysel histeretik eğrileri (Jiao ve diğ, 2015).

90° yönünde yapılan deneysel yükleme sonucunda bu kez hasar eğilme nedeni ile olmamıştır. Sönümleyici başlık uçlarında ve eğimli bölümün ortasında burulmaya diğer bölümlerde ise aksenal kuvvetlere (çekme-basınç) maruz kalmıştır. Bu nedenle 0°'de yükleme yönüne göre daha uzun sürede kopma oluşmuştur (Jiao ve diğ, 2015). Şekil 5.7a'da kopmanın başlık ucunda olduğu görülmektedir, sonlu elemanlar analizi sonucunda da (Şekil 5.7b) plastik şekildeğiştirmeler, başlık uç noktalarında yoğunlaşmakta olduğundan kopmanın yine aynı noktada gerçekleşmesi beklenmektedir.



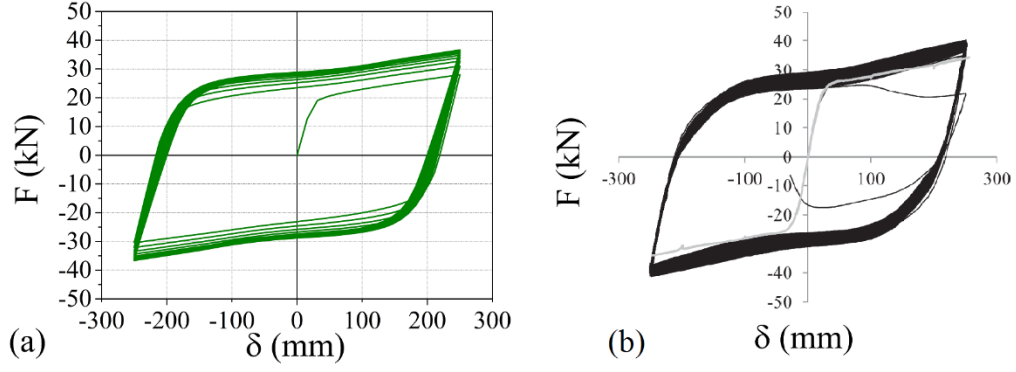
(a)



(b)

Şekil 5.7 : 90 derece: (a) Kopma noktası (Jiao ve diğ, 2015). (b) Eşdeğer plastik şekil değiştirmeler.

Şekil 5.8a'da sonlu elemanlar sonucunda elde edilen histeretik eğriler görülmektedir. Deneysel sonuçlarla karşılaştırıldığında sonuçların büyük oranda uyumlu olduğu anlaşılmaktadır (Şekil 5.8b). Kuramsal sonuçlara göre maksimum yatay kuvvet hem pozitif hem de negatif yönde 36,6 kN bulunmuştur. Bu bakımdan 0°'e yükleme yönüne göre daha büyük reaksiyon kuvveti elde edildiği gözlenmektedir.



Şekil 5.8 : 90° yönü: (a) Kuramsal histeretik eğrileri (Jiao ve diğ, 2015).
(b)Deneyisel histeretik eğrileri (Jiao ve diğ, 2015).

Bunun yanısıra 0 derece yükleme durumunda, deplasman arttıkça belli bir miktar sonra elde edilen yatay kuvvette düşüş gözlenirken, 90 derece yüklemede deplasman arttıkça yatay kuvvet de artmaktadır.

Sonlu elemanlar analizinin deneysel sonuçlarla oldukça uyumlu olduğu görülmektedir. Histeretik eğrinin ve buna bağlı olarak çıkarılacak diğer parametrelerin (k_{eff} , efektif rijitlik; ξ_{eff} , efektif sönüm; F , yatay kuvvet; E_p , sönümlenen enerji) yapılacak olan parametrik çalışma için güvenilir olduğu sonucu ortaya çıkmaktadır. Böylece elde edilen deneysel ve kuramsal sonuçlar yapılan modellemenin uygun olduğunu göstermektedir.

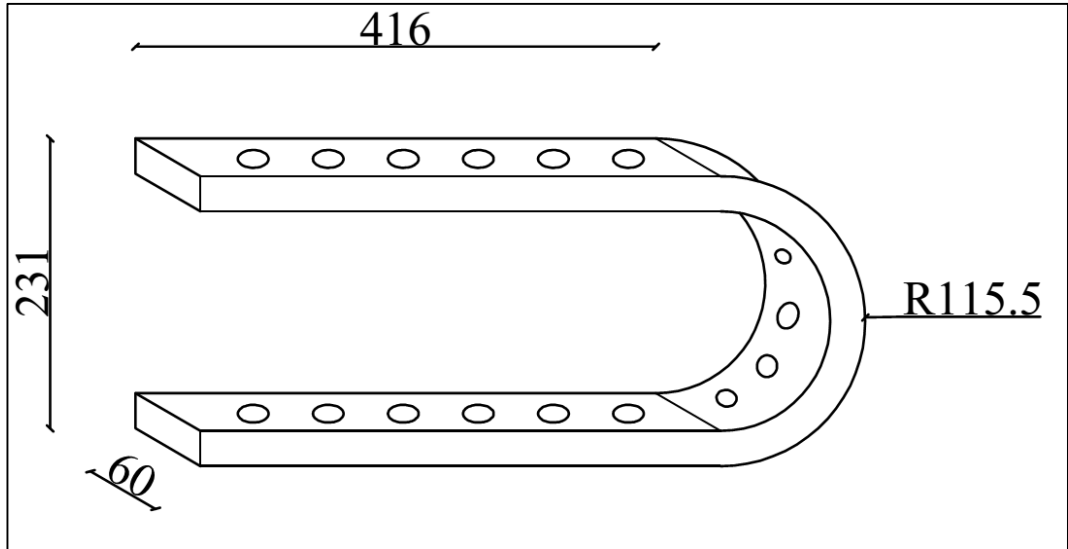
Sonlu elemanlar modelinin sağlaması amacıyla deneysel ve kuramsal olarak Deng ve diğ. (2013) tarafından incelenen UDS1, UDS2, UDS3 ve UDS4 isimli sönümleyiciler de bu çalışma kapsamında modellenmiş detaylı analiz sonuçları Ek-A'da verilmiştir.

6. SAYISAL ÖRNEKLER

Japonya’da uygulamada bina türü yapılarda sıkça kullanılan UD40 isimli mevcut sönümleyicilerin performanslarının olası iyileştirilmesi amacıyla alternatif sönümleyici geometrileri üzerinde çalışılmıştır. UD’lerin histeretik davranışı modellendiğinde sistemin geometrisi gereği plastik şekildeğişikliklerin çoğunlukla bir bölgede yoğunlaştığı görülmektedir. Bu bağlamda, daha yayılı bir plastikleşme durumunun elde edilmesinin faydalı olabileceği, sistemin enerji yutma kapasitesinin daha da iyileştirilebileceği düşünülmüştür. Bu amaçla, aşağıda açıklandığı biçimiyle farklı geometrik özelliklere sahip sönümleyiciler tasarlanmış ve histeretik performansları sayısal olarak incelenerek birbirleri ile karşılaştırılmıştır.

6.1 Geometri Seçimi

6.1.1 UDK isimli sönümleyiciler



Şekil 6.1 : K isimli sönümleyicilerin tipik geometrisi (mm).

Şekil 6.1’de UDK1, UDK2, UDK3, UDK4 ve UDK5 isimli sönümleyicilerin boyutları görülmektedir. Bu boyutlar UD40 sönümleyicisine benzer olup başlık bölümünden sonra genişlikte daraltma yapmak yerine plastik şekildeğişiklikleri

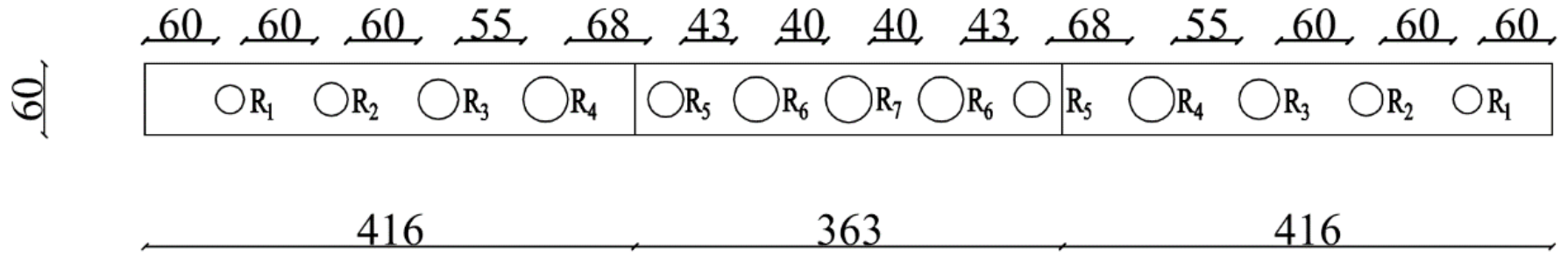
elemanın üzerine yaymak için çeşitli yarıçaplarda ve aralıklarda delikler açılmıştır. Bu şekilde sönümleyici performansındaki değişimin karşılaştırılması amaçlanmıştır.

Delik çaplarına ve aralıklara karar verirken ilk olarak kesit alanlarının ve dolayısı ile hacimlerin birbirine eşdeğer olması gözönüne alınmıştır. Bunun dışında delikli UD tasarımına yön veren diğer bir parametre ise gerilmelerin konsantrasyonu olmuştur.

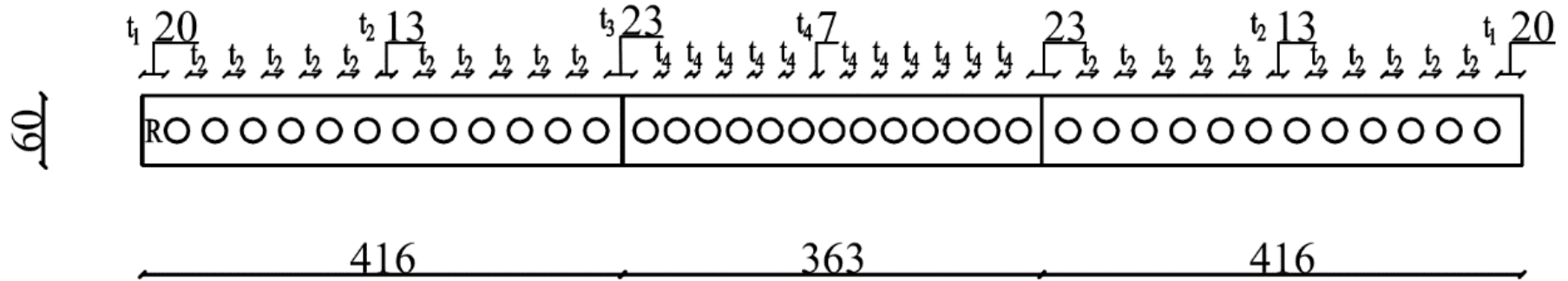
Schulz (1942) tarafından hazırlanan tabloya göre, sonlu genişlikte sonsuz uzunluktaki levhalarda gerilme artış katsayısı delik yarıçapı R , iki deliğin merkezleri arası uzaklık L ve levha genişliğine w_L bağlıdır. Gerilme yoğunluk katsayısı, R/L arttıkça artış, R/w_L arttıkça ise azalış göstermektedir. Bu nedenle delik çapını optimize etmek gerekmiştir.

UDK1 delik yerleşimi Şekil 6.2’de görülmektedir. $R_1, R_2, R_3, R_4, R_5, R_6, R_7$ sırasıyla 12 mm, 14 mm, 17 mm, 19 mm, 15 mm, 19 mm, 19.5 mm olarak seçilmiştir. UDK2 sönümleyicisinde delik yarıçapları R 10 mm olarak sabit tutulup, delik aralıkları t_1, t_2, t_3, t_4 sırasıyla 20 mm, 13 mm, 23 mm, 7 mm olarak değişmektedir (Şekil 6.3). UDK3 sönümleyicisinde UDK2’den farklı olarak delik yarıçapı 15 mm’ye arttırılmış ve toplam hacim eşitliği kriterine göre delik aralıklarında ve miktarında değişim olmuştur (Şekil 6.4). Şekil 6.5’te görülen UDK4 sönümleyicisi R 17.5 mm olarak seçilmiş ve tüm deliklerde aynıdır. Delik aralıkları UD40 sönümleyicisindeki kesit azalması yönünde azalmaktadır. Son olarak UDK5 sönümleyicinin geometrisi oluşturulmuştur (Şekil 6.6). Üst ve alt parçalarda delikler sabit aralıkta yerleştirilmiştir. $R_1, 15\text{mm}; R_2, 20\text{mm}$ olarak seçilmiştir.

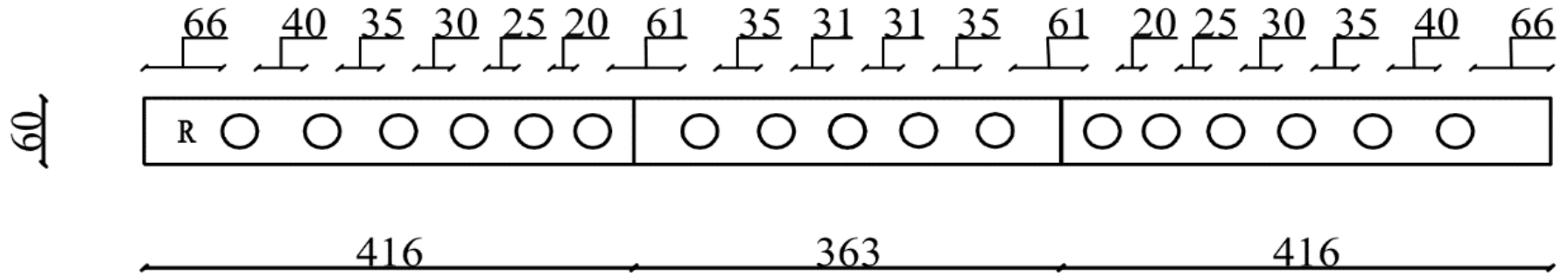
Çizelge 6.1’de UDK sönümleyicilerin toplam hacimleri gösterilmektedir. Bu tabloya göre sönümleyicilerin toplam hacimlerindeki değişim $\% \pm 1$ civarında olmuştur. Buna bağlı olarak histeretik davranışlarının eşdeğer hacim baz alınarak karşılaştırılabilir olduğu söylenebilir. Böylece eşit hacimde, ancak farklı özelliklerdeki U- sönümleyicilerin histeretik davranışlarının etkisini ve olası davranış iyileşmesini görmek mümkün olacaktır.



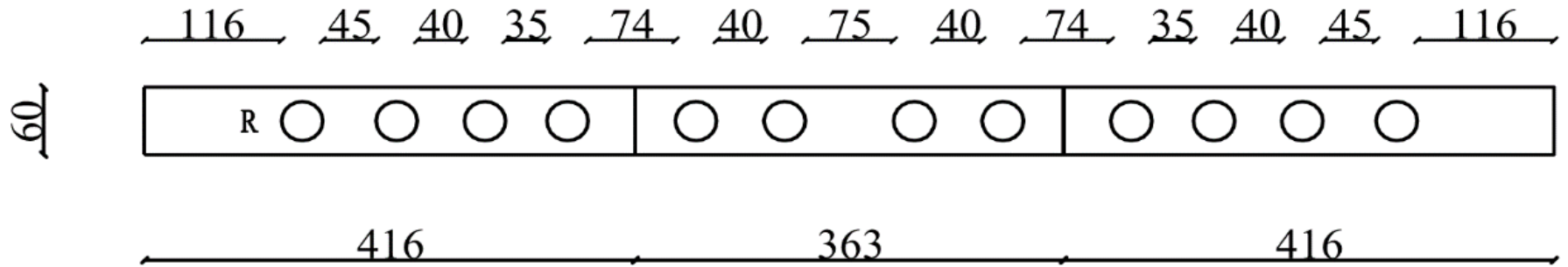
Şekil 6.2 : UDK1 sönümleyici delik yerleşim düzeni (mm) (Değişken delik çaplı sistem).



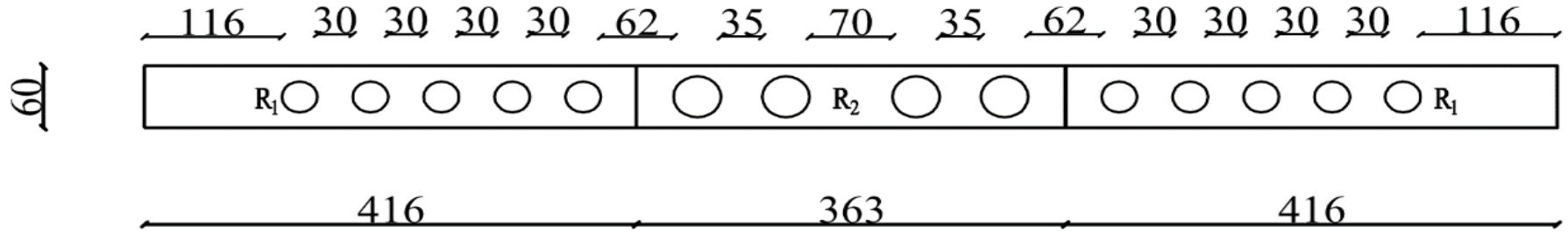
Şekil 6.3 : UDK2 sönümleyici delik yerleşim düzeni (mm) (Sabit delik çaplı sistem).



Şekil 6.4 : UDK3 sönümleyici delik yerleşim düzeni (mm) (Sabit delik çaplı sistem).



Şekil 6.5 : UDK4 sönümleyici delik yerleşim düzeni (mm) (Sabit delik çaplı sistem).

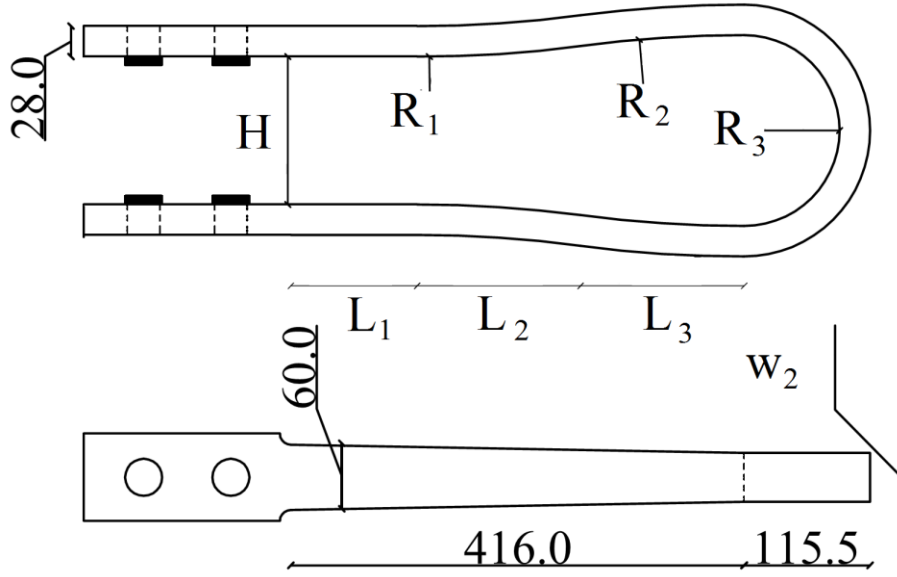


Şekil 6.6 : UDK5 sönümleyici delik yerleşim düzeni (mm) (Bölgesel değişen delik çaplı sistem).

Çizelge 6.1 : UDK ve UD40 alan ve hacim değerleri.

Enerji Sönümleyen Yüzey Alanı (mm ²)					Toplam Hacim (mm ³)		
	Alt Parça	Üst Parça	Eğimli Parça	Toplam	Enerji Sönümleyen Kısım	Toplam	Hacimsel Fark
UD40	21840	21840	16328	60008	1624817	2365534	% 0
UDK1	21850	21850	16903	60603	1639295	2380012	% 1
UDK2	21190	21190	17696	60076	1620237	2360955	% 0
UDK3	20719	20719	18246	59684	1608989	2349706	% -1
UDK4	21112	21112	17932	60155	1623250	2363967	% 0
UDK5	21426	21426	16753	59605	1611853	2352570	% -1

6.1.2 UDF isimli sönümleyiciler



Şekil 6.7 : UDF isimli sönümleyicilerin tipik geometrisi.

Şekil 6.7’de UDF isimli sönümleyicilerin tipik geometrisi görülmektedir. Bu sönümleyicinin H, R₁, R₂, R₃, L₁, L₂, L₃, W₂ parametreleri değiştirilerek eşit hacim değerlerinde (Çizelge 6.2) yeni sönümleyiciler oluşturulmuştur. Normal UD sönümleyici geometrisinde 0° yükleme yönünde üst ve alt kollar eğilmeye çalışırken, UDF geometrisine sahip sönümleyicilerin aynı durumda daha çok eksenel kuvvet alması amaçlanmış ve bu amaçla geometri Şekil 6.7’deki gibi tasarlanmıştır. UDF sönümleyicilerin detaylı geometrik özellikleri EK-A’da verilmiştir.

Çizelge 6.2 : UDF ve UD40 alan ve hacim değerleri.

Enerji Sönümleyen Yüzey Alanı (mm ²)					Toplam Hacim (mm ³)		
	Alt Parça	Üst Parça	Eğimli Parça	Toplam	Enerji Sönümleyen Kısım	Toplam	Fark
UD40	21840	21840	16328	60008	1624817	2365534	% 0
UDF1	19003	19003	21204	59209	1602455	2343172	% -1
UDF2	21886	21886	16328	60100	1627276	2367993	% 0
UDF3	22147	22147	16328	60621	1641289	2382006	% 1
UDF4	22029	22029	16328	60386	1624754	2365471	% 0
UDF5	22087	22087	16328	60502	1624806	2365523	% 0

6.2 Sonlu Elemanlar Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması

Bu alt bölümde detaylı sonuçları EK-A'da verilen UD40, UDK ve UDF isimli sönümleyicilere ilişkin histeretik eğrilerin ve bu eğrilere bağlı parametrelerin karşılaştırılması yapılacaktır.

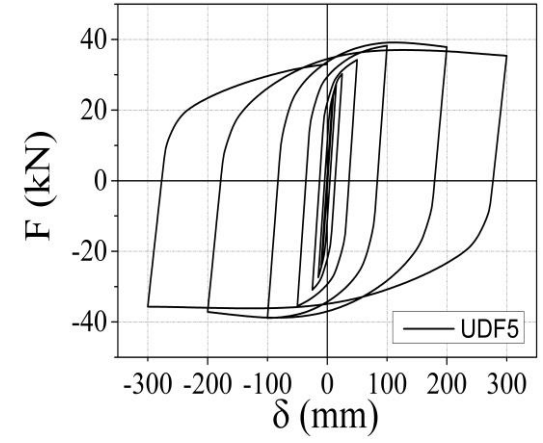
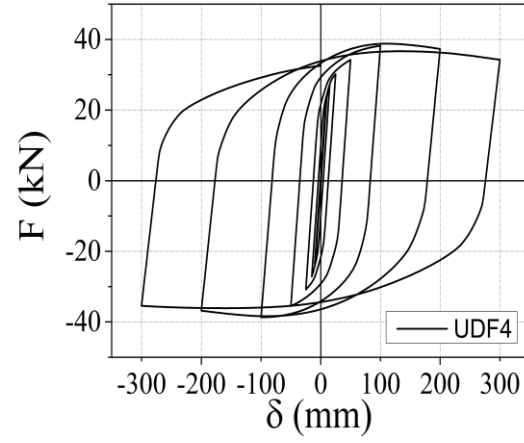
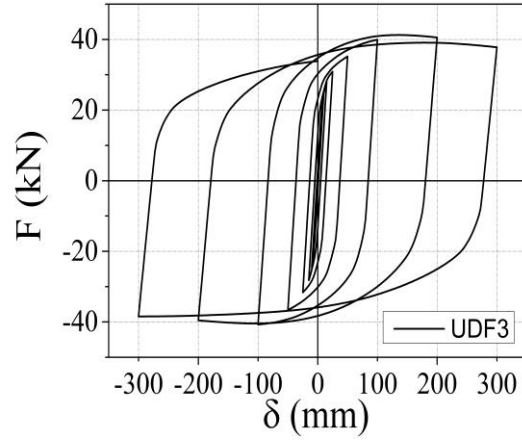
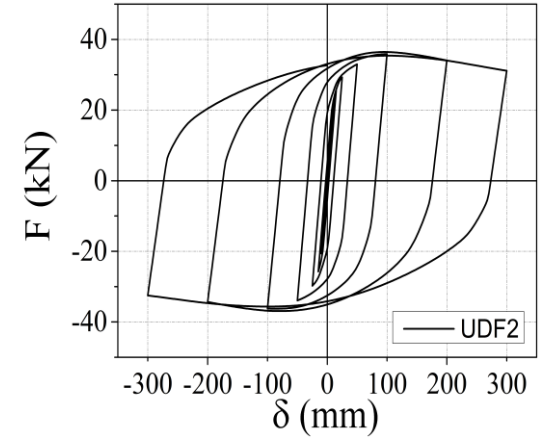
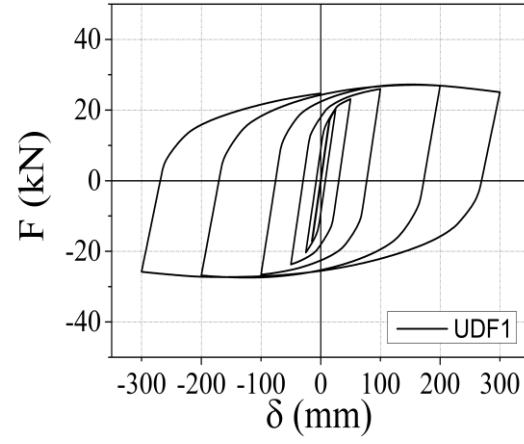
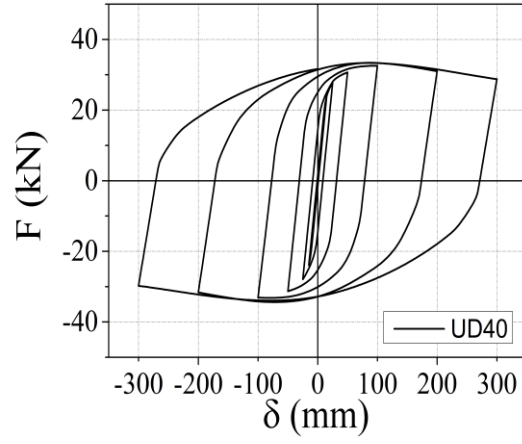
Farklı geometrilerdeki UD'lerin sonlu elemanlar analizinde, yükleme C tipi, malzeme SN490B ve yükleme yönü elverişsiz yükleme olan 0° seçilmiştir. Sonlu elemanlar model özellikleri ve varsayımları Bölüm 4'de detaylı olarak açıklanmıştır.

Çizelge 6.3 : Sönümlenen enerji miktarı (kNm).

Çevrim Sayısı	δ^+ (mm)	UD40	UDF1	UDF2	UDF3	UDF4	UDF5
0	0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1	10	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0
2	15	0,1	0,0	0,2	0,4	0,3	0,4
3	25	0,7	0,4	1,1	1,8	1,5	1,6
4	50	3,8	2,6	4,7	6,1	5,5	5,7
5	100	12,7	9,3	14,6	17,3	16,1	16,5
6	200	32,9	25,3	36,5	42,3	39,5	40,2
7	300	63,5	50,3	69,4	79,5	74,1	75,5

Şekil 6.8'de UD40 ve UDF isimli sönümleyicilerin histeretik eğrileri birlikte verilmiştir. Bu eğriler incelendiğinde UDF1 dışındaki tüm histeretik eğrilerin alanlarının UD40'a ait histeretik eğriden daha büyük olduğu görülebilir. Histeretik eğri altında kalan alanın toplamı, sönümlenen toplam enerjiye eşit olduğundan aynı çevrim sayısında en fazla enerjinin UDF3, en düşük toplam enerjinin ise UDF1 isimli sönümleyici tarafından tüketildiği sonucu çıkartılabilir (Çizelge 6.3).

Sönümlenen enerji miktarı dışında efektif rijitlik de sismik izolasyon sistemleri açısından önemli bir kavramdır. Taban izolasyon sisteminin, rüzgâr gibi görece küçük yatay yüklerde hareket etmeyecek kadar büyük ve deprem kuvveti gibi daha büyük yüklerde yapı hareketini sağlayacak kadar düşük rijitliğe sahip olması gerekmektedir.



Şekil 6.8 : UD40 ve UDF isimli sönümleyicilerin histeretik eğrileri.

Efektif rijitlikler her bir çevrim için maksimum ve minimum yerdeğiştirmelere karşılık gelen dayanımların mutlak değerlerinin toplamının, maksimum ve minimum yerdeğiştirmelerin mutlak değerlerinin toplamına oranı olarak ifade edilmektedir.

Çizelge 6.4 : Efektif rijitlik değerleri (N/mm).

Çevrim Sayısı	δ^+ (mm)	UD40	UDF1	UDF2	UDF3	UDF4	UDF5
1	10	1701	1175	2063	2459	2349	2388
2	15	1595	1142	1712	1872	1804	1820
3	25	1113	812	1181	1251	1220	1223
4	50	620	468	669	718	697	697
5	100	328	263	360	403	384	385
6	200	157	134	171	200	185	187
7	300	98	85	106	127	116	118

Çizelge 6.4'te efektif rijitlikleri verilen sönümleyicilerin ilk rijitliklerinin son rijitliklerine oranla çok büyük olduğu görülmektedir. UDF1 ilk efektif rijitliği 1175 N/mm sahip olan sönümleyicidir, bununla birlikte 3. çevrimde enerji sönümlemeye başlamıştır. Sönümlenen enerji ve efektif rijitlik tablolarına bakıldığında ilk efektif rijitlik arttıkça plastik şekildeğiştirme ve dolayısıyla enerjinin sönümlenmesi daha erken çevrimlerde başlamaktadır.

Çizelge 6.5 : Efektif sönüm oranları.

Çevrim Sayısı	δ^+ (mm)	UD40	UDF1	UDF2	UDF3	UDF4	UDF5
1	10	% 0	% 0	% 0	% 5	% 2	% 3
2	15	% 3	% 1	% 7	% 14	% 11	% 13
3	25	% 15	% 13	% 19	% 27	% 24	% 26
4	50	% 32	% 30	% 35	% 38	% 37	% 38
5	100	% 43	% 40	% 44	% 44	% 44	% 44
6	200	% 51	% 47	% 51	% 50	% 50	% 50
7	300	% 56	% 52	% 55	% 52	% 53	% 53

Efektif sönüm oranları 6.1'deki bağıntıya uygun olarak hesaplanmış k_{eff} efektif rijitlik, $E_{p_{loop}}$ bir çevrimde sönümlenen enerji, δ^+ , δ^- sırasıyla maksimum ve minimum yerdeğiştirme miktarlarıdır. Çizelge 6.5 incelendiğinde UD40 ve UDF sönümleyicilerin tamamının % 50'den fazla olduğu ve birbirine çok yakın değerler elde edildiği görülmektedir.

$$\beta_{eff} = \frac{E_{p_{loop}}}{k_{eff}(\delta^+ + \delta^-)^2} \quad (6.1)$$

Çizelge 6.6 : Maksimum kuvvetler (kN).

Çevrim Sayısı	δ^+ (mm)	UD40	UDF1	UDF2	UDF3	UDF4	UDF5
1	10	17	12	21	25	23	24
2	15	24	17	26	28	27	27
3	25	28	20	29	31	30	30
4	50	31	23	33	35	34	34
5	100	33	26	36	40	38	38
6	200	31	27	34	41	37	38
7	300	29	25	31	38	34	35

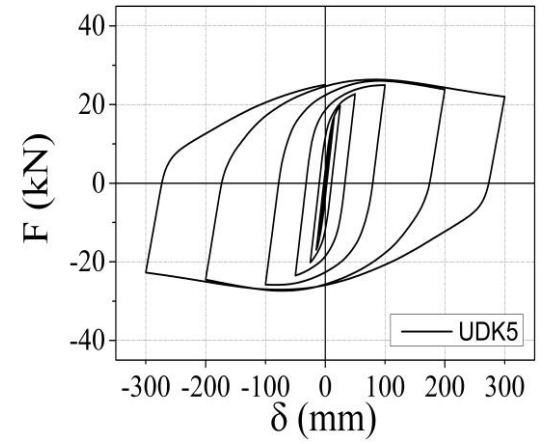
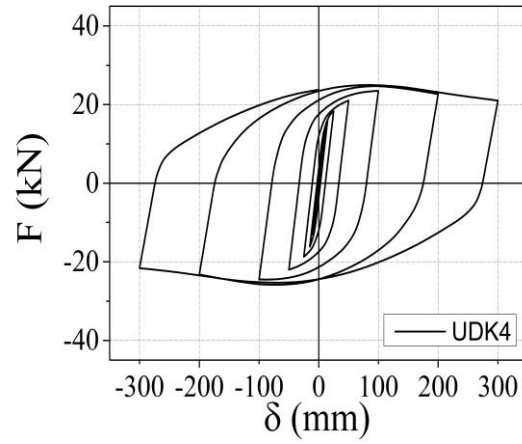
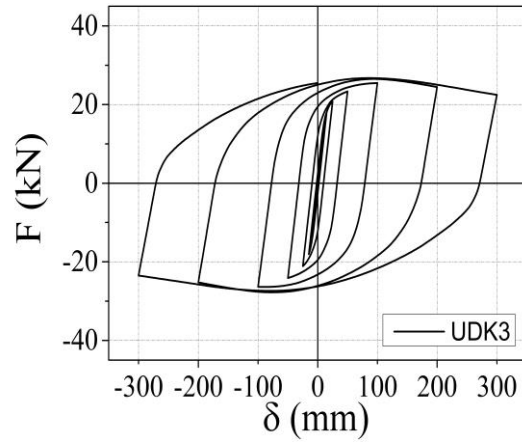
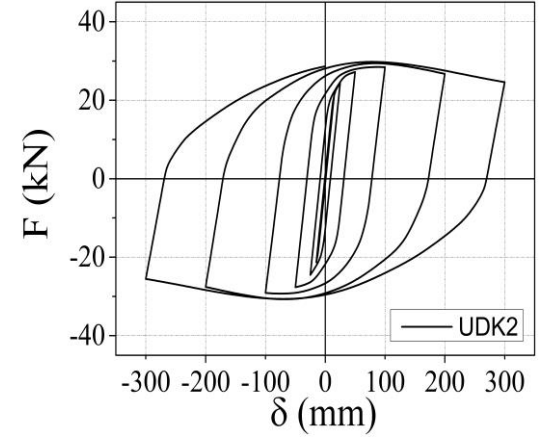
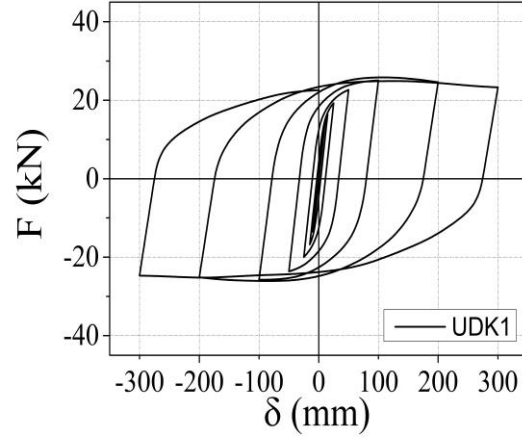
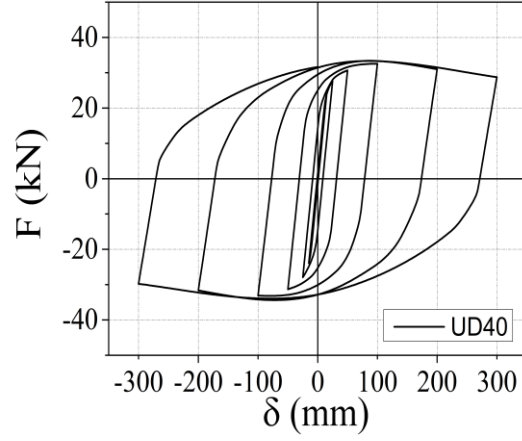
Histeretik eğriden çıkarılacak diğer bir sonuç da ulaşılan maksimum kuvvetler diğer bir deyişle ulaşılan dayanım değerleridir (Çizelge 6.6). Ulaşılan kuvvetlerin 100 mm'den sonra çok az miktarda düştüğü görülmektedir. Buradan, tasarlanan sönümleyicilerin çok büyük deplasmanlarda bile kararlı histeretik davranış gösterdiği sonucu çıkarılmaktadır.

Şekil 6.9'da UD40 ve UDK isimli sönümleyicilerin histeretik eğrileri görülmektedir. Yeni oluşturulan delikli sönümleyicilerin tamamının histeretik alanı UD40 sönümleyiciden düşüktür. UDK2, 55,5 kNm ile UD40'dan sonra en fazla enerji sönümlemektedir (Çizelge 6.7).

Çizelge 6.7 : Sönümlenen enerji (kNm).

Çevrim Sayısı	δ^+ (mm)	UD40	UDK1	UDK2	UDK3	UDK4	UDK5
0	0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1	10	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2	15	0,1	0,2	0,0	0,1	0,1	0,1
3	25	0,7	0,8	0,6	0,6	0,7	0,7
4	50	3,8	3,2	3,4	3,1	3,0	3,1
5	100	12,7	9,9	11,1	10,0	9,4	9,8
6	200	32,9	25,2	28,7	25,9	24,2	25,3
7	300	63,5	48,7	55,5	50,1	46,9	49,0

Efektif rijitliğe ilişkin olarak hazırlanan Çizelge 6.8 incelendiğinde ilk efektif rijitlikler UDK4 sönümleyicisinde 1314 N/mm'ye kadar düşmektedir



Şekil 6.9 : UD40 ve UDK isimli sönümleyicilerin histeretik eğrileri.

Çizelge 6.8 : Efektif rijitlik (N/mm).

Çevrim Sayısı	δ^+ (mm)	UD40	UDK1	UDK2	UDK3	UDK4	UDK5
1	10	1701	1357	1500	1370	1314	1328
2	15	1595	1108	1421	1204	1076	1124
3	25	1113	785	979	839	741	797
4	50	620	463	549	475	431	462
5	100	328	254	288	259	240	254
6	200	157	124	136	124	115	121
7	300	98	80	84	77	71	75

Efektif rijitlikteki ve sönümlenen enerji miktarındaki değişim sönüm oranlarında görülmemektedir. Tüm sönümleyiciler %50'den fazla ve birbirlerine çok yakın sönüm oranına sahiptirler (Çizelge 6.9).

Çizelge 6.9 : Sönüm oranları.

Çevrim Sayısı	δ^+ (mm)	UD40	UDK1	UDK2	UDK3	UDK4	UDK5
1	10	% 0	% 2	% 0	% 0	% 0	% 1
2	15	% 3	% 9	% 2	% 5	% 8	% 7
3	25	% 15	% 20	% 15	% 17	% 20	% 18
4	50	% 32	% 33	% 32	% 33	% 34	% 33
5	100	% 43	% 42	% 43	% 42	% 42	% 42
6	200	% 51	% 49	% 52	% 51	% 51	% 51
7	300	% 56	% 52	% 57	% 56	% 56	% 56

UDK isimli sönümleyiciler diğer sönümleyicilere benzer olarak 100 mm'deki deplasmanda maksimum kuvvete ulaşmaktadırlar. Bu deplasmandan sonra küçük bir oranda kuvvet azalması oluşmaktadır (Çizelge 6.9). Bu nedenle delikli olarak oluşturulan sönümleyicilerin de histeretik eğrilerinin kararlı olduğu sonucuna varılabilir.

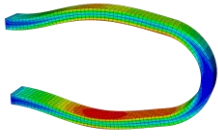
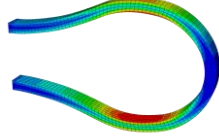
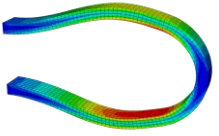
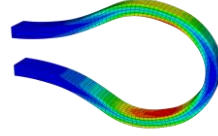
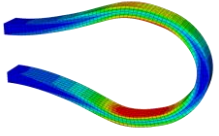
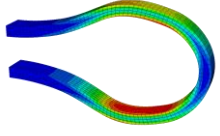
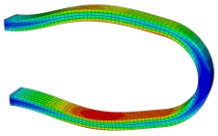
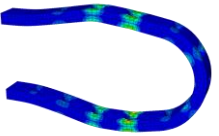
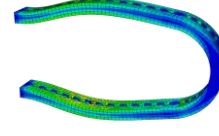
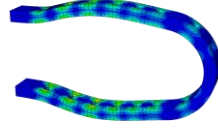
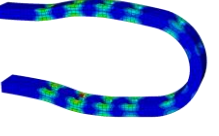
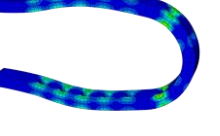
Çizelge 6.10 : Maksimum kuvvetler (kN).

Çevrim Sayısı	δ^+ (mm)	UD40	UDK1	UDK2	UDK3	UDK4	UDK5
1	10	17	14	15	14	13	13
2	15	24	16	21	18	16	17
3	25	28	19	24	21	18	20
4	50	31	23	27	23	21	23
5	100	33	25	28	25	23	25
6	200	31	25	27	24	23	24
7	300	29	23	25	22	21	22

Yapılan sayısal hesapların değerlendirilmesi amacıyla Çizelge 6.11’de sönümleyicilere ilişkin σ_{maks} ulaşılan maksimum gerilme miktarı, Y akma başlangıç yerdeğiştirmesi, PEEQ eşdeğer plastik şekildeğiştirmeler, $k_{eff}/k_{eff}(UD40)$ ilk efektif rijitliğin UD40’ın ilk efektif rijitliğine oranı, $E_p/E_p(UD40)$ sönümleyici tarafından tüketilen toplam enerjinin UD40’ın tükettiği enerjiye oranı ve $\xi_{(1. \text{Çevrim})}$ ilk çevrimdeki sönüm oranları gösterilmiştir. Ayrıca plastik şekildeğiştirmelerin yoğunlaştığı bölgeler sonlu elemanlar analizinin son adımından elde edilmiştir(Çizelge 6.11).

UDF1 sönümleyicisinde kesit azaltmasına gidilmemiş, yalnızca üst ve alt kollar bükülerek eksenel gerilme arttırılmaya çalışılmıştır. Bu sönümleyicide plastik şekildeğiştirmeler üst ve alt kollarda eğimli bölüme yakın tarafta oluşmuştur (Çizelge 6.11). UDF sönümleyiciler arasında ilk rijitlik değeri azalan tek sönümleyicidir. Diğer UDF (UDF2, UDF3, UDF4, UDF5) isimli sönümleyiciler üst ve alt kollardan bükülerek UD40’a benzer şekilde azalan kesitte oluşturulmuştur. Bu sönümleyicilerin H yüksekliklerinin azaldıkça ilk rijitliklerinin arttığı ve buna bağlı olarak tüketilen enerji miktarlarının da arttığı gözlenmiştir. İlk rijitliğin fazla olması sönümün daha erken çevrimlerde başlamasına olanak sağlamaktadır. Yerdeğiştirme kontrollü hesapta ilk rijitliği fazla olan sönümleyiciler erken deplasman aşamalarında daha fazla kuvvet etkisi altında kalmaktadırlar. Böylelikle çeliğin akması için gereken gerilme miktarına daha küçük deplasmanlarda ulaşılmaktadır. Bununla birlikte, ilk rijitliği çok yüksek sönümleyiciler kullanılması durumunda, küçük depremlerde sönümleyicinin plastik şekildeğiştirme yapamayacağı ve buna bağlı olarak ilave sönüm katkısı oluşturamayacağı beklenmektedir. İlk rijitliğin gereğinden düşük olması durumunda ise sönümleyici yapıya etkiyen küçük yatay kuvvetler etkisinde (küçük depremler, rüzgâr yükleri) etkin olarak çalışabileceği, ancak büyük depremlerde gerekli dayanımı gösteremeyeceği düşünülmektedir. Bu tip sönümleyicilerde plastik şekildeğiştirmelerin başlıklardan uzaklaştığı daha çok eğimli bölüme yakın tarafta yoğunlaştığı görülmektedir. Bunun nedeni, üst ve alt kolların bükülmesiyle deformasyonların büküm noktalarından sonraki bölgelerde yoğunlaşmasıdır.

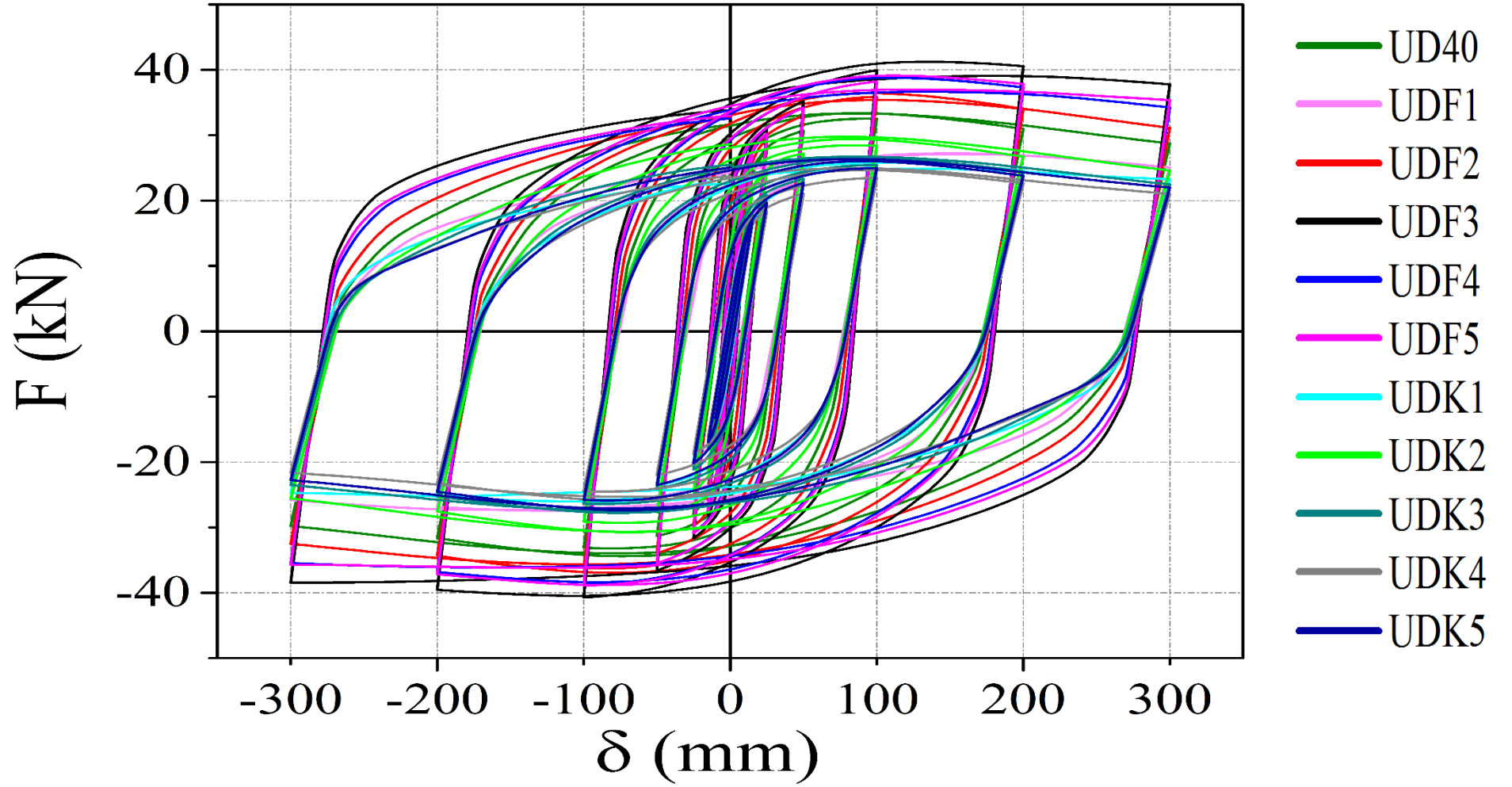
Çizelge 6.11 : Sönümleyicilerin Özelliklerinin Karşılaştırması (0° 7 Çevrim)

	UD40	UDF1	UDF2	UDF3	UDF4	UDF5
Y	12.5 mm	15 mm	10 mm	7.5 mm	10 mm	10 mm
PEEQ	0.27	0.28	0.35	0.50	0.43	0.43
σ_{maks}	591.7 MPa	577.9 MPa	604.5 MPa	651.4 MPa	644.4 MPa	645.7 MPa
Plastik şekil değiştirmenin yoğunlaştığı bölgeler						
$k_{eff}/k_{eff(UD40)}$	1.00	0.69	1.21	1.45	1.38	1.40
$E_p/E_{p(UD40)}$	1.00	0.79	1.09	1.25	1.17	1.19
$\xi_{(1. \text{ Çevrim})}$	%0	%0	%0	%5	%2	%3
	UD40	UDK1	UDK2	UDK3	UDK4	UDK5
Y	12.5mm	7.5mm	10mm	10mm	10mm	7.5mm
PEEQ	0.27	1.66	0.429	0.740	1.06	1.174
σ_{maks}	591.7 MPa	723 MPa	640.7 MPa	683.2 MPa	714.4 MPa	718.4 MPa
Plastik şekil değiştirmenin yoğunlaştığı bölgeler						
$k_{eff}/k_{eff(UD40)}$	1.00	0.80	0.88	0.81	0.77	0.78
$E_p/E_{p(UD40)}$	1.00	0.77	0.87	0.79	0.74	0.77
$\xi_{(1. \text{ Çevrim})}$	%0	%2	%0	%0	%0	%1

UDK1 Sönümleyicisinde plastik şekildeğiştirmeler üst ve alt kolların en sağındaki delikte yoğunlaşmış olup sönümleyici üzerine dağılamamıştır. Bu nedenle, delik yarıçapının bu denli büyük olması ($R/t=0.69$) sönümleyici davranışını olumsuz yönde etkilemiştir. UDK1'deki olumsuz davranış özelliklerini iyileştirmek için daha küçük delik çapı seçilerek UDK2 oluşturulmuştur. Bu sayede, plastik şekildeğiştirmelerin tek delikte yoğunlaşması önlenmiş ve sönümleyici üzerine yayılması sağlanmıştır. UDK3 ve UDK4 sönümleyicilerinde delik çapının artması ile birlikte elde edilen maksimum gerilme miktarları artmış, sönümleyicinin eğrisel yüzeyinde istenen düzeyde plastik şekildeğiştirme gerçekleşmemiştir. Bu tip sönümleyicilerde plastik şekildeğiştirmeler üst ve alt kollardaki deliklerin etrafında yoğunlaşmıştır. UDK5 sönümleyicide ise plastik şekildeğiştirmeler eğrisel yüzeydeki en büyük delikte ($R/t=0.71$) yoğunlaşmış, sönümleyicinin tamamı efektif olarak kullanılamamıştır.

Delikli sönümleyiciler için genel bir değerlendirme yapmak gerekirse, delik yarıçapları 10mm'den büyük olanlarda ($R/t=0.28$) plastik şekildeğiştirmelerin delik etrafında yoğunlaştığı, sönümleyicinin diğer bölgelerine ulaşmadığı gözlenmiştir. Değişik delik çaplı sönümleyicilerde (UDK1, UDK5) plastik şekildeğiştirmeler en zayıf kesitte yoğunlaşmakta ve sönümleyicinin davranışını bu bölgenin kontrol etmesine neden olmaktadır. Sonuç olarak, bu boyutlardaki sönümleyiciler için delik yarıçaplarını 10mm ($R/t=0.28$) civarında tutmak ve düzgün aralıklarla yayılmasını sağlamak, plastik şekildeğiştirmelerin sönümleyici boyunca daha uygun dağılmasına olanak sağlamaktadır. Bu çalışmada, eşdeğer hacimdeki sönümleyicilere delikler açılarak ilk rijitliklerinin düşürülebildiği gözlenmiştir.

UD40 ve buna alternatif olarak tasarlanan tüm sönümleyicilerin histeretik eğrileri topluca şekil 6.10'da verilmiştir. Bunun dışında UDF sönümleyicisinin 0,45 ve 90 derece yönlerinde yapılan yüklemeler sonucunda ortaya çıkan histeretik eğrileri, geometrik düzenine göre toplanarak çoklu sönümleyicilerin histeretik eğrileri elde edilmiştir. Uygulamada en çok kullanılan kombinasyonlardan 4'lü, 6'lı ve 8'li sönümleyici düzenlemesine ilişkin detaylı özellikler Ek-A'da verilmiştir.

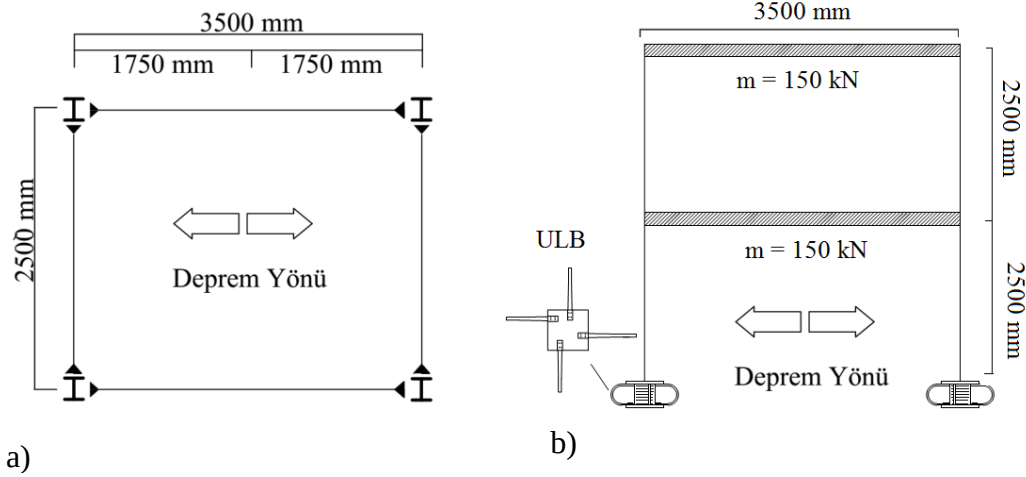


Şekil 6.10 : Tüm histeretik eğrilerin karşılaştırması.

7. ZAMAN TANIM ALANINDA ANALİZ

Bu bölümde Oh ve diğ. (2012) tarafından yapılan deneysel çalışma temel alınarak ULB sönümleyicisinin farklı depremler altındaki davranışı incelenmiştir. Bu amaçla önce yapının SAP2000 programında modeli kurulmuş, ardından seçilen 4 farklı deprem ivme kaydı ile yapıya hızlı doğrusal olmayan zaman tanım alanında (Fast Nonlinear Analysis) analiz yapılmıştır.

7.1 Analiz Düzeneği



Şekil 7.1 : (a) Çerçeve planı. (b) Öngörünüş.

Çizelge 7.1’de eleman boyutları verilen yapıya ilişkin geometrik özellikler Şekil 7.1’de özetlenmiştir. Kat yükseklikleri $h=2,5$ m, planda kolon aralıkları $3,5\text{m} \times 2,5\text{m}$ ’dir. Yapı üzerinde her katta 150 kN toplamda 300 kN yük bulunmaktadır.

Çizelge 7.1 : Yapı elemanları boyutları.

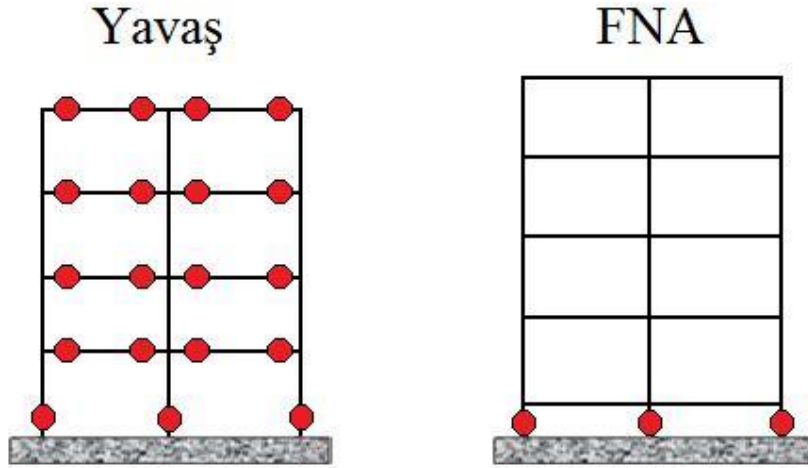
	Yükseklik (mm)	Başlık Genişliği (mm)	Gövde kalınlığı (mm)	Başlık Kalınlığı (mm)	Kesit Alanı (mm ²)
Kolonlar	350	175	7	11	6,314
Kirişler	300	150	6.5	9	4,678

Yapı hem ankastre mesnetli hem de taban izolasyonlu olarak modellenmiştir. Taban izolasyonlu yapıda ULB sönümleyicilerin tepkisini görmek amacı ile taban kirişinin üzerine 2 adet ULB sönümleyici yerleştirilmiştir. ULB'lerin herbiri 1 adet düşük sönümlü kauçuk izolatörden ve 4 adet UD sönümleyiciden meydana gelmektedir. Yükleme yönü Şekil 7.1'de gösterildiği gibi olup 4 adet deprem ivme kaydı kullanılmıştır.

7.2 Analiz Metodu

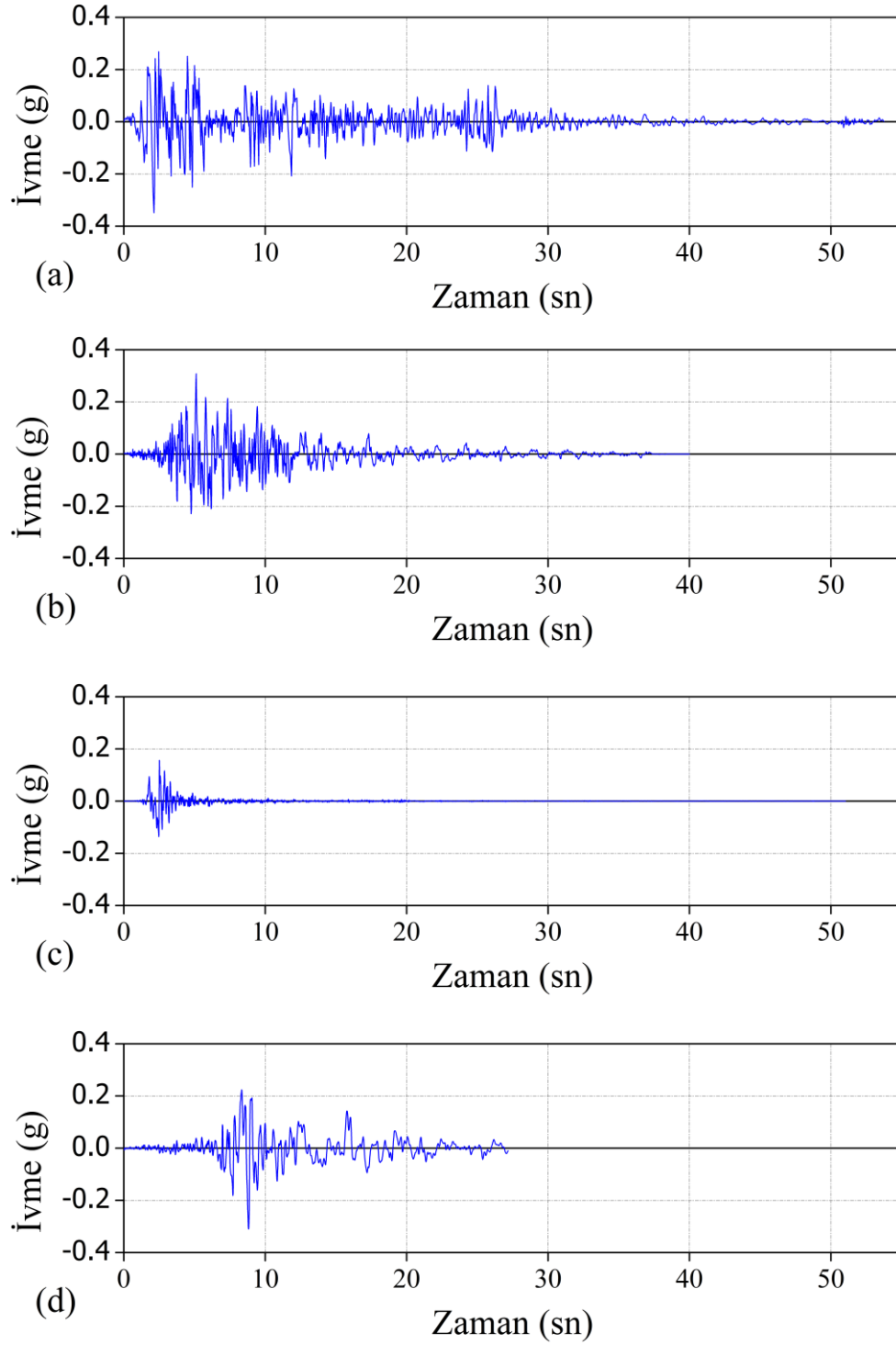
Sismik izolasyonlu yapı davranışının belirlenebilmesi amacı ile örnek yapı SAP2000 programıyla modellenmiştir. Bu modelde analiz yöntemi olarak hızlı doğrusal olmayan analiz yöntemi (FNA) kullanılmıştır.

Yapının büyük deplasmanlar altındaki gerçek davranışı önemli derecede doğrusal olmayan bir davranış sergilemektedir. Bununla birlikte modern tasarım anlayışına göre “iyi tasarlanmış yapıda sınırlı sayıda elemanda ihtiyaç duyulan süneklik ve göçme açıkça tanımlanmalıdır.” Dinamik yükler için ek sönümleyici çaprazlar, taban izolasyonu ve diğer enerji sönümleyiciler büyük deplasmanların yapısal elemanlardan önce meydana geleceği noktalar olarak belirlenebilir (Wilson, 1996).



Şekil 7.2 : (a) Yavaş. (b) Hızlı doğrusal olmayan analiz.

FNA yönteminde sınırlı sayıda elemanın doğrusal olmayan özellikleri tanımlanırken yapının diğer bölümlerindeki elemanların elastik davranış gösterdiği düşünülür. Sismik izolasyon uygulamalarında bu durum beklendiği için bu yöntemle analiz yapmak oldukça uygundur.



Şekil 7.3 : Deprem ivme kayıtları: a)18 Mayıs 1940 El Centro. b)17 Ocak 1994 Northridge. c) 31 Ekim 1935 Helena Montana. d) 17 Ağustos 1999 Kocaeli.

Şekil 7.3'te yapı analizinde kullanılan deprem ivme kayıtları görülmektedir (PEER, 2015). 18 Mayıs 1940 El Centro, 17 Ocak 1994 Northridge, 31 Ekim 1935 Helena Montana ve 17 Ağustos 1999 Kocaeli depremlerinin maksimum zemin ivmesi sırasıyla 0.348g, 0.308g, 0.156g ve 0.309g olarak ölçülmüştür. 18 Mayıs 1940 El

Centro ve 17 Ocak 1994 Northridge depremleri tarihi depremler olup aralarındaki önemli fark etki ettikleri süredir. 31 Ekim 1935 Helena Montana depremi diğer depremlere oranla daha düşük yer ivmesine sahip ve $M=6,0$ büyüklüğündedir. 17 Ağustos 1999 Kocaeli depremi ise ülkemizde yaşanmış en önemli depremlerden bir tanesidir.

7.3 Sismik İzolasyon Sistemi Tasarımı

Taban izolasyon sisteminin tasarımı ASCE 7-10 yönetmeliğinde verilen eşdeğer yatay kuvvet yöntemine göre yapılmıştır. Bu yöntemde en uygun değerler iteratif olarak çözülerek bulunmaktadır. Sismik izolasyonun tasarımında deneysel verilerle karşılaştırma yapmak amacı ile S_{M1} değeri doğrudan Oh ve diğ. (2012)'nin yayınlamış olduğu makaleden elde edilmiş olup, tasarım için belirlenen deplasman ve diğer varsayımlar da sözü edilen çalışmadan uyarlanmıştır.

ASCE 7-10 yönetmeliğine göre son yapılan iterasyonun adımları şöyle sıralanabilir:

- 1) LDR nin periyodu (T_{LDR}) seçilir ve ihtiyaç duyulan rijitlik ($K_{d,toplam LDR}$) hesaplanır. 7.1'de W sismik ağırlık, g ise yerçekimi ivmesidir. Doğal kauçuk izolatörün periyodu 3 sn seçilmiştir, buna göre

$$T_{LDR} = 2\pi \sqrt{\frac{W}{K_{d,toplam LDR} g}} \quad (7.1)$$

$$K_{d,toplam LDR} = 4\pi^2 \frac{W}{T_{LDR}^2 \times g} = 4\pi^2 \frac{300}{3^2 \times 9810} = 0.134 \text{ kN/mm}$$

- 2) Toplam akma dayanımı $Q_{d,total}$ ve tasarım deplasmanı D_M seçilerek toplam efektif rijitlik K_M hesaplanır. $Q_{d,total}$ değerinin pratikte sismik ağırlığın %5'inden daha fazla olması gerekmektedir (McVitty ve Constantinou 2015).

$$K_M = K_{d,total LDR} + \frac{Q_{d,total}}{D_M} \quad (7.2)$$

$$K_M = 0.134 + \frac{21.2}{185} = 0.249 \text{ kN/mm}$$

elde edilir.

3) Efektif toplam periyot T_M hesaplanarak izolasyon sisteminin periyodu bulunur.

$$T_M = 2\pi \sqrt{\frac{W}{K_{d,toplam} g}} \quad (7.3)$$

$$T_M = 2\pi \sqrt{\frac{300}{0.249 \times 9810}} = 2.2 \text{ sn}$$

4) Efektif sönüm değeri β_M hesaplanır. 7.4'te verilen Y akma başlangıcının mesafe olarak değeridir.

$$\beta_M = \frac{4Q_{d,total LB} (D_M - Y)}{2\pi K_M D_M^2} \quad (7.4)$$

$$\beta_M = \frac{4 \times 21.2(185 - 43)}{2\pi \times 0.249 \times 185^2} = 0.23$$

5) Efektif sönüme göre ASCE 17.5-1 tablosundan (Çizelge 7.2) sönüm katsayısı (B_M) iteratif olarak seçilir.

Çizelge 7.2 : Sönüm katsayısı.

β_M ya da β_D (%)	B_M ya da B_D
≤ 2	0.8
5	1
10	1.2
20	1.5
30	1.7
40	1.9
≥ 50	2

$\beta_M = \%23$ 'e karşılık gelen sönüm katsayısı $B_M = 1.56$ 'dır.

6) İterasyonun son adımında tasarım deplasmanı ile maksimum deplasmanın eşitliği kontrol edilir.

$$D_M = \frac{g S_{M_1} T_M}{4\pi^2 B_M} \quad (7.5)$$

$$D_M = \frac{9810 \times 0.53 \times 2.2}{4\pi^2 1.56} = 185 \text{ mm}$$

Bu işlem adımları sonucunda tasarım deplasmanı ile maksimum deplasmanın eşit olduğu görülerek yapılan tasarım boyutlarının uygun olduğu sonucuna varılmaktadır.

7.4 İzolasyon Sistemi Boyutlandırılması

Bölüm 7.3'te tasarım hesapları yapılan taban izolasyonu sistemi düşük sönümlü kauçuk ve UD olarak sönümleyici ayrı ayrı modellenmiştir.

7.4.1 LDR'nin boyutlandırılması

İhtiyaç duyulan efektif rijitlik değer 0.134 kN/mm olan 2 adet LDR'nin boyutları 7.6'ya göre iteratif olarak belirlenir. Kullanılan kauçuğun özellikleri Çizelge 7.3'te verilmiş olup Oh ve diğ. (2012)'nin çalışmalarından alınmıştır.

$$K_{req} = \frac{G\gamma A_{LDR}}{n_R t_R \gamma} = \frac{G A_{LDR}}{n_R t_R} \quad (7.6)$$

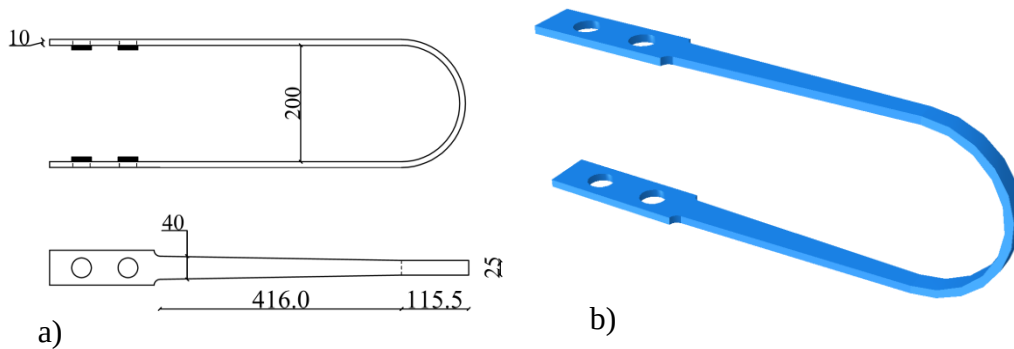
Çizelge 7.3 : LDR boyutları.

Kauçuk		Çelik		Dış Çap D _o (mm)	İç Çap D _i (mm)	Kesit Alanı A _{LDR} (mm ²)
Kalınlık t _R (mm)	Levha Sayısı n _R	İç Levha Kalınlığı t _{S,in} (mm)	Son levha Kalınlığı t _{S,end} (mm)			
4.2	25	2.3	22	200	100	23,560

LDR'nin histeretik modeli yalnızca efektif rijitliğe bağlı olarak lineer olarak kolayca modellenebilir. Tasarımı yapılan ULB için gerekli kauçuk rijitliği 0.67 kN/mm'dir.

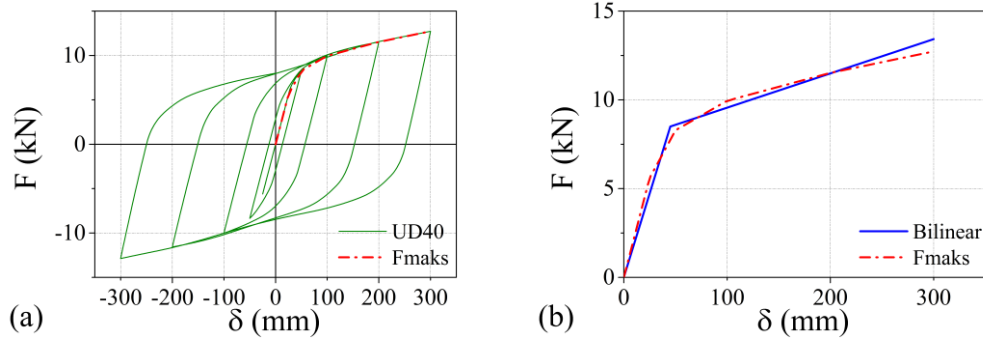
7.4.2 UD sönümleyicinin boyutlandırılması

UD sönümleyicinin boyutları gerekli yatay rijitliği sağlayacak şekilde makaledeki boyutlardan başlanarak iteratif olarak ABAQUS programı ile analiz edilmiştir. Yapılan analizler sonucunda UD sönümleyicinin boyutları t_d=10 mm, w₁=40 mm, w₂=25 mm, H_d=220 mm ve L_d=300 mm olarak elde edilmiştir (Şekil 7.4a).



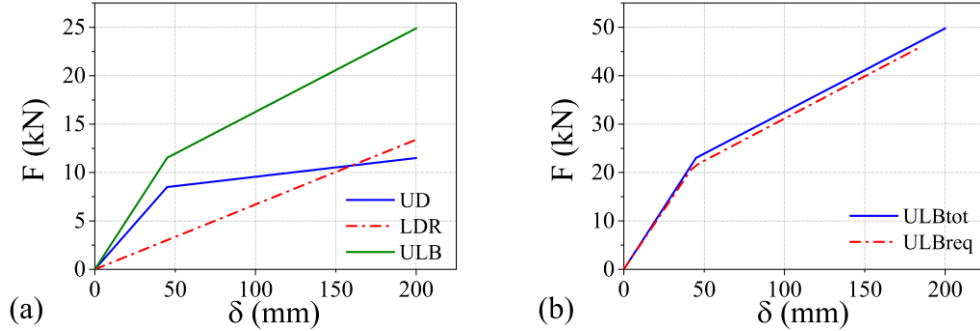
Şekil 7.4 : UD'nin: (a) Geometrisi. (b) Modeli.

Oluşturulan 4 adet UD sönümleyici için SN490B çelik malzeme kullanılmış C tipi yükleme uygulanarak (Şekil 7.5a) histeretik eğrisi elde edilmiştir.



Şekil 7.5 : UD'nin a) Histeretik eğrisi. b) Bilinear modeli.

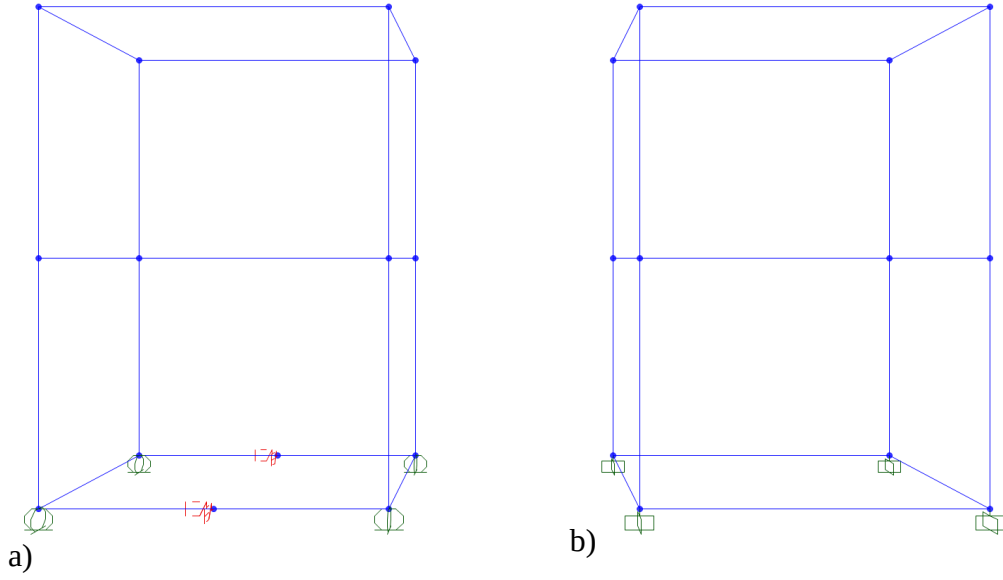
Histeretik eğriye ilişkin iki doğrulu (bilinear) model kırmızı çizgi ile Şekil 7.5b'de görülmektedir. İki doğrulu model oluşturulurken eğrideki maksimum kuvvet noktalarının yanı sıra histeretik alanın eşitliği de gözönüne alınmıştır. UD sönümleyicinin modeli ile düşük sönümlü kauçuk izolatörün modeli toplanarak ULB izolatörün iki doğrulu modeli elde edilmiştir (Şekil 7.6a). Bu işlemler sonucunda ihtiyaç duyulan taban izolasyon modeline çok yakın bir ULB modeli tasarlanmıştır (Şekil 7.6b).



Şekil 7.6 : a)ULB iki doğrulu modeli. b) tasarlanan (ULB_{tot}) ve ihtiyaç duyulan iki doğrulu model (ULB_{req}).

7.5 Zaman Tanım Alanında Çözüm Sonuçları

SAP2000 programında deney düzeneği modellenip hızlı doğrusal olmayan çözüm yapılmıştır. Yapı ankastre mesnetli ve izolasyonlu olmak üzere iki farklı durumda modellenmiş, dört farklı deprem ivmesi kullanılmıştır (Şekil 7.7).



Şekil 7.7 : Sonlu elemanlar modeli: a) Taban izolasyonlu. b) Ankastre mesnetli.

7.5.1 Taban kesme kuvvetleri

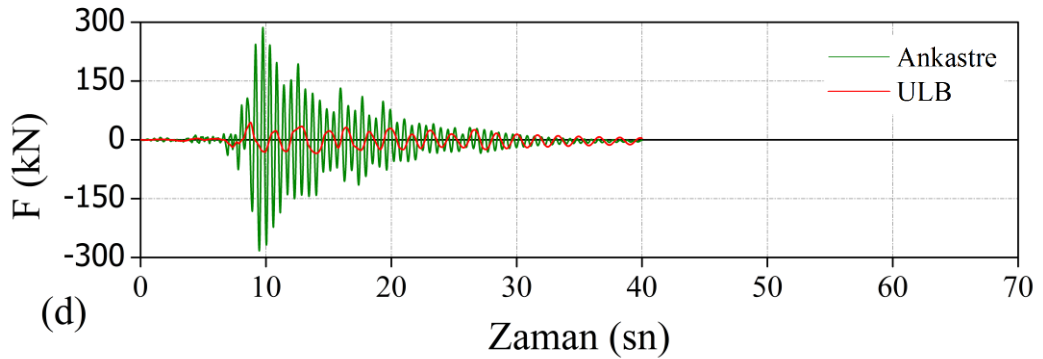
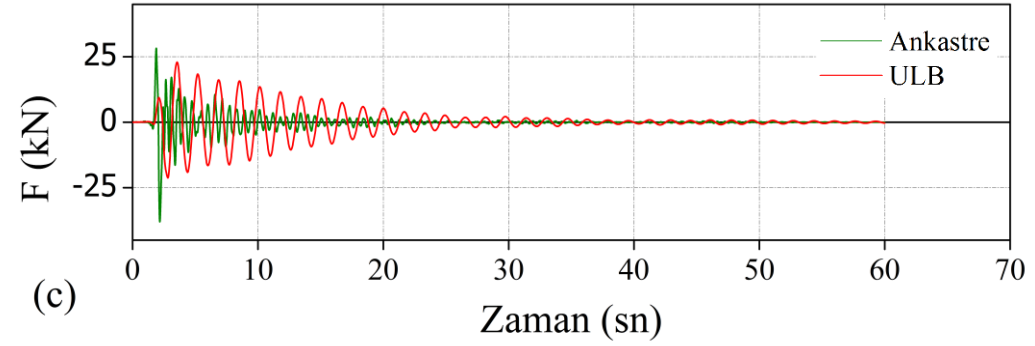
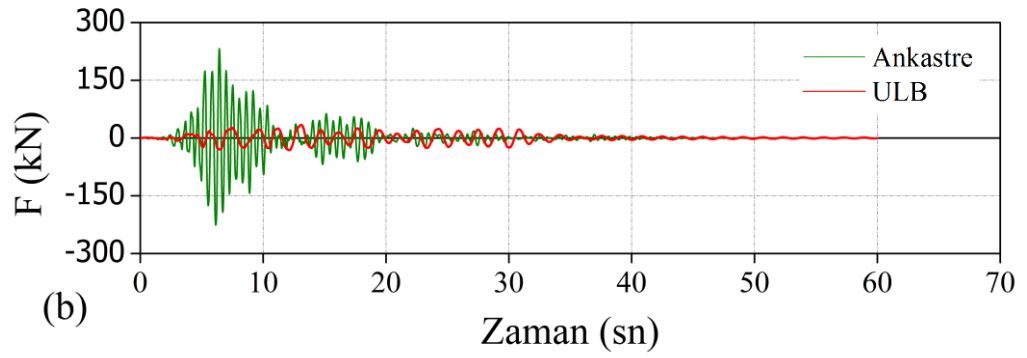
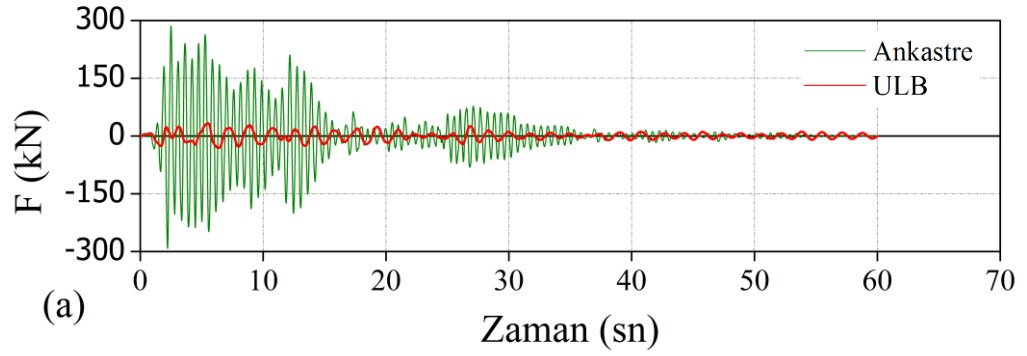
Yapılan sonlu elemanlar analizi sonucunda izolasyon sisteminin davranışının açıklanması için Çizelge 7.4’te maksimum taban kesme kuvvetleri gösterilmiştir.

Çizelge 7.4 : Maksimum taban kesme kuvvetleri

Deprem İvme Kaydı	Ankastre Mesnetli	Taban İzolasyonlu	Azalma
18 Mayıs 1940 El Centro	291.8 kN	33.3 kN	%89
17 Ocak 1994 Northridge	232.1 kN	33.8 kN	%85
31 Ekim 1935 Helena Montana	38.0 kN	22.9 kN	%40
17 Ağustos 1995 Kocaeli	286.3 kN	43.9 kN	%85

18 Mayıs 1940 El Centro depreminde ankastre mesnetli temel 291.8 kN taban kesme kuvvetine maruz kalırken ULB sistemi kullanılması durumunda 33.3 kN’luk bir taban kesme kuvveti almaktadır. 17 Ocak 1994 Northridge ve 17 Ağustos 1999 Kocaeli depreminde ise %85 oranında taban kesme kuvvetinde bir azalma sözkonusudur. Bu depremlere göre daha düşük yer ivmesi olan 31 Ekim 1935 Helena Montana depreminin etkisinde %40 oranında taban kesme kuvveti azalması gözlenmektedir. Bu depremde izolatör 43.5 mm deplasman yapmış ancak elastik sınırı olarak 45 mm’nin ötesine geçememiştir. Bu nedenle de doğrusal davranıp yapı sistemine sönüm katkısı olamamıştır. Bu depremin seçilme nedeni gerçekte bu tür durumların da olabileceğini göstermektir. Şekil 7.8’de ankastre ve ULB mesnetli yapıların zamanla değişen taban kesme kuvvetleri görülmektedir. ULB sistemlerin

tasarım depremleri etkisinde taban kesme kuvvetlerini ilk saniyelerden itibaren büyük oranda azalttığı açıkça gözlenmiştir.

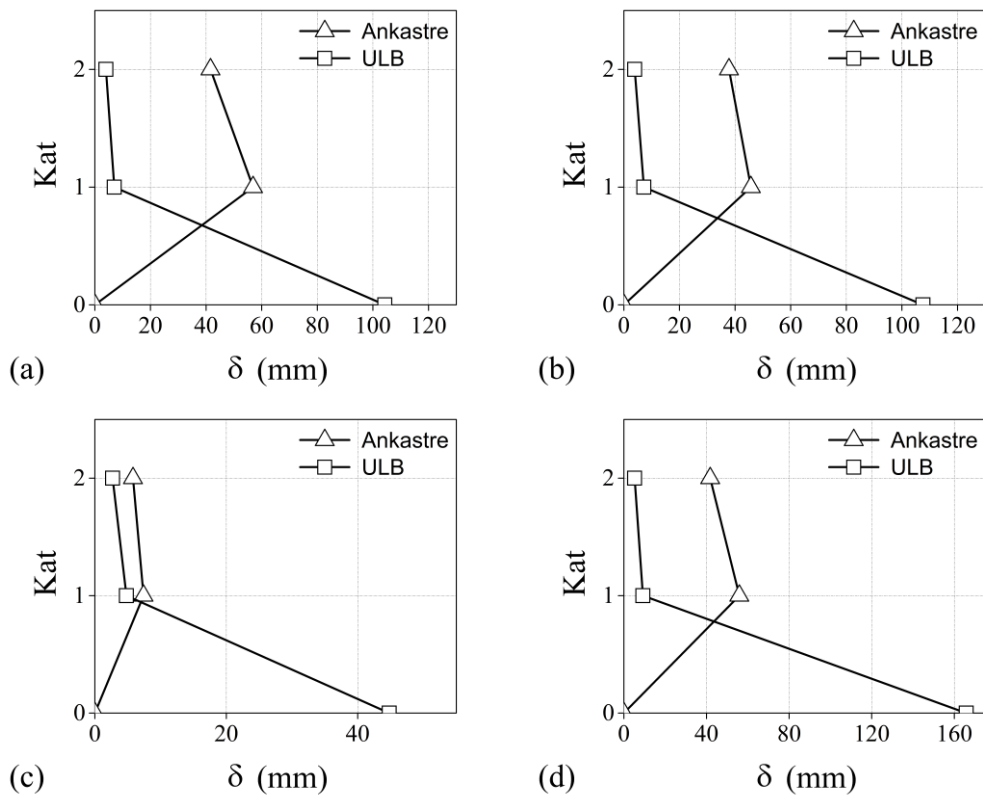


Şekil 7.8 : Taban kesme kuvveti grafiği: a) 18 Mayıs 1940 El Centro. b) 17 Ocak 1994 Northridge. c) 31 Ekim 1935 Helena Montana. d) 17 Ağustos 1999 Kocaeli.

7.5.2 Kat ötelemeleri ve oranları

İzolasyon sisteminin davranışı hakkında fikir yürütmek için ihtiyaç duyulan diğer bir parametre de kat ötelemeleri ve oranlarıdır.

Şekil 7.9’da maksimum kat ötelemeleri görülmektedir. Buna göre 18 Mayıs 1940 El Centro ve 17 Ocak 1994 Northridge depreminde 2. kat ötelemeleri ve oranları %90 oranında azalırken, 31 Ekim 1935 Helena Montana ve 17 Ağustos 1999 Kocaeli depremlerinde sırasıyla %53, %88 oranlarında azalma görülmektedir. Böylece kullanılan izolasyon sistemi sayesinde gerçekleşecek plastik deformasyonlar büyük ölçüde azalmaktadır.

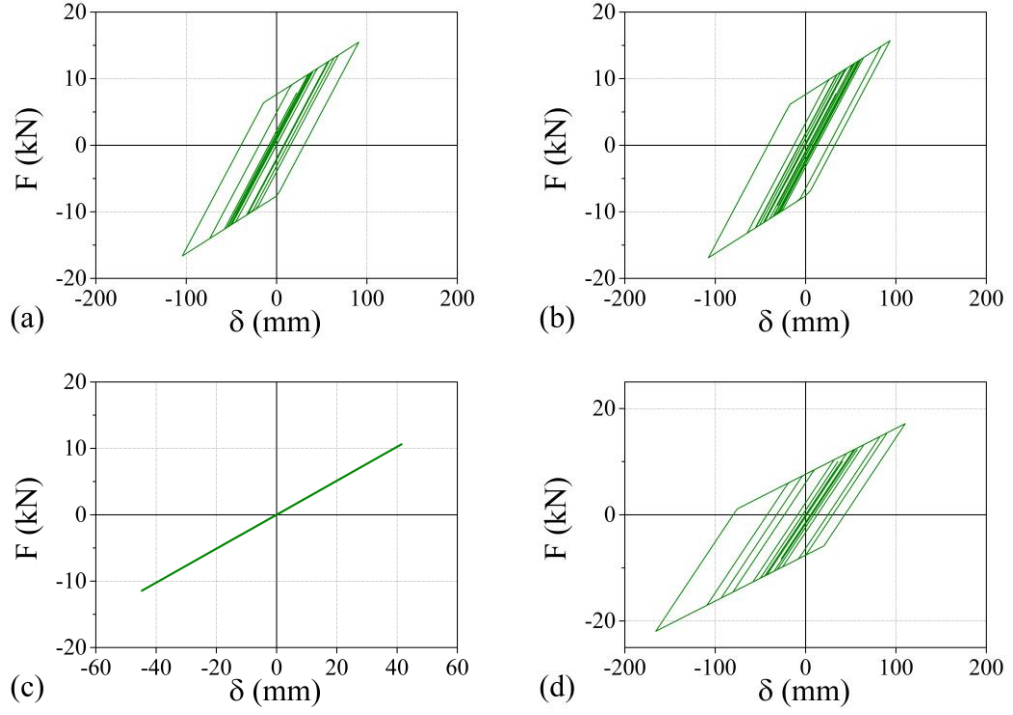


Şekil 7.9 : Maksimum kat ötelemeleri: a) 18 Mayıs 1940 El Centro. b) 17 Ocak 1994 Northridge. c) 31 Ekim 1935 Helena Montana. d) 17 Ağustos 1999 Kocaeli.

7.5.3 ULB histeresisleri

Şekil 7.10’da ULB’lere ilişkin histeretik eğriler görülmektedir. Bu histeretik eğriler incelendiğinde 45mm’den daha fazla deplasman yapılan depremlerde enerji sönümleniminin gerçekleştiği 31 Ekim 1935 Helena Montana deprem kaydı altında ise

yapı periyodunun uzaması nedeni ile maksimum kesme kuvvetinin azaldığı söylenebilir.



Şekil 7.10 : ULB histeretik eğrileri: a) 18 Mayıs 1940 El Centro. b) 17 Ocak 1994 Northridge. c) 31 Ekim 1935 Helena Montana. d) 17 Ağustos 1999 Kocaeli.

8. SONUÇLAR

8.1 Genel Sonuçlar

Bu çalışmanın ana amacı sismik izolasyon ve sönümleyici sistemlerin genel olarak incelenmesi ve mevcut koşullarda Türkiye’de üretilebilirlik kriteri baz alınarak en uygun olan düşük sönümlü kauçuk mesnet ve U şekilli çelik izolatörün (UD) birlikte kullanım olanaklarının araştırılmasıdır. Bu hedefe yönelik olarak özellikle Japonya’da üretilen ve yaygın uygulama olanağı bulunan UD’nin histeretik davranışının ve dolayısıyla performansının iyileştirilmesi için alternatif UD tasarımları geliştirilmiş, seçilen yükleme protokolleri ve geometriler altında her bir UD’nin histeretik eğrileri elde edilerek davranışsal özellikleri (maksimum dayanım, süneklik, sönüm oranı, tüketilen enerji) karşılaştırılmıştır. Doğrusal olmayan histeretik eğriye sahip olan UD’nin sonlu elemanlar modeli kurulup histeretik davranışı elde edilmiş ve yapı tabanında davranışı seçilen dört adet gerçek deprem verileri altında incelenmiştir. Buna göre aşağıda maddeler halinde verilen ana sonuçlara ulaşılmıştır.

- UD sönümleyicilerin histeretik davranışları yükleme yönünden, yükleme hızından ve yükleme geçmişinden çok az etkilenirler.
- UD sönümleyici taban izolasyon sistemleri ile birlikte ilave sönüm ihtiyacını karşılamak amacı ile kullanılabileceği gibi yapının çeşitli bölgelerinde farklı düzenlemelerle başlı başına sönümleyici olarak da kullanılabilir.
- Bu tez çalışmasında yapılan sonlu elemanlar modeli sonuçlarında göre efektif sönüm oranları maksimum deplasmanda $\xi_{eff}=0.50$ ’nin üzerinde çıkmaktadır.
- UD sönümleyicilerin önemli bir üstünlüğü de kolayca üretilebilir ve uygulanabilir olmalarıdır. Maliyetlerinin düşük olması özellikle mevcut binaların tasarımında büyük önem taşımaktadır.
- Klasik UD sönümleyicilerin yanısıra bilindiği kadarıyla ilk kez bu çalışmada delikli olarak UDK ve bükümlü UDF olarak oluşturulan sönümleyicilerin

sonlu elemanlar modeli oluşturulmuştur. Eşdeğer kütleye sahip bu elemanlarda UDK'da genel olarak ilk efektif rijitlik değeri azalırken UDF sönümleyiciler aynı çevrim sayısında daha fazla enerji sönümlemişlerdir.

- UDF tipi sönümleyicilerde plastik şekildeğiştirmelerin başlıklardan uzaklaştığı daha çok eğimli bölüme yakın tarafta yoğunlaştığı görülmektedir. Bunun nedeni, üst ve alt kolların bükülmesiyle deformasyonların büküm noktalarından sonraki bölgelerde yoğunlaşmasıdır.
- Değişik delik çaplı sönümleyicilerde (UDK1, UDK5) plastik şekildeğiştirmeler en zayıf kesitte yoğunlaşmakta ve sönümleyicinin davranışını bu bölgenin kontrol etmesine neden olmaktadır. Sonuç olarak, bu boyutlardaki sönümleyiciler için delik yarıçaplarını 10mm ($R/t=0.28$) civarında tutmak ve düzgün aralıklarla yayılmasını sağlamak, plastik şekildeğiştirmelerin sönümleyici boyunca daha uygun dağılmasına olanak sağlamaktadır.
- ULB (düşük sönümlü kauçuk izolatör ve U-şekilli çelik sönümleyici) taban izolasyon sistemi büyük deplasmanlar altında yapıya gelen taban kesme kuvvetlerini %85 civarında azaltmıştır. Bu nedenle, büyük depremlerde yapıya çok önemli seviyede katkı sağladığı gözlenmiştir.
- ULB taban izolasyon sistemi daha küçük deplasman istemine sahip depremlerde taban kesme kuvvetini %40 oranında azaltmış, ancak UD'de plastikleşme oluşmadığı için ilave bir sönümleme katkısı gözlenmemiştir. Rüzgâr gibi etkiler nedeni ile izolasyon sisteminin ilk rijitliğinin belli bir seviyeden aşağı düşürülemediği için böyle bir sonucun ortaya çıkması beklenmiştir.

Bu çıkarımlara ek olarak UD sönümleyiciler, oluşturulan sonlu elemanlar modeli ile boyutları değiştirilerek istenen mekanik özelliklerde üretilebilirler. Ayrıca yalnızca yeni yapılarda değil de değişik düzenlemelerle mevcut yapıların performanslarının artırılması amacı ile ya da tarihi yapıların güçlendirilmesi amacı ile de kullanılabilirler. Düşük maliyetli olması ve ileri teknoloji gerektirmemesi nedeni ile metalik sönümleyiciler sismik izolasyon ve enerji sönümleyici sistemlerinin yaygınlaşması için önemli bir fırsattır.

8.2 Gelecekte Yapılacak Çalışmalar İçin Öneriler

Bu çalışmada U-şekilli çelik sönümleyicilerin sonlu elemanlar modelinin başarı ile oluşturulduğu görülmektedir. Bu sönümleyicilerin, belirli kriterler gözönüne alınmak koşuluyla, (ilk rijitlik, sönüm oranı vb), paslanmaz çelik, düşük veya yüksek dayanımlı çelik, alüminyum gibi metallerle de çeşitli formlarda üretilmeleri mümkündür. Bununla birlikte U-şekilli sönümleyicilerin yalnızca tabanda değil katlar arasında kullanımı ya da ilave çapraz elemanlarla diagonal olarak kullanımı inceleme konusu olabilecektir.

KAYNAKLAR

Abaqus Manual 6.14. (2014). Dassault Systèmes Simulia Corp.

Aguirre, M, ve Roberto A. Sánchez. (1992). “Structural Seismic Damper.” *Journal of Structural Engineering* 118 (5): 1158–71. doi:10.1061/(ASCE)0733-9445(1992)118:5(1158).

Broggiato, Giovanni B., Francesca Campana, ve Luca Cortese. (2008). “The Chaboche nonlinear kinematic hardening model: Calibration methodology and validation.” *Meccanica* 43 (2): 115–24. doi:10.1007/s11012-008-9115-9.

Constantinou, Michael C., A.S. Whittaker, Y. Kalpakidis, ve D.M. Fenz. (2007). *Performance of Seismic Isolation Hardware under Service and Seismic Loading. MCEER.*

Deng, Kailai, Peng Pan, Yukun Su, ve Yantao Xue. (2015). “Shape optimization of U-shaped damper for improving its bi-directional performance under cyclic loading.” *Engineering Structures* 93 (2015). Elsevier Ltd: 27–35. doi:10.1016/j.engstruct.2015.03.006.

Deng, Kailai, Peng Pan, ve Chaoyi Wang. (2013). “Development of crawler steel damper for bridges.” *Journal of Constructional Steel Research* 85. Elsevier Ltd: 140–50. doi:10.1016/j.jcsr.2013.03.009.

Ene, D., Y. Jiao, S. Kishiki, S. Yamada, Y. Konishi, N. Kawamura, ve Y. Haoshi. (2014). “Hysteretic Behaviour and Plastic Deformation Capacity of U-Shaped steel dampers under 2d random loading histories.” İçinde *Tenth U.S. National Conference on Earthquake Engineering*. Alaska.

Ene, D., S. Kishiki, S. Yamada, Y. Konishi, ve N. Kawamura. (2012). “Experimental Study on U-dampers for Base-isolated Structures under 2D Random Loading Histories.” İçinde *International Symposium on Earthquake Engineering*.

Hodge, P. G. (1981). *Plastic analysis of structures*. Krieger Pub Co.

Frederick, C. O., ve P. J. Armstrong. (2007). “A Mathematical Representation Of The Multiaxial Bauschinger Effect.” *Materials at High Temperatures* 24 (1): 1–26. doi:10.3184/096034007X207589.

Jiao, Yu, S. Kishiki, D. Ene, S. Yamada, N. Kawamura, ve Y. Konishi. (2014). “Plastic Deformation Capacity and Hysteretic Behaviour of U-Shaped Steel

- Dampers for Seismic Isolated Buildings Under Dynamic Cyclic Loadings.” İçinde *Tenth U.S. National Conference on Earthquake Engineering*. Alaska.
- Jiao, Yu, Shoichi Kishiki, Satoshi Yamada, Diana Ene, Yoshinao Konishi, Yuuma Hoashi, ve Masao Terashima.** (2015). “Low cyclic fatigue and hysteretic behavior of U-shaped steel dampers for seismically isolated buildings under dynamic cyclic loadings.” *Earthquake Engineering & Structural Dynamics* 44 (10): 1523–38. doi:10.1002/eqe.2533.
- Jirásek, Milan, ve ZP Bazant.** (2002). *Inelastic analysis of structures*. Chichester, West Sussex, England: Wiley.
- Kato, Shiro, ve Yun-beom Kim.** (2006). “A finite element parametric study on the mechanical properties of J-shaped steel hysteresis devices.” *Journal of Constructional Steel Research* 62 (8): 802–11. doi:10.1016/j.jcsr.2005.11.014.
- Kato, Shiro, Yun-Beom Kim, Shoji Nakazawa, ve T Ohya.** (2005). “Simulation of the cyclic behavior of J-shaped steel hysteresis devices and study on the efficiency for reducing earthquake responses of space structures.” *Journal of Constructional Steel Research* 61 (10): 1457–73. doi:10.1016/j.jcsr.2005.03.006.
- Kawamura, N, Y Konishi, M Terashima, Y Jiao, D Ene, S. Kishiki, ve S. Yamada.** (2014). “Evaluation Methods of Residual Fatigue Life of U Shaped Steel Dampers after Extreme Earthquake Excitation.” İçinde *Tenth U.S. National Conference on Earthquake Engineering*. Alaska.
- Kelly, JM, RI Skinner, ve AJ Heine.** (1972). “Mechanisms of energy absorption in special devices for use in earthquake resistant structures.” İçinde *Bulletin of NZ Society for Earthquake*.
- Konishi, Y, N Kawamura, M Terashima, S. Kishiki, S. Yamada, I. Aiken, C. Black, K. Murakami, ve T. Someya.** (2012). “Evaluation of the fatigue life and behavior characteristics of U-shaped steel dampers after extreme earthquake loading.” İçinde *15th World Conference on Earthquake Engineering*. Lisbon, Portugal.
- Kumar, Manish.** (2012). *Analysis of Elastomeric Bearing in Compression*.
- Lemaître, J, ve Jean-Louis Chaboche.** (1990). *Mechanics Of Solid Materials*. Cambridge: Cambridge University Press.
- McVitty, William J, ve Michael C Constantinou.** (2015). *Property Modification Factors for Elastomeric Seismic Isolation Bearings*. Technical Report MCEER.
- Myers, Andrew T., Gregory G. Deierlein, ve Amit Kanvinde.** (2009). *Testing and probabilistic simulation of ductile fracture initiation in structural steel components and weldments*. Stanford University.

- Naeim, Farzad, ve James M. Kelly.** (1999). *Design of Seismic Isolated Structures: From Theory to Practice*. John Wiley & Sons.
- Nakashima, Masayoshi, ve P. Chusilp.** (2003). "A partial view of Japanese post-Kobe seismic design and construction practices." *Earthquake Engineering and Engineering Seismology* 4 (1): 3–13.
- Oh, Sang-Hoon, Sung-Hoon Song, Sang-Ho Lee, ve Hyung-Joon Kim.** (2012). "Seismic response of base isolating systems with U-shaped hysteretic dampers." *International Journal of Steel Structures* 12 (2): 285–98. doi:10.1007/s13296-012-2011-0.
- Oh, Sang-hoon, Sung-hoon Song, Sang-ho Lee, ve Hyung-joon Kim.** (2013). "Experimental study of seismic performance of base-isolated frames with U-shaped hysteretic energy-dissipating devices." *Engineering Structures* 56 (2013). Elsevier Ltd: 2014–27. doi:10.1016/j.engstruct.2013.08.011.
- Patil, S J, ve G R Reddy.** (2012). "State Of Art Review - Base Isolation Systems For Structures." *international Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering* 2 (7): 438–53.
- PEER.** (2015). "No Title." Erişim Kasım 15. <http://ngawest2.berkeley.edu/>.
- S. Kishiki , S. Yamada, D. Ene, ve M. Terashima Y. Konishi , N. Kawamura.** (2014). "Evaluation of Plastic Deformation Capacity of U Shaped Steel Dampers for Base-Isolated Structures Under 2D Horizontal Loading." İçinde *Tenth U.S. National Conference on Earthquake Engineering*. Alaska.
- Schulz, K J.** (1942). "On the state of stress in perforated strips and plates." *Proc. Kon. Nederl. Akad. Wetensch. Amsterdam* 45: 233.
- Skinner, R. I., J. M. Kelly, ve A. J. Heine.** (1974). "Hysteretic dampers for earthquake-resistant structures." *Earthquake Engineering & Structural Dynamics* 3 (3): 287–96. doi:10.1002/eqe.4290030307.
- Skinner, Robert Ivan, William H. Robinson, ve G. H. McVerry.** (1993). *An introduction to seismic isolation*. John Wiley & Sons.
- Soong, T. T., ve G. F. Dargush.** (1997). *Passive Energy Dissipation Systems in Structural Engineering*. Wiley.
- Spencer, Billie F.Jr., ve S. Nagarajaiah.** (2003). "State of the Art of Structural Control." *Journal of Structural Engineering* 129 (7): 845–56. doi:10.1061/(ASCE)0733-9445(2003)129:7(845).
- Stojadinovic, Bozidar.** (2011). *Technical Considerations for Seismic Isolation of Nuclear Facility Structures*. UC Berkeley.
- Suzuki, Kazuaki, ve Eiichiro Saeki.** (2005). *Development of U-shaped Steel*

Damper for Seismic Isolation System. Nippon Steel Technical Report.

Symans, M D, F A Charney, A S Whittaker, M C Constantinou, C A Kircher, M W Johnson, ve R. J. McNamara. (2008). “Energy Dissipation Systems for Seismic Applications: Current Practice and Recent Developments.” *Journal of Structural Engineering* 134 (1): 3–21. doi:10.1061/(ASCE)0733-9445(2008)134:1(3).

Tagawa, Hiroshi, ve Jinhe Gao. (2012). “Evaluation of vibration control system with U-dampers based on quasi-linear motion mechanism.” *Journal of Constructional Steel Research* 70 (2012). Elsevier Ltd: 213–25. doi:10.1016/j.jcsr.2011.09.004.

Terashima, Masao, Norihisa Kawamura, Yoshinao Konishi, Tomoyuki Someya, Shoichi Kishiki, ve Satoshi Yamada. (2014). “Contribution to Emergency Action and Post-Earthquake Evaluation of Seismically Isolated Hospital Building Experienced The Great East Japan Earthquake.” İçinde *Second European Conference On Earthquake Engineering and Seismology*. Istanbul.

USGS. (1991). “Global Seismicity and World Cities.” [http://store.usgs.gov/b2c_usgs/b2c/display/\(xcm=r3standardpitrex_prd&layout=6_1_61_50_2&uiarea=2&ctype=areaDetails&care=0000000009\)/.do](http://store.usgs.gov/b2c_usgs/b2c/display/(xcm=r3standardpitrex_prd&layout=6_1_61_50_2&uiarea=2&ctype=areaDetails&care=0000000009)/.do).

USGS. (2014). “Earthquakes with 1,000 or More Deaths 1900-2014.” http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/world/world_deaths.php.

Wada, Akira, ve Nobuyuki Mori. (2008). “Seismic Design for the Sustainable City: A Report on Japanese Practice.” *Structures Congress 2008*, 1–8. doi:10.1061/41016(314)123.

Warn, Gordon P., ve Keri L. Ryan. (2012). “A Review of Seismic Isolation for Buildings: Historical Development and Research Needs.” *Buildings* 2: 300–325. doi:10.3390/buildings2030300.

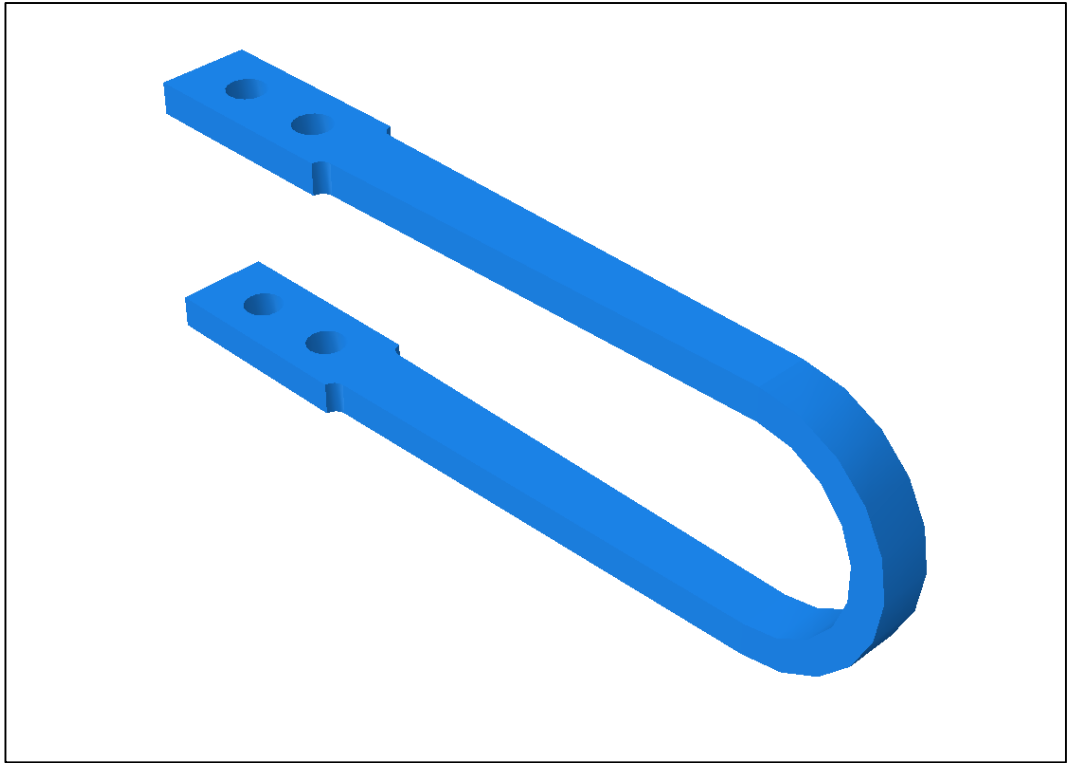
Wilson, Edward L. (1996). “Fast Nonlinear Analysis.” İçinde *Three-dimensional static and dynamic analysis of structures*. Berkeley, California 94704 USA: Computers and Structures, Inc.

Yenidogan, Cem, ve Mustafa Erdik. (2014). “The State of Art in Seismic Isolation and Energy Dissipation Applications in Turkey.” *Menshin* 83 (2): 49–59.

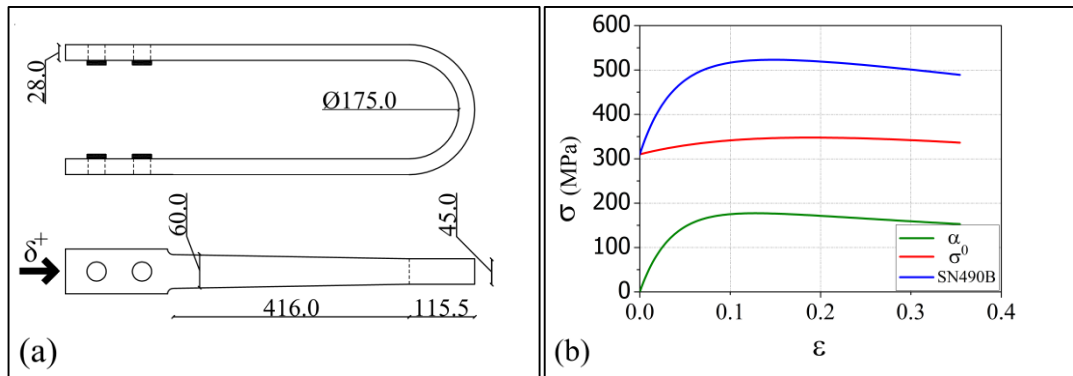
EK-A. Enerji Sönümleyicilerin Modellenmesi ve Davranış Özellikleri

A.1 UD40 Sönümleyici Yükleme 0°

A.1.1 Geometri ve malzeme

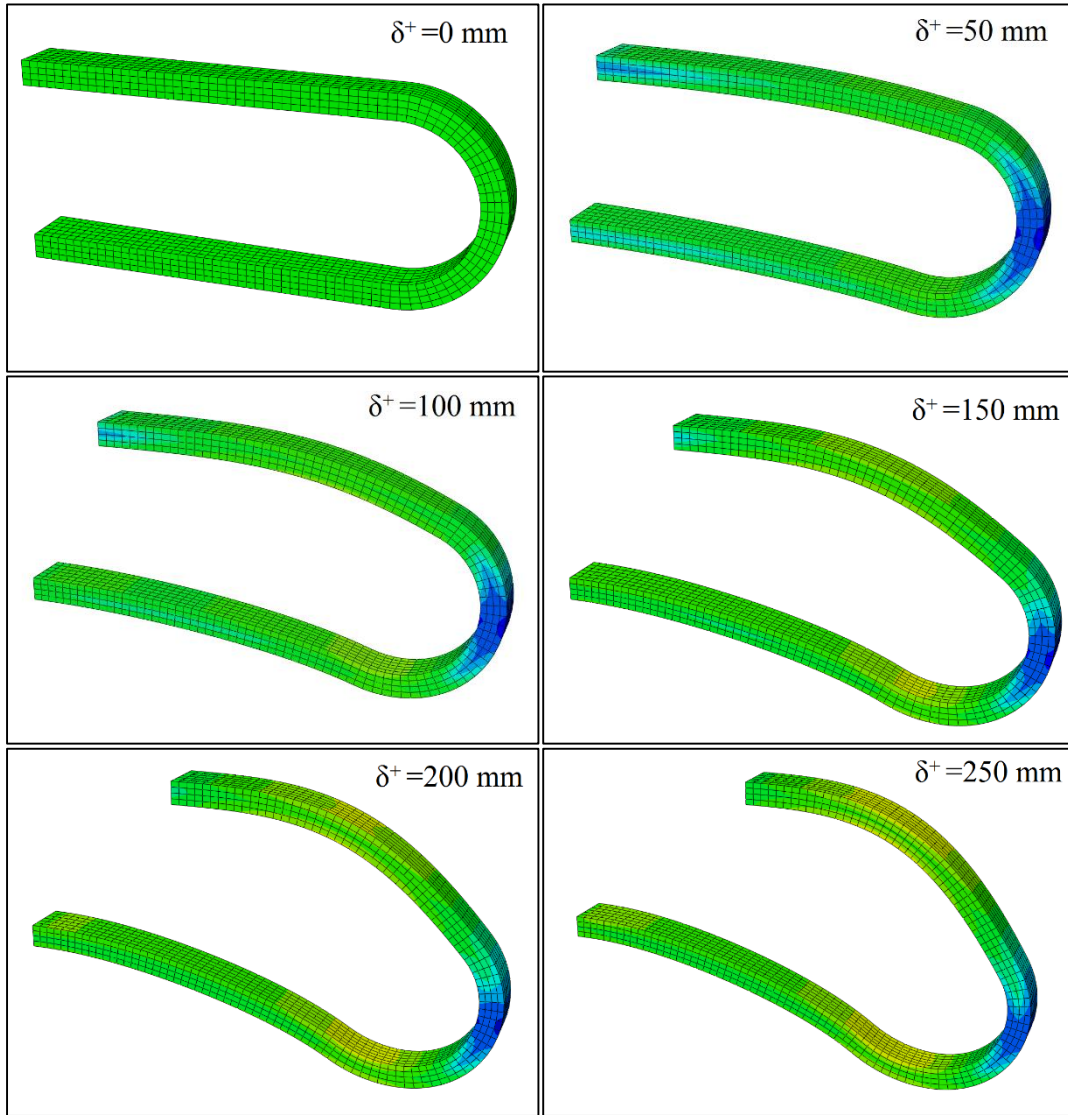


Şekil A.1 : Üç boyutlu model.

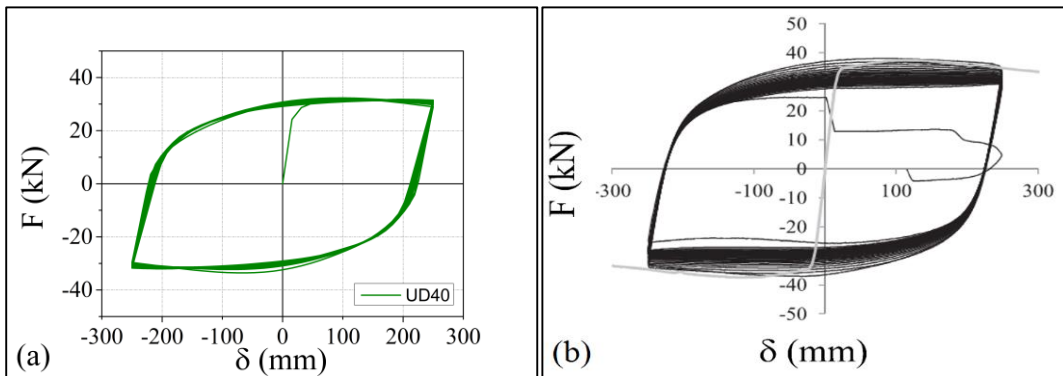


Şekil A.2 : (a) UD40 boyutları (mm) – Yükleme yönü. (b) Malzeme Özellikleri.

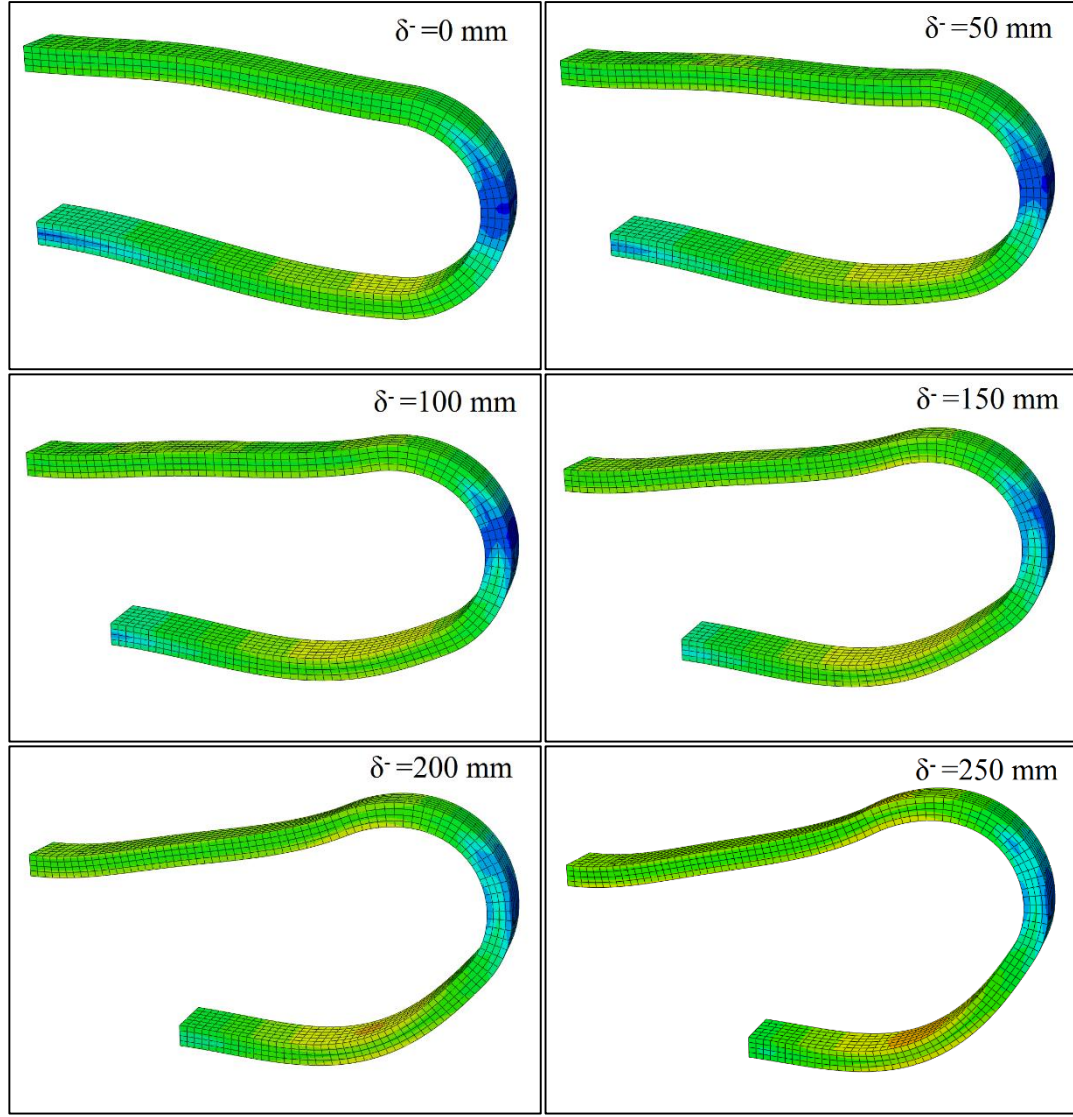
A.1.2 Sonlu elemanlar modeli



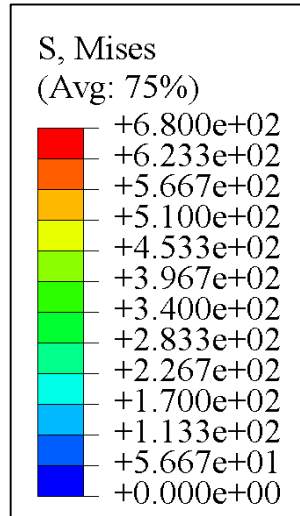
Şekil A.3 : İlk çevrime ilişkin gerilme ve yerdeğiştirme durumları.



Şekil A.4 : (a) Kuramsal. (b) Deneysel histeretik eğrileri.

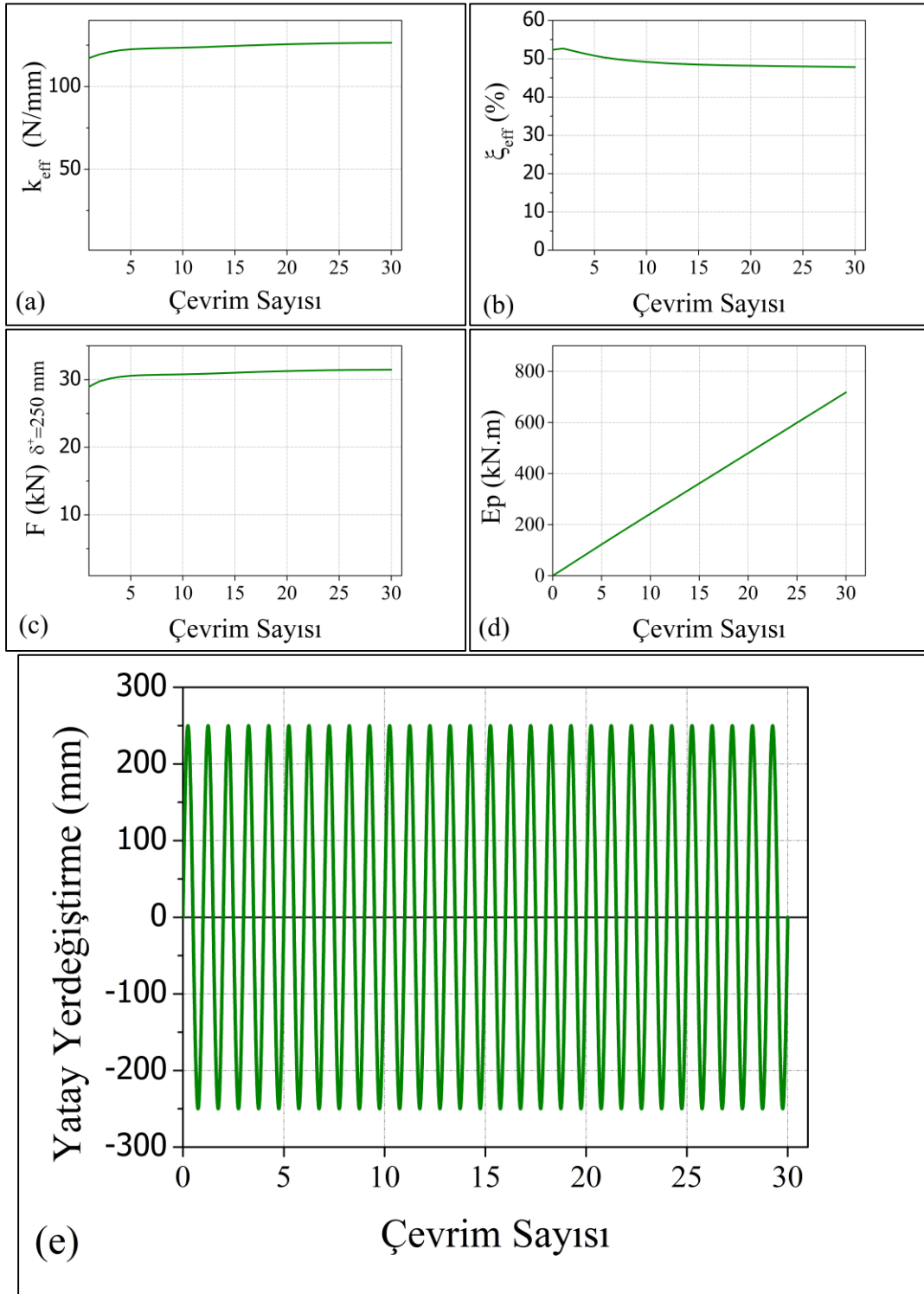


Şekil A.5 : İlk çevrime ilişkin gerilme ve yerdeğiştirme durumları.



Şekil A.6 : Gerçek gerilme değerleri (MPa).

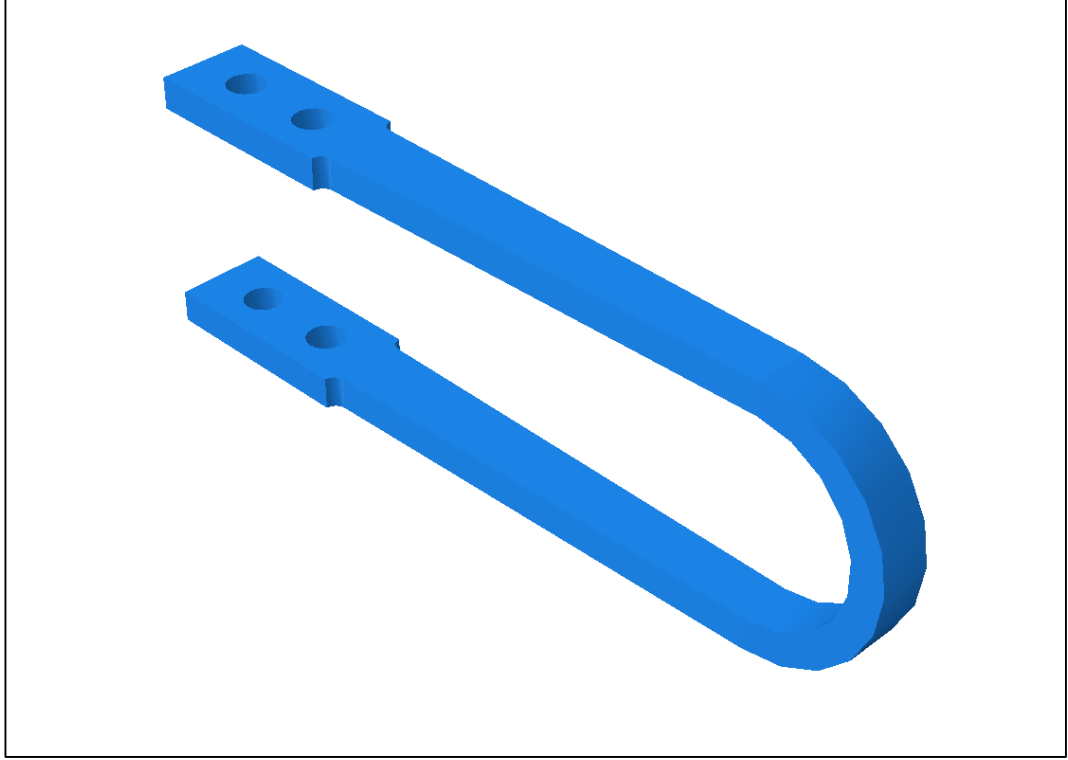
A.1.3 Sonlu Elemanlar Modeli Sonuçları



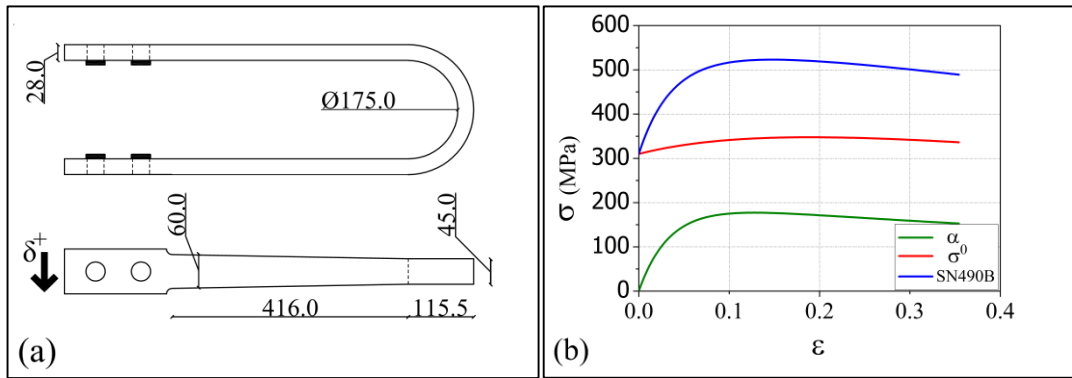
Şekil A.7 : a) Efektif rijitlik. b) Efektif sönüm. c) 250 mm'deki yatay kuvvet. d) Histeretik enerji. e) Yükleme grafiği.

A.2 UD40 Sönümleyici Yükleme 90°

A.2.1 Geometri ve malzeme

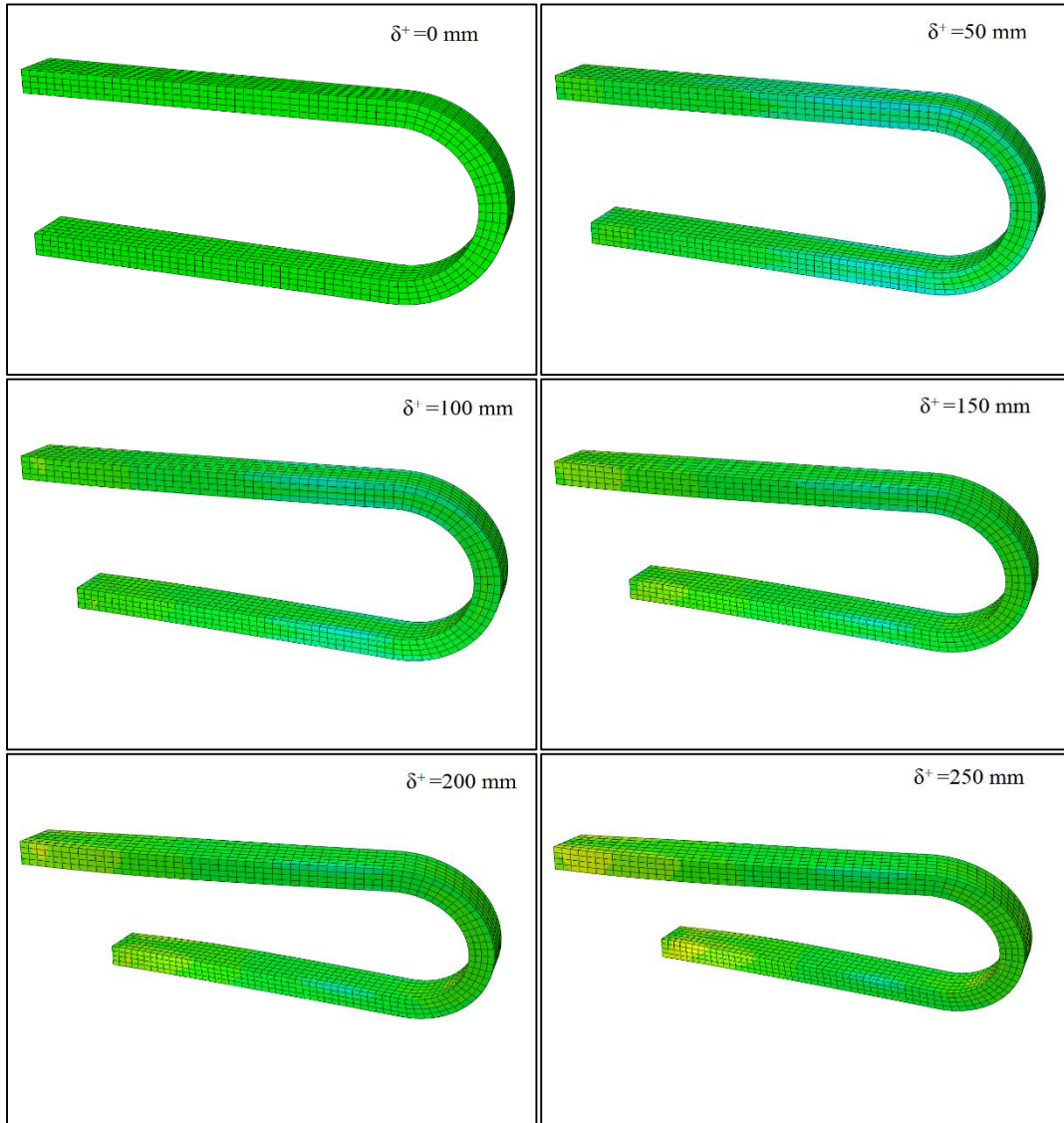


Şekil A.8 : Üç boyutlu model.

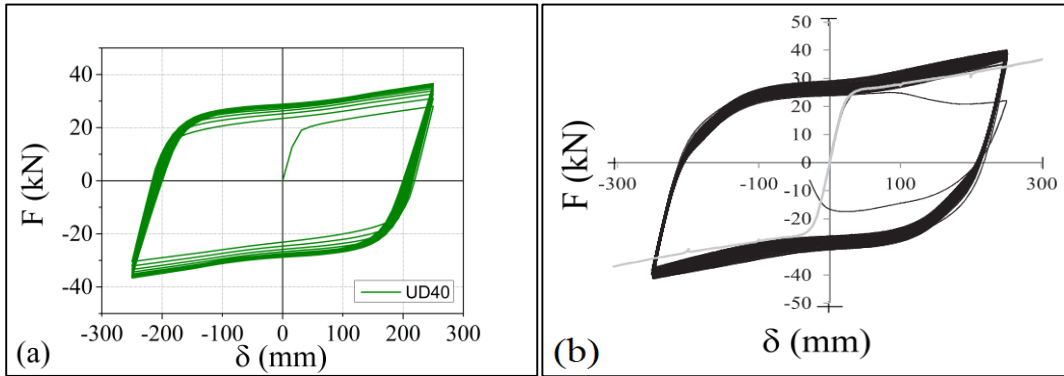


Şekil A.9 : (a) UD40 boyutları (mm) – Yükleme yönü. (b) Malzeme özellikleri.

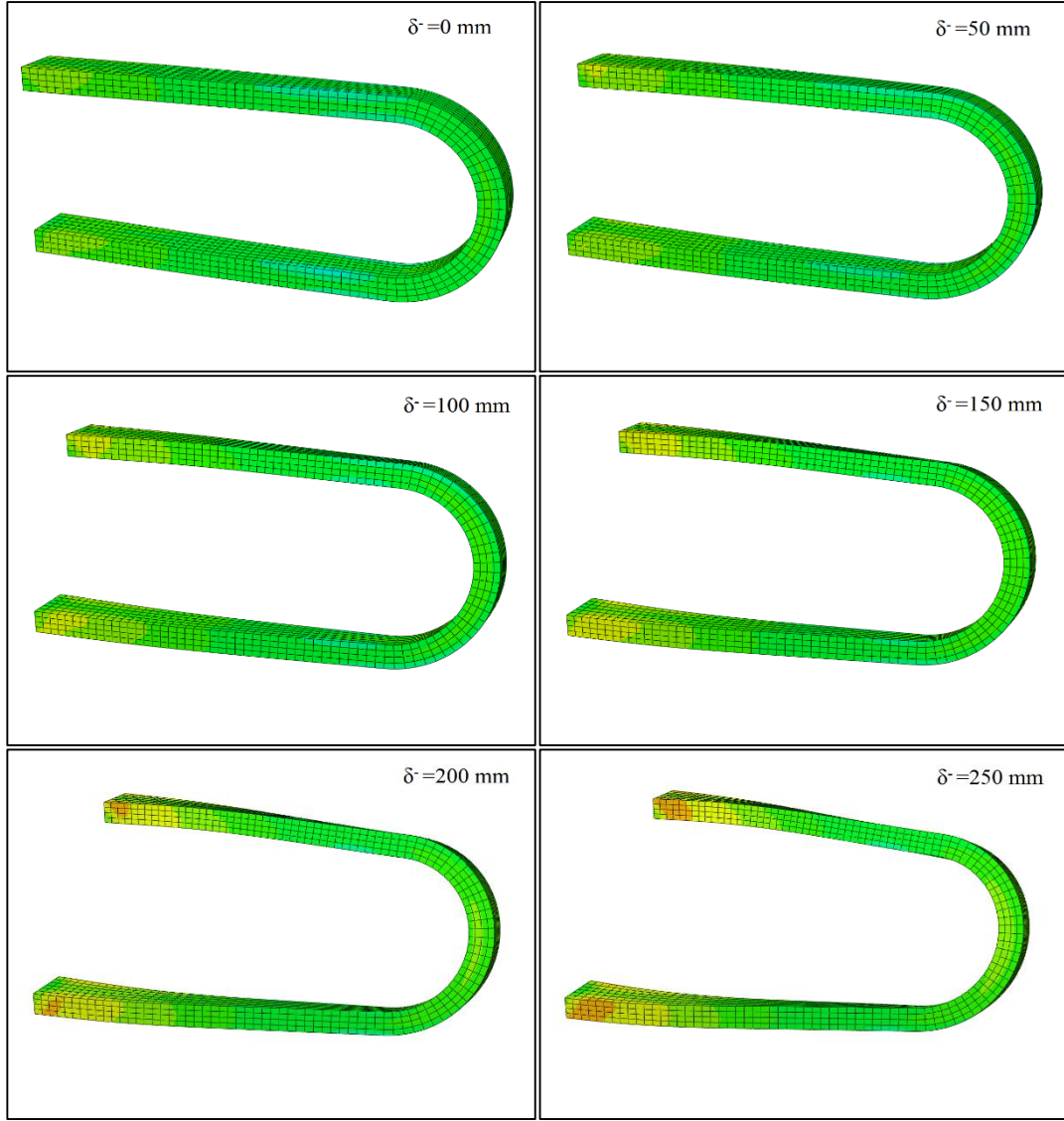
A.2.2 Sonlu elemanlar modeli



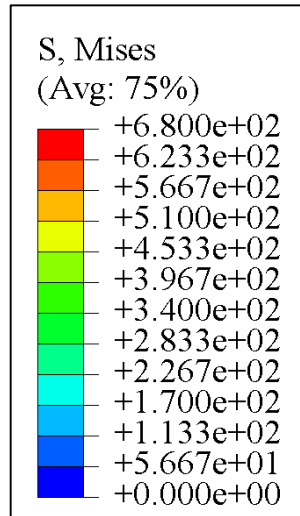
Şekil A.10 : İlk çevrime ilişkin gerilme ve yerdeğiştirme durumları.



Şekil A.11 : (a) Kuramsal. (b) Deneysel histeretik eğrileri.

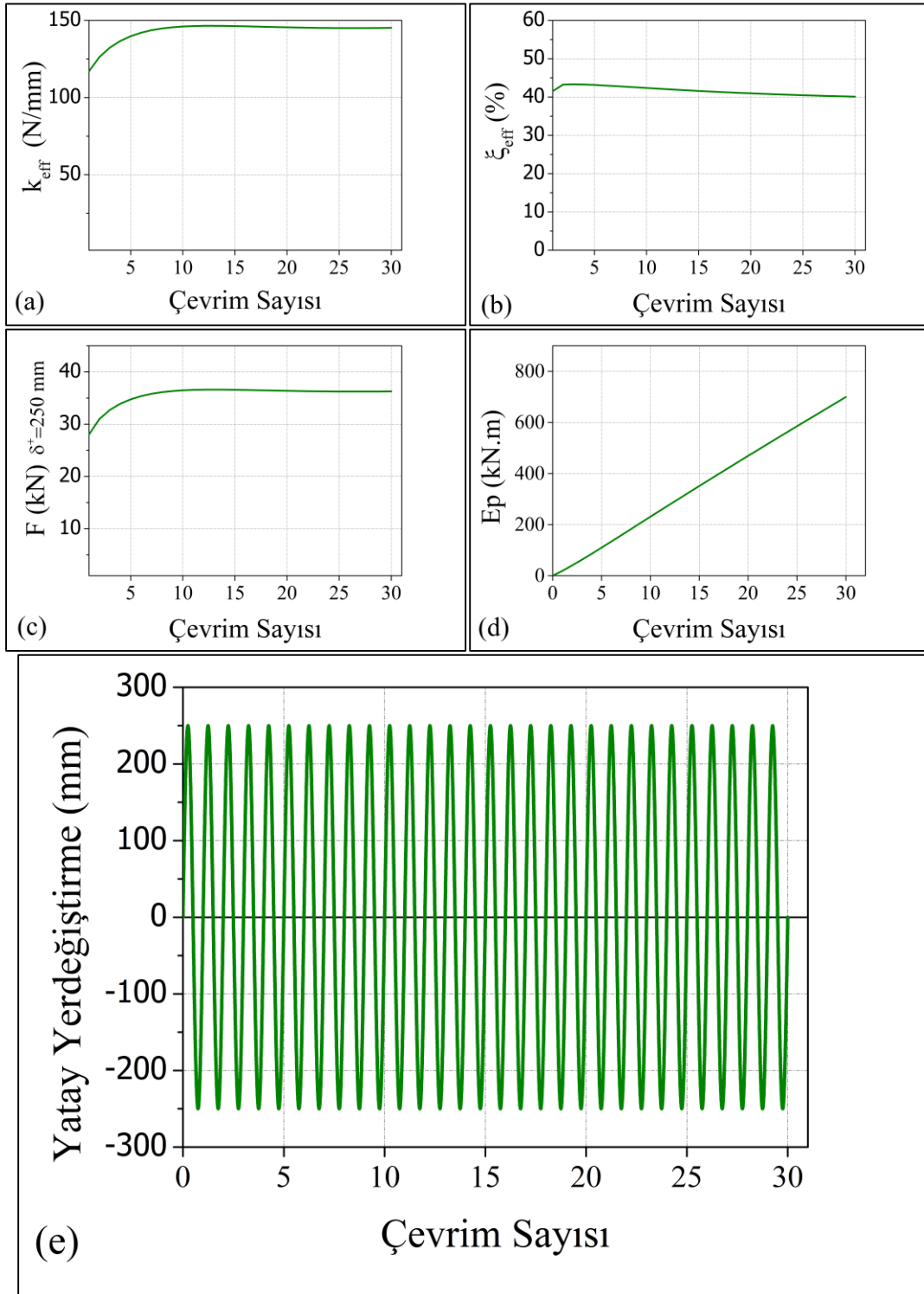


Şekil A.12 : İlk çevrime ilişkin gerilme ve yerdeğiştirme durumları.



Şekil A.13 : Gerçek gerilme değerleri (MPa).

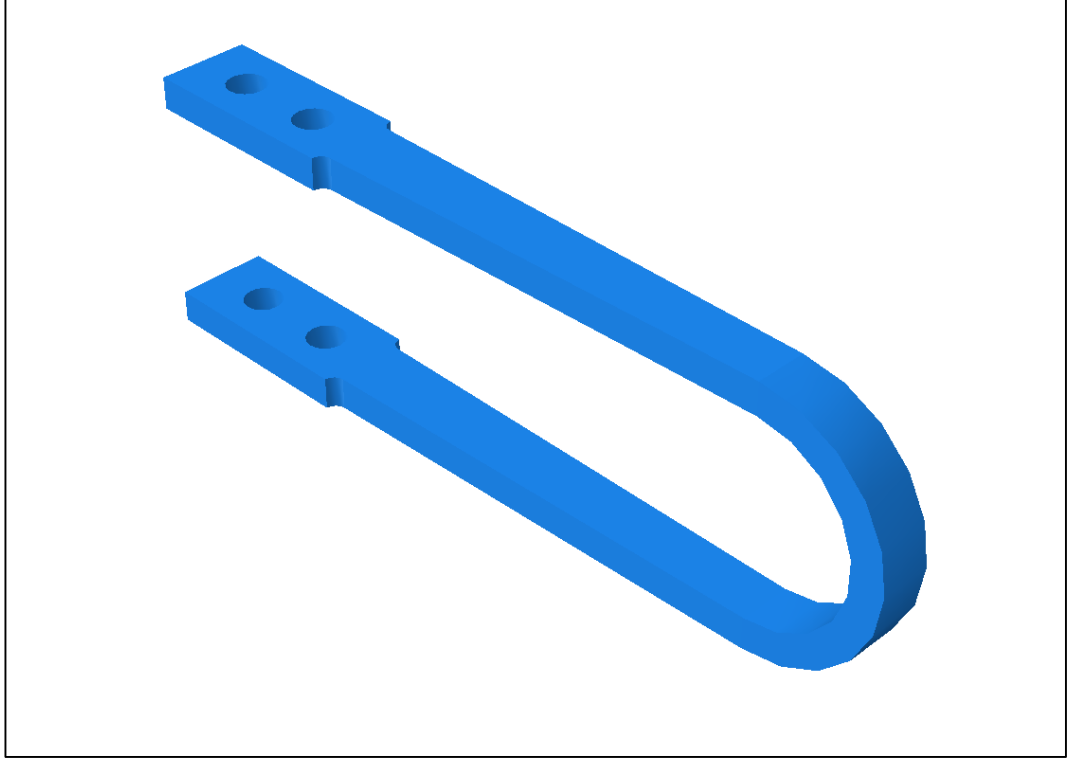
A.2.3 Sonlu elemanlar modeli sonuçları



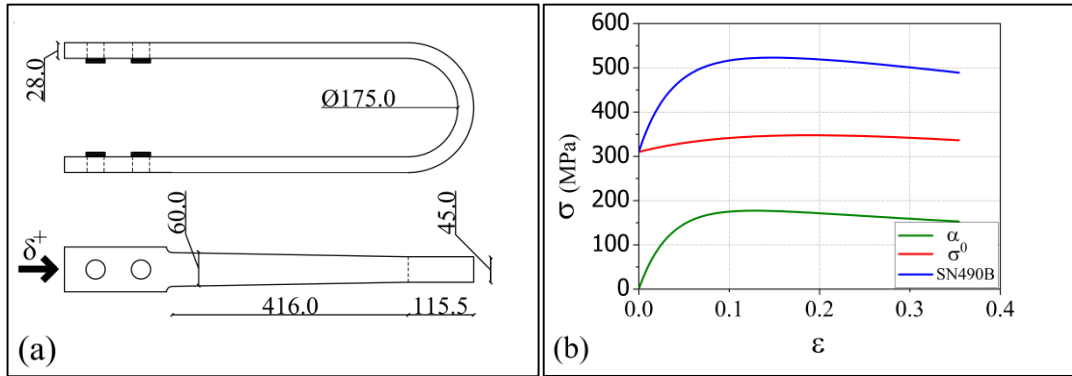
Şekil A.14 : a) Efektif rijitlik. b) Efektif sönüm. c) 250 mm’deki yatay kuvvet. d) histeretik enerji. e) Yükleme grafiği.

A.3 UD40 Sönümleyici Yükleme 0°

A.3.1 Geometri ve malzeme

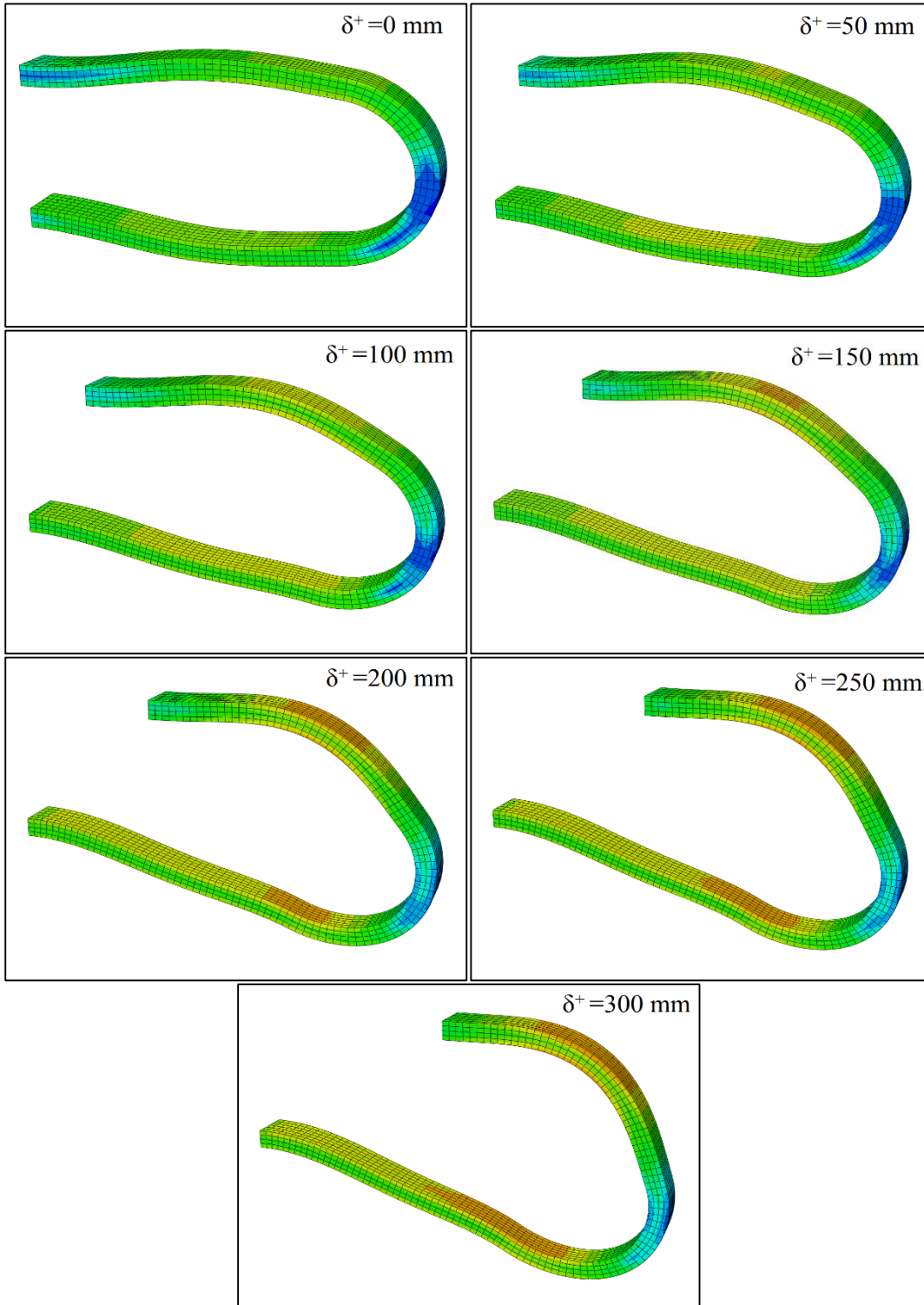


Şekil A.15 : Üç boyutlu model.

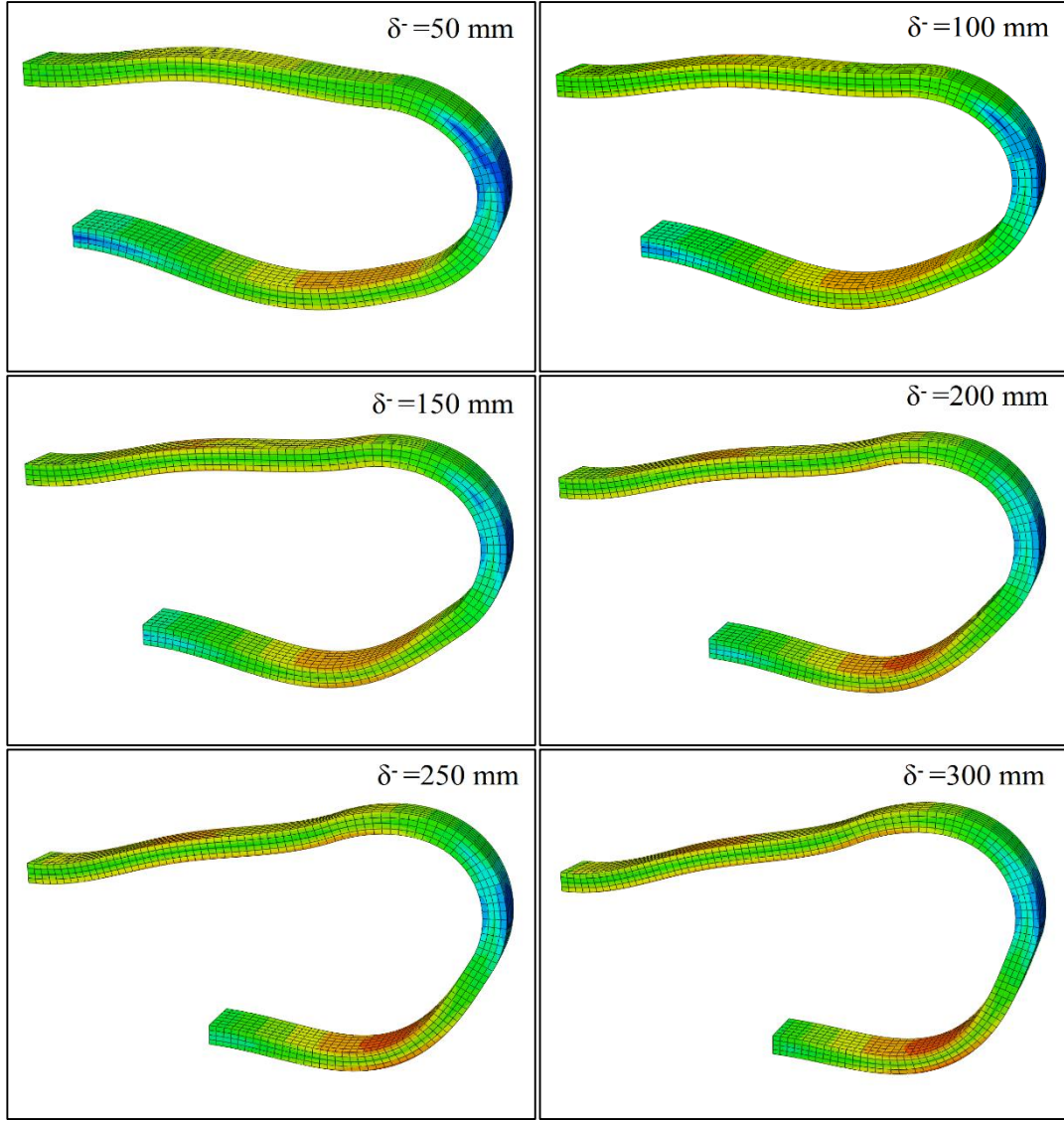


Şekil A.16 : (a) UD40 boyutları – Yükleme yönü (b) Malzeme özellikleri.

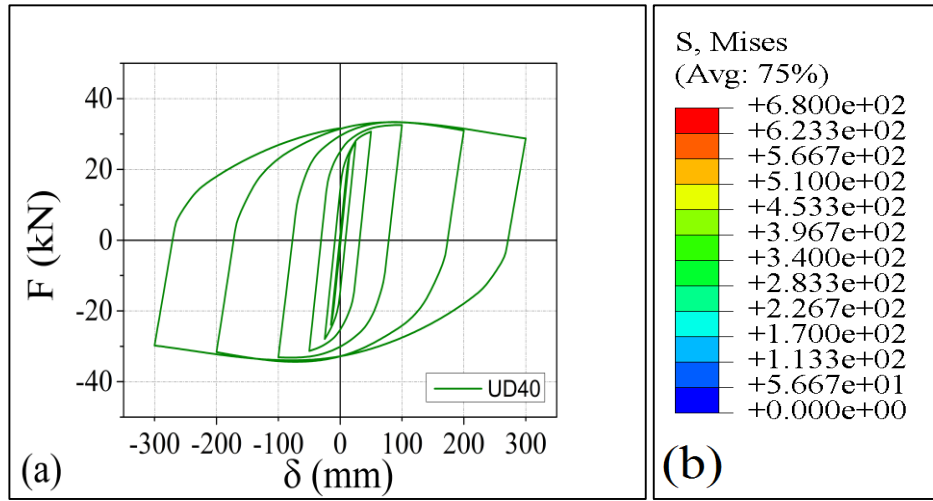
A.3.2 Sonlu elemanlar modeli



Şekil A.17 : Son çevrime ilişkin gerilme ve yerdeğiştirme durumları

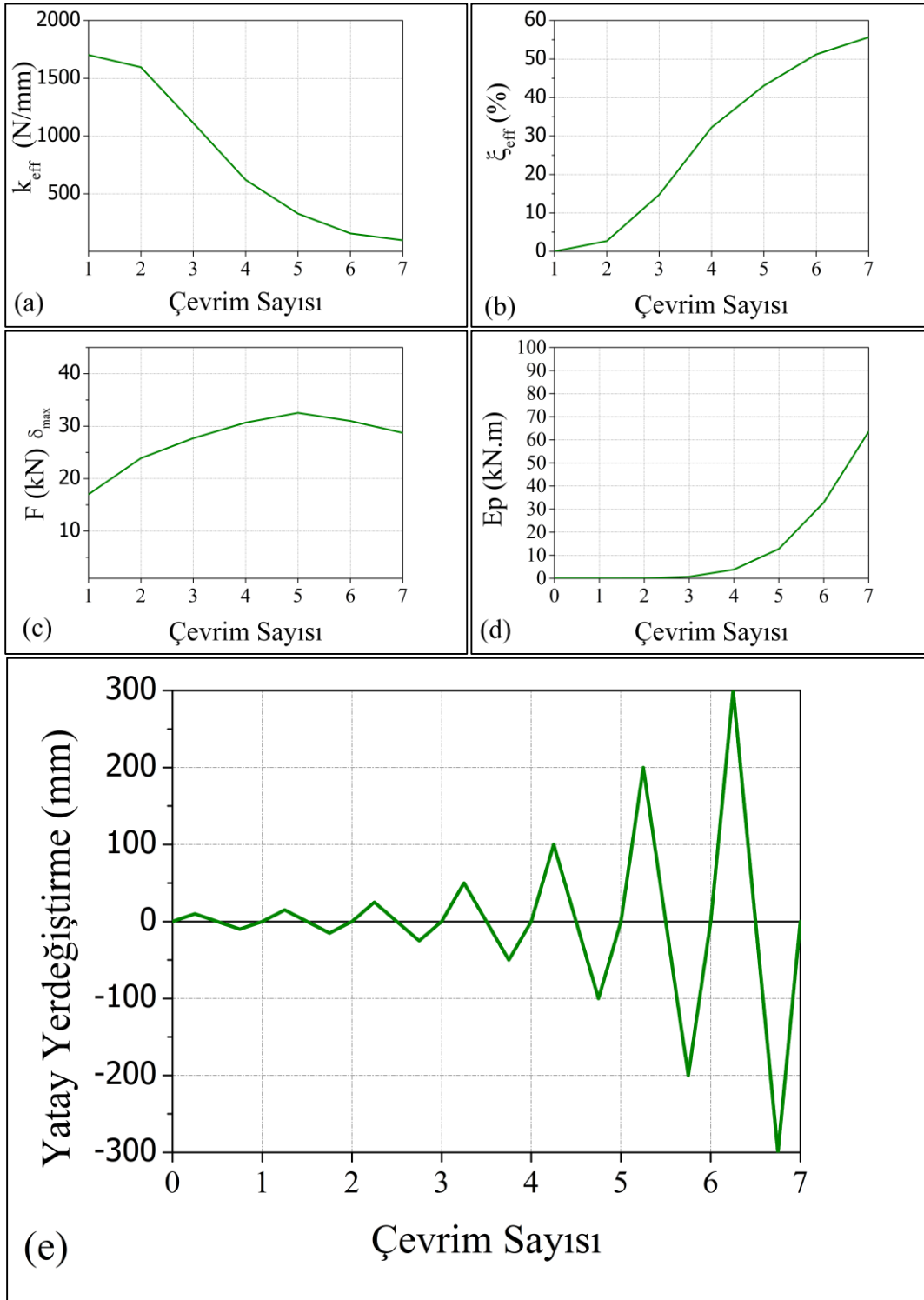


Şekil A.18 : Son çevrime ilişkin gerilme ve yerdeğiştirme durumları



Şekil A.19 : (a) Histeretik eğrisi (b) Gerçek gerilme değerleri (MPa)

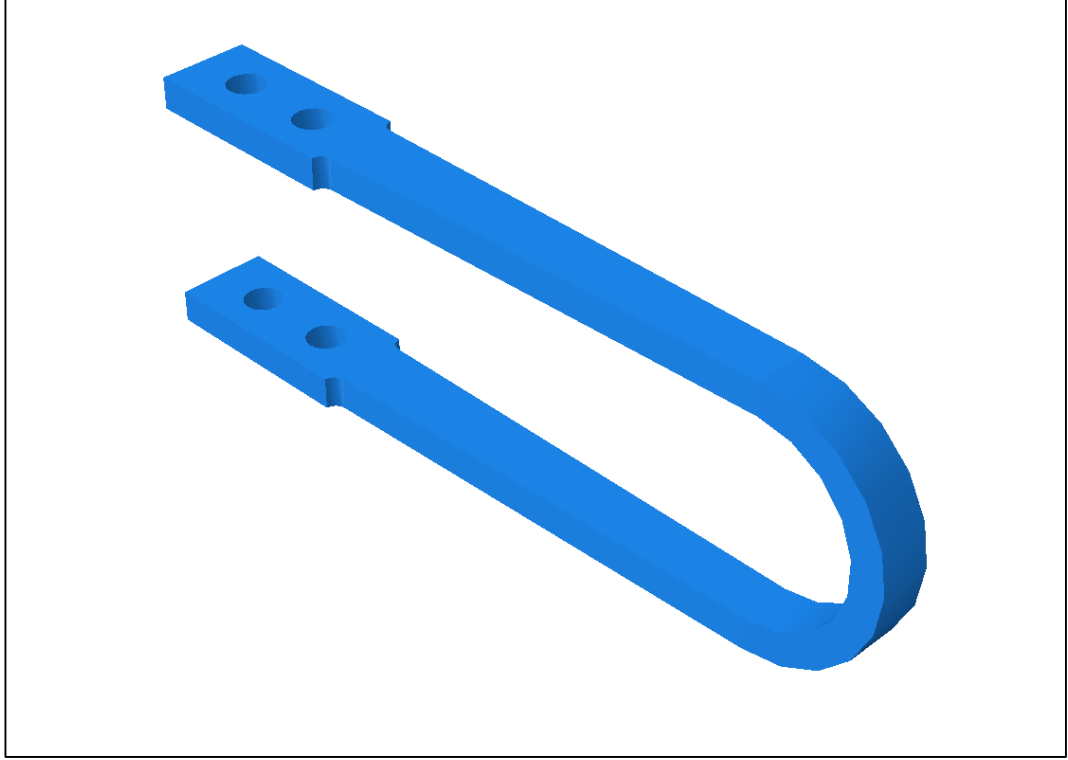
A.3.3 Sonlu elemanlar modeli sonuçları



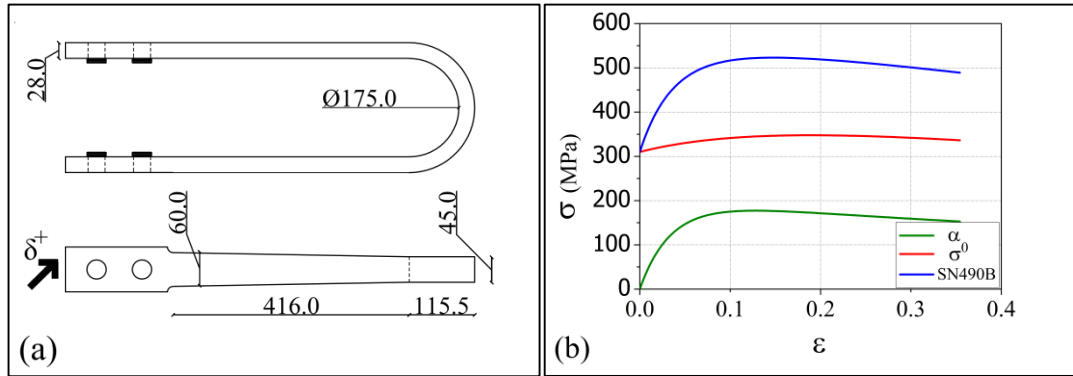
Şekil A.20 : a) Efektif rijitlik. b) Efektif sönüm. c) Maksimum deplasmandaki yatay kuvvet. d) Kümülatif histeretik enerji. e) Yükleme grafiği.

A.4 UD40 Sönümleyici Yükleme 45°

A.4.1 Geometri ve malzeme

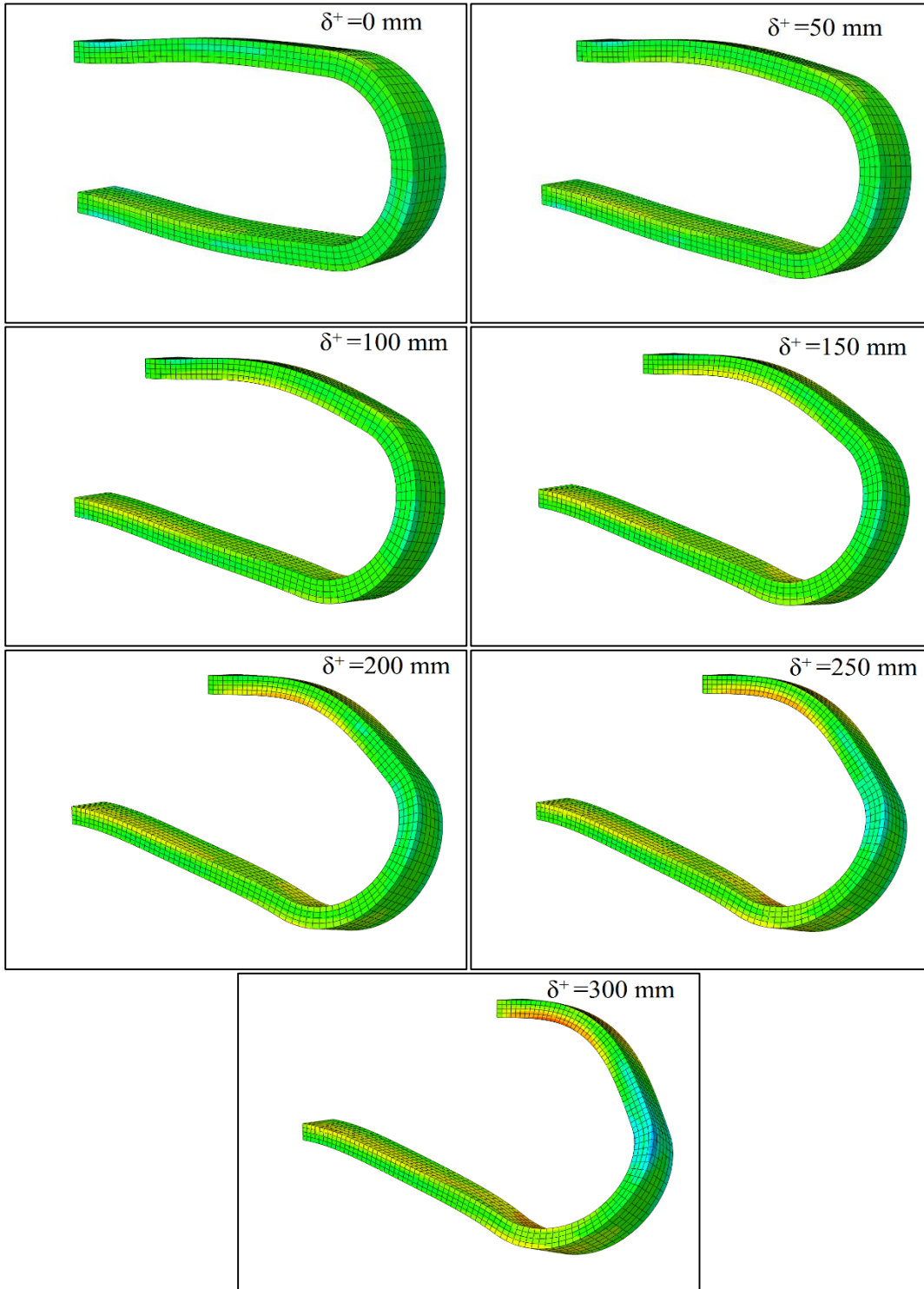


Şekil A.21 : Üç boyutlu model.

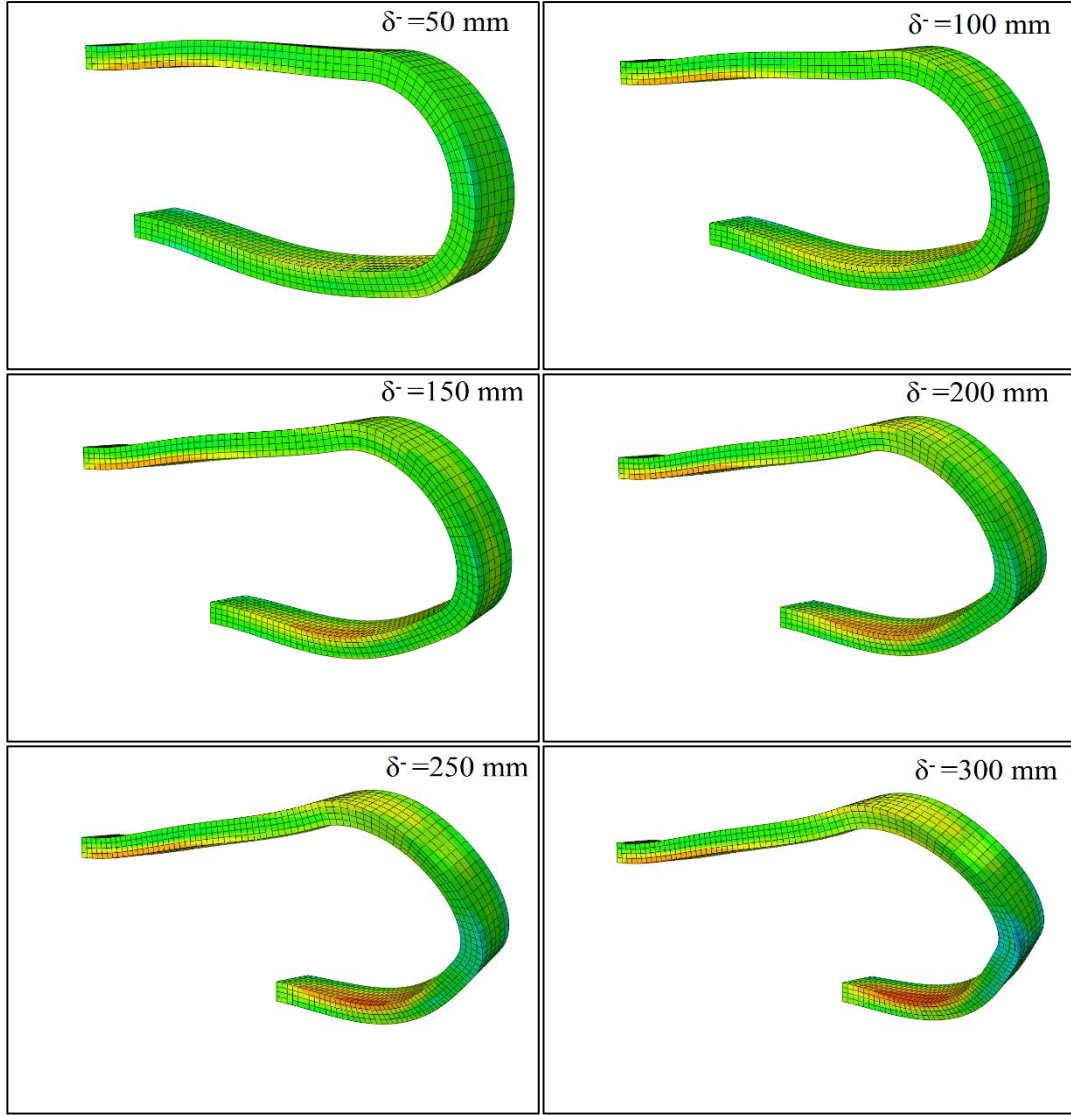


Şekil A.22 : (a) UD40 boyutları – Yükleme yönü. (b) Malzeme özellikleri.

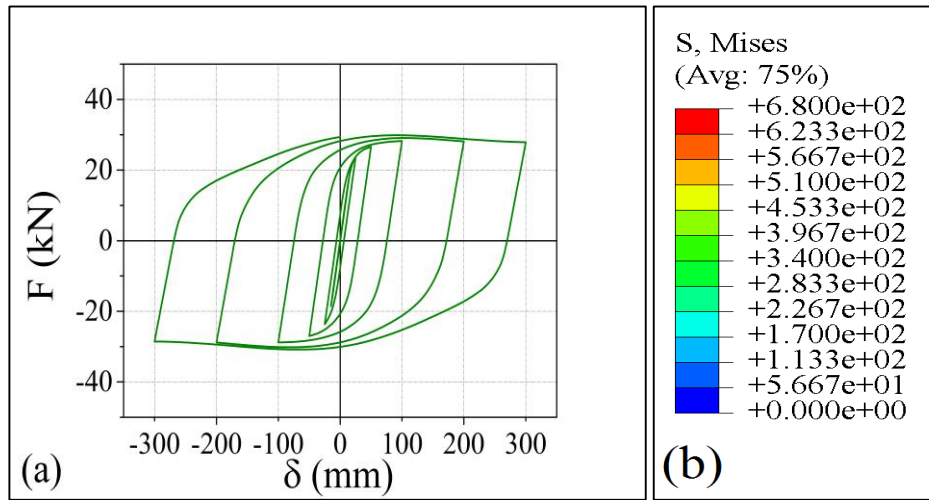
A.4.2 Sonlu elemanlar modeli



Şekil A.23 : Son çevrime ilişkin gerilme ve yerdeğiştirme durumları

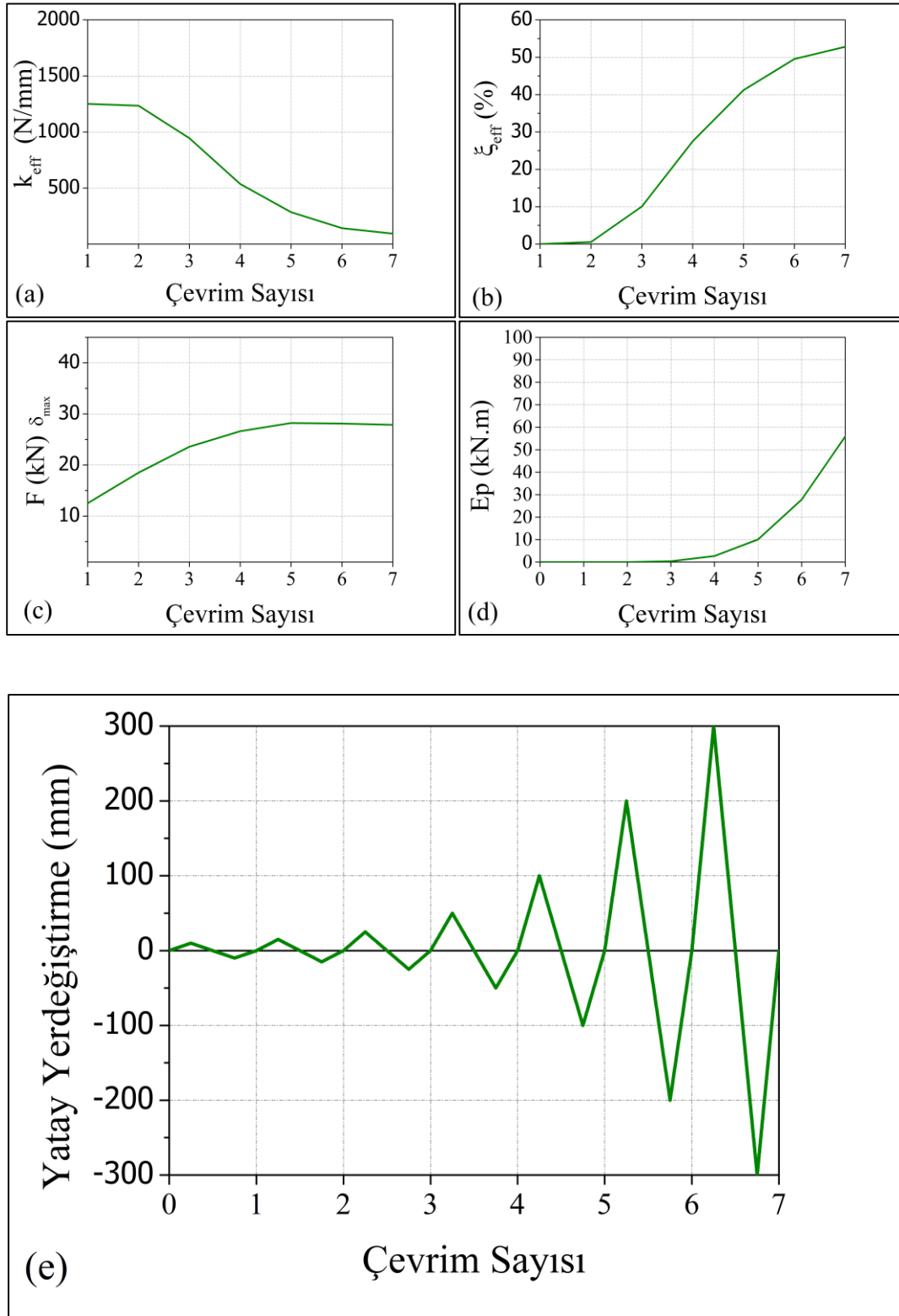


Şekil A.24 : Son çevrime ilişkin gerilme ve yerdeğiştirme durumları.



Şekil A.25 : (a) Histeresis eğri. (b) Gerçek gerilme değerleri (MPa).

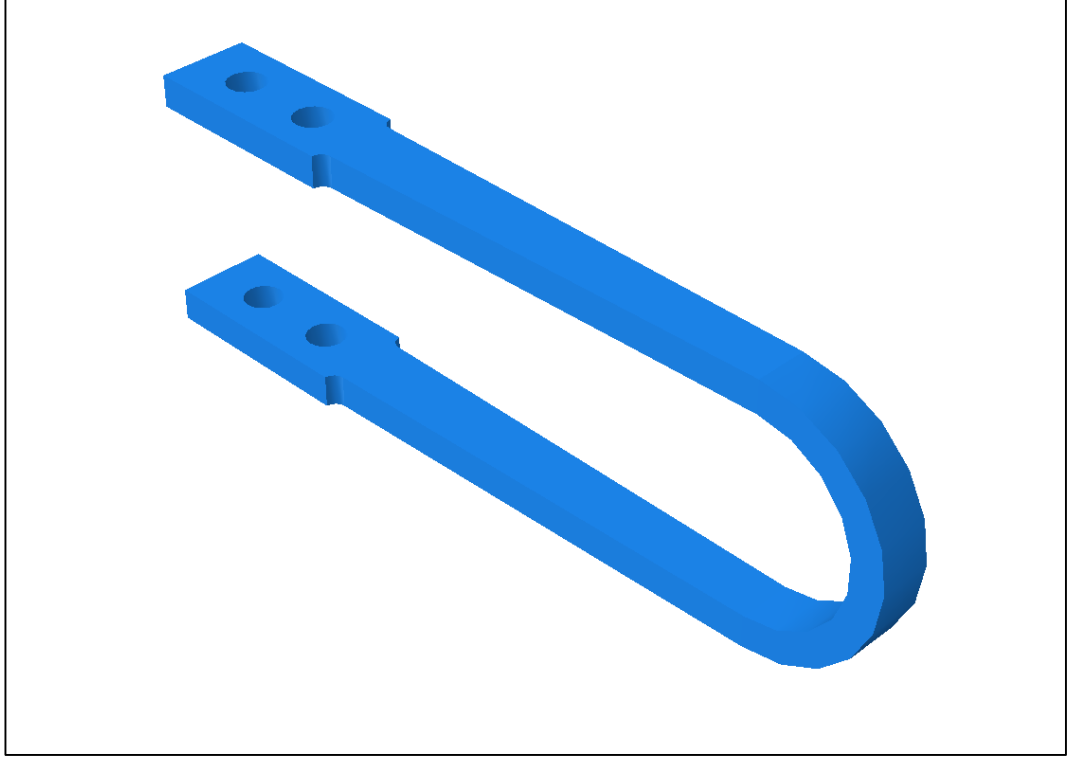
A.4.3 Sonlu elemanlar modeli sonuçları



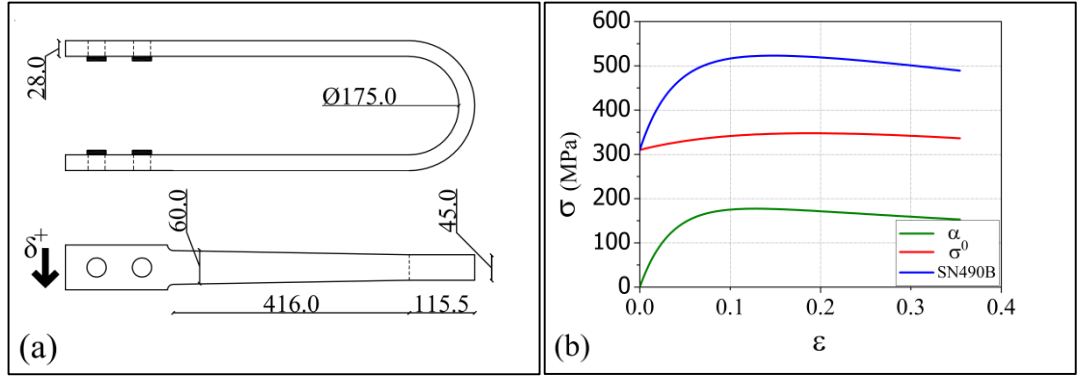
Şekil A.26 : a) Efektif Rijitlik b) Efektif Sönüm c) Maksimum Deplasmandaki Yatay Kuvvet d) Kümülatif Histeresis Enerji e) Yükleme Grafiği

A.5 UD40 Sönümleyici Yükleme 90°

A.5.1 Geometri ve malzeme

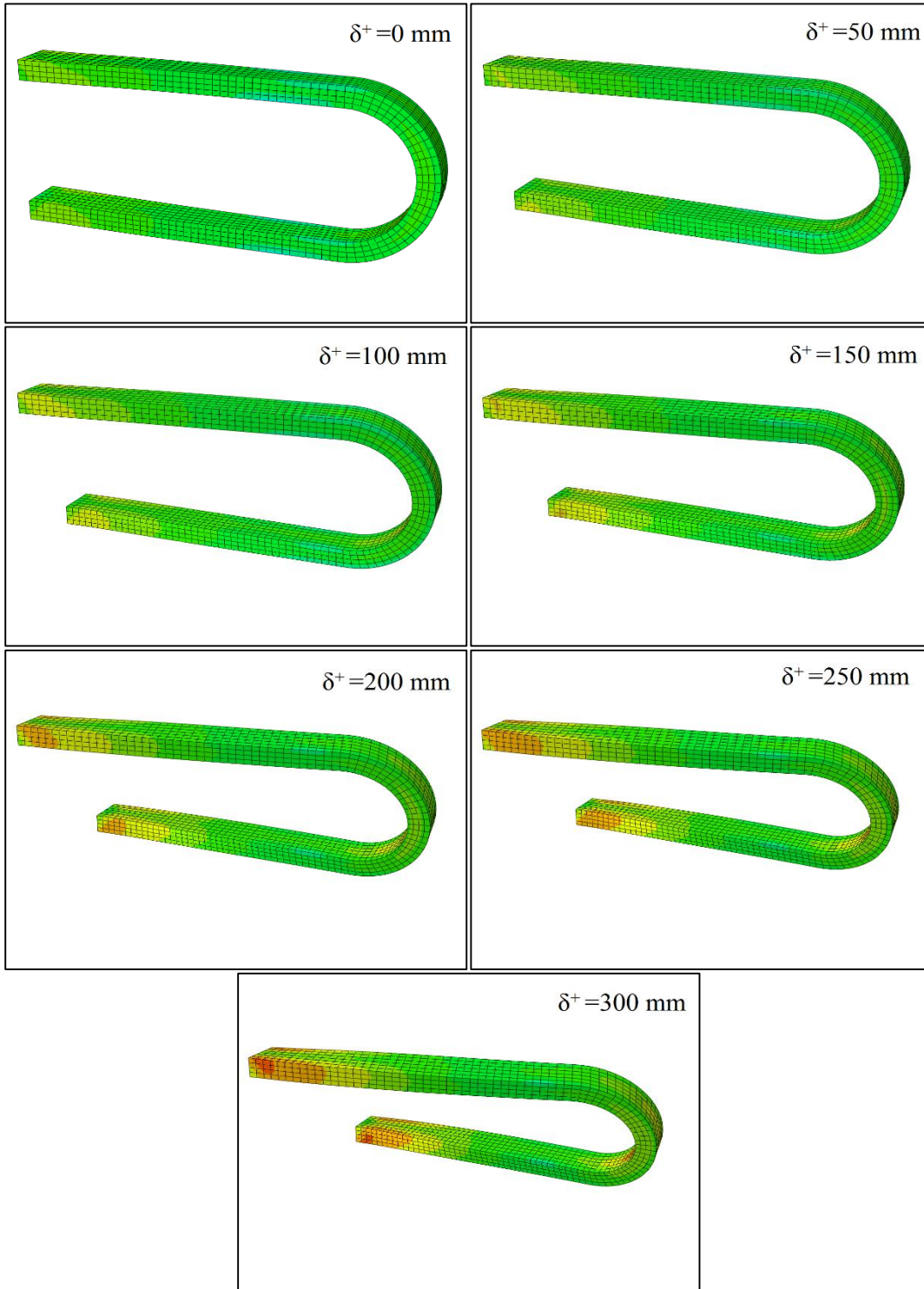


Şekil A.27 : Üç boyutlu model.

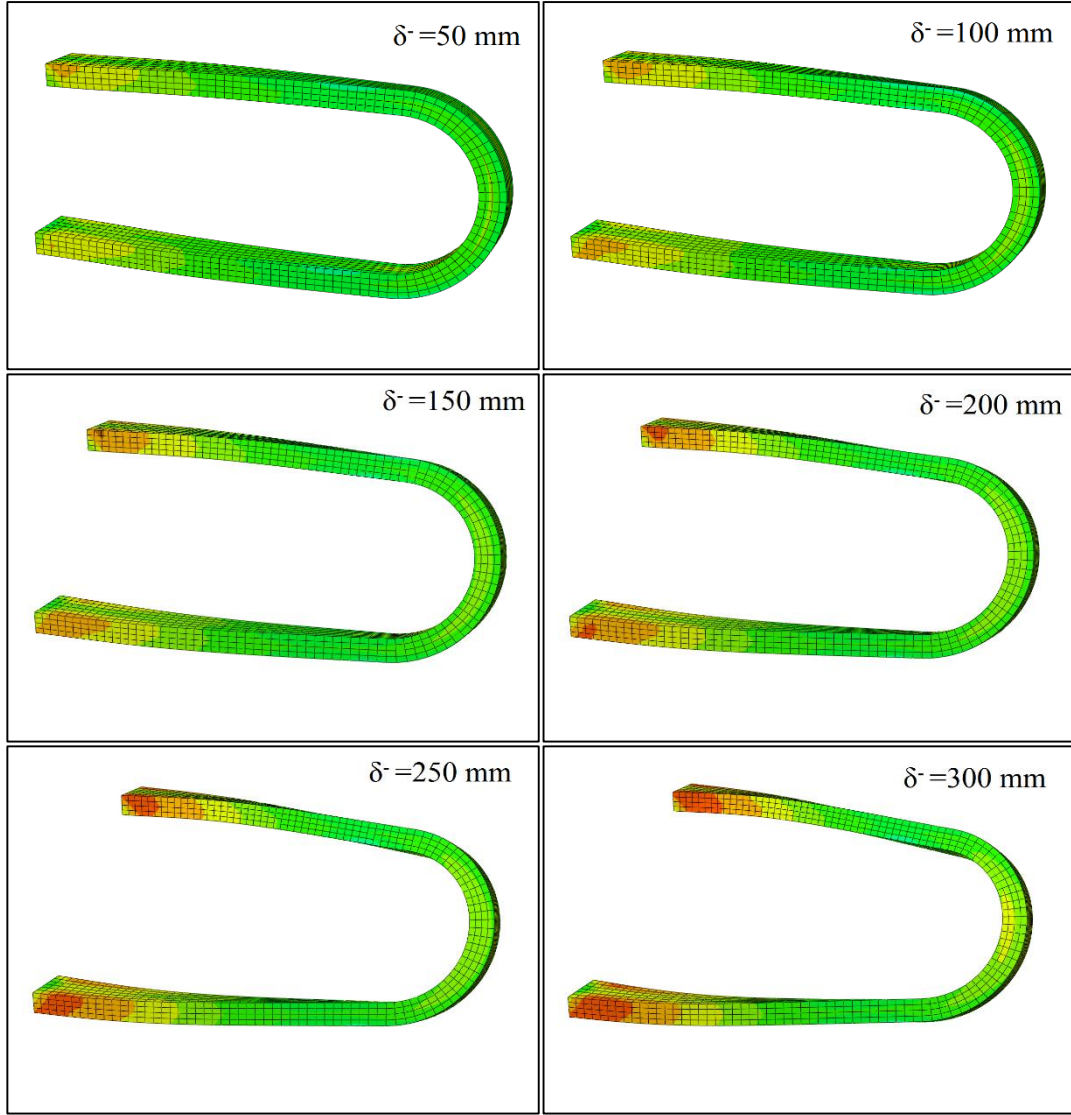


Şekil A.28 : (a) UD40 boyutları – Yükleme yönü. (b) Malzeme özellikleri.

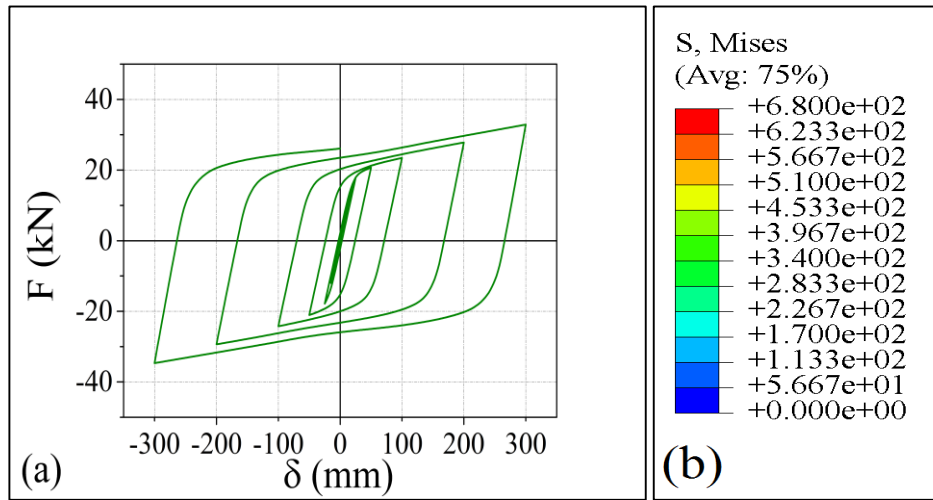
A.5.2 Sonlu elemanlar modeli



Şekil A.29 : Son çevrime ilişkin gerilme ve yerdeğiştirme durumları.

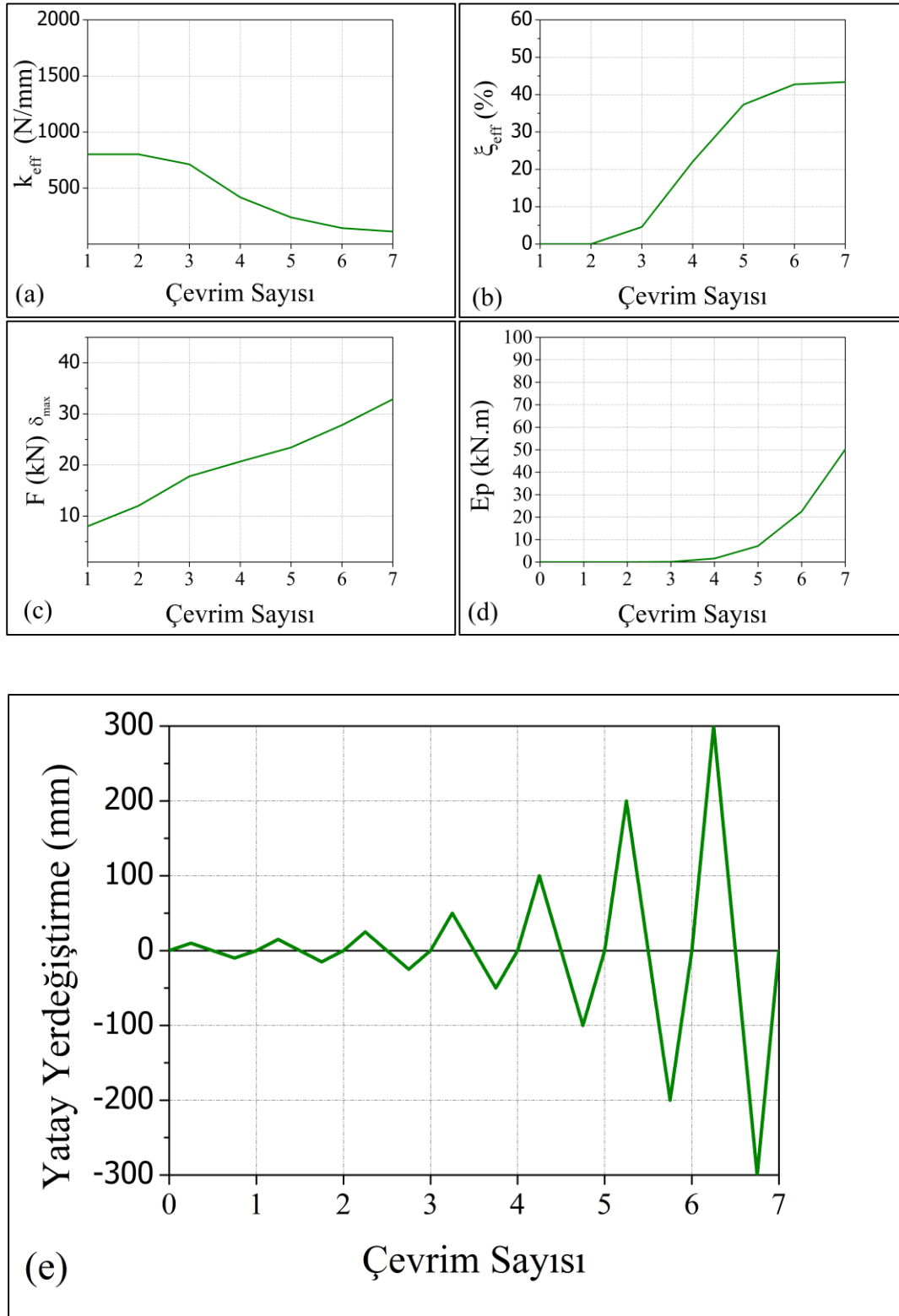


Şekil A.30 : Son çevrime ilişkin gerilme ve yerdeğiştirme durumları.



Şekil A.31 : (a) Histeretik eğrisi (b) Gerçek gerilme değerleri (MPa).

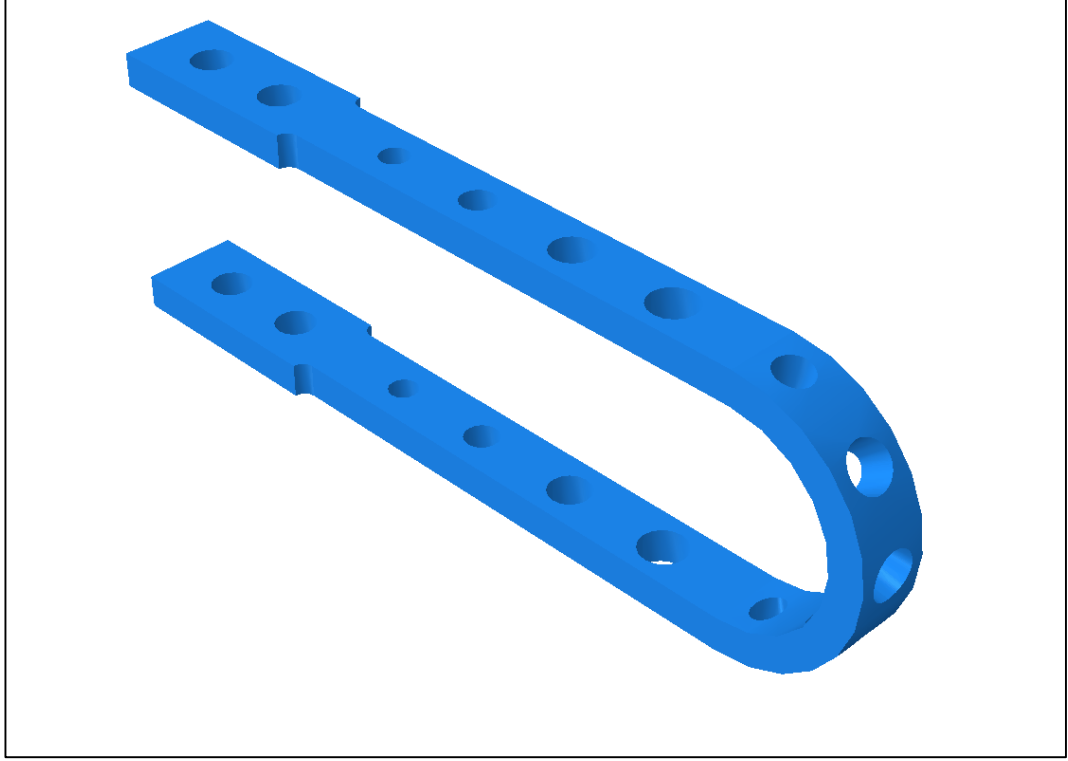
A.5.3 Sonlu elemanlar modeli sonuçları



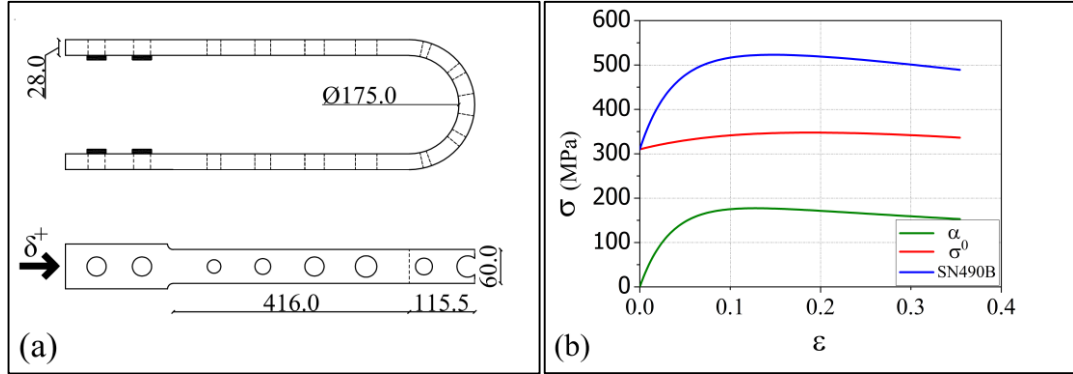
Şekil A.32 : a) Efektif rijitlik. b) Efektif sönüm. c) Maksimum deplasmandaki yatay kuvvet. d) Kümülatif histeretik enerji. e) Yükleme grafiği.

A.6 UDK1 Sönümleyici

A.6.1 Geometri ve malzeme

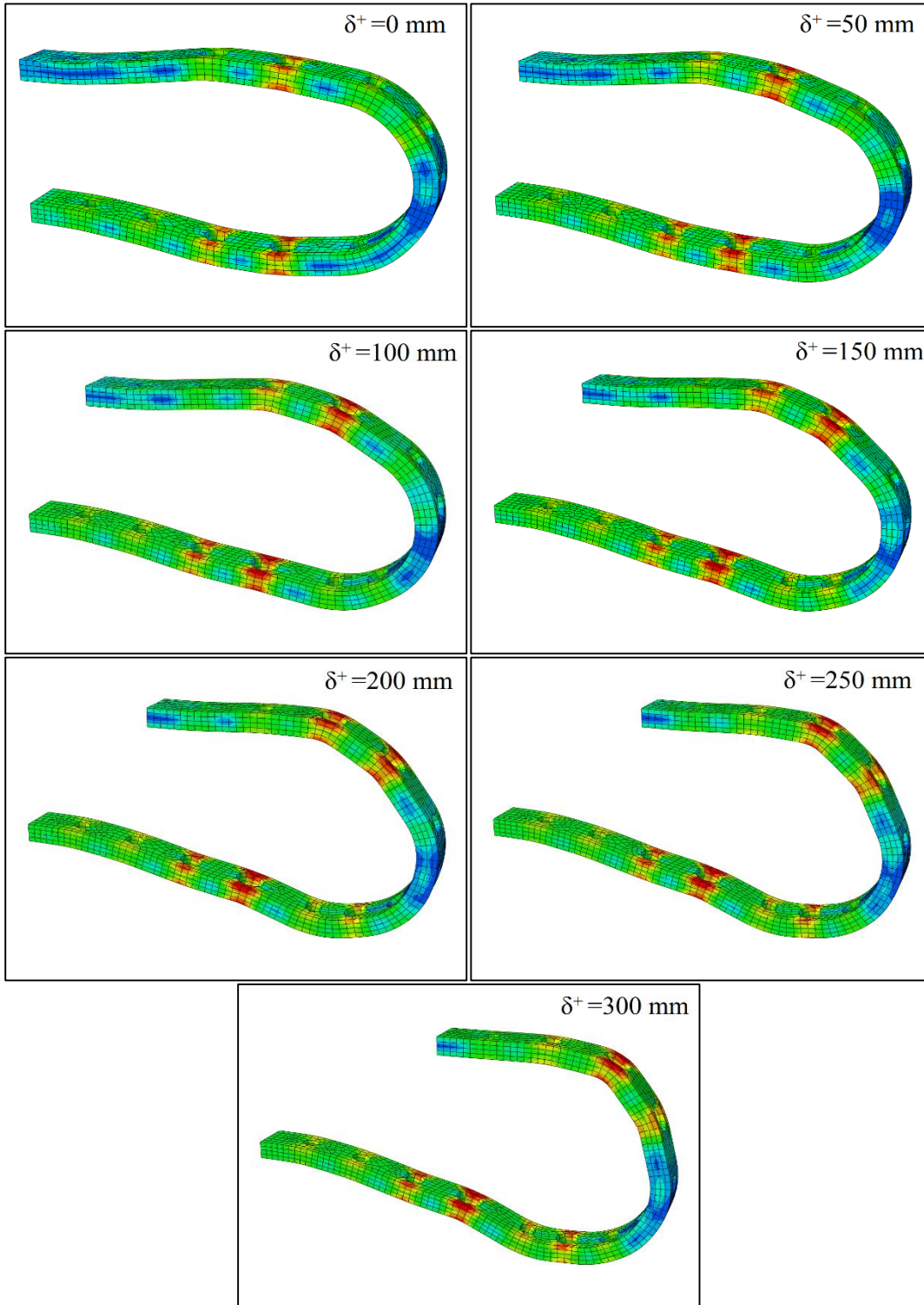


Şekil A.33 : Üç boyutlu model.

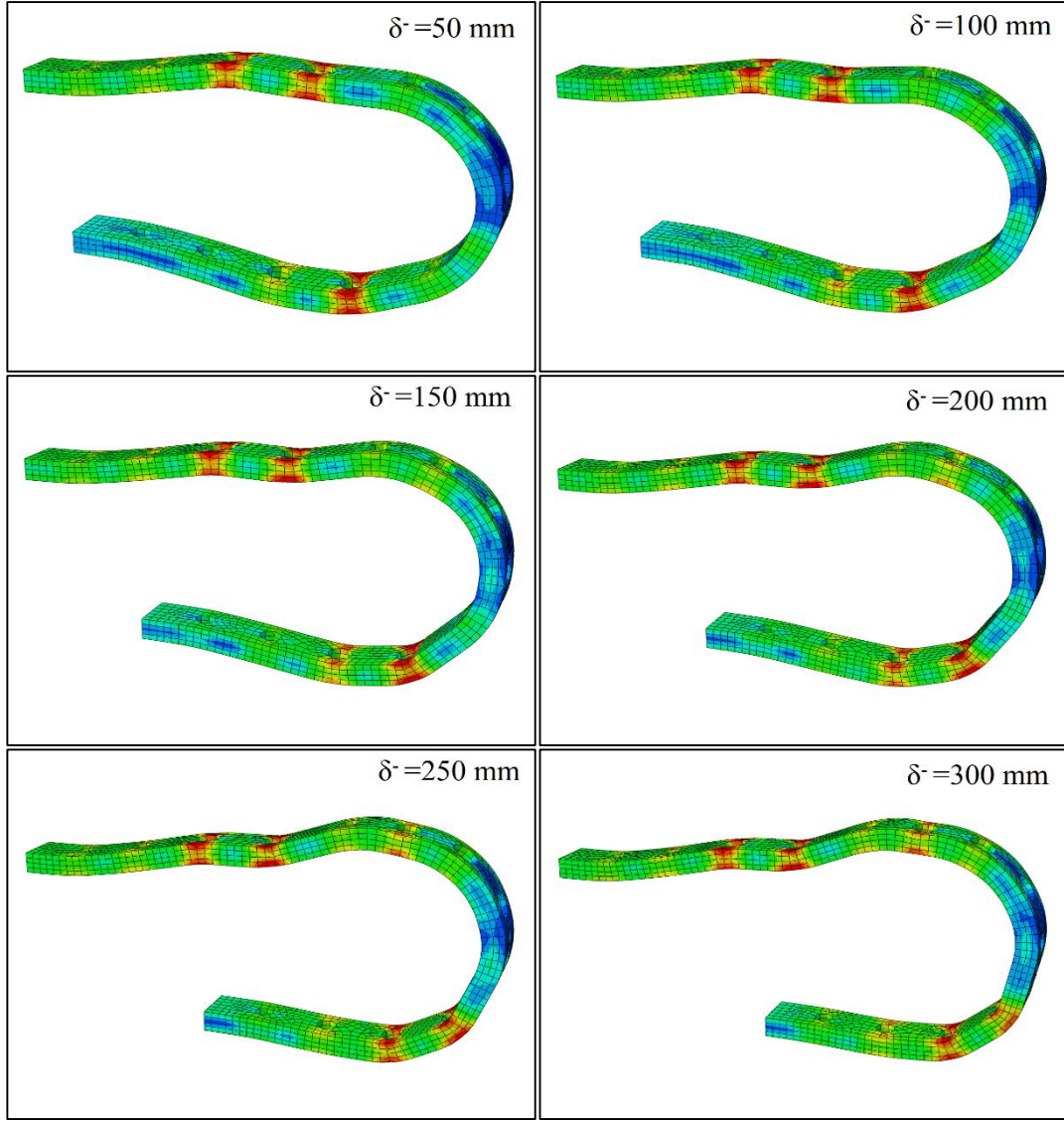


Şekil A.34 : (a) Sönümleyici boyutları – Yükleme yönü. (b) Malzeme özellikleri.

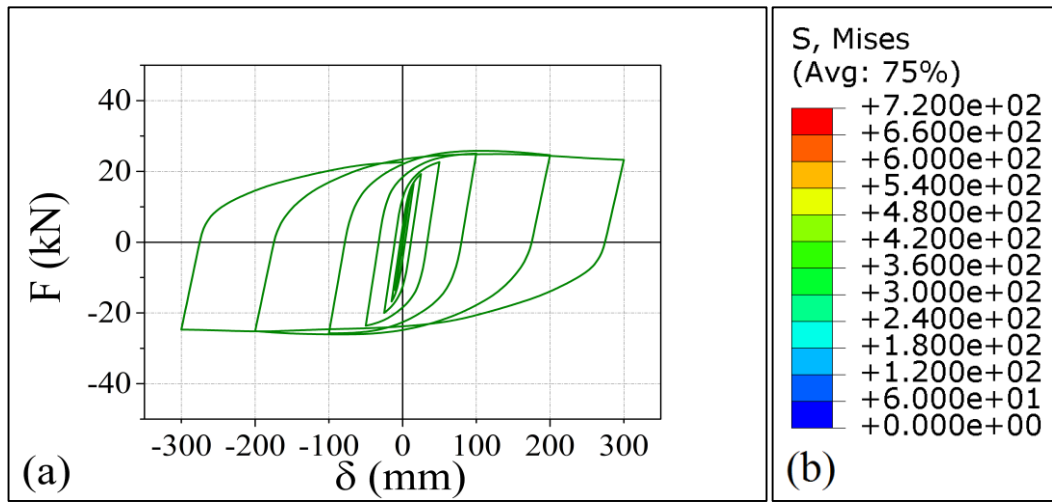
A.6.2 Sonlu elemanlar modeli



Şekil A.35 : Son çevrime ilişkin gerilme ve yerdeğiştirme durumları.

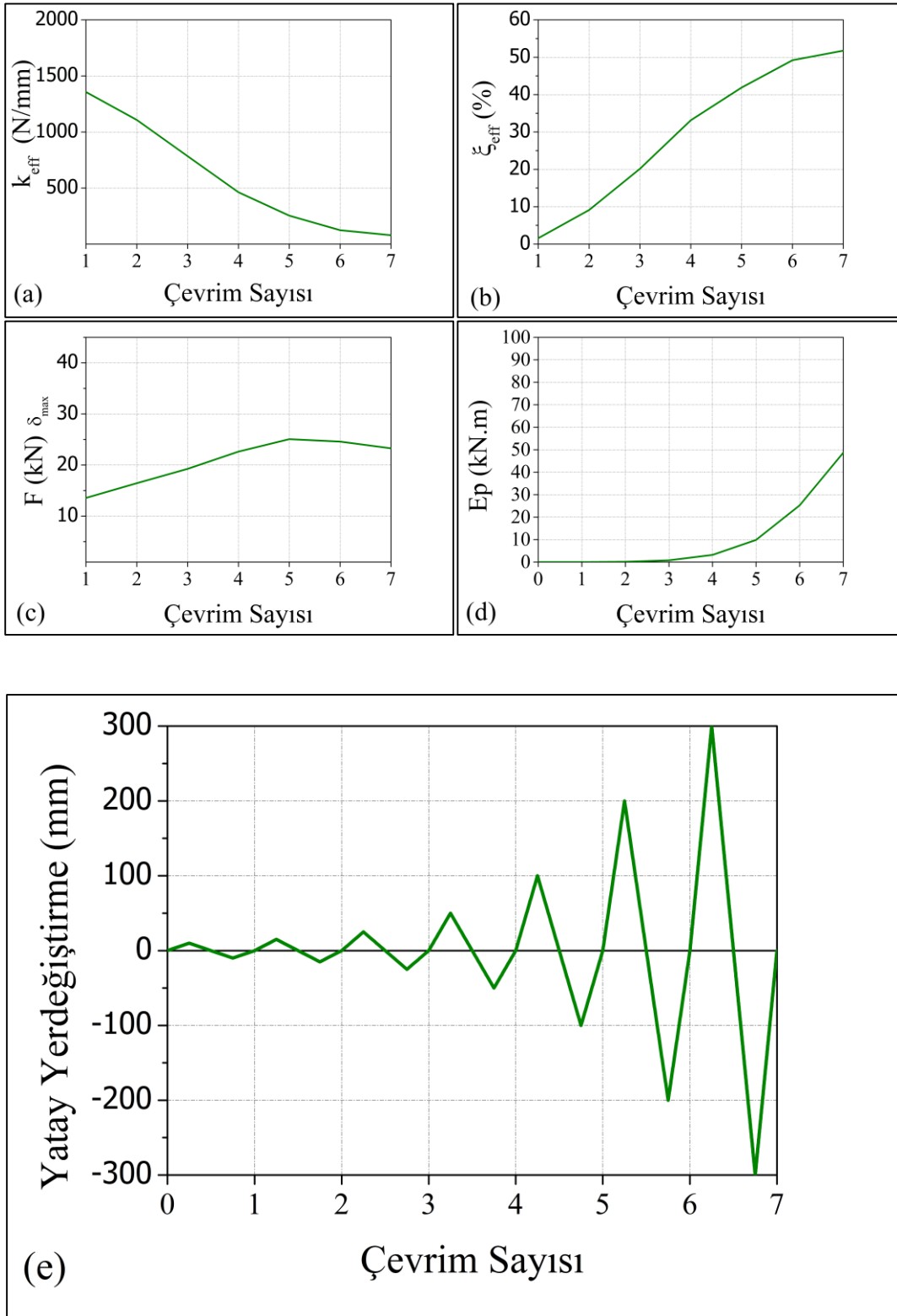


Şekil A.36 : Son çevrime ilişkin gerilme ve yerdeğiştirme durumları.



Şekil A.37 : (a) Histeretik eğrisi. (b) Gerçek gerilme değerleri (MPa).

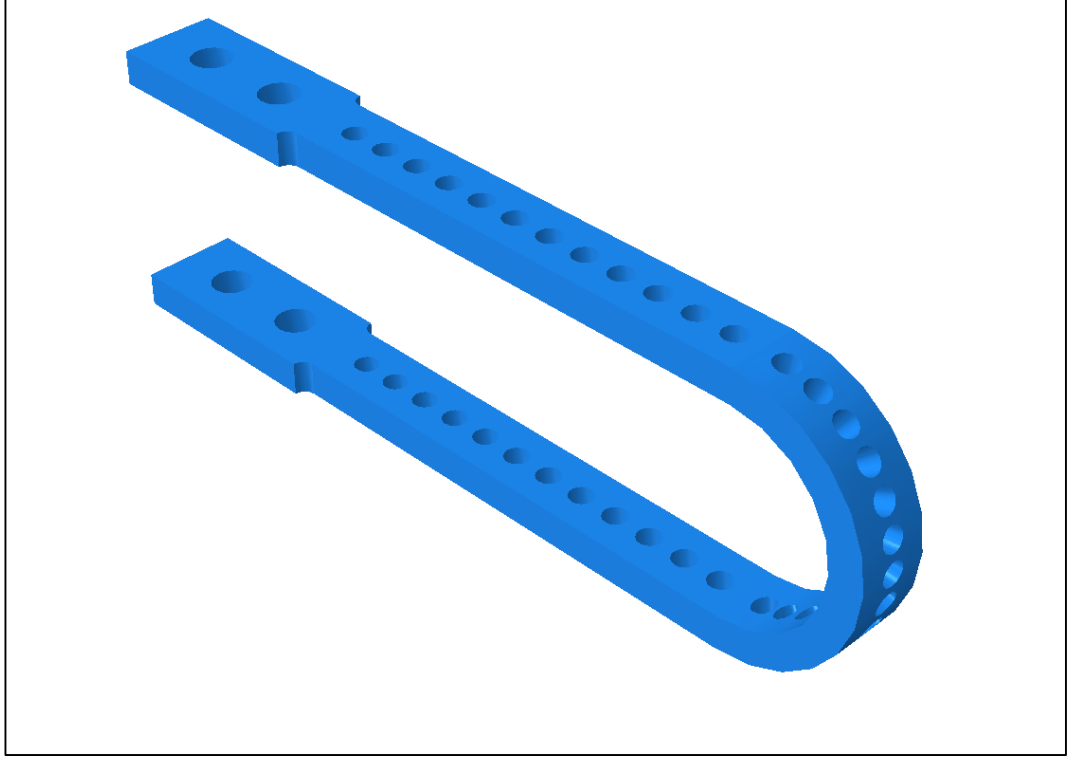
A.6.3 Sonlu elemanlar modeli sonuçları



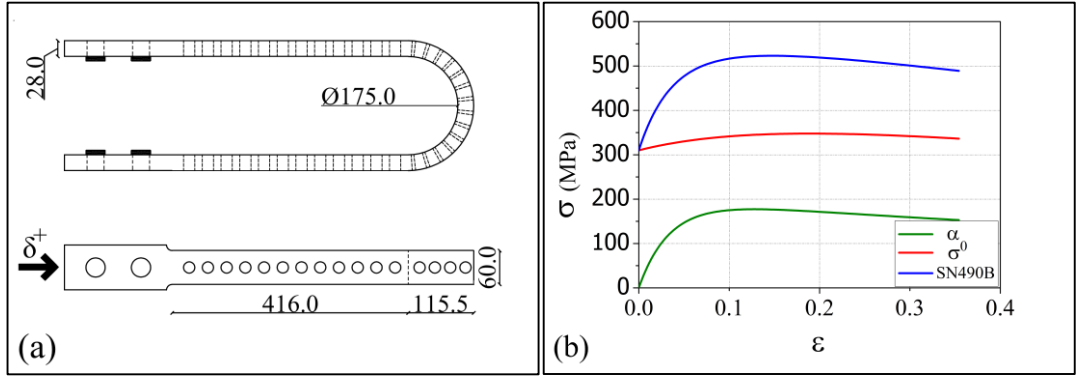
Şekil A.38 : a) Efektif rijitlik. b) Efektif sönüm. c) Maksimum deplasmandaki yatay kuvvet. d) Kümülatif histeretik enerji. e) Yükleme grafiği.

A.7 UDK2 Sönümleyici

A.7.1 Geometri ve malzeme

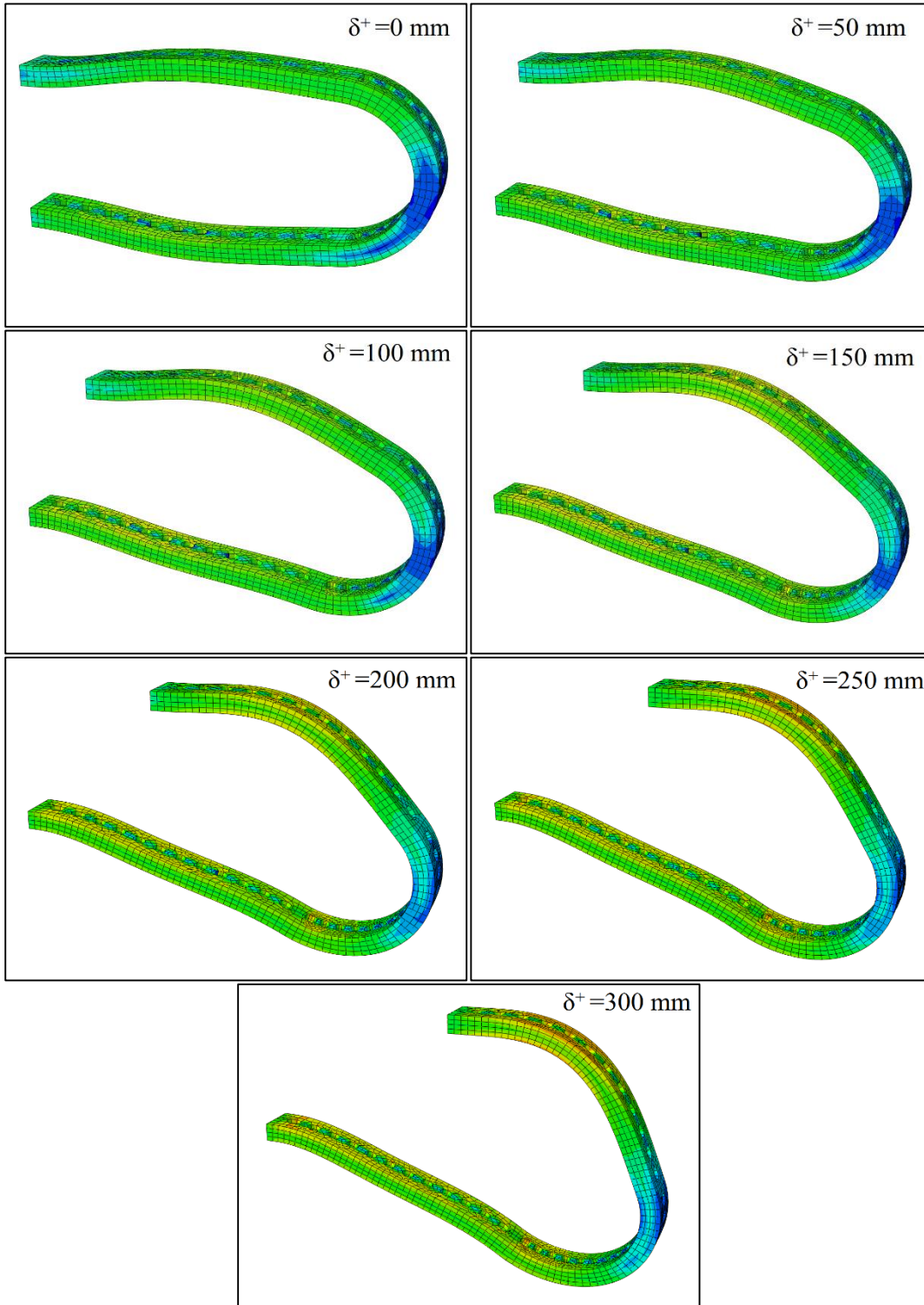


Şekil A.39 : Üç boyutlu model.

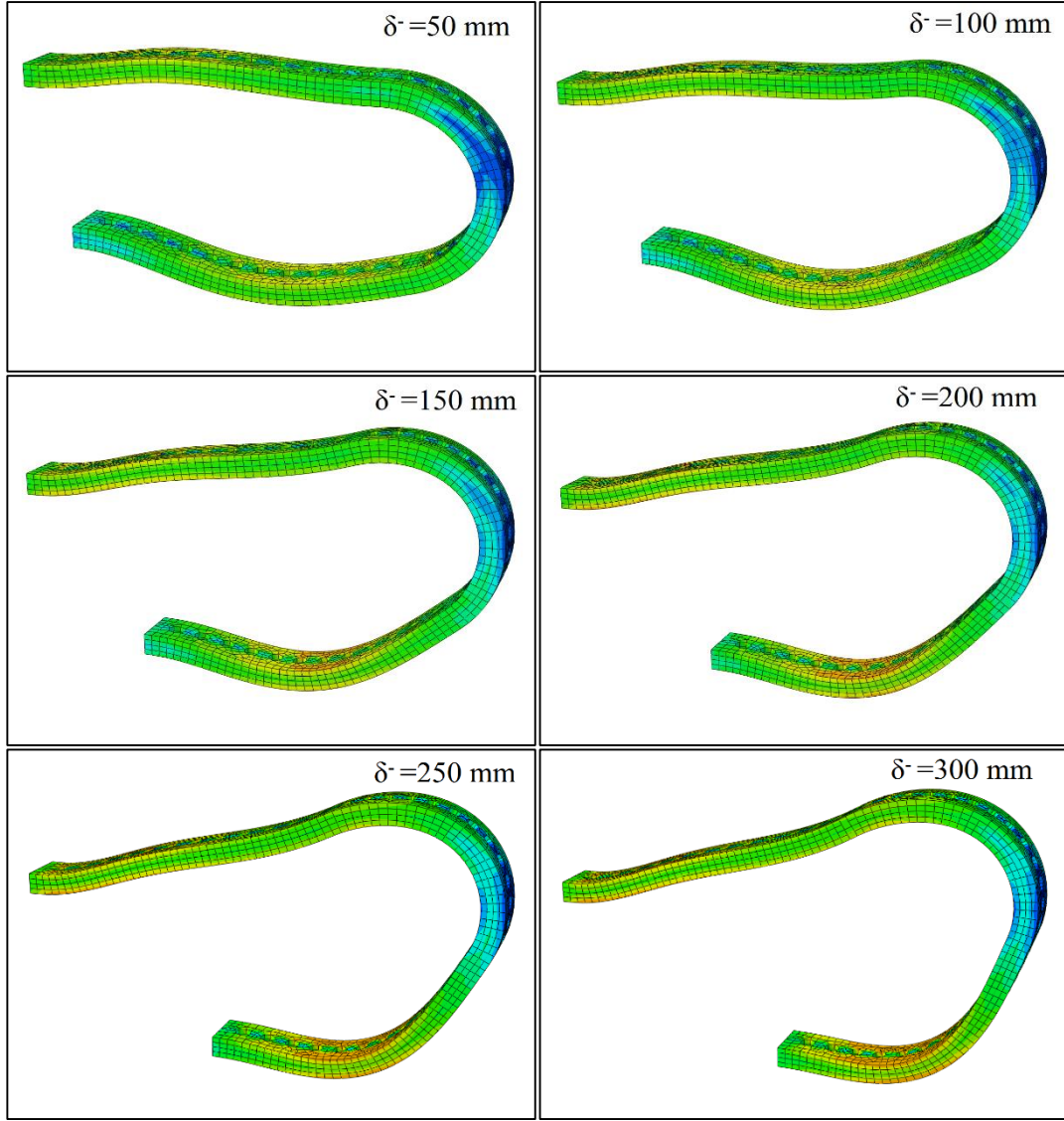


Şekil A.40 : (a) Sönümleyici boyutları – Yükleme yönü. (b) Malzeme özellikleri.

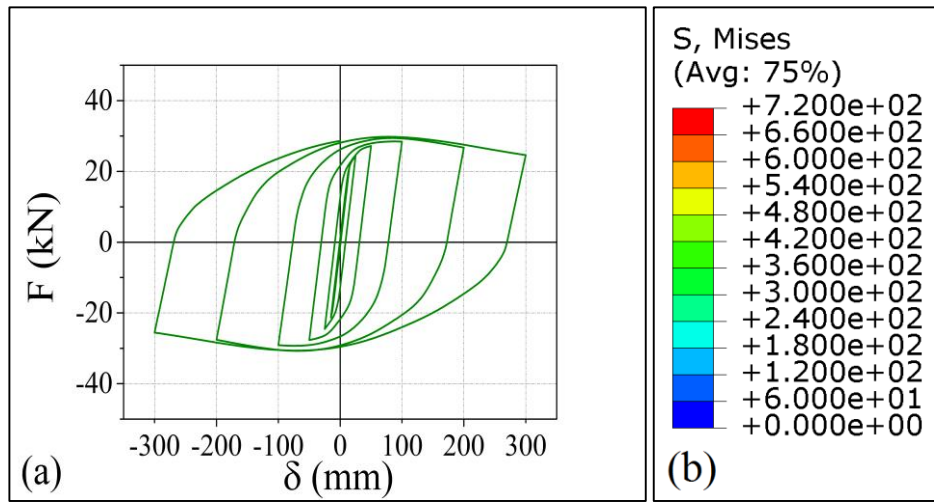
A.7.2 Sonlu Elemanlar Modeli



Şekil A.41 : Son Çevrime ilişkin gerilme ve yerdeğiştirme durumları.

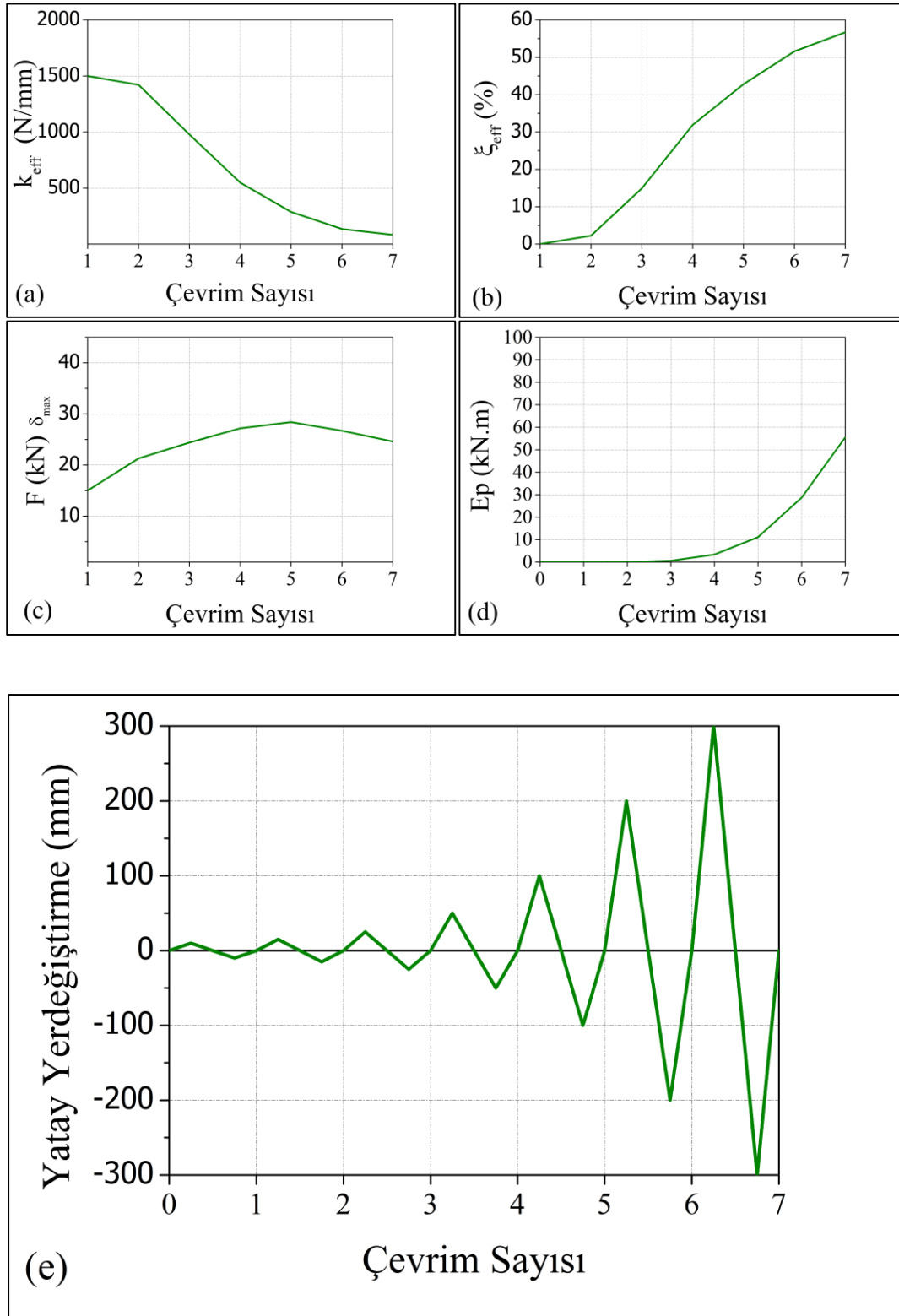


Şekil A.42 : Son çevrime ilişkin gerilme ve yerdeğiştirme durumları.



Şekil A.43 : (a) Histeretik eğrisi. (b) Gerçek gerilme değerleri (MPa).

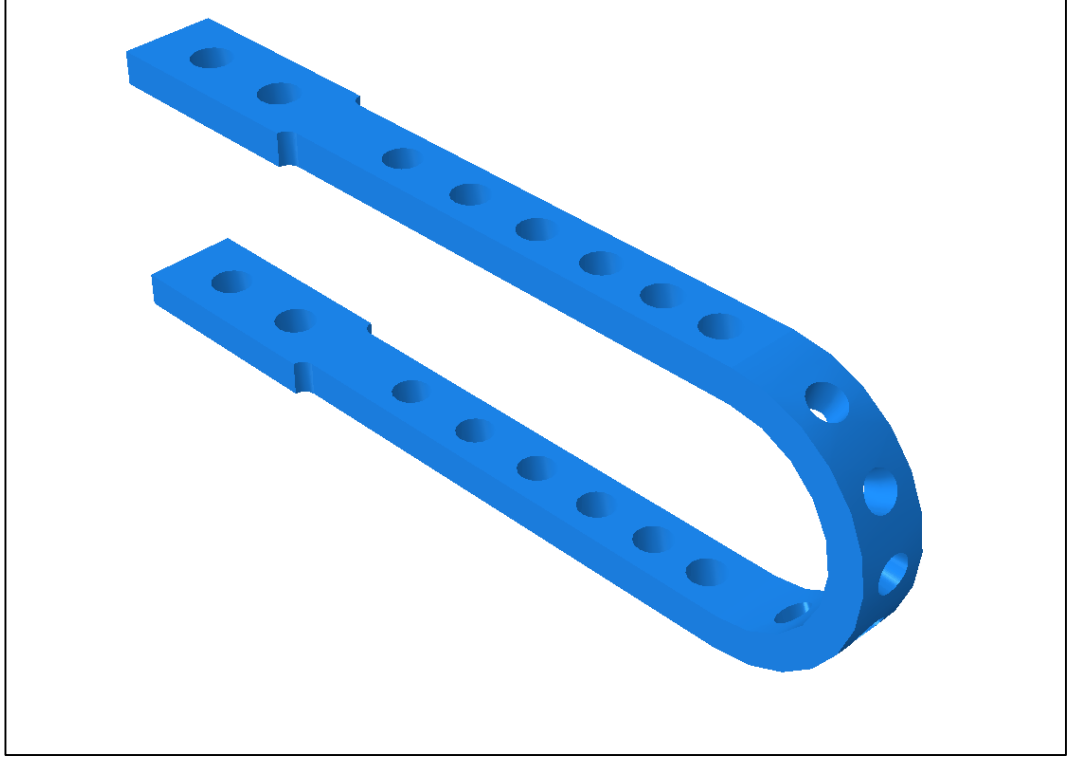
A.7.3 Sonlu elemanlar modeli sonuçları



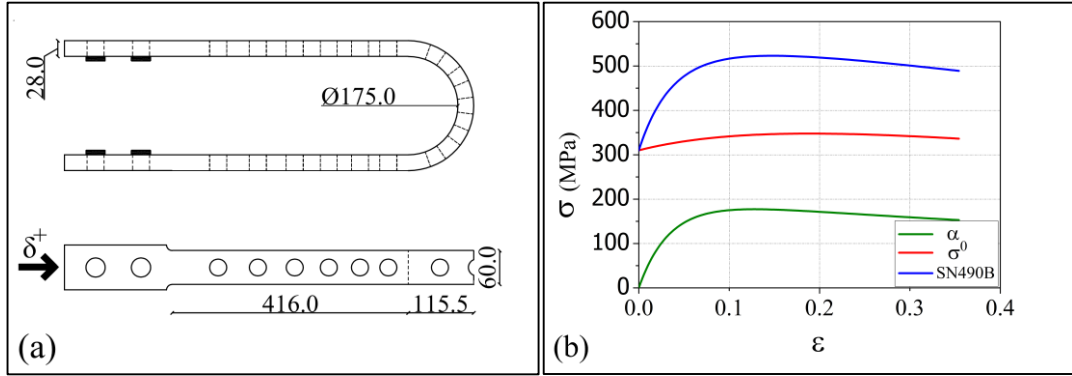
Şekil A.44 : a) Efektif rijitlik. b) Efektif sönüm. c) Maksimum deplasmandaki yatay kuvvet. d) Kümülatif histeretik enerji. e) Yükleme grafiği.

A.8 UDK3 Sönümleyici

A.8.1 Geometri ve malzeme

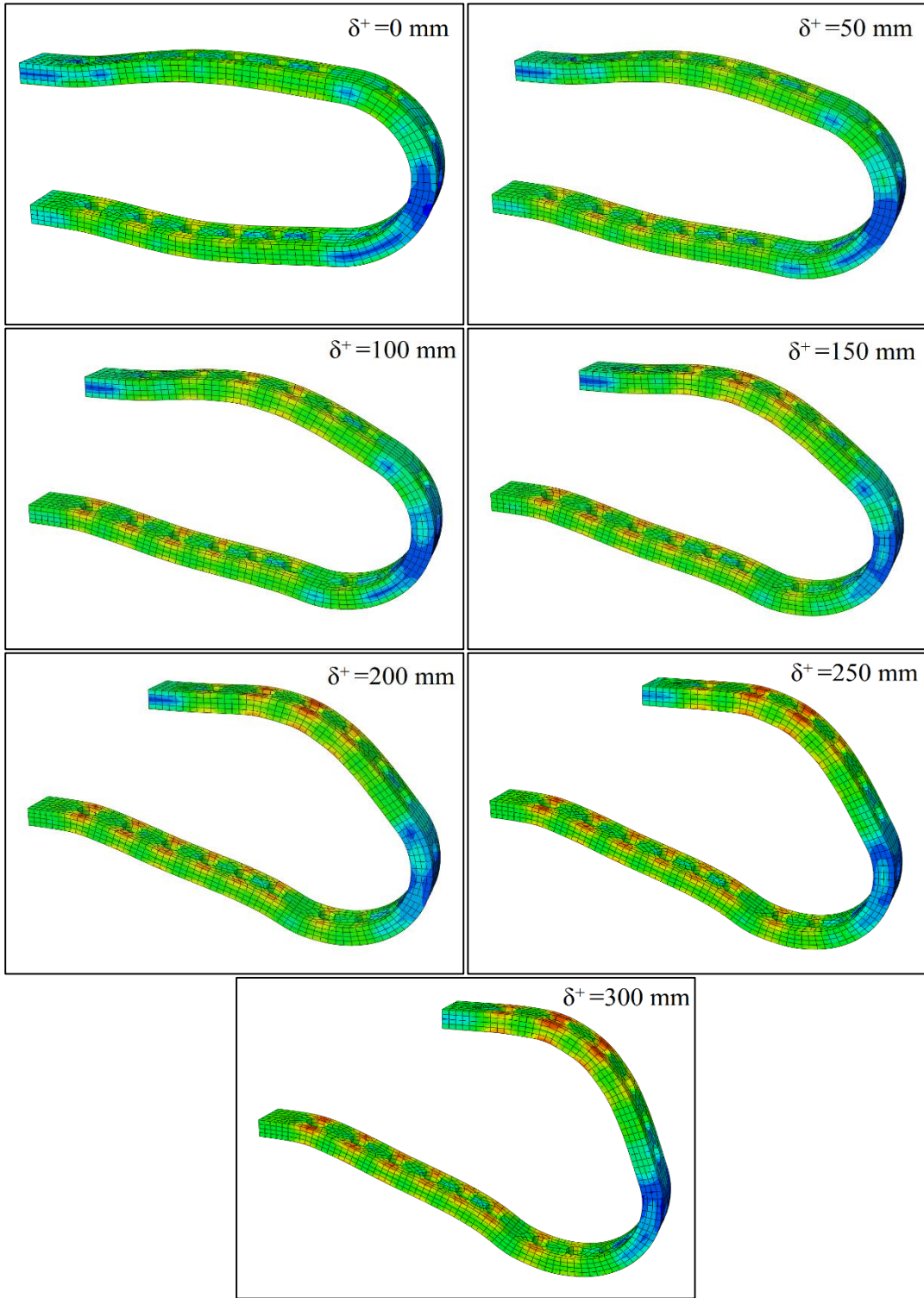


Şekil A.45 : Üç boyutlu model.

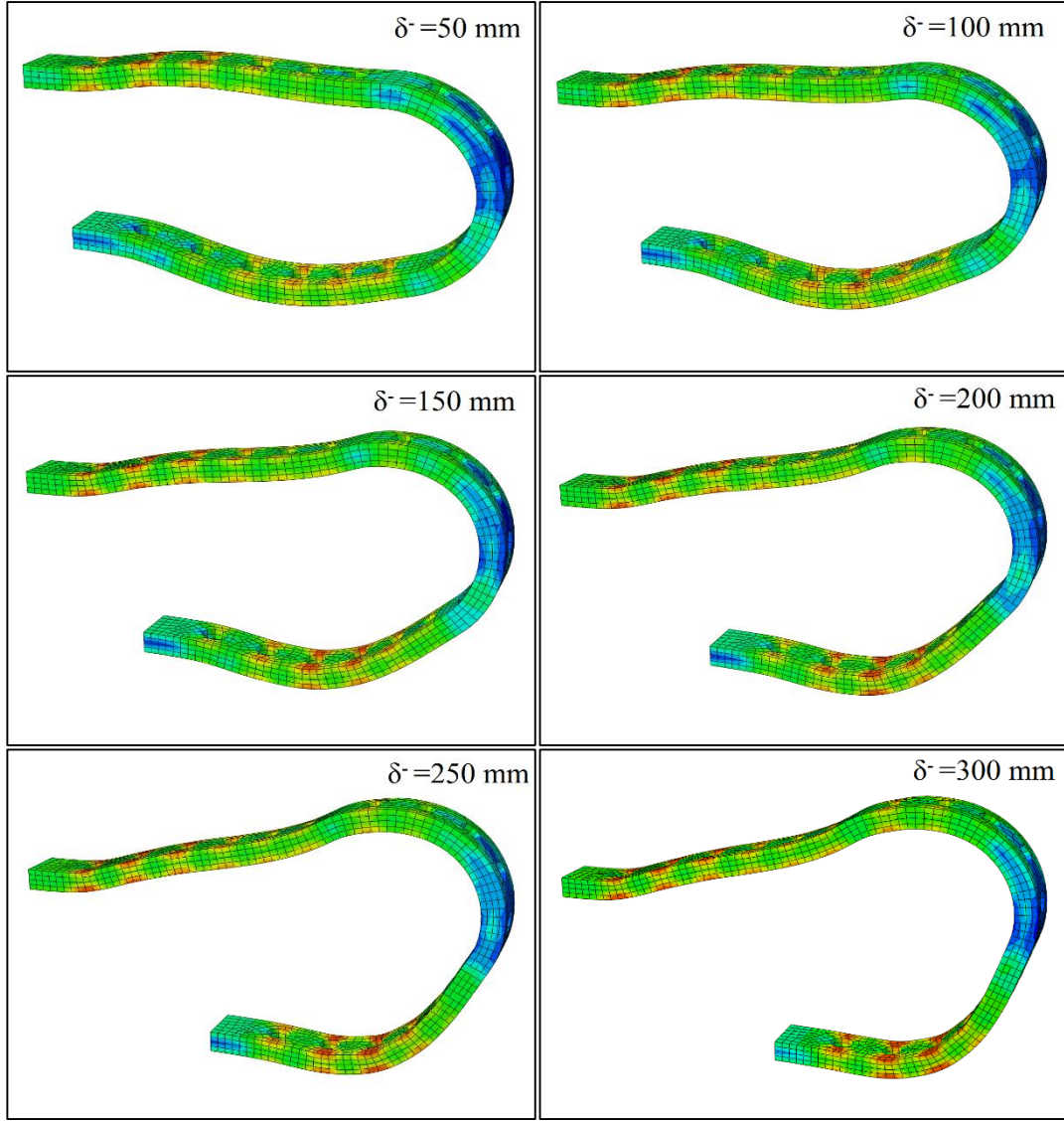


Şekil A.46 : (a) Sönümleyici boyutları – Yükleme yönü. (b) Malzeme özellikleri.

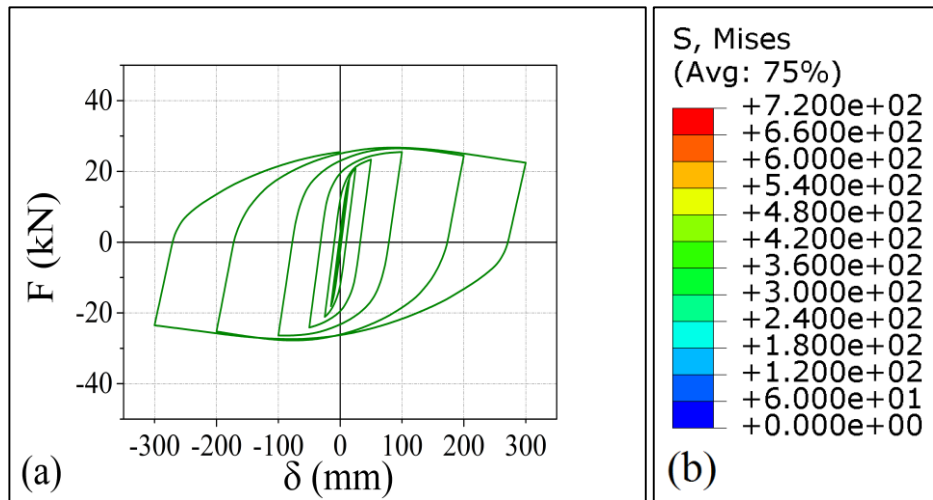
A.8.2 Sonlu elemanlar modeli



Şekil A.47 : Son çevrime ilişkin gerilme ve yerdeğiştirme durumları.

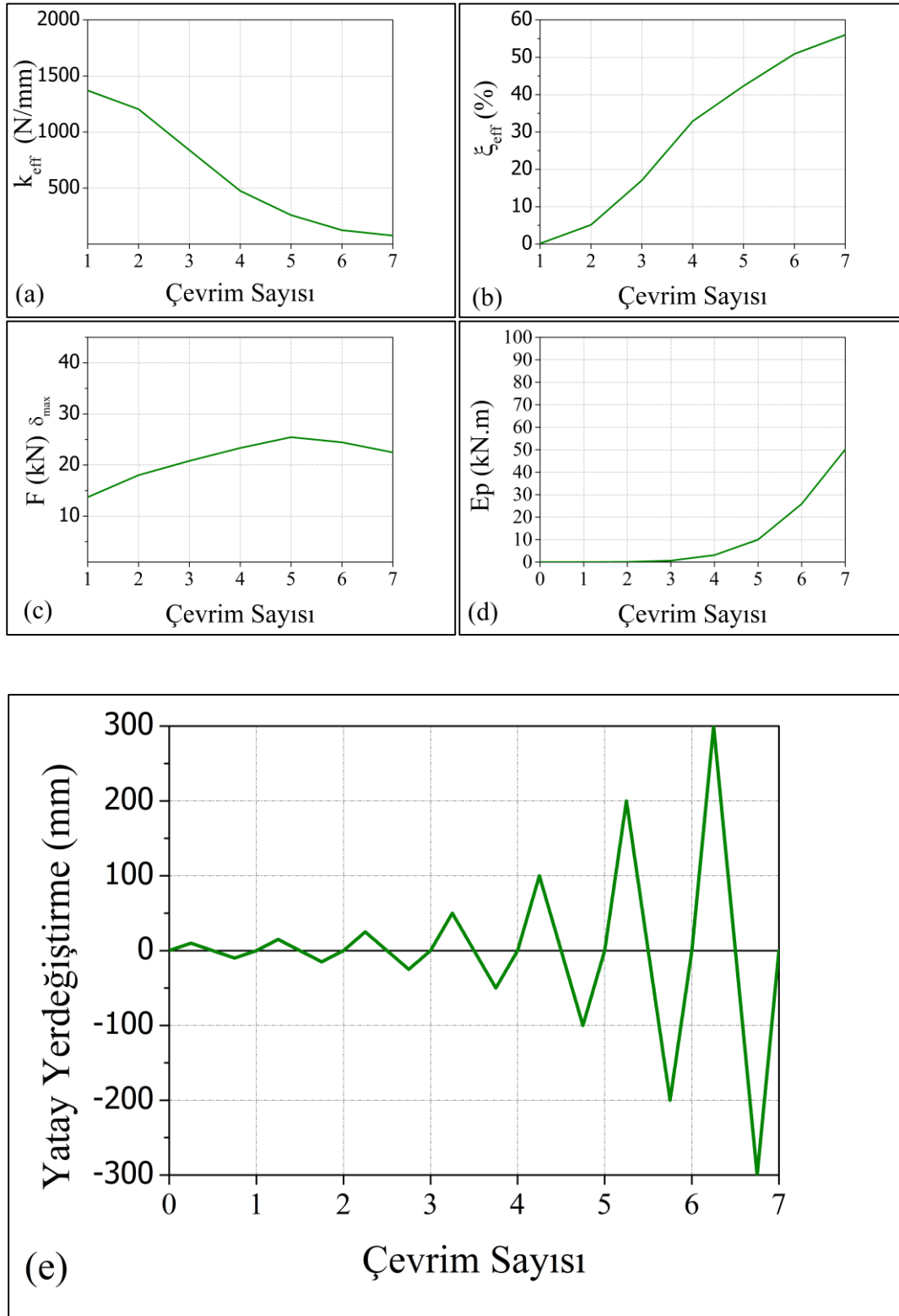


Şekil A.48 : Son çevrime ilişkin gerilme ve yerdeğiştirme durumları.



Şekil A.49 : (a) Histeretik eğrisi. (b) Gerçek gerilme değerleri (MPa).

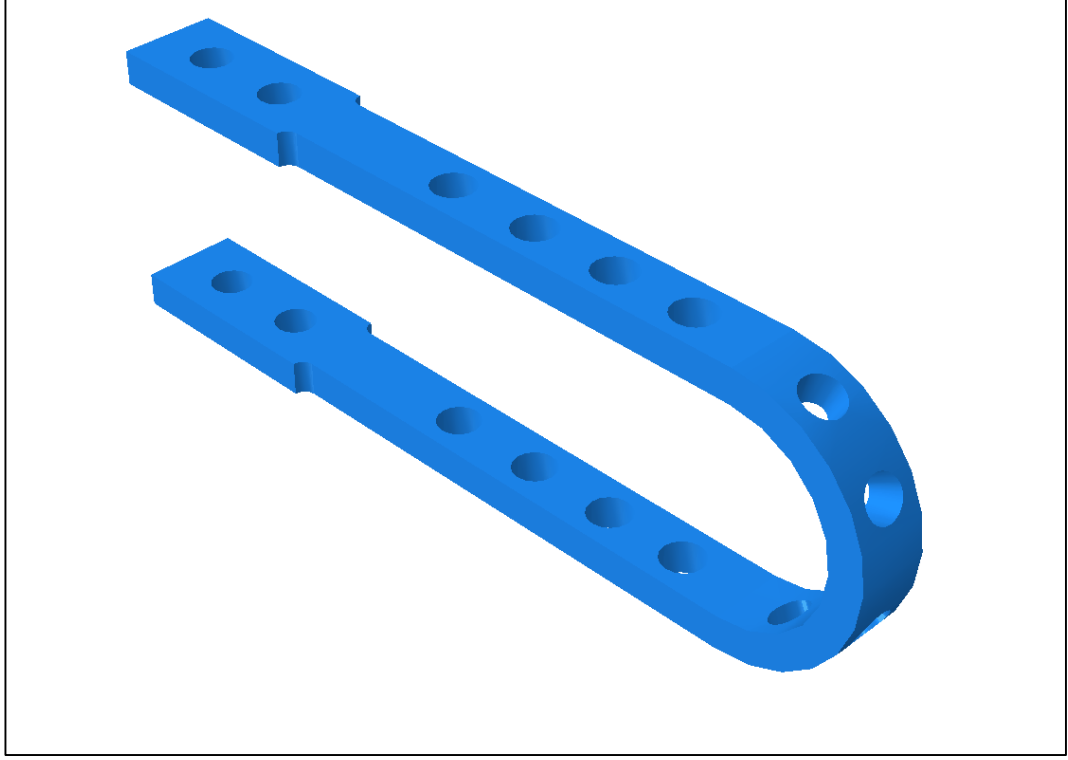
A.8.3 Sonlu elemanlar modeli sonuçları



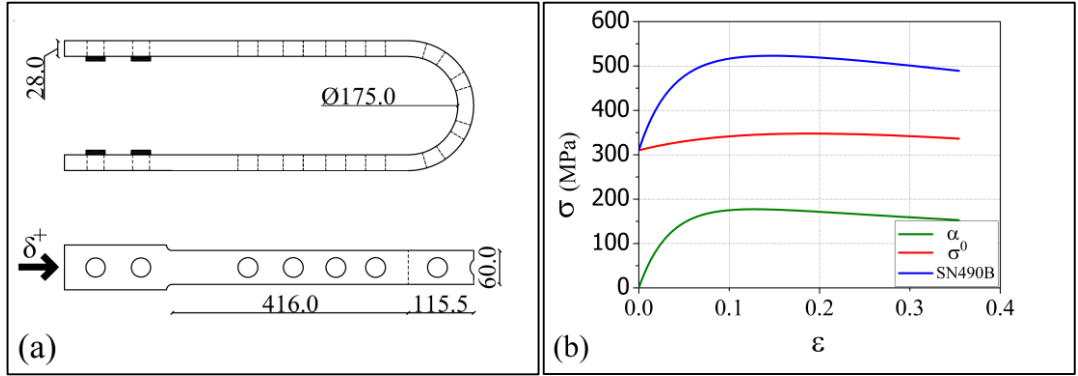
Şekil A.50 : a) Efektif rijitlik. b) Efektif sönüm. c) Maksimum deplasmandaki yatay kuvvet. d) Kümülatif histeretik enerji. e) Yükleme grafiği.

A.9 UDK4 Sönümleyici

A.9.1 Geometri ve malzeme

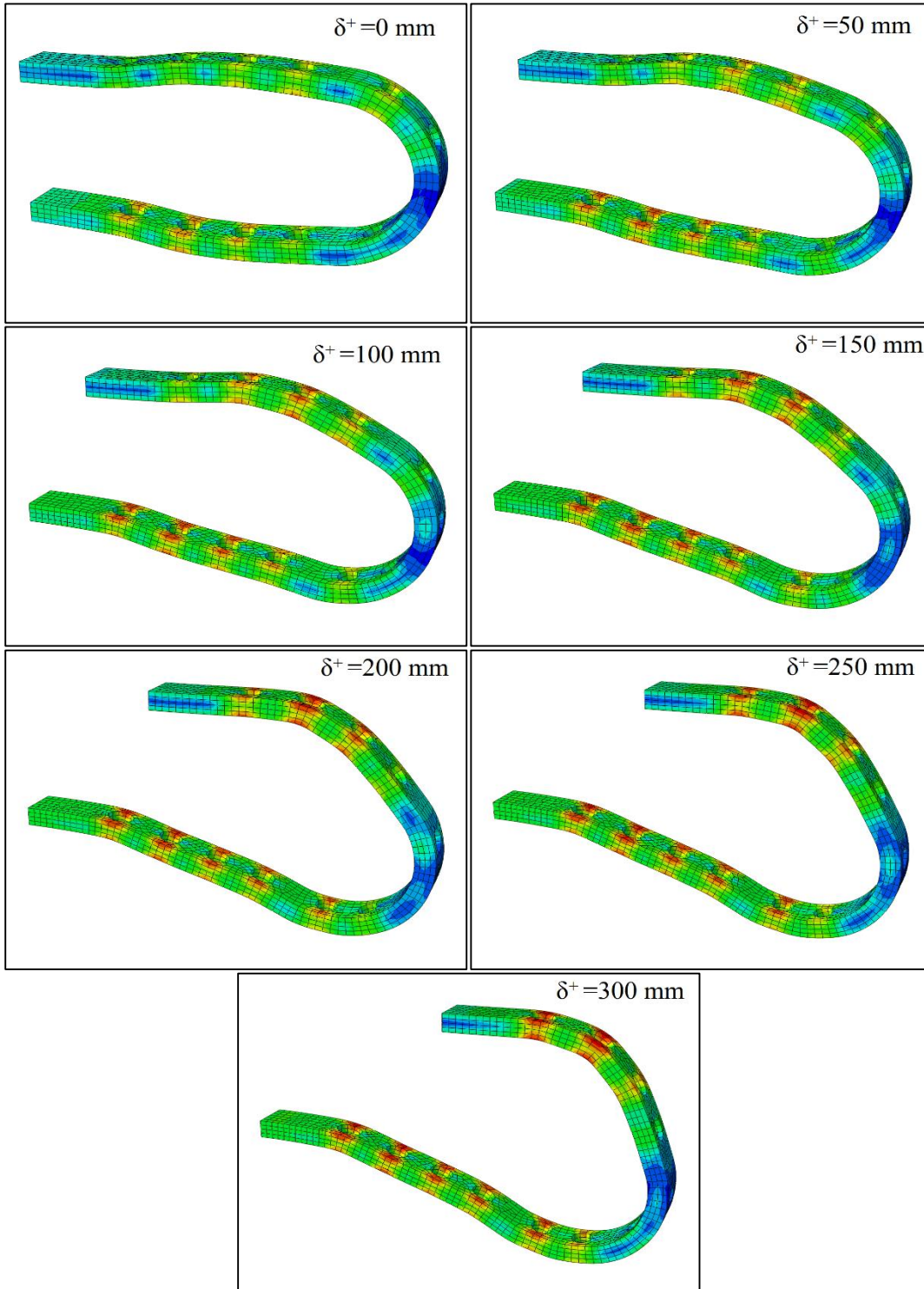


Şekil A.51 : Üç boyutlu model.

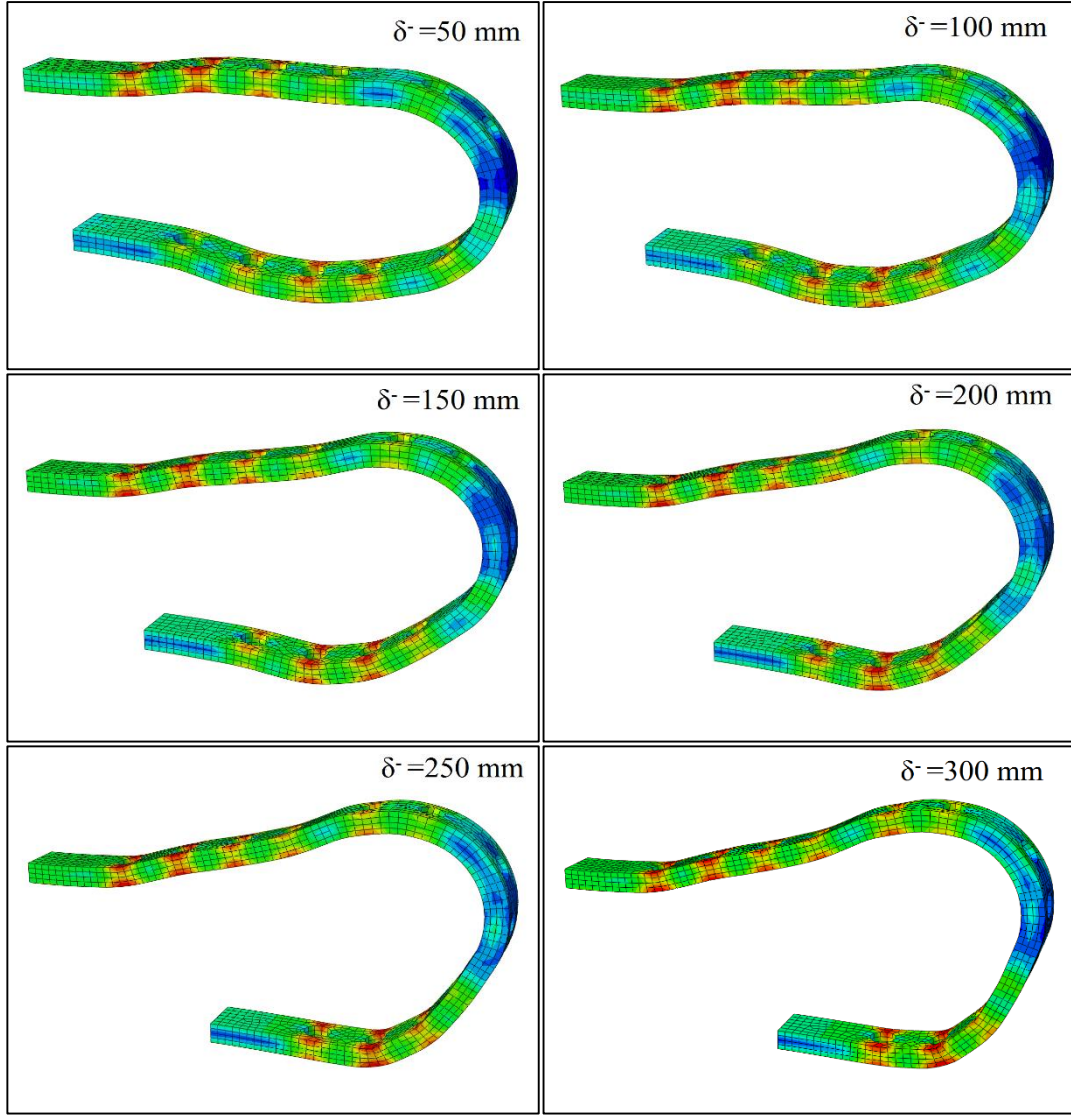


Şekil A.52 : (a) Sönümleyici boyutları – Yükleme yönü. (b) Malzeme özellikleri.

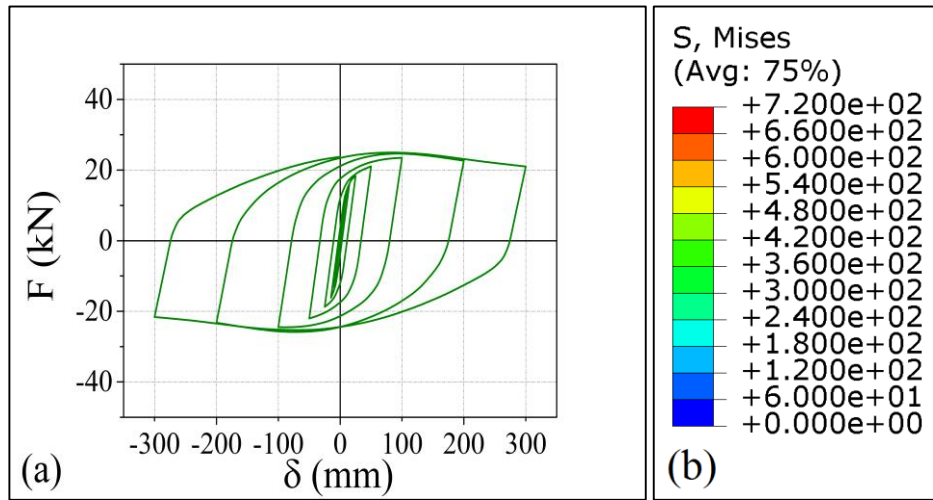
A.9.2 Sonlu elemanlar modeli



Şekil A.53 : Son çevrime ilişkin gerilme ve yerdeğiştirme durumları.

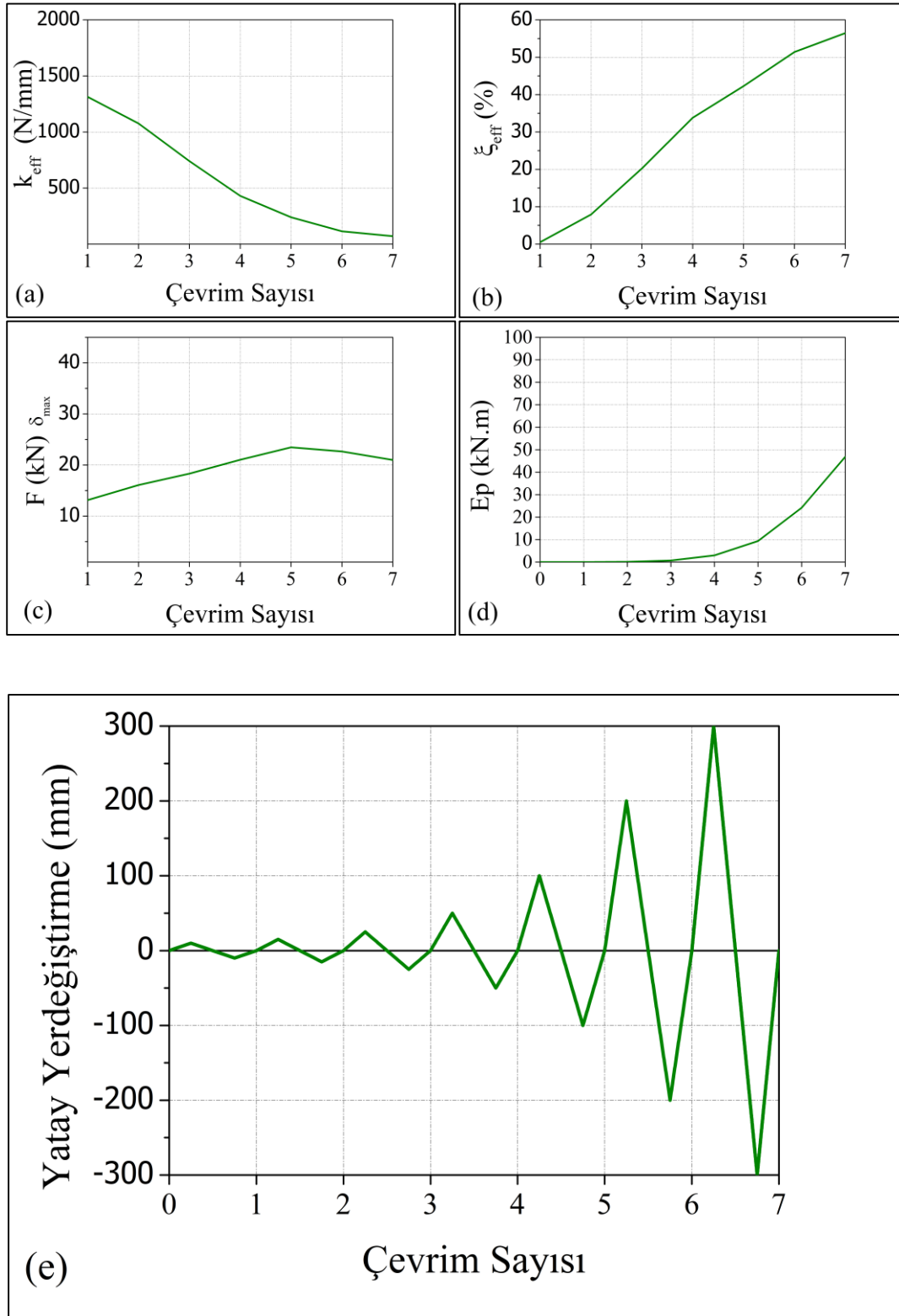


Şekil A.54 : Son çevrime ilişkin gerilme ve yerdeğiştirme durumları.



Şekil A.55 : (a) Histeretik eğrisi. (b) Gerçek gerilme değerleri (MPa).

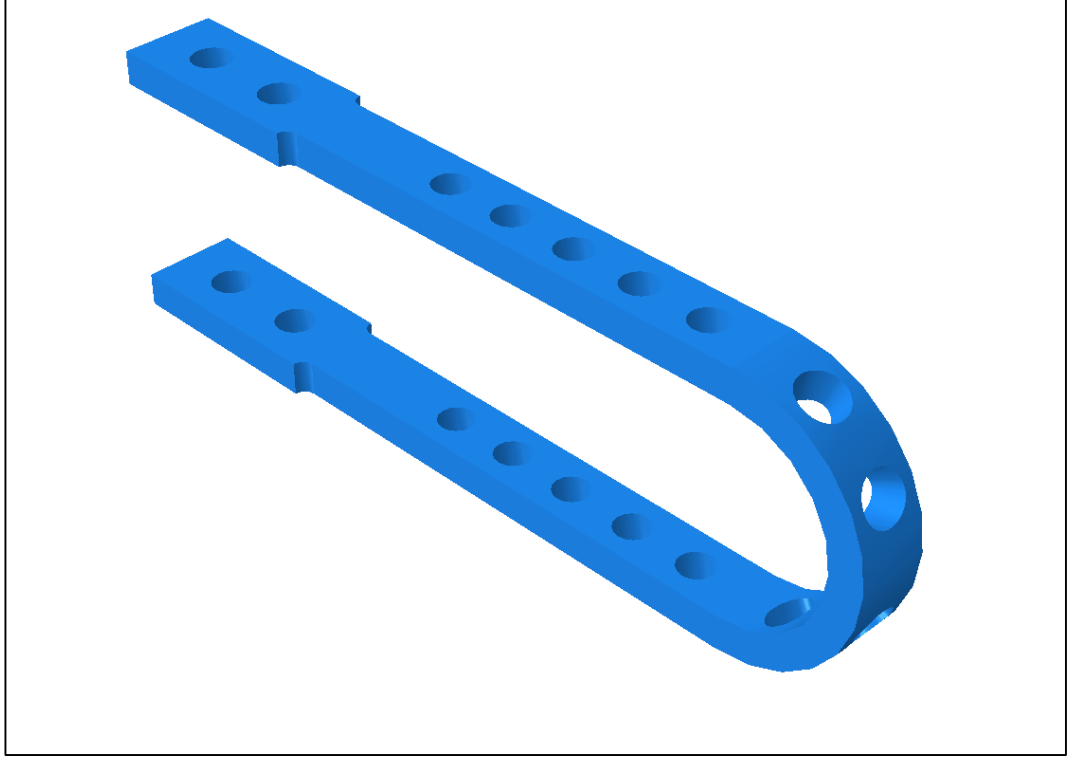
A.9.3 Sonlu elemanlar modeli sonuçları



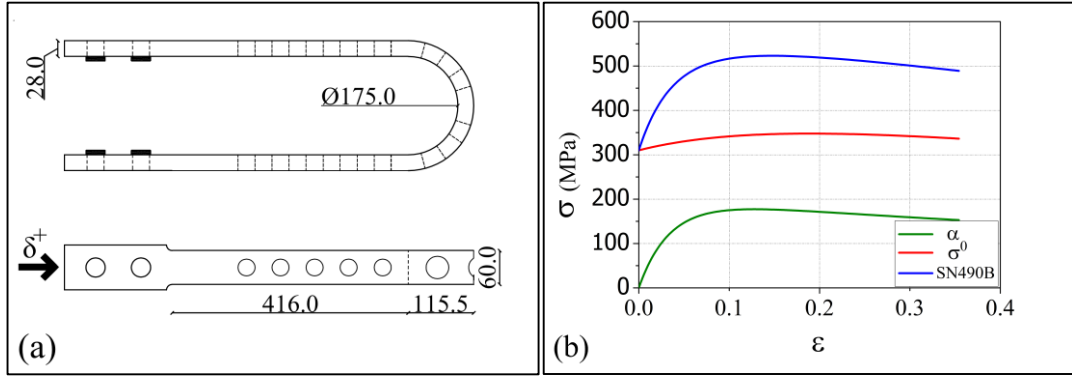
Şekil A.56 : a) Efektif rijitlik. b) Efektif sönüm. c) Maksimum deplasmandaki yatay kuvvet. d) Kümülatif histeretik enerji. e) Yükleme grafiği.

A.10 UDK5 Sönümleyici

A.10.1 Geometri ve Malzeme

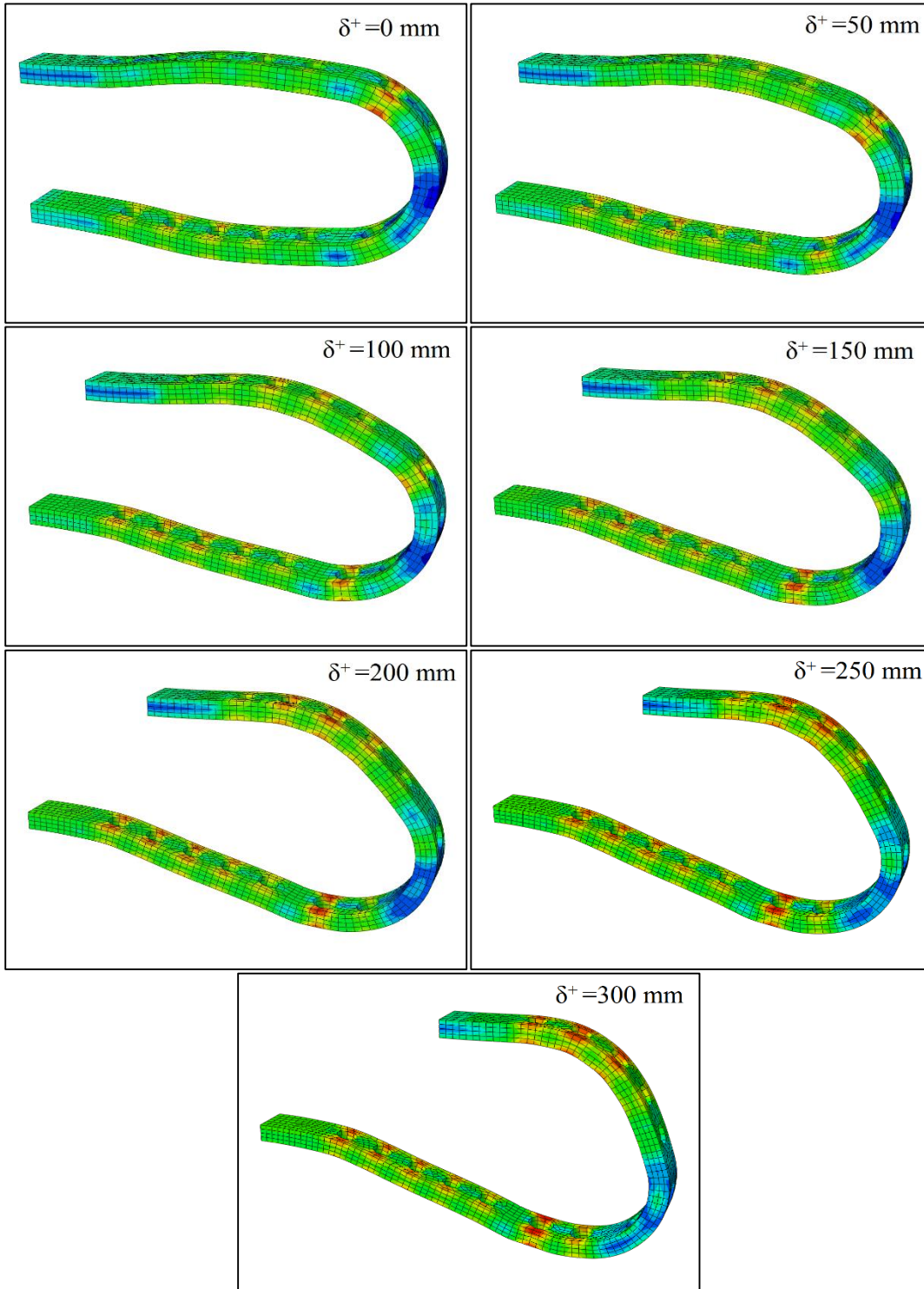


Şekil A.57 : Üç boyutlu model.

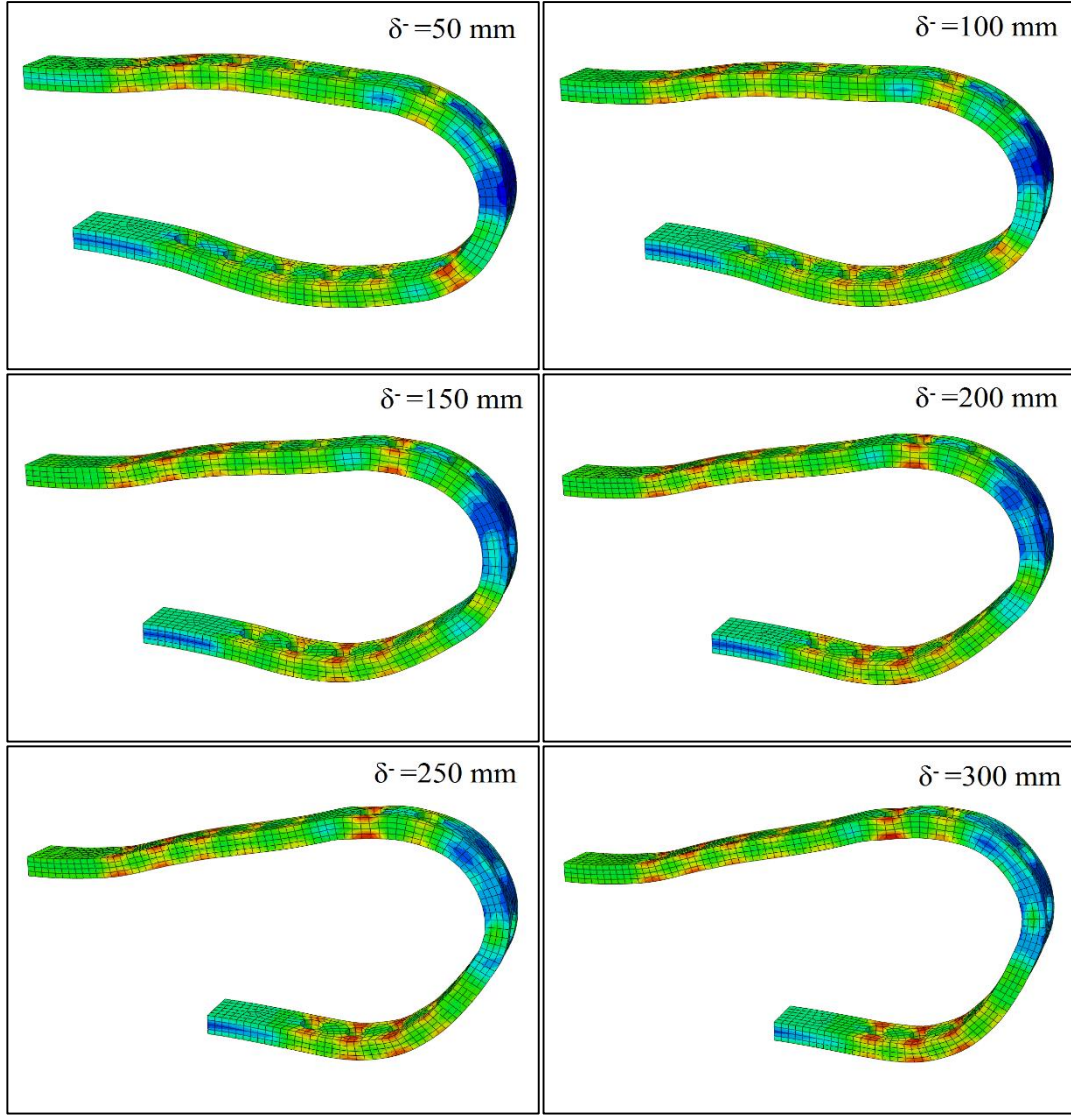


Şekil A.58 : (a) Sönümleyici boyutları – Yükleme yönü. (b) Malzeme özellikleri.

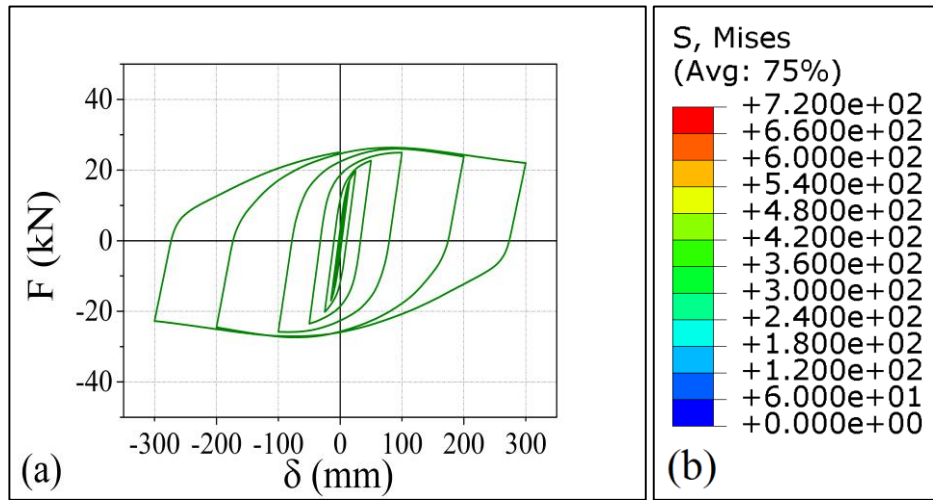
A.10.2 Sonlu elemanlar modeli



Şekil A.59 : Son çevrime ilişkin gerilme ve yerdeğiştirme durumları.

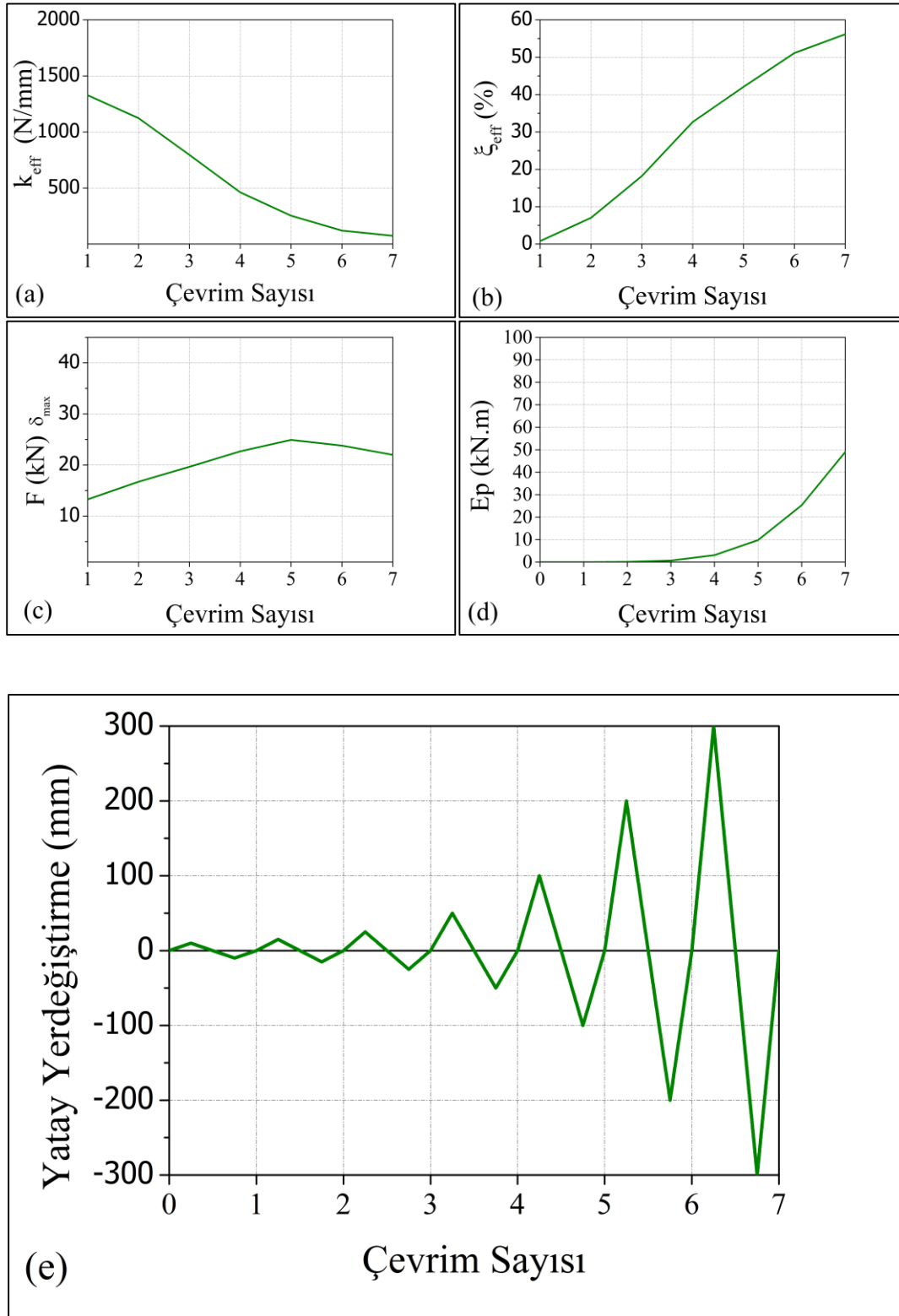


Şekil A.60 : Son çevrime ilişkin gerilme ve yerdeğiştirme durumları.



Şekil A.61 : (a) Histeretik eğrisi. (b) Gerçek gerilme değerleri (MPa).

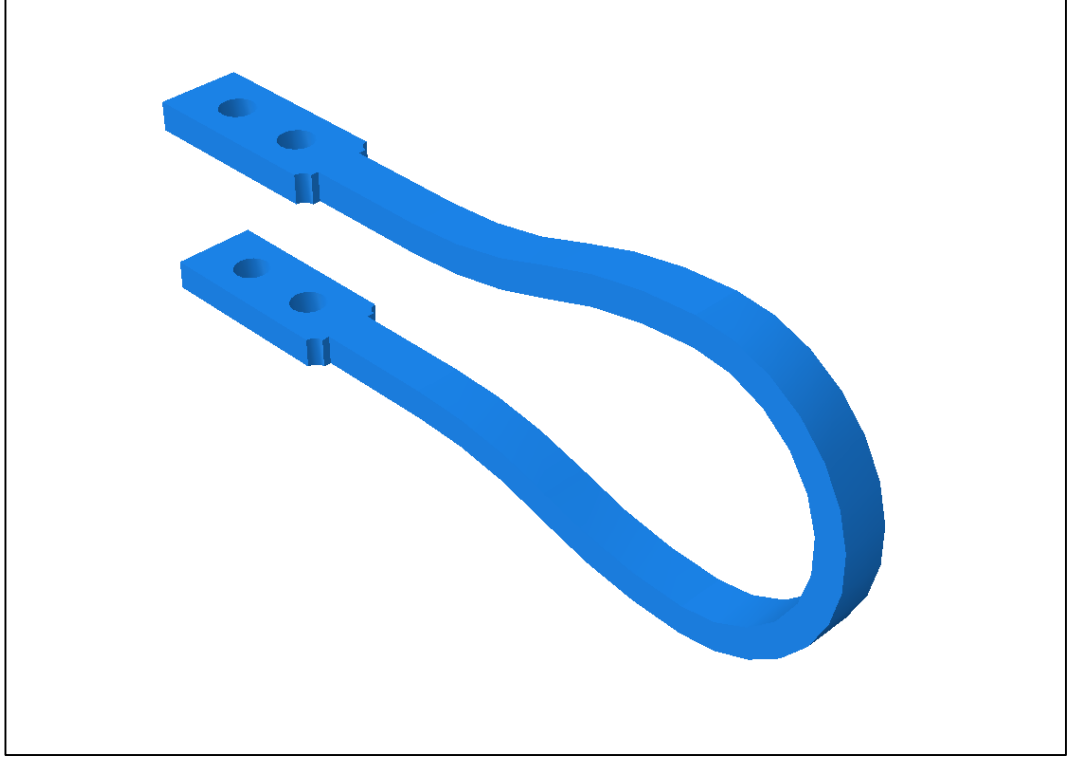
A.10.3 Sonlu elemanlar modeli sonuçları



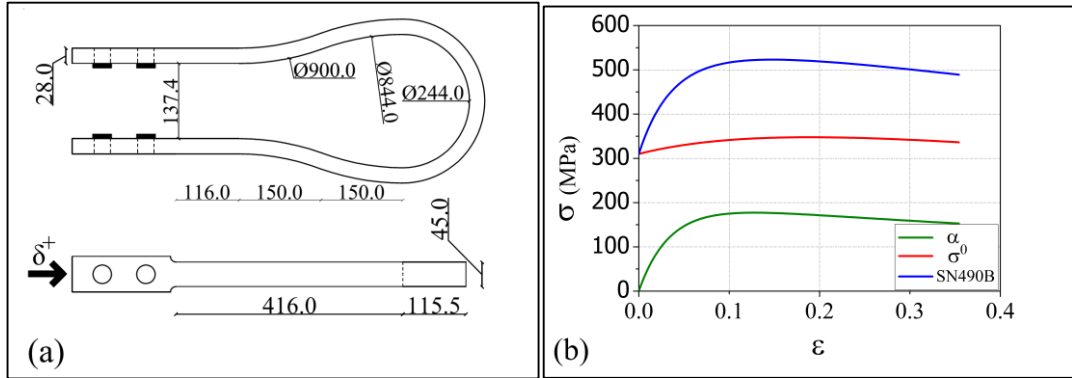
Şekil A.62 : a) Efektif rijitlik. b) Efektif sönüm. c) Maksimum deplasmandaki yatay kuvvet. d) Kümülatif histeretik enerji. e) Yükleme grafiği.

A.11 UDF1 Sönümleyici

A.11.1 Geometri ve malzeme

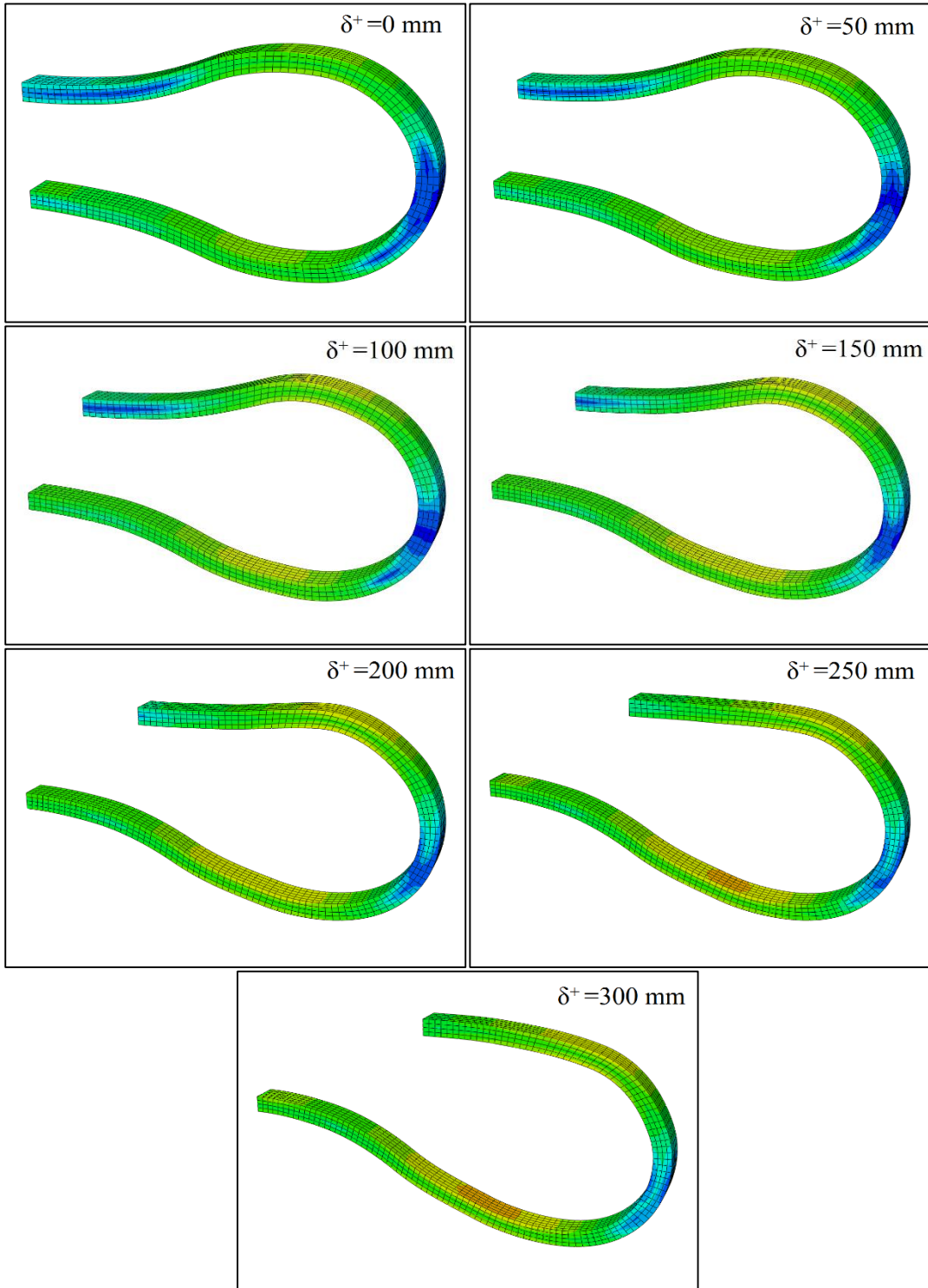


Şekil A.63 : Üç boyutlu model.

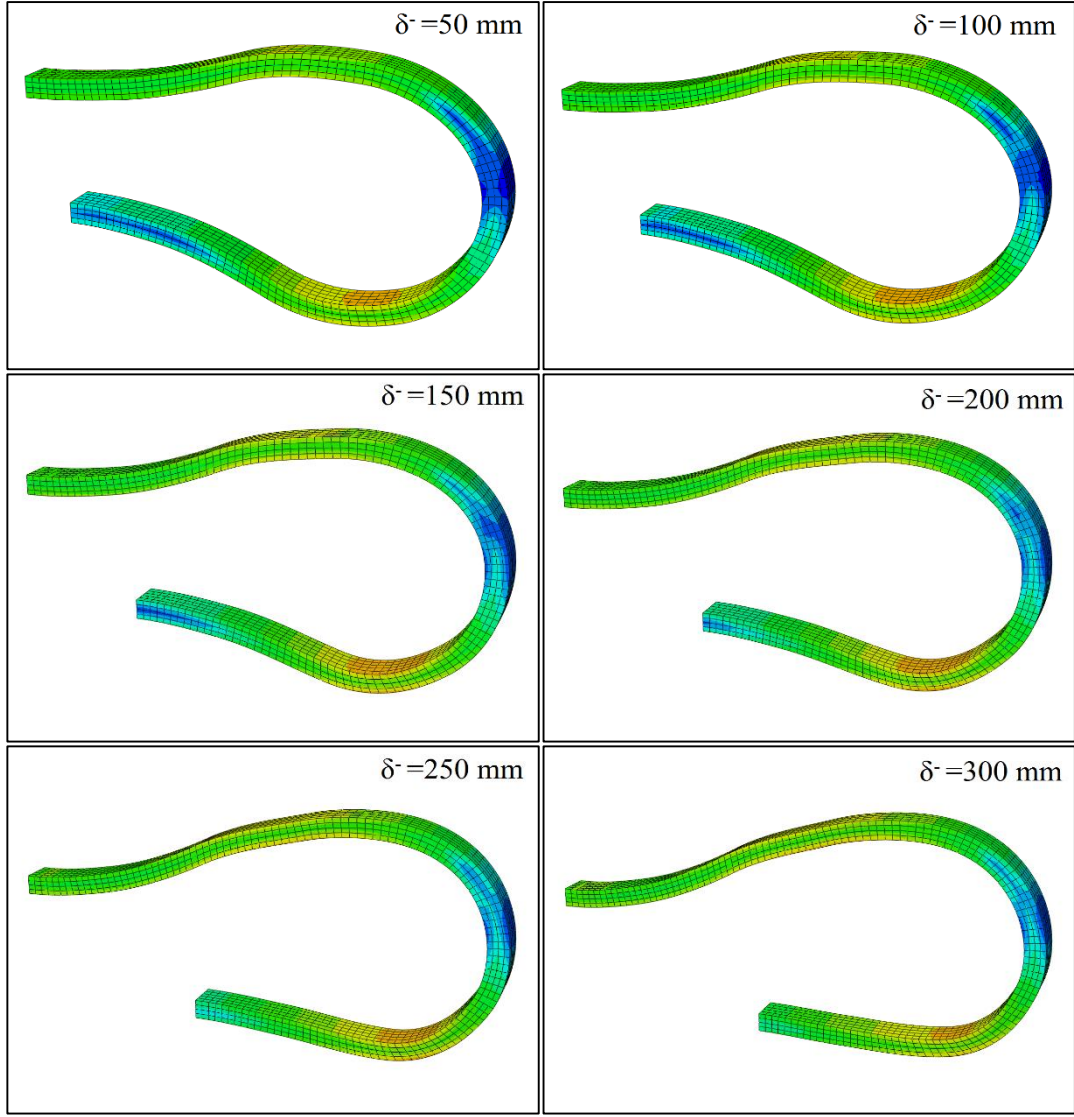


Şekil A.64 : (a) Sönümleyici boyutları – Yükleme yönü. (b) Malzeme özellikleri.

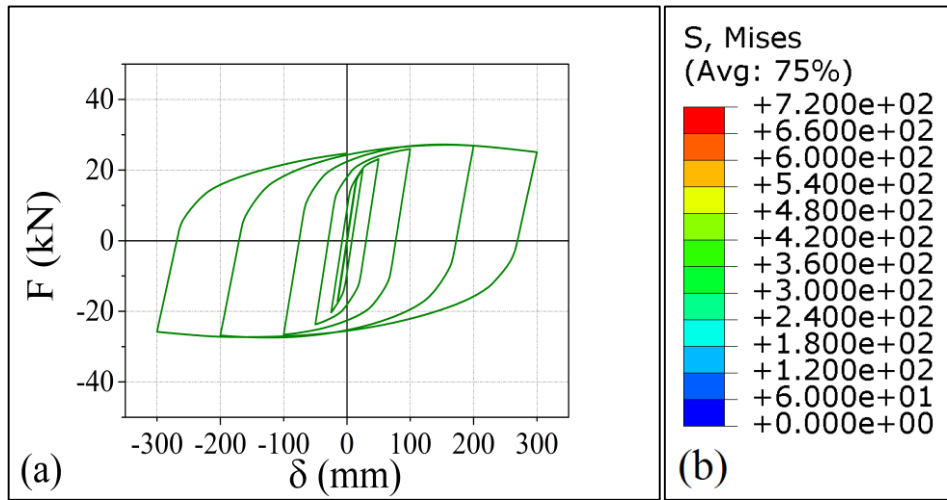
A.11.2 Sonlu elemanlar modeli



Şekil A.65 : Son çevrime ilişkin gerilme ve yerdeğiştirme durumları.

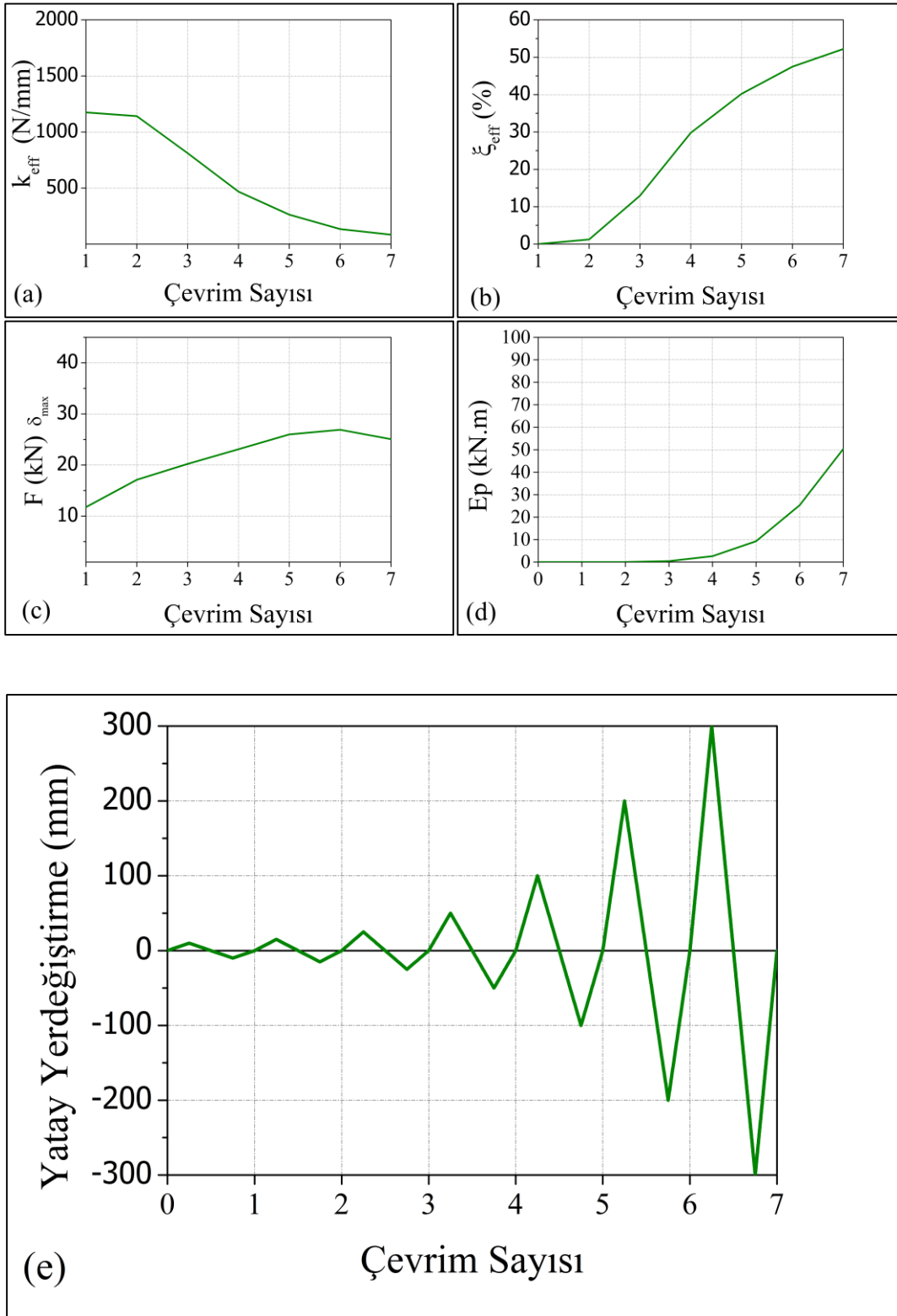


Şekil A.66 : Son çevrime ilişkin gerilme ve yerdeğiştirme durumları.



Şekil A.67 : (a) Histeretik eğrisi. (b) Gerçek gerilme değerleri (MPa).

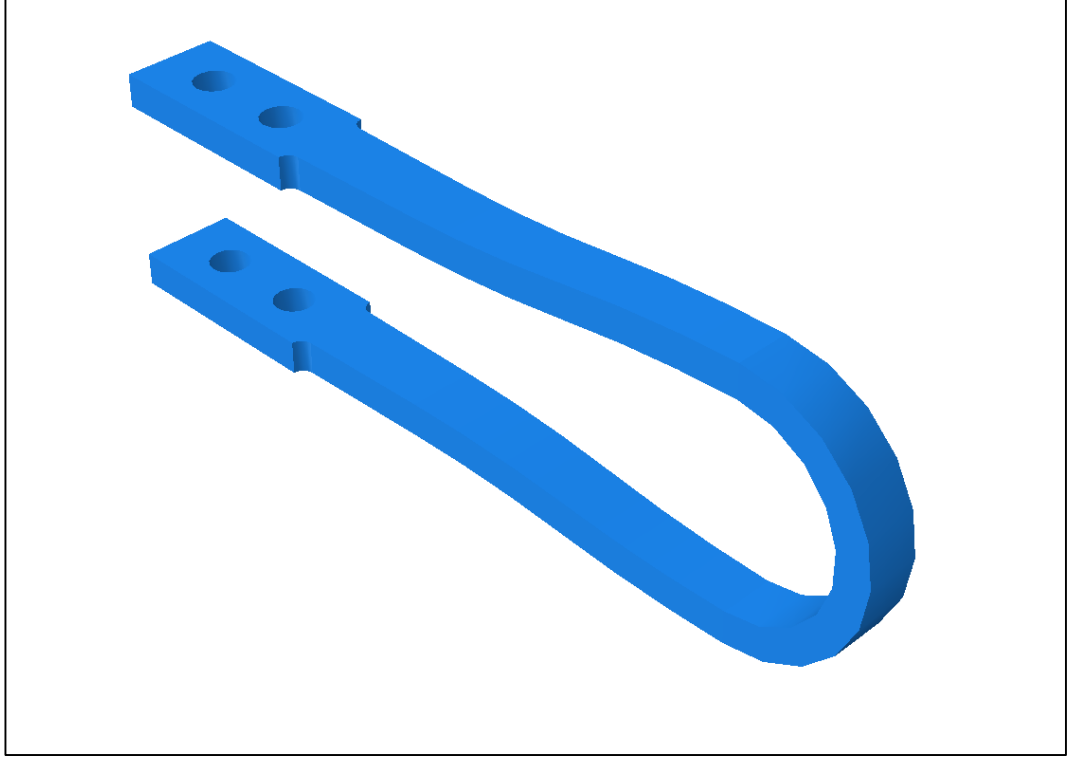
A.11.3 Sonlu elemanlar modeli sonuçları



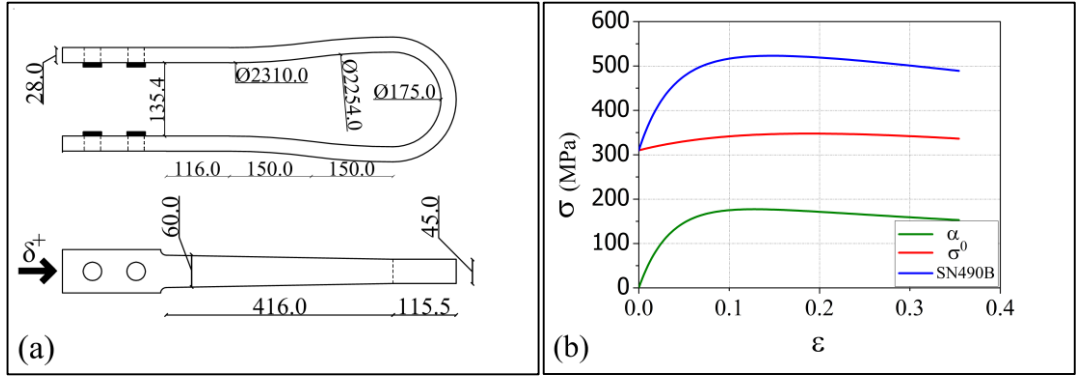
Şekil A.68 : a) Efektif rijitlik. b) Efektif sönüm. c) Maksimum deplasmandaki yatay kuvvet. d) Kümülatif histeretik enerji. e) Yükleme grafiği.

A.12 UDF2 Sönümleyici

A.12.1 Geometri ve malzeme

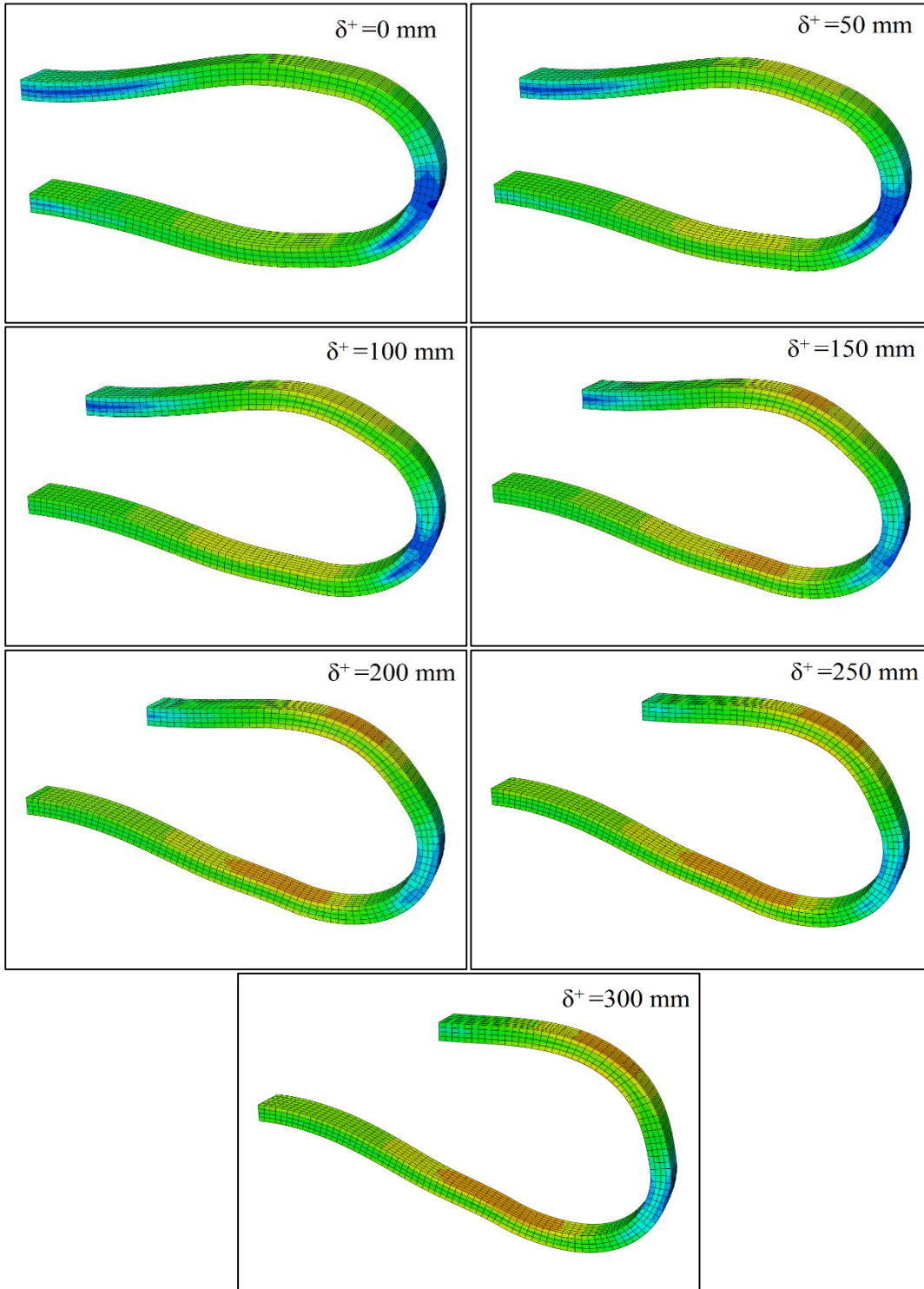


Şekil A.69 : Üç boyutlu model.

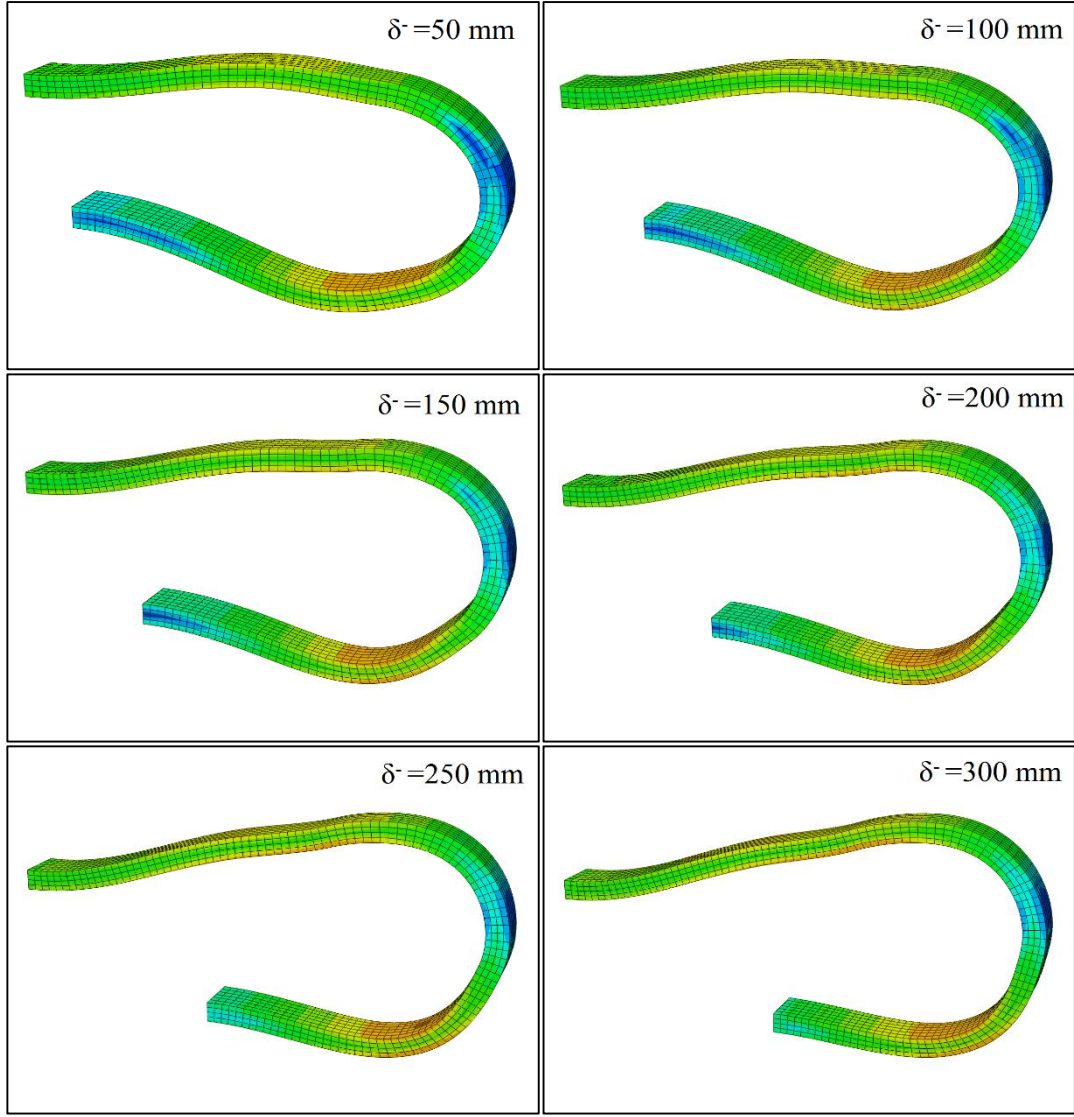


Şekil A.70 : (a) Sönümleyici boyutları – Yükleme yönü. (b) Malzeme özellikleri.

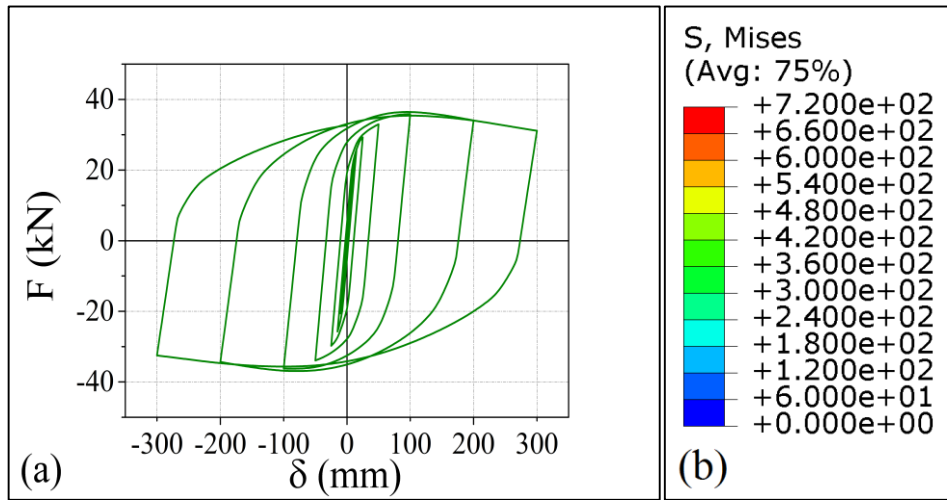
A.12.2 Sonlu elemanlar modeli



Şekil A.71 : Son çevrime ilişkin gerilme ve yerdeğiştirme durumları.

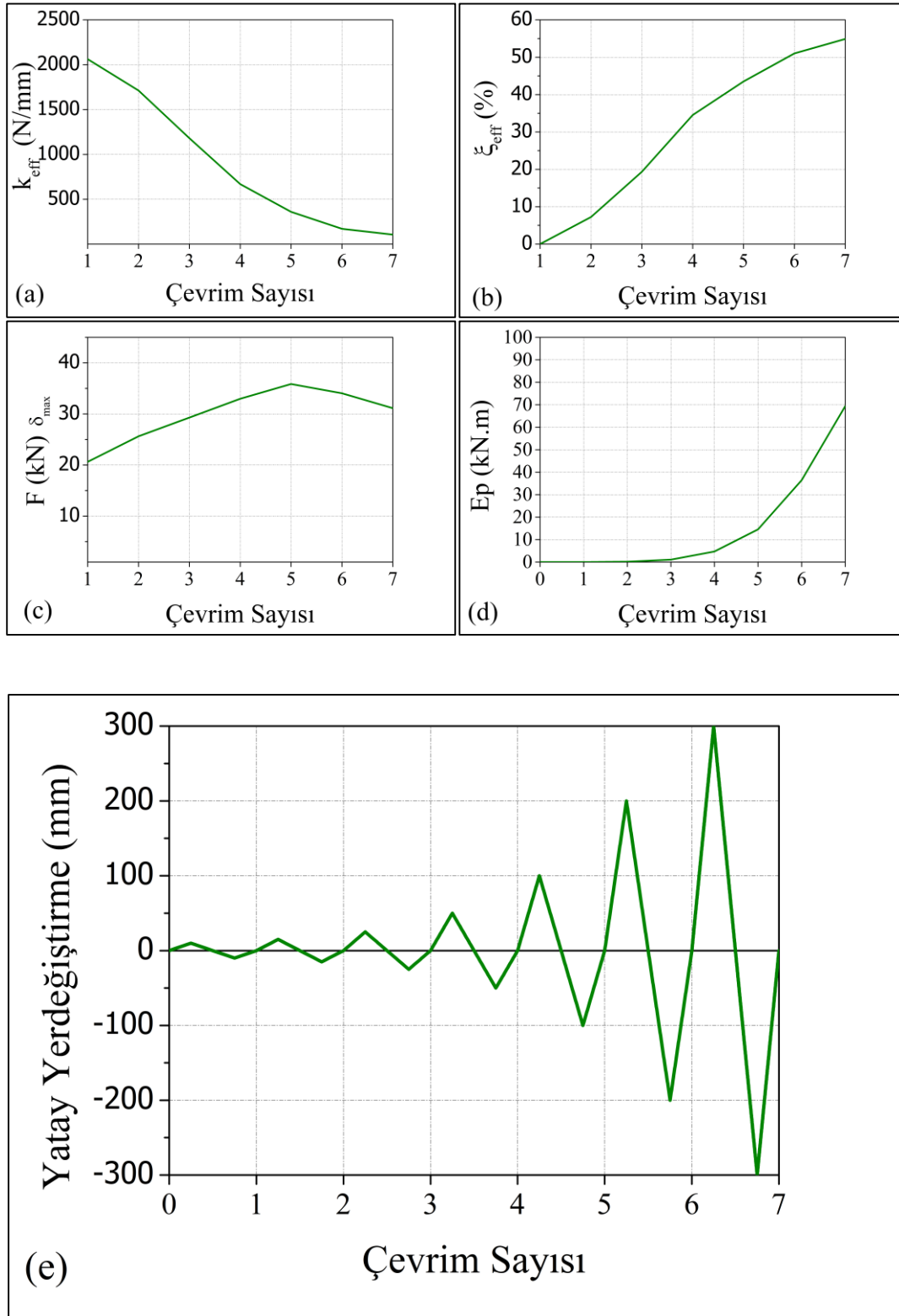


Şekil A.72 : Son çevrime ilişkin gerilme ve yerdeğiştirme durumları.



Şekil A.73 : (a) Histeretik eğrisi. (b) Gerçek gerilme değerleri (MPa).

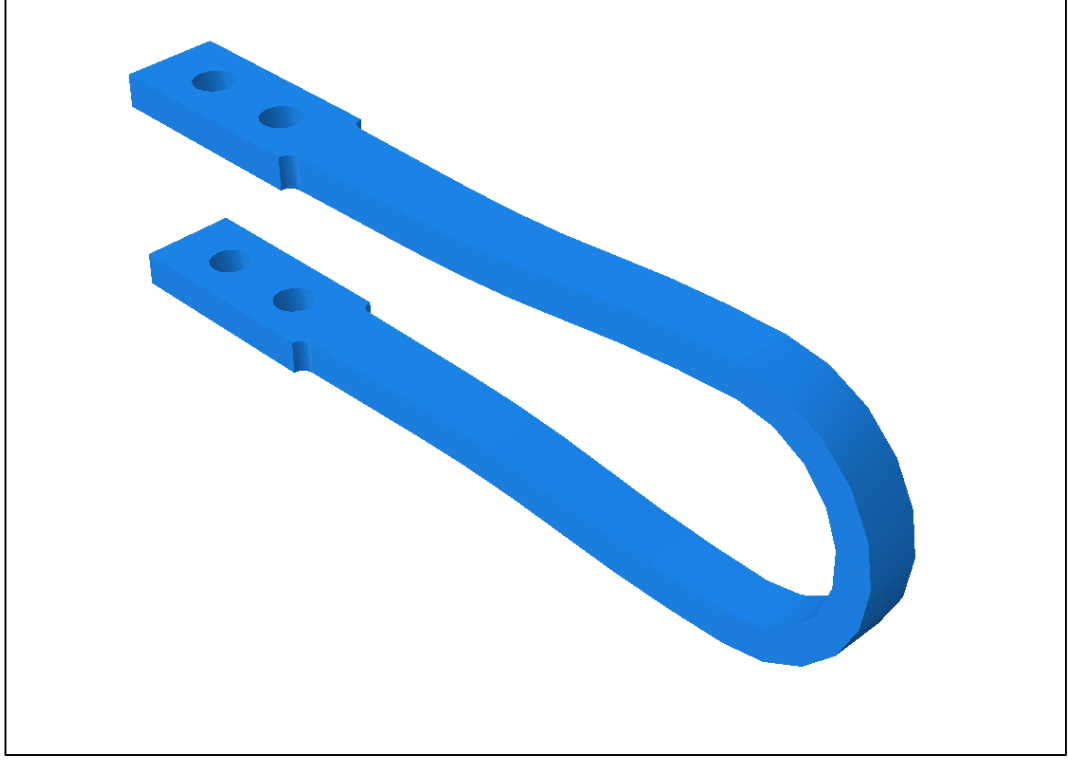
A.12.3 Sonlu elemanlar modeli sonuçları



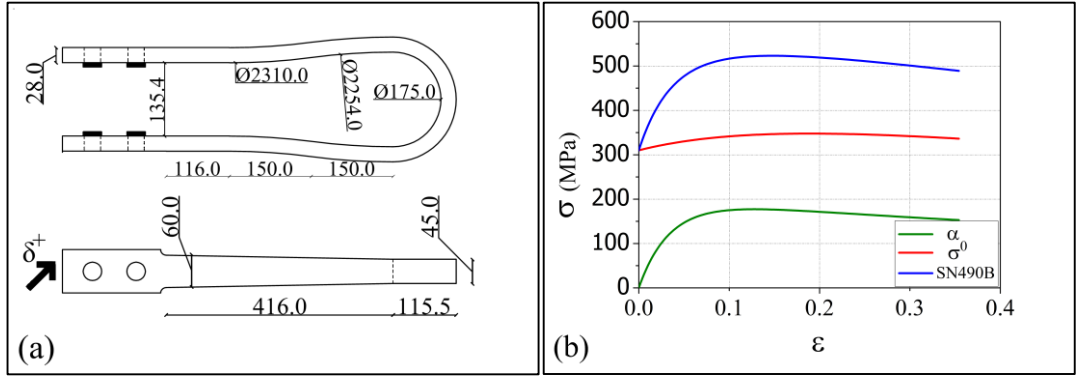
Şekil A.74 : a) Efektif rijitlik. b) Efektif sönüm. c) Maksimum deplasmandaki yatay kuvvet. d) Kümülatif histeretik enerji. e) Yükleme grafiği.

A.13 UDF2 Sönümleyici

A.13.1 Geometri ve malzeme

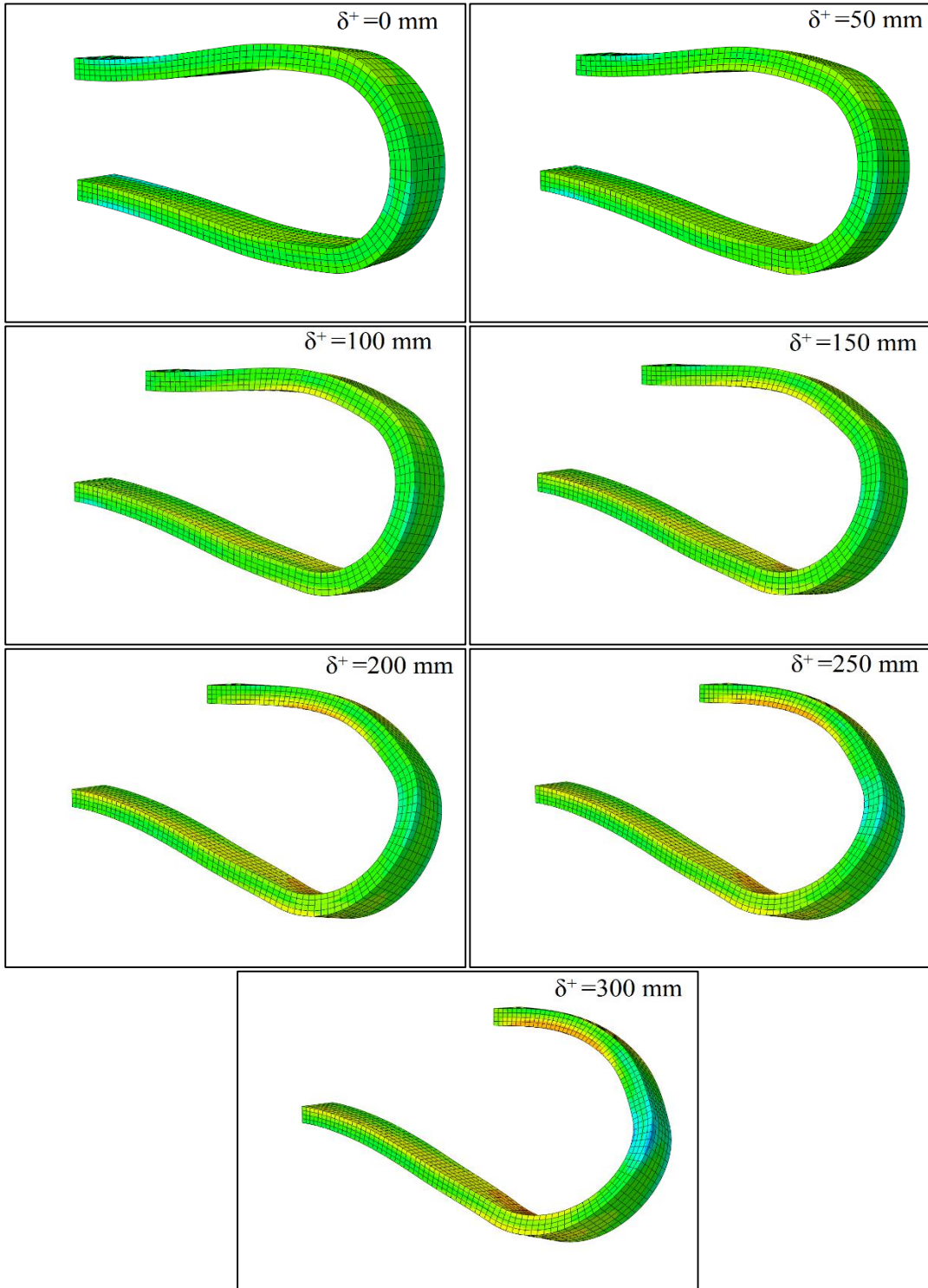


Şekil A.75 : Üç boyutlu model.

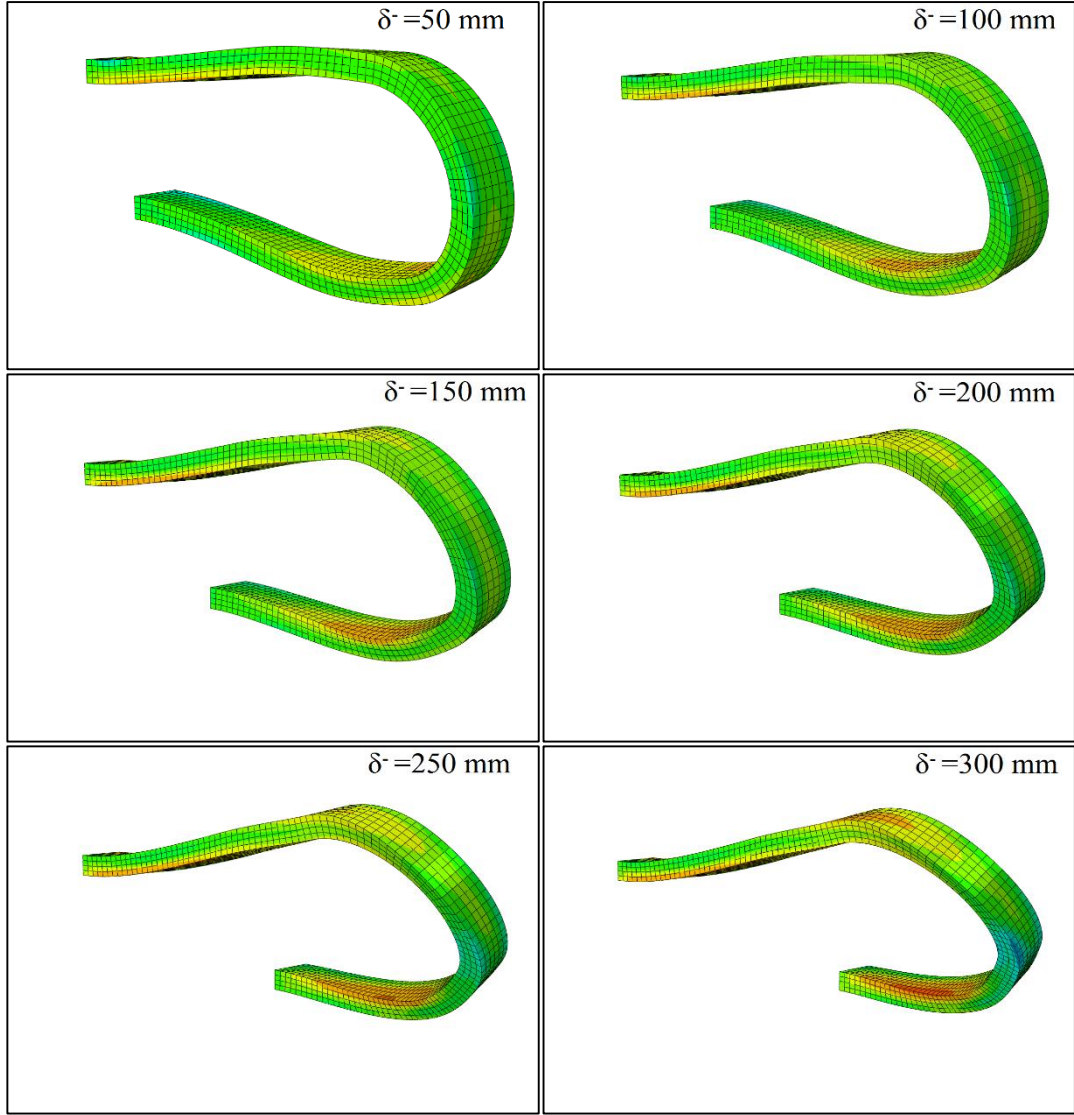


Şekil A.76 : (a) Sönümleyici boyutları – Yükleme yönü. (b) Malzeme özellikleri.

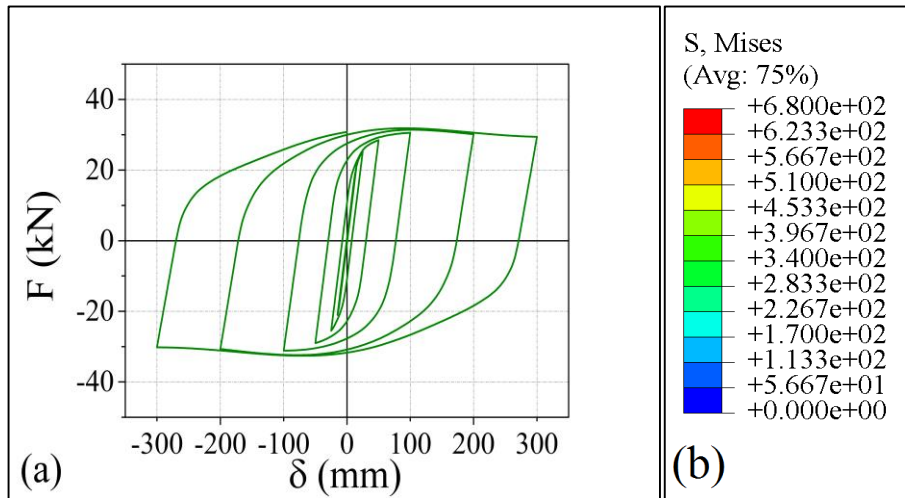
A.13.2 Sonlu elemanlar modeli



Şekil A.77 : Son çevrime ilişkin gerilme ve yerdeğiştirme durumları.

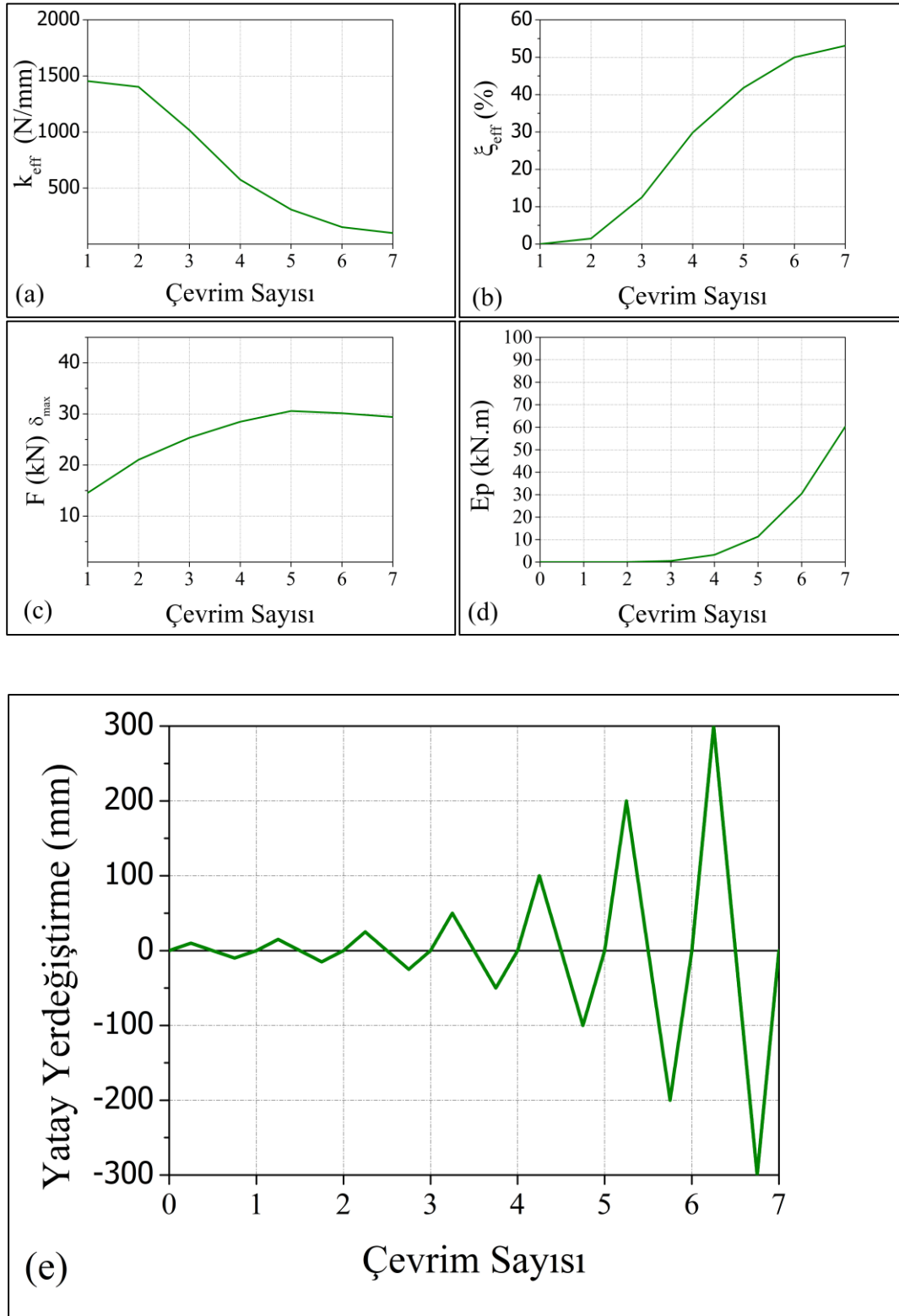


Şekil A.78 : Son çevrime ilişkin gerilme ve yerdeğiştirme durumları.



Şekil A.79 : (a) Histeretik eğrisi. (b) Gerçek gerilme değerleri (MPa).

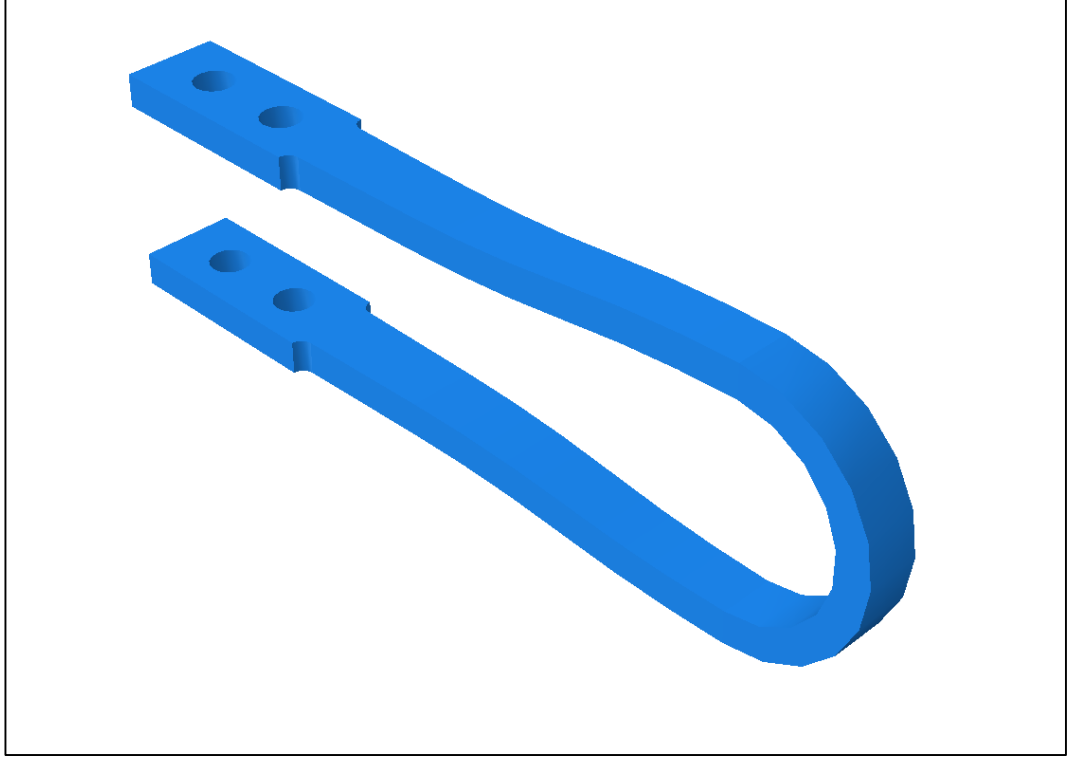
A.13.3 Sonlu elemanlar modeli sonuçları



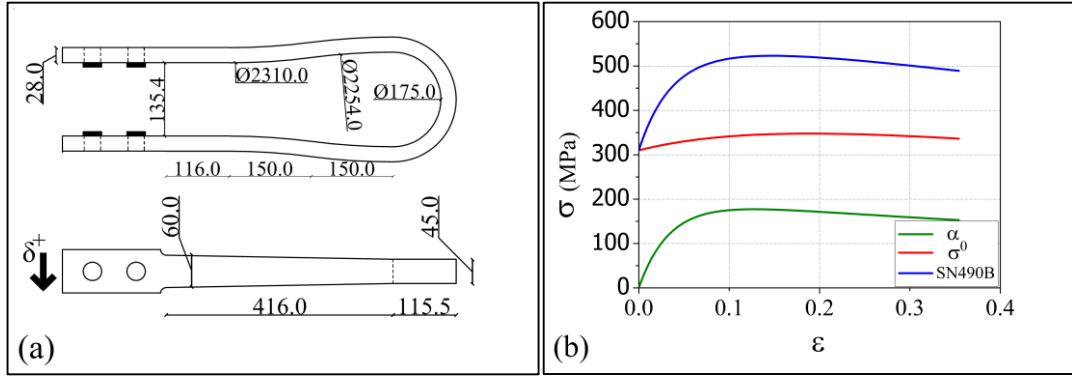
Şekil A.80 : a) Efektif rijitlik. b) Efektif sönüm. c) Maksimum deplasmandaki yatay kuvvet. d) Kümülatif histeretik enerji. e) Yükleme grafiği.

A.14 UDF2 Sönümleyici

A.14.1 Geometri ve malzeme

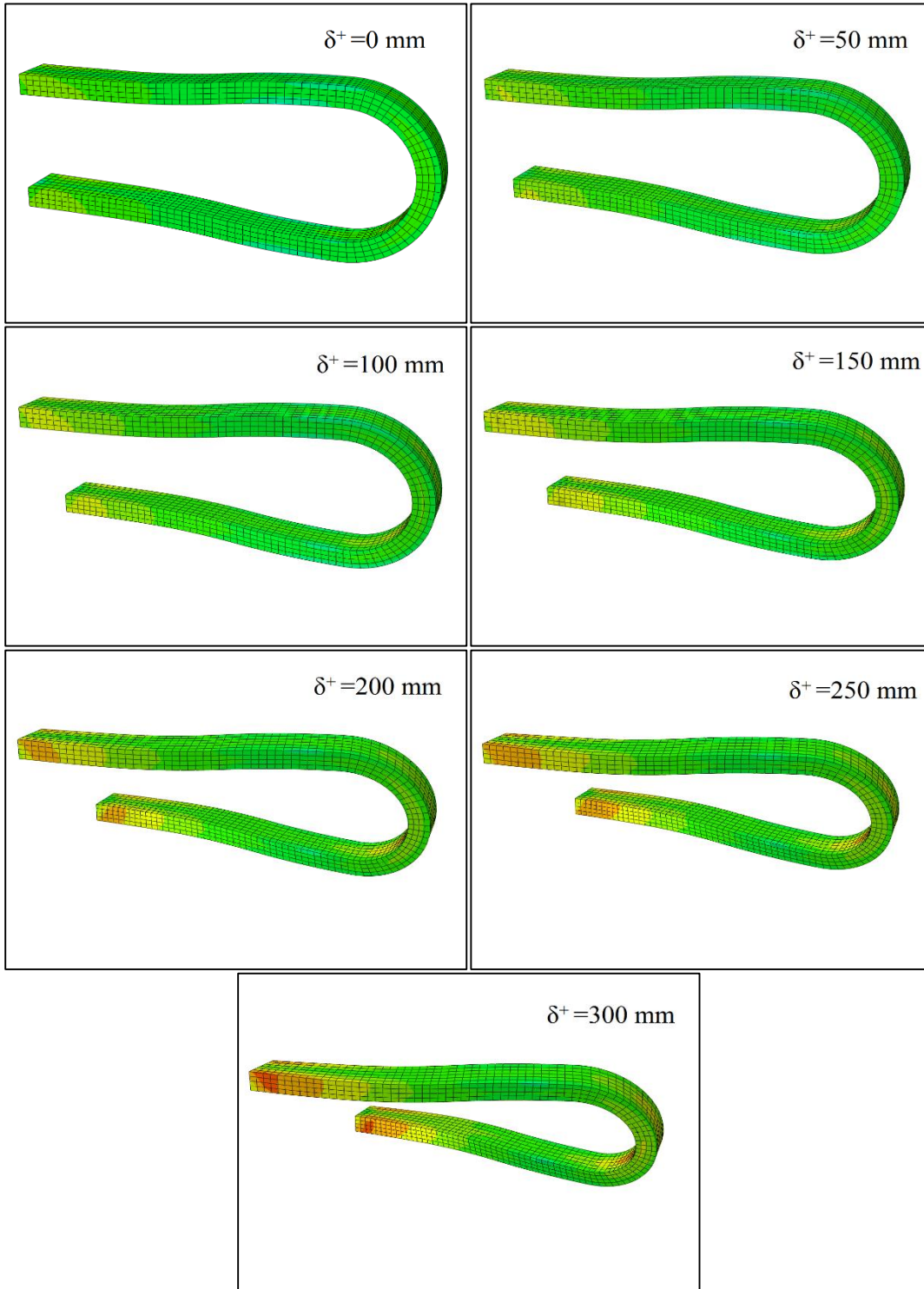


Şekil A.81 : Üç boyutlu model.

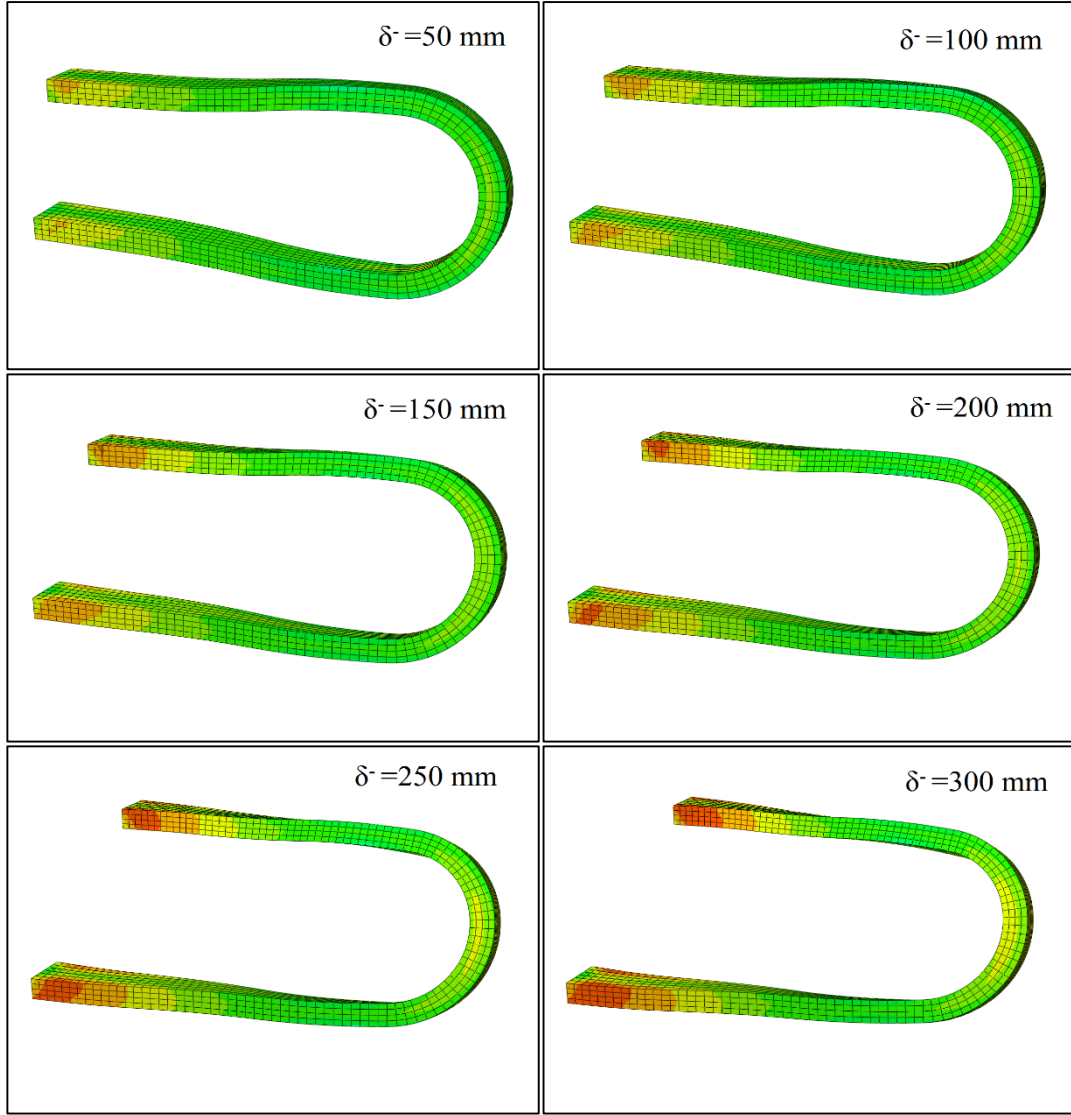


Şekil A.82 : (a) Sönümleyici boyutları – Yükleme yönü. (b) Malzeme özellikleri.

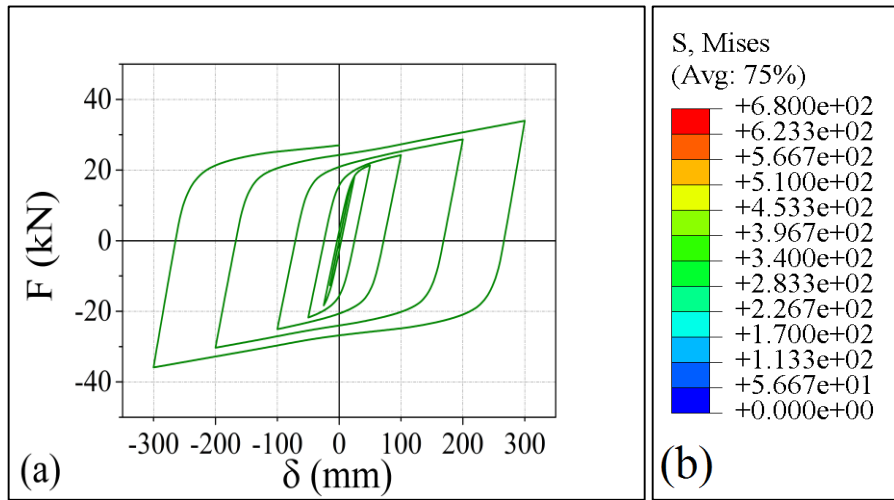
A.14.2 Sonlu elemanlar modeli



Şekil A.83 : Son çevrime ilişkin gerilme ve yerdeğiştirme durumları.

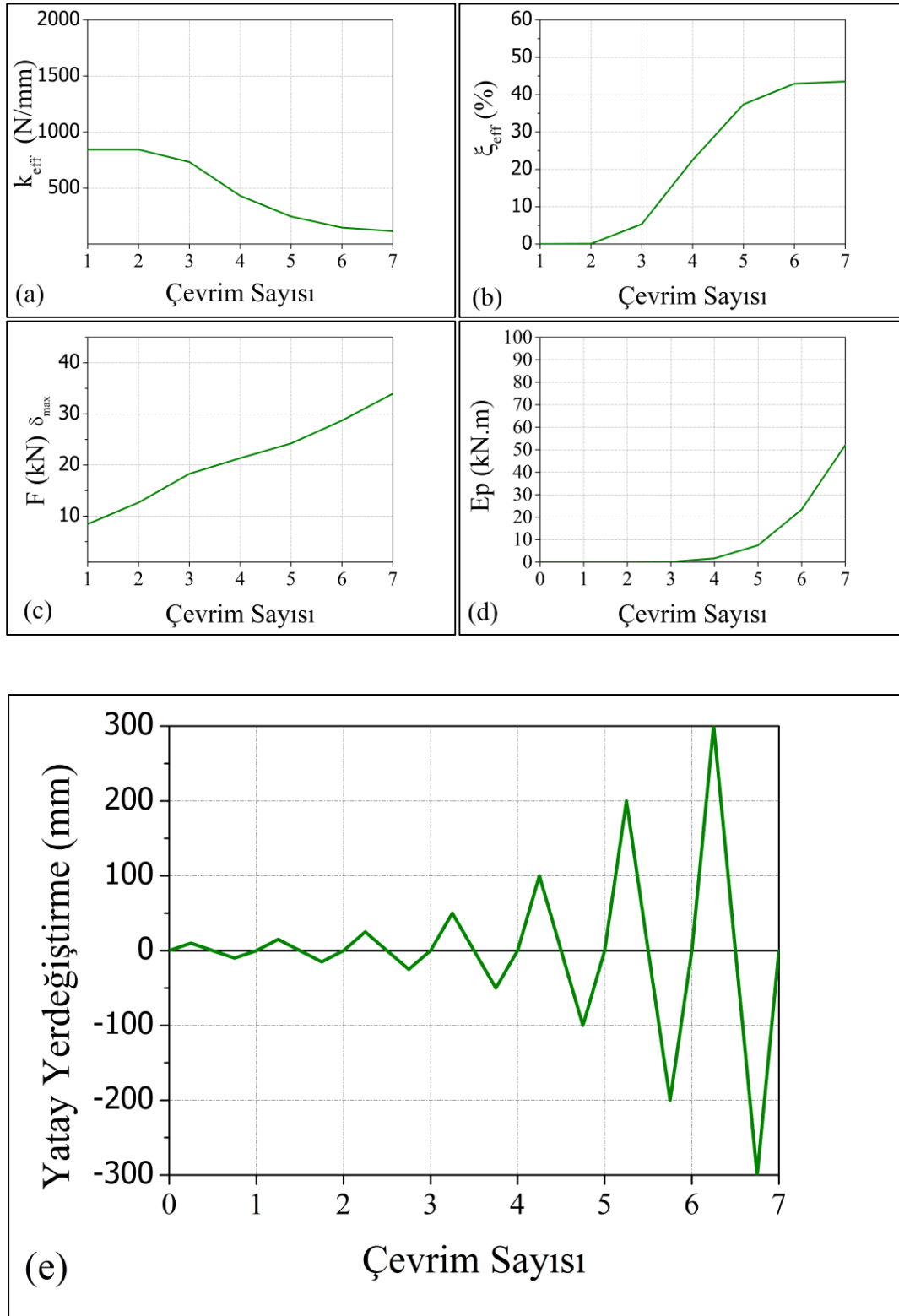


Şekil A.84 : Son çevrime ilişkin gerilme ve yerdeğiştirme durumları.



Şekil A.85 : (a) Histeretik eğrisi. (b) Gerçek gerilme değerleri (MPa).

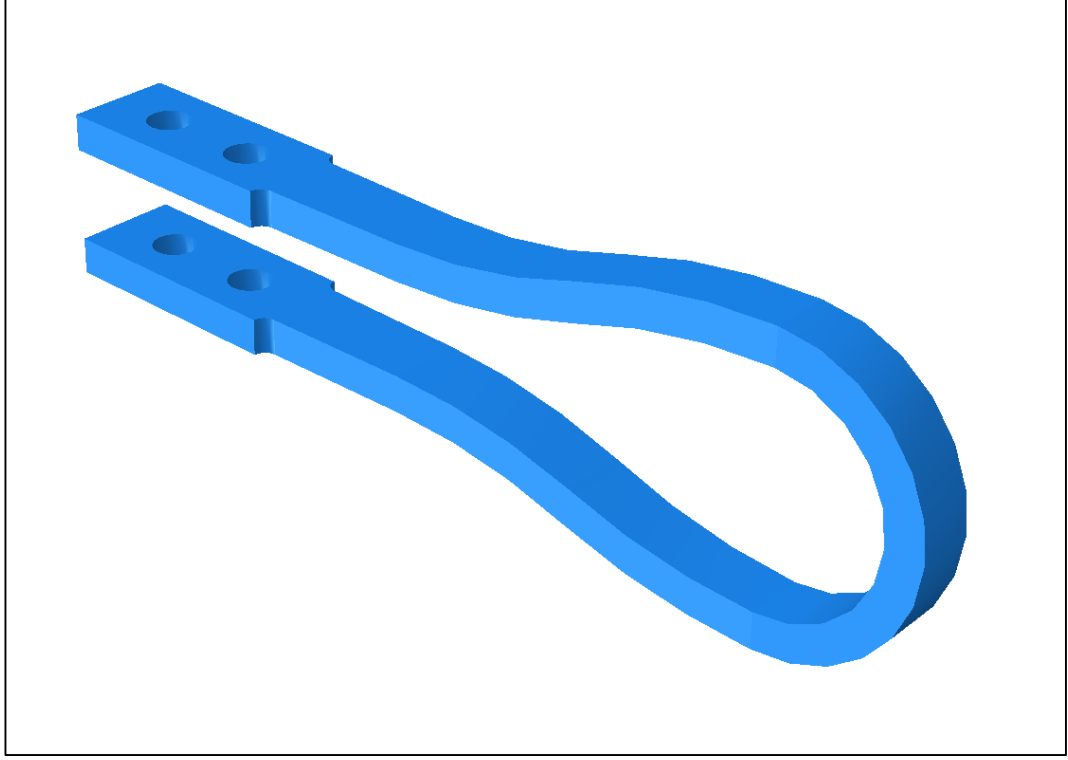
A.14.3 Sonlu elemanlar modeli sonuçları



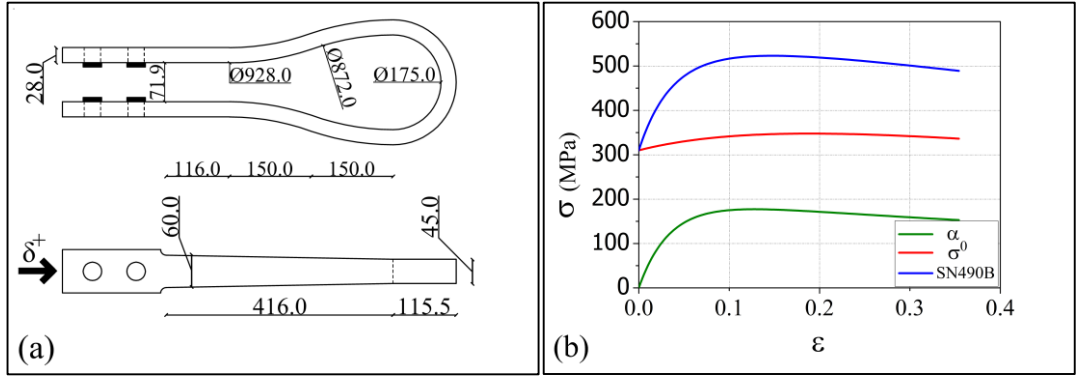
Şekil A.86 : a) Efektif rijitlik. b) Efektif sönüm. c) Maksimum deplasmandaki yatay kuvvet. d) Kümülatif histeretik enerji. e) Yükleme grafiği.

A.15 UDF3 Sönümleyici

A.15.1 Geometri ve malzeme

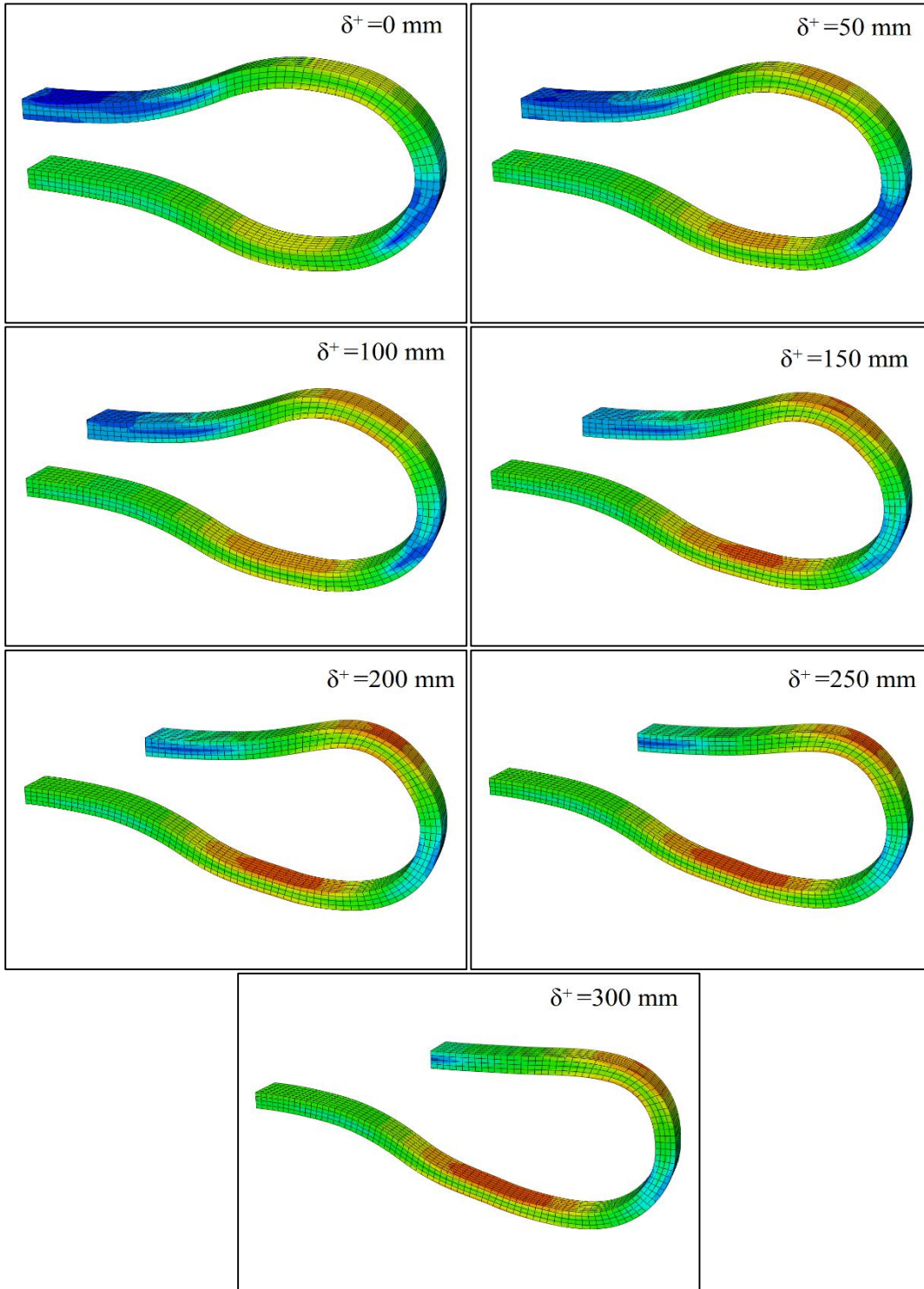


Şekil A.87 : Üç boyutlu model.

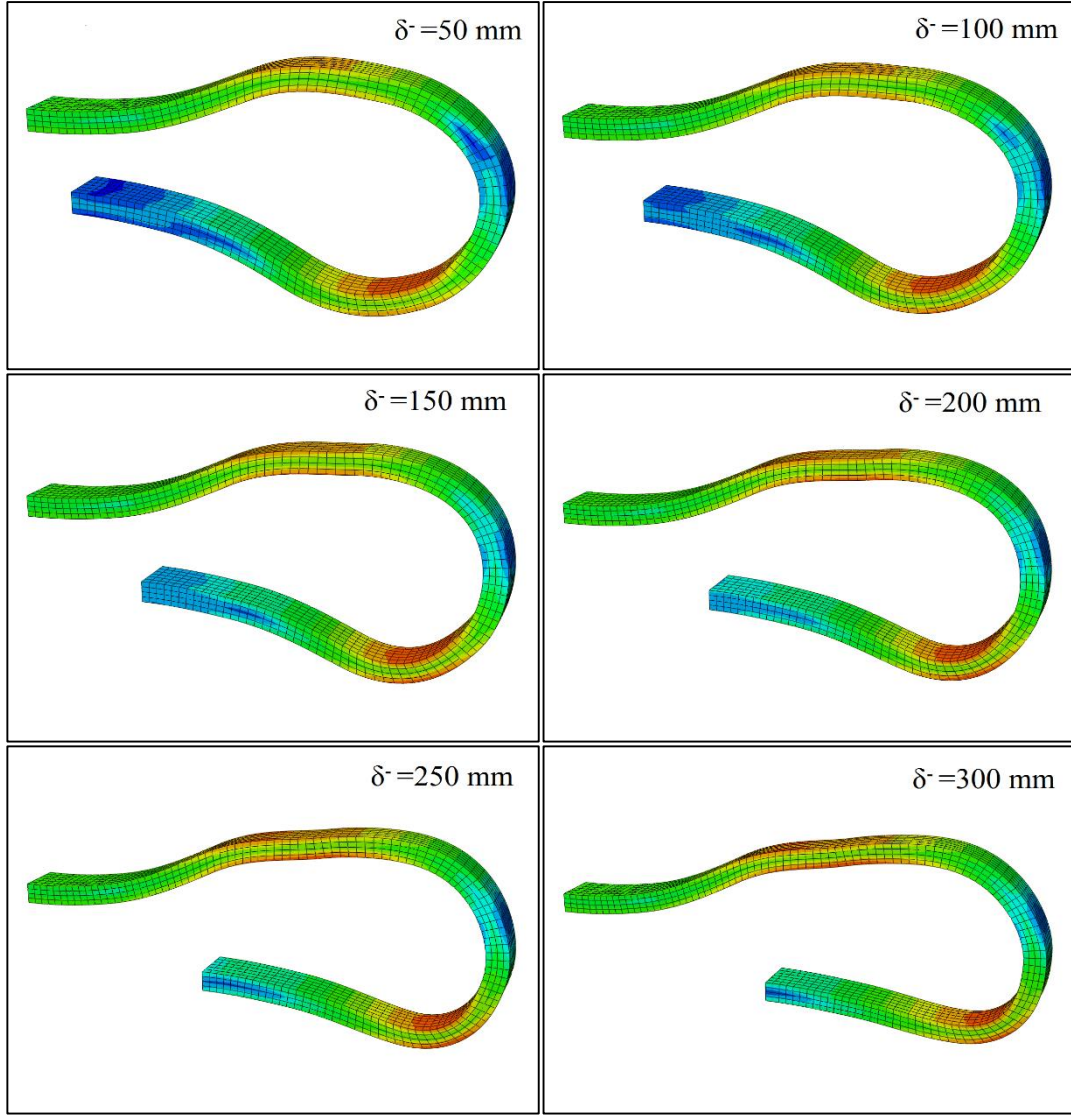


Şekil A.88 : (a) Sönümleyici boyutları – Yükleme yönü. (b) Malzeme özellikleri.

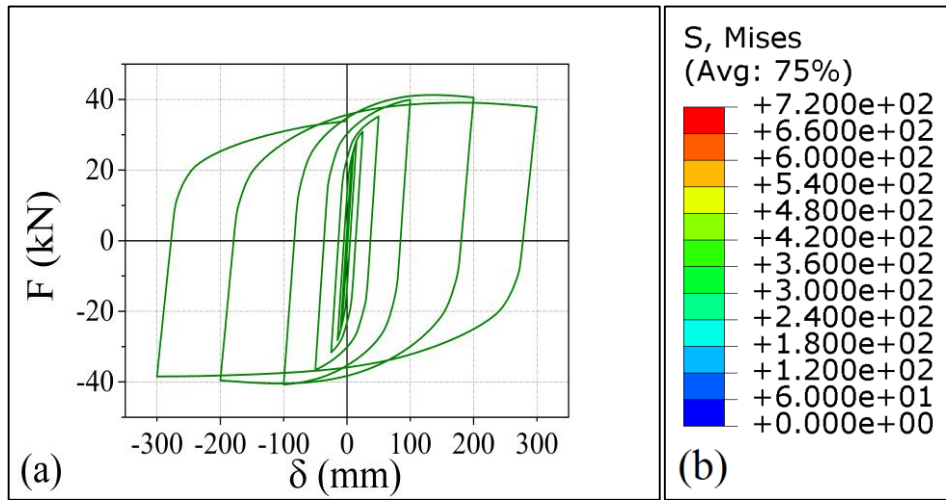
A.15.2 Sonlu elemanlar modeli



Şekil A.89 : Son çevrime ilişkin gerilme ve yerdeğiştirme durumları.

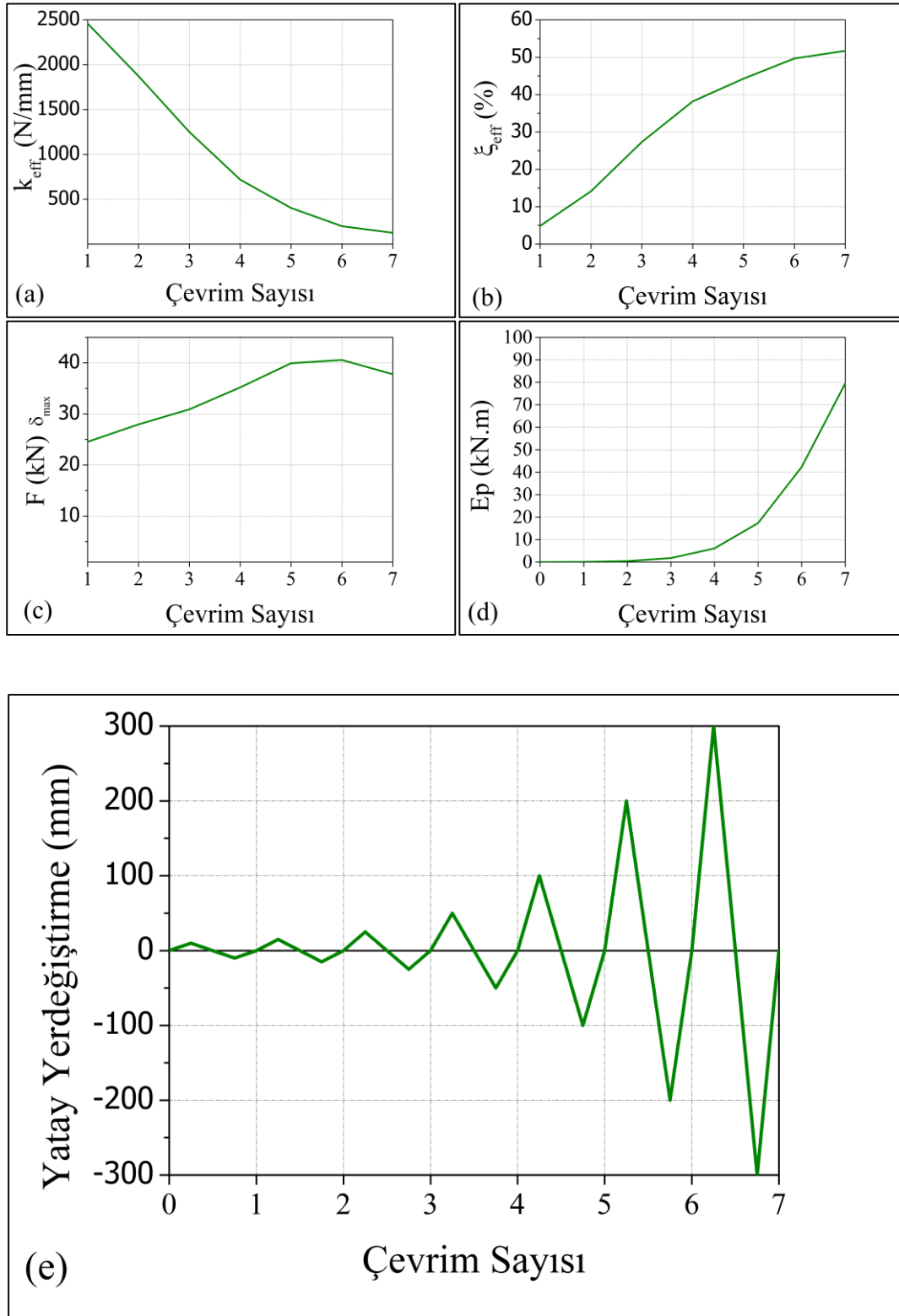


Şekil A.90 : Son çevrime ilişkin gerilme ve yerdeğiştirme durumları.



Şekil A.91 : (a) Histeretik eğrisi. (b) Gerçek gerilme değerleri (MPa).

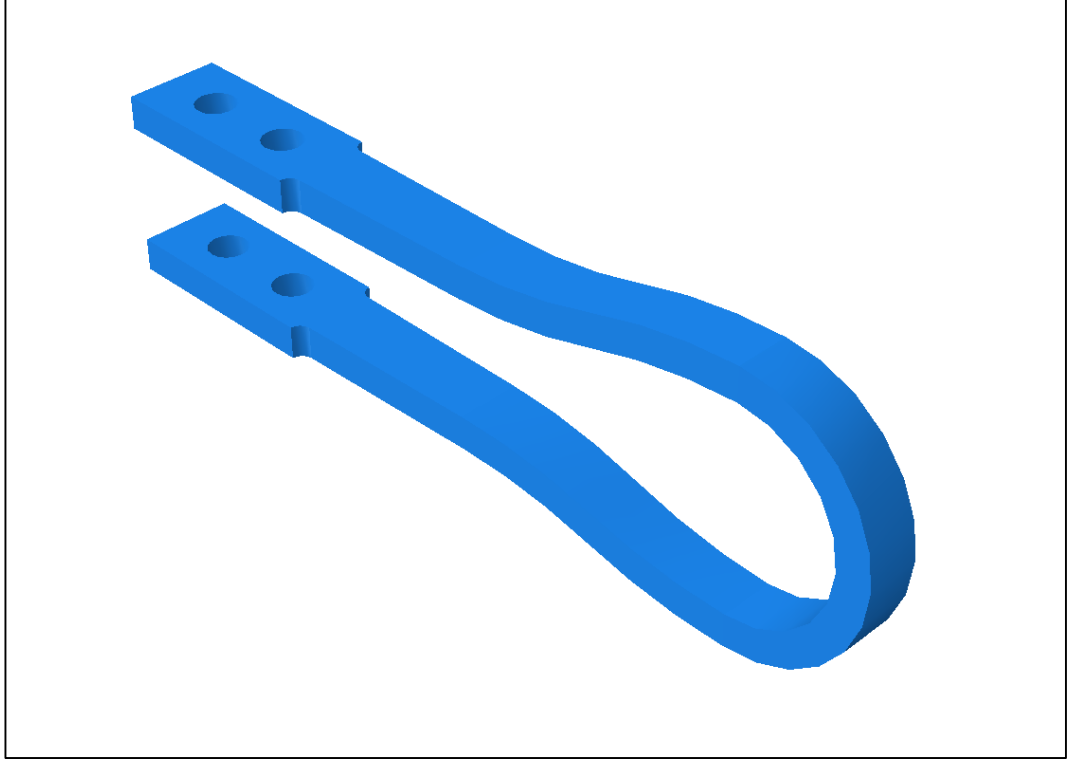
A.15.3 Sonlu elemanlar modeli sonuçları



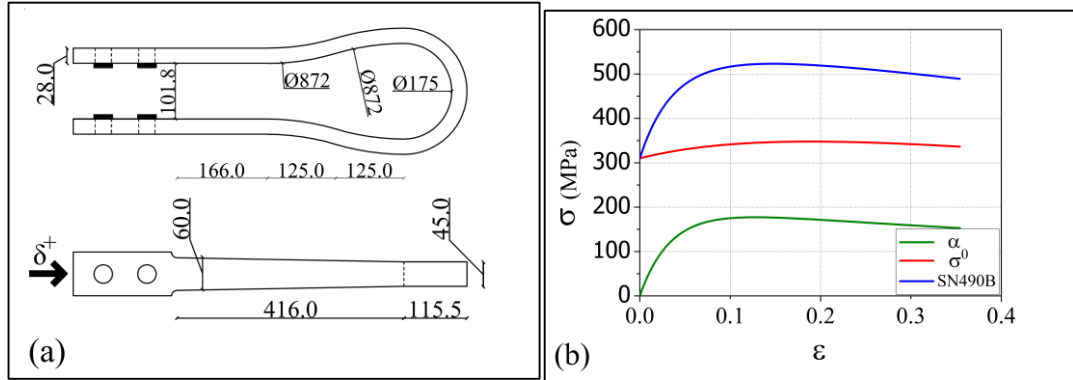
Şekil A.92 : a) Efektif rijitlik. b) Efektif sönüm. c) Maksimum deplasmandaki yatay kuvvet. d) Kümülatif histeretik enerji. e) Yükleme grafiği.

A.16 UDF4 Sönümleyici

A.16.1 Geometri ve malzeme

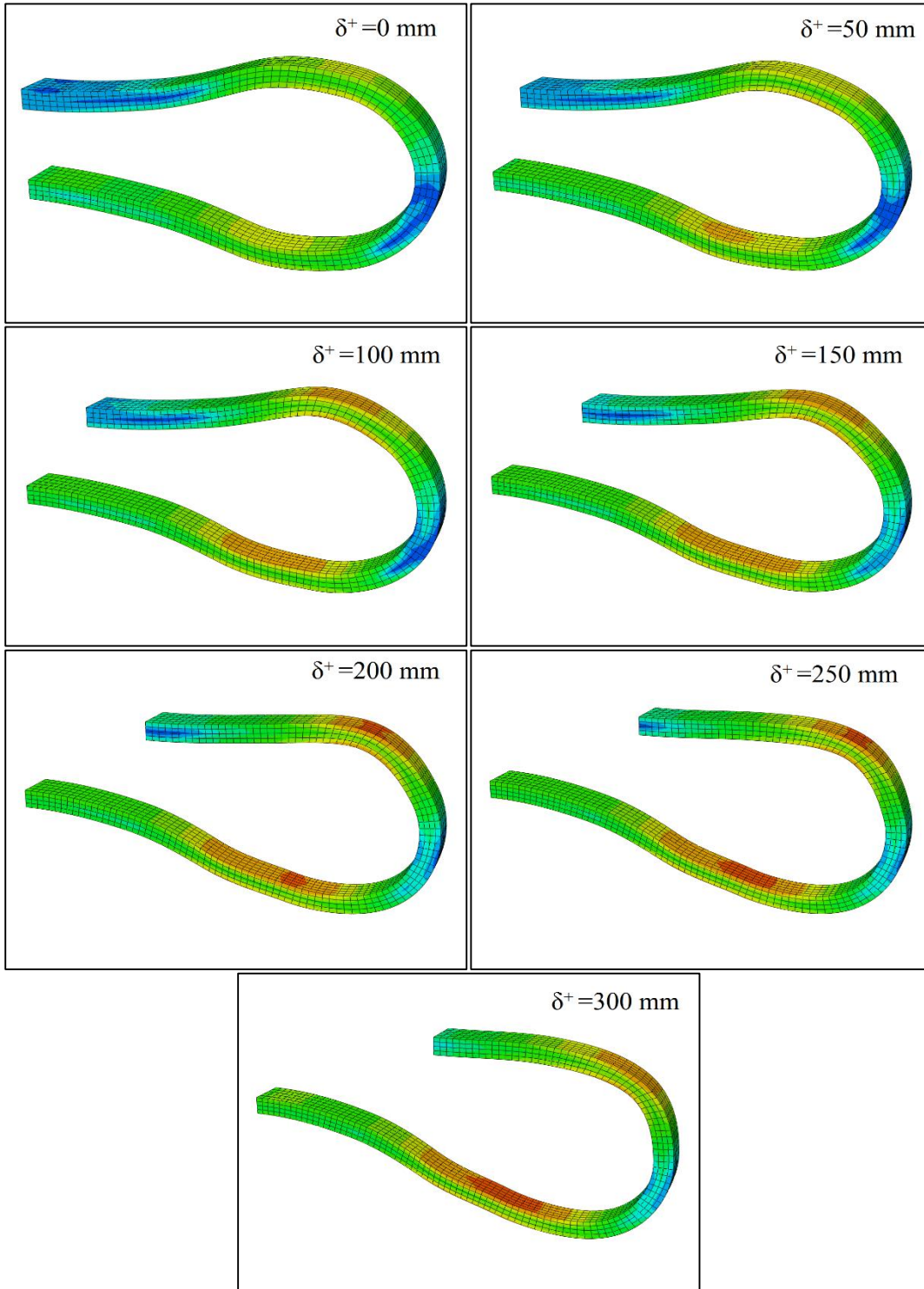


Şekil A.93 : Üç boyutlu model.

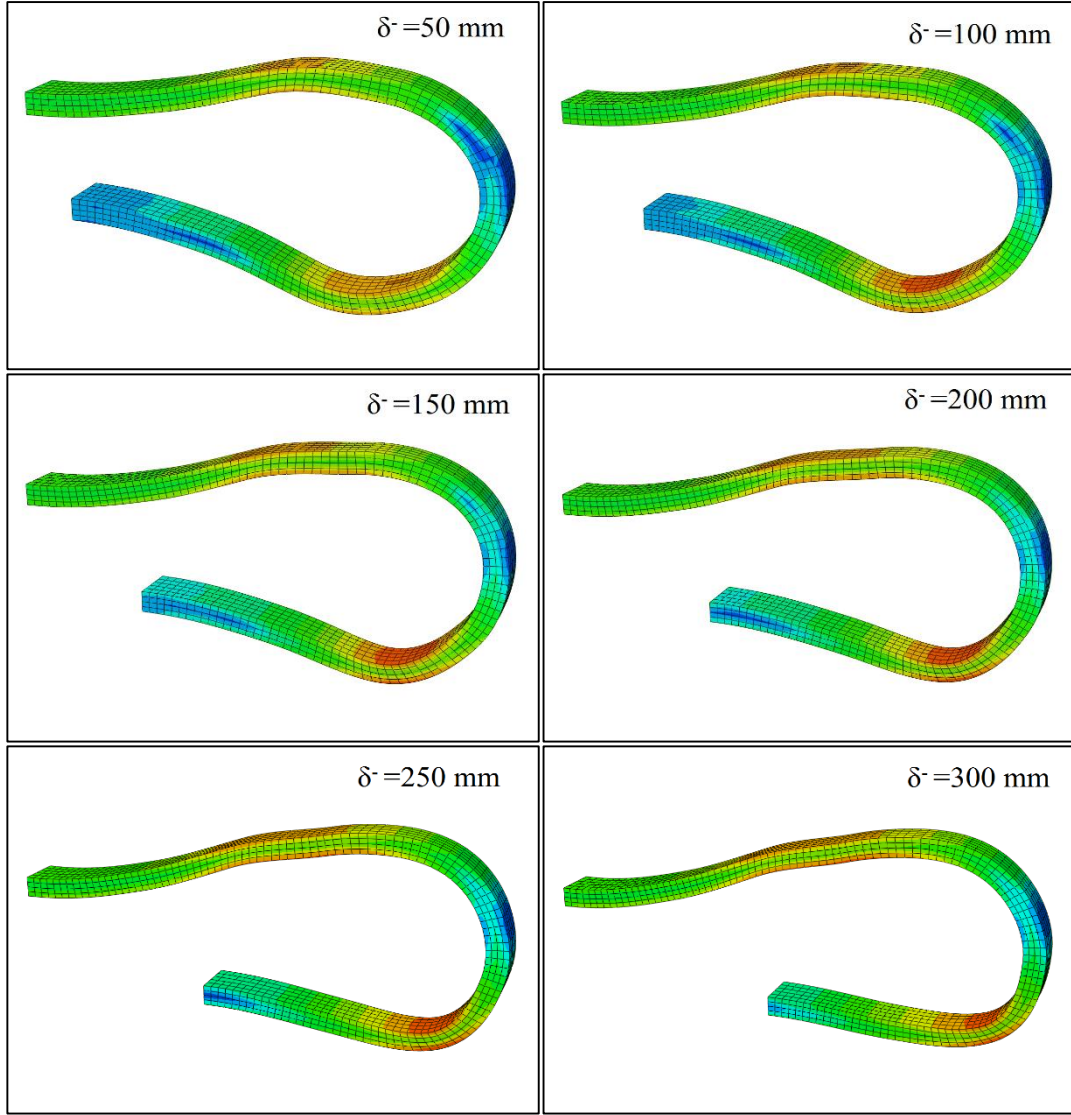


Şekil A.94 : (a) Sönümleyici boyutları – Yükleme yönü. (b) Malzeme özellikleri.

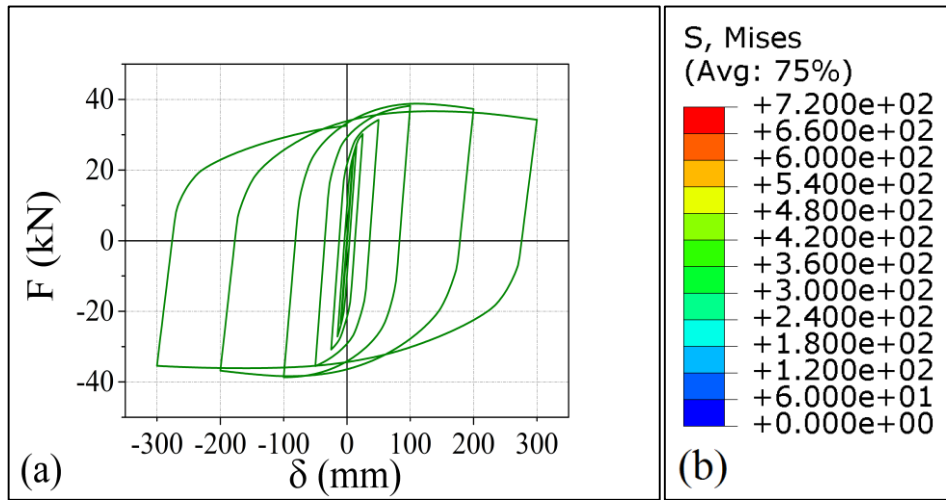
A.16.2 Sonlu elemanlar modeli



Şekil A.95 : Son çevrime ilişkin gerilme ve yerdeğiştirme durumları.

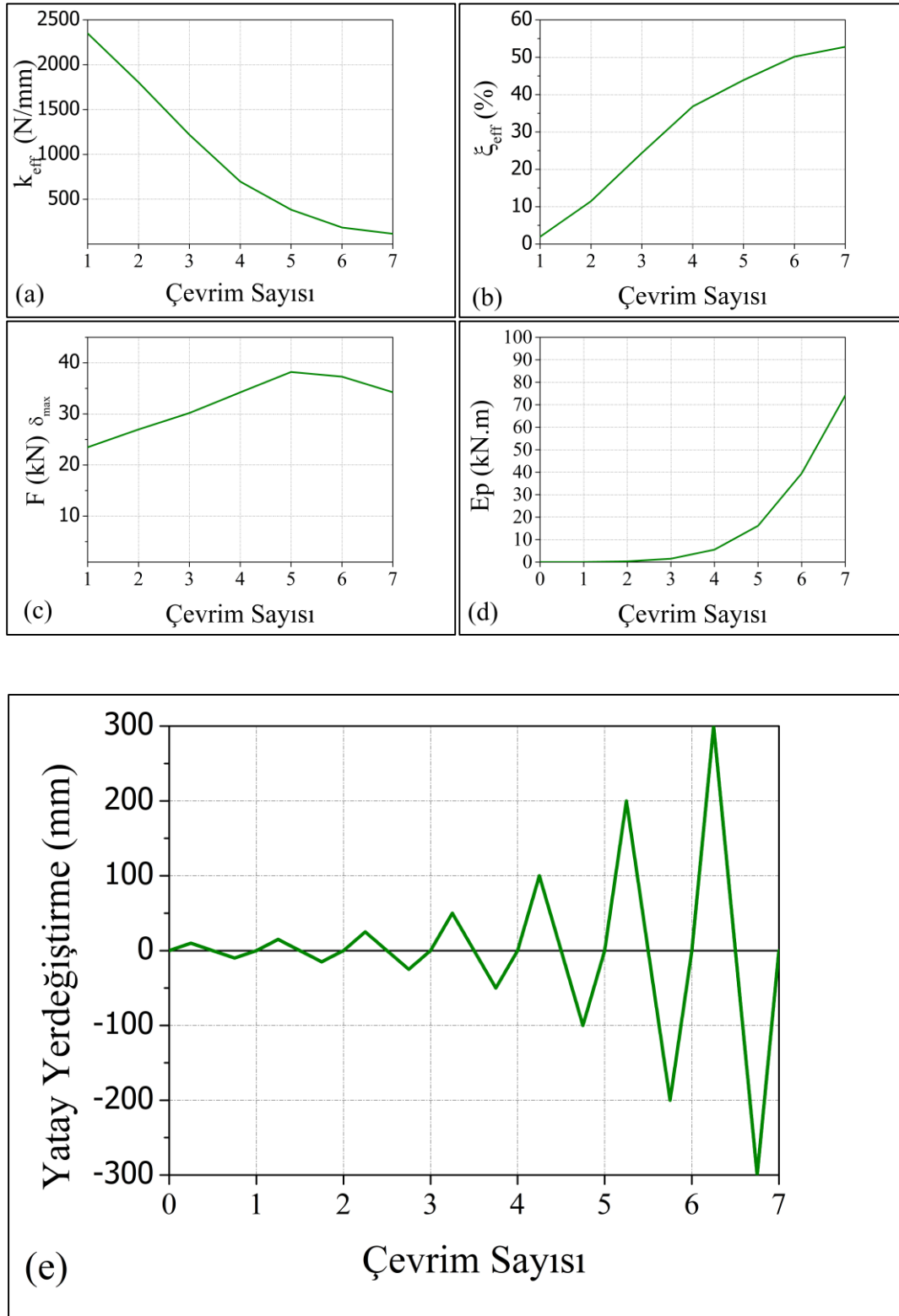


Şekil A.96 : Son çevrime ilişkin gerilme ve yerdeğiştirme durumları.



Şekil A.97 : (a) Histeretik eğrisi. (b) Gerçek gerilme değerleri (MPa).

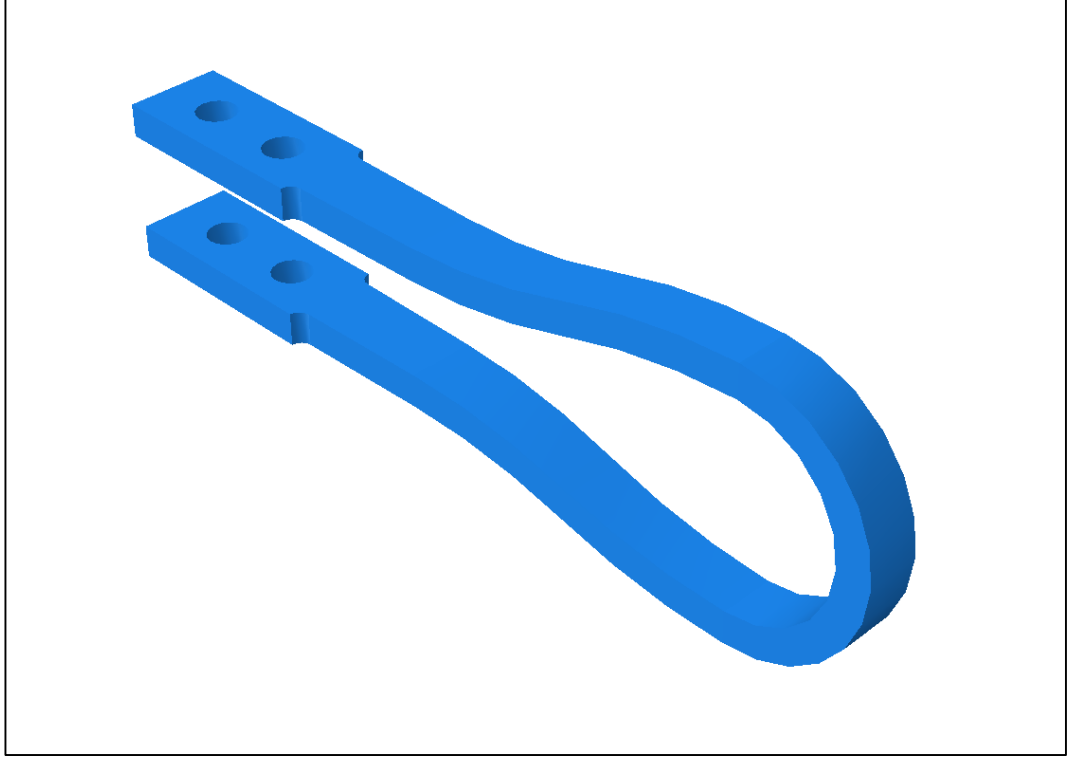
A.16.3 Sonlu elemanlar modeli sonuçları



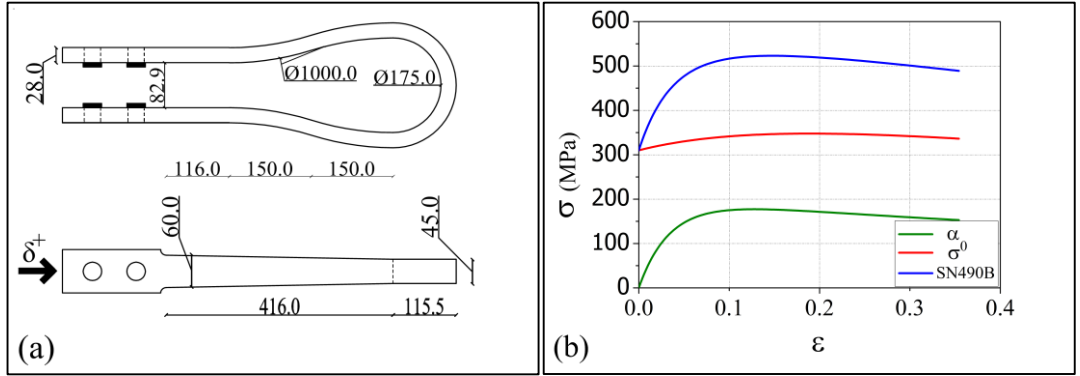
Şekil A.98 : a) Efektif rijitlik. b) Efektif sönüm. c) Maksimum deplasmandaki yatay kuvvet. d) Kümülatif histeretik enerji. e) Yükleme grafiği.

A.17 UDF5 Sönümleyici

A.17.1 Geometri ve malzeme

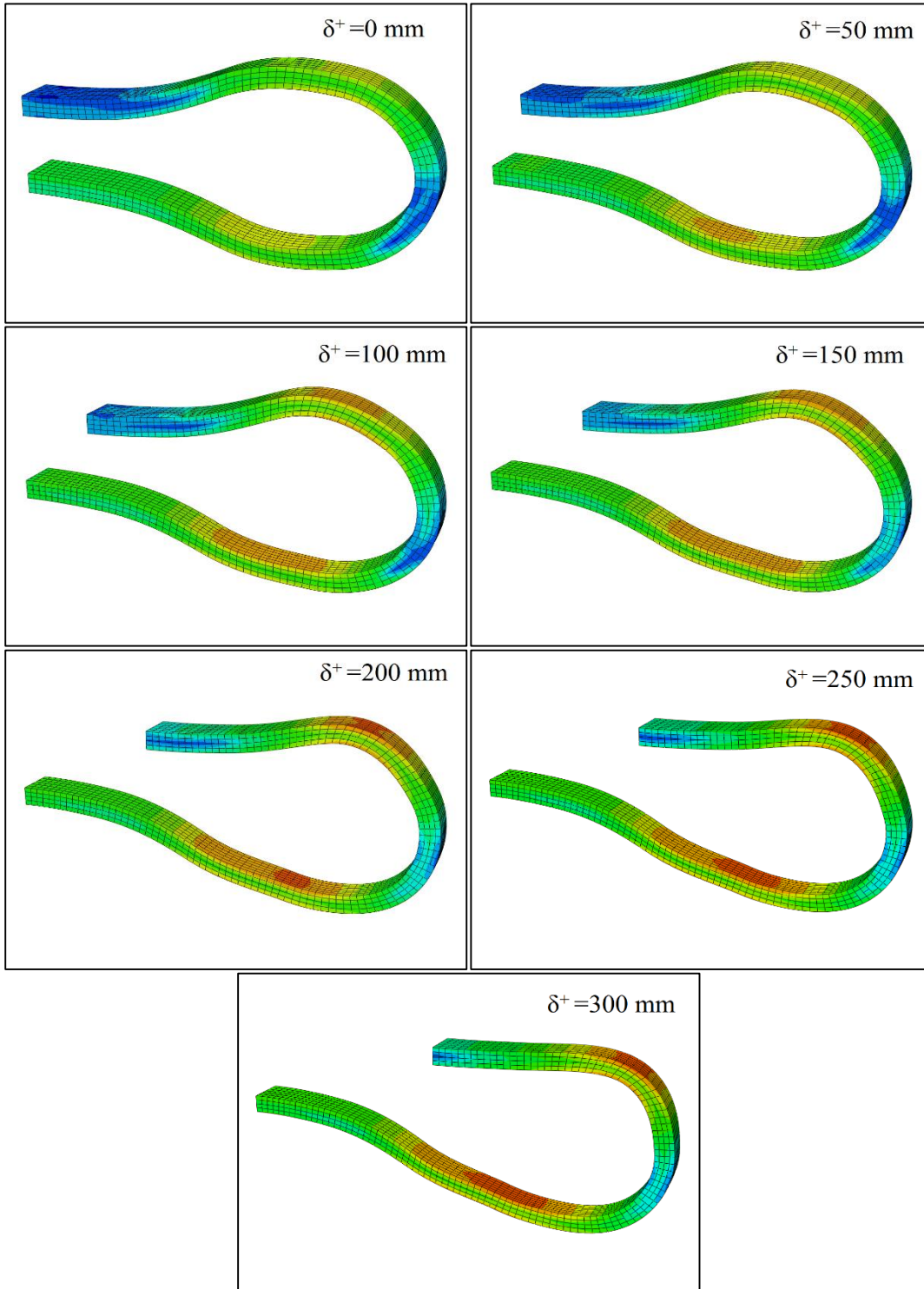


Şekil A.99 : Üç boyutlu model.

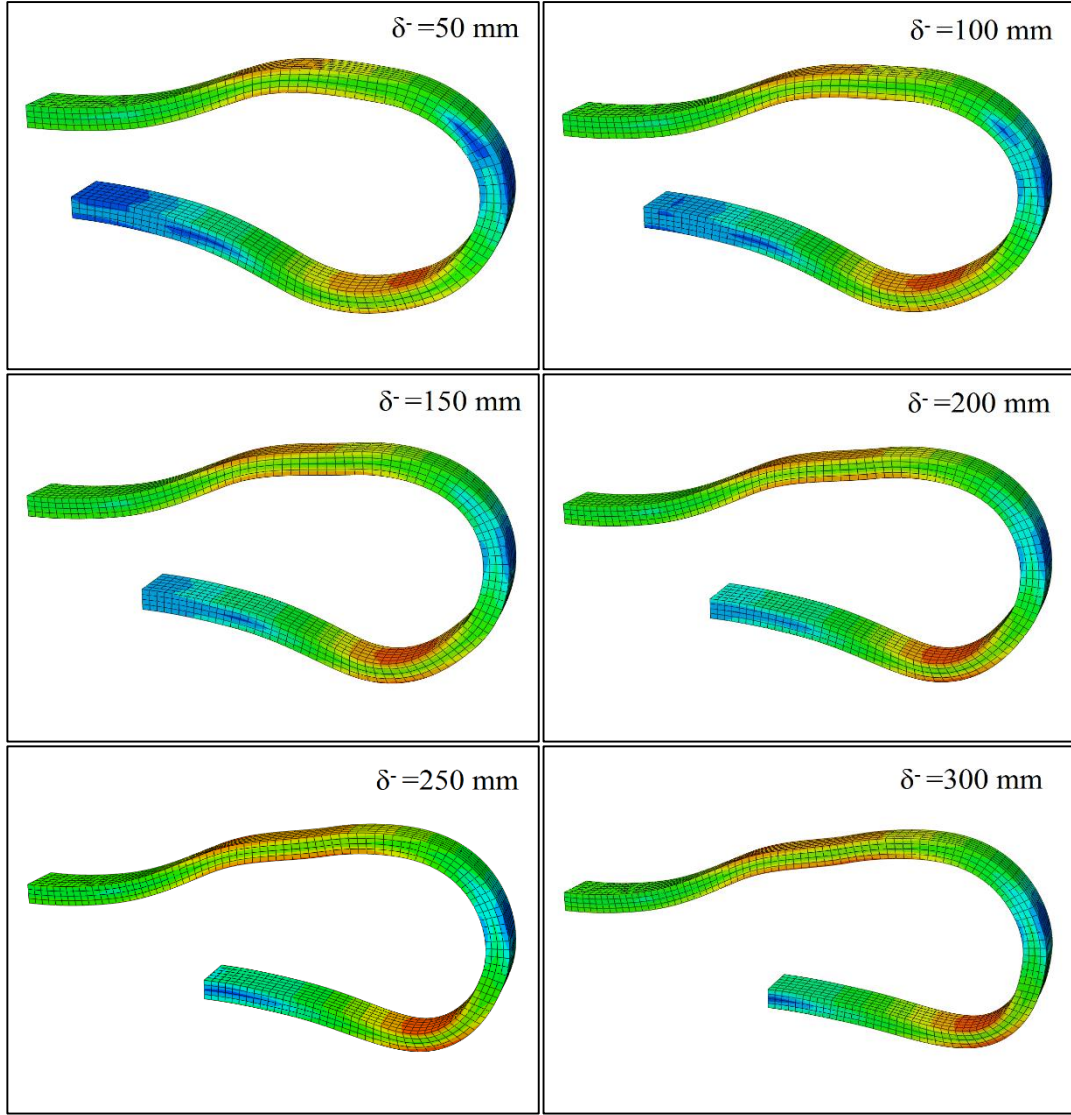


Şekil A.100 : (a) Sönümleyici boyutları–Yükleme yönü. (b) Malzeme özellikleri

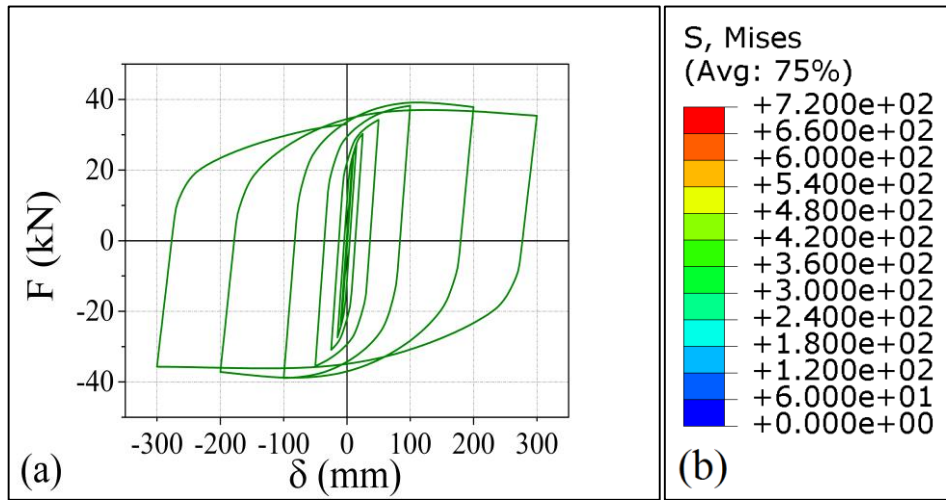
A.17.2 Sonlu elemanlar modeli



Şekil A.101 : Son çevrime ilişkin gerilme ve yerdeğiştirme durumları.

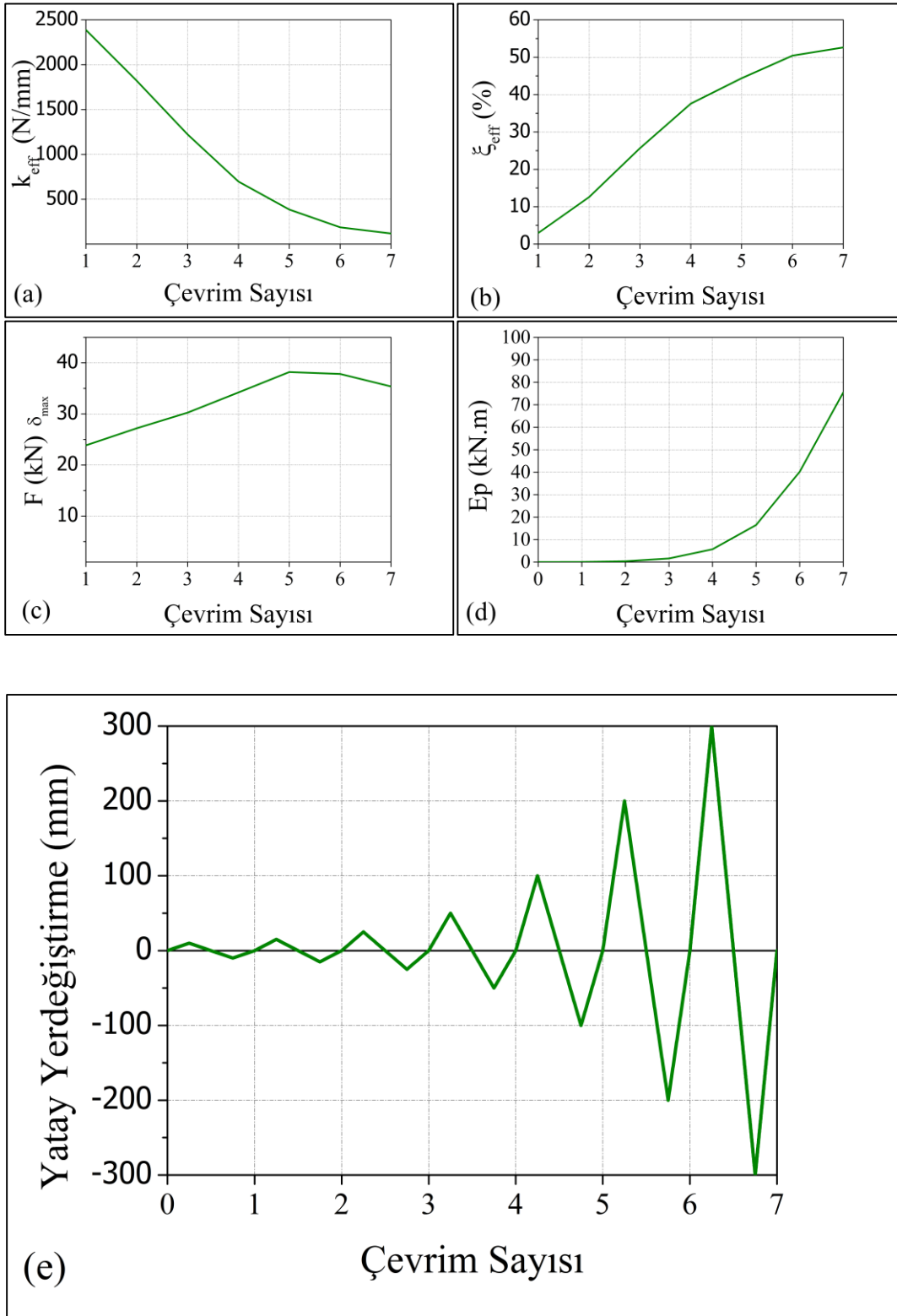


Şekil A.102 : Son çevrime ilişkin gerilme ve yerdeğiştirme durumları.



Şekil A.103 : (a) Histeretik eğrisi. (b) Gerçek gerilme değerleri (MPa).

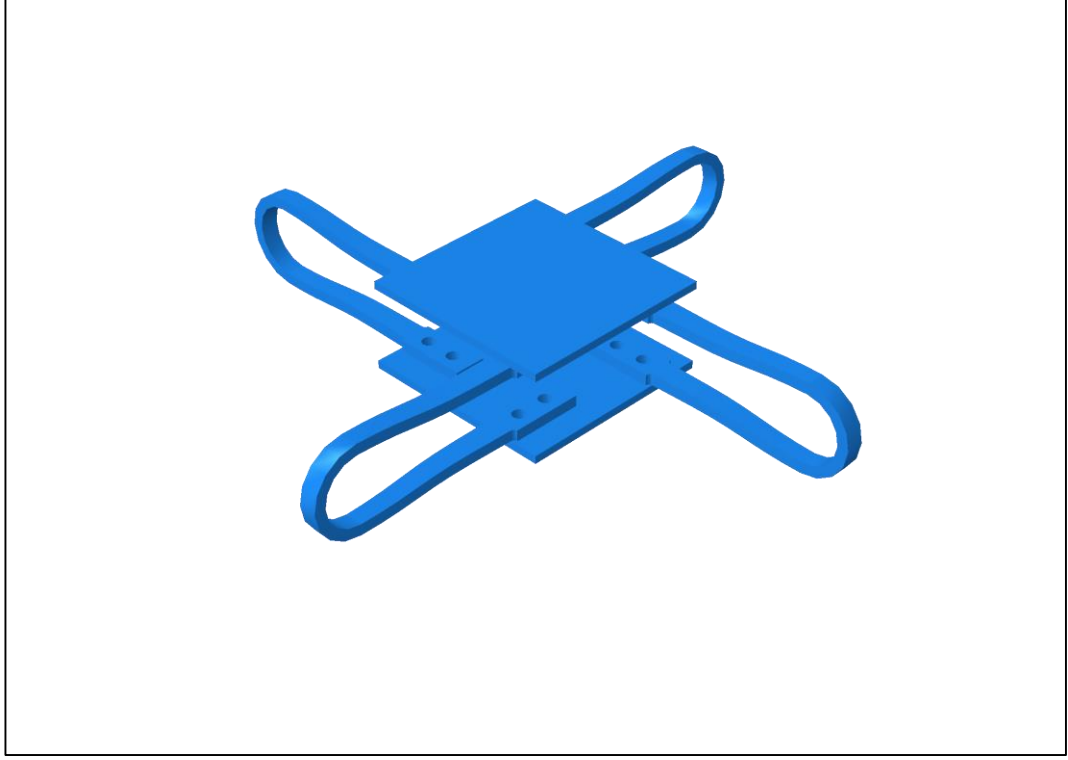
A.17.3 Sonlu elemanlar modeli sonuçları



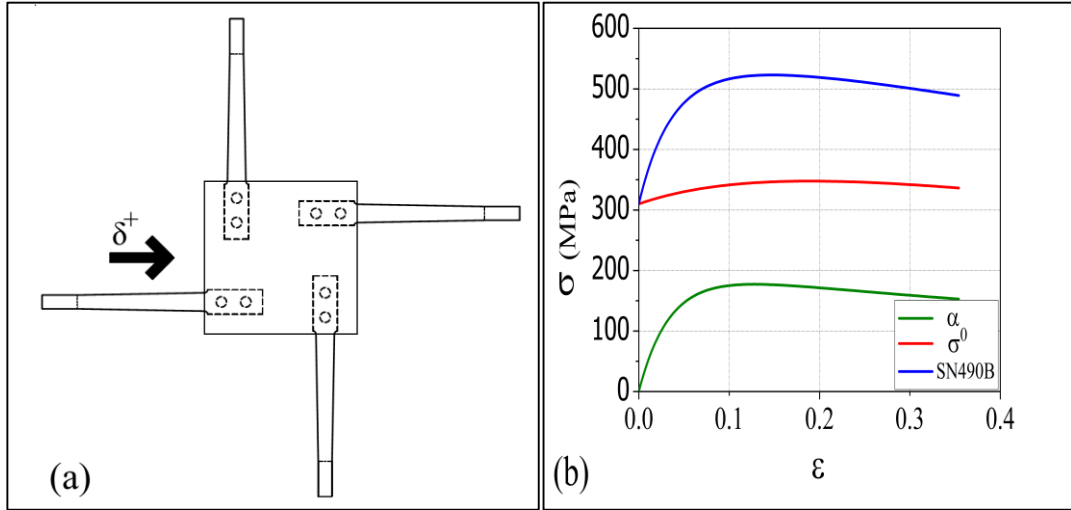
Şekil A.104 : a) Efektif rijitlik. b) Efektif sönüm. c) Maksimum deplasmandaki yatay kuvvet. d) Kümülatif histeretik enerji. e) Yükleme grafiği.

A.18 4UF2 Sönümleyici

A.18.1 Geometri ve malzeme

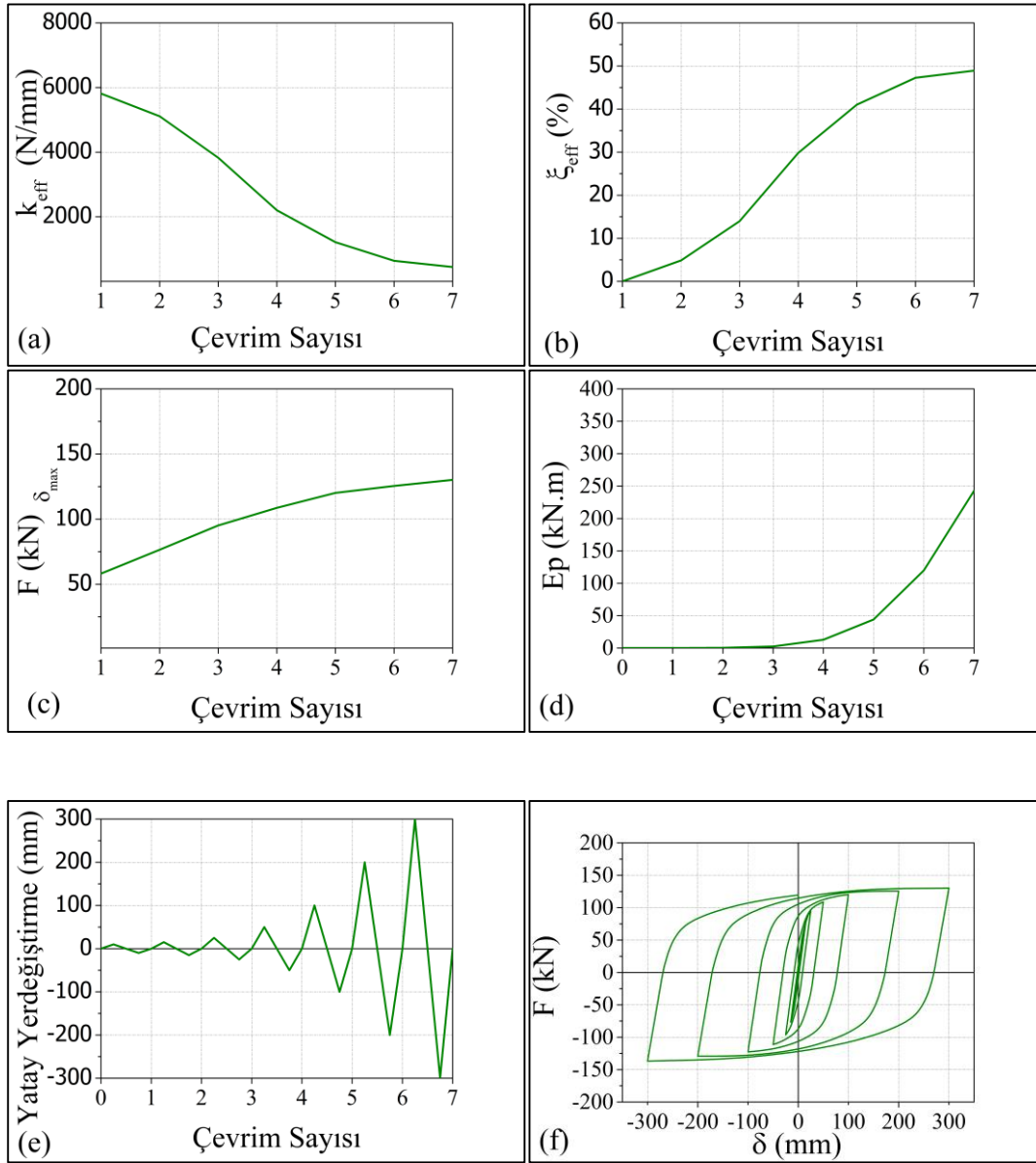


Şekil A.105 : Üç boyutlu model.



Şekil A.106 : (a) Sönümleyici geometrisi-Yüklemeye yönü (b) Malzeme özellikleri.

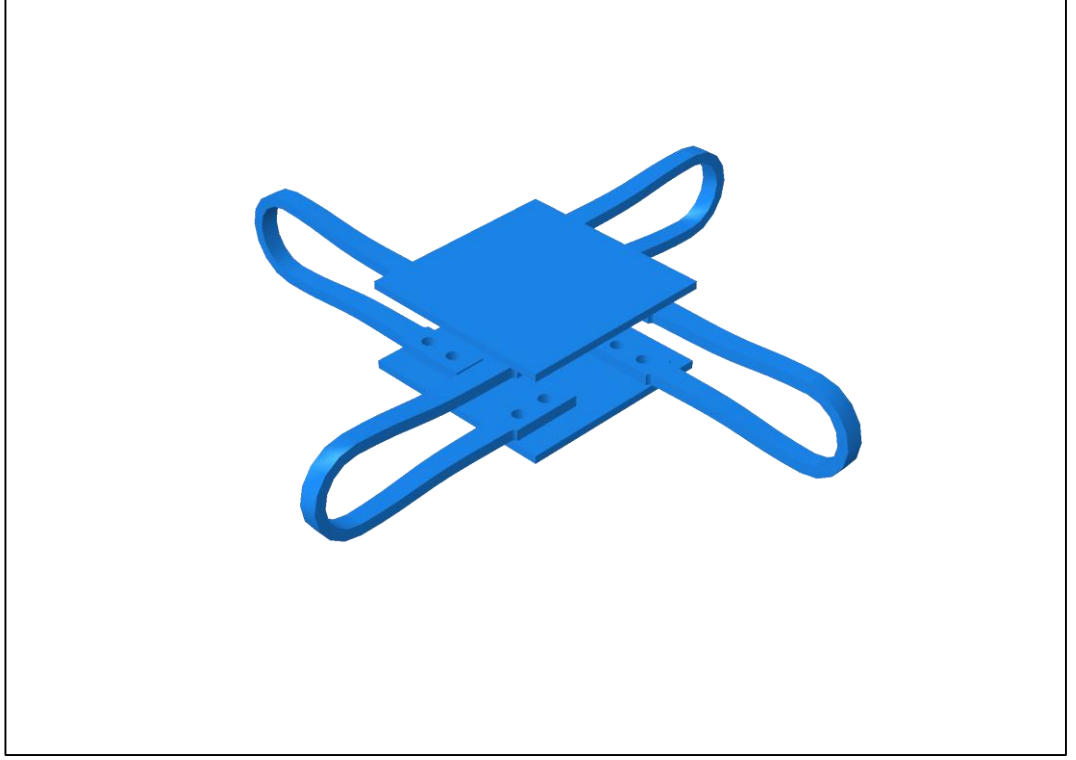
A.18.2 Sonlu elemanlar modeli sonuçları



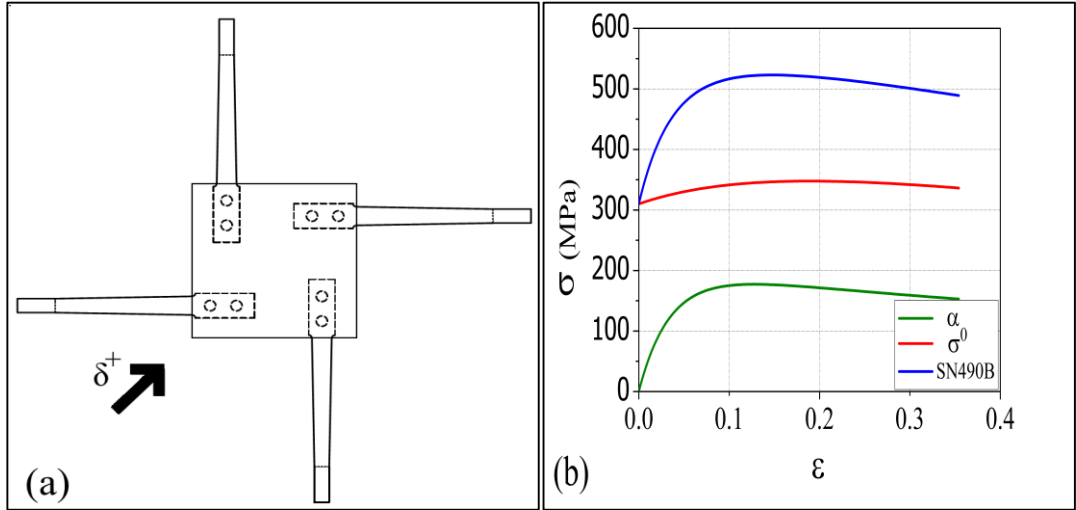
Şekil A.107 : a) Efektif rijitlik. b) Efektif sönüm. c) Maksimum deplasmandaki yatay kuvvet. d) Kümülatif histeretik enerji. e) Yükleme grafiği. f) Histeretik eğrisi.

A.19 4UF2 Sönümleyici

A.19.1 Geometri ve malzeme

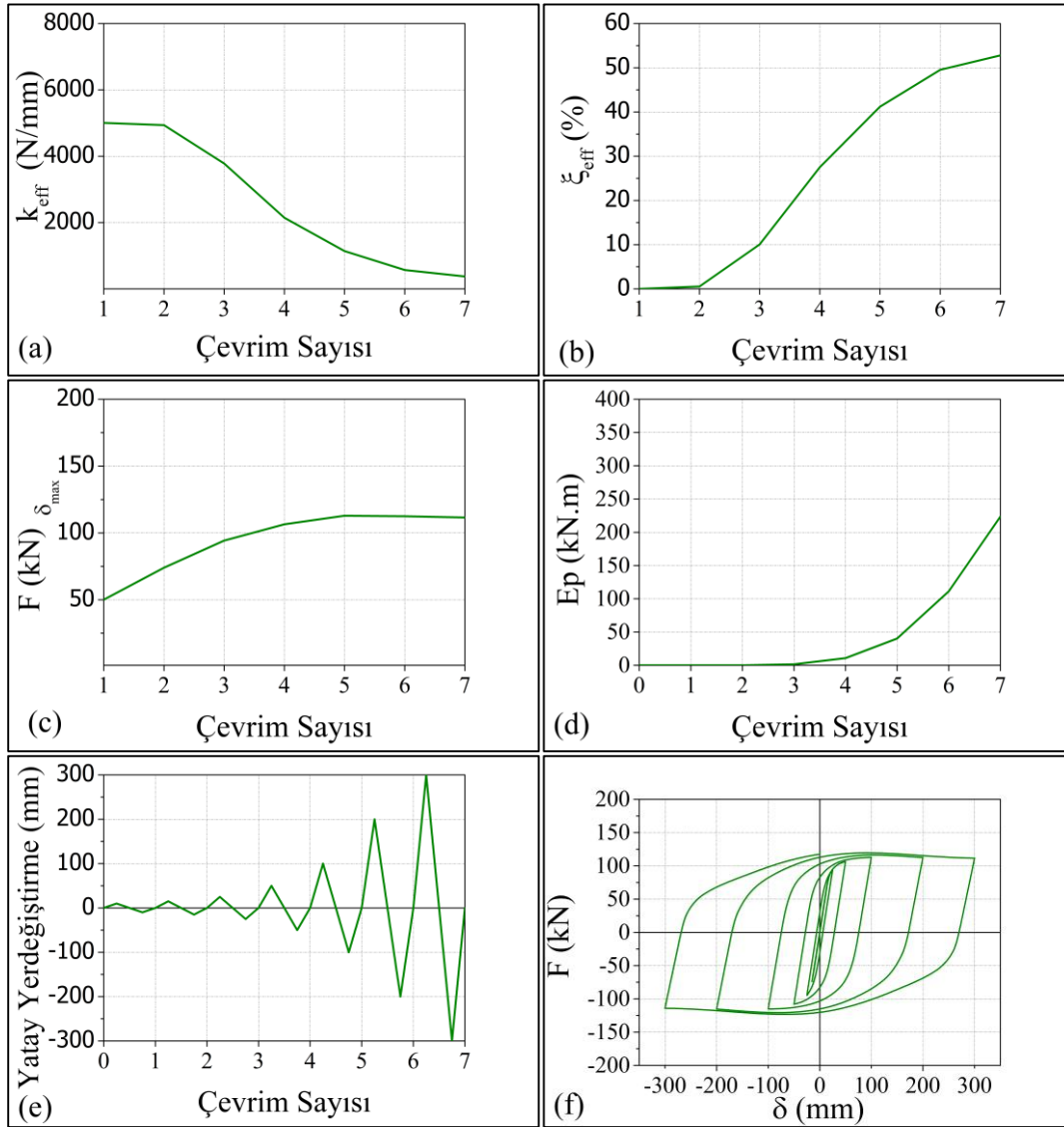


Şekil A.108 : Üç boyutlu model.



Şekil A.109 : (a) Sönümleyici geometrisi ve yükleme yönü. (b) Malzeme özellikleri.

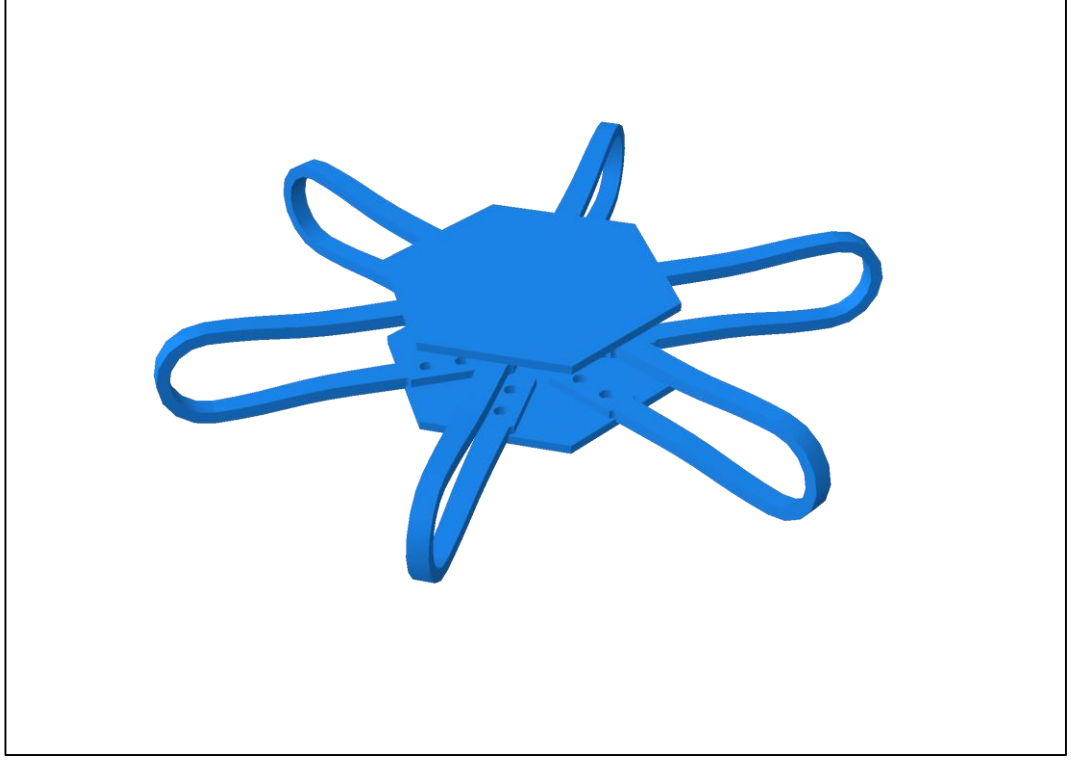
A.19.2 Sonlu elemanlar modeli sonuçları



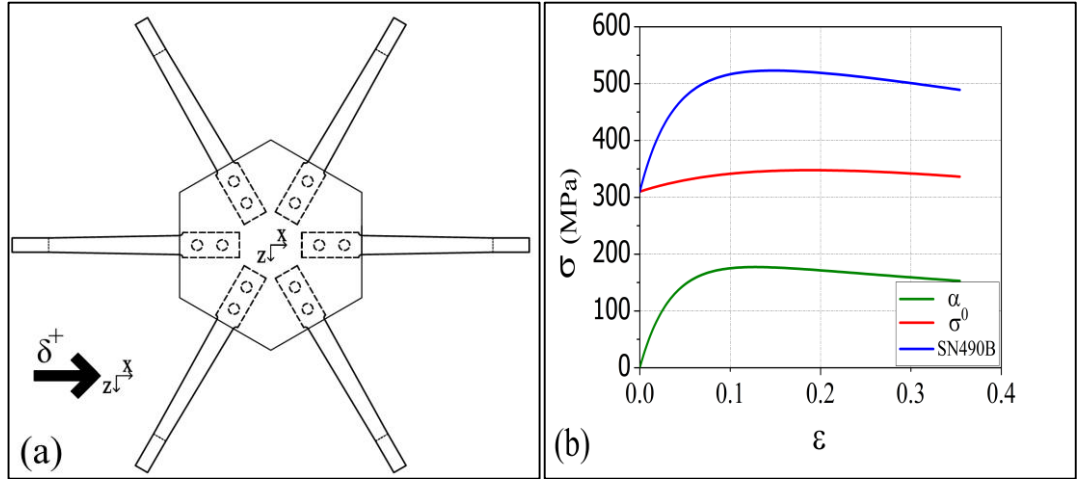
Şekil A.110 : a) Efektif rijitlik. b) Efektif sönüm. c) Maksimum deplasmandaki yatay kuvvet. d) Kümülatif histeretik enerji. e) Yükleme grafiği. f) Histeretik eğrisi.

A.20 6UF2 Sönümleyici

A.20.1 Geometri ve malzeme

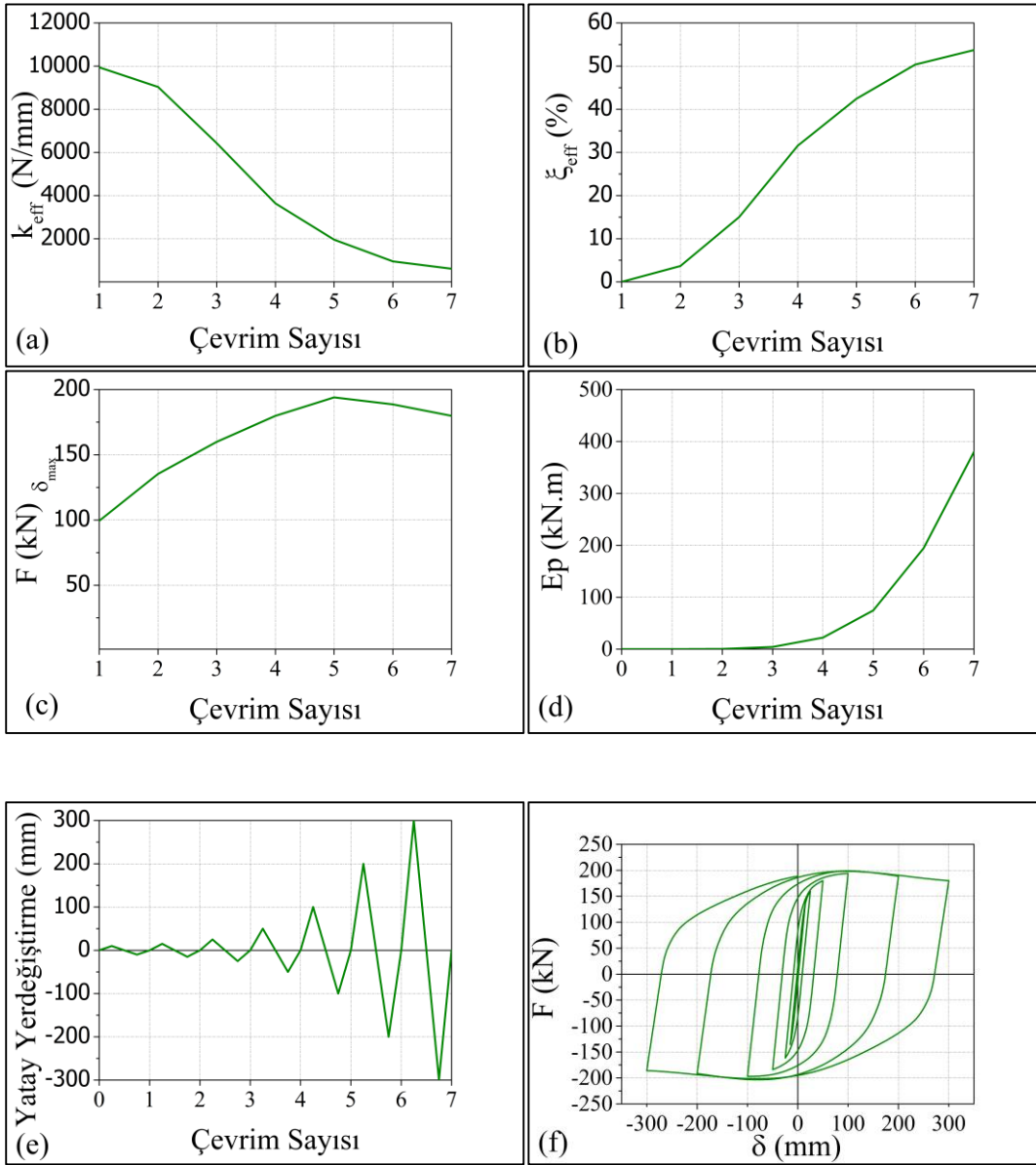


Şekil A.111 : Üç boyutlu model.



Şekil A.112 : (a) Sönümleyici boyutları–Yükleme yönü. (b) Malzeme özellikleri.

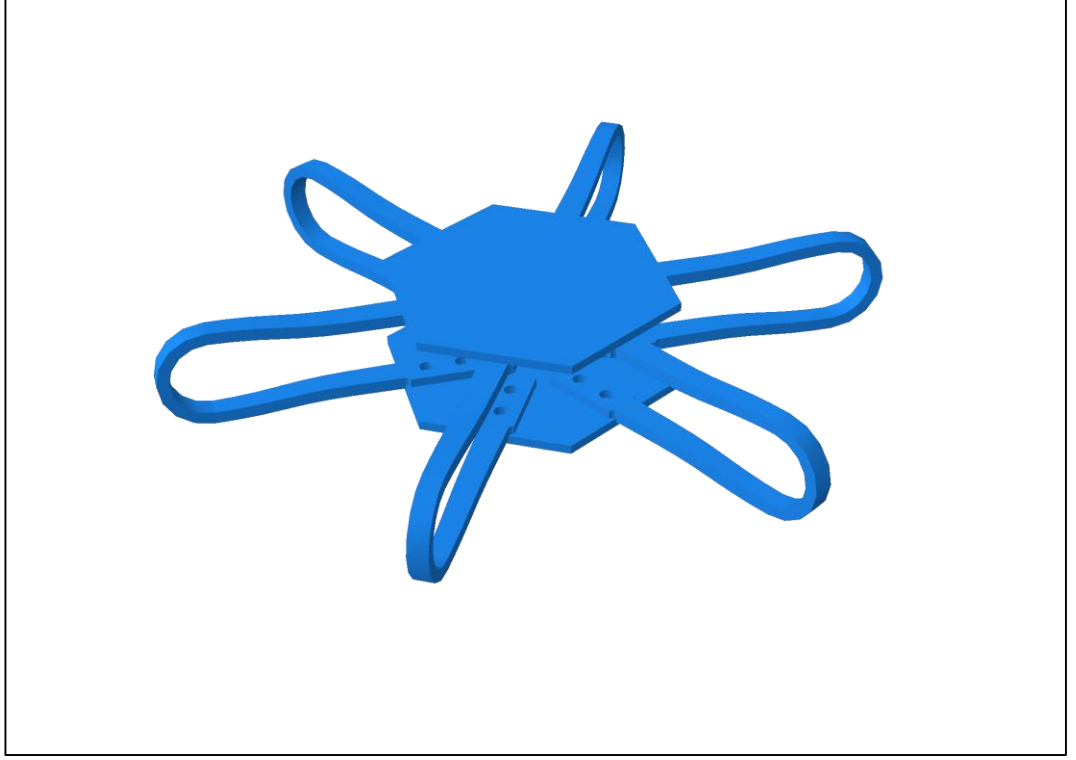
A.20.2 Sonlu elemanlar modeli sonuçları



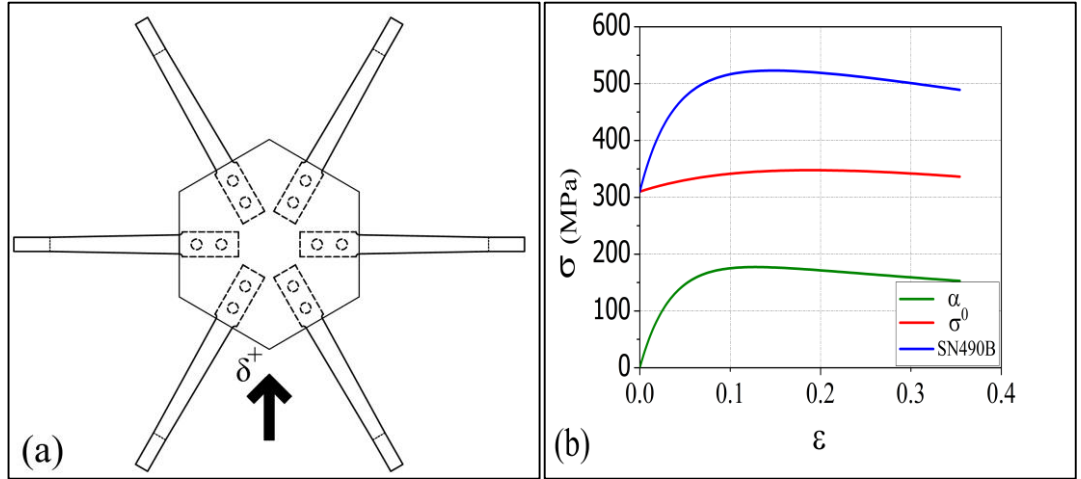
Şekil A.113 : a) Efektif rijitlik. b) Efektif sönüm. c) Maksimum deplasmandaki yatay kuvvet. d) Kümülatif histeretik enerji. e) Yükleme grafiği. f) Histeretik eğrisi.

A.21 6UF2 Sönümleyici

A.21.1 Geometri ve malzeme

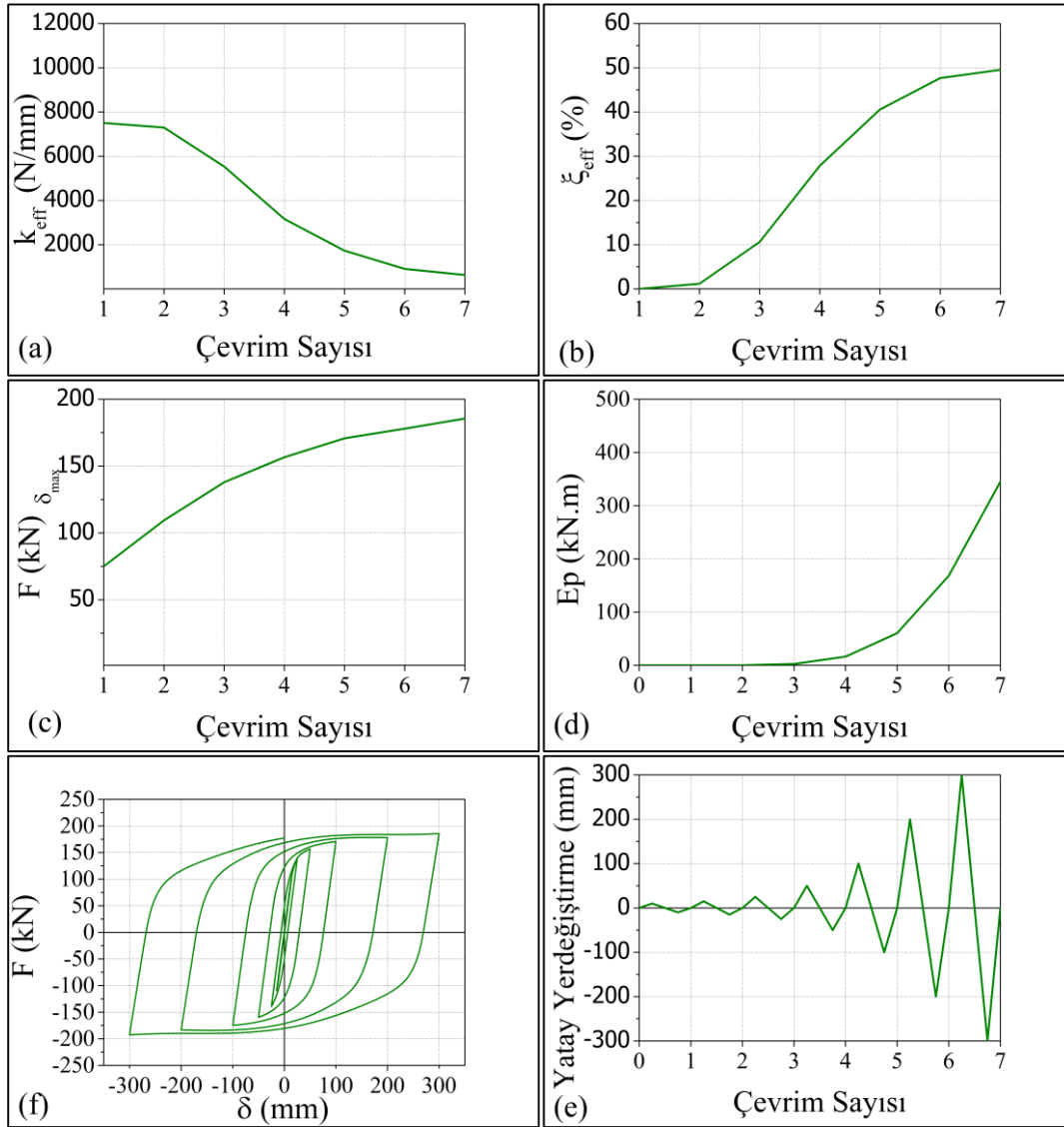


Şekil A.114 : Üç boyutlu model.



Şekil A.115 : (a) Sönümleyici boyutları–Yükleme yönü. (b) Malzeme özellikleri.

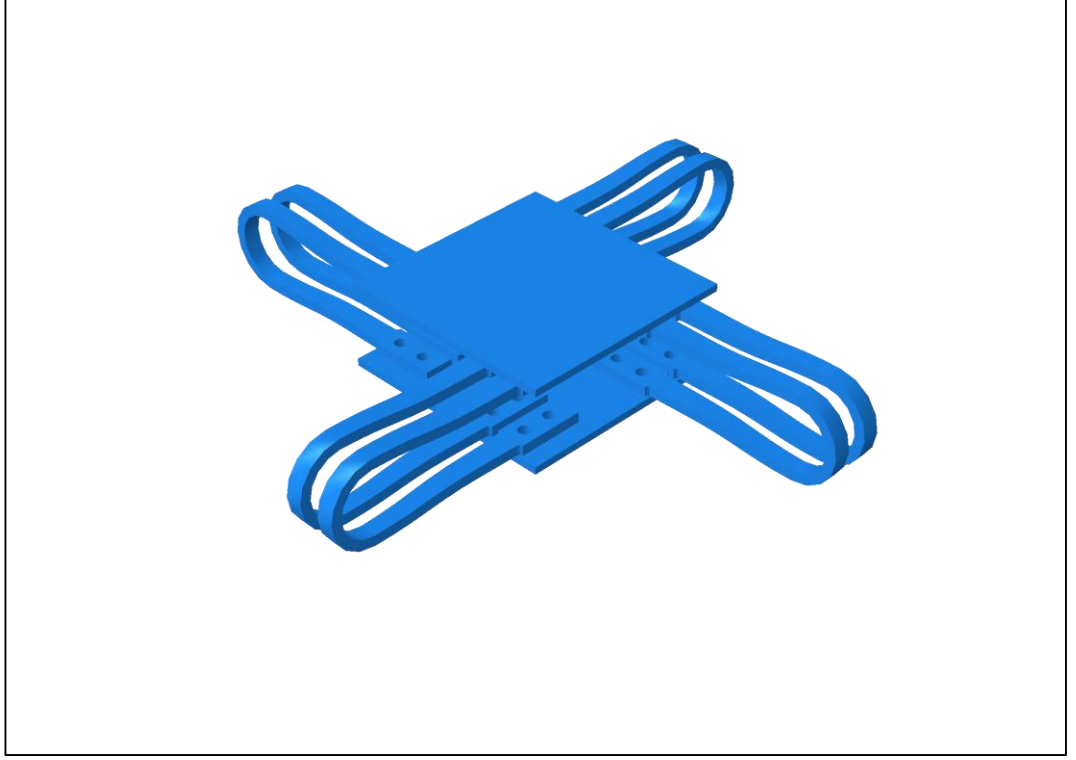
A.21.2 Sonlu elemanlar modeli sonuçları



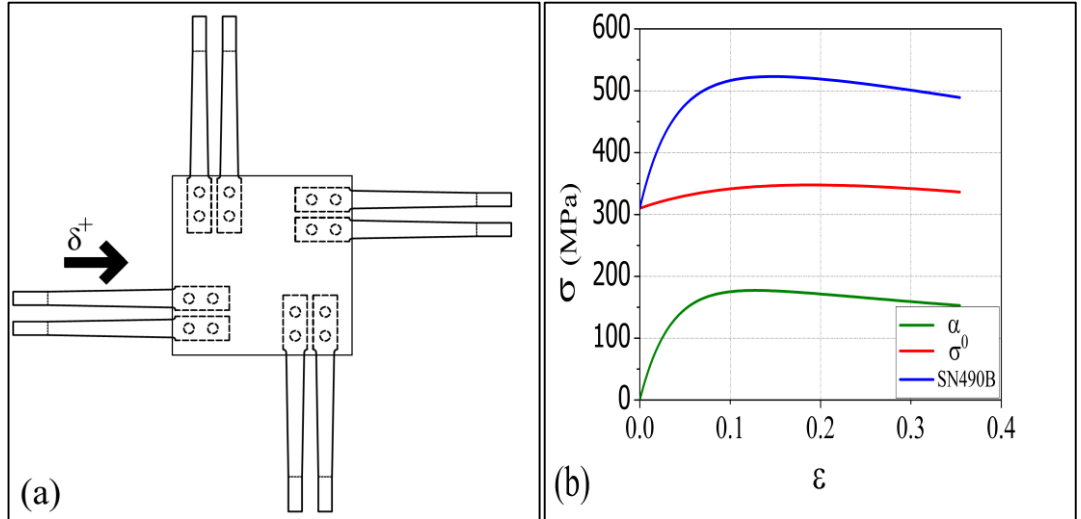
Şekil A.116 : a) Efektif rijitlik. b) Efektif sönüm. c) Maksimum deplasmandaki yatay kuvvet. d) Kümülatif histeretik enerji. e) Yükleme grafiği. f) Histeretik eğrisi.

A.22 8UF2 Sönümleyici

A.22.1 Geometri ve malzeme

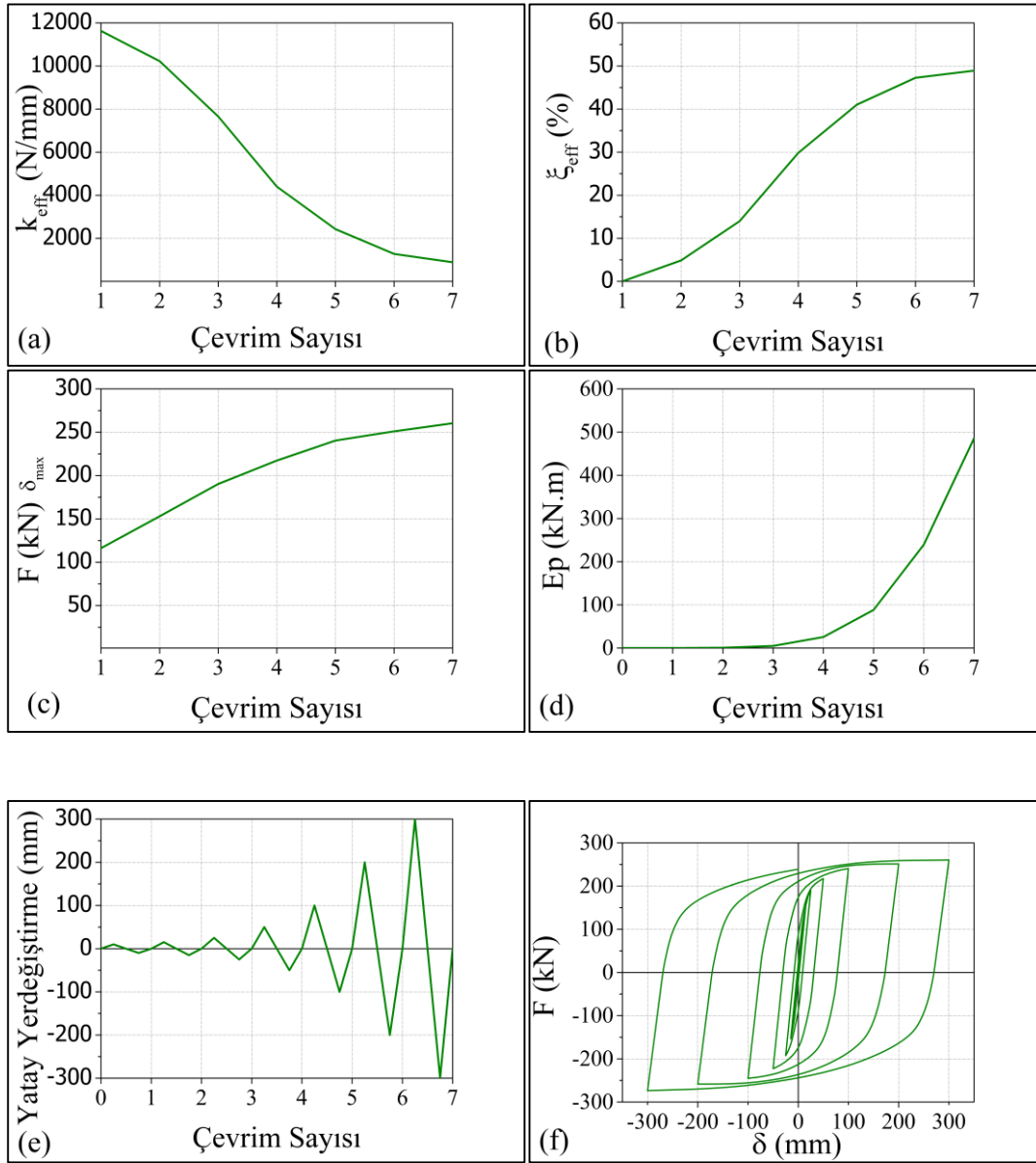


Şekil A.117 : Üç boyutlu model.



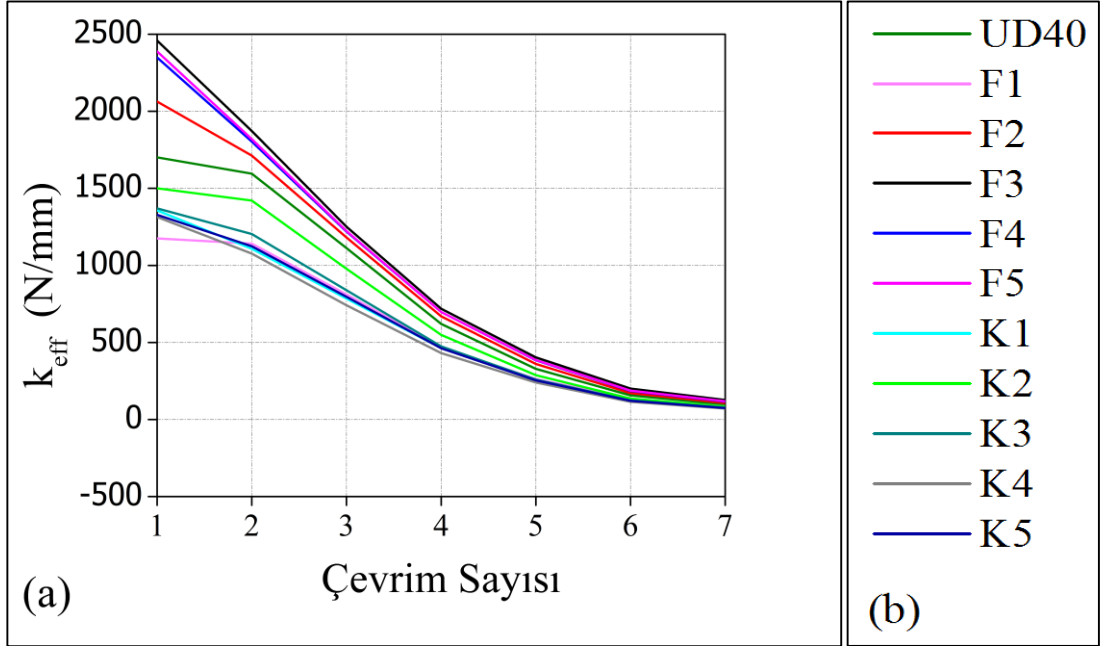
Şekil A.118 : (a) Sönümleyici boyutları–Yükleme yönü. (b) Malzeme özellikleri.

A.22.2 Sonlu elemanlar modeli sonuçları

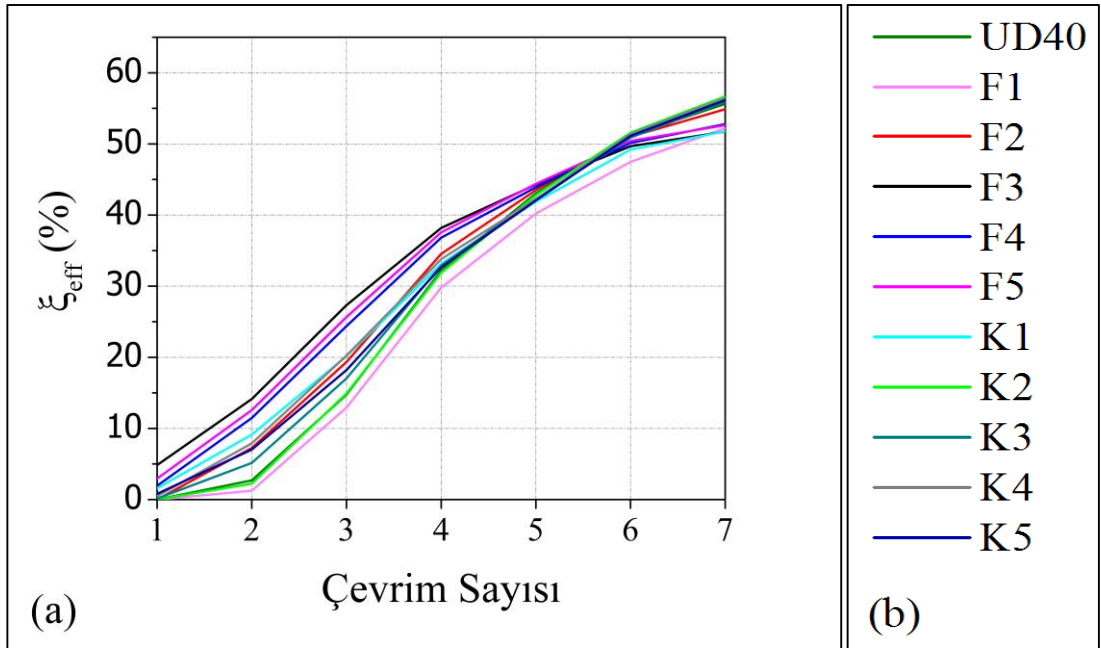


Şekil A.119 : a) Efektif rijitlik. b) Efektif sönüm. c) Maksimum deplasmandaki yatay kuvvet. d) Kümülatif histeretik enerji. e) Yükleme grafiği. f) Histeretik eğrisi.

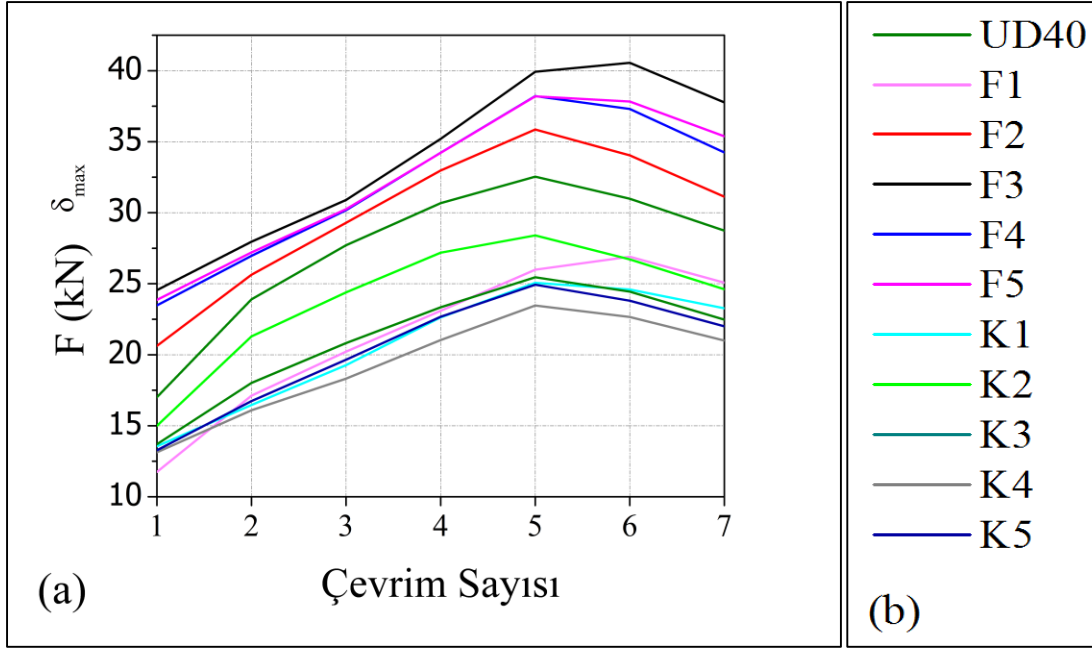
A.23 Tekil Sönümleyicilerin Karşılaştırılması



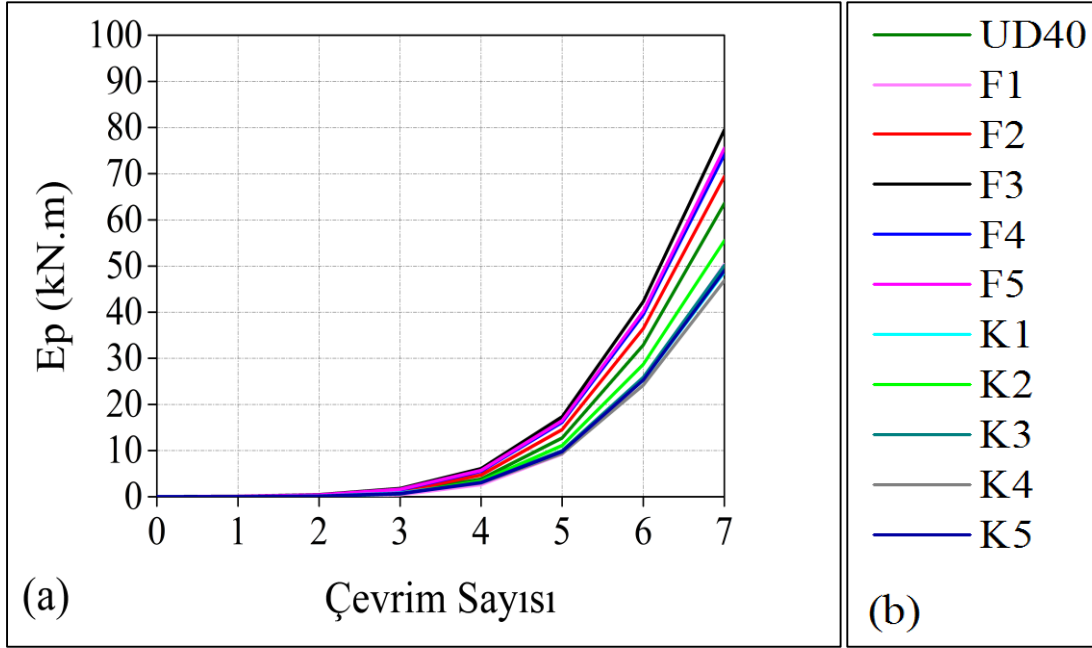
Şekil A.120 : a) Efektif rijitlik. b) Lejant.



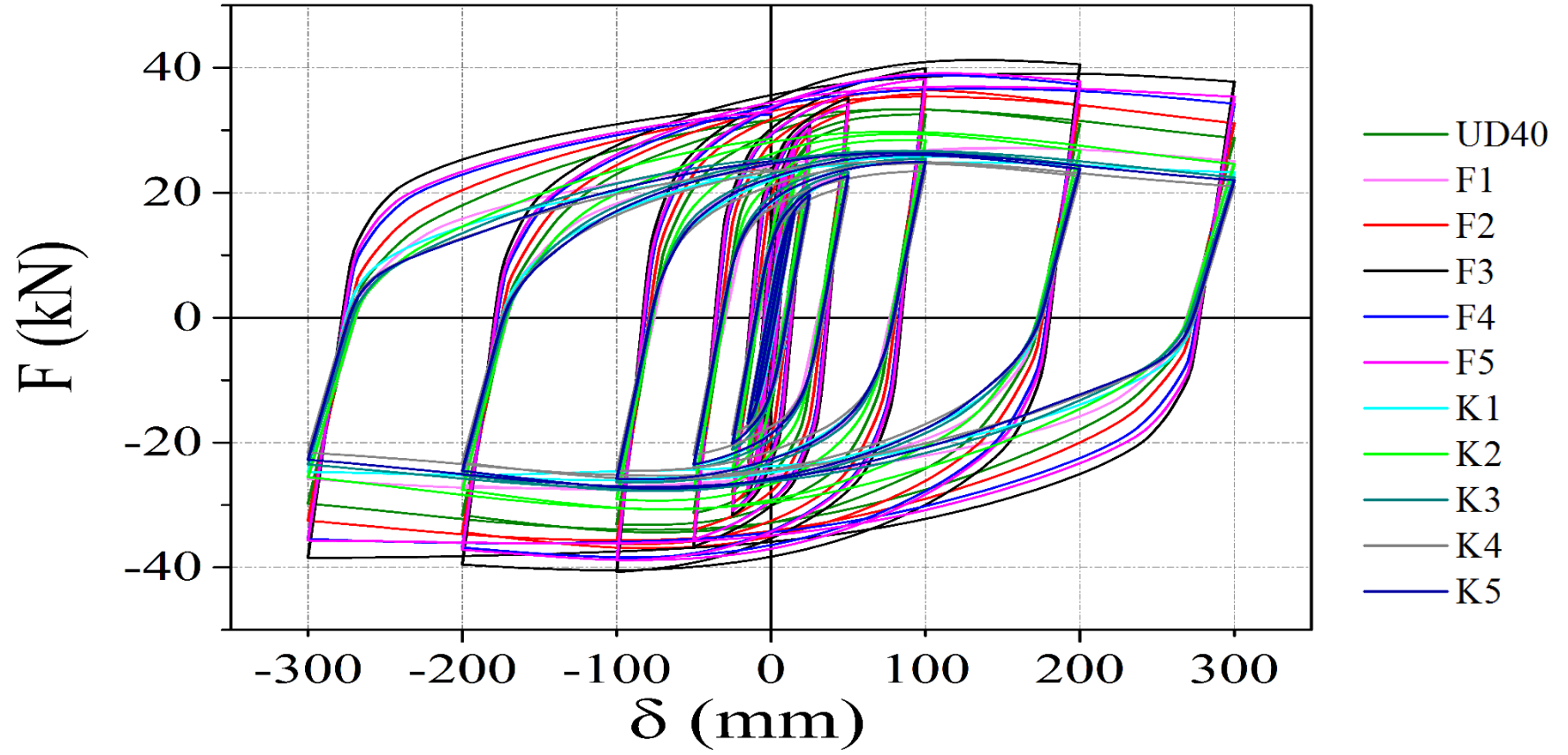
Şekil A.121 : a) Efektif sönüm oranı. b) Lejant.



Şekil A.122 : a) Maksimum deplasmandaki yatay kuvvet. b) Lejant.



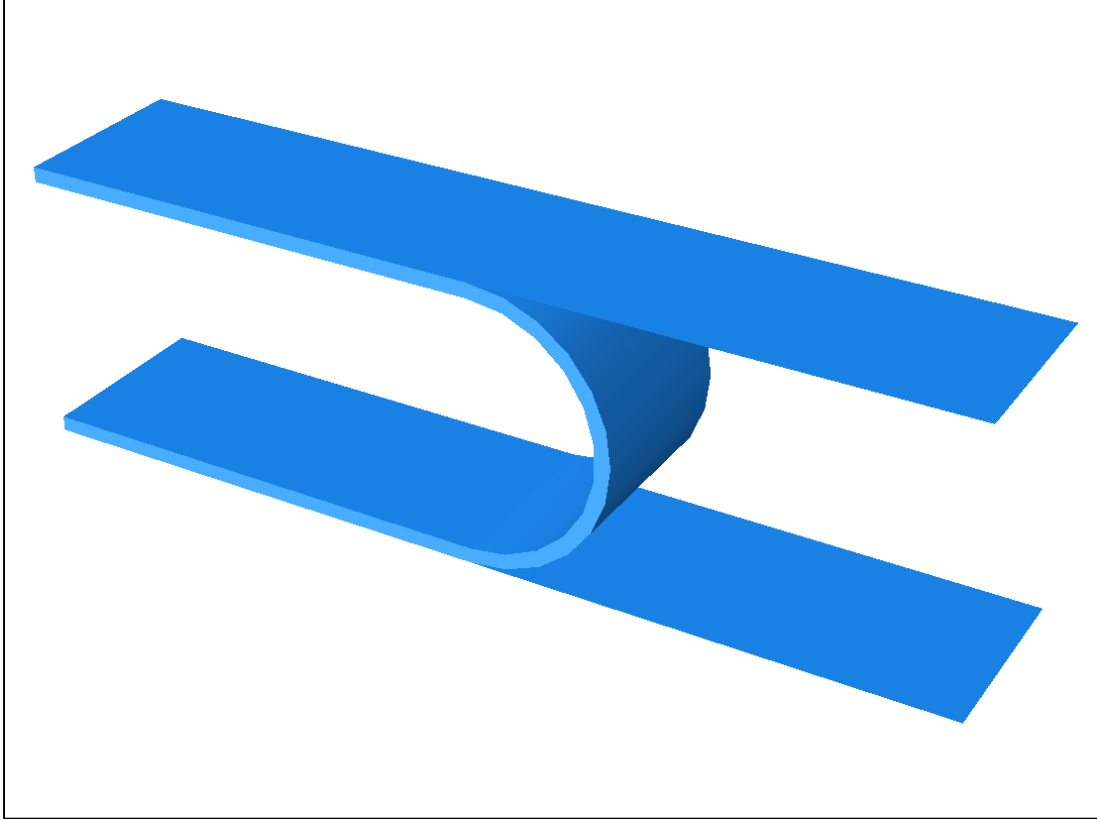
Şekil A.123 : a) Kümülatif histeretik enerji b) Lejant.



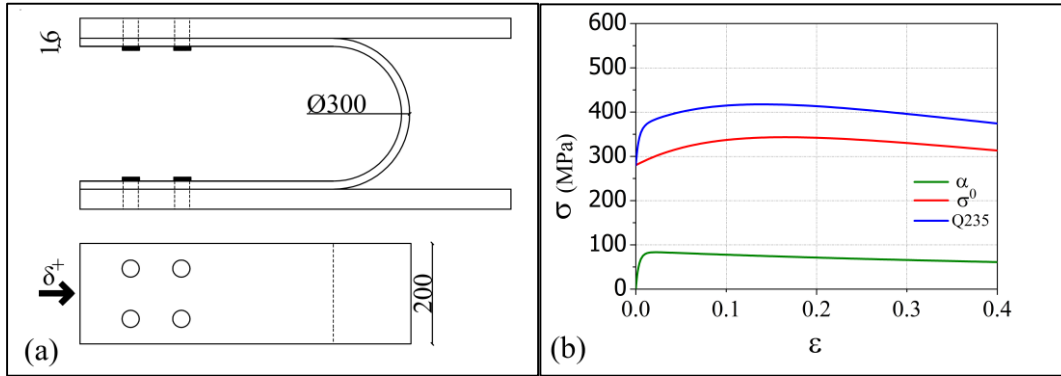
Şekil A.124 : Tüm histeretik eğrilerin karşılaştırılması.

A.24 UDS1 Sönümleyici Yükleme 0°

A.24.1 Geometri ve malzeme

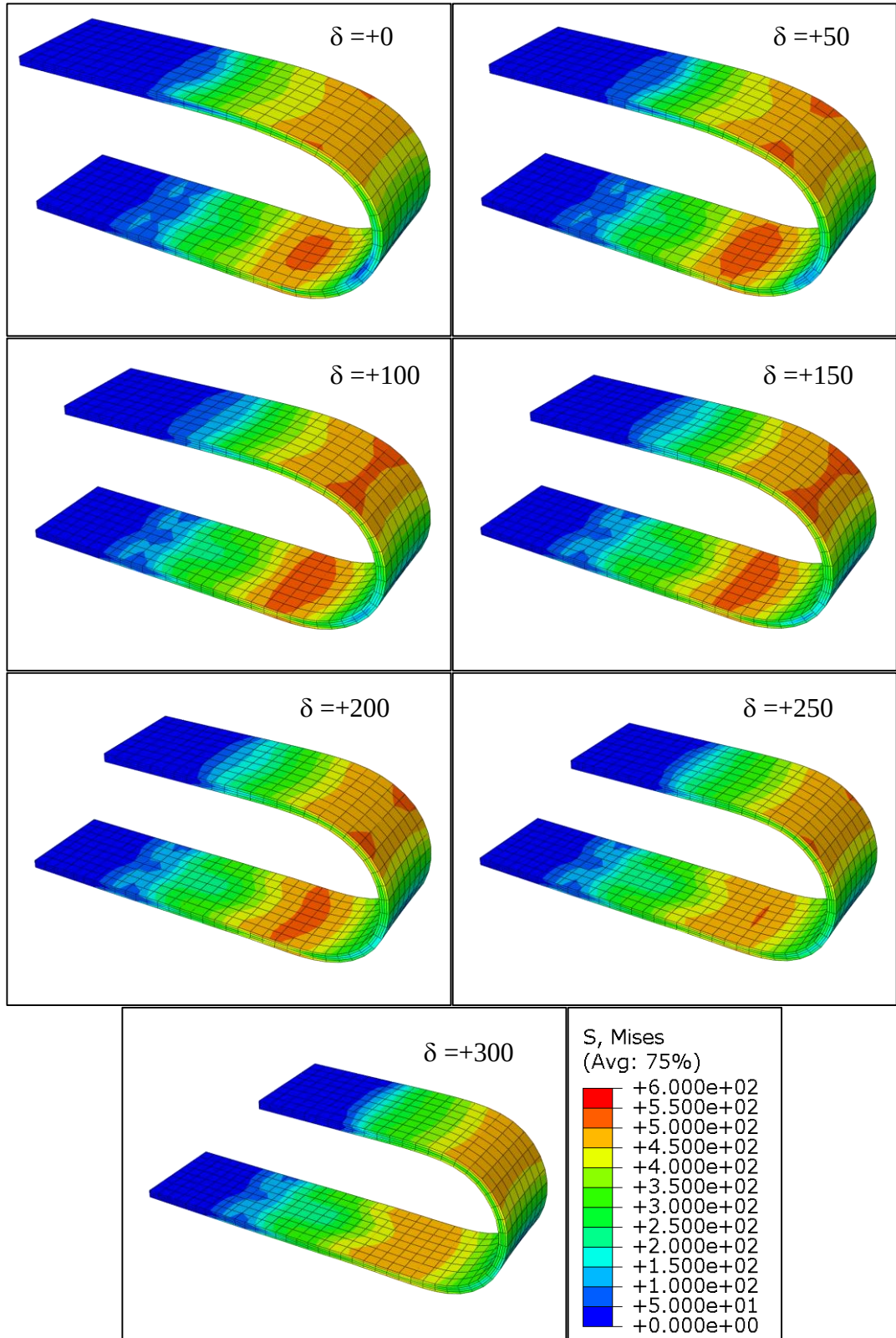


Şekil A.125 : Üç boyutlu model.

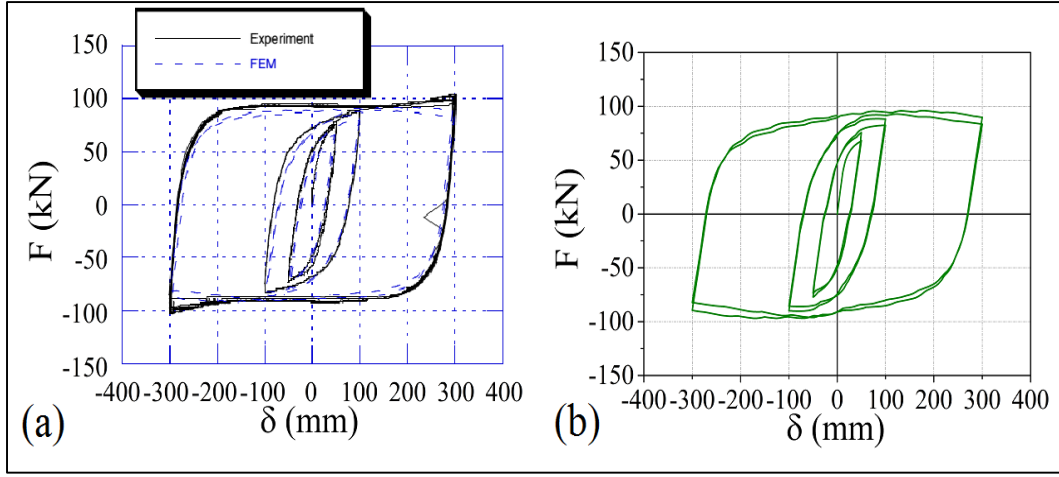


Şekil A.126 : (a) UDS1 boyutları – Yükleme yönü. (b) Malzeme özellikleri.

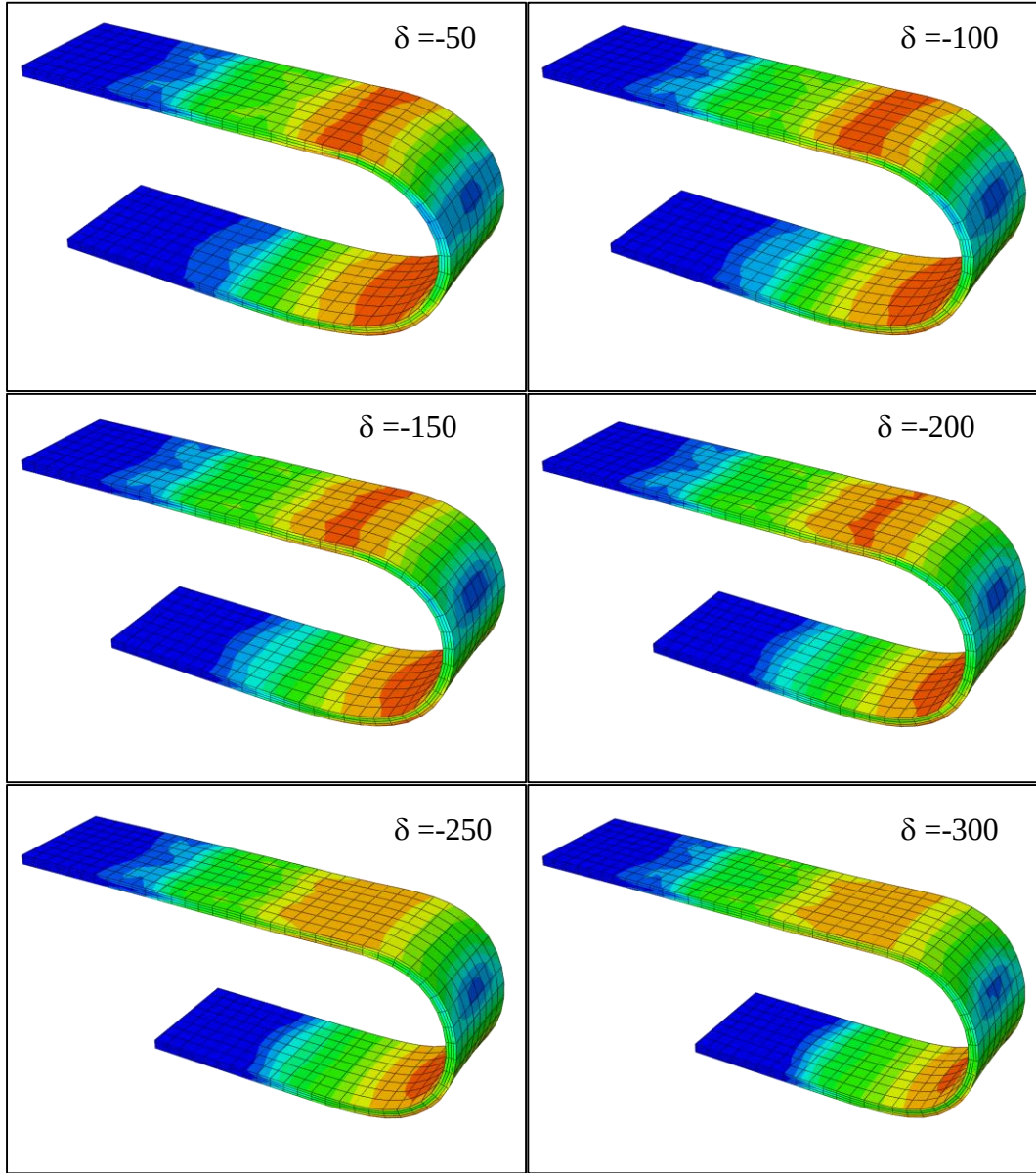
A.24.2 Sonlu elemanlar modeli



Şekil A.127 : Son çevrime ilişkin gerilme ve yerdeğiştirme durumları.

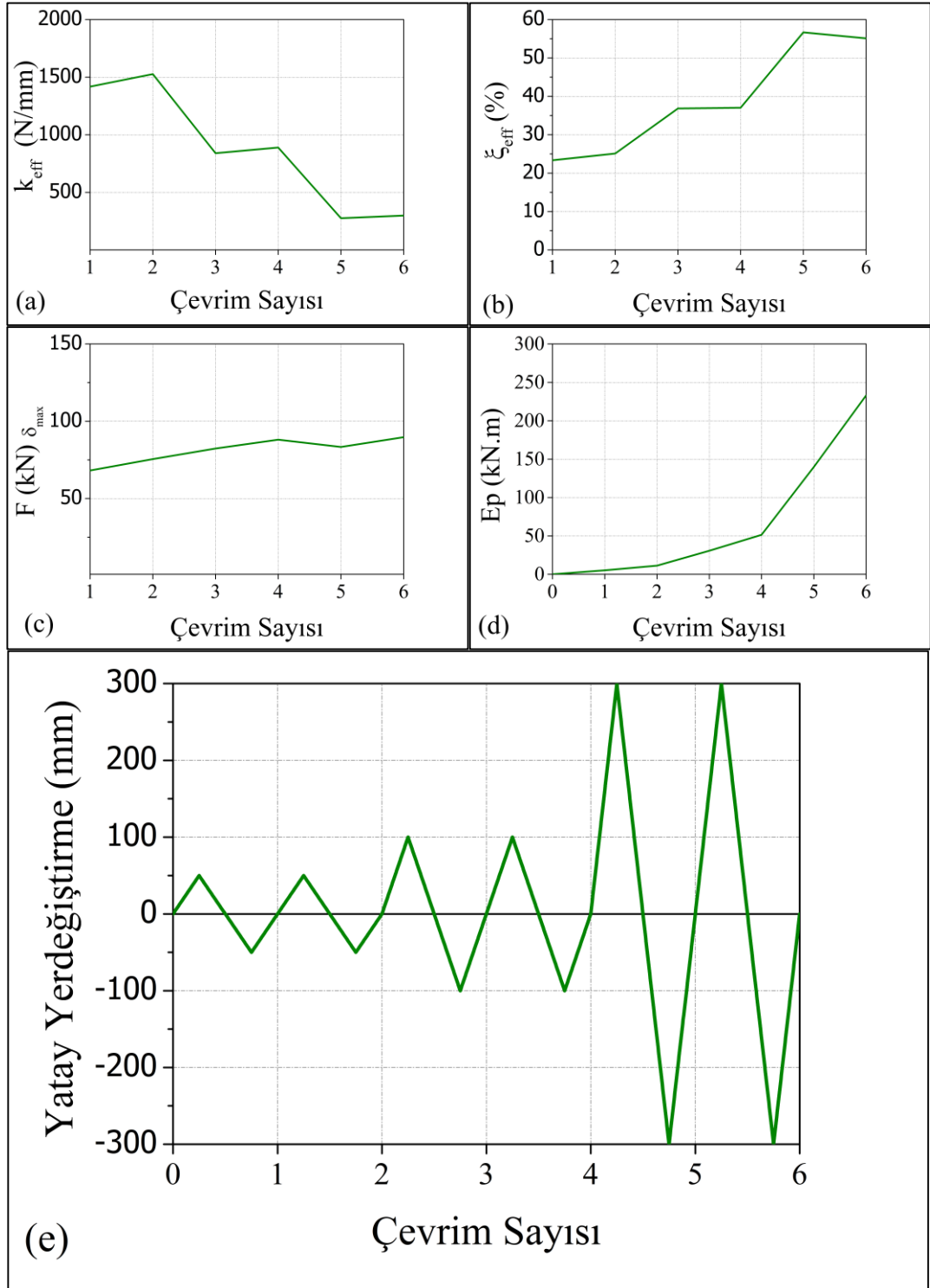


Şekil A.128 : (a) DeneySEL. (b) Kuramsal histeretik eğrileri.



Şekil A.129 : Son çevrime ilişkin gerilme ve yerdeğiştirme durumları.

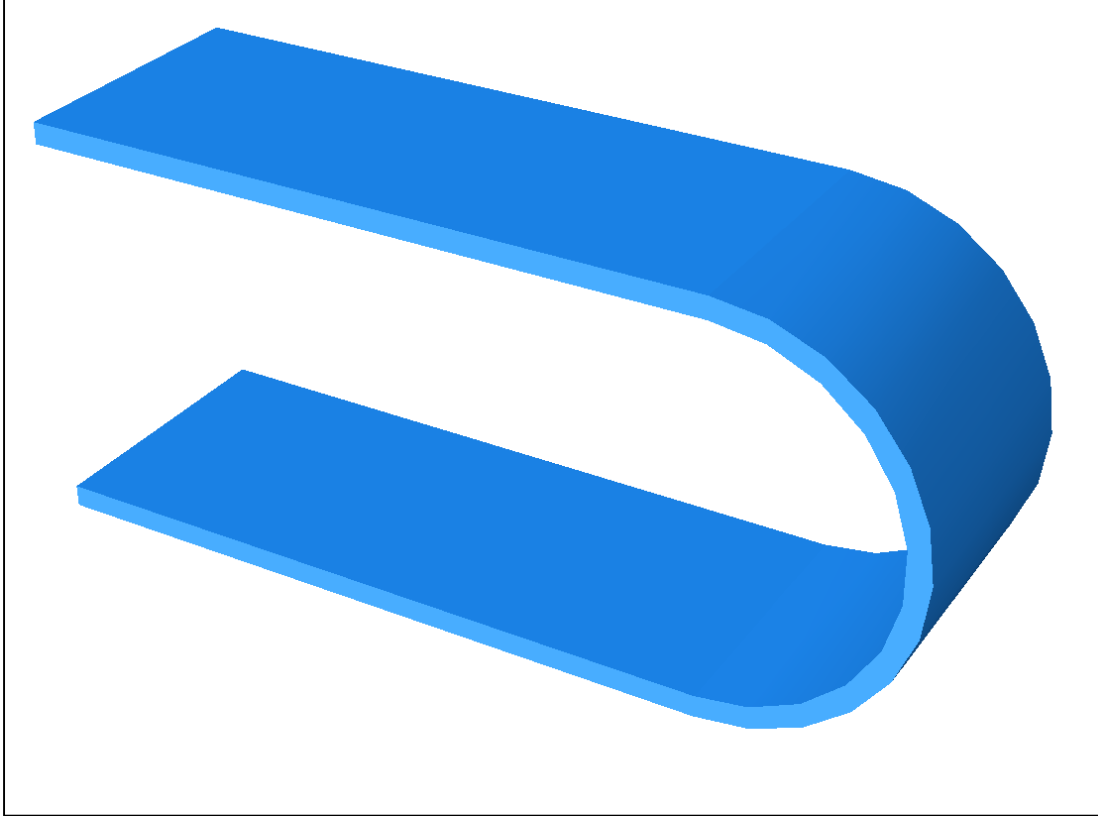
A.24.3 Sonlu Elemanlar Modeli Sonuçları



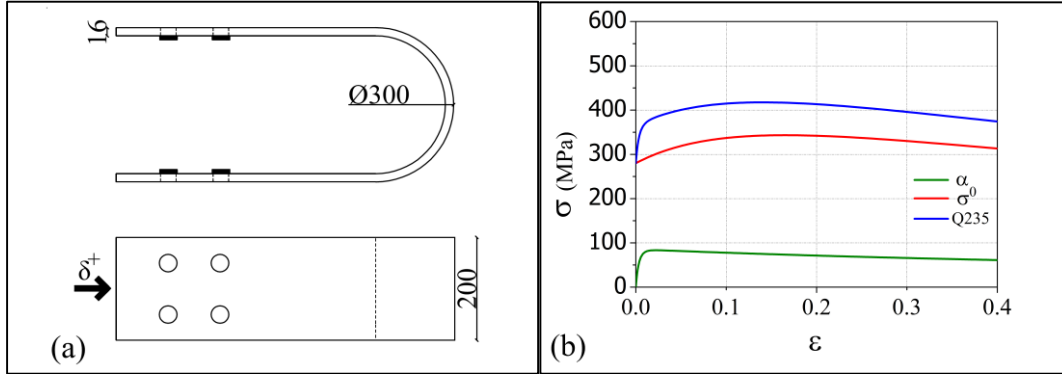
Şekil A.130 : a) Efektif rijitlik. b) Efektif sönüm. c) 250 mm'deki yatay kuvvet. d) Histeretik enerji. e) Yükleme grafiği.

A.25 UDS2 Sönümleyici Yükleme 0°

A.25.1 Geometri ve malzeme

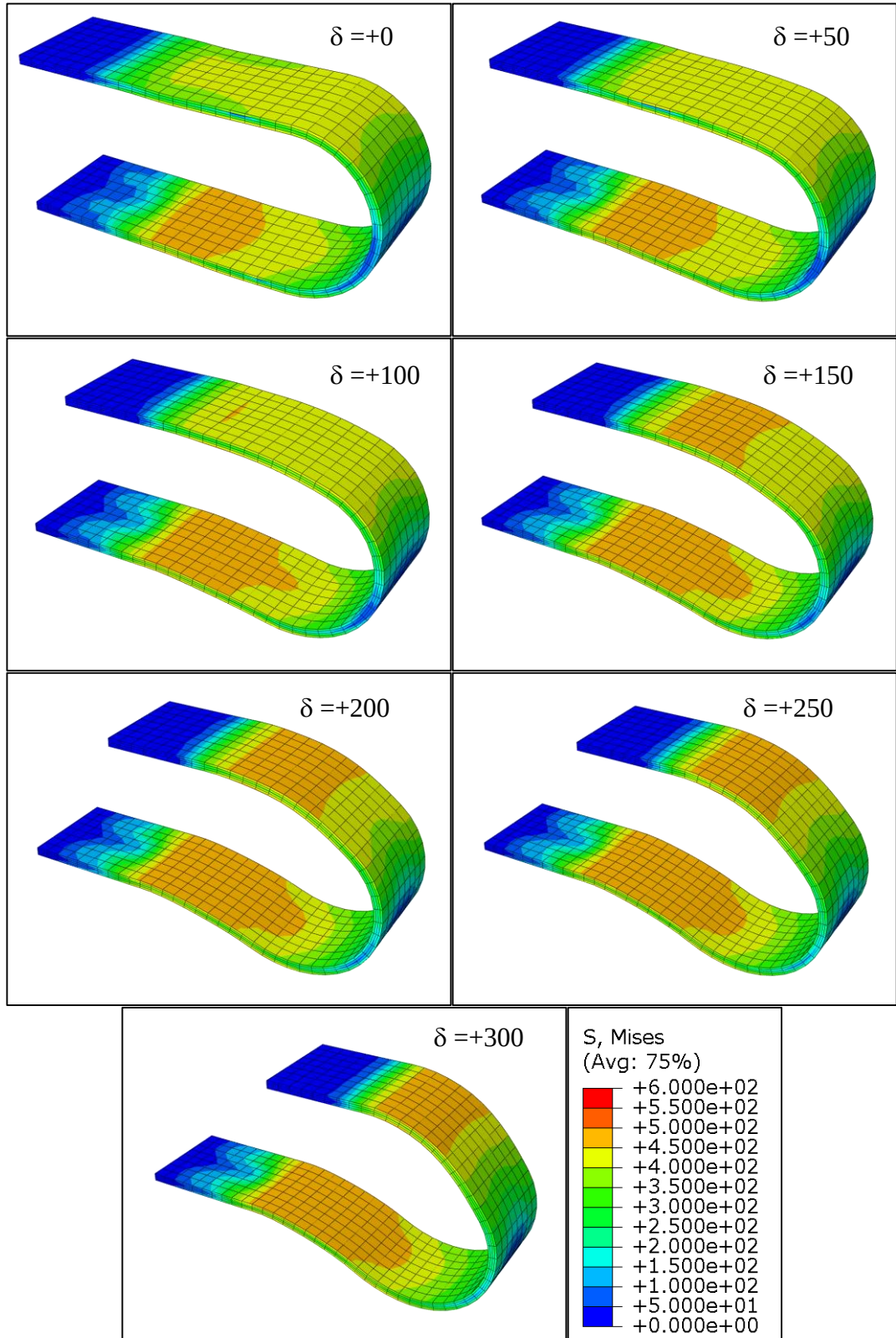


Şekil A.131 : Üç boyutlu model.

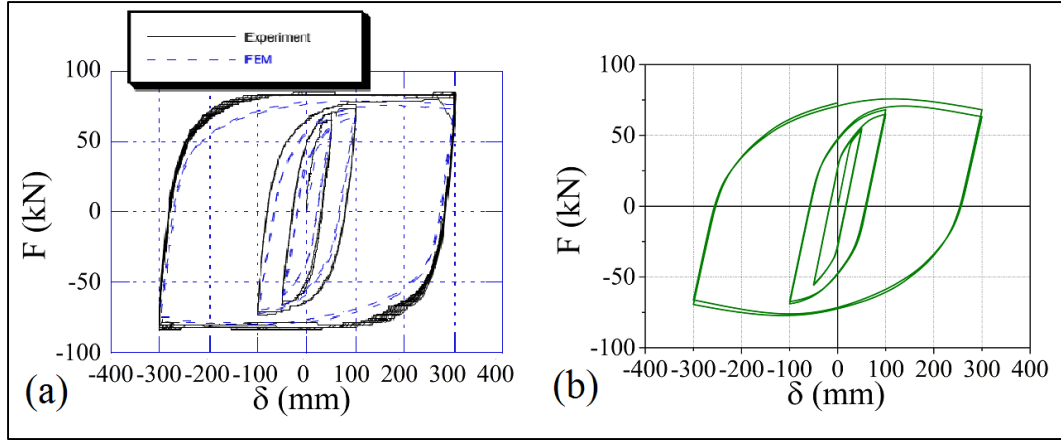


Şekil A.132 : (a) UDS2 boyutları – Yükleme yönü. (b) Malzeme özellikleri.

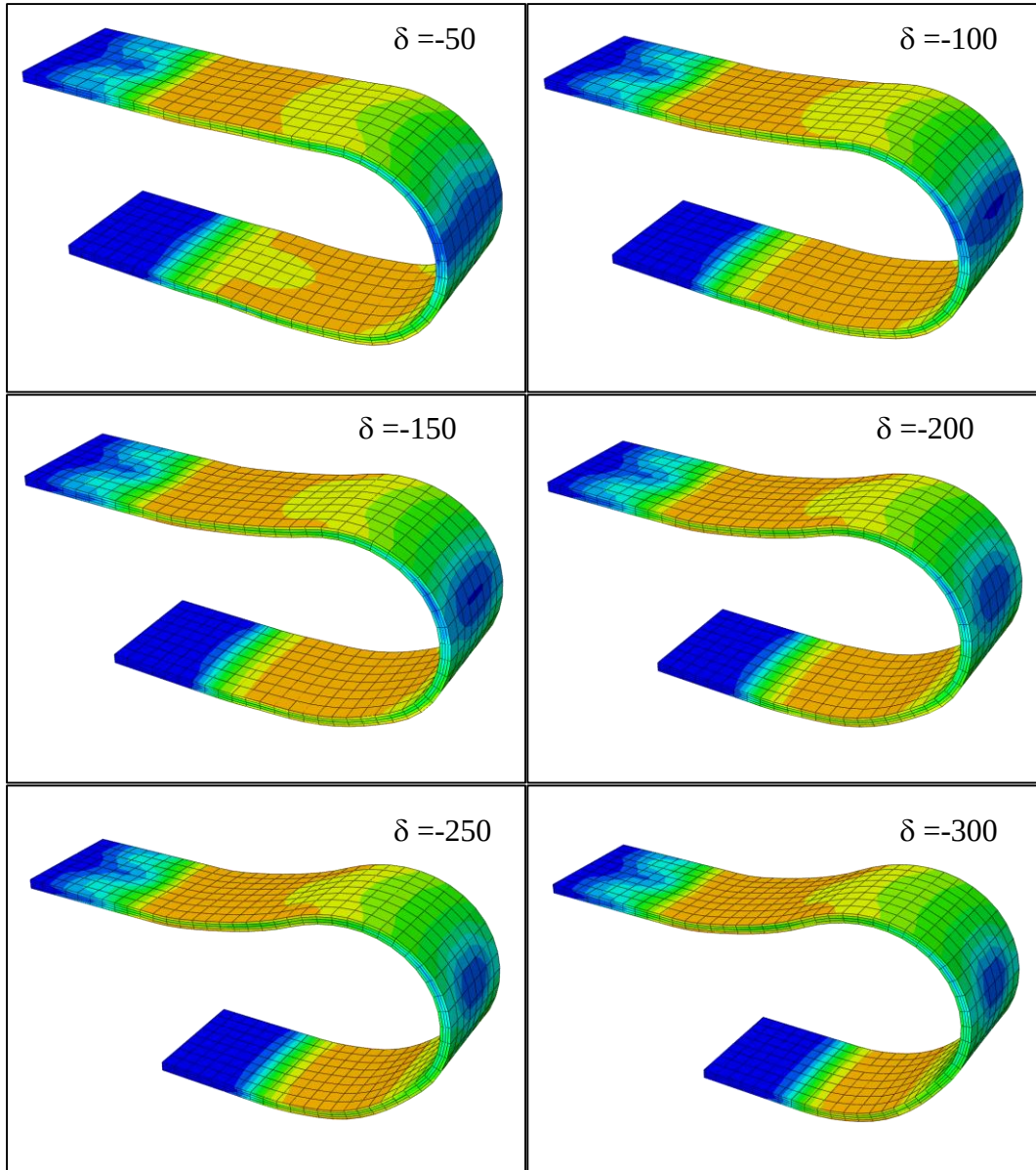
A.25.2 Sonlu elemanlar modeli



Şekil A.133 : Son çevrime ilişkin gerilme ve yerdeğiştirme durumları.

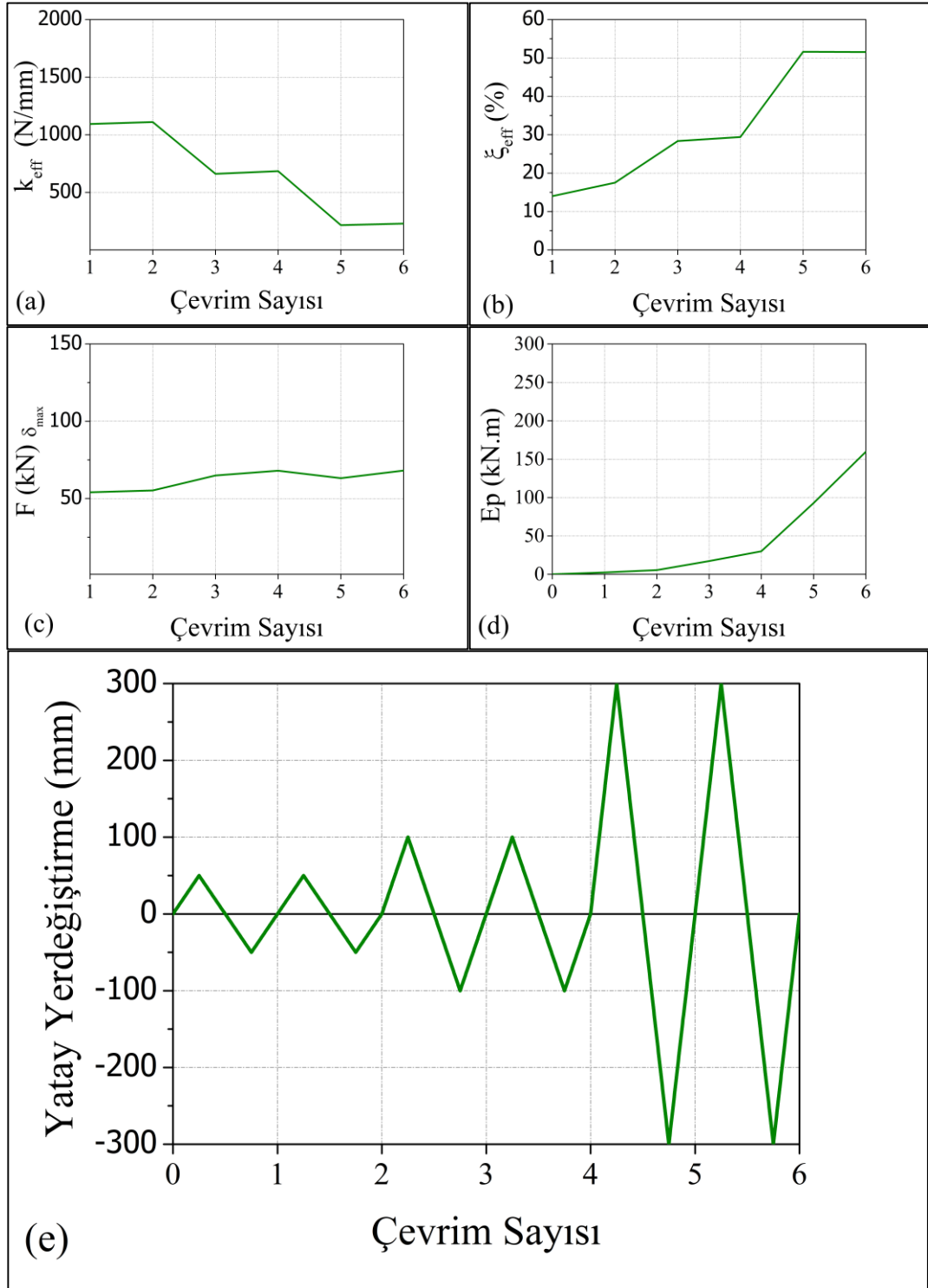


Şekil A.134 : (a) Deneysel. (b) Kuramsal histeretik eğrileri.



Şekil A.135 : Son çevrime ilişkin gerilme ve yerdeğiştirme durumları.

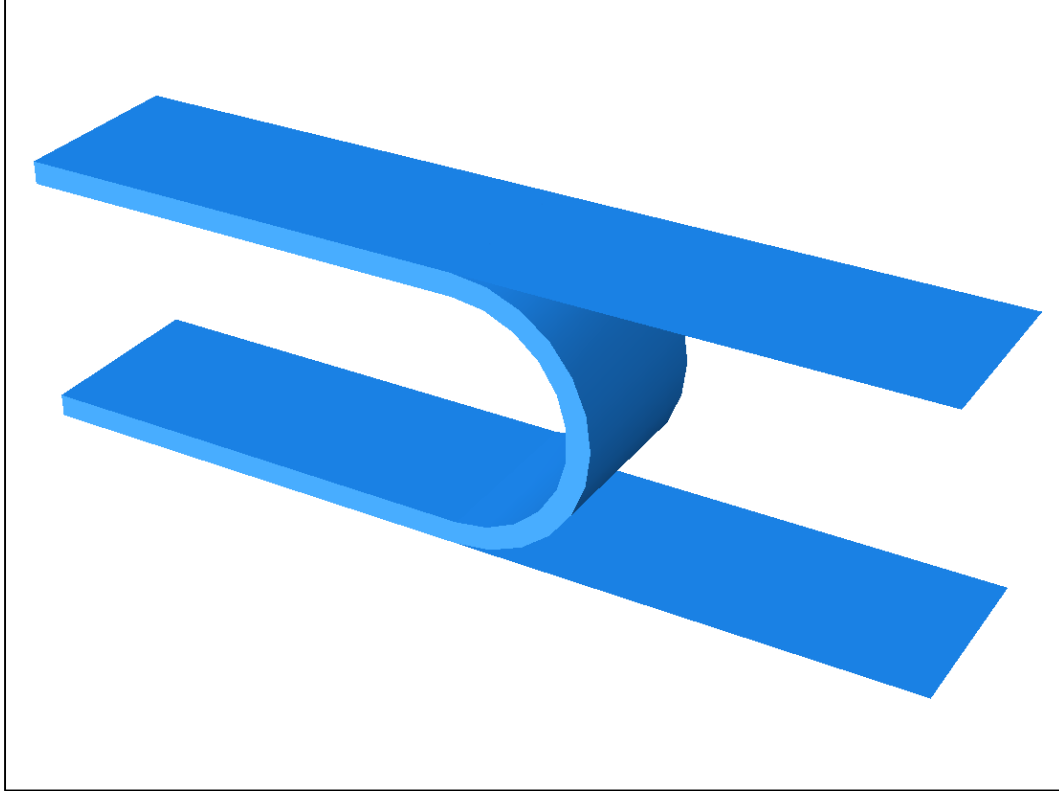
A.25.3 Sonlu Elemanlar Modeli Sonuçları



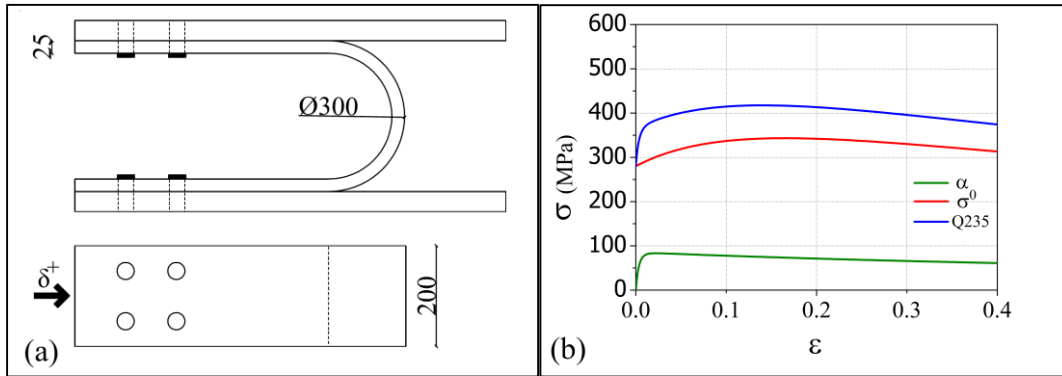
Şekil A.136 : a) Efektif rijitlik. b) Efektif sönüm. c) 250 mm'deki yatay kuvvet. d) Histeretik enerji. e) Yükleme grafiği.

A.26 UDS3 Sönümleyici Yükleme 0°

A.26.1 Geometri ve malzeme

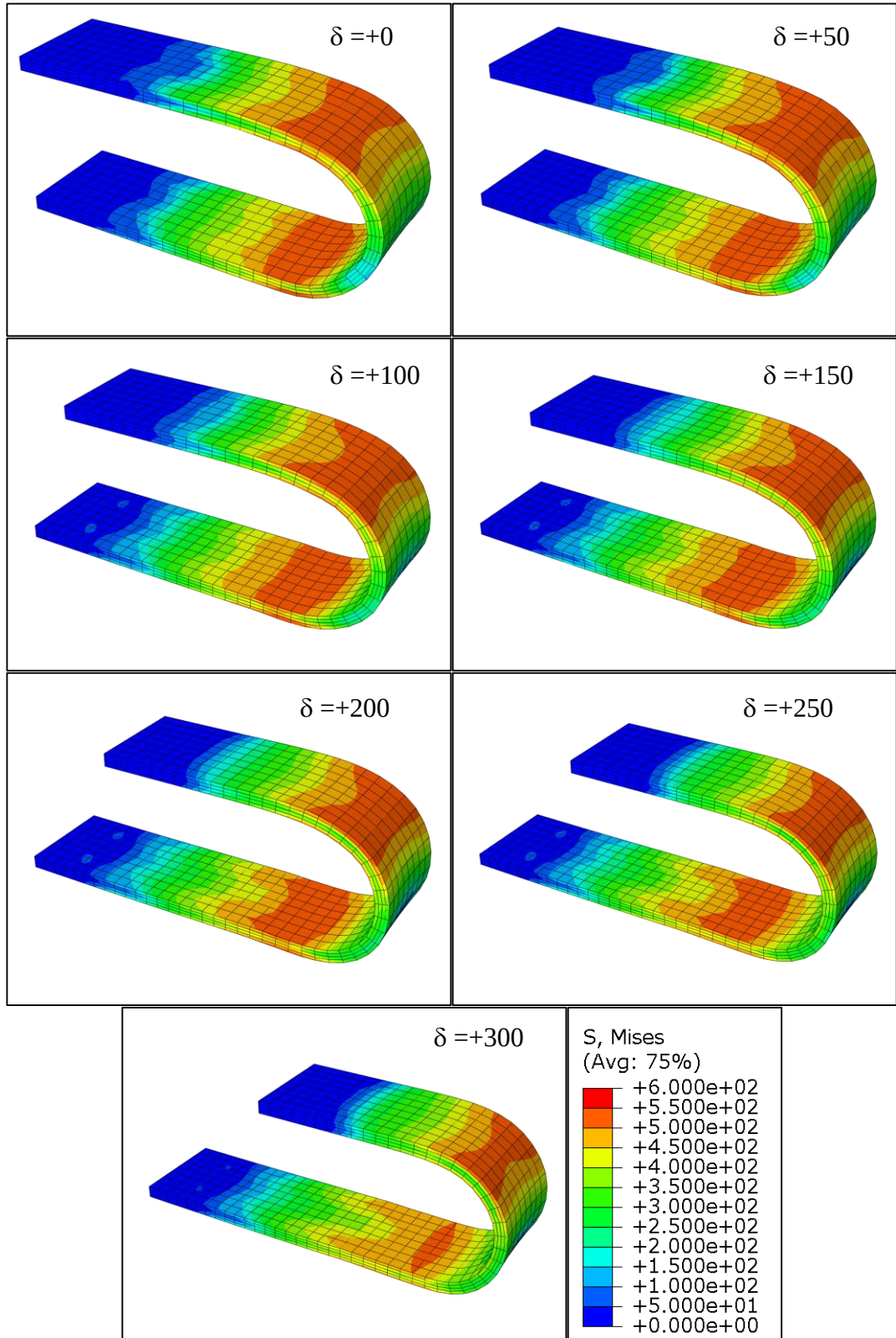


Şekil A.137 : Üç boyutlu model.

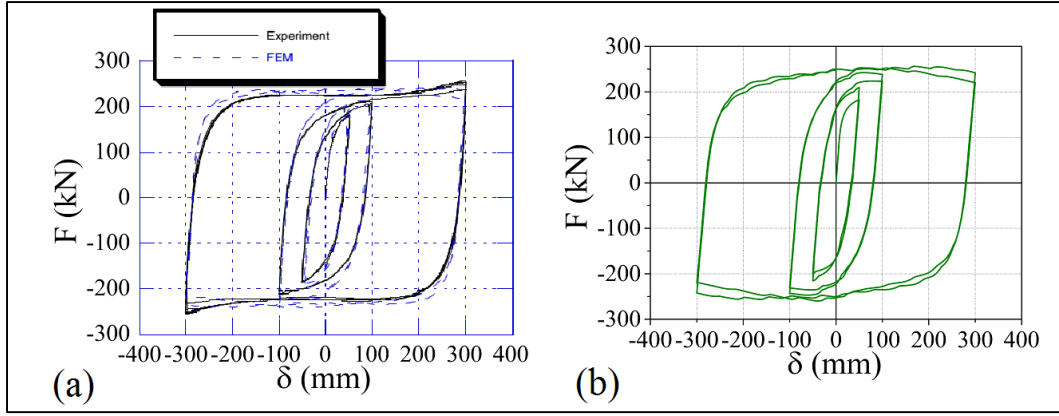


Şekil A.138 : (a) UDS3 boyutları – Yükleme yönü. (b) Malzeme özellikleri.

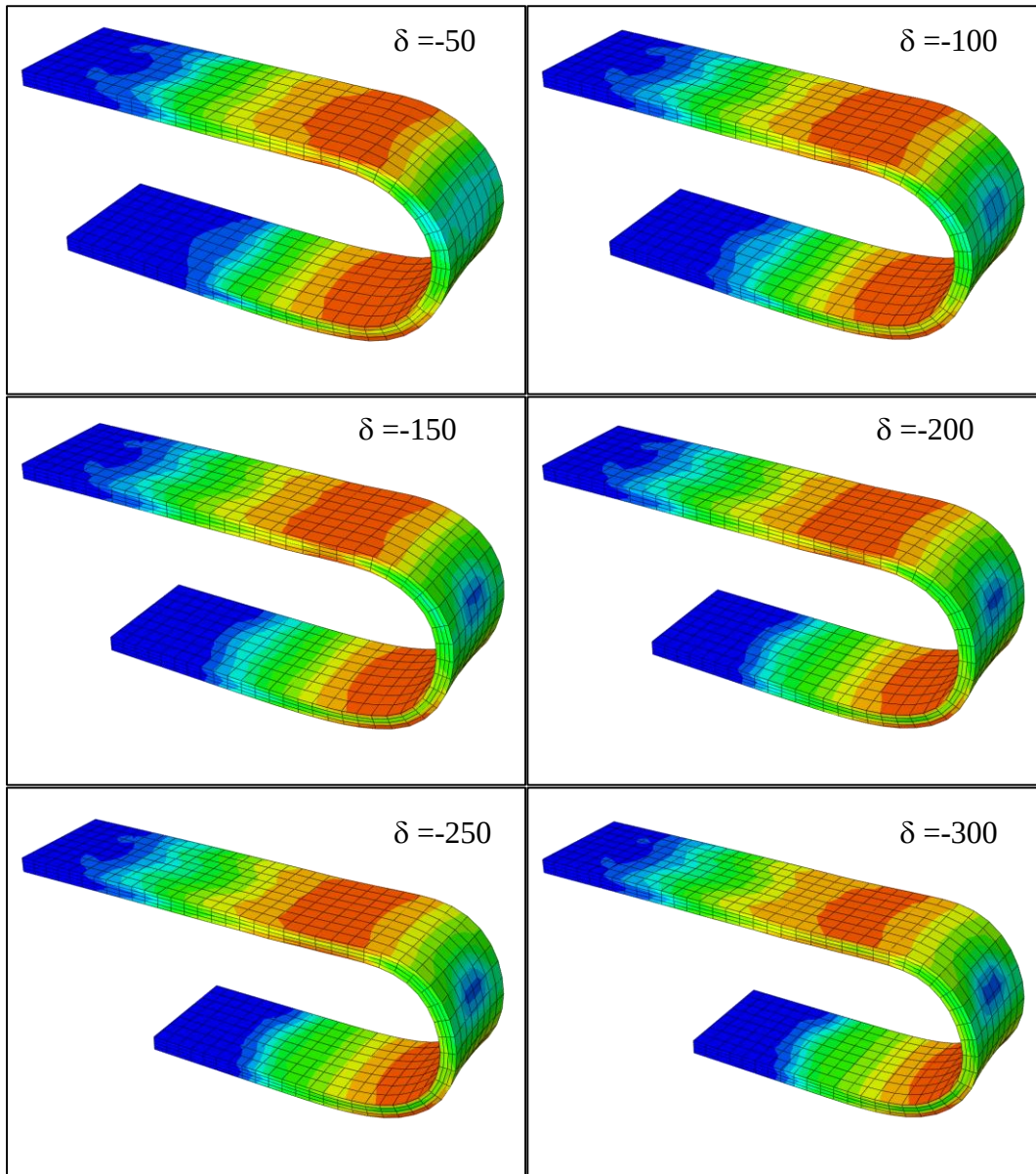
A.26.2 Sonlu elemanlar modeli



Şekil A.139 : Son çevrime ilişkin gerilme ve yerdeğiştirme durumları.

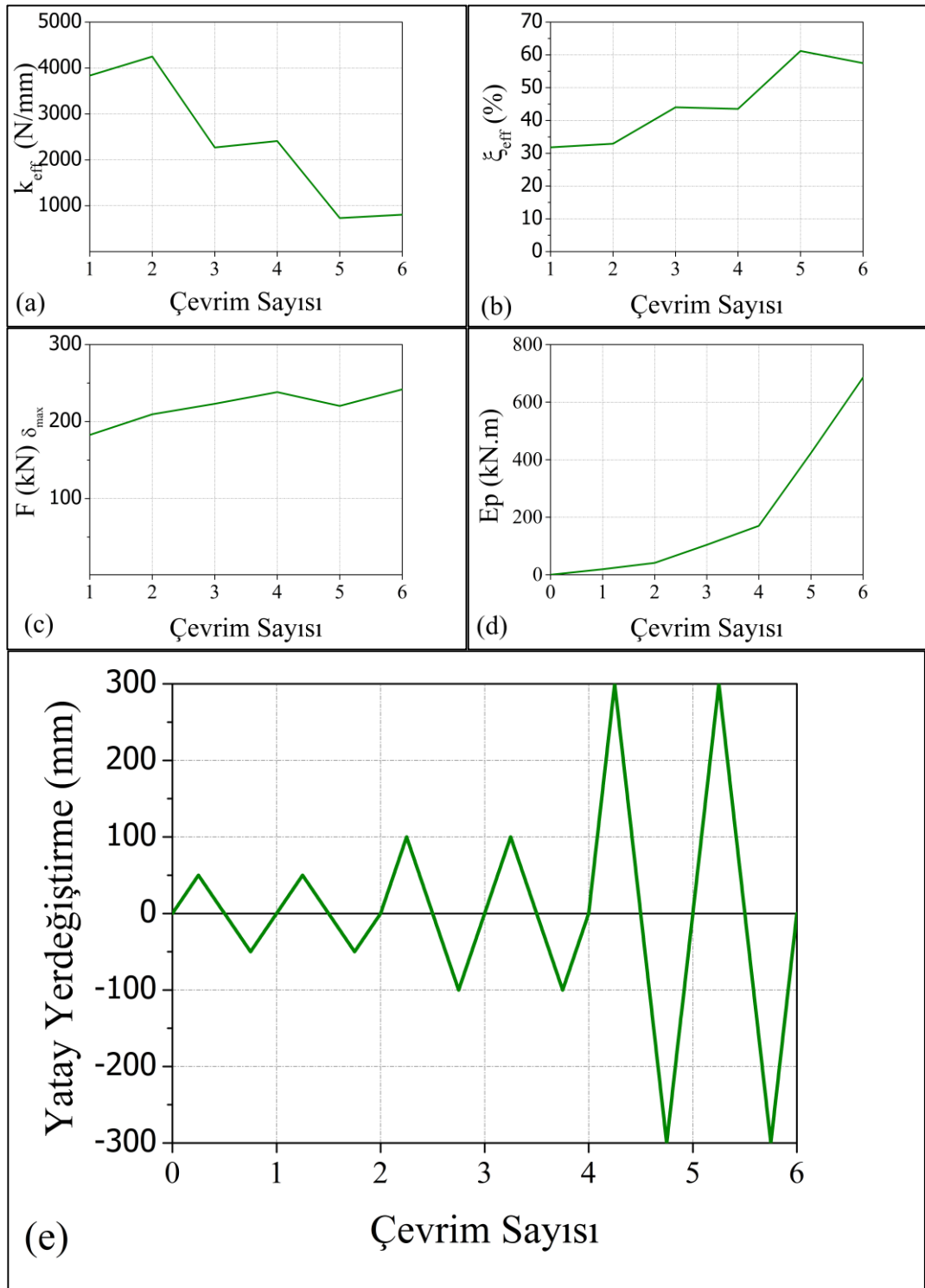


Şekil A.140 : (a) DeneySEL. (b) Kuramsal histeretik eğrileri.



Şekil A.141 : Son çevrime ilişkin gerilme ve yerdeğiştirme durumları.

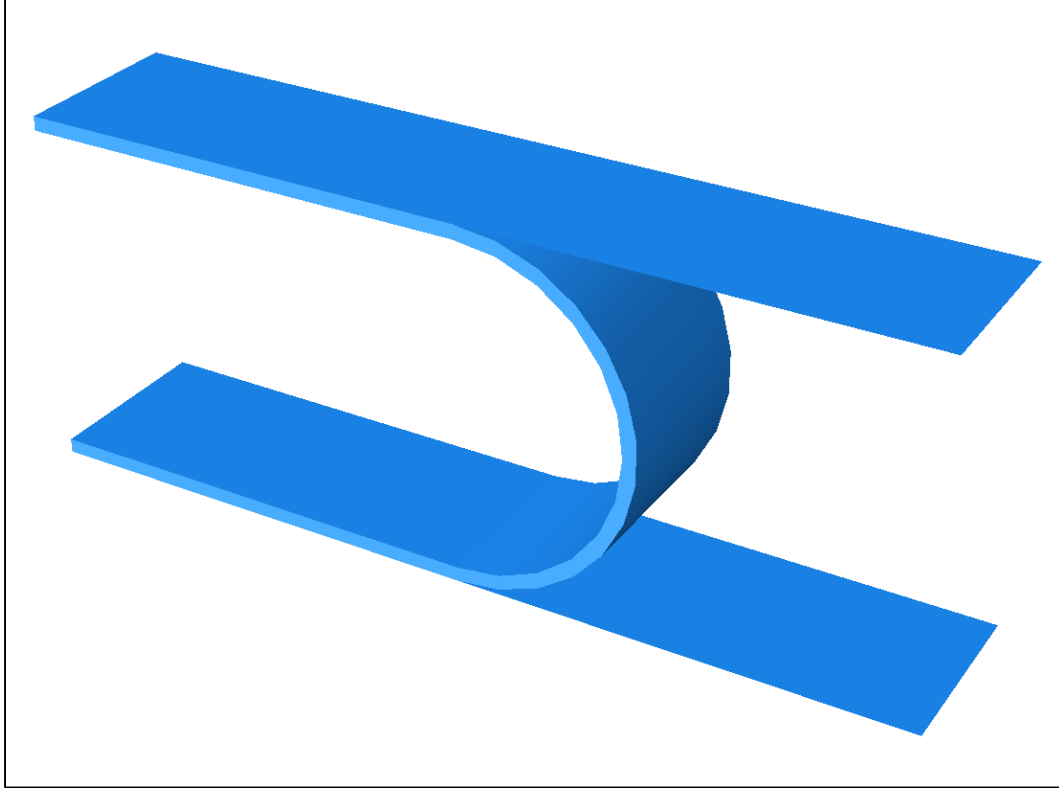
A.26.3 Sonlu Elemanlar Modeli Sonuçları



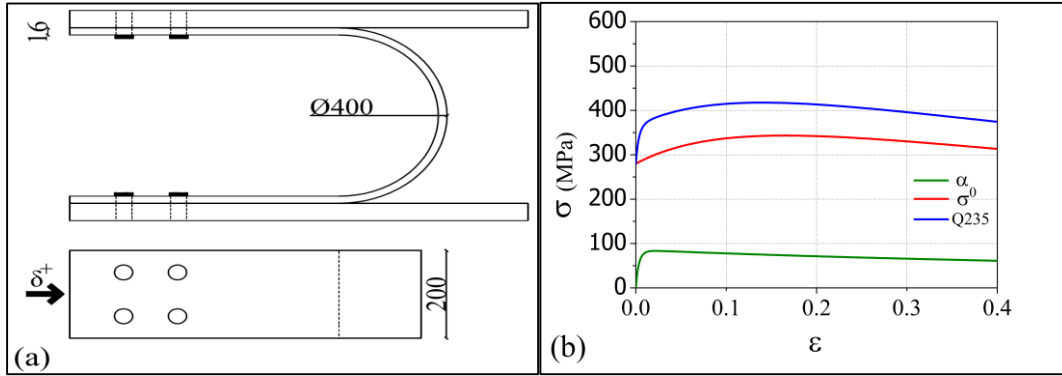
Şekil A.142 : a) Efektif rijitlik. b) Efektif sönüm. c) 250 mm'deki yatay kuvvet. d) Histeretik enerji. e) Yükleme grafiği.

A.27 UDS3 Sönümleyici Yükleme 0°

A.27.1 Geometri ve malzeme

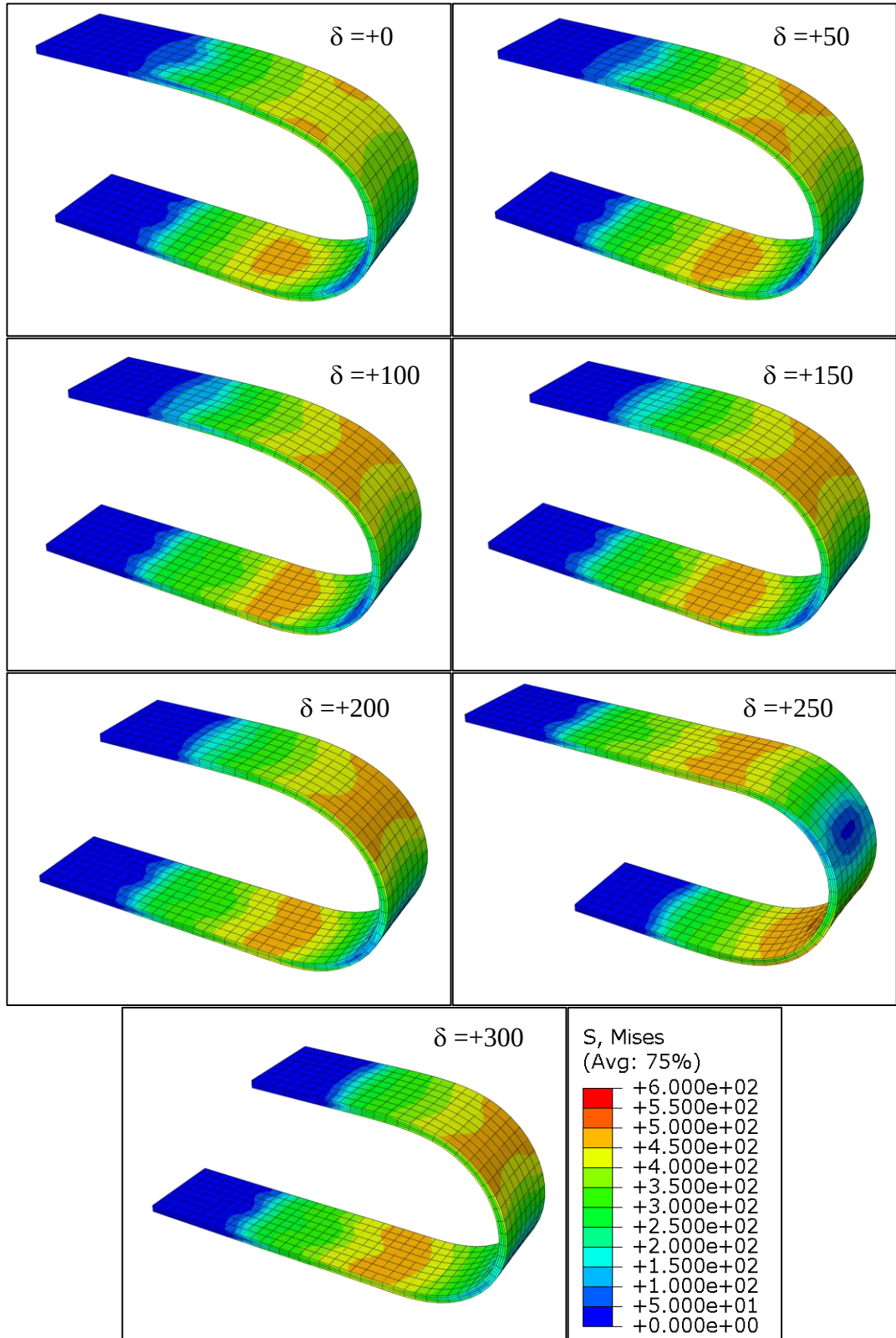


Şekil A.143 : Üç boyutlu model.

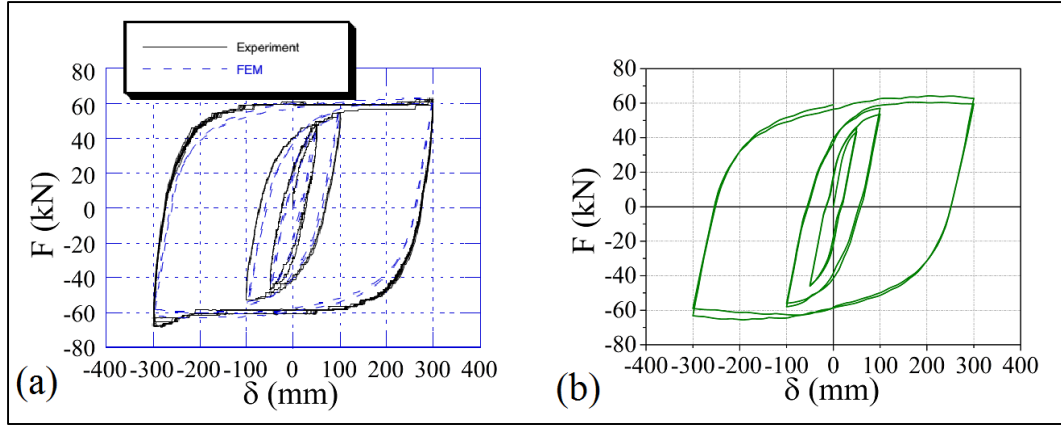


Şekil A.144 : (a) UDS3 boyutları – Yükleme yönü. (b) Malzeme özellikleri.

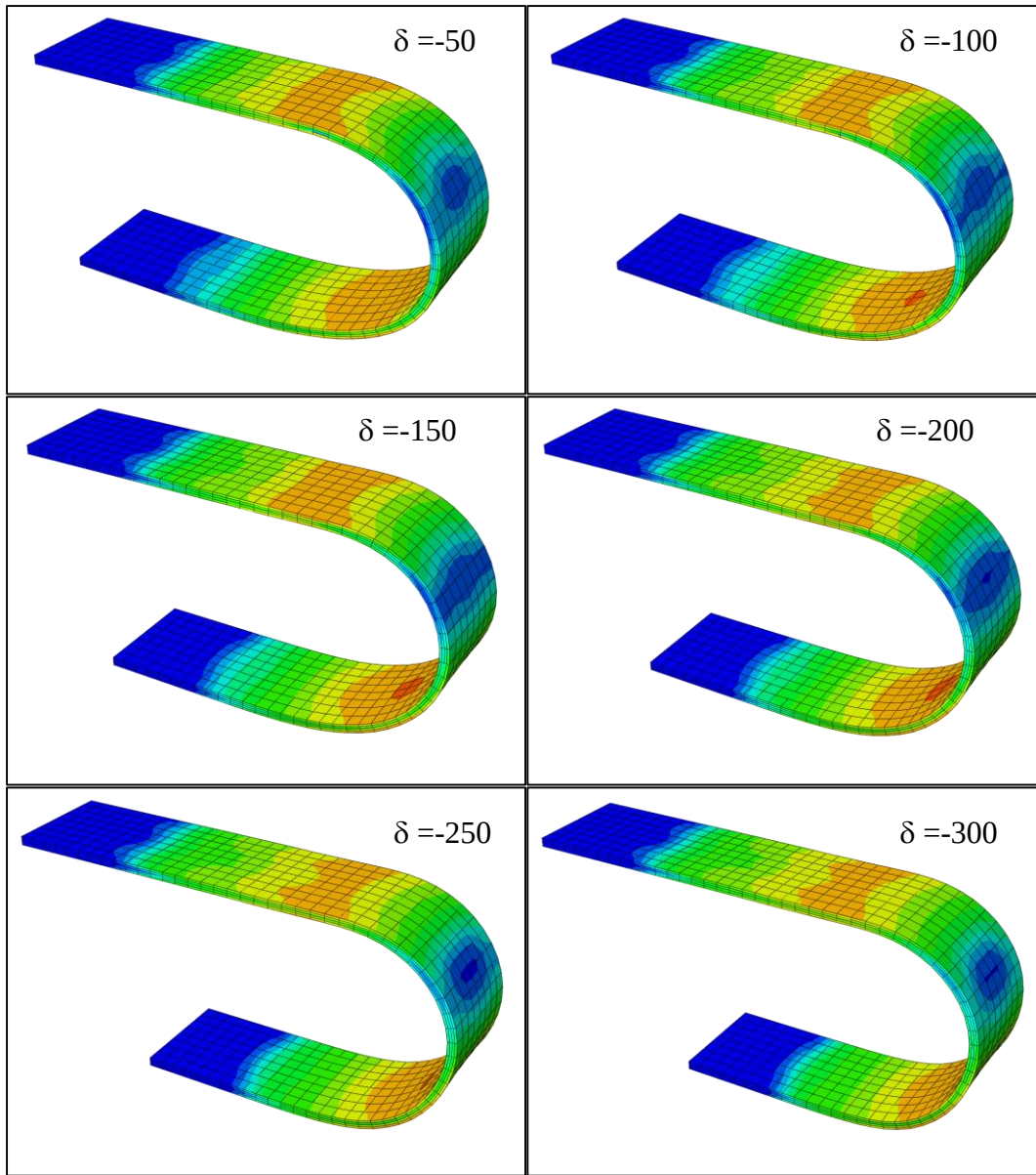
A.27.2 Sonlu elemanlar modeli



Şekil A.145 : Son çevrime ilişkin gerilme ve yerdeğiştirme durumları.

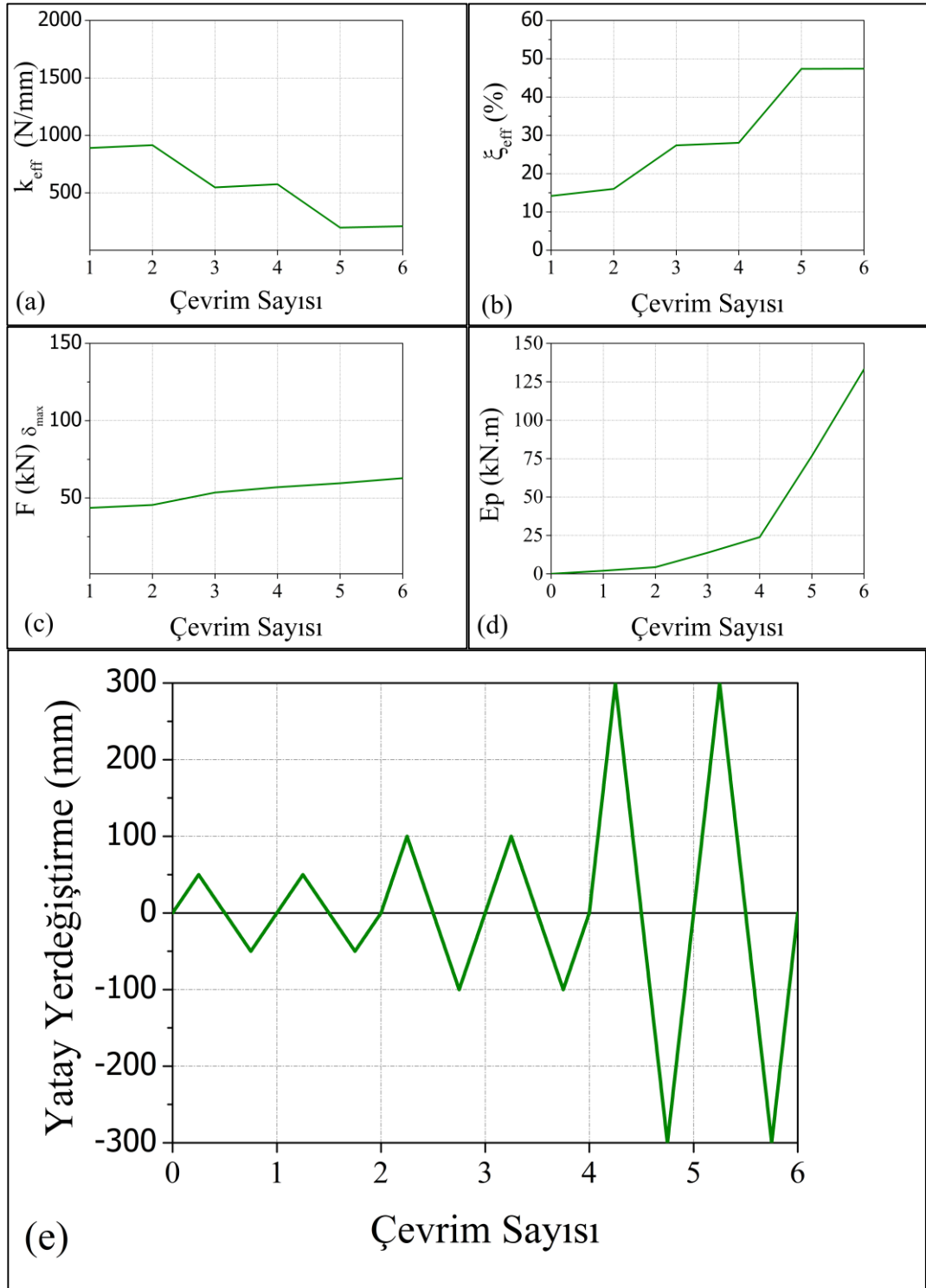


Şekil A.146 : (a) Deneysel. (b) Kuramsal histeretik eğrileri.



Şekil A.147 : Son çevrime ilişkin gerilme ve yerdeğiştirme durumları.

A.27.3 Sonlu Elemanlar Modeli Sonuçları



Şekil A.148 : a) Efektif rijitlik. b) Efektif sönüm. c) 250 mm'deki yatay kuvvet. d) Histeretik enerji. e) Yükleme grafiği.

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Kurtuluş Atasever
Doğum Tarihi ve Yeri : 26.01.1989 İstanbul
E-posta : kurtulus.atasever@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lise** : 2008, İstanbul Lisesi
- **Lisans** : 2013, Dokuz Eylül Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği

MESLEKİ DENEYİM :

- Rozet İnşaat ve Yapı Malzemeleri San. Tic. LTD. Şantiye Şefi
- Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi Araştırma Görevlisi