

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ŞEKİL VERME İŞLEMİNİN ÇARPMA PERFORMANSINA ETKİLERİNİN
SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mak. Müh. Recep GÜMRÜK

AĞUSTOS 2006
TRABZON

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**ŞEKİL VERME İŞLEMİNİN ÇARPMA PERFORMANSINA ETKİLERİNİN
SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE İNCELENMESİ**

Mak. Müh. Recep GÜMRÜK

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
"Makina Yüksek Mühendisi"
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 31.07.2006
Tezin Savunma Tarihi : 23.08.2006**

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Sami KARADENİZ

Jüri Üyesi : Prof. Dr. Ragıp ERDÖL

Jüri Üyesi : Doç. Dr. Hasan SOFUOĞLU

Enstitü Müdürü : Prof. Dr. Emin Zeki BAŞKENT

Trabzon 2006

ÖNSÖZ

Otomotiv endüstrüsünde yoğun şekilde uygulanan çarpma analizlerinin bilimsel bir uygulaması bu tez çalışmasında yapılmıştır. Tezde, mühendislik uygulamalarında geniş kullanım alanlarına sahip LS-DYNA sonlu elemanlar paket programı kullanılmıştır.

Çarpma analizleri ve sonlu elemanlar yöntemini birleştiren bir konuda çalışma imkanı vermesinden ve gösterdiği ilgiden dolayı sayın Prof. Dr. Sami KARADENİZ'e teşekkürü bir borç bilirim

Tez çalışmam sırasında yaptığı katkılar ve yönlendirmelerden dolayı Yrd. Doç. Dr. Hasan GEDİKLİ ve Dr. Vahap VAHAPOĞLU'na teşekkür ederim.

Ayrıca, bugüne kadar hep yanımda olan sevdiklerim ve aileme teşekkürlerimi sunarım.

Recep GÜMRÜK

Trabzon 2006

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	II
İÇİNDEKİLER.....	III
ÖZET	V
SUMMARY	VI
ŞEKİLLER DİZİNİ	VII
TABLolar DİZİNİ.....	XI
SEMBOLLER DİZİNİ	XII
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş	1
1.2. Tezin Konusu ve Amacı	3
1.3. Literatür Özeti.....	3
1.4. Enerji Yutucuları	6
1.4.1. İnce Duvarlı Tüpler.....	7
1.4.1.1. Eksenel Çarpma	8
1.4.1.2. Eksenel Altüst Olma	9
1.4.1.3. Eksenel Yarıлма.....	10
1.4.1.4. Yanal Bükülme	10
1.4.1.5. Yanal Basma.....	11
1.4.1.6. Yanal Düzleşme.....	11
1.4.2. Petek (Balküpü) Yapılar	12
1.4.3. Köpükler	13
1.4.4. Yalıtkan (Isolator) Yapılar.....	13
1.5. Çarpma Mekaniğindeki Bazı Performans Büyüklükleri.....	14
1.5.1. Birim Kütle Başına Yutulan Enerji.....	14
1.5.2. Ortalama Çarpma Kuvveti.....	14
1.5.3. Ortalama Çarpma Gerilmesi.....	15
1.5.4. Birim Çarpma Uzunluğu Başına Sönümlenen Enerji	15
1.5.5. Çarpma Kuvveti Verimi	15
1.5.6. Strok Verimi	15

1.5.7.	Dinamik Büyütme Faktörü	16
1.6.	Geri Yaylanma (Springback) Olayı	16
1.7.	LS-DYNA.....	17
1.8.	Direk Zaman İntegrasyon Yöntemleri	19
1.8.1.	Ekspilisit Yöntem	19
1.8.2.	İmpilisit Yöntem.....	21
1.8.3.	İmpilisit ve Ekspilisit Yöntemler Arasındaki Farklar.....	21
2.	YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	23
2.1.	Giriş	23
2.2.	Kullanılan Eleman Tipi ve Büyüklüğü	25
2.3.	Malzeme Modeli.....	26
2.4.	Çarpma Modelinin Oluşturulması Aşamaları	27
2.4.1.	Derin Çekme Analizi	27
2.4.2.	Kırpma (Trimming) Analizi	31
2.4.3.	Geri Yaylanma Analizi	32
2.4.4.	Ağ (Mesh) Kabalaştırma Analizi.....	34
2.4.5.	Çarpma Analizleri.....	35
2.4.5.1.	Şekil Verme İşlemlerinden Gelen Deforme Olmuş Ağ ile Yapılan Çarpma Analizleri.....	35
2.4.5.2.	Nominal Geometri ile Yapılan Çarpma Analizleri.....	38
2.4.5.3.	Statik Çarpma Analizleri	39
2.4.5.4.	Oluğun (Trigger) Deformasyon Şekline Etkisinin İncelenmesi	41
2.4.5.5.	Şekil Verme Hızının Çarpma Davranışına Etkisi.....	41
3.	BULGULAR VE İRDELEMELER	42
3.1.	Şekil Verme İşlemlerinden Gelen Deforme Olmuş Ağ ile Yapılan Çarpma Analizleri.....	42
3.2.	Nominal Geometri ile Yapılan Çarpma Analizleri.....	79
3.3.	Statik Çarpma Analizleri	90
3.4.	Oluğun Deformasyon Şekline Etkisinin İncelenmesi.....	94
3.5.	Şekil Verme Hızının Çarpma Davranışına Etkisinin İncelenmesi	99
4.	SONUÇLAR	101
5.	ÖNERİLER.....	103
6.	KAYNAKLAR	105
	ÖZGEÇMİŞ	109

ÖZET

Bu tez çalışmasında form verme işlemi verilerinin aksenal yükleme etkisindeki kiriş benzeri bir yapının statik ve dinamik çarpma davranışına etkileri sonlu elemanlar yöntemi ile incelenmiştir. Özellikle, derin çekme işlemi nedeniyle oluşan plastik şekil değiştirme, kalınlık değişimi ve artık gerilmelerin bir şapka kesitli, punto kaynağı ile düz bir kapakla kapatılmış bir kirişin enerji yutma ve şekil değiştirme davranışı incelenmiştir.

Analizler farklı iki simülasyon modeli kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Birinci model derin çekme ve geri yaylanma analizleri sonundaki deforme olmuş ağ kullanılarak, ikinci model ise derin çekme simülasyonu sonunda elde edilen artık şekil verme verilerinin nominal geometri kullanılarak oluşturulan yeni bir ağ üzerine eşleştirilmesiyle oluşturulmuştur.

Derin çekme işlemi sırasında baskı plakasına uygulanan kuvvet değiştirilerek kalıcı form verme etkilerinde değişimler elde edilmiştir.

Şekil verme işlemi malzemenin mukavemetinde, kalınlığında ve yapının final geometrisinde önemli değişimlere sebep olmaktadır. Derin çekme işlemi sırasında oluşan plastik şekil değişimi şekil değiştirme pekleşmesine neden olduğundan yapının daha rijit davranmasına sebep olmaktadır. Öte yandan, aynı işlem sırasında oluşan kalınlık incelmeleri yapıyı zayıflatmaktadır. Şekil verme işlemi sonunda elde edilen tüm etkilerin birlikte göz önüne alınması daha rijit bir yapının oluşmasına neden olmaktadır.

Nominal geometri kullanılarak oluşturulan ağla yapılan analizler baskı plakası kuvvetinin büyüklüğünün çarpma performansı üzerinde önemli etkisinin olabileceğini göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Sonlu Elemanlar Yöntemi, LS-DYNA, Dinamik Çarpma, Statik Çarpma, Artık Şekil Verme Etkileri, Derin Çekme, Geri Yaylanma, Ağ Kabalaştırma, Enerji Yutucusu, İmpilisit Yöntem, Ekspilisit Yöntem

SUMMARY

Investigation of the Effects of the Forming Process on the Crash Performance by Finite Element Method

In this thesis, the effects forming process data on the quasi-static and dynamic impact responses of beam like structures under axial loading were investigated by finite element method. In particular, the effects of plastic strains, thickness reductions and residual stresses due to deep drawing process on the energy absorption and deformation response of a frame having a simple hat profile and spot welded flat lid were examined.

In these analyses, two different meshes were used. One was the deformed mesh coming from the forming and springback analysis, the other was created by transferring the final state data after the forming process on to a frame with the nominal cross sectional dimensions.

During deep drawing process, different residual forming effects were created by changing the blank holder force

The forming process causes significant changes in material strength, thickness and the final geometry of the structure. The plastic strains produced in the material during the forming process causes a stiffer response of the structure by giving rise to deformation hardening. However, the reduction in the thickness due to the same process weakens the structure. Consideration of all the data obtained from the forming process leads to the forming of a structure which exhibits more resistance against deformation.

The analyses carried out by the mesh based upon the nominal geometric data showed that the magnitude of the blank holder force may have a considerable influence on the crash performance

Key Words: Finite Element Method, LS-DYNA, Dynamic Crash, Static Crash, Residual Forming Effects, Deep Drawing Process, Springback, Mesh Coarsening, Energy Absorber, Implicit Method, Explicit Method

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.1. Bir araca ait iskelet yapısı ve enerji sönümlenme elemanları [1].	1
Şekil 1.2. Dairesel kesitli tüplerin aksel deformasyon modları [13], (a) Aksel simetrik, (b) Simetrik	8
Şekil 1.3. Kare kesitli tüplerin aksel deformasyon modları [13], (a) Simetrik, (b) Aksel simetrik	9
Şekil 1.4. Çift taraflı boru çevrimine maruz bırakılmış bir tüpün kesit görünüşü	9
Şekil 1.5. Kare ve daire kesitli tüpler için aksel tüp yarılmaları, (a) Dairesel kesitli tüpün aksel yarılmaları, (b) Kare kesitli tüplerin aksel yarılmaları [11].	10
Şekil 1.6. Bir tüpün yanal basma ile deformasyonu [10].	11
Şekil 1.7. İki paralel düzlem arasında tüpün yanal düzleştirilmesi [11].	12
Şekil 1.8. Örnek bir petek yapısı ve gerilme-şekil değiştirme ilişkisi [10].	13
Şekil 1.9. Geri yaylanma olayının mekanik davranışı	16
Şekil 1.10. Şapka kesitli bir profilin geri yaylanma sonrası boyutlarında meydana gelen değişim [21].	17
Şekil 1.11. Tez çalışmasında kullanılan programlar	18
Şekil 1.12. Eksplicit zaman integrasyon şeması	19
Şekil 2.1. Parçanın geometrisi ve ölçüleri	25
Şekil 2.2. DP 430 çeliğine ait çeşitli şekil değişimi hızlarında gerçek gerilme ve plastik şekil değişimi grafiği [29].	27
Şekil 2.3. Derin çekme işlemine ait parçaları	28
Şekil 2.4. (a) Zımbanın hareket eğrisi, (b) Baskı plakası yük eğrisi	29
Şekil 2.5. Derin çekme işleminden sonra parçada oluşan, (a) Von Mises gerilme dağılımı, (b) Etkin plastik şekil değişimi, (c) Kalınlık değişimi	30–31
Şekil 2.6. Kırpmalı analiz için tanımlanan eğrinin şekli	32
Şekil 2.7. Kırpmalı analiz için, (a) Kırpmalı analizden önceki durum, (b) Kırpmalı analizden sonraki durum	32
Şekil 2.8. (a) Geri yaylanma analizinden önce parçadaki Von Mises gerilme Dağılımı ve sınır koşulları, (b) Geri yaylanma analizinden sonra Von Mises gerilme dağılımı	33-34

Şekil 2.9. Geri Yaylanma Analizinden Sonra kapak üzerindeki Von Mises gerilme dağılımı	34
Şekil 2.10. Ağ kabalaştırmadan önce ve kabalaştırdıktan sonraki ağ durumu.....	35
Şekil 2.11. Çarpma analizlerinde kullanılan sonlu elemanlar modeli.....	36
Şekil 2.12. Çarpma modeline aktarılmış gerilme dağılımı.....	37
Şekil 2.13. Geri yaylanma analizinden sonraki verilerin nominal geometri üzerine eşleştirilmesi, (a) Kalınlık eşleştirilmesi, (b) Plastik şekil değişiminin eşleştirilmesi, (c) Gerilmenin eşleştirilmesi.....	38-39
Şekil 2.14. Statik analizlerde rijit duvar için tanımlanan zamana göre yer değiştirme eğrisi.....	40
Şekil 3.1. Farklı baskı plakası yükleri altında derin çekme analizinden sonra parçalardaki kalınlık değişimleri, (a) 1 mm kalınlıklı parça, (b) 1.5 mm kalınlıklı parça, (c) 2 mm kalınlıklı parça.....	44
Şekil 3.2. 1000 kN'luk baskı plakası yükü ile şekil verilen 1 mm kalınlıklı parçanın deformasyon modlarının zamanla değişimi.....	45
Şekil 3.3. 50 kN baskı plakası yükü ile şekil verilen 1 mm kalınlıklı parçada, (a) Rijit duvarın zamanla yaptığı yer değiştirme, (b) İç enerji değişimi, (c) Rijit duvarda oluşan reaksiyon kuvvetinin rijit duvar yer değiştirmesi ile değişimi, (d) Ortalama çarpma kuvvetinin değişimi	46-47
Şekil 3.4. 200 kN baskı plakası yükü ile şekil verilen 1 mm kalınlıklı parçada, (a) Rijit duvarın zamanla yaptığı yer değiştirme, (b) İç enerji değişimi, (c) Rijit duvarda oluşan reaksiyon kuvvetinin rijit duvar yer değiştirmesi ile değişimi, (d) Ortalama çarpma kuvvetinin değişimi.....	48-49
Şekil 3.5. 600 kN baskı plakası yükü ile şekil verilen 1 mm kalınlıklı parçada, (a) Rijit duvarın zamanla yaptığı yer değiştirme, (b) İç enerji değişimi, (c) Rijit duvarda oluşan reaksiyon kuvvetinin rijit duvar yer değiştirmesi ile değişimi, (d) Ortalama çarpma kuvvetinin değişimi.....	50-51
Şekil 3.6. 1000 kN baskı plakası yükü ile şekil verilen 1 mm kalınlıklı parçada, (a) Rijit duvarın zamanla yaptığı yer değiştirme, (b) İç enerji değişimi, (c) Rijit duvarda oluşan reaksiyon kuvvetinin rijit duvar yer değiştirmesi ile değişimi, (d) Ortalama çarpma kuvvetinin değişimi.....	52-53
Şekil 3.7. 1300 kN baskı plakası yükü ile şekil verilen 1 mm kalınlıklı parçada, (a) Rijit duvarın zamanla yaptığı yer değiştirme, (b) İç enerji değişimi, (c) Rijit duvarda oluşan reaksiyon kuvvetinin rijit duvar yer değiştirmesi ile değişimi, (d) Ortalama çarpma kuvvetinin değişimi	54-55
Şekil 3.8. 1300 kN baskı plakası yükü ile şekillendirilen parçada kanal ve kapak arasında meydana gelen boy farkı.....	58
Şekil 3.9. Yüksek baskı plakası yükü sebebiyle parçanın boyunda oluşan kısalmanın maksimum çarpma kuvvetine etkisi	59
Şekil 3.10. Plastik şekil değişiminin çarpmaya etkisi	60

Şekil 3.11. Çarpma analizlerinde 1 mm kalınlıklı parçada tüm baskı plakası yüklemeleri için elde edilen geometrik etkilerin rijit duvar yer değiştirmesi bakımından karşılaştırılması	60
Şekil 3.12. Çarpma analizlerinde 1 mm kalınlıklı parçada tüm baskı plakası yüklemeleri için elde edilen plastik şekil verme etkilerinin rijit duvar yer değiştirmesi bakımından karşılaştırılması	61
Şekil 3.13. Çarpma analizlerinde 1 mm kalınlıklı parçada tüm baskı plakası yüklemeleri için elde edilen kalınlık değişimi etkilerinin rijit duvar yer değiştirmesi bakımından karşılaştırılması	61
Şekil 3.14. Çarpma analizlerinde 1 mm kalınlıklı parçada tüm baskı plakası yüklemeleri için elde edilen tüm şekil verme etkilerinin içerildiği durumların rijit duvar yer değiştirmesi bakımından karşılaştırılması	62
Şekil 3.15. 600 kN baskı plakası yükü ile şekil verilen 1.5 mm kalınlıklı parçada, (a) Rijit duvarın zamanla yaptığı yer değiştirme, (b) İç enerji değişimi, (c) Rijit duvarda oluşan reaksiyon kuvvetinin rijit duvar yer değiştirmesi ile değişimi, (d) Ortalama çarpma kuvvetinin değişimi	64-65
Şekil 3.16. 1000 kN baskı plakası yükü ile şekil verilen 1.5 mm kalınlıklı parçada, (a) Rijit duvarın zamanla yaptığı yer değiştirme, (b) İç enerji değişimi, (c) Rijit duvarda oluşan reaksiyon kuvvetinin rijit duvar yer değiştirmesi ile değişimi, (d) Ortalama çarpma kuvvetinin değişimi	66-67
Şekil 3.17. 1300 kN baskı plakası yükü ile şekil verilen 1.5 mm kalınlıklı parçada, (a) Rijit duvarın zamanla yaptığı yer değiştirme, (b) İç enerji değişimi, (c) Rijit duvarda oluşan reaksiyon kuvvetinin rijit duvar yer değiştirmesi ile değişimi, (d) Ortalama çarpma kuvvetinin değişimi	68-69
Şekil 3.18. 600 kN baskı plakası yükü ile şekil verilen 2 mm kalınlıklı parçada, (a) Rijit duvarın zamanla yaptığı yer değiştirme, (b) İç enerji değişimi, (c) Rijit duvarda oluşan reaksiyon kuvvetinin rijit duvar yer değiştirmesi ile değişimi, (d) Ortalama çarpma kuvvetinin değişimi	70-71
Şekil 3.19. 1000 kN baskı plakası yükü ile şekil verilen 2 mm kalınlıklı parçada, (a) Rijit duvarın zamanla yaptığı yer değiştirme, (b) İç enerji değişimi, (c) Rijit duvarda oluşan reaksiyon kuvvetinin rijit duvar yer değiştirmesi ile değişimi, (d) Ortalama çarpma kuvvetinin değişimi	72-73
Şekil 3.20. 1300 kN baskı plakası yükü ile şekil verilen 2 mm kalınlıklı parçada, (a) Rijit duvarın zamanla yaptığı yer değiştirme, (b) İç enerji değişimi, (c) Rijit duvarda oluşan reaksiyon kuvvetinin rijit duvar yer değiştirmesi ile değişimi, (d) Ortalama çarpma kuvvetinin değişimi	74-75
Şekil 3.21. Kalınlıkla iç enerjideki değişimi (a) 600 kN baskı plakası yükü, (b) 1000 kN baskı plakası yükü, (c) 1300 kN baskı plakası yükü	77-78
Şekil 3.22. 600 kN baskı plakası yükü için tüm etkiler altında kalınlığın ortalama çarpma kuvvetine etkisi	78

Şekil 3.23. 1000 kN baskı plakası yükü ile şekil verilen 1mm kalınlıklı parçaya ait şekil verme verilerinin nominal geometriye eşlenmesi, (a) Rijit duvarın zamanla yaptığı yer değiştirme, (b) İç enerji değişimi, (c) Rijit duvarda oluşan reaksiyon kuvvetinin rijit duvar yer değiştirmesi ile değişimi, (d) Ortalama çarpma kuvvetinin değişimi	80-81
Şekil 3.24. Şekil verme etkilerinin nominal geometriye eşleştirilmesiyle oluşturulan modellerin deformasyon modları	82
Şekil 3.25. Farklı baskı plakası yüklemeleri etkisinde bulunan 1mm kalınlıklı parçaya ait şekil verme verilerinin tümünün nominal geometriye eşlenmesi, (a) Rijit duvarın yer değiştirmesi, (b) İç enerji değişimi, (c) Rijit duvar kuvveti, (d) Ortalama çarpma kuvveti verilerinin karşılaştırılması	84-85-86
Şekil 3.26. Farklı baskı plakası kuvvetleri etkisinde şekil verilen parçalara ait tüm şekil verme etkilerinin dikkate alındığı deforme olmuş ağ ve nominal ağ kullanılması durumunda rijit duvar yer değişimleri, (a) 50 kN, (b) 200 kN, (c) 600 kN, (d) 1000 kN, (e) 1300 kN	87
Şekil 3.27. Çarpma analizlerinde başlangıç deformasyon modları, (a) Birinci çeşit deformasyon modu, (b) İkinci çeşit deformasyon modu, (c) Üçüncü çeşit deformasyon modu.....	88
Şekil 3.28. Başlangıç deformasyon modunun 1300 kN baskı plakası yükü ile üretilmiş 1 mm kalınlıklı parçada deforme olmuş ağ ve nominal ağ kullanılması durumlarında çarpmaya etkisi, (a) İkinci çeşit başlangıç deformasyon modu, (b) Üçüncü çeşit başlangıç modu	89
Şekil 3.29. Statik çarpma analizlerinde rijit duvar yer değiştirmesine bağlı olarak oluşan deformasyon modları	91
Şekil 3.30. Çarpma kuvvetinin rijit duvar yer değiştirmesiyle değişimi	92
Şekil 3.31. İç enerjinin rijit duvar yer değiştirmesi ile değişimi	92
Şekil 3.32. Ortalama çarpma kuvvetinin rijit duvar yer değiştirmesi ile değişimi.....	93
Şekil 3.33. Statik ve dinamik çarpma analizlerinin karşılaştırılması	94
Şekil 3.34. Parçanın oluksuz, tek oluklu ve iki oluklu olması durumunda oluşan deformasyon modları	96
Şekil 3.35. Parçada oluk bulunmasının etkileri, (a) Rijit duvarın yer değiştirmesi, (b) İç enerji değişimi, (c) Rijit duvar kuvveti, (d) Ortalama çarpma kuvveti verilerinin karşılaştırılması.....	97-98
Şekil 3.36. Şekil verme hızının çarpmaya davranışına etkisi (a) Rijit duvarın zamanla yaptığı yer değiştirme eğrisi, (b) Rijit duvar kuvvetinin rijit duvar yer değiştirmesi ile değişimi	100

TABLolar DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1.1. İmpilisit ve ekspilisit yöntem arasındaki farklar [26].....	22
Tablo 2.1. Yapılan çarpma analizleri	35

SEMBOLLER DİZİNİ

A_0	: Enerji yutucusunun orijinal kesit alanı
C,P	: Şekil değiştirme hızı parametreleri
d_{Maks}	: Maksimum çarpma mesafesi
E	: Elastisite modülü
E_m	: Birim kütle başına yutulan enerji
E_T	: Toplam yutulan enerji
F_{ext}	: Dış kuvvet vektörü
F_{int}	: İç kuvvet vektörü
F_{ort}	: Ortalama çarpma kuvveti
l	: Enerji yutucusunun toplam uzunluğu
m	: Enerji yutucusunun orijinal kütlesi
M	: Kütle matrisi
n	: Herhangi bir zaman anı
t	: Zaman
u	: Yerdeğiştirme
\dot{u}	: Hız
\ddot{u}	: İvme
σ_y	: Akma gerilmesi
σ_{ort}	: Ortalama çarpma gerilmesi
ϵ_{eff}	: Efektif plastik şekil değişimi
ν	: Poisson oranı
ρ	: Malzemenin yoğunluğu
η	: Çarpma kuvveti verimi
η_s	: Strok verimi
Δt	: Zaman adımı
Δt_{krit}	: Kritik zaman adımı
ω_{max}	: Maksimum doğal frekans
β, γ	: Newmark sabitleri

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Artan taşıt araçlarının sayısına bağlı olarak artan yaralanmalı ve ölümlü kazalar daha güvenli araçların yapılmasını gerekli kılmıştır. Bu amaçla günümüzde, özellikle taşıt araçlarının ve enerji sönümlenme (absorber) parçalarının çarpma davranışlarını belirlemek ve performanslarını iyileştirmek için büyük otomotiv firmalarında ve araştırma enstitülerinde çarpma analizleri ile ilgili çok yoğun çalışmalar yapılmaktadır. Bu analizlerinin temel amacı çarpma anında ortaya çıkan enerjinin yolculara veya kargolara en az zararı verecek şekilde yapı tarafından sönümlenmesini sağlayacak optimum dizaynı gerçekleştirmektir.

Genelde bir aracın iskelet yapısı, yakıt tüketimi de dikkate alınarak ince cidarlı içi boş kirişlerden oluşturulur. Ayrıca ön ve arka çarpışma durumlarında araç güvenliğini arttırmak için enerji yutucusu adı verilen çarpma anında ortaya çıkan enerjiyi (genellikle çarpan cisimlerin kinetik enerjisi) kendi içerisinde sönümleyerek aracın güvenliğini arttırmaya yarayan parçalar kullanılmaktadır. Şekil 1.1’de bir otomobilin iskelet yapısı ve enerji sönümlenme elemanları görülmektedir [1].



Şekil 1.1. Bir araca ait iskelet yapısı ve enerji sönümlenme elemanları [1].

Çarpma simülasyonlarında yoğun olarak kullanılan sonlu elemanlar yöntemi, ilk olarak 1950 yılının sonunda kullanılmaya başlanmıştır. Sonlu elemanlar yöntemi karmaşık ve yüksek şekilde non-linear problemleri çözmeye çok yararlı bir sayısal araçtır. İlk kullanımında sadece lineer analizleri yapma yeteneğine sahip olan sonlu elemanlar yöntemi, yüksek performanslı bilgisayarların gelişmesi ile pek çok alanda karmaşık problemleri çözmek için kullanılmaktadır. Bugün ANSYS, NASTRAN, LS-DYNA ve ABAQUS gibi çok sayıda sonlu elemanlar metoduna dayalı ticari paket programı bulunmaktadır. Bu programlar modern yaşamın gerektirdiği pek çok tasarımda, gereksinim duyulan non-linear ve dinamik analizlerde yoğun şekilde kullanılmaktadır. Paket programlar vasıtasıyla çarpma testlerinin simülasyonları araç prototipini veya numuneyi üretmeksizin ve çarptırmaksızın bilgisayar ortamında onlarca kez virtüel olarak kolayca gerçekleştirilebilmektedir. Örneğin otomobillerin çarpma performansını incelemeye pek çok parametrik çalışmanın kolayca yapılması bu programlar sayesinde mümkün olmaktadır. Bu da deneysel çalışmanın aksine para ve zaman açısından çok büyük bir tasarruf sağlamaktadır.

Bir aracın çarpma güvenliği, araç yapı elemanlarının çarpma başlangıcındaki çarpma modu ve yük taşıma kapasitesi ile birlikte değerlendirilmek zorundadır [2]. Ön kenar kirişi gibi aracın yapı elemanları, darbe esnasında kinetik enerjiyi yeterli şekilde yutacak şekilde tasarlanmalıdır. Araç yapısının yeterli şekilde enerji yutmasının tahmini, çarpma modu ve yük taşıma kapasitesi açısından tam çarpma analizlerinin gerçekleştirilmesini gerektirmektedir. Güvenilir çarpma simülasyonları elde etmek için malzemelerin dinamik özellikleri yanında şekil verme ve kalıplama etkileri de düşünülmelidir. Araç yapısında çoğu yük taşıyan parçalar saç parça şekil verme işlemiyle üretilirler. Üretim esnasında parçalarda üretim koşullarına ve yöntemine bağlı olarak kalınlık ve plastik şekil değişiminin üniform olmayan dağılımı yanında şekil vermeden gelen incelmeler ve katlanmalar meydana gelebilir. Oysaki pek çok analiz bu şekil verme etkilerini dikkate almadan gerçekleştirilmektedir. Bu etkileri analizlerde hesaba katmamak çarpma modunda ve enerji yutma kapasitesinin belirlenmesinde hatalı sonuçlara sebep olmaktadır [2].

Bu bölümde önce tezin konusu ve ilgili literatür araştırması verildikten sonra genel hatları ile enerji yutucular, çarpma mekaniğindeki bazı performans büyüklükleri, geri yaylanma (springback), tezde kullanılan LS-DYNA ve diğer programlar, zaman integrasyon yöntemleri tanıtılacaktır.

1.2. Tezin Konusu ve Amacı

Bilindiği üzere araçların pek çok parçası sac metallere şekil verme işlemleriyle üretilmektedir. Şekil verme işlemi esnasında parçalarda kalınlık değişimleri, plastik şekil değişimleri ve artık gerilmeler gibi etkiler oluşmaktadır. Bu etkiler parçanın yük altında gerilme-şekil değiştirme davranışını, belli bir dereceye kadar da çarpma davranışını, değiştirebilirler.

Bu tez çalışmasının amacı aksel statik ve dinamik yüklemeler etkisindeki şapka kesitli bir enerji yutma elemanında, profilin derin çekme işlemi ile oluşturulması sırasında oluşan kalınlık değişimleri, plastik şekil değişimleri ve artık gerilmeler gibi artık şekil verme etkilerinin parçanın dinamik ve statik çarpma performansına etkilerinin belirlenmesidir. Ayrıca tez çalışmasında şekil verme işlemi esnasında parçada oluşan artık şekil verme etkilerinin büyüklüklerinin değiştirilmesi sağlanılarak bu değişimlerin çarpma davranışını nasıl etkilediğinin belirlenmesi de amaçlanmaktadır.

Yukarıda ifade edilen amaçları gerçekleştirebilmek için, tez çalışmasında aşağıdaki adımlar takip edilmektedir.

- Şekil verme analizleri için malzeme ve sonlu elemanlar modelinin oluşturulması
- Dinamik çarpma analizlerinin sonlu elemanlar modelinin hazırlanması
- Statik çarpma analizlerinin geçerliliğinin sağlanması ve sonlu elemanlar modelinin hazırlanması
- Şekil verme etkilerinin dinamik çarpma analizleri için incelenmesi ve farklı büyüklükteki şekil verme etkilerinin çarpma performansına etkilerinin karşılaştırılması
- Şekil verme etkilerinin statik çarpma analizleri için incelenmesi

1.3. Literatür Özeti

Genellikle deformasyon pekleşmesinin (strain hardening) kalınlık incelmeye etkisini karşılayacağı düşünülerek çarpma analizlerinde bu etkiler dikkate alınmayarak saf malzeme özellikleriyle çözüm yapılmaktadır [3]. Son yıllarda yapılan çalışmalar şekil vermenin, parçaların çarpma cevabı üzerine ölçülebilir etkileri olduğunu göstermektedir. Daha güvenilir ve gerçekçi çarpma simülasyonları için şekil verme etkilerinin hesaba

katılması gerektiği genellikle yapılan çalışmalarda vurgulanmıştır. Örneğin, Dutton hidroform (hydroform) yöntemi ile üretilmiş bir S şeklinde içi boş tüpün şekil verme etkileriyle çarpma davranışını sayısal olarak incelemiştir [4]. Bu çalışmada şekil verme analizinden elde edilen deforme olmuş geometri, kalınlık değişimi, plastik şekil değişimi, gerilme ve geri yaylanma analizi sonrası elde edilen gerilme dağılımları gibi parametrelerin her birinin ayrı ayrı çarpmaya etkileri incelenmiştir. Parçanın deforme olmuş geometrisinde ve rijit duvar yer değiştirmesinde önemli farklar görülmüştür. En önemli etkiyi %78'den daha az rijit duvar yer değişimi ile plastik şekil değişimi göstermektedir. Dikkat çeken bir diğer parametre gerilmenin etkisi ise hemen hemen hiç yok denecek kadar az olmaktadır. Yine Oliveira tarafından alüminyum alaşımı tüplerin S şeklinde eğilmesinden oluşan artık şekli verme etkilerinin çarpma üzerine etkileri incelenmektedir [5]. Çarpma anındaki maksimum reaksiyon kuvvetinin şekil verme etkilerini içerdiği durum için yaklaşık %25–30 ve sönmülenen enerjinin de %18 arttığı belirlenmiştir.

Kullanılan hardening modelinin şekil verme etkileriyle ilişkisini belirlemeye yönelik bir çalışma Lee tarafından yapılmıştır [6]. Lee S şeklinde, derin çekme yöntemi ve hidroform yöntemi ile üretilen iki ayrı tüpün şekil verme etkileri altında kinematik ve izotropik hardening modelleri arasındaki davranışı sayısal olarak belirlemeye çalışmıştır. Burada amaç sistemin yükleme, boşaltma ve tekrar yüklenmesi ile hardening modelinin çarpmaya etkisini görmektir. Sonuçta plastik şekil değişiminin çarpma davranışını önemli şekilde değiştirdiği ve deformasyonun artması ile kinematik hardening modelinin izotropik modele göre etkisinin azaldığı sonucuna ulaşılmaktadır.

Literatürde dikkat çeken bir diğer özellikte, bazı çalışmalarda şekil vermeden gelen deforme olmuş ağ (mesh), bazılarında da katı modelleme programı ile geometrisi oluşturulan parçanın, sonlu elemanlarla modellenmesi ile elde edilen çarpma ağı adı verilen daha kaba bir ağ kullanılmaktadır. Kaba ağ geometrik etki olarak adlandıracağımız şekil verme ve geri yaylanma analizinden oluşan şekil değişimlerini içermemektedir. Huh [2] bir aracın ön kenar parçalarından birinin çarpma analizlerini derin çekme analizinden elde ettiği kalınlık ve plastik şekil değişimi verilerini LS-DYNA programını kullanarak çarpma modeline (kaba meshli) aktararak gerçekleştirmiştir. Aktarma esnasında şekil verme analizindeki ağ ile çarpma ağı arasındaki yoğunluk farkından dolayı hem plastik şekil değişimi hem de kalınlığın maksimum değerlerinde çok az da olsa yumuşamalar

olmaktadır. Bu çalışmada, Huh plastik şekil değişiminin çarpmada baskın (dominant) olduğunu ve malzemenin mukavemetini arttırdığını tespit etmiştir.

Broune şekil verme analizi yapmadan şekil verme etkilerini belirlemeye yönelik bir algoritma geliştirmiştir [7]. Bir düz levhayı bükme işlemine tabi tuttukten sonra geri yaylanma analizi gerçekleştirmiş ve ardından şekil verilmiş levhayı iki rijit plaka arasına yerleştirerek çarpma performansı üzerine şekil verme etkilerini hem LS-DYNA programı hem de kendi geliştirdiği algoritma vasıtasıyla incelemiştir. Algoritma ve LS-DYNA'dan elde edilen sonuçlar oldukça yakın davranış göstermiştir. Uyguladığı algoritma malzemenin kalınlık değişiminin az olduğu ve yoğun mesh yapısına sahip problemlerde geçerli olmaktadır. Ayrıca şekil verme etkileriyle çarpma kuvvetinin arttığı da tespit edilmiştir.

Araç parçaları üzerinde bireysel olarak şekil verme etkilerinin incelenmesi yanında tüm veya kısmi araç modelleri üzerinde de şekil vermenin çarpma üzerine etkileri incelenmektedir. Dutton aracın ön kirişini tek adımlı derin çekme analizi ile modellemiş ve plastik şekil değişimi verileriyle kalınlık dağılımını tam araç modeline aktarmış [8]. Aracın şekil verme etkisi altındaki ve şekil verme etkisiz deformasyon modunda önemli bir fark görülmemiştir. Fakat maksimum çarpma kuvvetinde %18'lik bir artış meydana gelmektedir. Yine benzer bir çalışma Chen tarafından yapılmıştır [3]. Bu çalışmada da aracın bazı parçalarının üretiminden gelen kalınlık, plastik şekil değişimi ve gerilmeler ful araç çarpma modeline aktarılmıştır. Ful araç modelinin ve parçaların çarpma davranışları değerlendirilmiştir. Şekil verme etkilerini içeren model daha rijit davranış göstermekte ve ivmelenmede %10'luk bir artış görülmektedir. Parça düzeyinde ise aracın ön kirişinde burkulma ve eğilme, şekil verme etkilerinin içerilmediği durum için çok daha şiddetli olmaktadır. Bu durum şu şekilde açıklanmaktadır. Plastik şekil değişimleri sebebiyle parçada şekil değişimi pekleşmesi (strain hardening) yani mukavemet artışı olmaktadır. Bu da kalınlık incelmeleri ve gerilmeleri etkisini karşılamaktadır. Chen'in çalışmasının sonuçlarına benzer sonuçlar Simunovic tarafından yapılan çalışmada da bulunmuştur [9]. Simunovic araç deformasyon modunda önemli bir fark tespit edilmemiştir, fakat yine parça bazında belirli farklar ortaya çıkmaktadır.

Genel olarak tam araç üzerinde şekil verme etkileri ile ilgili şu kaniya varılmaktadır. Şekil verme etkilerinin bireysel olarak parçanın çarpma davranışında önemli bir etkisi bulunmasına rağmen tam araç modeli üzerindeki etkileri açık şekilde ortaya çıkmamaktadır [9].

Literatürdeki yapılan çalışmalardan genel olarak şu bilgiler çıkarılmaktadır;

- Çoğunluğunda LS-DYNA programı kullanılarak çözümler yapılmıştır.
- Şekil verme analizlerinde daha ince bir ağ kullanılmış, çarpmada daha kaba bir ağ yeterli görülmüştür. Yani geometrik etki ihmal edilmiştir.
- Gerilmenin çarpmaya etkisinin nispeten az olduğu düşünülerek çoğu analizde dikkate alınmamıştır.
- Şekil vermenin etkisini inceleyen tüm çarpma analizleri rijit duvara karşı gerçekleştirilmiştir.

Sonuç olarak Yapıların enerji sönümleme karakteristiklerini belirlemek ve iyileştirmek için pek çok deneysel ve sayısal çalışma yapılmasına rağmen, şekil verme etkilerinin çarpma performansını belirleme ile ilgili nispeten az çalışma yapılmıştır [3]. Bunun en önemli nedeni, sonlu elemanlar paket programlarının kullanımı ve ileri analizleri yapabilme kapasitelerine ulaşabilmelerinin yakın zamana dayanması gösterilebilir.

1.4. Enerji Yutucuları

Enerji yutucusu kinetik enerjiyi kısmen veya tamamıyla enerjinin başka bir formuna dönüştüren bir yapı veya sistemdir. Dönüştürülen enerji, örneğin katılardaki elastik şekil değiştirme enerjisi ve sıkıştırılabilir sıvılardaki basınç enerjisi gibi geri dönüşebilir veya plastik şekil değiştirme enerjisi gibi geri dönüşümsüz olabilir. Bir şekil değiştirebilir enerji yutucusu dizayn edileceği zaman, çarpma enerjisinin çoğu yutucunun kendi içerisinde ve geri dönüşümsüz tarzda sönümlenmesi amaçlanmaktadır. Böylece insan yaralanmaları ve ekipman zararları en aza indirgenir. Kinetik enerjinin plastik şekil verme enerjisine dönüşümü uygulanan yükün şiddetine, metoduna, deformasyon veya yer değişim modlarına ve malzeme özellikleri gibi parametrelere bağlıdır [10].

Deforme olabilen enerji yutucuları ince duvarlı tüpler (dairesel ve kare kesitli veya prizmatik), çok köşeli kolonlar, tüp şeklinde yüzükler, peteksi yapılar, sandviç düzlemler, yalıtkan yapılar (isolator) şeklinde imal edilebilir. Ayrıca bunların enerji sönümlenmelerini arttırmak için içleri köpüklerle (foam) doldurulabilir [11].

Bir enerji yutan yapının şu özelliklere sahip olması arzu edilir [12].

- Enerji yutumu geri dönüşümsüz tarzda olmalıdır. Yani enerjiyi elastik olmayan deformasyon mekanizması ile sönmlemelidir.
- Maksimum reaksiyon kuvveti kritik değerin altında olmalıdır. Büyük deformasyon proseslerinde, ideal olarak reaksiyon kuvveti sabit kalmalıdır.
- Büyük miktarda enerjiyi sönmlemesi için, deformasyon boyu yeterince uzun olmalıdır.
- Kararlı ve tekrarlanabilir bir deformasyon moduna sahip olmalıdır.
- Hafif ve yüksek enerji sönmleme kapasitesine sahip olmalıdır.
- Düşük maliyetli ve kolay monte edilebilir olmalıdır.

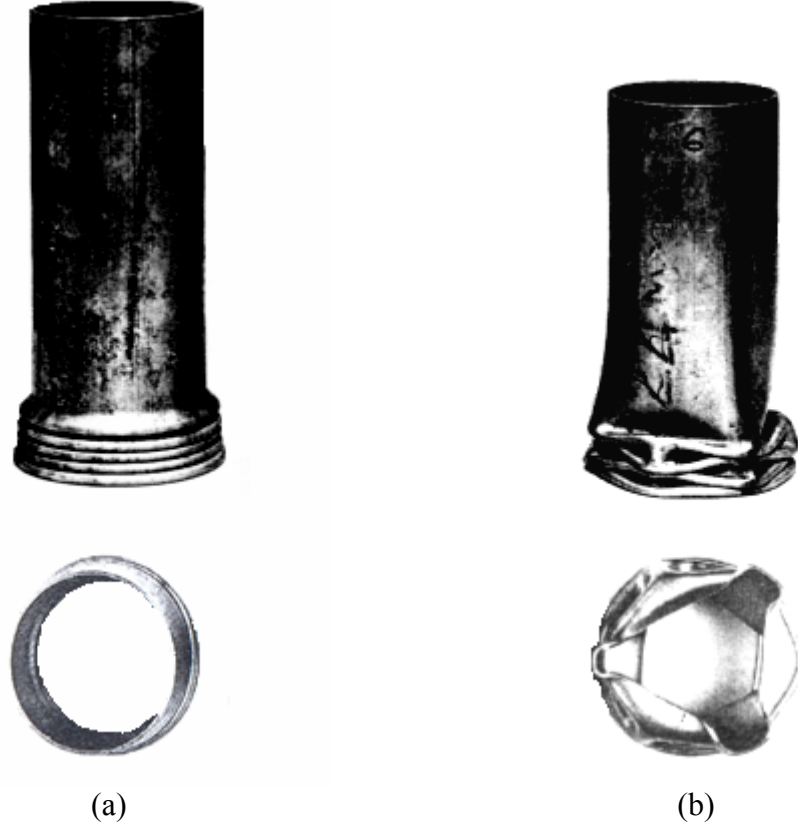
1.4.1. İnce Duvarlı Tüpler

İnce duvarlı tüpler enerji yutucularının en yaygın tipleridir [11]. Öteki tiplerle karşılaştırılınca basittirler ve enerji sönmleme kapasitesi açısından da iyi bir kapasiteye sahiptirler. Bunun sonucunda modern araç iskeletlerinde çok yaygın şekilde kullanılmaktadırlar. Bu tüpler çelik, alüminyum veya reçine ile güçlendirilmiş kompozit malzemelerden imal edilebilir. İnce duvarlı tüpler kare veya dairesel gibi çeşitli kesit yapılarında olabilirler. Yine bu yapılar eksen boyunca kesit alanı daralan konik ve prizmatik (tapered) şekilde de imal edilebilir. Enerji yutucularının deformasyon modu, ne kadar enerjinin, ne kadar hızlı ve ne şekilde sönmlendiğini belirlemede etkin olduğu için önemlidir. Metalik ve kompozit tüpler enerjiyi çok farklı yollarla sönmleler. Metaller nispeten daha yumuşaktır ve enerjiyi aşırı plastik deformasyonla sönmleler. Kompozit yapılar ise kırılığandır ve enerjiyi, matriks çatlaması, dağılma ve fiber kopması şeklinde sönmleler.

Metalik ince duvarlı tüplerin pek çok deformasyon modu olmasına rağmen, aksel çarpma, aksel altüst olma, aksel yarıma, yanal eğilme, yanal basma ve yanal düzlenme gibi başlıca deformasyon modları hakkında burada kısa bilgiler verilecektir.

1.4.1.1. Eksenel Çarpma

Tüp deformasyon modlarının en yaygın olanıdır. Uygun bir çarpma kuvveti sağlar ve eksenel yükleme altında malzemenin hemen hemen tümü plastik iş ile enerji sönmlemeye katıldığı için oldukça iyi bir enerji sönmleme kapasitesine sahiptir. Dairesel ve kare kesitli ince cidarlı tüplerin eksenel çarpmasında genellikle üç deformasyon modu ile karşılaşılır. Bunlar; global burkulma veya eğilme, eksenel simetrik (concertina) mod ve simetrik (diamond) modlardır [13]. Eksenel simetrik ve simetrik modlar lokal deformasyon modlarıdır ve tüpte daha fazla deformasyona sebep olduklarından dolayı daha çok enerji sönmlemler. Dairesel kesitler için, bu üç modun hangisinin meydana geleceği tüp çapının kalınlığına oranı ve tüp boyunun kalınlığına oranına bağlıdır [14]. Bunların yanında malzeme özellikleri ve sınır koşulları da eksenel deformasyon modunun oluşumunu etkiler. Şekil 1.2 ve Şekil 1.3’de sırasıyla dairesele ve kare kesitli ince duvarlı tüplerin eksenel simetrik ve simetrik deformasyon modlarının şekli görülmektedir.



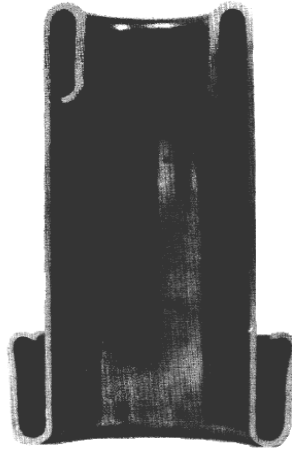
Şekil 1.2. Dairesel kesitli tüplerin eksenel deformasyon modları [13],
(a) Eksenel simetrik, (b) Simetrik



Şekil 1.3. Kare kesitli tüpler tüplerin aksel deformasyon modları [13],
(a) Simetrik, (b) Aksel simetrik

1.4.1.2. Aksel Altüst Olma

Boru çevrimi olarak da adlandırılan bu deformasyon modu ilk kez 1969 yılında General Motors tarafından kullanılmıştır. Bu deformasyon modun da bir aksel yüke maruz kalan tüp, uygun bir kalıp vasıtasıyla içten dışa veya dıştan içe doğru dönmeye maruz bırakılır [15]. Genelde alüminyum ve yumuşak çelik tüplerde iyi sonuç verirler. Düzgün kalınlık dağılımlı tüpler için sabit bir yük davranışı sergiler. Şekil 1.4’de bir çift taraflı boru çevrimine maruz bırakılmış tüp görülmektedir [16].



Şekil 1.4. Çift taraflı boru çevrimine maruz bırakılmış bir tüpün kesit görünüşü

1.4.1.3. Eksenel Yarılma

Enerji, tütün eğilmesi, bükülmesi, uzaması ve yırtılması ile sönümlenir [17]. Tüp boyunun %90'ına kadar enerji sönümlemesi devam eder ve ayrıca hemen hemen sabit bir kuvvet (yük) davranışı sergiler. Tüpler kare ve dairesel kesitli olabilir. Şekil 1.5'de kare ve dairesel kesitli tüplerin eksenel yarılma deformasyonları görülmektedir.



(a)



(b)

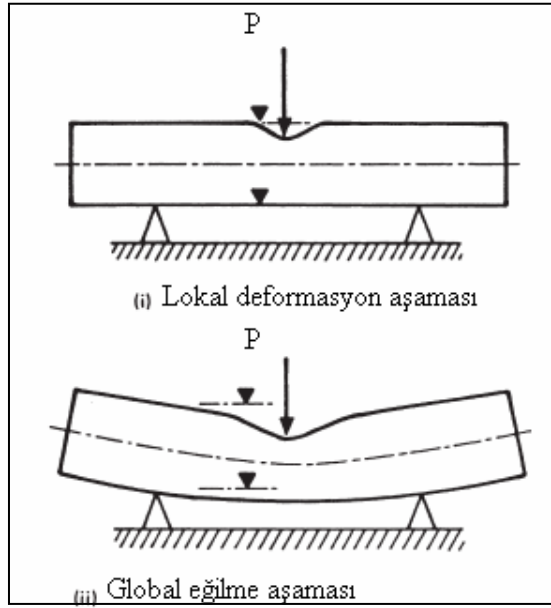
Şekil 1.5. Kare ve dairesel kesitli tüpler için eksenel tüp yarılması, (a) Dairesel kesitli tüpün eksenel yarılması, (b) Kare kesitli tüplerin eksenel yarılması [11].

1.4.1.4. Yanal Bükülme

Bu deformasyon tipinde tüp, ya yanal bir yükleme sebebiyle eğilmekte ya da eksenel bir kuvvet sebebiyle global eğilmeye maruz kalmaktadır. Fakat gerçekte enerji yutucuları nadiren saf eksenel ve saf yanal yüklemelere maruz kalırlar [18]. Hem global eğilmenin hem de eksenel deformasyonun aynı anda gerçekleştiği, tüp eksenini ile belli bir açı yapan yüklemelerde (oblique) sıklıkla meydana gelmektedir.

1.4.1.5. Yanal Basma

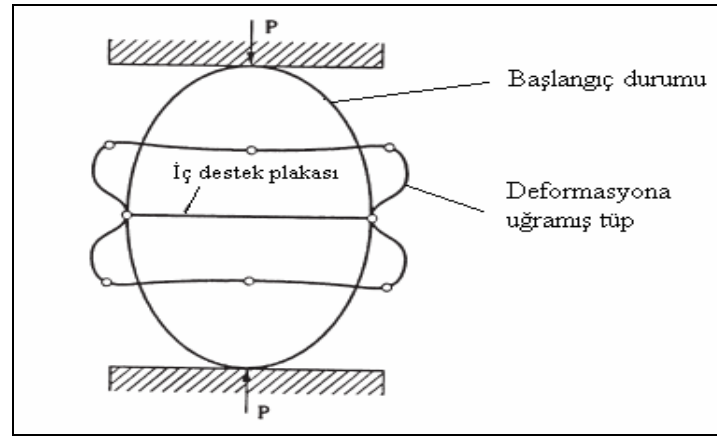
Bu mekanizmada iki noktadan desteklenen tp, eksenine dik olarak etkiyen bir tekil yüke maruz kalmaktadır. Enerji sönümleme önce yükün uygulandığı noktada lokal deformasyonla ve daha sonra tüpün global bükülmesi ile elde edilir. Plastik deformasyona katılan malzeme miktarının sınırlı olması sebebiyle, enerji sönümleme düşüktür. Bu yüzden pratik yaşımda çok yaygın olmasına (otomobil tamponu gibi) rağmen, bu deformasyon mekanizmasına bilimsel açıdan çok az ilgi vardır [11].



Şekil 1.6. Bir tüpün yanall basma ile deformasyonu [10].

1.4.1.6. Yanall Dzleşıme

Bu deformasyon türünde aksenal arpmadaki kadar malzemenin deformasyonuna izin verilmezse bile, yanall basmadan daha fazla malzeme deformasyona uğrar. Bu mekanizma ile tüpün eksenine paralel tüm uzunluğu deformasyona katılır. Tp içine destekler monte edildiğinde, enerji sönümlemenin arttığı gzmlenmiştir. Şekil 1.7’de bir i destekli bir tüpün yanall dzleşımesi görülmektedir.

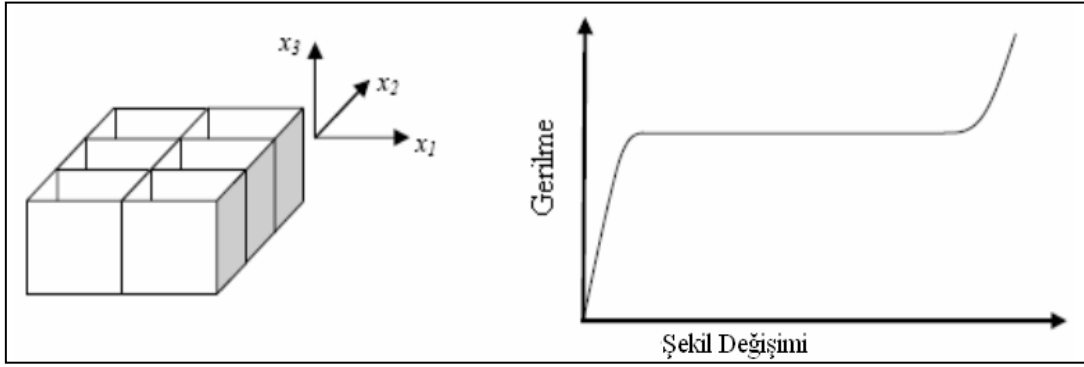


Şekil 1.7. İki paralel düzlem arasında tüpün yanal düzleştirilmesi [11].

1.4.2. Petek (Balküğü) Yapılar

Hüresel yapılar olarak da adlandırılan petek yapılar, uygulamalarda en çok kullanılan enerji yutucularıdır. Petek yapılar otomobil tamponu, lokomotif önu, uçak ve helikopter alt yüzeyleri gibi pek çok alanda kullanılmaktadır. Bu yapılar saç çelik ve alüminyum alaşımları, termoplastik gibi çeşitli malzemelerden üretilmektedir. Çoğu hücreler altıgen şeklinde imal edilir, fakat üçgen, kare, dairesel kesitlerde de imal edilmektedir.

Petek yapıların yükleme davranışı üç ana bölgeden oluşur. İlki lineer elastik davranış ve başlangıçta yük uygulandıkça, hücre duvarları küçük yer değişimler vasıtasıyla elastik şekilde eğilir. Gerilme kritik seviyeye geldiğinde izafi olarak sabit kalır. Bu bölge plato olarak adlandırılır ve bu bölgede elastik bükülme, burkulma, plastik çökme ve kırılmalar oluşur. Son bölgede ise hücre duvar malzemesinin yoğunluk artışı sebebiyle gerilme keskin şekilde artmaya başlar [10]. Şekil 1.8'de petek yapılara ait gerilme-şekil değiştirme eğrisi görülmektedir.



Şekil 1.8. Örnek bir petek yapı ve gerilme-şekil değiştirme ilişkisi [10].

1.4.3. Köpükler

Enerji sönmlemeleri petek yapılara benzemekle birlikte hücre yapıları düzenli değildir. Paketleme endüstrisinde yoğun kullanılmaktadır. Ayrıca tüplerin enerji sönmleme kapasitesini arttırmak için tüplerin içine doldurulmaktadır. Bu durumda izafi yoğunluk kavramı önem kazanır. İzafi yoğunluk köpüğün yoğunluğunun, doldurulduğu katı malzemenin yoğunluğuna oranıdır. Bu oran çok düşük olursa, yeterli enerji sönmlemenmeden deformasyonlar gerçekleşecektir. Eğer çok yüksek olursa da, bu durumda gerilmeler, yeterli enerji sönmlemenmeden kritik bir değere ulaşacaktır. Köpükler genellikle polimer veya metalik malzemelerden yapılıdır. Polimer köpükler sıcak polimer üzerine gaz kabarcıklar üflenerek elde edilir. Metal köpükler ise organik tanecikler ile ergimiş metalin karıştırılması ile elde edilir.

Metal köpüklerin kullanımı son dönemlerde hızla yaygınlaşmaktadır. En çok kullanılan metal köpükler alüminyum ve nikelden yapılanlardır. Hafifliği, uygun mekanik davranışı ve düşük maliyetli üretim prosesi sebebiyle alüminyum köpükler son dönemde özel ilgi bulmuştur [19].

1.4.4. Yalıtkan (Isolator) Yapılar

Bu sönmleme elemanı araç süspansiyon sistemlerine çok benzerdir. Bir piston içindeki orifisten sıvıyı geçirmeye zorlayarak enerjiyi sönmlemler. Genellikle araçlarda tampon arkasında ufak darbeleri sönmlemede kullanılır. En büyük dezavantajı darbe hızıdır. Hız yüksek olursa maksimum çarpma kuvveti çok yüksek olur. Bu da araç içindeki yolcuların zarar görmesine yol açabilir.

1.5. Çarpma Mekanizmasındaki Bazı Performans Büyüklükleri

Literatürde enerji yutucularının enerji yutma kapasitelerini değerlendirmek için pek çok performans büyüklüğü önerilmiştir. Bu büyüklükler genellikle enerji yutucularının başlangıç dizayn aşamasında kullanılır. Bu tez çalışmasında bazılarına yer verilen çarpma performans büyüklüklerinden aşağıda bahsedilecektir.

1.5.1. Birim Kütle Başına Yutulan Enerji

Birim kütle başına yutulan enerji değeri;

$$E_m = \frac{E_T}{m} \quad (1)$$

bağıntısı ile verilir. Burada E_T toplam yutulan veya sönmölenen enerji, m ise deformatyona uğramamış enerji yutucunun kütesidir. Bir enerji yutucunun birim kütle başına sönmölediği enerji onun deformatyon moduna bağılıdır. Örneğin, içi boş bir tüp aksnel çarpmada yanıl basmadan çok daha fazla enerji sönmöler. Çünkü aksnel çarpmada daha fazla malzeme deformatyona katılır. Bu büyüklük, verilen bir kütle için enerji sönmöleme açısından hangi sönmöleme elemanınımın daha verimli olduğunu belirlemeye yardımcı olur.

1.5.2. Ortalama Çarpma Kuvveti

Ortalama çarpma kuvveti, enerji yutucunun kararlı bir şekilde deforme olduğu ortalama kuvvettir. Verilen bir yer değıştirme için sönmölenen enerjinin çarpma mesafesine oranı olarak verilir. Yolculara ve kargolara çarpma anında çok fazla sarsıntı gelmemesi için, ortalama çarpma kuvveti eğrisinin mümkün olduğu kadar düze yakın olması tercih edilir.

1.5.3. Ortalama arpma Gerilmesi

Ortalama arpma gerilmesi, ortalama çarpma kuvvetinin (F_{ort}), enerji yutucunun orijinal kesit alanına (A_0) b6lümü olarak tanımlanır.

$$\sigma_{ort} = \frac{F_{ort}}{A_0} \quad (2)$$

1.5.4. Birim arpma Uzunluğu Başına S6nmlenen Enerji

Çarpma enerjisi ya enerji yutucunun deforme olmamiş uzunluğuna veya ulaşılan maksimum çarpma mesafesine b6lnerek bulunur. Çarpma b6lgesinin sınırlı olduğu durumlarda yararlı bir parametredir.

1.5.5. Çarpma Kuvveti Verimi

Ortalama arpma kuvvetinin maksimum çarpma kuvvetine b6lmdr.

$$\eta = \frac{F_{ort}}{F_{maks}} \quad (3)$$

Yolcu güvenliğinin 6nemli olduğu durumlarda bu oranın maksimum olması arzulanır. Burada amaç genellikle çarpmanın başlangıında meydana gelen maksimum (pik) kuvvetin azaltılmasıdır.

1.5.6. Strok Verimi

Bu değer s6nm elemanının gerçekte toplam uzunluğunun ne kadarının kullanıldığının bir 6lsdr. Genellikle amaç, enerji yutucusunun tüm uzunluğu boyunca deformasyon sağlamaktır. Alan ve yer sıkıntısı problemlerinin 6nem kazandığı

tasarımlarda yararlı bir parametredir. Maksimum çarpma mesafesinin sönüm elemanının orijinal boyuna oranıdır.

$$\eta_s = \frac{d_{maks}}{l} \quad (4)$$

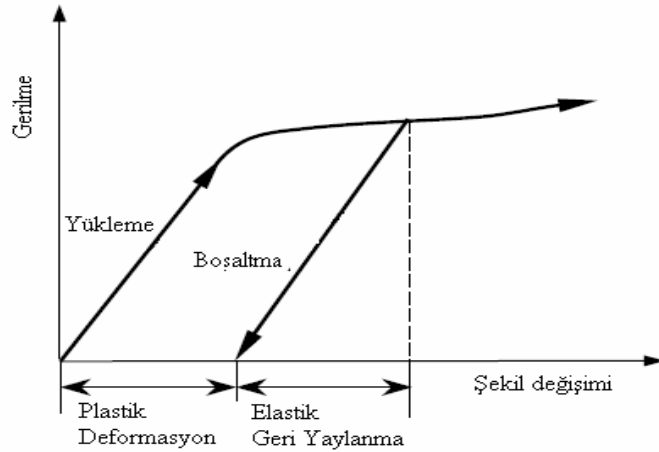
Burada d_{Maks} , maksimum çarpma veya çökme mesafesi, l , enerji yutucunun orijinal boyudur.

1.5.7. Dinamik Büyütme Faktörü

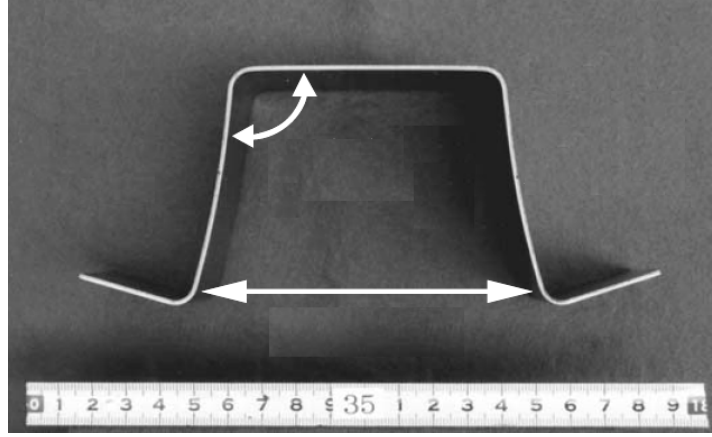
Bu faktör bir enerji yutucusu için dinamik yükleme altında sönümlenen enerjinin, statik yükleme altındaki sönümlenen enerjiye oranı olarak tanımlanır. Bu büyüklük atalet ve şekil değiştirme hızlarının etkilerini değerlendirmek için basit bir yoldur.

1.6. Geri Yaylanma (Springback) Olayı

Geri yaylanma, plastik şekil değişimine uğrayacak şekilde yüklenen parçanın şekli ile yük kalktıktan sonraki şekli arasındaki ayrılıktır. Şekil 1.9'da bir geri yaylanma olayının mekanik davranışı görülmektedir. Bir kalıplama veya şekil verme işleminden sonra yük kaldırılır kaldırılmaz elastik şekil değişimleri ve gerilme gevşemeleri (Stress relaxation) meydana gelir [20]. Şapka kesitli bir profilin geri yaylanma sonrası boyutlarında meydana gelen değişim Şekil 1.10'da görülmektedir.



Şekil 1.9. Geri yaylanma olayının mekanik davranışı



Şekil 1.10. Şapka kesitli bir profilin geri yaylanma sonrası boyutlarında meydana gelen değişim [21].

Geri yaylanma şekil ve ölçülerde değişikliğe sebep olduğu için parçaların montajında problemlere sebep olabilir. Bu yüzden geri yaylanma tahminleri saç metal şekil verme endüstrisinde önemli bir sorundur. Malzemelerin mekanik özellikleri, saç kalınlığı, kalıp geometrisi (kalıp yarıçapı ve kalıp parçaları arası boşluk gibi), şekil verme parametreleri ve yağlama koşulları gibi pek çok parametre geri yaylanmayı etkilemektedir [22].

1.7. LS-DYNA

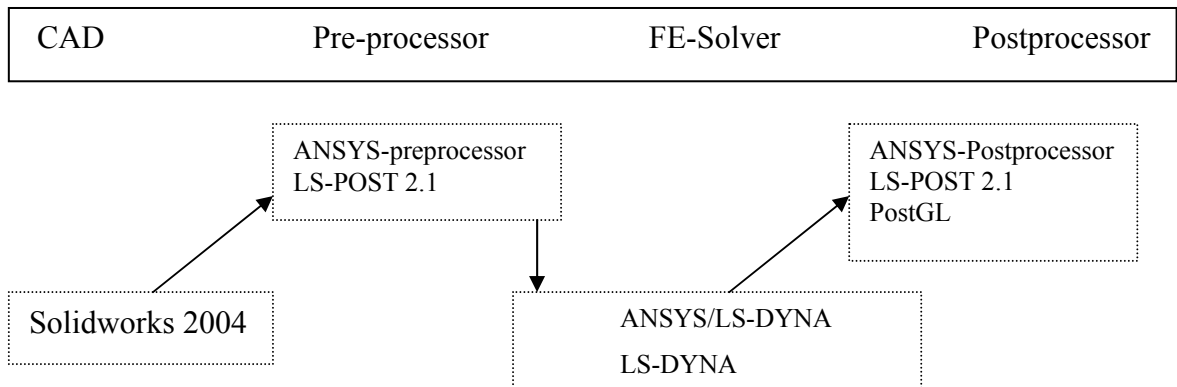
LS-DYNA non-lineer fiziksel olayların çözümünde kullanılan çok fonksiyonlu bir eksplicit ve implicit sonlu elemanlar programıdır. Genellikle bu olaylar çarpma analizleri gibi çok kısa bir süre içinde vuku bulan büyük deformasyonların gerçekleştiği olaylardır. LS-DYNA Amerikalı bir şirket olan Livermore Software Technology Cooperation (Lstc) şirketi tarafından geliştirilmiştir [23]. Bu paket program onu pek çok alanda basitten karışık problemlere kadar çok güçlü bir çözüm aracı yapan bir çok özelliğe sahiptir. Bu özelliklerden bazıları şunlardır;

- Temas bölgelerini tam otomatik olarak tanımlayabilmekte ve 26 temas tanımı içermektedir. Çok karışık geometrilerde teması tanımlamada otomatik temas tanımlamaları ile büyük kolaylık sağlar.
- 130 malzeme modeli ve geniş bir eleman çeşitliliğine sahiptir.

- Otomobil endüstrisine yönelik özel uygulamalara sahiptir. (emniyet kemeri, hava yastığı, insan dokusu, kalp ve beyin modelleme olanağı)
- Metal şekil vermede bazı özel uygulamalar. Örneğin ağ inceltilmesi (adaptive mesh) gibi analiz esnasında deformasyonun ve kuvvetlerin büyük olduğu bölgelerde ağ yoğunluğunu otomatik olarak arttırabilme olanağı sunmaktadır

Ayrıca LS-DYNA pek çok sonuç dosyası üretme kapasitesine sahiptir. Görsel sunum dosyası d3plot dosyaları yanında d3thdt zamana göre sonuçların yazıldığı bir sonuç dosyası üretir. Yine isteğe bağlı sonuçların yazıldığı ASCII dosyalarını da üretme kapasitesine sahiptir. Bu dosyalarda zamana göre düğüm (node) ve element sonuçları yanında, rijit duvar ve deforme olmuş geometriye ait bilgiler bu dosyalara yazılabilir. LS-DYNA programının bu tez çalışmasında da kullanılan, çok adımlı analizlerde (şekil verme analizinden sonra geri yaylanma analizi gibi), bir önceki analizden elde edilen bazı verilerin bir sonraki analize aktarılmasında büyük kolaylık sağlayan dynain adında sonuç dosyası üretebilme özelliğidir. Bu dosya bir sonraki analizde giriş (input) dosyası olarak kullanılabilir.

Sonlu elemanlar analizleri için kullanılan programlar genellikle üç bölümden oluşurlar. Bunlar; sonlu elemanlar modelinin oluşturulduğu, sınır koşulları ve yüklemelerin tanımlandığı pre-processor olarak adlandırılan kısım, çözümün yapıldığı kısım (solver) ve sonuçların çeşitli şekil ve formlarda dış ortama aktarıldığı postprocessor kısımlarıdır. Ayrıca geometrinin çizilmesinde kullanılan katı modelleme (CAD) programları da pre-processor kısmına ilave edilebilir. Şekil 1.11’de bu tez çalışmasında kullanılan programlar sıralanmıştır.



Şekil 1.11. Tez çalışmasında kullanılan programlar

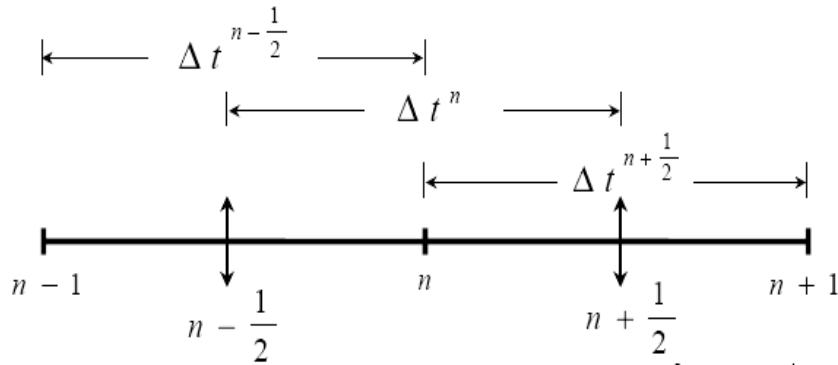
ANSYS/LS-DYNA, LS-DYNA programının bazı ileri özelliklerini içerir ve aynı çözüm yöntemini uygular. Ls-prepost 2.1 programı hem sonlu elemanlar modelinin hazırlanabildiği ve hem de sonuçların simülasyonunun yapılabildiği çok yönlü bir programdır [24]. PostGL de yine sonuçların görsel olarak incelenmesinde kullanılan postprocessor programdır.

1.8. Direk Zaman İntegrasyon Yöntemleri

Başlıca iki tip direk zaman integrasyon yöntemi vardır. Bunlar ekspilisit (açık zaman integrasyon) ve impilisit (kapalı zaman integrasyon) yöntemleridir.

1.8.1. Ekspilisit Yöntem

Ekspilisit zaman integrasyon yöntemi merkezi farklar metoduna dayanır. Ekspilisit yöntem sistemin n anındaki dengesinden direk zaman integrasyonu ile çözüm yapar.



Şekil 1.12. Ekspilisit zaman integrasyon şeması

Sistemin denge denklemi, t^n zamanındaki çözümü bilinen bir n anında kurulur ve t^{n+1} zamanında çözümü bilinmeyen $n+1$ anındaki sistemin çözümü bulunmaya çalışılır. Sistemin hareket eşitliği şu şekilde verilebilir;

$$M \ddot{u}^n = F_{ext}^n - F_{int}^n \quad (5)$$

Burada M kütle matrisi, \ddot{u}^n , ivme vektörü F_{ext}^n dış kuvvet vektörü ve F_{int}^n iç kuvvet vektörüdür. Buradan ivme;

$$\ddot{u}^n = M^{-1}(F_{ext}^n - F_{int}^n) \quad (6)$$

şeklinde kolayca belirlenir. Hız güncellenirse;

$$\dot{u}^{n+\frac{1}{2}} = \dot{u}^{n-\frac{1}{2}} + \Delta t^n \ddot{u}^n \quad (7)$$

ifadesi elde edilmiş olur. Bilinmeyen n+1 anındaki yer değiştirme ise;

$$u^{n+1} = u^n + \Delta t \dot{u}^{n+\frac{1}{2}} \quad (8)$$

olarak elde edilir. Burada zaman adımı;

$$\Delta t^{n+\frac{1}{2}} = \frac{\Delta t^n + \Delta t^{n+1}}{2} \quad (9)$$

eşitliği ile verilmektedir.

Merkezi farklar metodu koşullu kararlı bir yöntemdir. Yani zaman adımı belli bir kritik değeri aşmamalıdır [25]. Bu değer;

$$\Delta t_{kri} < \frac{2}{\omega_{max}} \quad (10)$$

şeklinde ifade edilir. Burada ω_{max} sistemin maksimum doğal frekansdır.

1.8.2. İmpilisit Yöntem

İmpilisit yöntem Newmark metodunu kullanır. Bu yöntem her zaman adımında (n+1) anındaki sistemin dengesi için çözüm yapar.

Newmark metodunda n+1 anındaki hız ve yer değiştirme şu şekilde verilmektedir.

$$u^{n+1} = u^n + \Delta t^n \dot{u}^n + \frac{1}{2} (\Delta t^n)^2 [(1-2\beta)\ddot{u}^n + 2\beta\ddot{u}^{n+1}] \quad (11)$$

$$\dot{u}^{n+1} = \dot{u}^n + \Delta t^n [(1-\gamma)\ddot{u}^n + \gamma\ddot{u}^{n+1}]$$

Burada, $\beta=0$, $\gamma=0$ için eşitlikler merkez farklar yöntemine dönüşür. $\beta \neq 0$ için denge denkleminin çözümü gerekir. Bu yöntem koşulsuz kararlıdır. Bu yüzden çok büyük zaman adımlarına izin verir.

1.8.3. İmpilisit ve Ekspilisit Yöntemler Arasındaki Farklar

Yukarıda da belirtildiği gibi iki yöntemin en önemli farkı, ekspilisit yöntemin sistemin n anındaki dengesi için, impilisit yöntemin ise n+1 anındaki dengesi için çözüm yapmasıdır. Tablo 1.1'de detaylı bir şekilde iki yöntem arasındaki farklar verilmiştir.

Tablo 1.1. İmpilisit ve ekspilisit yöntemler arasındaki farklar [26].

No	İmpilisit yöntem	Ekspilisit yöntem
1	Büyük zaman adımlarına izin verir ve denge denklemleri her zaman adımın sonunda kesin şekilde sağlanır.	Sistemin kararlılığının sağlanması için zaman adımı çok küçük değerlerle sınırlandırılır.
2	Temas şartlarının ani değiştiği durumlarda yakınsama problemi verebilir.	Çözüm kararlıdır. Hemen hemen her problem için çözüm verebilir.
3	Her zaman adımı için pek çok denge iterasyon gerektirir ve her bir iterasyon için bir dizi lineer denklem sistemi çözmek gerekir.	Zaman adımı başına daha az hesap gerekir. Büyük deformasyonlara maruz kalan karmaşık geometriler pek çok elemanla çözülebilir.
4	Rijit yüzeylerle çok sayıda düğümün etkileşimini çözmekte uygun değildir. Fakat geri yaylanma (springback) hesabını çok iyi ele almaktadır.	Ekspilisit yöntem büyük saç şekil verme problemlerini çözmekte etkilidirler. Fakat geri yaylanmadan sonraki geometriyi hesaplamak zor olabilir.
5	Genellikle yükün yavaş uygulandığı ve statik problemlerde etkilidirler. Genellikle atalet etkileri hesaba katılmaz.	Çarpma ve patlama gibi yüksek hızlı problemler başarıyla analiz edilebilir.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

2.1. Giriş

Tezin giriş bölümünde de belirtildiği gibi şekil verme etkilerinin çarpma üzerine etkisini belirleyebilmek için, parçanın bir şekil verme yöntemiyle imal edilmesi gerekmektedir. Bu amaçla, tez çalışmasında üretim yöntemi olarak tek adımlı derin çekme yöntemi kullanılmıştır. Öncelikle düz bir saç plaka derin çekme analizine tabi tutularak şapka profilli (U profilli) bir kanal haline getirilmiştir. Ardından şekil verilmiş parçanın kenarlarında oluşan düzensizlikleri ve fazlalık malzemeyi yok etmek için kırpma (trimming) analizi gerçekleştirilmiştir. Parça kalıptan çıktıktan sonra artık gerilmeler sebebiyle azda olsa belli bir elastik deformasyona (geri yaylanmaya) maruz kalacaktır. Bu durumu tespit etmek için parçanın açık yüzeyine kalıptan çıkmadan önce saç bir plaka punto (nokta) kaynağı ile monte edilmiş ve daha sonra geri yaylanma analizine tabi tutulmuştur. Burada ikinci bir geri yaylanma analizinden kaçınmak için parça kalıptan çıkarılmadan kapak parçaya monte edilmiştir. Gerçek imalatta parça, kalıptan çıktıktan sonra kenarları tekrar bastırılarak istenen ölçüye getirilip kapak monte edildikten sonra, serbest bırakılmaktadır. Yani parçada kalıptan çıktıktan ve kapak monte edildikten sonra iki ayrı elastik geri yaylanma olmaktadır. Geri yaylanma analizinin akabinde çarpma simülasyonları için gerekli zamanı ve bilgisayar hafızasını azaltmak için ağ (mesh) kabalaştırma (coarsening) analizi gerçekleştirilmiştir. En son aşama olarak gerekli sınır koşulları uygulanarak, şekil verme etkilerinin her birinin ayrı ayrı etkisini görmek amacı ile rijit duvara karşı eksenel çarpma analizleri gerçekleştirilmiştir. Yukarıda sayılan tüm işlem prosedürleri 1, 1.5 ve 2 mm parçalar için ayrı ayrı tekrarlanmıştır.

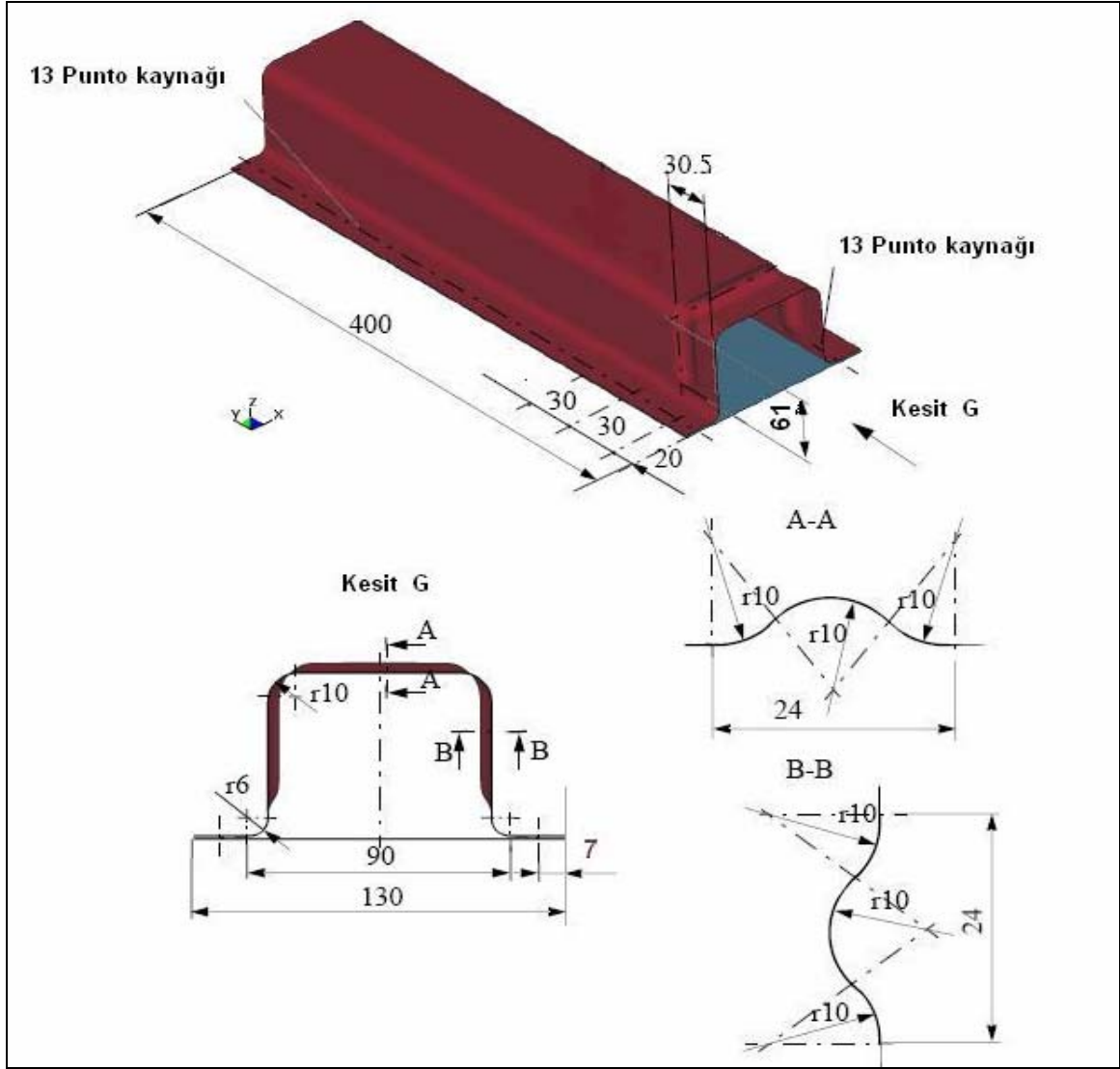
Belirtilen tüm analizler (geri yaylanma hariç) ekspilisit olarak LS-DYNA programı kullanılarak yapılmıştır. Geri yaylanma analizi ise impilisit olarak yine LS-DYNA programıyla yapılmıştır. Bir önceki analizden elde edilen deforme olmuş geometri, kalınlık değişimi, artık gerilme ve plastik şekil değişimine ait veriler bir sonraki analize dynain dosyası vasıtasıyla aktarılmıştır.

Bu tez çalışmasında ayrıca derin çekme işlemi esnasında baskı plakasına uygulanan yük değerinin değiştirilmesinin parçanın çarpma davranışına ne gibi etki yaptığı da belirlenmeye çalışılmıştır. Çünkü baskı plakasına uygulanan yükün değişmesi şekil verme

esnasında oluşan kalınlık değişimi, artık gerilme ve plastik şekil değişiminin değişmesine neden olmaktadır. Seçilen çeşitli baskı plakası y¼k¼ altındaki farklı şekil verme etkilerinin çarpma üzerine performansını belirlemede iki farklı ağ kullanılmıştır. Birincisi, derin çekme ve geri yaylanma analizi sonunda elde edilen ve deforme olmuş ağ olarak adlandıracağımız ağ olmaktadır. Bu ağ geri yaylanma sonundaki elastik geometrik değişimleri içerdiği için geometrik etkiyi içeren ağ olarak ta adlandırılabilir. Birinci ağ için çarpma analizleri, şekil verme etkilerinin dynain dosyası vasıtasıyla çarpma modeline bire bir aktarılması ile gerçekleştirilmiştir. İkincisi ise, CAD programı vasıtasıyla oluşturulan nominal ölç¼lere sahip parça geometrisinin, nispeten daha kaba bir ağ ile modellenmesi ile oluşan ve nominal ağ olarak adlandırılan ağdır. Bu ağ herhangi bir şekil verme işlemine maruz kalmadığı için deforme olmamış veya geometrik etkiyi içermeyen ağ olarak ta adlandırılabilir. Nominal geometri için çarpma analizleri birinci ağın kullanıldığı şekil verme ve geri yaylanma analizleri sonunda elde edilen kalınlık dağılımı, artık gerilme ve plastik şekil değişimlerinin dynain dosyası vasıtasıyla deforme olmuş ağ ve nominal ağ arasında eşleştirilmesi ile gerçekleştirilmiştir.

Statik arpma üzerine, şekil verme işleminin etkilerini incelemek için yapılan analizler de yine ekspilisit olarak gerçekleştirilmiştir. Burada statik analizlerde başlangıçta rijit duvara k¼tle verilmemiş ve rijit duvarın hareketi zamana g¼re bir yer değiştirme eğrisi ile tanımlanmıştır.

Yukarıda bahsedilen t¼m çarpma analizleri şekil 2.1’de geometrisi ve ölç¼leri verilen parça üzerinde gerçekleştirilmiştir [27]. Parça, kanal ve kapağın her bir yanında 13’er olmak üzere toplamda 26 punto kaynağıyla monte edilmesinden oluşmaktadır. Kanalın ön kısmına 30.5 mm’lik bir mesafede kesit d¼zlemine paralel ve geometrik olarak üstten dış b¼key, yanlardan ise i b¼key olan bir oluk (trigger) bulunmaktadır. Bu oluğun kullanılmasındaki temel amaç başlangıç anındaki deformasyon modunun d¼zg¼n ve kararlı olmasını sağlamaktır.



Şekil 2.1. Parçanın geometrisi ve ölçüleri

2.2. Kullanılan Eleman Tipi ve Büyüklüğü

Tez çalışmasında kullanılan saç parçalarının kalınlığı, boyutlarının yanında çok küçük olması sebebiyle kabuk (shell) elemanlarla modellenmesi uygun görülmüştür. Yine rijit olarak düşünülen parçalar da kabuk elemanlarla modellenmiştir. LS-DYNA programında eleman formülasyonu olarak tam olarak integre edilen (Fully integrated shell elements, type 16) eleman formülasyonu, kalınlık doğrultusunda beş integrasyon noktası ile modellenmiştir. Bu eleman formülasyonu çok fazla hafıza ve zaman kullanmasına rağmen, çözümde daha güvenilir sonuçlar vermektedir. Bu elemanın kullanılmasının tercih edilmesinin bir diğer nedeni de genellikle tek integrasyon noktası kullanıldığında ortaya çıkan kum saati (Hourglassing effects) etkisi olarak adlandırılan sıfır enerji modları

probleminden kaçınılmaktır. Rijit parça ve yüzeyler ise gereksiz şekilde zaman harcamamak için tam integrasyonlu eleman formülasyonuna göre çok daha hızlı çözüm yapan Belytschko-Tsay (Type 2) eleman formülasyonu ve tek integrasyon noktasıyla birlikte modellenmiştir.

Literatürde yapılan çalışmalarda çarpma analizleri için eleman büyüklüğünün 5-7 mm arasında olmasının lokal ve global deformasyon değişimlerini yakalamada yeterli olduğu belirlenmiştir [27]. Yine, Fairchild tarafından yapılan U profilli bir kirişin çarpma analizlerinden 5 mm eleman büyüklüğünün yeterli olduğu görülmektedir [28]. Bu yüzden burada eleman büyüklüğü olarak çarpma analizlerinde başlangıçta 5x5 mm boyutlu dört düğüm noktalı quadrilateral kabuk elemanlar kullanılmaktadır. Nominal geometride oluşun bulunduğu kısımdaki geçiş noktaları üçgen elemanlarla modellenmiştir. Derin çekme analizlerinde parça geometrisinin ve köşelerdeki kıvrımların daha düzgün olması için eleman boyutu 2.5x2.5 mm olarak seçilmiştir.

2.3. Malzeme Modeli

LS-DYNA programının tanımladığı pek çok malzeme modellerinden biri olan parçalı doğrusal izotrop plastik (Piecewise linear isotropic plasticity, type 24) model bu çalışma boyunca malzeme modeli olarak kullanılmıştır. Çarpma simülasyonlarında özellikle çelik yapılar için yoğun olarak kullanılan bu model bir izotrop, üç boyutlu, elastik-plastik (Von Mises) malzeme modelidir. Bu modelde malzemenin dinamik davranışı Cowper-Symonds eşitliği ile tanımlanmaktadır [20], [23].

$$\sigma_y(\dot{\epsilon}_{eff}^P, \epsilon_{eff}^P) = \sigma_y(\epsilon_{eff}^P) \left[1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}_{eff}^P}{C} \right)^{\frac{1}{P}} \right] \quad (12)$$

Burada, $\sigma_y(\epsilon_{eff}^P)$ akma gerilmesi (şekil verme hızı dikkate alınmaksızın), $\dot{\epsilon}_{eff}$ efektif plastik şekil değiştirme hızı ve C, P ise şekil verme hızı parametreleridir.

Bu malzeme modelinin en önemli özelliklerinden biri tek eksenli çekme düzeneği ile belirlenmiş, bir malzemeye ait gerçek gerilme ve gerçek plastik şekil değişimi grafiğinin o

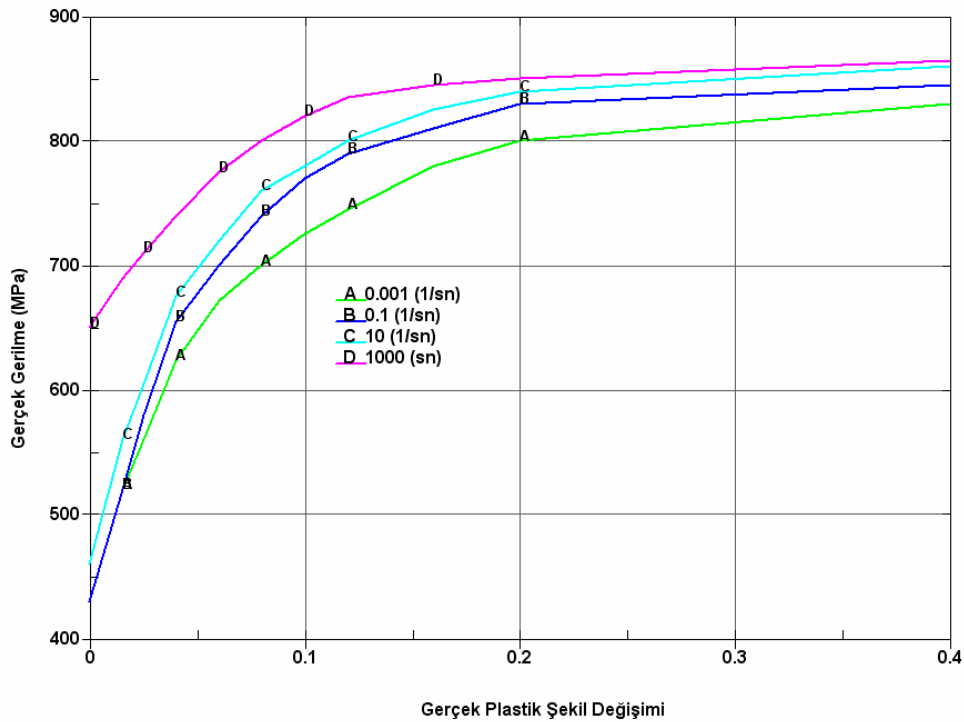
malzeme için programa giriş verisi olarak verilebilmesidir. Şekil verme hızını hesaplarda dikkate almak için yine bu grafik çeşitli şekil verme hızlarında belirlenmiş gerçek gerilme, gerçek plastik şekil değişimi eğrilerinden oluşabilir.

Bu tez çalışmasında DP 430 çift fazlı yapı çeliği kullanılmıştır. DP 430 çeliğinin çeşitli şekil değişimi hızlarındaki gerçek gerilme gerçek plastik şekil değişimi eğrileri Şekil 2.2’de verilmiştir [29]. Bu malzemenin mekanik özellikleri aşağıdaki şekildedir.

Elastisite Modülü, $E=200$ GPa

Poisson Oranı, $\nu=0.3$

Malzemenin yoğunluğu, $\rho= 7850$ kg/m³



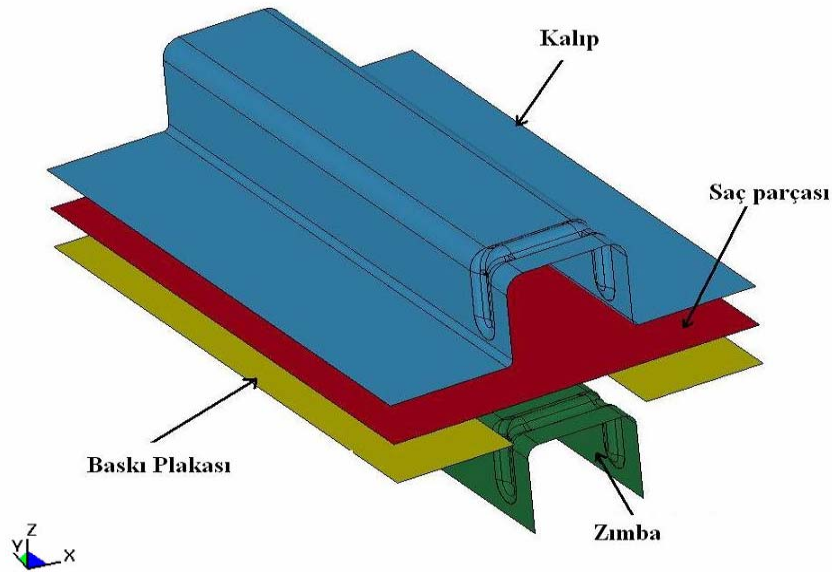
Şekil 2.2. DP 430 çeliğine ait çeşitli şekil değişimi hızlarında gerçek gerilme ve plastik şekil değişimi grafiği [29].

2.4. Çarpma Modelinin Oluşturulması Aşamaları

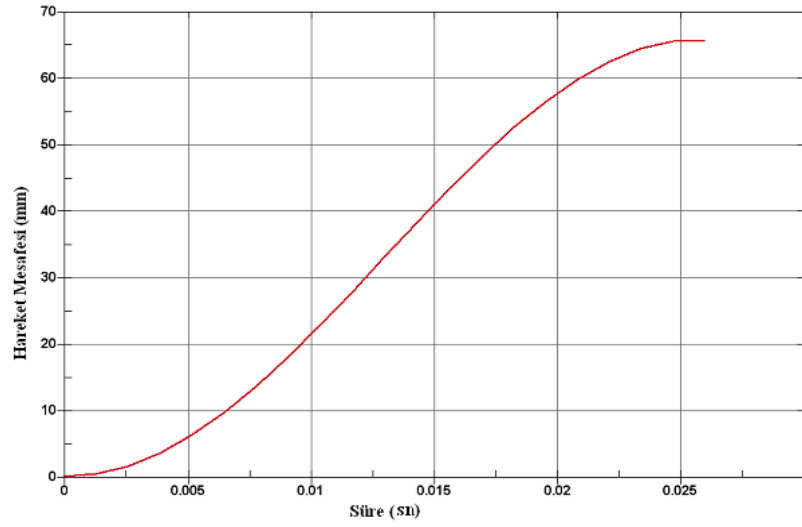
2.4.1. Derin Çekme Analizi

Saç parçanın istenilen geometriye sahip olması için burada tek adımlı derin çekme analizinden yararlanılmıştır. Derin çekme işlemi, Şekil 2.3’de görüldüğü gibi kalıp (dişi kalıp), zımba (erkek kalıp) ve baskı plakası vasıtasıyla gerçekleştirilmektedir. Kalıp ve

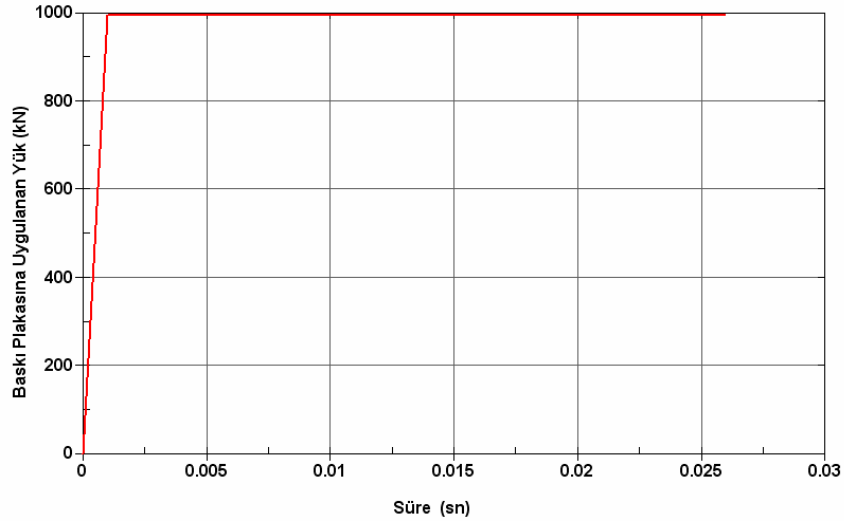
zımba saçı şekillendiren, baskı plakası ise üzerine yük uygulanarak şekil verme esnasında saçın kenarlarının kırışmasını engelleyen parçalardır. Derin çekme işlemindeki işlem prosedüründe, Maker'in şekil verme simülasyonlarında takip ettiği işlem adımları ve tavsiyeler dikkate alınmıştır [30]. Kalıp, zımba ve baskı plakası rijit olarak modellenmiştir. İş parçası ise 2.5x2.5 mm boyutunda dört düğüm noktalı 16000 kabuk elemanla modellenmiştir. Zımbanın hareketi sinüzoidal bir eğri ile sınırlandırılmıştır. Zımbanın zamana göre hareketi ve baskı plakası üzerinde 1000 kN'luk yük için yükün zamana göre değişim eğrisi Şekil 2.4'te verilmektedir. Diğer yükleme durumları içinde benzer grafikler kullanılmıştır. Parçalar arasındaki temas, "*CONTACT_FORMING_ONE_WAY_SURFACE_TO_SURFACE" temas kartı vasıtasıyla tanımlanmaktadır. Parçalar arasında 0.15'lik bir sürtünme katsayısı öngörülmüştür ve işlem süresi 0.026 s olarak belirlenmiştir. Ayrıca kalıbın tüm hareket serbestlik dereceleri sınırlandırılmış olup zımba ve baskı plakası sadece z ekseninde hareket edebilmektedir.



Şekil 2.3. Derin çekme işlemine ait parçaları



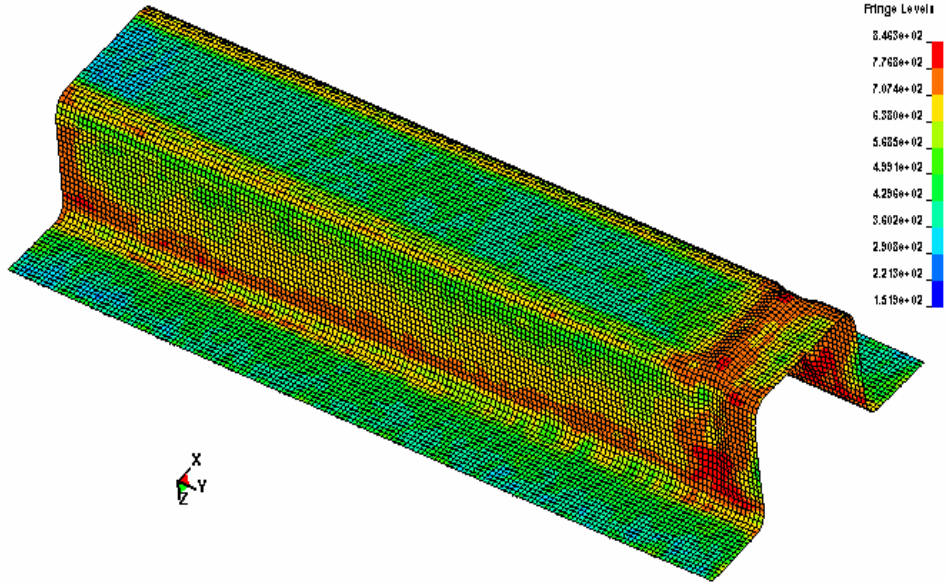
(a)



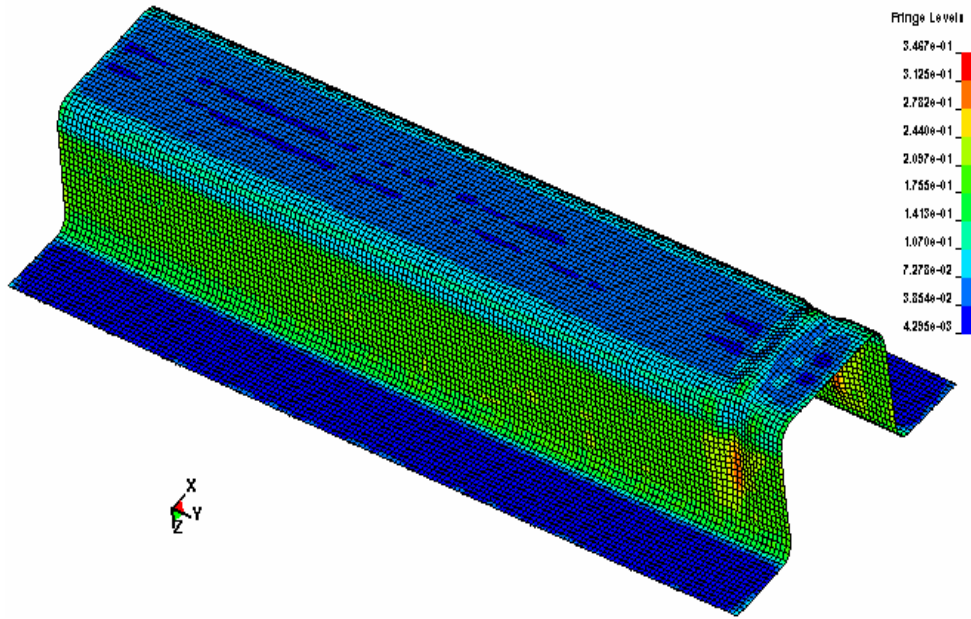
(b)

Şekil 2.4. (a) Zımbanın hareket eğrisi, (b) Baskı plakası yük eğrisi

Derin çekme işleminden sonra 1 mm kalınlıklı ve 1000 kN baskı plakası yüküyle şekillendirilen parçada oluşan Von Mises gerilme dağılımı, kalınlık ve plastik şekil değişimi dağılımları Şekil 2.5'te verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi kalınlık ve plastik şekil değişimi en fazla oluğun (trigger) yan yüzeylerinde ve parçanın kenarlarında oluşmaktadır.



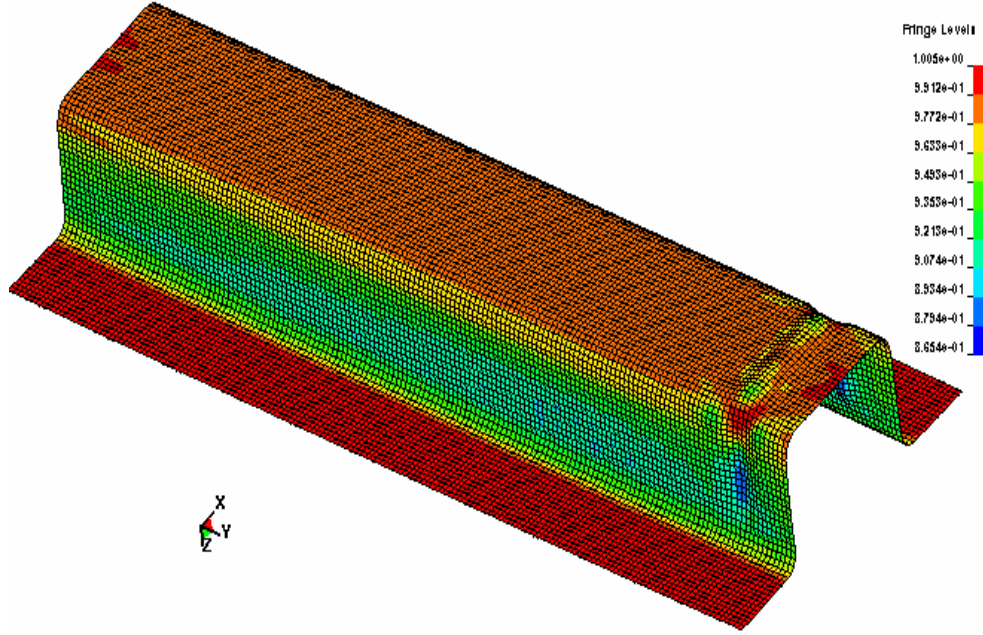
(a)



(b)

Şekil 2.5. Derin çekme işleminden sonra parçada oluşan, (a) Von Mises gerilme dağılımı, (b) Efektif plastik şekil değişimi, (c) Kalınlık değişimi

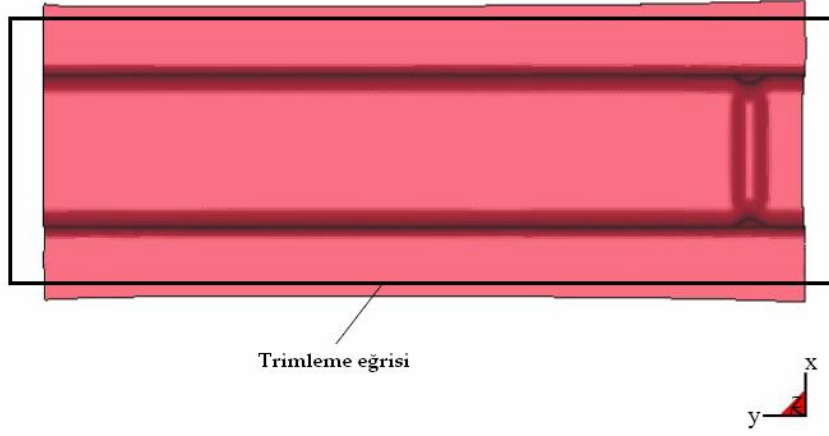
Şekil 2.5'in devamı;



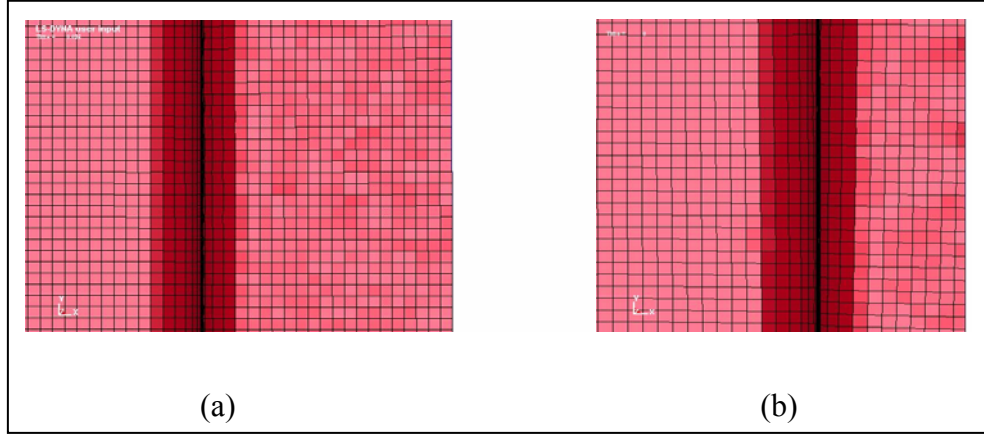
(c)

2.4.2. Kırpma (Trimming) Analizi

Derin çekme esnasında parçanın köşeleri eşit olmayan biçimde şekillenmektedir. Ayrıca başlangıçta saç parçanın boyunun, parçanın istenilen şekli alabilmesi için ne kadar olmasına karar vermek zordur. Bu yüzden tahmini bir ölçü alınarak işlem yapılmıştır. Kırpma analizi hem parçanın kenarlarında oluşan eğrilikleri düzeltmek hem de fazlalık malzemeyi parçadan uzaklaştırmak için yapılan bir analizdir. Dynain dosyası vasıtasıyla derin çekmeden gelen deforme olmuş geometri ve artık şekil verme etkileri kırpma analizine aktarılmıştır. Kırpma analizinde önce, Şekil 2.6'da görüldüğü gibi bir eğri ile parçadan uzaklaştırılacak kısımlar belirlenir. Program bu eğrinin z eksenini boyunca parça üzerine iz düşümü dışında kalan kısımları parçadan uzaklaştırır. Kesilen kısımlarda yeni elemanlar ve düğüm noktaları oluşturur. İşlem sıfır zamanı için gerçekleştirilir. Eleman sayısına göre birkaç dakikada çözüm yapılmaktadır. Şekil 2.7'de parçanın bir kısmı için kırpma analizinden önce ve sonraki durum görülmektedir.



Şekil 2.6. Kırpma analizi için tanımlanan eğrinin şekli



Şekil 2.7. Kırpma analizi için, (a) Kırpma analizinden önceki durum, (b) Kırpma analizinden sonraki durum

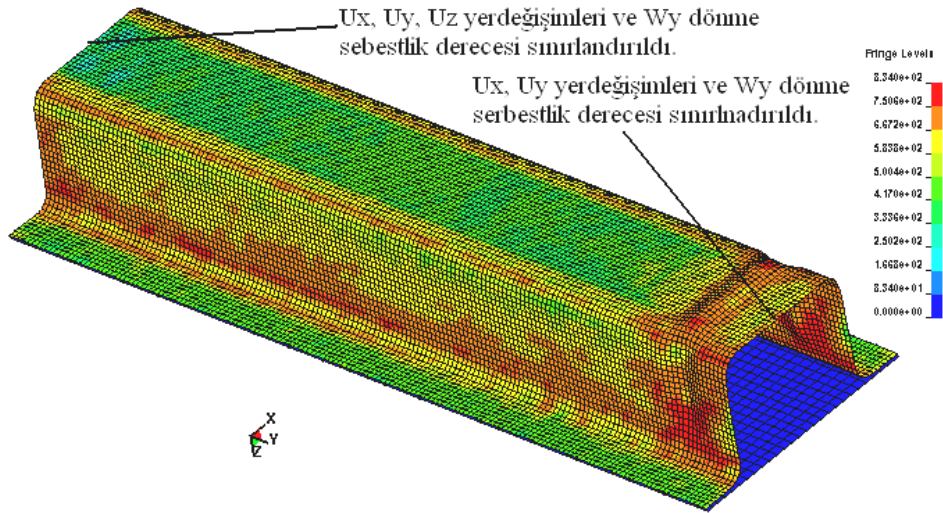
2.4.3. Geri Yaylanma Analizi

Derin çekme analizinden sonra şekillendirilen parçada kalan artık gerilmeler parça kalıptan çıkarıldıktan sonra bir gerilme gevşemesine ve genelde elastik olan deformasyonlara yol açacaktır. Bu sebeple bu yeni gerilme ve deformasyon durumunu belirlemek için geri yaylanma analizleri gerçekleştirilmiştir. Geri yaylanma analizleri daha gerçekçi sonuçlar vermesi sebebiyle LS-DYNA programıyla implisit olarak yapılmıştır. Geri yaylanma analizlerinin gerçekleştirilmesinde de Maker tarafından önerilen prosedür ve tavsiyeler dikkate alınmıştır [31, 32, 33].

Burada iki kez geri yaylanma analizinden kaçınmak için hem kırpma hem de kapağın parçaya montaj işlemi parça kalıptan çıkarılmadan önce gerçekleştirilmiştir. Gerçekte, kırpma ve montaj işlemi parça kalıptan çıktıktan sonra gerçekleştirilir. Ardından parçanın

geri yaylanma etkisiyle açılan kanatları bastırılarak istenilen geometriye getirildikten sonra kapak parçaya punto kaynağı ile monte edilir. Yani, parça kalıptan çıktıktan sonra ve kapak montaj edildikten sonra iki geri yaylanma olayına maruz kalır.

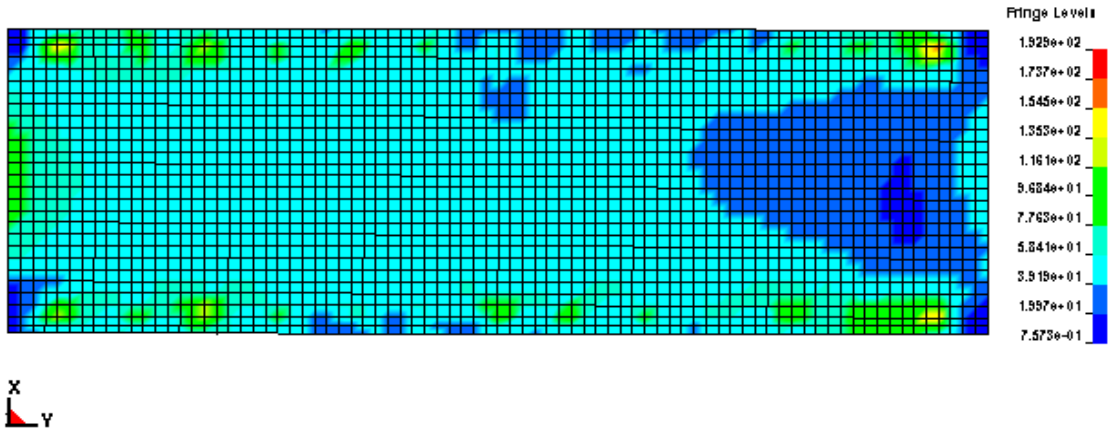
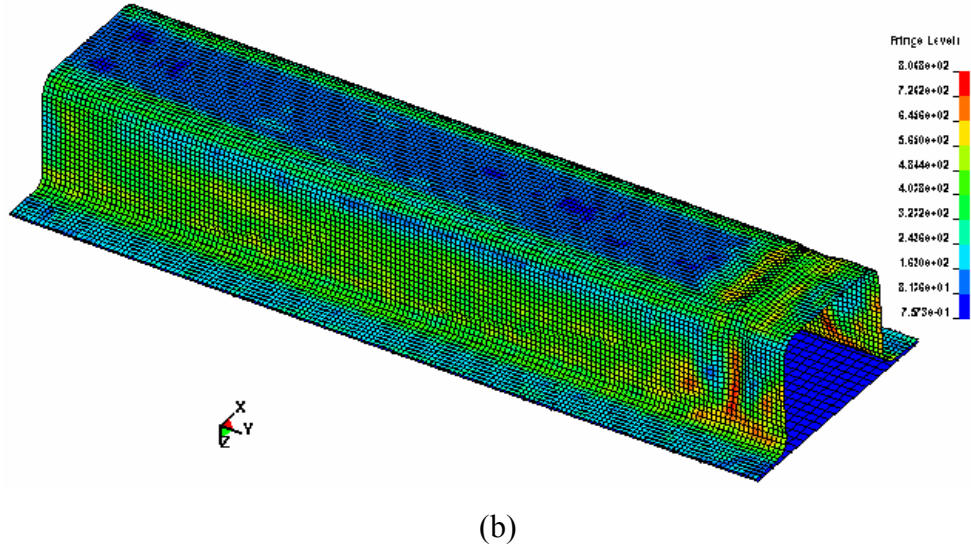
Punto kaynağı LS-DYNA programında “*CONTACT_TIED_NODE_TO_SURFACE” kartı vasıtasıyla modellenmiştir. Bu kart ile kapak üzerinde uygun olarak seçilen 26 adet düğüm noktasının serbestlik dereceleri, parçanın kanatları üzerine bağlanmaktadır [34]. Kapak geri yaylanma analizine, şekil verme etkileri olmaksızın saf olarak girmektedir ve 5x5 mm boyutunda toplamda 2160 kabuk elemanla modellenmiştir. Punto kaynağının kenarlardan 7 mm mesafeye doğru yerleştirilebilmesi için kenar bölgelerinde 5x3.5 mm kenar uzunluklu elemanlar kullanılmıştır. Malzeme ve eleman formülasyonları kanalla aynı seçilmiştir. Ayrıca geri yaylanma analizi esnasında parçanın rijit olarak hareket yapmaması için her iki uçunda birer düğüm noktasının Şekil 2.8a’da görüldüğü gibi, uygun şekilde hareket ve dönme serbestlik dereceleri sınırlandırılmıştır. 1 mm kalınlıklı ve 1000 kN’luk baskı plakası yükü ile derin çekilmiş parçaya ait, geri yaylanma analizinden önceki ve sonraki Von Mises gerilme dağılımları Şekil 2.8b’de verilmiştir. Kapak üzerindeki Von Mises gerilme dağılımı da Şekil 2.10’da verilmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi gerilmeler punto kaynaklarının bulunduğu bölgelerde maksimum olmaktadır.



(a)

Şekil 2.8. (a) Geri yaylanma analizinden önce parçadaki Von Mises gerilme dağılımı ve sınır koşulları, (b) Geri yaylanma analizinden sonra Von Mises gerilme dağılımı

Şekil 2.8'in devamı;

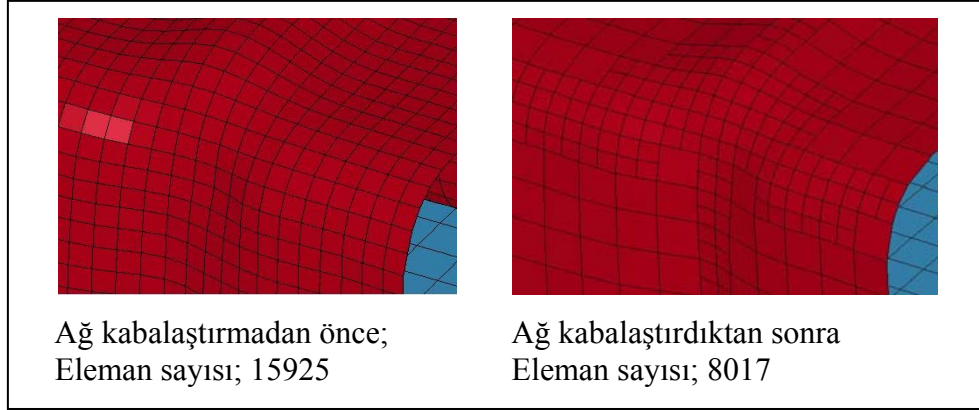


Şekil 2.9. Geri yaylanma analizinden sonra kapak üzerindeki Von Mises gerilme dağılımı

2.4.4. Ağ (Mesh) Kabalaştırma Analizi

Çarpma analizleri gerçekleştirilmeden önce, çarpma analizlerinde çözüm için gerekli olan zamanı ve bilgisayar hafızasını azaltmak için, parça ağ kabalaştırma analizine sokuldu. Bu analizde kullanıcı tarafından belirlenen açığa uygun şekilde program tarafından dört komşu eleman birleştirilir ve tek eleman haline getirilir. Ağ sürekliliğini korumak için ara noda ait bilgiler “*CONSTRAINED_ADAPTIVITY” kartı ile dynain dosyasında saklanır. Analiz sıfır zamanı için yapılır. Ağ kabalaştırma işlemi için verilen açı, eleman sayısının 7750 ile 8030 arasında olacak şekilde verilmiştir. Çünkü açının değişmesi ile

eleman sayısı değişmektedir. Şekil 2.11’de 1 mm kalınlıklı ve 1000 kN baskı plakası yükü altında şekillendirilen parçanın ağ kabalaştırmadan ve kabalaştırdıktan sonraki ağ durumu görülmektedir.



Şekil 2.10. Ağ kabalaştırmadan önce ve kabalaştırdıktan sonraki ağ durumu

2.4.5. Çarpma Analizleri

2.4.5.1. Şekil Verme İşlemlerinden Gelen Deforme Olmuş Ağ ile Yapılan Çarpma Analizleri

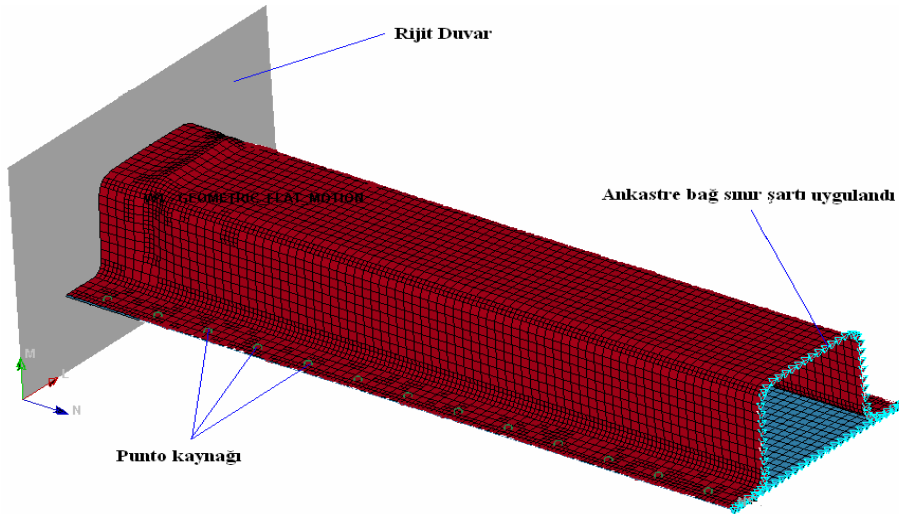
Burada şekil verme etkilerinin çarpmaya etkisini incelemek için her baskı plakası yükü ile şekillendirilen parça üzerinde altı çeşit çarpma analizi gerçekleştirildi. Tablo 2.1’de görüldüğü gibi her bir şekil verme etkisi ayrı ayrı ve tümünüm aynı anda etkimesi durumu için analizler yapılmaktadır.

Tablo 2.1.Yapılan çarpma analizleri

No	Analiz tipi	Kalınlık değişimi	Plastik şekil değişimi	Artık Gerilme
1	Geometrik etki	Yok(1mm)	Yok	Yok
2	Tüm Etkiler	Var	Var	Var
3	Plastik şekil değişimi	Yok (1mm)	Var	Yok
4	Kalınlık değişimi	Var	Yok	Yok
5	Gerilme Etkisi	Yok (1mm)	Yok	Var
6	Nominal Geometri	Yok (1mm)	Yok	Yok

Tabloda geometrik etki olarak adlandırılan şekil verme etkisi ile yapılan çarpma analizleri, derin çekme ve geri yaylanma analizi sonrası meydana gelen deforme olmuş ağ yapısının çarpmaya etkisini incelemek için gerçekleştirilmiştir. Geometrik etki, deforme olmuş ağ dışında kalınlık dağılımı da dahil olmak üzere herhangi bir etki içermemektedir. Tabloda parantez içindeki 1 mm'lik değerler sabit kalınlık değerini ifade etmektedir. Plastik şekil değişimi ve gerilme etkisi sabit kalınlık için yalnızca plastik şekil değişimi ve yalnızca gerilme değerlerinin parçaya yüklenmesi ile incelenmiştir. Tüm etkiler olarak ifade edilen çarpma analizi ise, plastik şekil değişimi, kalınlık değişimi ve gerilmelerin aynı anda parçaya yüklenmesi durumunda gerçekleştirilmiştir. Yukarıda saydığımız tüm analizler aynı zamanda geometrik etki dediğimiz etkiyi içermektedir. Çünkü geometrik etki, tüm etkiler, plastik şekil değişimi, kalınlık değişimi ve gerilme etkisi testlerini gerçekleştirmekte kullandığımız ağ, derin çekme ve geri yaylanma analizinden elde edilmiştir. Nominal geometri olarak adlandırdığımız testte ise katı modelleme programında çizilen nominal ölçülere sahip parça üzerinde ağ oluşturulması ile elde edilen çarpma modeli kullanılmıştır. Bu model sabit kalınlıklıdır ve herhangi bir şekil verme etkisi içermemektedir.

Bu tez çalışması boyunca yapılacak olan çarpma analizleri için kullanılan sonlu elemanlar modeli Şekil 2.11'de görülmektedir. Parçanın bir ucuna ankastre bağ sınır koşulu uygulandı ve diğer ucuna sadece y eksenini boyunca hareketine müsaade verilen rijit duvar çarpıtılarak çarpma analizleri gerçekleştirildi. Rijit duvara 35 kg'lık bir kütle ve 15 m/s'lik bir başlangıç hızı verilmiştir.

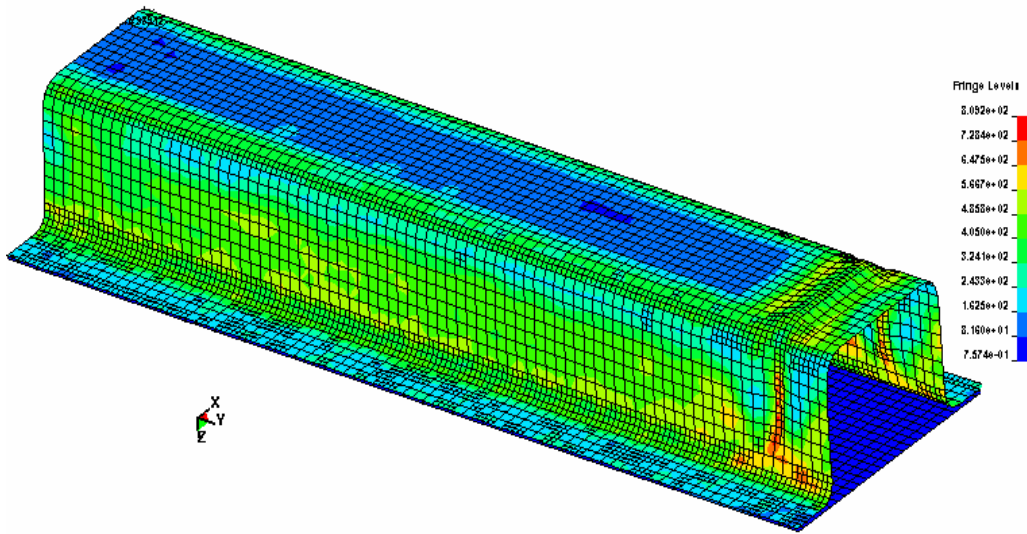


Şekil 2.11. Çarpma analizlerinde kullanılan sonlu elemanlar modeli

Çarpma analizlerinde punto kaynağını impilisit olarak çözülen geri yaylanma analizlerindeki “*CONTACT_TIED_NODE_TO_SURFACE” kartı ile modellenememektedir [34]. Bunun yerine çarpma analizlerinde punto kaynağı kiriş elemanlarla “*CONTACT_TIED_SHELL_EDGE_TO_SURFACE” kartı vasıtasıyla modellenmiştir. Bu kart ile modellenmede punto kaynakları ağ durumundan bağımsızdır ve istenilen yere yerleştirilebilmektedir. Çarpma anında parçaların birbirleriyle temasının yanında, kendi içlerinde de temas oluşturacağı için temas tanımı olarak “*AUTOMATIC_SINGLE_SURFACE” temas kartı kullanılmıştır. Bu temas tanımı hızlı ve çok karmaşık olaylarda çok sayıda parça arasındaki temasları tanımlamada etkindir [34].

Nominal geometri tamamıyla 5x5 mm dört düğümlü toplam 6585 elemanla modellenmiştir.

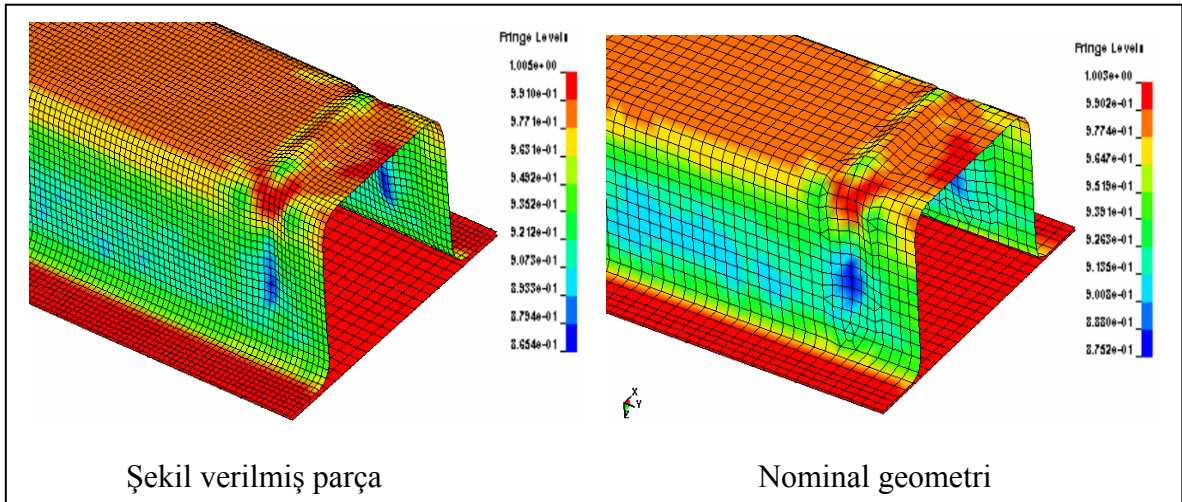
Şekil vermeden gelen etkilere ait veriler daha önceden de bahsedildiği gibi dynain dosyası vasıtasıyla “*INCLUDE” kartı kullanılarak çarpma analizlerine aktarılmıştır. Dynain dosyası içindeki verilerden (deforme olmuş geometri, kalınlık dağılımı, plastik şekil değişimi ve gerilmeler), istenilenler Fortran programı vasıtasıyla ayıklanıp çarpma modeline uygulanmıştır. Kapak çarpma analizlerine saf malzeme özellikleriyle değil, geri yaylanma analizinden kalan gerilmelerle girmiştir. Şekil 2.12’de 1 mm kalınlıklı, 1000 kN basma plakası yükü ile şekillendirilmiş parça için çarpmadan önce kabalaştırılmış ağ üzerine yapılan gerilme aktarımı görülmektedir. Geri yaylanma sonundaki gerilme dağılımı (Şekil 2.8b) ile aynı dağılım, aktarma ile de elde edilmiştir. Sadece ağ kabalaşmasından dolayı gerilme dağılımlarında çok az fark olduğu görülmektedir.



Şekil 2.12. Çarpma modeline aktarılmış gerilme dağılımı

2.4.5.2. Nominal Geometri ile Yapılan Çarpma Analizleri

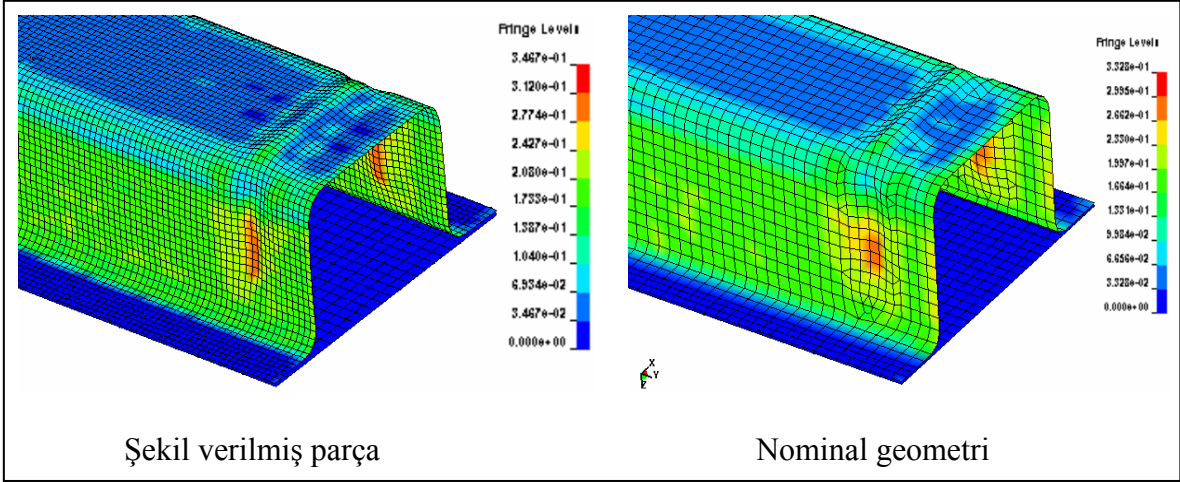
Burada şekil verme etkilerini incelemek için literatürde bazı çalışmalarda yapılan farklı bir yol uygulanmıştır. Bu çalışmada şekil verme etkilerinin çarpma davranışına etkisini incelemek için yapılan çarpma analizleri, nominal geometri üzerine geri yaylanma analizi sonundaki gerilme, plastik şekil değişimi ve kalınlık dağılımının her birinin eşleştirilmesi ile gerçekleştirilmiştir. Burada, deforme olmuş ağ ile yapılan çarpmadan farklı olarak nominal geometri kullanılarak modellenen ağ kullanıldığı için, geometrik etki adını verdiğimiz analize gerek kalmamıştır ve yalnızca beş çeşit çarpma analiz gerçekleştirilmiştir. Veriler yine dynain dosyası vasıtasıyla “*INCLUDE_STAMPED_PART” kartı vasıtasıyla nominal geometriye eşleştirilmiştir. Şekil 2.13’de 1 mm kalınlıklı ve 1000 kN’luk baskı plakası yükü ile derin çekme işlemine maruz bırakılmış parça için, geri yaylanma analizi sonundaki şekil verme etkileri ile çarpma modelindeki eşleştirilmiş veriler görülmektedir. Bu analizler sadece 1 mm kalınlıklı parça için gerçekleştirilmiştir. Eleman ve düğüm sayısı ile numaraları tamamen farklı iki ağ arasında eşleme yapıldığı için kalınlık, plastik şekil değişimi ve gerilmelerde eşleşme sonrası %3–5 arasında farklar ortaya çıkmaktadır. Malzeme modeli, rijit duvarın başlangıç hız ve kütlesi gibi diğer tüm veriler deforme olmuş geometri ile yapılan çarpma analizlerindeki verilerle aynı olarak modellenmiştir.



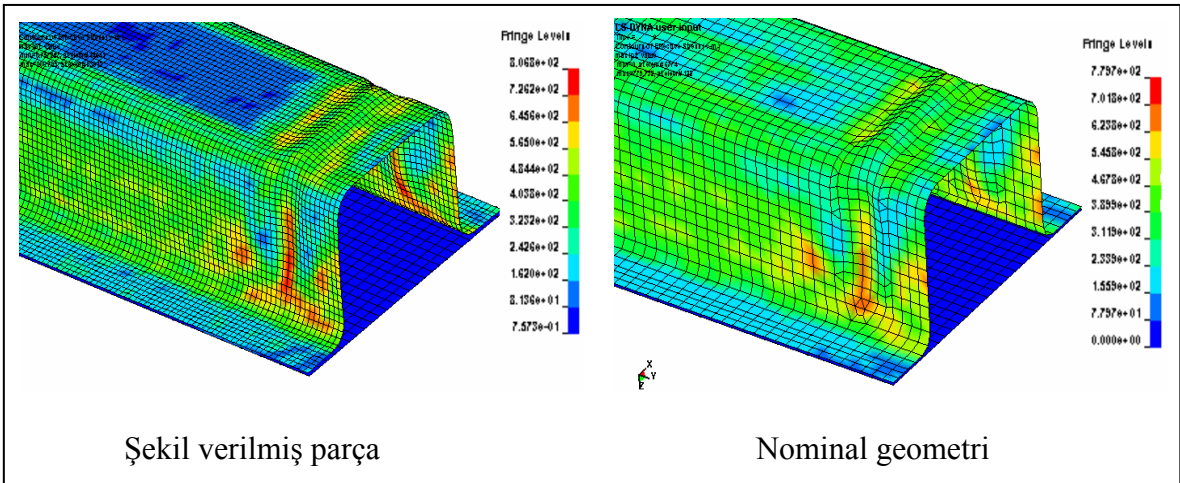
(a)

Şekil 2.13. Geri yaylanma analizinden sonraki verilerin nominal geometri üzerine eşleştirilmesi, (a) Kalınlık eşleştirilmesi, (b) Plastik şekil değişiminin eşleştirilmesi, (c) Gerilmenin eşleştirilmesi

Şekil 2.13'ün devamı;



(b)



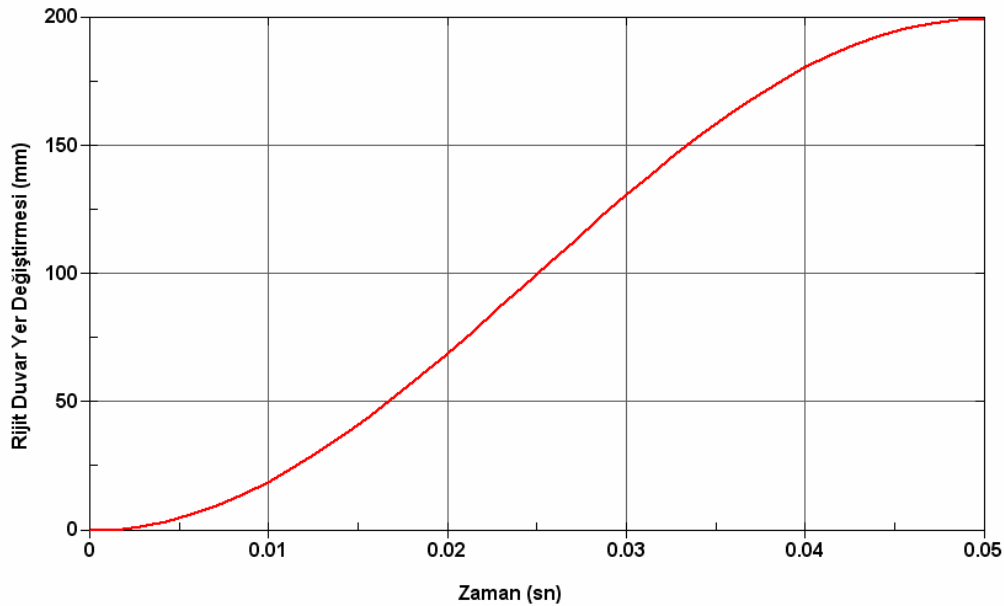
(c)

2.4.5.3. Statik Çarpma Analizleri

Statik analizler de dinamik analizler gibi ekspilisit olarak LS-DYNA programında, şekil verme etkilerinin statik çarpma analizleri üzerine ne gibi etkileri olduğunu belirlemek için gerçekleştirilmiştir. Burada yapılan statik çarpma analizleri, belli şartlar altında ekspilisit olarak yapılan analizlerinin sonuçlarının statik çözümlere yakın olduğu kabul edilerek yapılmıştır. Statik kabullü çarpma analizlerinin geçerli olabilmesi için öncelikle

deformasyon esnasındaki kinetik enerjinin, şekil değiştirme enerjisi (iç enerji) yanında ihmal edilebilecek kadar küçük olması gerekmektedir [35, 10]. Yine, bu esnada kum saati enerjisinin (hourglassing energy) çok düşük yüzeylerde kalması gerekmektedir. Ayrıca ekspilisit olarak statik çarpma testlerini yapmak için bir başka yolda malzeme yoğunluğunu uygun bir skala ile çarpmaktır [36]. Böylece dinamik etkiler bertaraf edilerek statik analizler gerçekleştirilebilir.

Statik çarpma analizleri esnasında yukarıdaki saydığımız ön şartlar dikkate alınmıştır. Ayrıca şekil verme hızının etkisini ihmal etmek için Şekil 2.2’de görülen çeşitli şekil değiştirme hızlarındaki gerçek gerilme, gerçek plastik şekil değiştirme eğrileri içinden, sadece 0.001 (1/s) şekil değiştirme hızındaki gerçek gerilme, gerçek plastik şekil değiştirme eğrisi, malzeme verisi olarak statik çarpma analizlerinde kullanılmıştır. Burada dinamik analizlerin tersine rijit duvar kütleli olarak modellenmiş ve analiz esnasında rijit duvarın hareketi zamanla sinüzoidal bir hareket yapacak şekilde tanımlanmıştır (Şekil 2.14). Rijit duvarın toplam yer değiştirmesi 200 mm olarak seçilmiştir. Statik analizler yalnızca 1 mm kalınlıklı 1000 kN baskı plakası altında derin çekme işlemi ile şekillendirilmiş saç parça için, deforme olmuş ağ kullanılarak yapılmıştır.



Şekil 2.14. Statik analizlerde rijit duvar için tanımlanan zamana göre yer değiştirme eğrisi

2.4.5.4. Oluğun (Trigger) Deformasyon Şekline Etkisinin İncelenmesi

Tez çalışmasında kullanılan parçanın ön ucundan 30.5 mm mesafede, çarpma analizlerinde başlangıç deformasyonunun düz ve kararlı olması için, yan kenarlarda iç bükey, üst kısımda ise dış bükey olan bir oluk (Trigger) kullanılmıştır (Şekil 2.1). Oluklu parça ile oluk kullanılmayan parça arasında çarpma anında ne gibi deformasyon farklarının ortaya çıktığını görmek, yani oluğun çarpmaya etkisinin ne olduğunu tespit etmek için bu bölümde üç çeşit parça dizaynı ile çarpma analizleri gerçekleştirilmiştir. Parçalar, oluksuz, tek oluklu ve birinci oluktan 60 mm mesafeye başka bir oluğun yerleştirildiği iki oluklu olarak üç şekilde dizayn edilmiştir. Sonlu elemanlar modelleri diğer çarpma modelleri gibi tasarlanmış ve 5x5 mm eleman boyutlu kabuk elemanlar kullanılmıştır. Rijit duvara 45 kg kütle ve 15 m/s'lik başlangıç hızı verilmiş ve çarpma analizleri aksenal olarak her üç parça için gerçekleştirilmiştir.

2.4.5.5. Şekil Verme Hızının Çarpma Davranışına Etkisi

Çarpma analizlerinde merak edilen bir başka konuda, şekil verme hızının çarpmaya olan etkisidir. Bilindiği gibi çarpma olayı çok kısa süreler içinde vuku bulmaktadır ve çarpma esnasında parçalarda yüksek hızlarda deformasyonlar oluşabilmektedir. Bu bölümde DP 430 çeliğinin şekil verme hızının çarpmaya etkisinin ne olduğunu belirlemek için nominal geometriye sahip ağ üzerinden iki farklı çarpma testi gerçekleştirilmiştir. Birincisinde şekil verme hızı ihmal edilerek çarpma analizi gerçekleştirilmiştir. Şekil verme hızını ihmal etmek için Şekil 2.2'deki grafikte çeşitli şekil verme hızlarındaki eğrilerden yalnızca 0.001 (1/s) şekil verme hızına ait gerçek gerilme- gerçek plastik şekil değişimi eğrisi, malzeme için programda giriş verisi olarak kullanılmıştır. İkinci durumda şekil verme hızının etkisini çarpma analizine dahil edebilmek için diğer analizlerde olduğu gibi seçilen şekil verme hızlarındaki eğriler malzeme modeline giriş verisi olarak kullanılmıştır. Şekil verme hızının etkisinin incelendiği analizler 1.5 mm kalınlıklı parça için gerçekleştirilmiştir. Rijit duvar 35 kg kütle ve 15 m/s'lik başlangıç hızına sahip olacak şekilde modellenmiştir.

3. BULGULAR VE İRDELEME

3.1. Şekil Verme İşlemlerinden Gelen Deforme Olmuş Ağ ile Yapılan Çarpma Analizleri

Daha önceki bölümlerde de belirtildiği gibi tezin asıl amacı şekil verme işleminden gelen etkilerin parçanın çarpma davranışına etkilerinin belirlenmesidir. Bu bölümde derin çekme işlemi sonunda parçada oluşan ağ yapısı (deforme olmuş ağ) kullanılarak çarpma analizleri gerçekleştirilmiştir. Burada 1 mm kalınlıklı parça için beş farklı baskı plakası yükü (50, 200, 600, 1000 ve 1300 kN), 1.5 ve 2 mm kalınlıklı parçalar için ise üç farklı baskı plakası yükü (600, 1000 ve 1300 kN) ile yapılan derin çekme simülasyonu sonuçları kullanılmıştır. Şekil verme işlemi sonunda parçada oluşan artık şekil verme etkilerinden plastik şekil değiştirme, kalınlık değişimi ve artık gerilme dağılımları çarpma analizlerine aktarılmıştır. Her bir baskı plakası yükü için gerçekleştirilen çarpma analizleri sonuçları dört ayrı grafik şeklinde verilecektir. Bu grafiklerden ilki, şekil verme etkilerinin her biri için (Tablo 2.1’de verilen durumlar için) çarpma esnasında rijit duvarın eksenel yer değiştirmesinin zamanla değişimini gösteren rijit duvar yer değiştirmesi-zaman grafiğidir. İkincisi, parçada meydana gelen iç enerjinin rijit duvar yer değiştirmesine göre değişimini (sönümlenen enerji) gösteren iç enerji-rijit duvar yer değiştirme grafiğidir. Üçüncüsü, çarpma esnasında her bir şekil verme etkisi için rijit duvar üzerinde oluşan reaksiyon kuvvetinin rijit duvar yer değiştirmesi ile değişimini gösteren rijit duvar kuvveti-rijit duvar yer değiştirmesi grafiğidir. Dördüncü grafik ise ortalama çarpma kuvvetinin (ortalama rijit duvar kuvveti) rijit duvar yer değiştirmesi ile değişimini gösteren ortalama rijit duvar kuvveti-rijit duvar yer değiştirmesi grafiğidir.

Her bir baskı plakası yükü ile gerçekleştirilen derin çekme işlemi esnasında 1, 1.5 ve 2 mm kalınlıklı parçalarda oluşan kalınlık değişimleri Şekil 3.1’de verilmiştir. Grafikler parçanın uçtan 200 mm mesafedeki kesit düzlemine ait kalınlık değişimlerini yansıtmaktadır. Grafiklerden de görüldüğü gibi baskı plakası yükü arttıkça parçada kalınlık incelmeleri artmaktadır (Şekil 3.1a). En büyük kalınlık incelmesi kanalın kenar yüzeylerinin orta bölgesinde oluşmaktadır. Parçanın üst yüzeyinde ve kanatlarında önemli bir kalınlık değişimi görülmemektedir. 1 mm kalınlık için oluşan kalınlık incelmesi eğilimi benzer şekilde 1.5 ve 2 mm kalınlıklı parçalarda da oluşmaktadır (Şekil 3.1b-c).

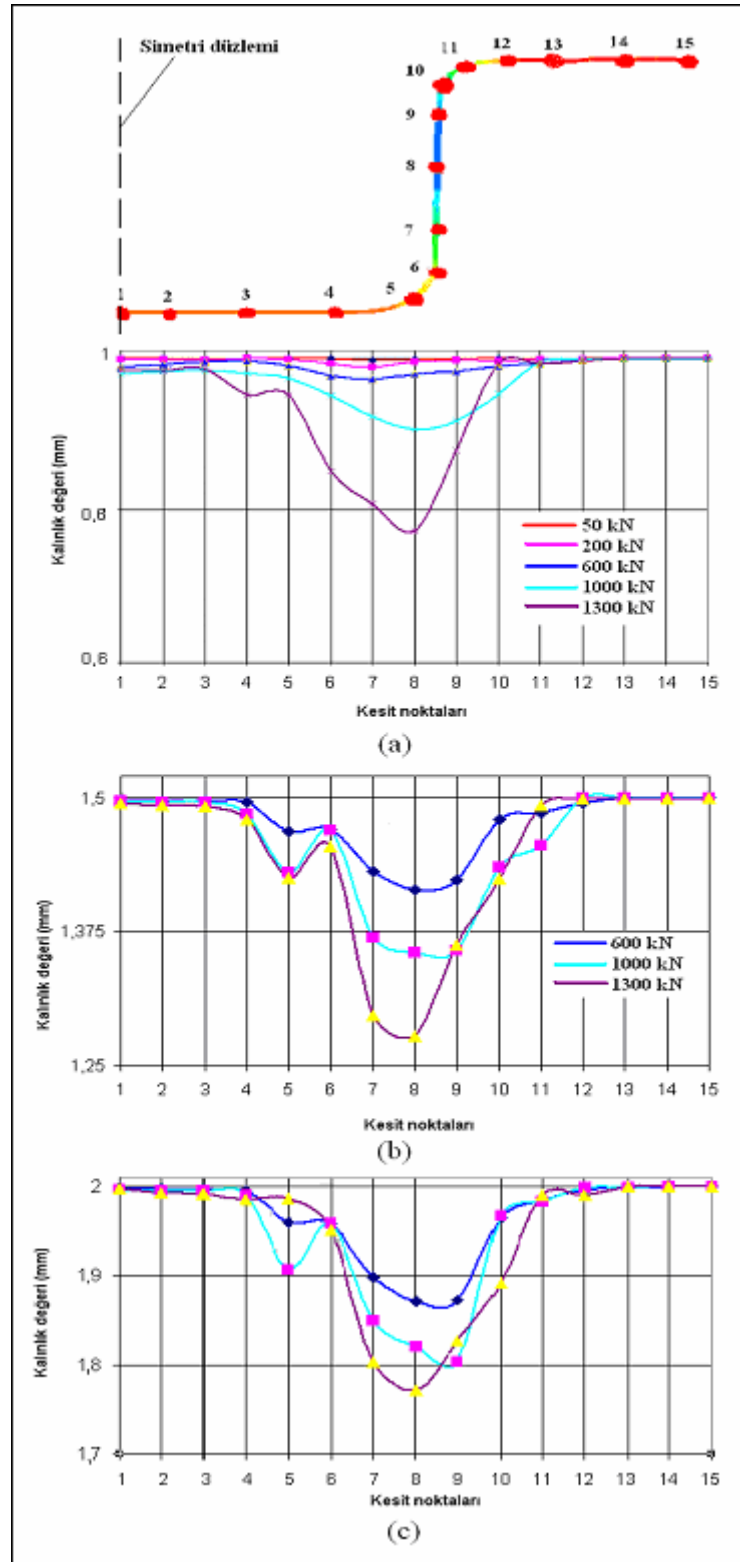
1000 kN baskı plakası ile şekil verilen 1 mm kalınlıklı parçada plastik şekil değişimi, artık gerilme, kalınlık değişimi, geometrik etki, nominal geometri ve tüm etkiler için, belli zaman aralıklarında çarpma esnasında meydana gelen deformasyon modlarının görünüşleri Şekil 3.2’de verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi en fazla aksel deformasyon, kalınlık değişimini içeren modelde oluşmaktadır. En az aksel deformasyon ise plastik şekil verme etkisinin esas alındığı modelde oluşmaktadır. 0.01 saniyede tüm modellere ait deformasyon modları benzer davranış sergilerken 0.025 saniyede farklı davranışlar sergilemektedirler. Örneğin nominal geometriyi esas alan model düzgün bir deformasyon modu sergilerken kalınlık değişimi ve geometrik etkiyi temel alan modeller global bir eğilme başlangıcı göstermektedir.

1 mm kalınlıklı ve 50 kN baskı plakası yüküyle şekillendirilmiş parçada, Şekil 3.3a’da görüldüğü üzere başlangıçta rijit duvar yer değiştirmesi hızla artmakta ve sonra artış hızı azalmaktadır. Plastik şekil değişimi ve tüm etkilerin dikkate alındıkları modellerde rijit duvar yer değiştirmesi diğer şekil verme etkilerinin dikkate alındığı modellerinkinden daha düşük olarak gerçekleşmiştir. En büyük yer değiştirme kalınlık değişiminin esas alındığı modelde olmuştur.

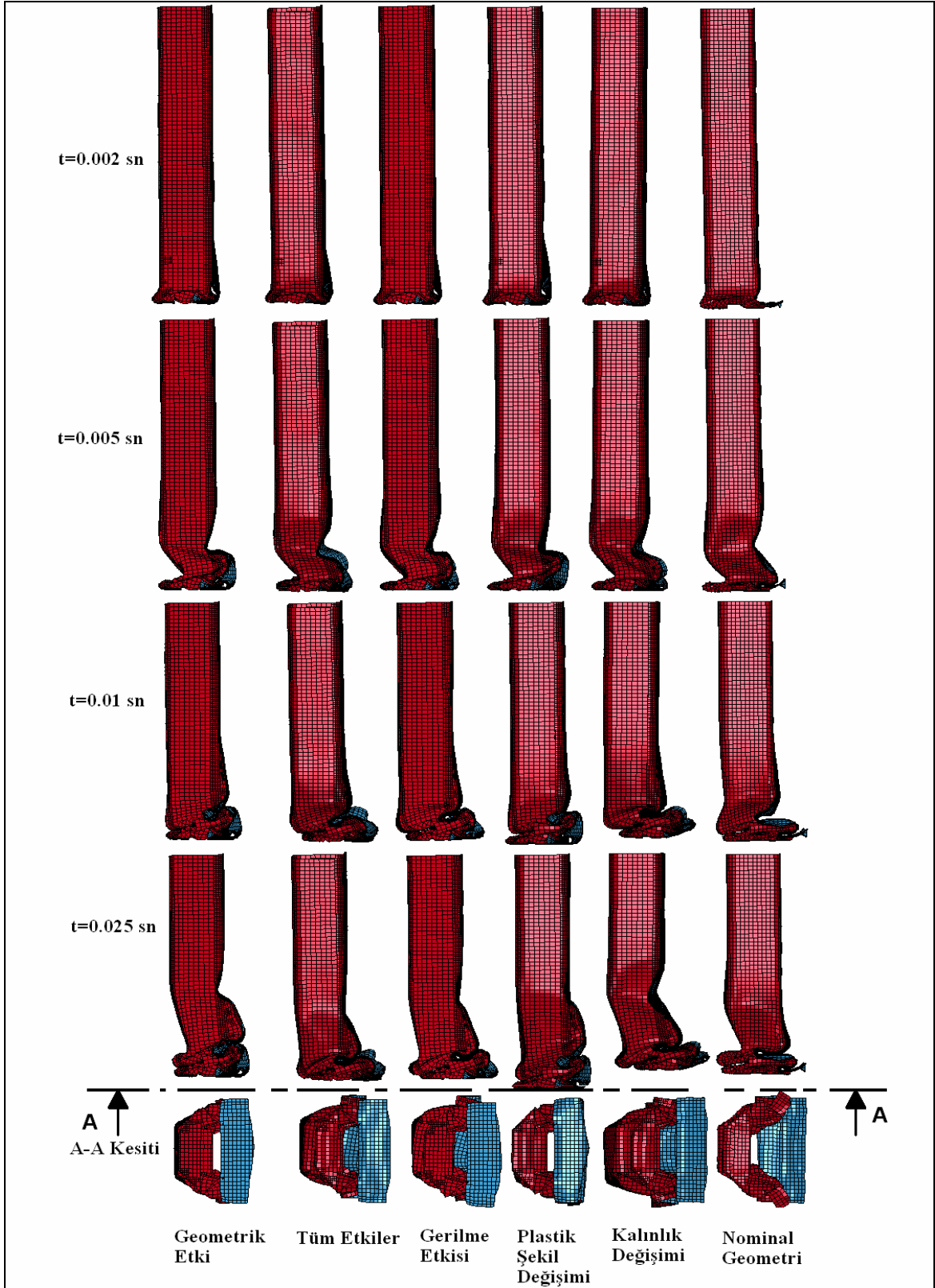
Şekil 3.3b’de ise iç enerji rijit duvar yer değiştirmesine göre değişimi verilmektedir. İç enerji değişimleri rijit duvar yer değiştirmesi ile doğrusala yakın bir şekilde artış göstermektedir. Aynı miktar yer değiştirme için en fazla iç enerji değişimi, plastik şekil değişiminin esas alındığı modelde, en azı ise kalınlık değişiminin etkisinin göz önüne alındığı modelde oluşmaktadır.

Rijit duvar çarpma kuvveti grafiğinde (Şekil 3.3c) kuvvet, her bir şekil verme etkisi için başlangıç anında bir maksimum değere ulaşmaktadır ve ardında hızla düşerek daha düşük seviyelerde dalgalı bir değişim göstermektedir. Yine ortalama çarpma kuvveti de başlangıçta maksimum bir değere ulaşmakta fakat maksimum değerden sonra düşerek hemen hemen sabit değerde kalmaktadır.

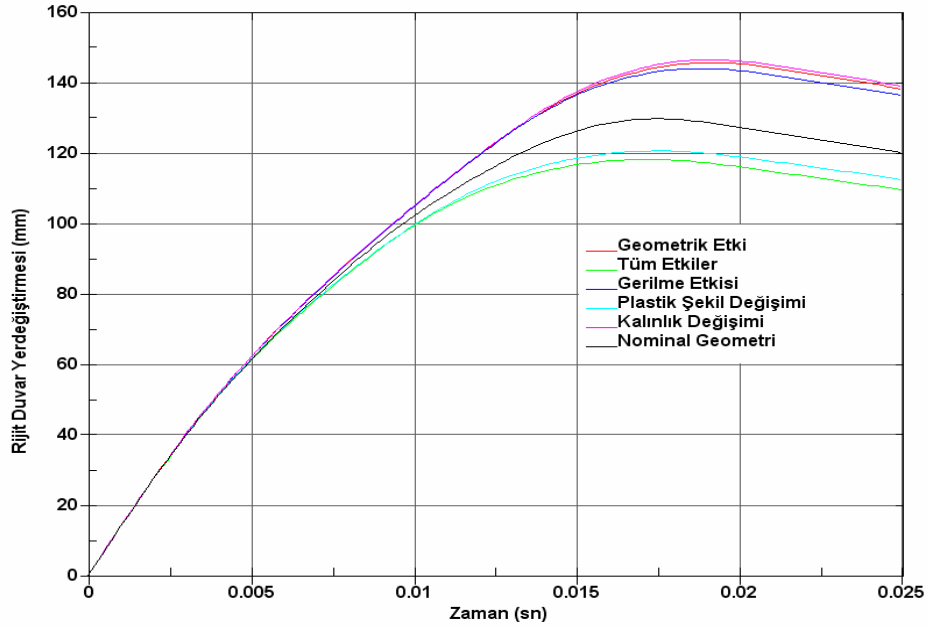
200, 600, 1000 ve 1300 kN baskı plakası yüklemeleri ile ilgili grafikler, sırasıyla, Şekil 3.4-Şekil 3.7’de verilmiştir. 50 kN baskı plakası yükü için elde edilen grafiklerde şekil verme etkilerinin sergilediği eğilimler 200, 600, 1000 ve 1300 kN baskı plakası yüklemeleri ile ilgili grafiklerde de görülmektedir. Baskı plakası yükü arttıkça şekil verme etkilerinin yaptığı değişimler daha belirgin olarak ortaya çıktığı görülmektedir.



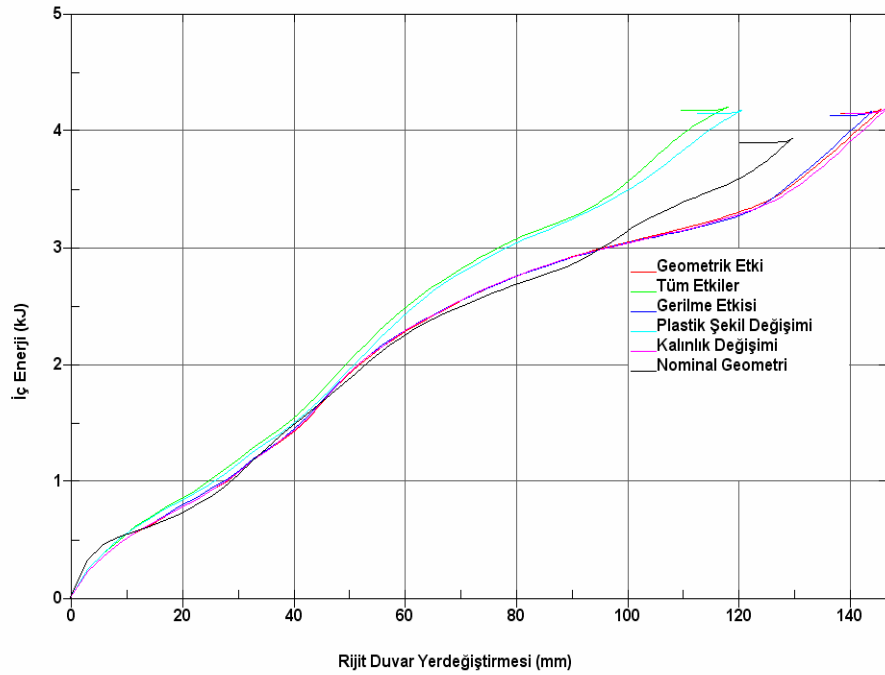
Şekil 3.1. Farklı baskı plakası yükleri altında derin çekme analizinden sonra parçalardaki kalınlık değişimleri, (a) 1 mm kalınlıklı parça, (b) 1.5 mm kalınlıklı parça, (c) 2 mm kalınlıklı parça



Şekil 3.2. 1000 kN'luk baskı plakası yükü ile şekil verilen 1 mm kalınlıklı parçanın deformasyon modlarının zamanla değişimi



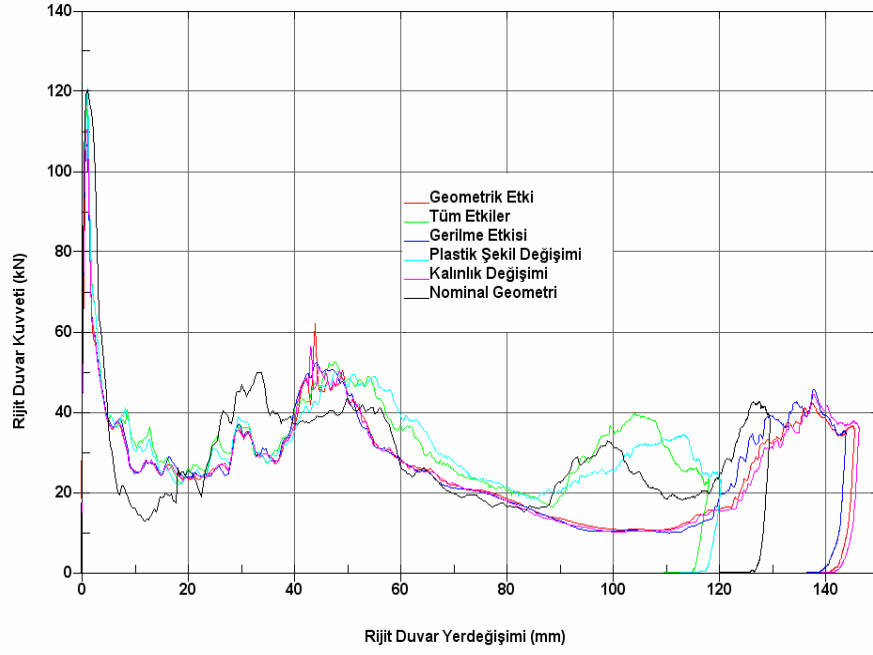
(a)



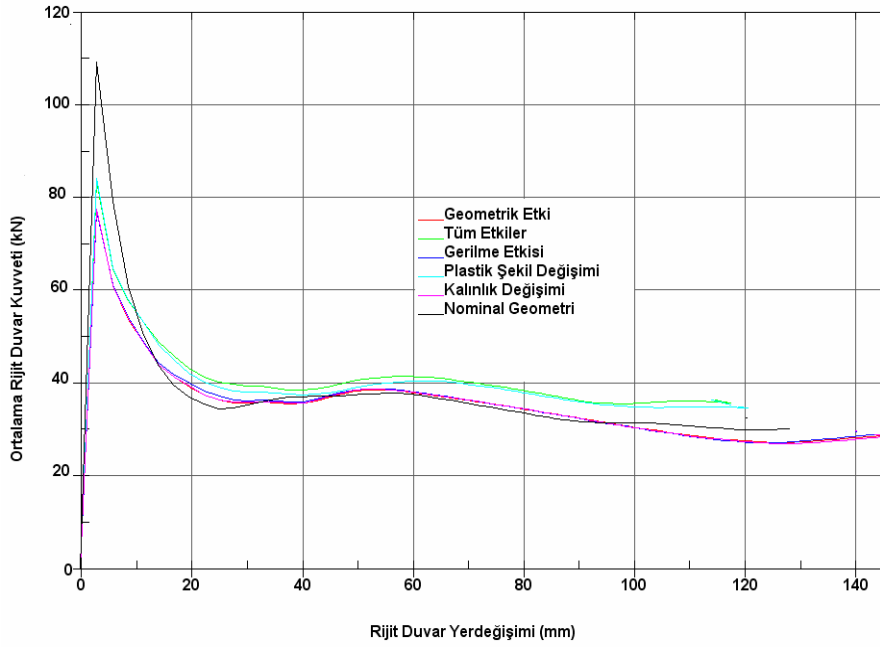
(b)

Şekil 3.3. 50 kN baskı plakası y¼k¼ ile Şekil verilen 1 mm kalınlıklı parçada, (a) Rijit duvarın zamanla yaptığı yer değiştirme, (b) İ enerji değişimi, (c) Rijit duvarda oluşan reaksiyon kuvvetinin rijit duvar yer değiştirmesi ile değişimi, (d) Ortalama arpma kuvvetinin değişimi

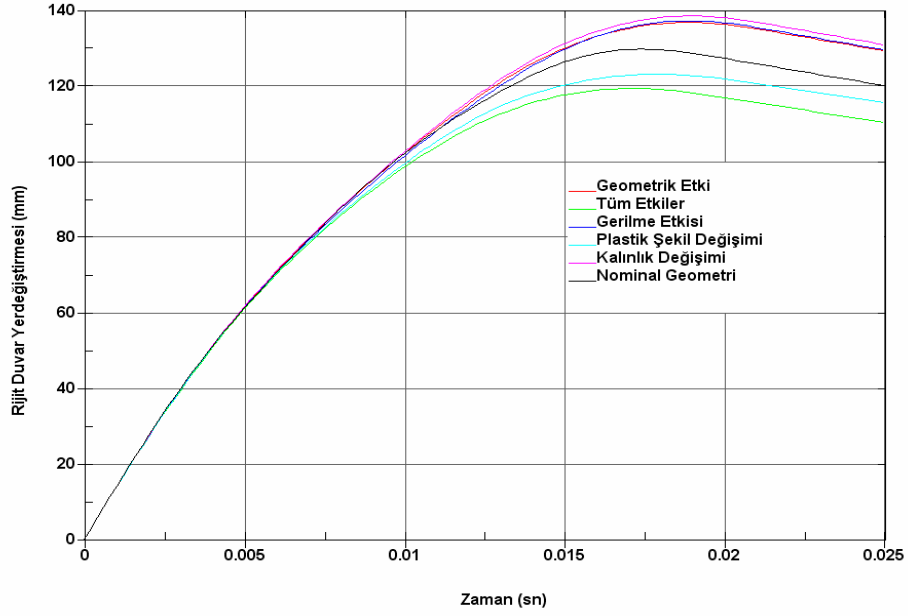
Şekil 3.3'ün devamı;



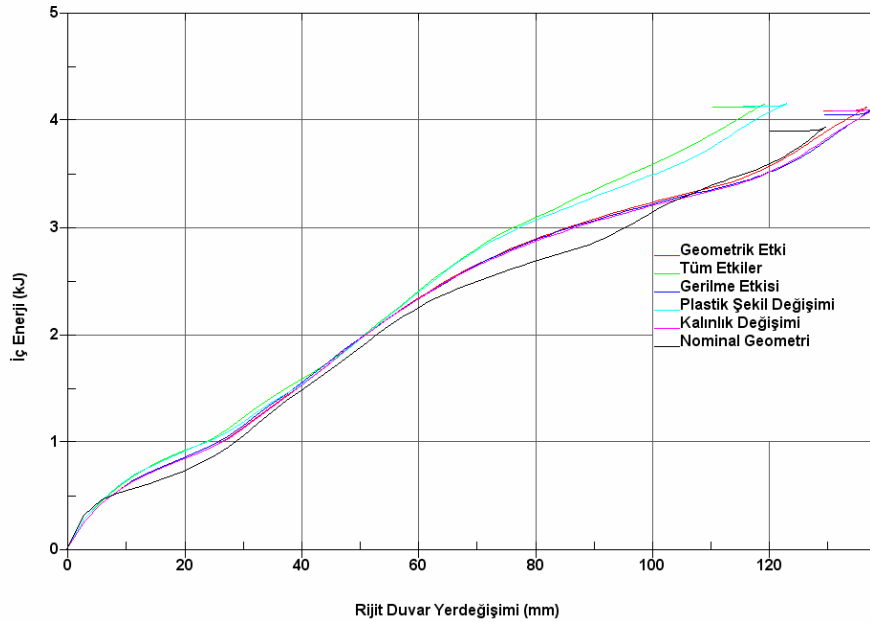
(c)



(d)



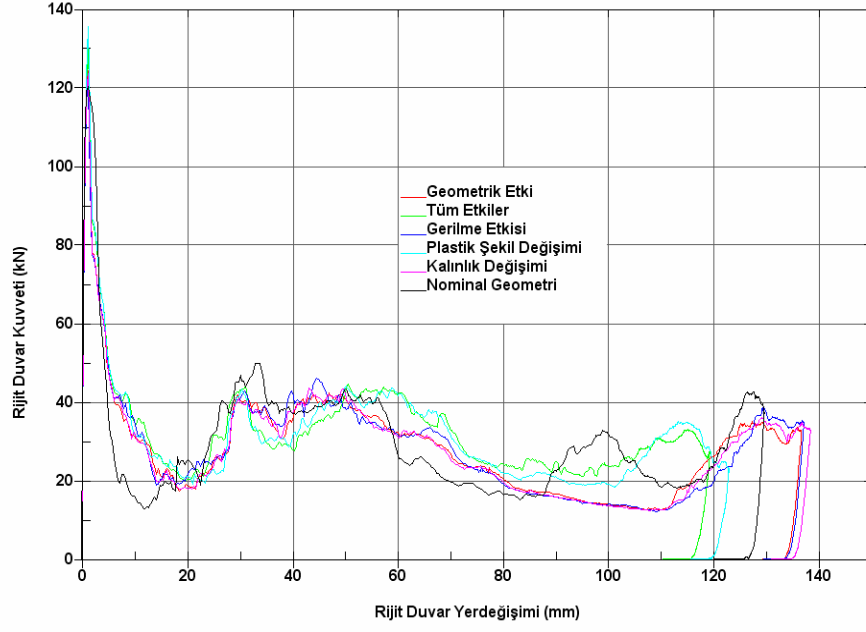
(a)



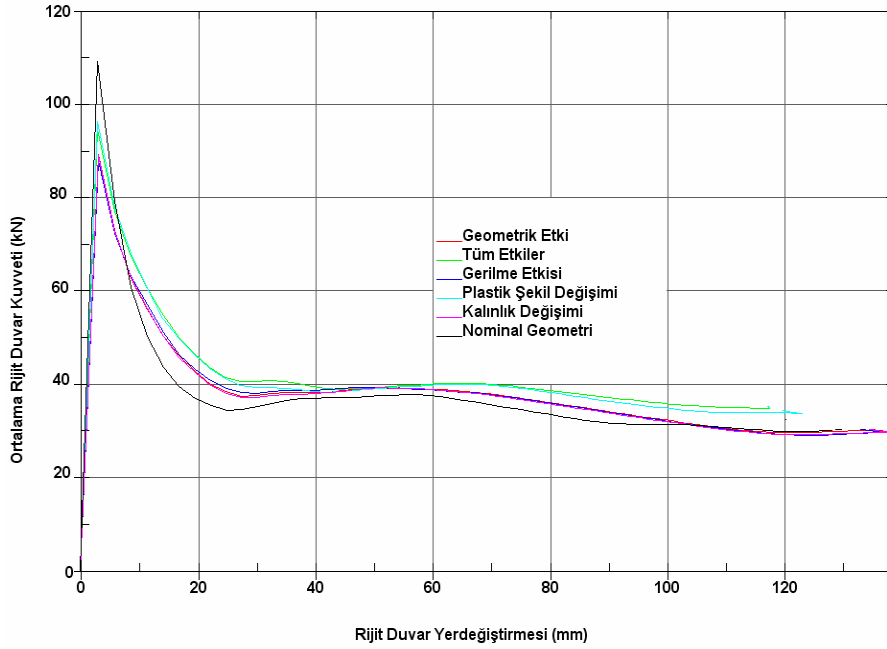
(b)

Şekil 3.4. 200 kN baskı plakası yükü ile şekil verilen 1 mm kalınlıklı parçada, (a) Rijit duvarın zamanla yaptığı yer değiştirme, (b) İç enerji değişimi, (c) Rijit duvarda oluşan reaksiyon kuvvetinin rijit duvar yer değiştirmesi ile değişimi, (d) Ortalama çarpma kuvvetinin değişimi

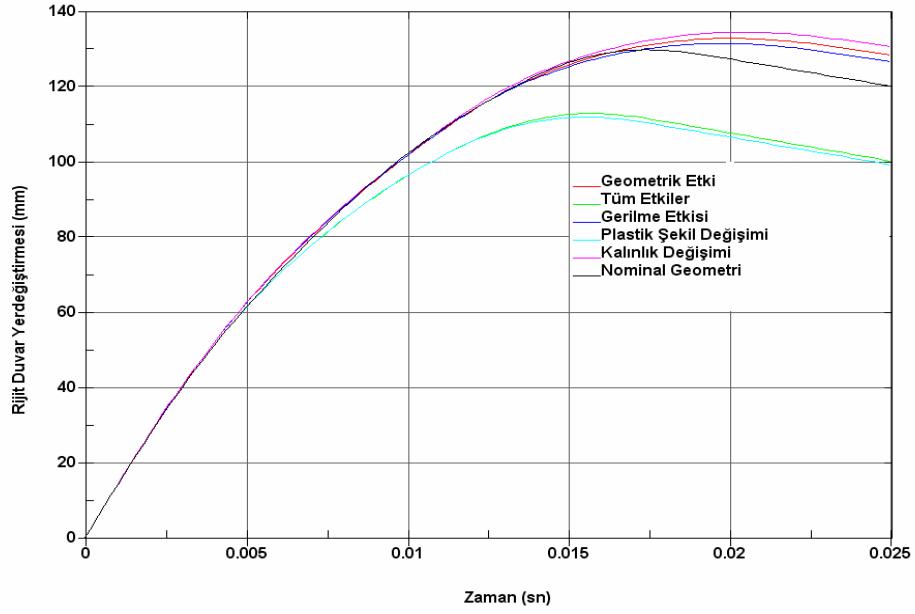
Şekil 3.4'ün devamı;



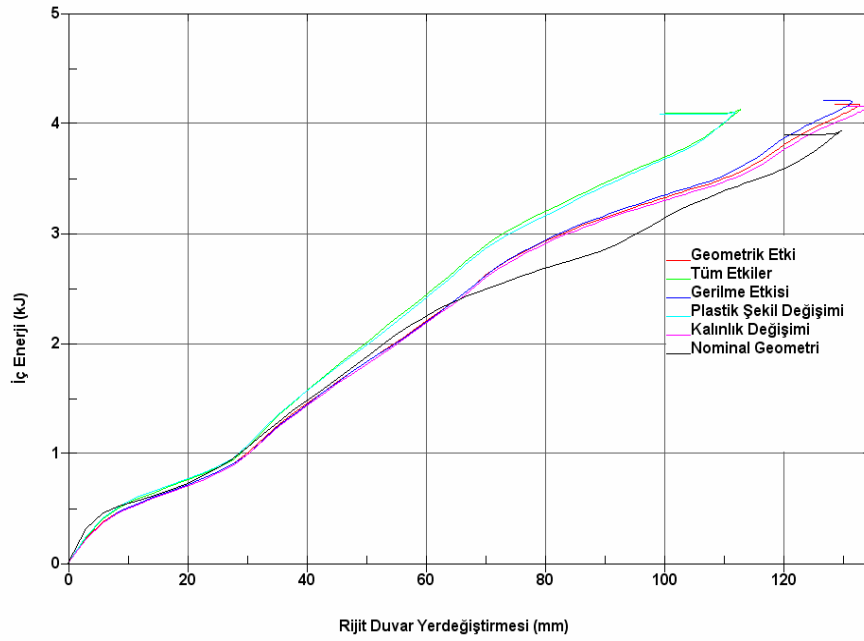
(c)



(d)



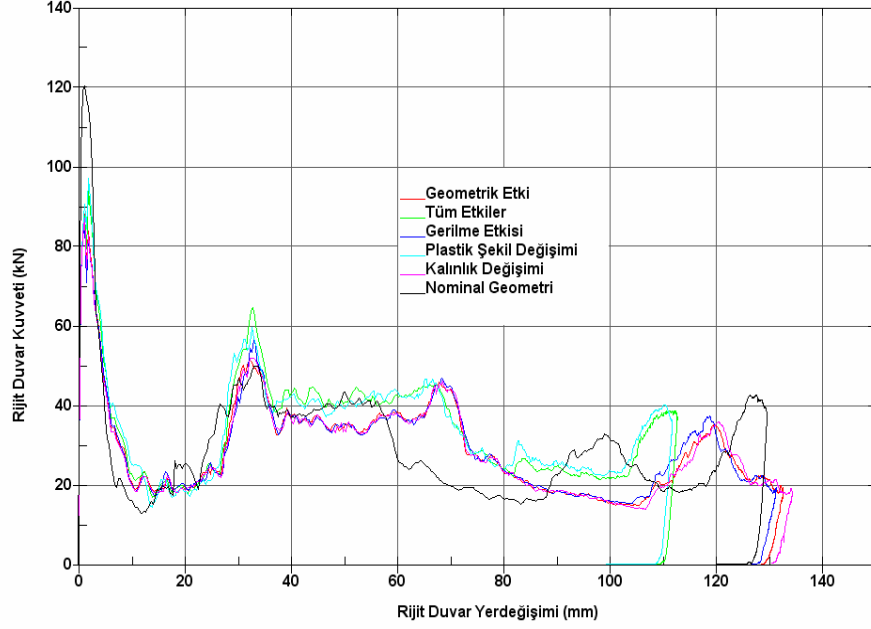
(a)



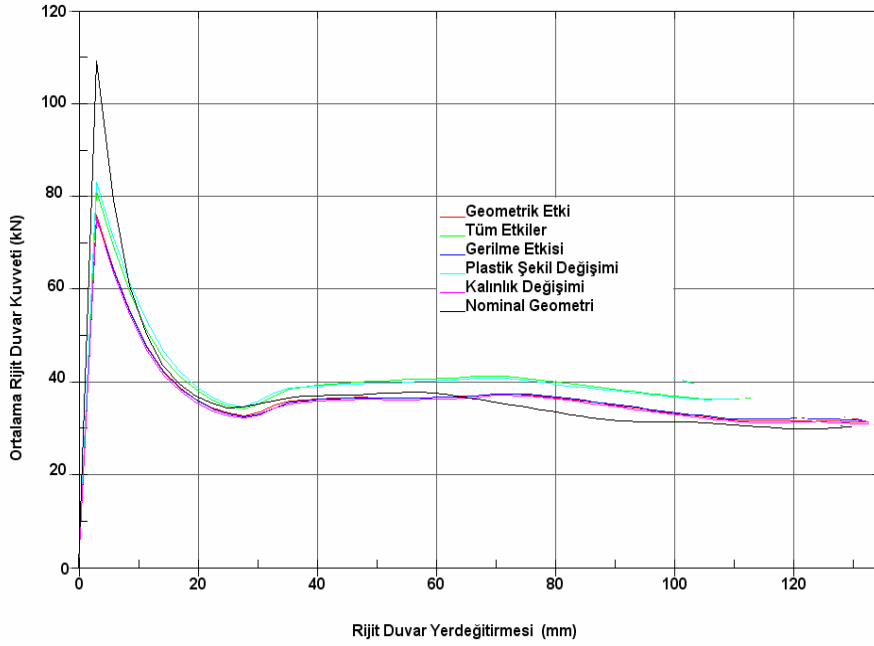
(b)

Şekil 3.5. 600 kN baskı plakası yükü ile şekil verilen 1 mm kalınlıklı parçada, (a) Rijit duvarın zamanla yaptığı yer değiştirme, (b) İç enerji değişimi, (c) Rijit duvarda oluşan reaksiyon kuvvetinin rijit duvar yer değiştirmesi ile değişimi, (d) Ortalama çarpma kuvvetinin değişimi

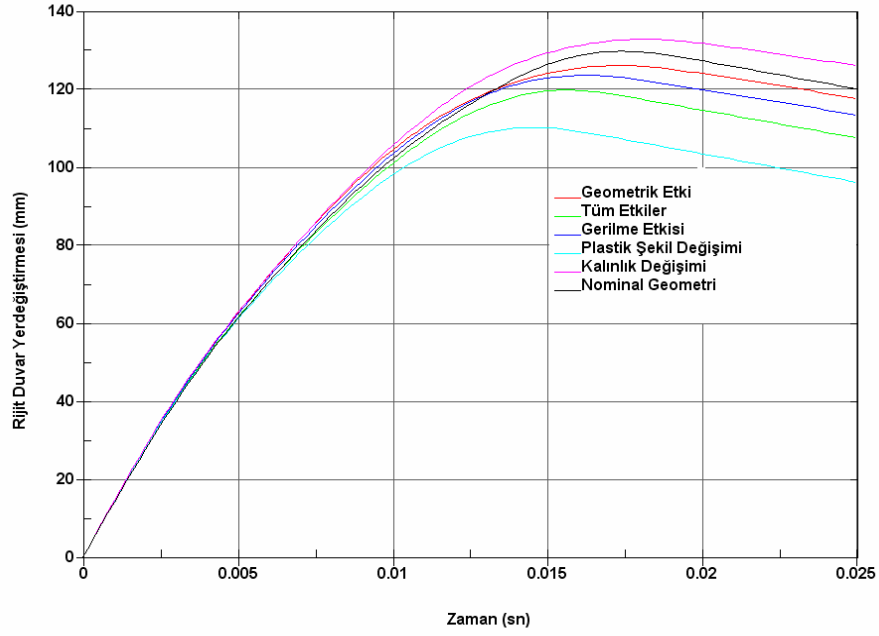
Şekil 3.5'in devamı;



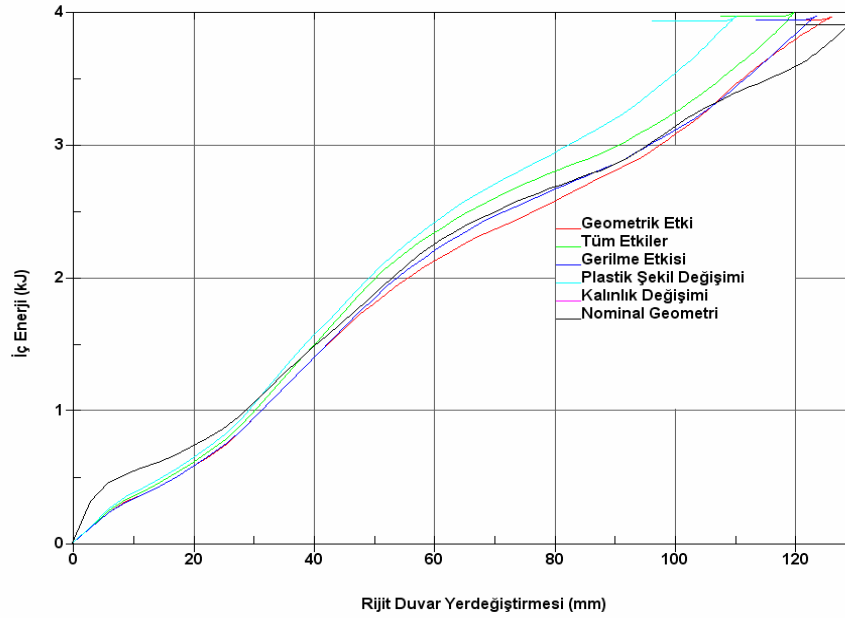
(c)



(d)



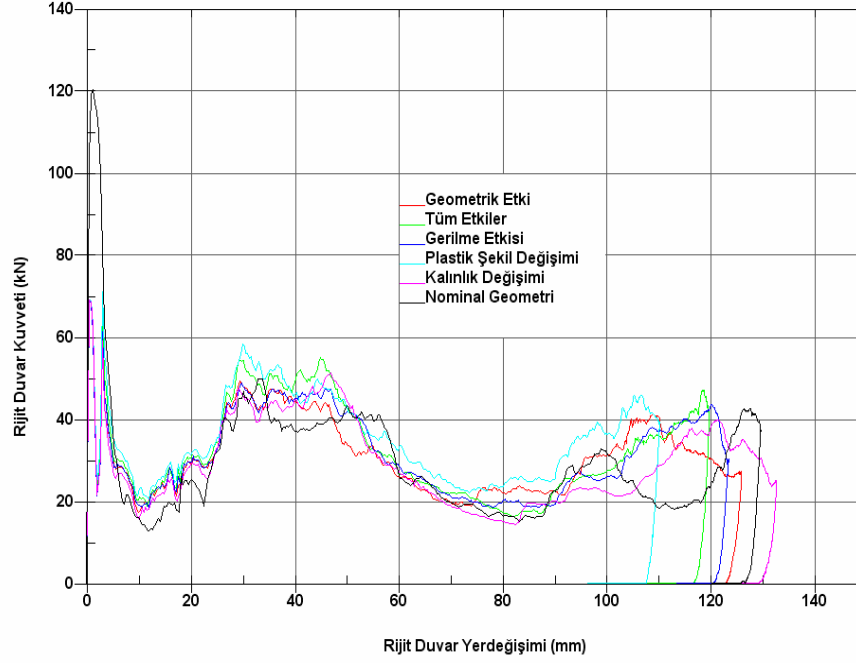
(a)



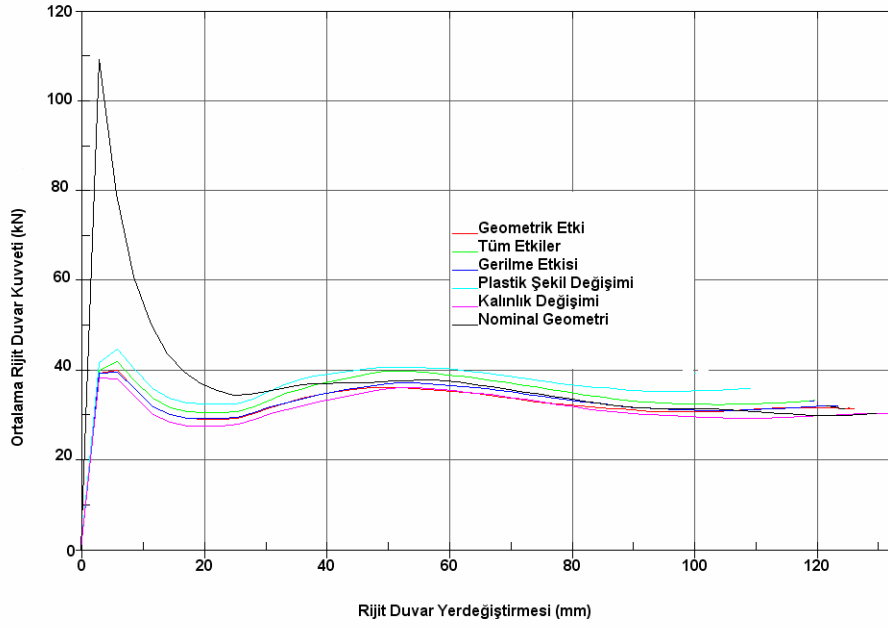
(b)

Şekil 3.6. 1000 kN baskı plakası yükü ile Şekil verilen 1 mm kalınlıklı parçada, (a) Rijit duvarın zamanla yaptığı yer değiştirme, (b) İ enerji değişimi, (c) Rijit duvarda oluşan reaksiyon kuvvetinin rijit duvar yer değiştirmesi ile değişimi, (d) Ortalama arpma kuvvetinin değişimi

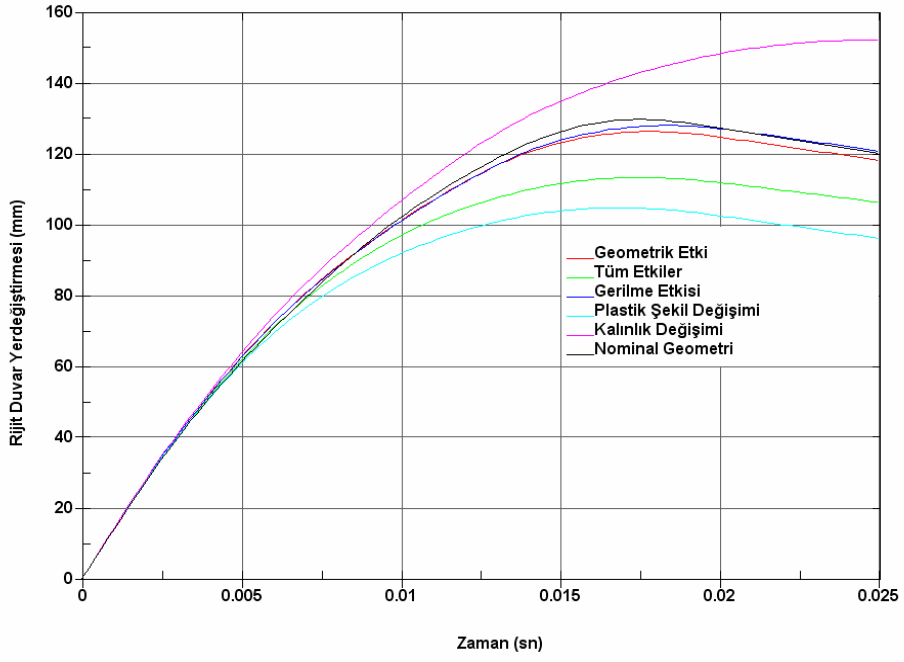
Şekil 3.6' nın devamı;



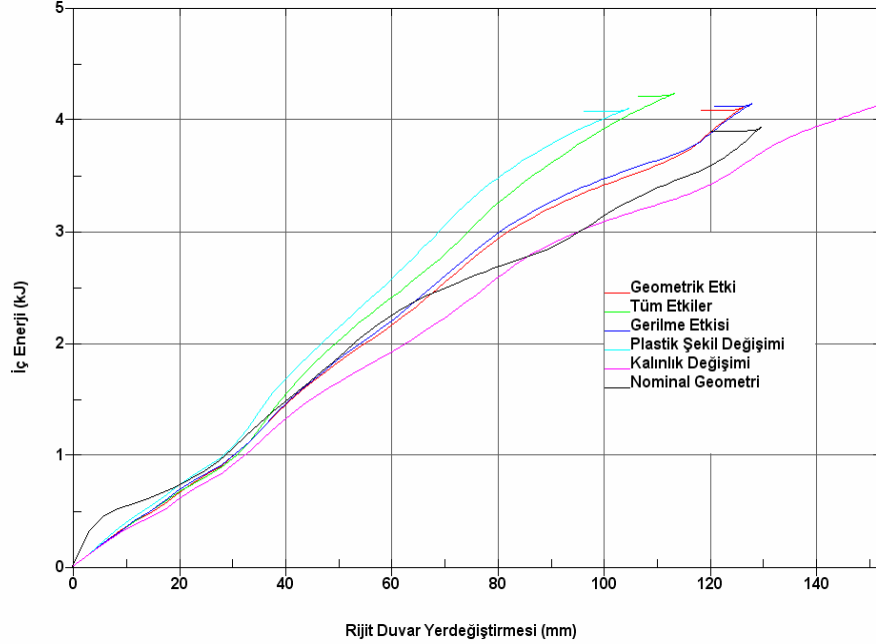
(c)



(d)



(a)

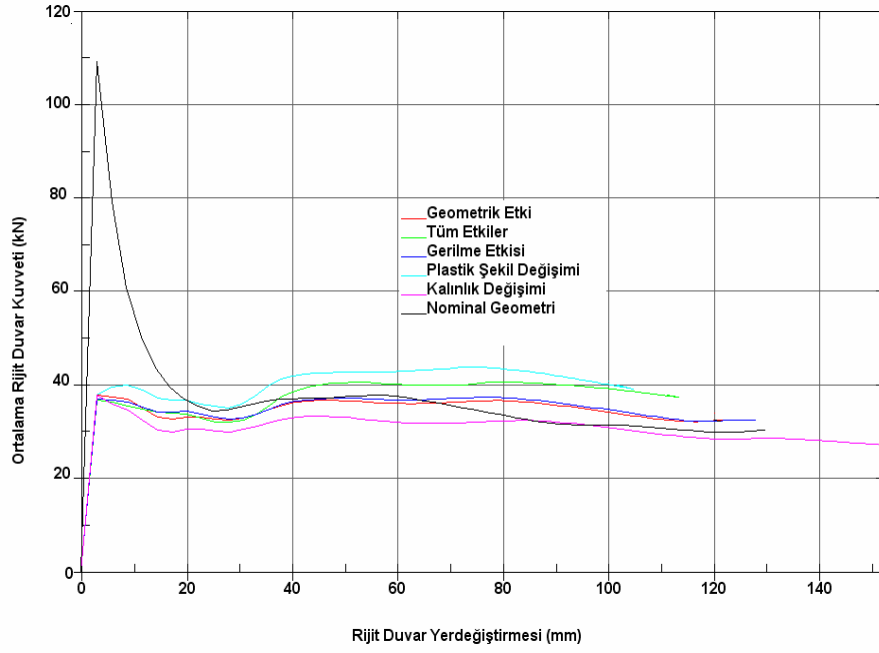
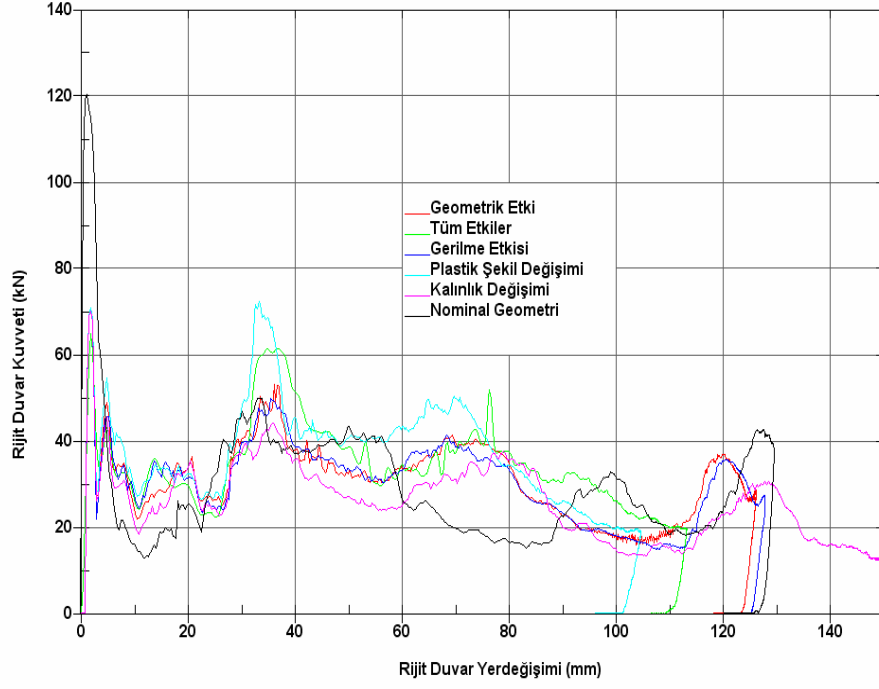


(b)

Şekil 3.7. 1300 kN baskı plakası yükü ile şekil verilen 1 mm kalınlıklı parçada, (a) Rijit duvarın zamanla yaptığı yer değiştirme, (b) İç enerji değişimi, (c) Rijit duvarda oluşan reaksiyon kuvvetinin rijit duvar

yer değiştirmesi ile değişimi, (d) Ortalama arpma kuvvetinin değişimi

şekil 3.7'nin devamı;



(d)

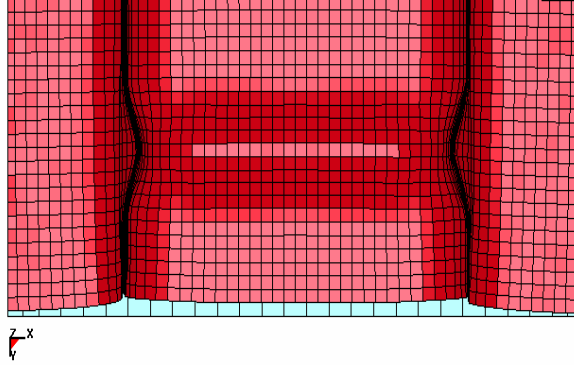
Yukarıda verilen analiz sonuçlarına bakıldığında şekil verme etkilerinin her birinin parçanın çarpma performansını önemli derecede etkilediği görülmektedir. Rijit duvar yer değiştirmesi açısından, Şekil 3.3-Şekil 3.7 arasındaki grafiklerde iki şekil verme etkisinin etkin olduğu ortaya çıkmaktadır. Bunlardan ilki plastik şekil değişiminin etkisi, ikincisi ise kalınlık değişiminin etkisidir. Yalnız plastik şekil değişimini içeren modellerle gerçekleştirilen analizlerde parçanın, hiçbir şekil verme etkisini içermeyen nominal geometrisinin esas alınarak yapılan çarpma analizleri sonuçlarına göre daha az aksenal rijit duvar hareketine izin verdiği görülmektedir. Yani plastik şekil değişiminin dikkate alınmasının parçanın daha rijit davranmasına yol açtığı söylenebilir. Bunun aksine yalnız kalınlık değişiminin dikkate alındığı durumda ise parçanın davranışının zayıfladığı ve daha fazla rijit duvar yer değiştirmesinin meydana geldiği görülmektedir. Yalnız gerilme etkisinin esas alındığı durumda ise parçanın davranışının geometrik etki olarak adlandırılan deforme olmuş (üzerinde herhangi bir artık şekil verme etkisi olmayan) geometri ile yapılan çarpma analizlerinde elde edilen sonuçlara yakın değerler verdiği tespit edilmiştir. Buradan da görüleceği gibi seçilen malzeme, imalat şekli ve yükleme durumunda artık gerilmelerin çarpmaya etkisi diğer şekil verme etkileri kadar olmamaktadır. Dutton'un yaptığı çalışmada da buna benzer bir sonuca varılmıştır [4]. Dutton'un çalışmasında plastik şekil değişiminin parçanın rijitliğini arttırdığı, artık gerilmelerin parçanın çarpma davranışına hemen hemen hiç etkisinin bulunmadığı görülmüştür. Bu sebeple literatürde yapılan pek çok çalışmada gerilmeler çarpma modeline aktarılmadan çarpma analizleri yapılmaktadır. Tüm şekil verme etkilerinin birlikte dikkate alındığı durumda rijit duvarın yer değişimi miktarının, analize yalnız plastik şekil değişiminin aktarıldığı durumdan biraz daha fazla olduğu görülmektedir. Bunun nedeni plastik şekil değişimlerinin etkisi ile parça şekil verme etkilerini içermeyen parçaya göre daha rijit davranırken, kalınlık incelmeleri dikkate alındığında parçanın rijitliğinin biraz azalmasıdır. Deforme olmuş geometri ile yapılan geometrik etki adını verdiğimiz analizlerde parçanın nominal geometriye göre rijitliğinin düştüğü görülmektedir. Bu durumun geri yaylanma analizi sebebiyle oluşan elastik deformasyonlardan kaynaklandığı söylenebilir. Bu bölümde elde edilen sonuçlar Aleksandra [27], Dagson [37] ve Dutton'un [4] şapka kesitli kanallar için yaptıkları çalışmalarda buldukları sonuçlar, bu tez çalışmasında plastik şekil değişimi, kalınlık değişimi ve artık gerilmelerin çarpma üzerine bulunan sonuçlarıyla oldukça örtüşmektedir.

Bu tez çalışmasında incelenmeye çalışılan konulardan birisi de baskı plakası yükünün değişmesi ile oluşan artık şekil verme etkilerindeki değişimlerin parçanın çarpma davranışını nasıl etkilediğidir. Baskı plakası yükünün artması ile rijit duvar yer değişiminin zamana göre değişimini veren grafiklerde, plastik şekil değişimini esas alan model ve kalınlık değişimini esas alan modellenin verdiği rijit duvar yer değiştirmeleri arasındaki fark, beklenildiği gibi artmaktadır. Çünkü baskı plakası yükü arttıkça plastik şekil değişimi artmaktadır. Plastik şekil değişiminin artması ile parçada daha fazla sertleşme ve mukavemet artışı olmakta iken kalınlık incelmelerinin (Şekil 3.1a) artışı ile de parçanın rijitliği düşmektedir. Ayrıca düşük baskı plakası yüklerinde, göreceli olarak daha az plastik şekil verme ve kalınlık incelmeleri oluşması sebebiyle, plastik şekil verme ile tüm etkileri içeren modellere ait eğriler ile kalınlık değişimi ve geometrik etkiyi içeren modellere ait eğriler birbirlerine yakın oldukları görülmektedir. Burada dikkat çeken bir diğer sonuçta yük arttıkça, örneğin 1000 ve 1300 kN için, geometrik etkiyi içeren modele ait rijit duvar yer değiştirme eğrisinin nominal geometriyi esas alan modele ait eğriye yakınlaşmasıdır. Bu durum yüksek baskı plakası yükü ile derin çekme işlemi esnasında parçada daha fazla plastik şekil değişimlerinin meydana gelmesinden kaynaklanmaktadır. Çünkü yüksek plastik şekil değişimleri, geri yaylanma esnasında çok daha az elastik deformasyonların oluşmasına sebep olmaktadır [21]. Bu yüzden parçanın nominal ölçülerden sapması daha düşük düzeyde kalmaktadır.

İç enerji, yani sönmölenen enerjinin rijit duvar yer değiştirmesi ile ilgili değişimini veren grafiklere bakıldığında (Şekil 3.3b, Şekil 3.4b, Şekil 3.5b, Şekil 3.6b ve Şekil 3.7b), aynı miktarda rijit duvar yer değiştirmesi için plastik şekil değişimi ve tüm etkilerin içerildiği durumlarda en fazla, kalınlık değişimini esas alan modelde ise en az enerjinin sönmölediği görülmektedir. Diğer etkilerin göz önüne alındığı analiz sonuçları birbirlerine yakın davranışlar sergilemektedir.

Rijit duvar kuvveti ve ortalama çarpma kuvvetinin, rijit duvarla yer değişimini veren grafiklerde maksimum çarpma kuvvetleri, çarpma olayının başlangıç anında meydana gelmektedir. Çünkü rijit duvarın parçaya temas ettiği ilk anda, yanal yüzeylerin ataleti sebebiyle çarpma kuvveti yüksek olmaktadır [13]. Beklenildiği gibi plastik şekil değişiminin dikkate alındığı durumda maksimum çarpma kuvvetinin en yüksek olduğu görülmektedir. Kalınlık değişiminin dikkate alındığı durumda ise çarpma kuvveti nispeten daha düşük olmaktadır. Şekil 3.3-Şekil 3.7 arasındaki çarpma kuvveti grafiklerinde, baskı plakası yükünün artması ile maksimum çarpma kuvveti iki farklı davranış göstermektedir.

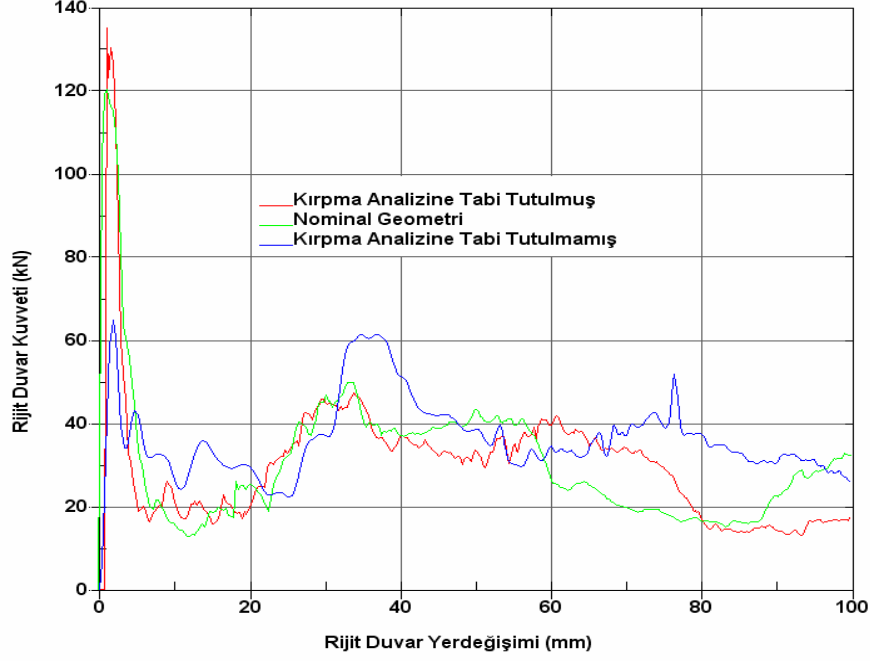
50 ve 200 kN gibi göreceli olarak düşük baskı plakası yüklerinde, şekil verme etkilerinin her biri için, maksimum çarpma kuvveti değeri nominal geometrinin esas alındığı modelin verdiği değere çok yakın ve üstünde iken (Şekil 3.3c ve Şekil 3.4c), 600 kN baskı plakası yükü ve daha büyük yüklerde nominal geometrinin dikkate alındığı durumdakinden daha düşük değerler vermektedir. Ayrıca, Şekil 3.6c’de de açıkça görüldüğü gibi, maksimum çarpma kuvveti iki uç (pik) değere ulaşmaktadır. Bu da maksimum çarpma kuvveti ve ortalama çarpma kuvveti değerlerinin, başlangıçta, nominal geometriye göre daha düşük olmasına sebep olmaktadır. Bu durum şu şekilde açıklanabilir; yüksek baskı plakası yükü ile yapılan derin çekme analizlerinde kanalın boyu, Şekil 3.8’de görüldüğü gibi, kapağa göre biraz kısalmaktadır. Çarpma anında, rijit duvar önce kapağa çarpmakta ve ardından kapak deformasyona uğradıktan sonra kanala çarpmaktadır. Bu da maksimum çarpma kuvvetinin düşmesine ve birbirine yakın iki uç değeri yapmasına sebep olmaktadır. Buradan kapağın kanala göre biraz daha kısa yapılmasının veya çarpmanın parça eksenine göre açılı olmasının maksimum çarpma kuvvetinin düşmesine neden olabileceği sonucuna varılabilir.



Şekil 3.8. 1300 kN baskı plakası yükü ile şekillendirilen parçada kanal ve kapak arasında meydana gelen boy farkı

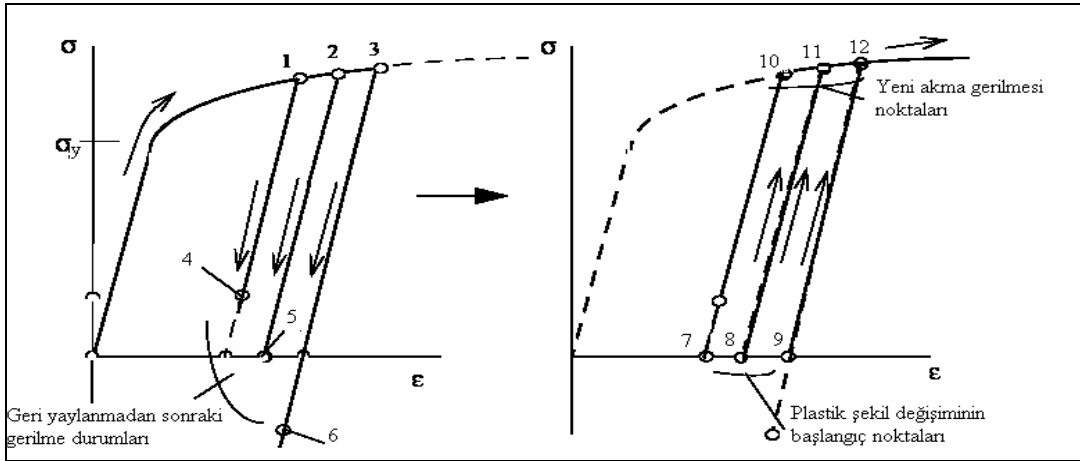
Yüksek baskı plakası yükü ile şekil verilen parçalar için yapılan çarpma analizlerinde, maksimum çarpma kuvvetindeki düşüşü daha iyi anlamak için ilave çarpma analizleri gerçekleştirilmiştir. Çarpma gerçekleştirilmeden önce derin çekme analizinden sonra parçanın kenarları yanında ön ve arka ucunda 5 mm mesafede kırpmalı analizi gerçekleştirilmiştir. Ardından tüm şekil verme etkileri modele yüklenerek çarpma analizi tekrarlanmıştır. Nominal geometriye sahip parça, uçları kırpmalı analizine tabi tutulmuş parça ve kırpmalı analizine tabi tutulmamış parçalara ait rijit duvar yer değiştirmesine göre rijit duvar çarpma kuvvetinin değişimi Şekil 3.9’da görülmektedir. Şekilde de görüldüğü

gibi şekil verme etkilerini içeren kırılmış parçada maksimum çarpma kuvveti nominal geometriye sahip modeldekinden daha yüksek çıkmaktadır.



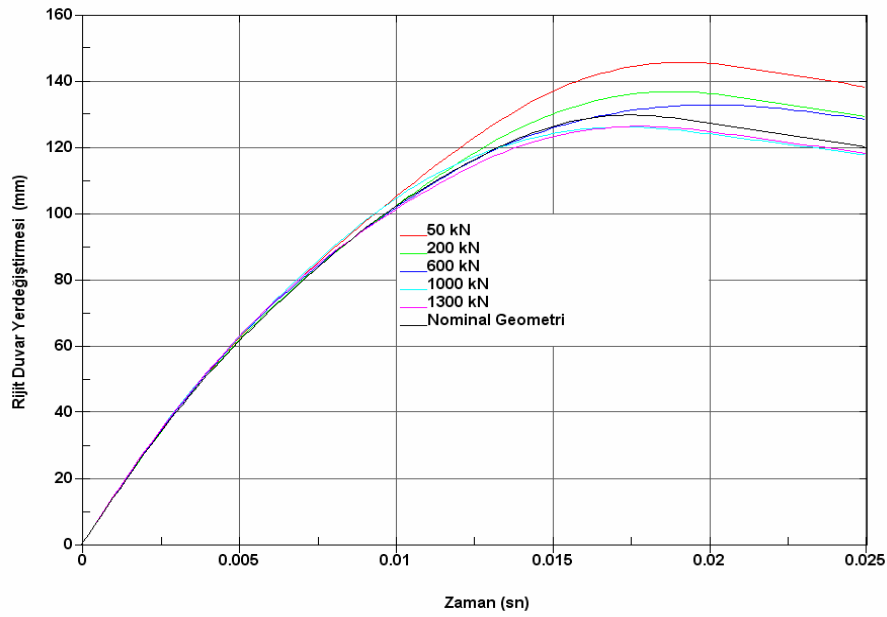
Şekil 3.9. Yüksek baskı plakası yükü sebebiyle parçanın boyunda oluşan kısalmanın maksimum çarpma kuvvetine etkisi

Yukarıda değinilen analiz sonuçlarından plastik şekil değiştirmenin parçanın çarpma performansı üzerine önemli derecede etkisi bulunduğu görülmüştür. Yalnızca plastik şekil değişimi etkisinin parçaya aktarılması durumunda parçanın mukavemet artışı Şekil 3.10 yardımıyla açıklanabilir. Şekilde görüldüğü gibi şekil verme işlemi esnasında parçada 1,2,3 noktaları ile belirtilen gerilme değerleri oluştuğu kabul edilsin. Geri yaylanma analizinden sonra gerilme değerleri 4,5,6 noktalarına hareket edecektir. Buradan yalnızca efektif plastik şekil değişimleri çarpma modeline aktarılırsa gerilme ve plastik şekil değişiminin başlangıç pozisyonu 7,8,9 noktaları olacaktır. Çarpma anında parça yüklendikçe gerilme durumu elastik bölge eğrisine paralel artış yaparak 10,11,12 noktalarına ulaşacaktır. Yani parçanın yeni akma gerilme değerleri 10, 11 ve 12 noktaları olacaktır. Bu noktalar malzemenin başlangıç akma gerilmesi değerinden yüksek olduğu için parçada pekleşme (strain hardening) nedeniyle mukavemet artışı olacaktır.

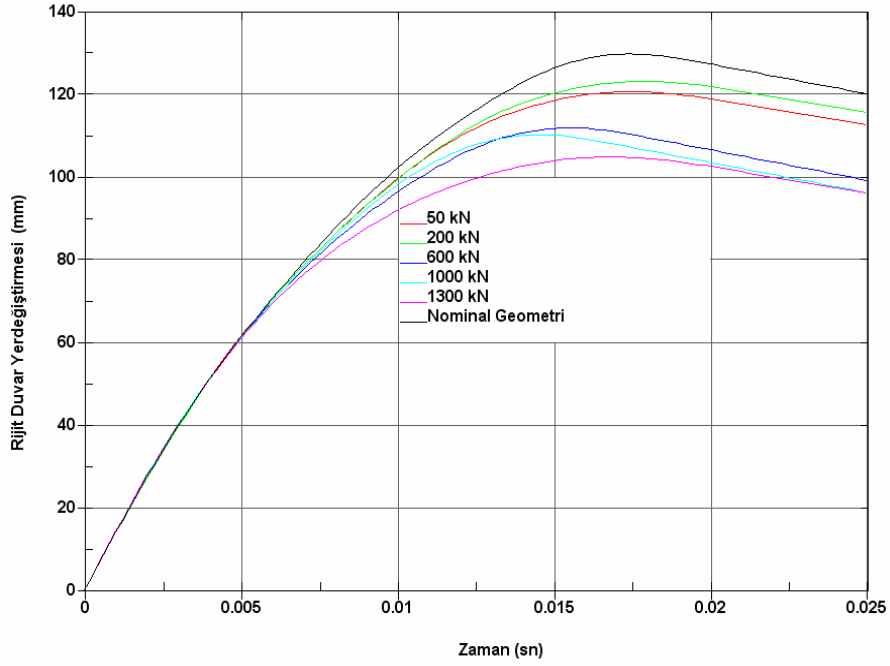


Şekil 3.10. Plastik şekil değişiminin çarpmaya etkisi

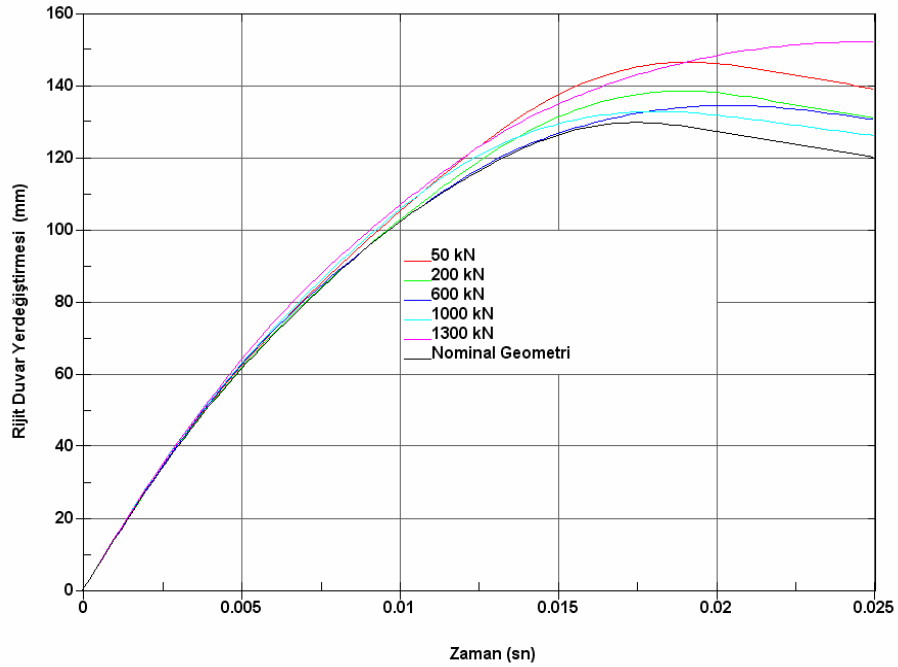
Şekil 3.11-Şekil 3.14 arasında, 1 mm kalınlıklı parçada her bir baskı plakası yükü için çarpma performanslarının rijit duvar yer değiştirmesi açısından bir birleriyle karşılaştırıldığı grafikler verilmektedir. Şekil 3.11’de her bir baskı plakası yükünde elde edilen geometrik etkiler, Şekil 3.12’de her bir baskı plakası yükü için plastik şekil değişimi etkileri, Şekil 3.13’de kalınlık değişimlerinin etkileri ve Şekil 3.14’de de her bir baskı plakası yükü için elde edilen tüm etkiler açısından rijit duvar yer değiştirme eğrileri karşılaştırılmaktadır.



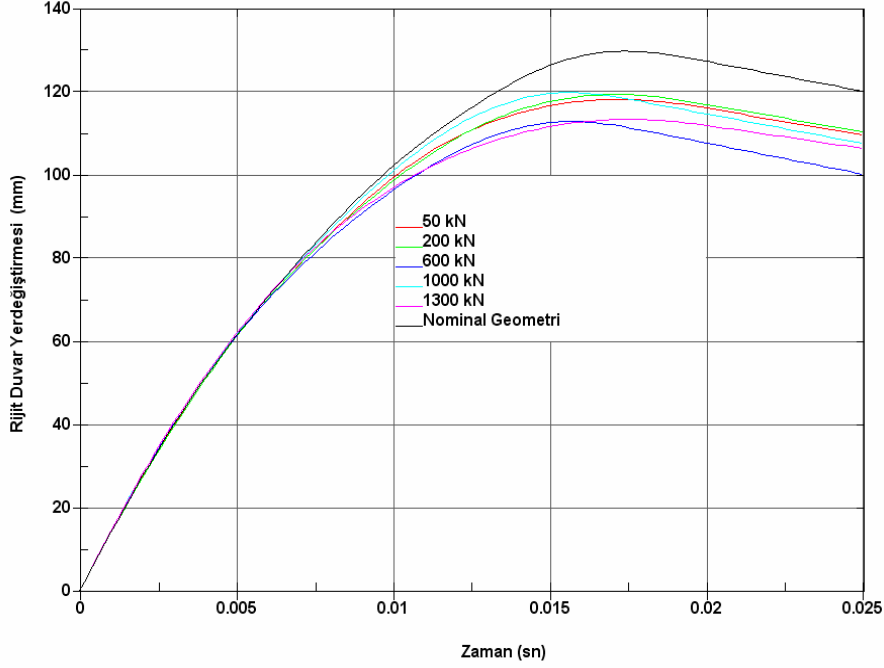
Şekil 3.11. Çarpma analizlerinde 1 mm kalınlıklı parçada tüm baskı plakası yüklemeleri için elde edilen geometrik etkilerin rijit duvar yer değiştirmesi bakımından karşılaştırılması



Şekil 3.12. Çarpma analizlerinde 1 mm kalınlıklı parçada tüm baskı plakası yüklemeleri için elde edilen plastik şekil verme etkilerinin rijit duvar yer değiştirmesi bakımından karşılaştırılması



Şekil 3.13. Çarpma analizlerinde 1 mm kalınlıklı parçada tüm baskı plakası yüklemeleri için elde edilen kalınlık değişimi etkilerinin rijit duvar yer değiştirmesi bakımından karşılaştırılması



Şekil 3.14. Çarpma analizlerinde 1 mm kalınlıklı parçada tüm baskı plakası yüklemeleri için elde edilen tüm şekil verme etkilerinin içerildiği durumların rijit duvar yer değiştirmesi bakımından karşılaştırılması

Şekil 3.11'de geometrik etkinin baskı plakası yükü arttıkça daha az rijit duvar yer değiştirmesine neden olduğu ve nominal geometrinin yaptığı rijit duvar yer değiştirmesine yakın davranış sergilediği görülmektedir. Şekil 3.12'de yalnız plastik şekil değişiminin içerildiği durumda, baskı plakası yükünün artması ile rijit duvar yer değiştirmesinin azaldığı görülmektedir. Çünkü baskı plakası yükünün artması ile plastik şekil değişimleri artmakta ve bunun sonucunda, yukarıda açıklandığı gibi, (Şekil 3.10) malzemenin mukavemeti artmaktadır. Şekil 3.13'de kalınlık değişimlerinin içerildiği durumda 1300 kN'luk baskı plakası yüküne kadar rijit duvar yer değiştirmesi düşmekte ve 1300 kN için en fazla rijit duvar yer değiştirmesine izin vermektedir. Bu durum şu şekilde açıklanabilir; 1300 kN'luk yüklemeye kadar parçanın mukavemetini düşürecek boyutta kalınlık incilmesi meydana gelememektedir. Bu yüzden parça geometrik etkiye paralel davranış sergilemektedir. 1300 kN yüklemeye aşırı kalınlık incilmesi sebebiyle parçada mukavemet düşüşü oluşmaktadır. Şekil 3.14'de ise tüm etkilerin içerildiği durumda rijit duvar yer değiştirmesi, genelde, tüm baskı plakası yüklemeleri için fazla bir değişim göstermemektedir.

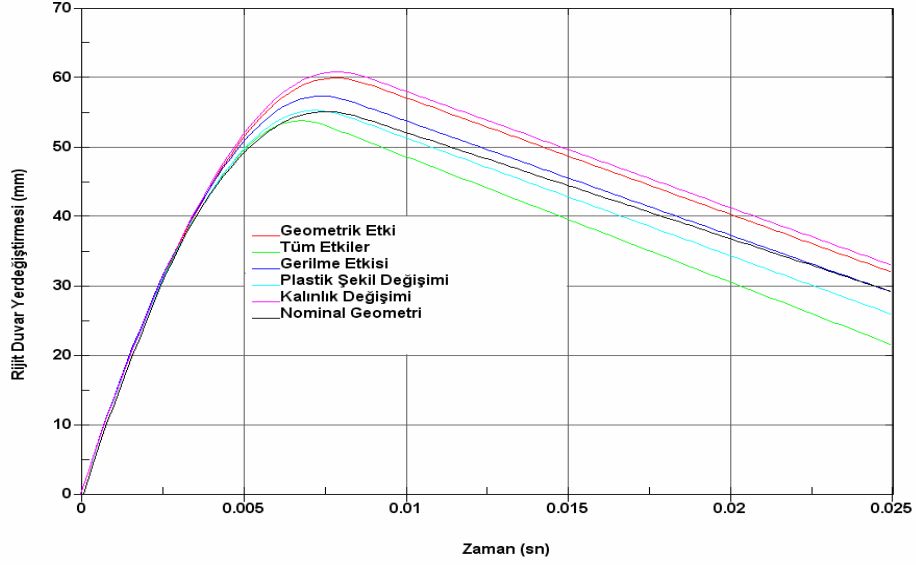
1.5 ve 2 mm kalınlıklı parçalar için farklı baskı plakası yükleri altında elde edilen şekil verme etkileri esas alınarak gerçekleştirilen çarpma analizlerinden elde edilen rijit duvarın yaptığı aksenal yer değiştirmelerinin zamanla değişimi, iç enerji değişimlerinin rijit duvar yer değiştirmesi ile değişimi, çarpma kuvveti ve ortalama çarpma kuvvetlerin rijit duvar yer değiştirmesi ile değişimlerini gösteren sonuçlar Şekil 3.15-Şekil 3.20'de sırasıyla verilmektedir. Şekil 3.15a, Şekil 3.16a ve Şekil 3.17a'da görüldüğü gibi 1.5 mm kalınlıklı parça için 35 kg kütle ve 15 m/s'lik çarpma hızına sahip rijit duvar için aksenal yer değiştirme 60 mm civarında oluşmaktadır. Bu değer, aynı koşullarda, 2 mm kalınlıklı parça için 40 mm civarında gerçekleşmektedir (Şekil 3.18a, Şekil 3.19a, ve Şekil 3.20a). Yine grafiklerde şekil verme etkileri altında rijit duvar yer değiştirmeleri 1 mm kalınlığa benzer davranış sergilemektedir. Plastik şekil değişimini dikkate alan çarpma analizlerinde en az aksenal yer değişimi oluşurken, kalınlık değişimini içerenlerde en fazla yer değişimi meydana geldiği görülmektedir. 1.5 mm kalınlıklı parça için geometrik etki 600 kN yüklemde nominal geometriden çok daha fazla yer değişimi verirken (Şekil 3.15a), 1000 ve 1300 kN yüklemeleri için nominal geometriye yakın bir davranış sergilemektedir (Şekil 3.16a ve Şekil 3.17a).

2 mm kalınlık parça için 600 kN'luk baskı plakası yükünde geometrik etki nominal geometriden daha az rijit duvar yer değiştirmesine izin verirken (Şekil 3.18a), 1000 kN'da hemen hemen aynı yer değiştirmeyi vermektedir (Şekil 3.19a). 1300 kN' da ise nominal geometriden daha fazla rijit duvar yer değiştirmesine izin vermektedir (Şekil 3.20a).

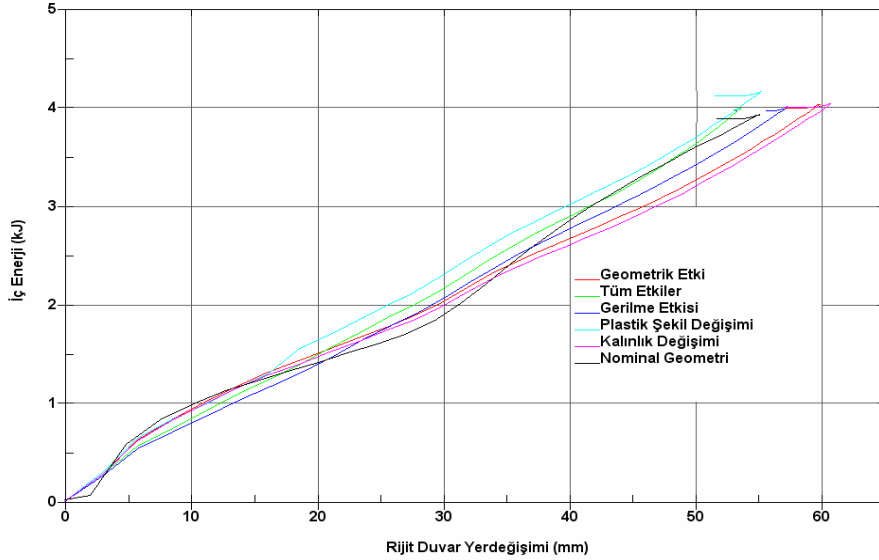
1.5 ve 2 mm kalınlıklı parçalara ait iç enerji–rijit duvar yer değiştirme ilişkisini veren grafiklerde hemen hemen 1 mm kalınlıklı parçada elde edilen eğilimler göze çarpmaktadır. 1.5 mm kalınlık için Şekil 3.15b, Şekil 3.16b, Şekil 3.17b ve 2 mm kalınlıklı parça için Şekil 3.18b, Şekil 3.19b ve Şekil 3.20b'de görüldüğü üzere aynı miktarda yer değiştirme için plastik şekil değişimi en fazla enerjiyi sönmülerken, yalnız kalınlık değişiminin göz önüne alındığı çarpma analizinde en az enerjinin sönmüldüğü görülmektedir. Gerilme etkisi, geometrik etki ve nominal geometri, iç enerji değişimi açısından genel olarak birbirine yakın davranış göstermektedir.

1.5 mm kalınlıklı parçada plastik şekil değişimi etkisi için Şekil 3.15c'de görüldüğü gibi maksimum rijit duvar çarpma kuvveti 600 kN yüklemde en yüksek olmaktadır. Şekil 3.16c ve Şekil 3.17c'de 1000 kN ve 1300 kN yüklemelerinde şekil verme etkilerinden dolayı oluşan maksimum çarpma kuvveti nominal geometriden düşük çıkmakta ve iki pik değer vermektedir. Aynı durum, Şekil 3.18c, Şekil 3.19c ve Şekil 3.20c'de görüldüğü gibi

2 mm kalınlıklı parça için de oluşmaktadır. Ortalama arpma kuvvetine ait grafiklerde hem 1.5 hem de 2 mm kalınlıklı parçalar için, 1 mm kalınlıklı parçada oluşan pik değer daha yüksek olmakta fakat ortalama değerden sapması nispeten dşek olmaktadır. Yani ortalama çarpma kuvveti eğrileri daha düz eğilim sergilemektedir (şekil 3.15d, şekil 3.16d, şekil 3.17d, şekil 3.18d, şekil 3.19d, şekil 3.20d).



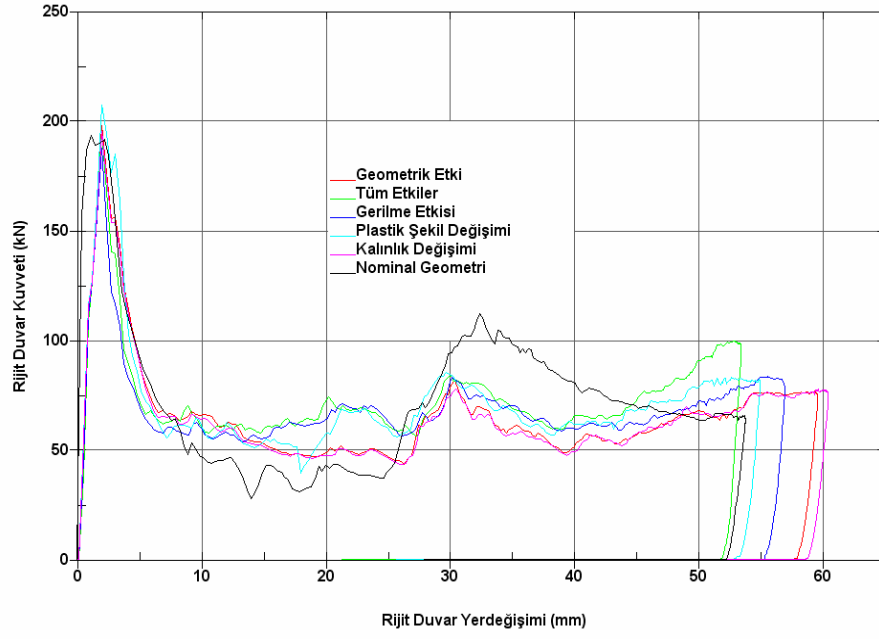
(a)



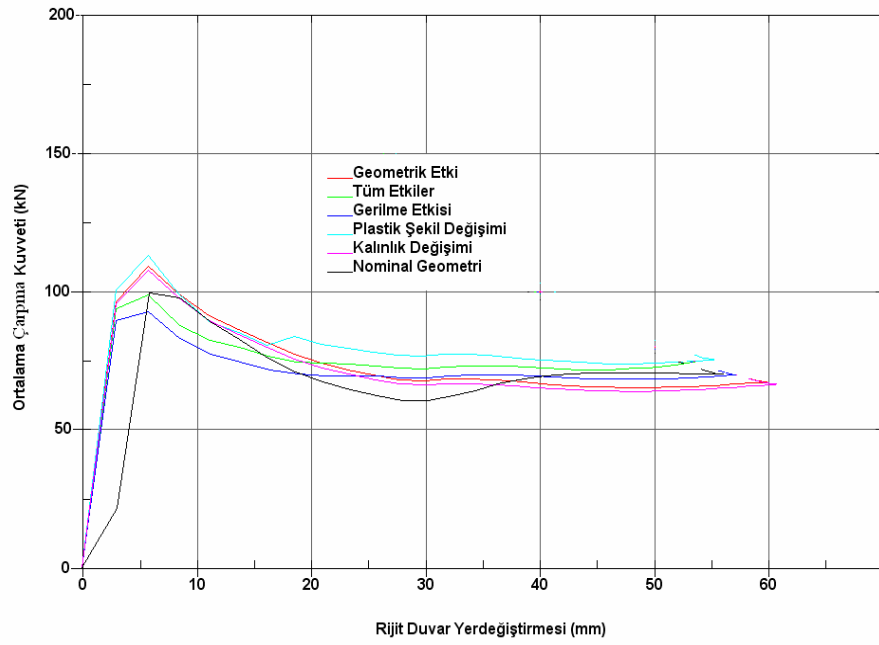
(b)

şekil 3.15. 600 kN baskı plakası yku ile şekil verilen 1.5 mm kalınlıklı parçada, (a) Rijit duvarın zamanla yaptığı yer değişirme, (b) İ enerji değişimi, (c) Rijit duvarda oluşan reaksiyon kuvvetinin rijit duvar yer değişirmesi ile değişimi, (d) Ortalama arpma kuvvetinin değişimi

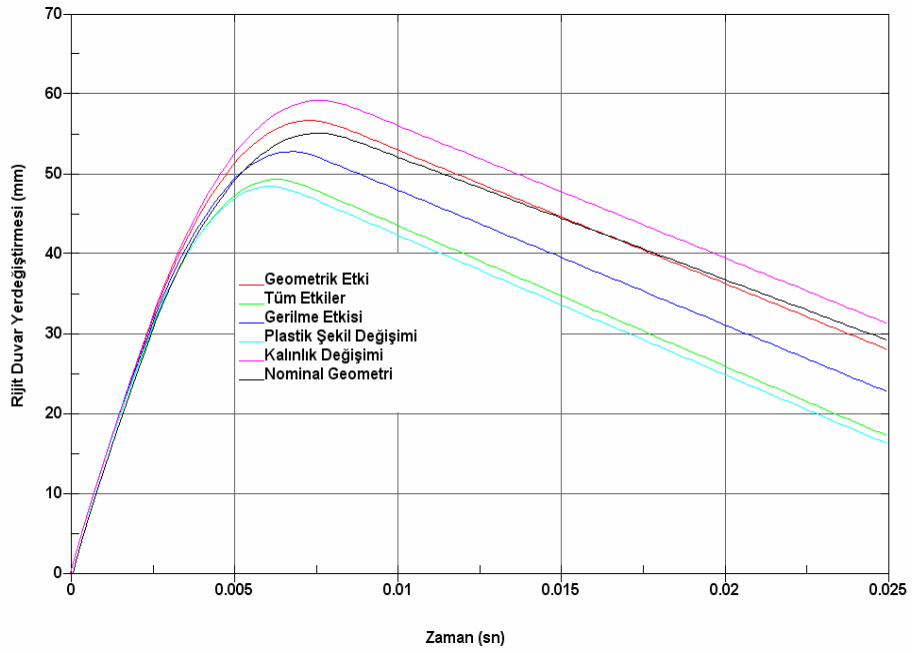
Şekil 3.15'in devamı;



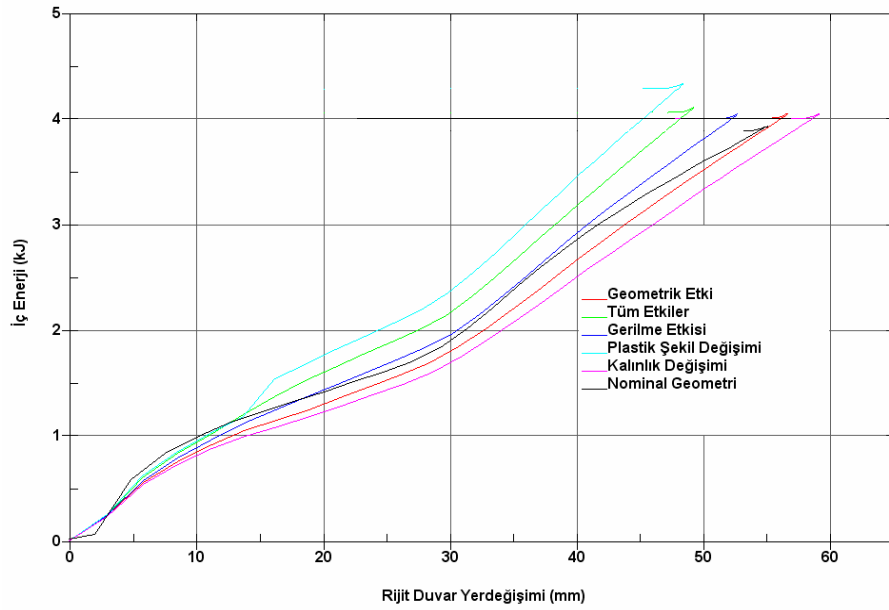
(c)



(d)



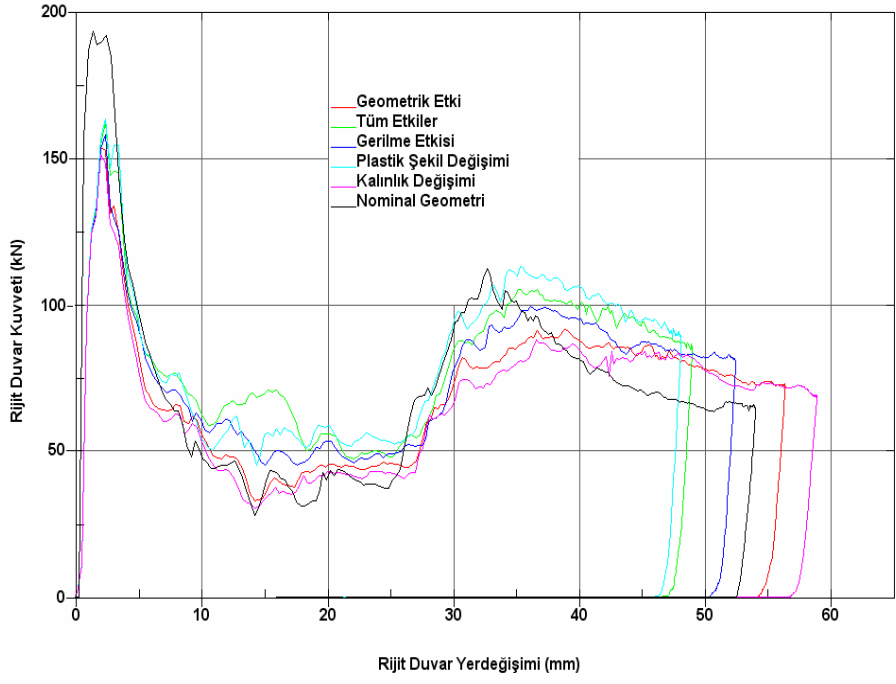
(a)



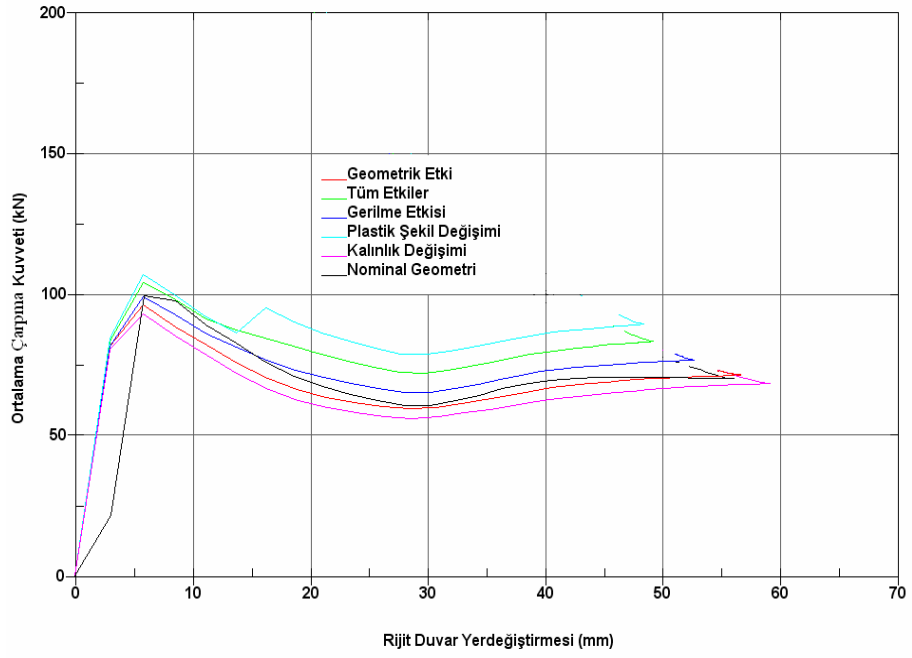
(b)

Şekil 3.16. 1000 kN baskı plakası yükü ile şekil verilen 1.5 mm kalınlıklı parçada, (a) Rijit duvarın zamanla yaptığı yer değiştirme, (b) İç enerji değişimi, (c) Rijit duvarda oluşan reaksiyon kuvvetinin rijit duvar yer değiştirmesi ile değişimi, (d) Ortalama çarpma kuvvetinin değişimi

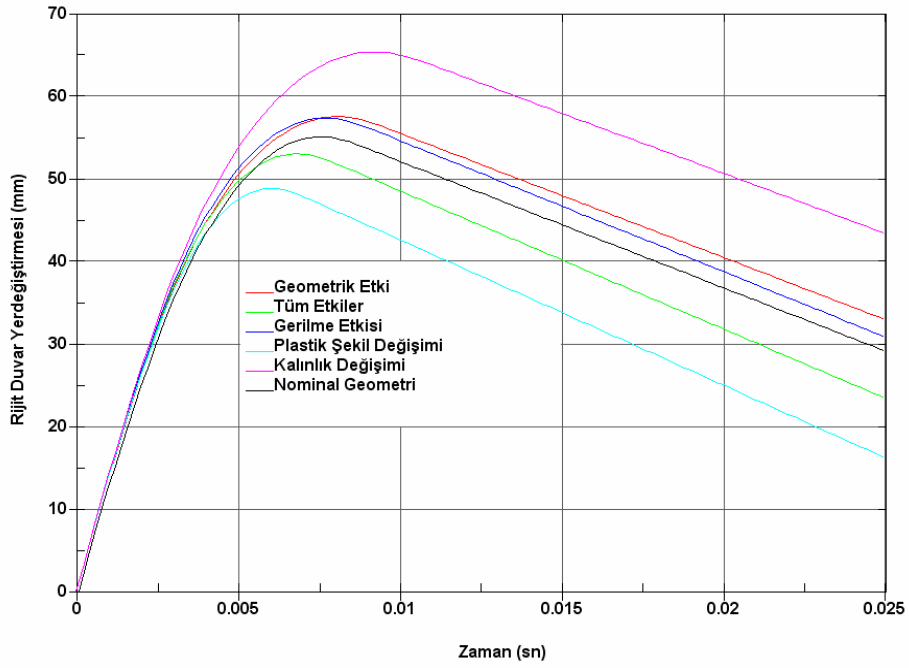
Şekil 3.16'nın devamı;



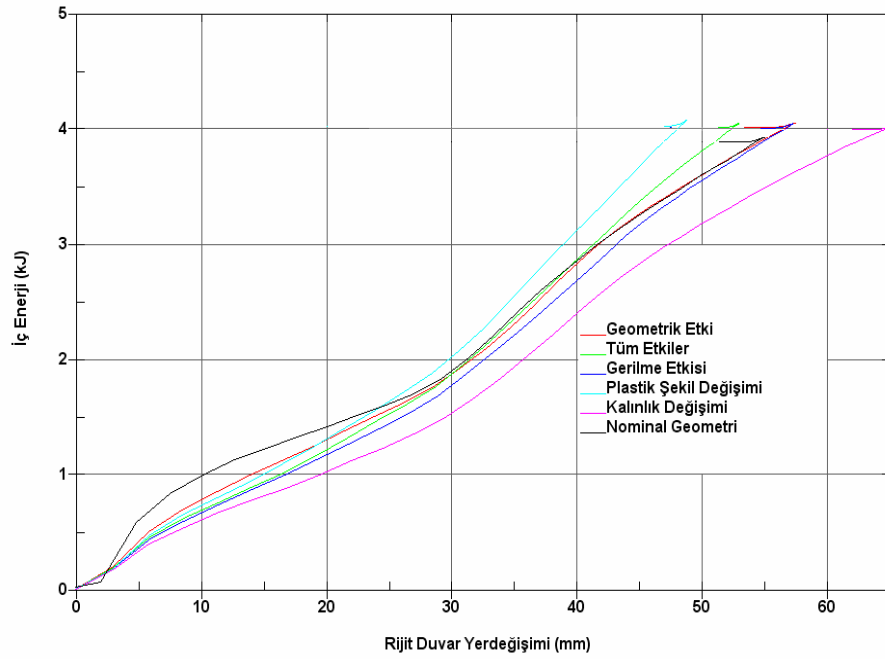
(c)



(d)



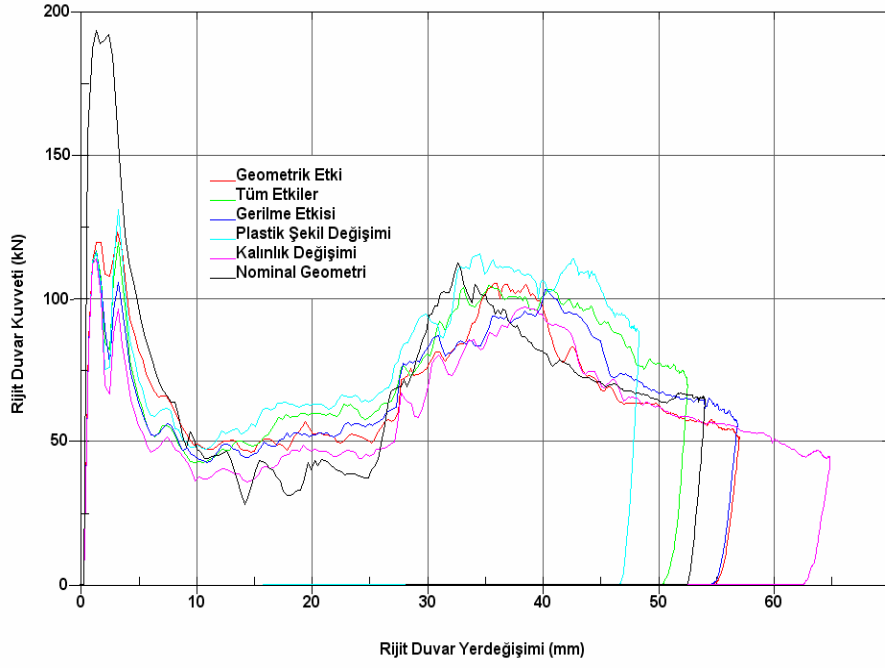
(a)



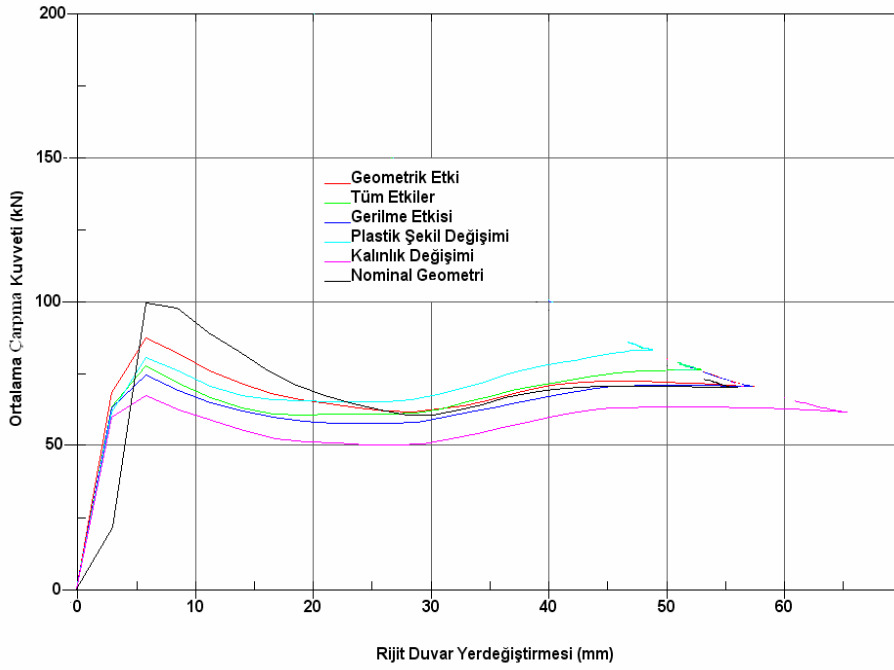
(b)

Şekil 3.17. 1300 kN baskı plakası yükü ile şekil verilen 1.5 mm kalınlıklı parçada, (a) Rijit duvarın zamanla yaptığı yer değiştirme, (b) İç enerji değişimi, (c) Rijit duvarda oluşan reaksiyon kuvvetinin rijit duvar yer değiştirmesi ile değişimi, (d) Ortalama çarpma kuvvetinin değişimi

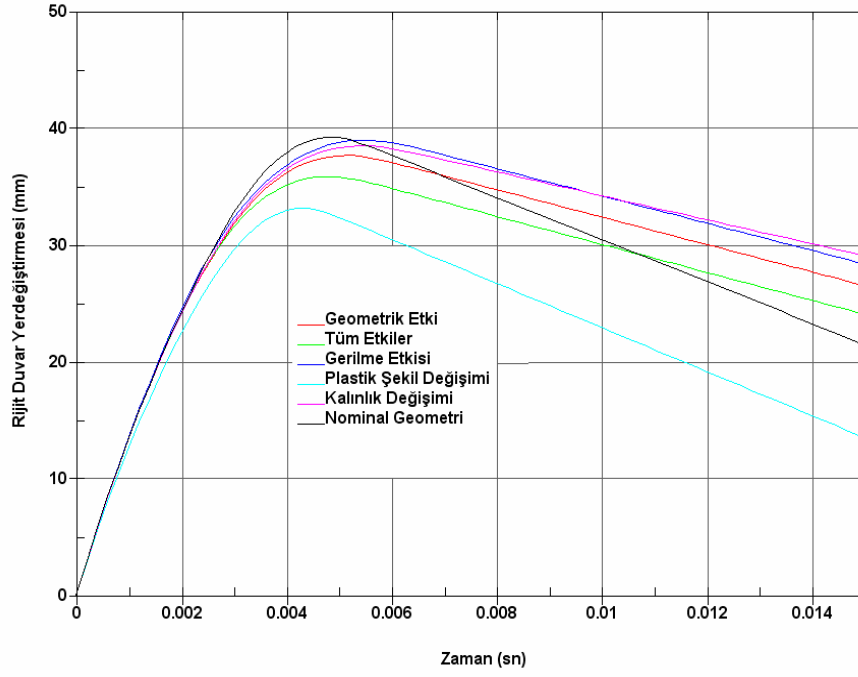
Şekil 3.17'nin devamı;



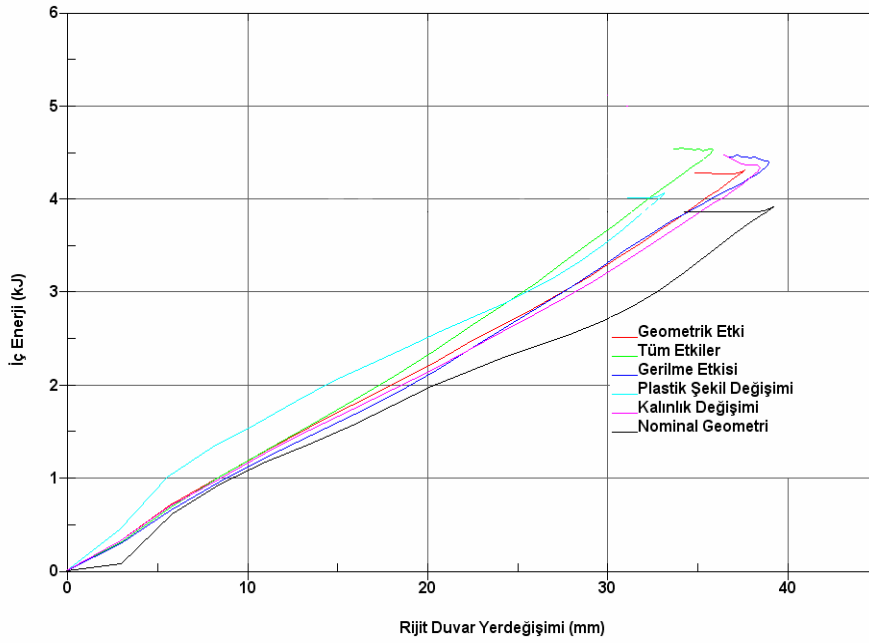
(c)



(d)



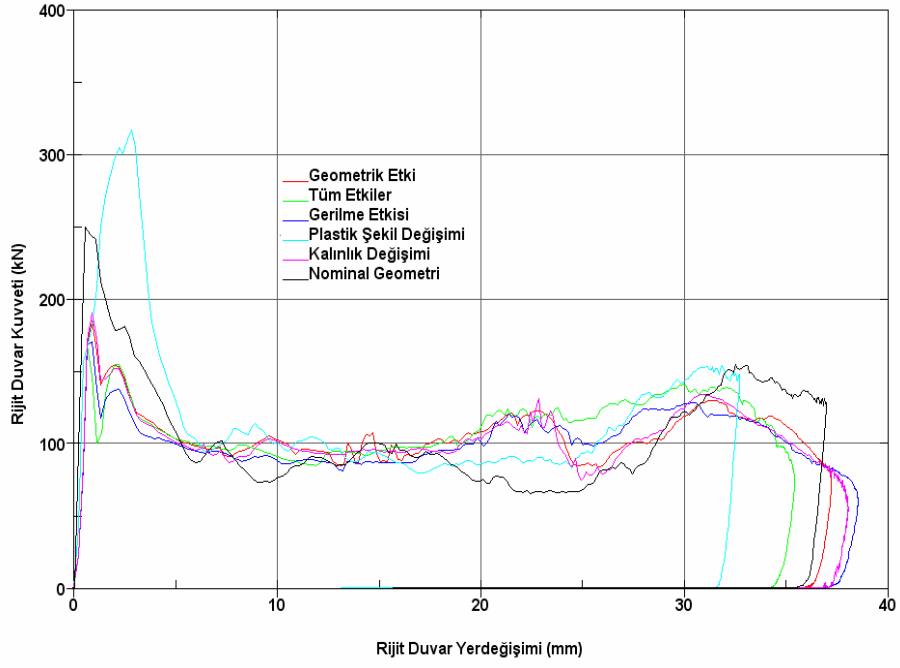
(a)



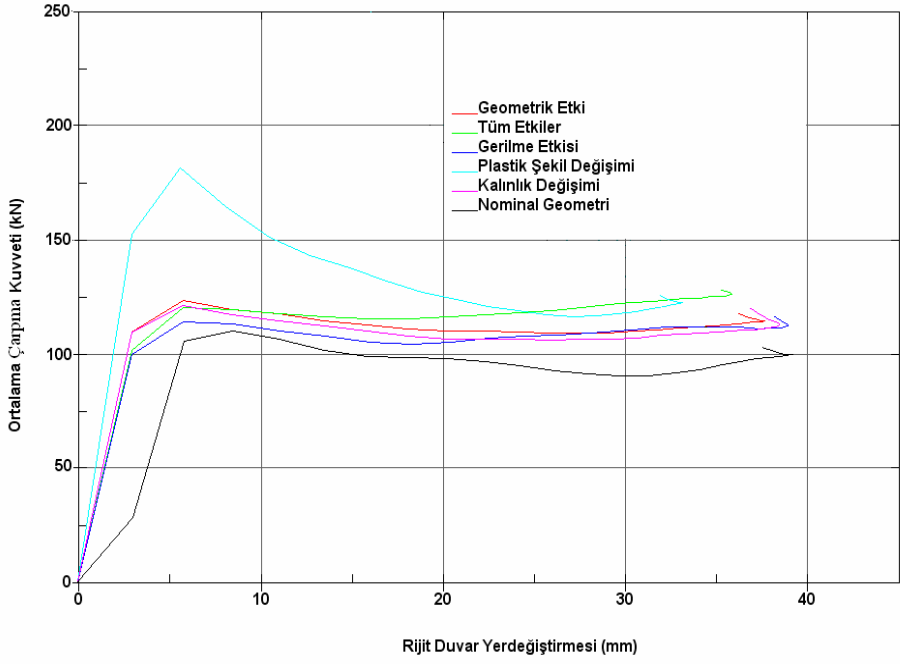
(b)

Şekil 3.18. 600 kN baskı plakası yükü ile şekil verilen 2 mm kalınlıklı parçada, (a) Rijit duvarın zamanla yaptığı yer değiştirme, (b) İç enerji değişimi, (c) Rijit duvarda oluşan reaksiyon kuvvetinin rijit duvar yer değiştirmesi ile değişimi, (d) Ortalama çarpma kuvvetinin değişimi

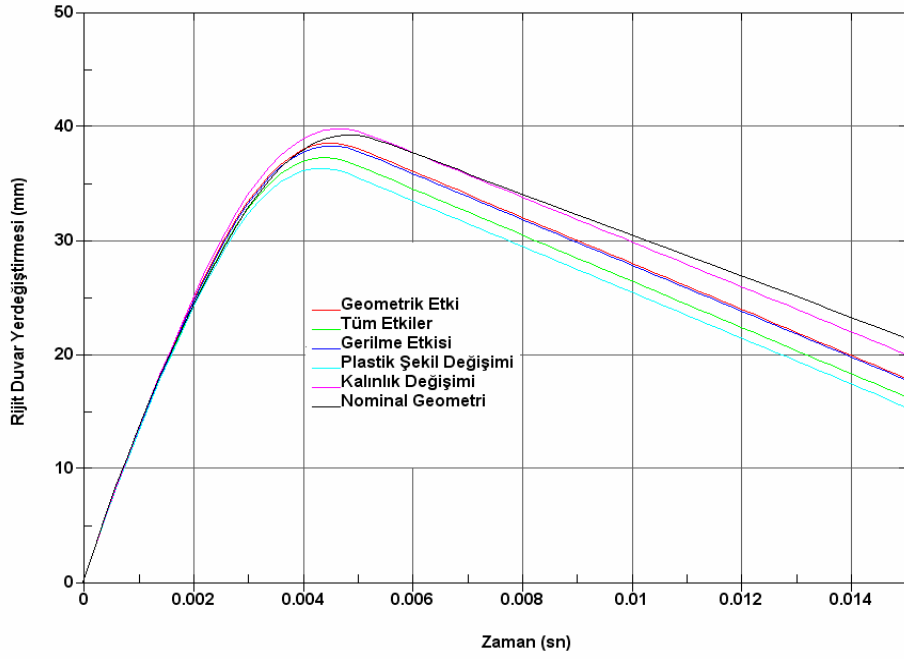
Şekil 3.18'in devamı;



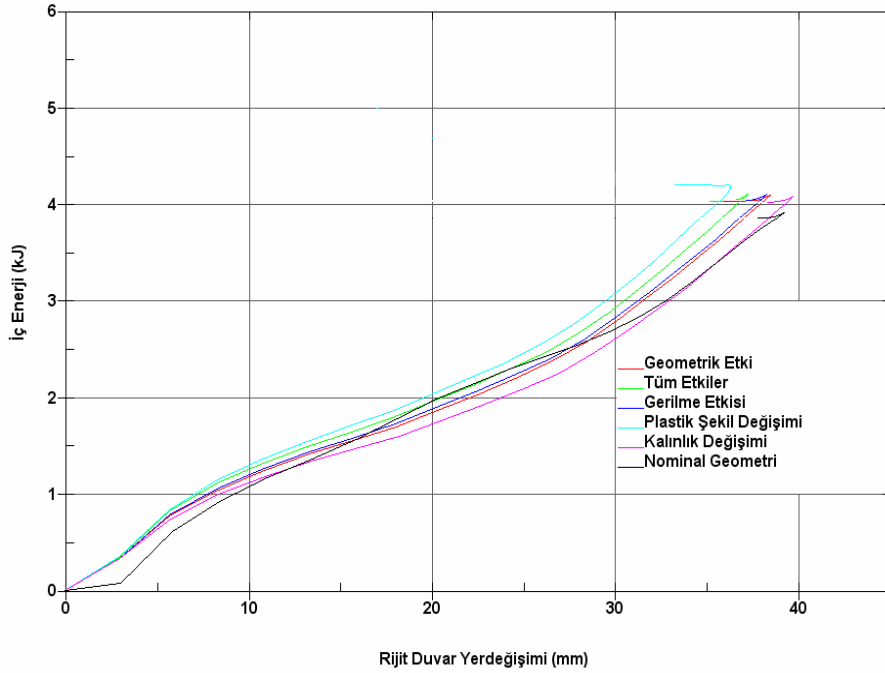
(c)



(d)



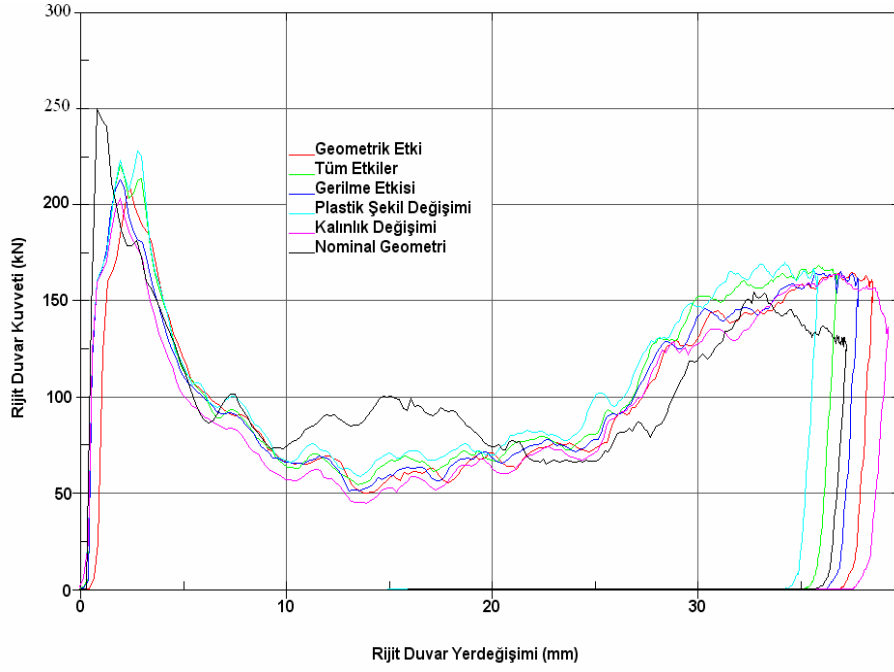
(a)



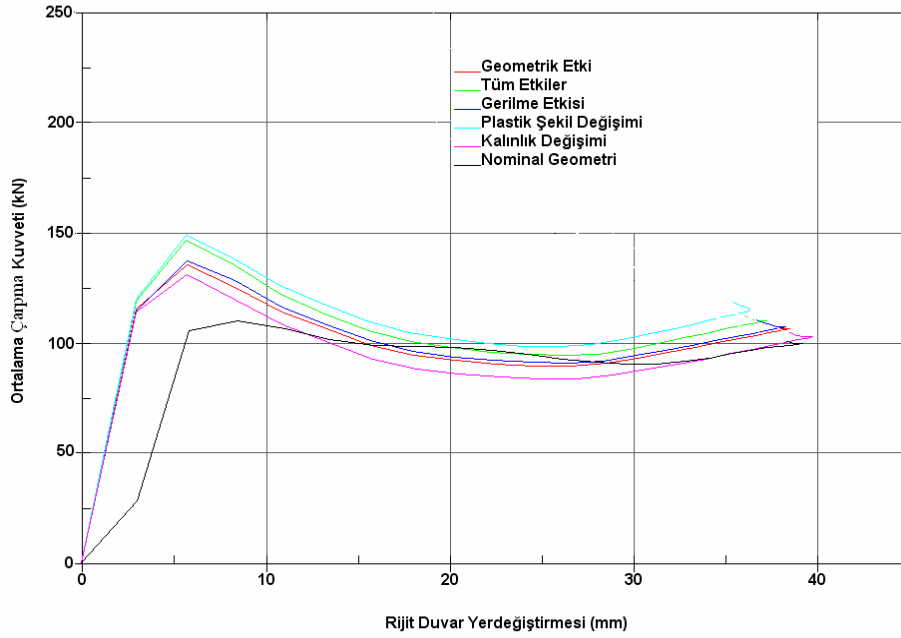
(b)

Şekil 3.19. 1000 kN baskı plakası yükü ile şekil verilen 2 mm kalınlıklı parçada, (a) Rijit duvarın zamanla yaptığı yer değiştirme, (b) İç enerji değişimi, (c) Rijit duvarda oluşan reaksiyon kuvvetinin rijit duvar yer değiştirmesi ile değişimi, (d) Ortalama çarpma kuvvetinin değişimi

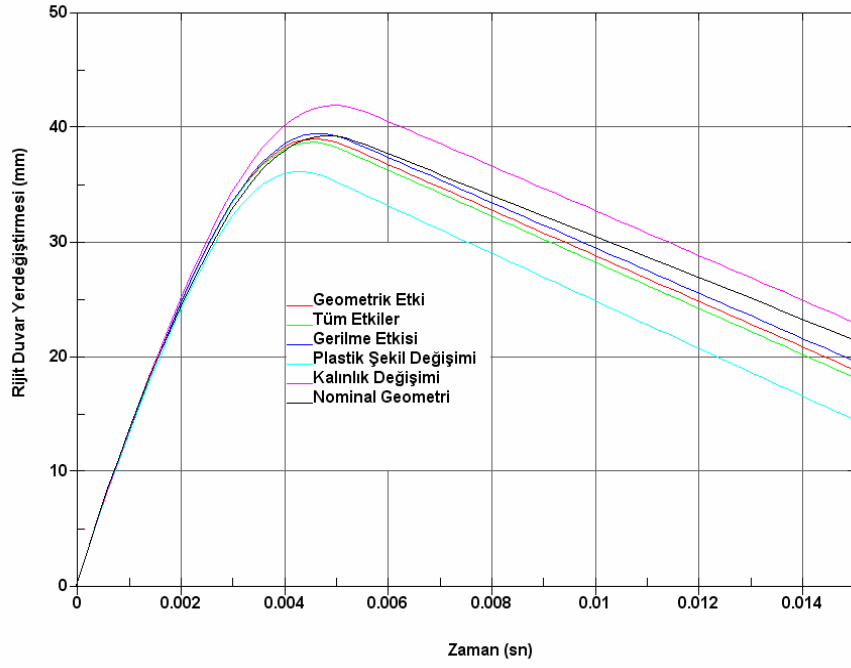
Şekil 3.19'un devamı;



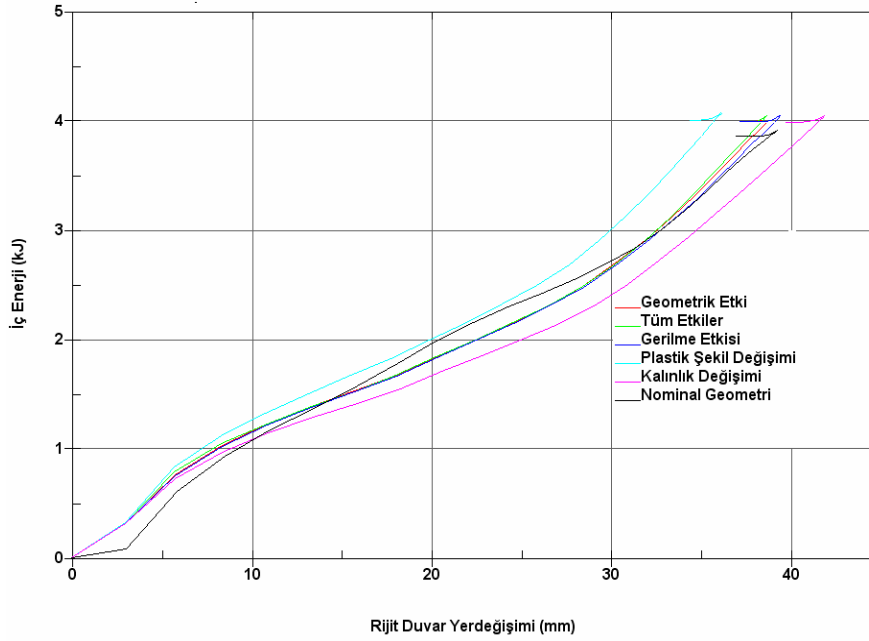
(c)



(d)



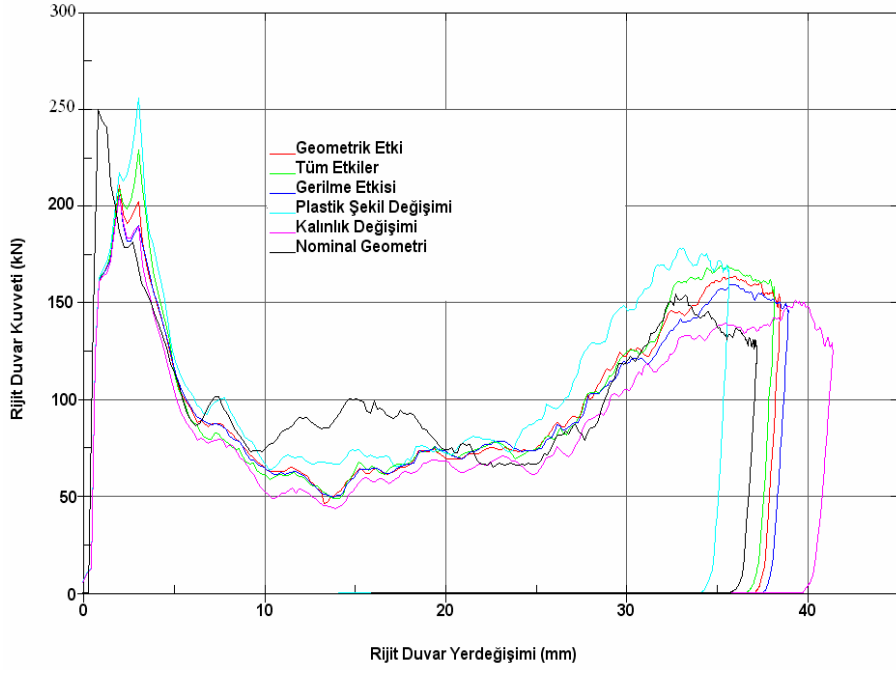
(a)



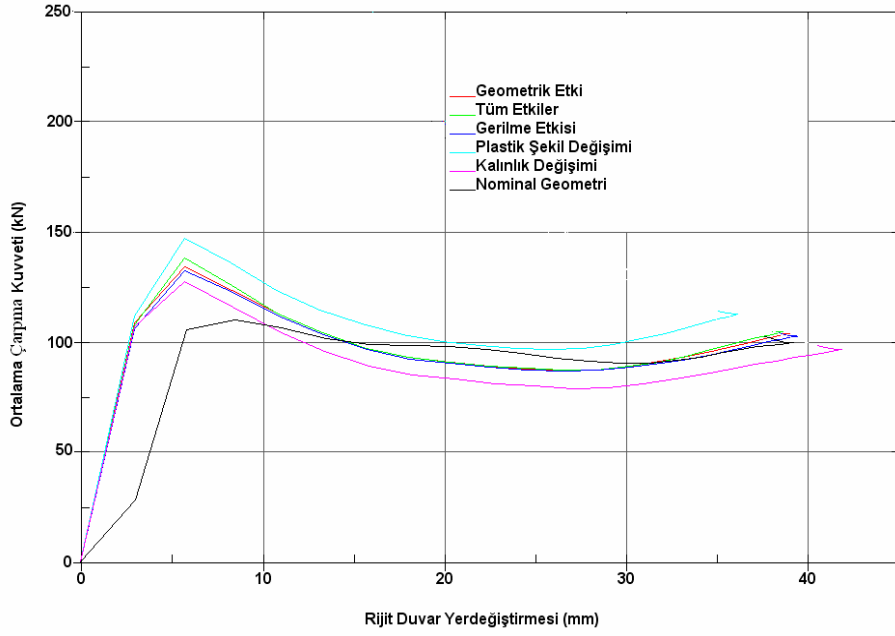
(b)

Şekil 3.20. 1300 kN baskı plakası yükü ile şekil verilen 2 mm kalınlıklı parçada (a) Rijit duvarın zamanla yaptığı yer değiştirme, (b) İç enerji değişimi, (c) Rijit duvarda oluşan reaksiyon kuvvetinin rijit duvar yer değiştirmesi ile değiştirmesi, (d) Ortalama çarpma kuvvetinin değiştirmesi

Şekil 3.20'nin devamı;



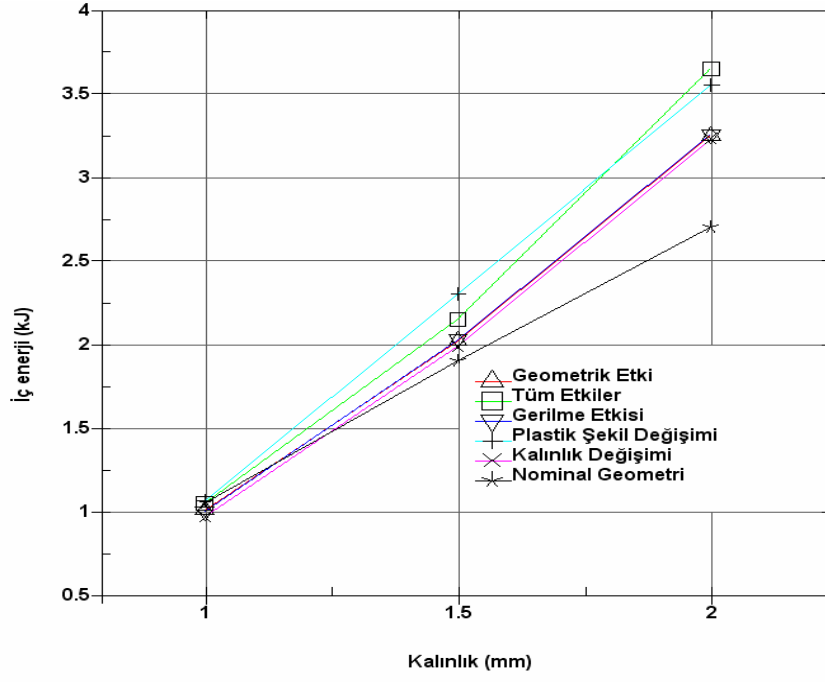
(c)



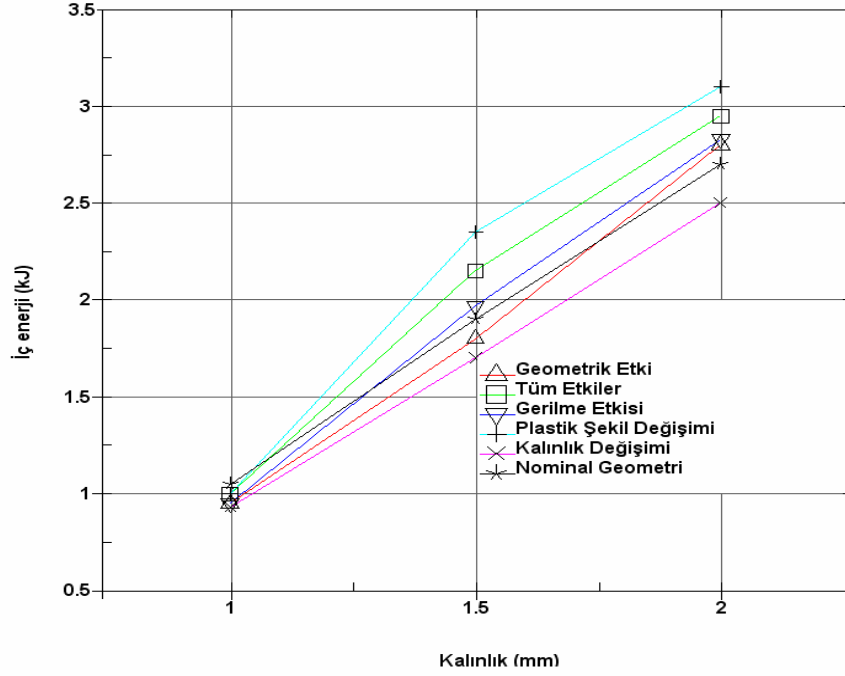
(d)

1.5 ve 2 mm kalınlıklı parçalar için elde edilen sonuçlar genel olarak, 1 mm kalınlıklı parça için elde edilen sonuçlarla benzer davranışlar sergilemektedir. Yine plastik şekil değişimi ve kalınlık değişiminin etkin parametreler olduğu göze çarpmaktadır. 1 mm kalınlığa göre 1.5 ve 2 mm kalınlıklı parçalarda daha az rijit duvar yer değiştirmesi meydana gelmekte ve buna paralel olarak çok daha az bir deformasyon ile rijit duvarın kinetik enerjisini sönmölemektedirler. Ayrıca 1 mm kalınlıklı parçada 600 kN ve daha yüksek baskı plakası yükleri için maksimum çarpma kuvveti değerlerinde, kanalı parçaya göre kısılması nedeniyle meydana gelen düşüşler, 1.5 ve 2 mm kalınlıklı parçalarda 1000 ve 1300 kN'luk baskı plakası yüklemeleri için meydana geldiği görölmektedir (Şekil 3.16c, Şekil 3.17c, Şekil 3.19c, Şekil 3.20c).

Kalınlığın ve baskı plakası yükünün artmasıyla şekil verme etkilerinin çarpmaya etkilerinin nasıl değiştiği, Şekil 3.21'de sönmölenen enerjinin büyüklüğü açısından karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma eğrileri 30 mm'lik rijit duvar yer değiştirmesi için sönmölenen (iç enerji değişimi) enerji miktarları için verilmiştir. Şekil'den de göröldüğü gibi kalınlığın artması ile aynı miktarda rijit duvar yer değiştirmesi için iç enerji değişiminin lineer olarak arttığı görölmektedir. Grafiklerde görölen bir diğör özellik, şekil verme etkilerini içeren çarpma analizlerinden elde edilen iç enerji değişimleri de kalınlıkla birlikte lineer artmaktadır. Plastik şekil değişiminin dikkate alındığı modelin en fazla enerjiyi sönmölediği bu grafiklerde de görölmektedir. Kalınlık değişiminin dikkate alındığı model ise en az enerjiyi sönmölemektedir. Bu sonuçlar, Nagel ve Thambiratnam [38] tarafından, düz bir tüp için kalınlığın enerji sönmölemeye etkisinin araştırıldığı çalışmada bulunan sonuçlarla uyumludur.



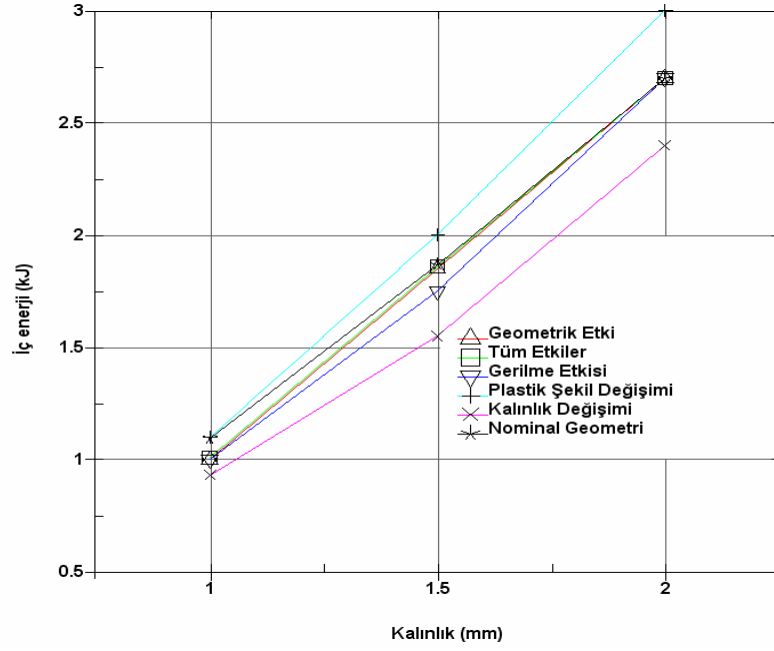
(a)



(b)

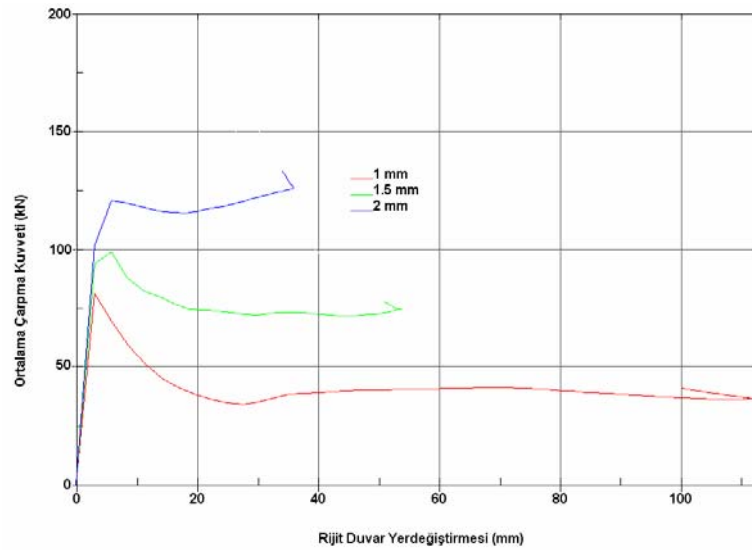
Şekil 3.21. Kalınlıkla iç enerjideki değişimi, (a) 600 kN baskı plakası yükü, (b) 1000 kN baskı plakası yükü, (c) 1300 kN baskı plakası yükü

Şekil 3.21'in devamı;



(c)

Ortalama çarpma kuvvetinin kalınlıkla ilişkisini ortaya çıkarmaya yönelik olarak 600 kN baskı plakası yüküyle şekil verilen parçanın tüm şekil verme etkilerinin birlikte dikkate alındığı modelle yapılan çarpma analizleri sonuçları Şekil 3.22'de verilmiştir.



Şekil 3.22. 600 kN baskı plakası yükü için tüm etkiler altında kalınlığın ortalama çarpma kuvvetine etkisi

Şeklin incelenmesinden ortalama çarpma kuvvetinin kalınlığın artması ile arttığı görülmektedir. Parça kalınlığının artması parçanın yanal yüzeylerinin atalet kuvvetinde artışa sebep olmaktadır [39]. Bu sebeple ortalama kuvvet artmakta, rijit duvarın yer değiştirmesi ise azalmaktadır.

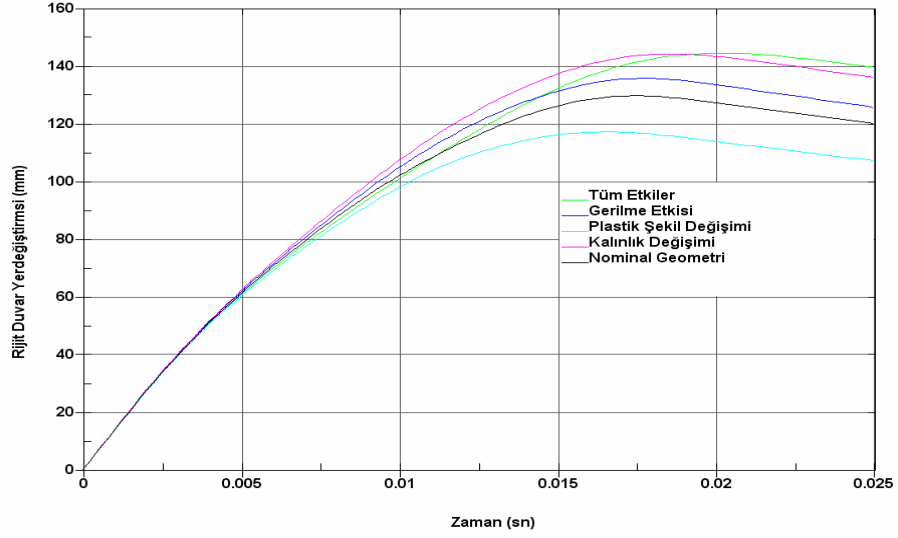
3.2. Nominal Geometri ile Yapılan Çarpma Analizleri

Nominal geometri üzerine şekil vermeden gelen plastik şekil değişimi, kalınlık ve gerilme dağılımına ait verilerin eşleştirilmesi ile yapılan çarpma analizlerinde geometrik etkiye ait veriler bulunmamaktadır. Bu bölümde 1 mm kalınlıklı ve 1000 kN baskı plakası yükü ile şekillendirilen parça için elde edilen sonuçların yanında, deforme olmuş ağ ile yapılan analizlerden elde edilen sonuçlarla nominal geometriye ait sonuçların karşılaştırıldığı grafikler verilmektedir. Bu analizlerde de rijit duvar yine 35 kg kütleyle ve 15 m/s'lik bir başlangıç hızına sahiptir.

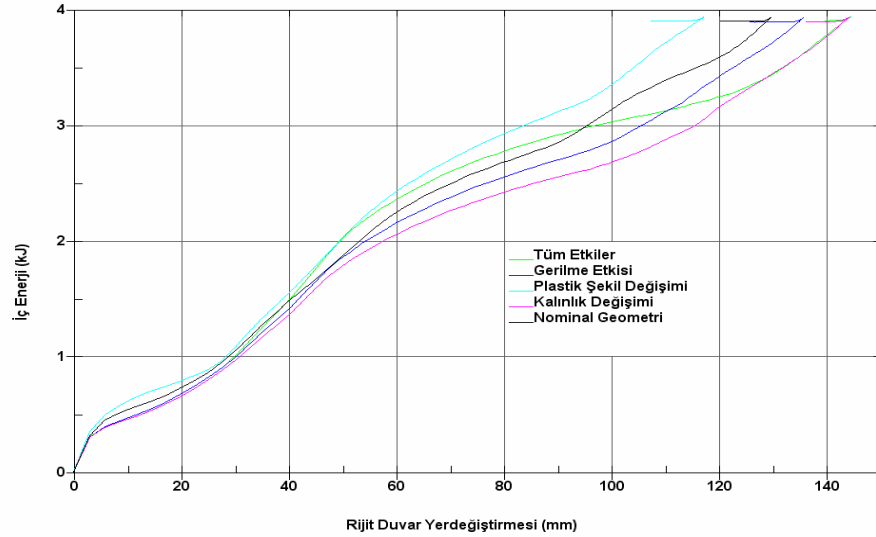
Şekil 3.23a'da şekil verme etkilerinin rijit duvar yer değiştirmesinin zamanla değişimi gösteren eğri verilmektedir. Grafikten de görüldüğü gibi plastik şekil değişimini içeren model en az rijit duvar yer değiştirmesine izin vermekte ve artık gerilmenin dikkate aldığı model ise nominal geometriyi esas alan modele yakın bir değerde yer değiştirme yapmaktadır. Tüm etkiler ve kalınlık değişimini esas alan modeller aynı miktarda ve nominal geometriyi esas alan modelden daha fazla yer değişimine izin vermektedir. Fakat tüm şekil verme etkilerinin dikkate alındığı modelde rijit duvarın yer değiştirmesi kalınlık değişimini dikkate alan modelden daha büyüktür.

İç enerji değişimi, deforme olmuş geometrinin esas alındığı modelle elde edilen sonuçlarla benzer davranış göstermektedir (Şekil 3.23b). Aynı miktar yer değiştirme için yine plastik şekil değişimini içeren model en fazla enerjiyi sönmölemektedir iken kalınlık değişimini dikkate alan model en az enerjiyi sönmölemektedir. Tüm etkileri içeren model ise 100 mm'lik rijit duvar yer değiştirmesi miktarına kadar düzgün ve plastik şekil değişimi eğrisine yakın davranırken, 100 mm'den sonra hızla düşerek aynı miktarda yer değiştirme için en az enerji miktarını sönmölemektedir. Rijit duvar çarpma kuvveti ve ortalama çarpma kuvveti ilişkisini gösteren grafiklerde ise şekil verme etkilerini ayrı ayrı dikkate alan modellerin birbirine benzer davranışlar sergilediği görülmektedir. Yalnızca maksimum değerler plastik şekil değişimi için bir miktar yüksek çıkmaktadır (Şekil 3.23c-d). Şekil 3.24'de ise 1 mm kalınlıklı, 1000 kN baskı plakası yükü ile derin çekilmiş parça

için belli zaman aralıklarında plastik şekil değişimi, kalınlık değişimi, tüm etkiler, artık gerilme ve nominal geometriyi esas alan çarpma modellerine ait deformasyon modları verilmektedir. Şekilden de görüldüğü üzere çarpmadan 0.002 saniye sonraki deformasyon modlarında önemli bir fark olmamasına rağmen 0.005 saniye anında tüm etkilerin dikkate alındığı modelde global bir eğilme başlamaktadır. Buna karşın diğer şekil verme etkilerinin esas alındığı modellerin düzgün bir deformasyon modu sergilendiği görülmektedir.



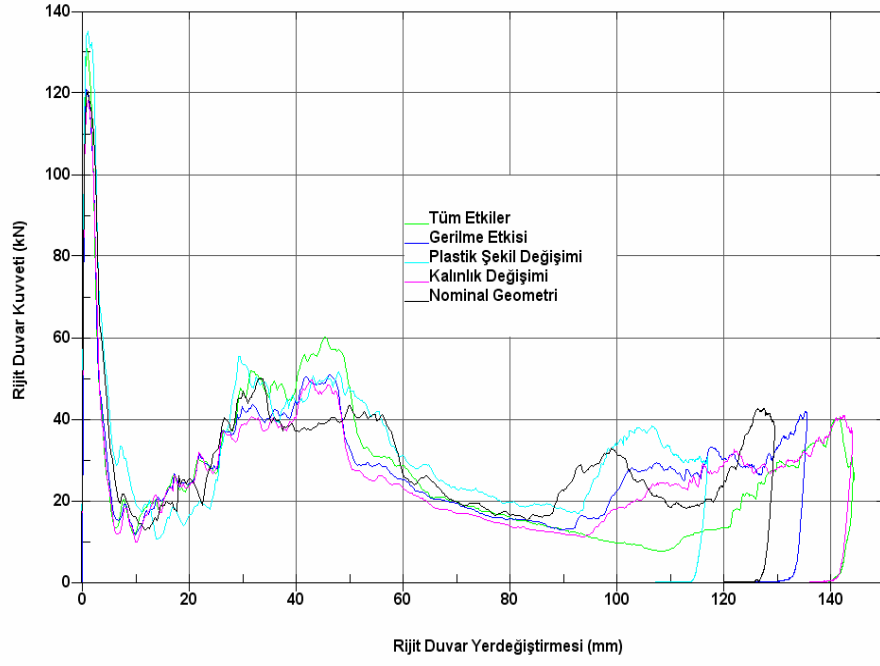
(a)



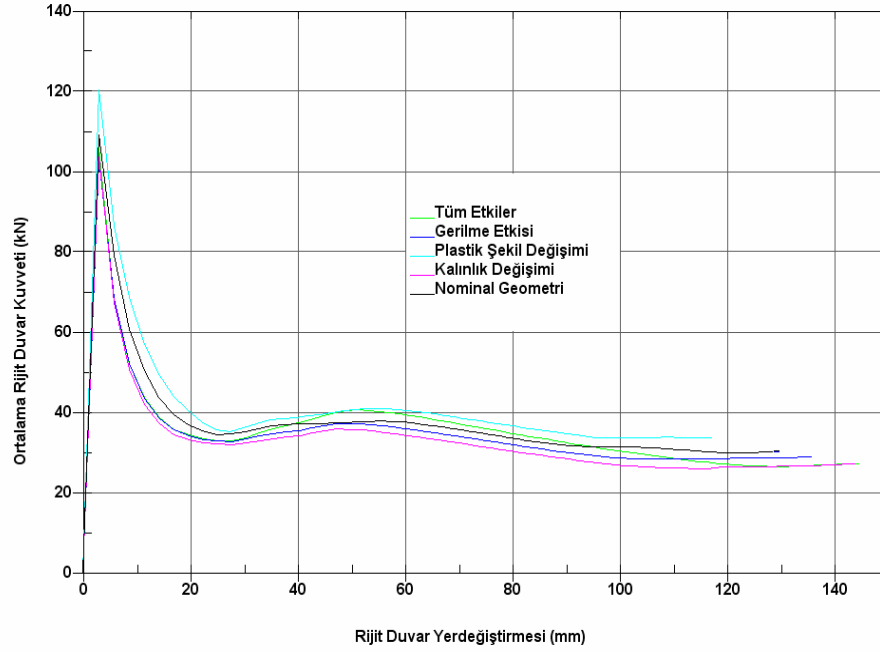
(b)

Şekil 3.23. 1000 kN baskı plakası yükü ile şekil verilen 1mm kalınlıklı parçaya ait şekil verme verilerinin nominal geometriye eşlenmesi, (a) Rijit duvarın zamanla yaptığı yer değiştirme, (b) İç enerji değişimi, (c) Rijit duvarda oluşan reaksiyon kuvvetinin rijit duvar yer değiştirmesi ile değişimi, (d) Ortalama çarpma kuvvetinin değişimi

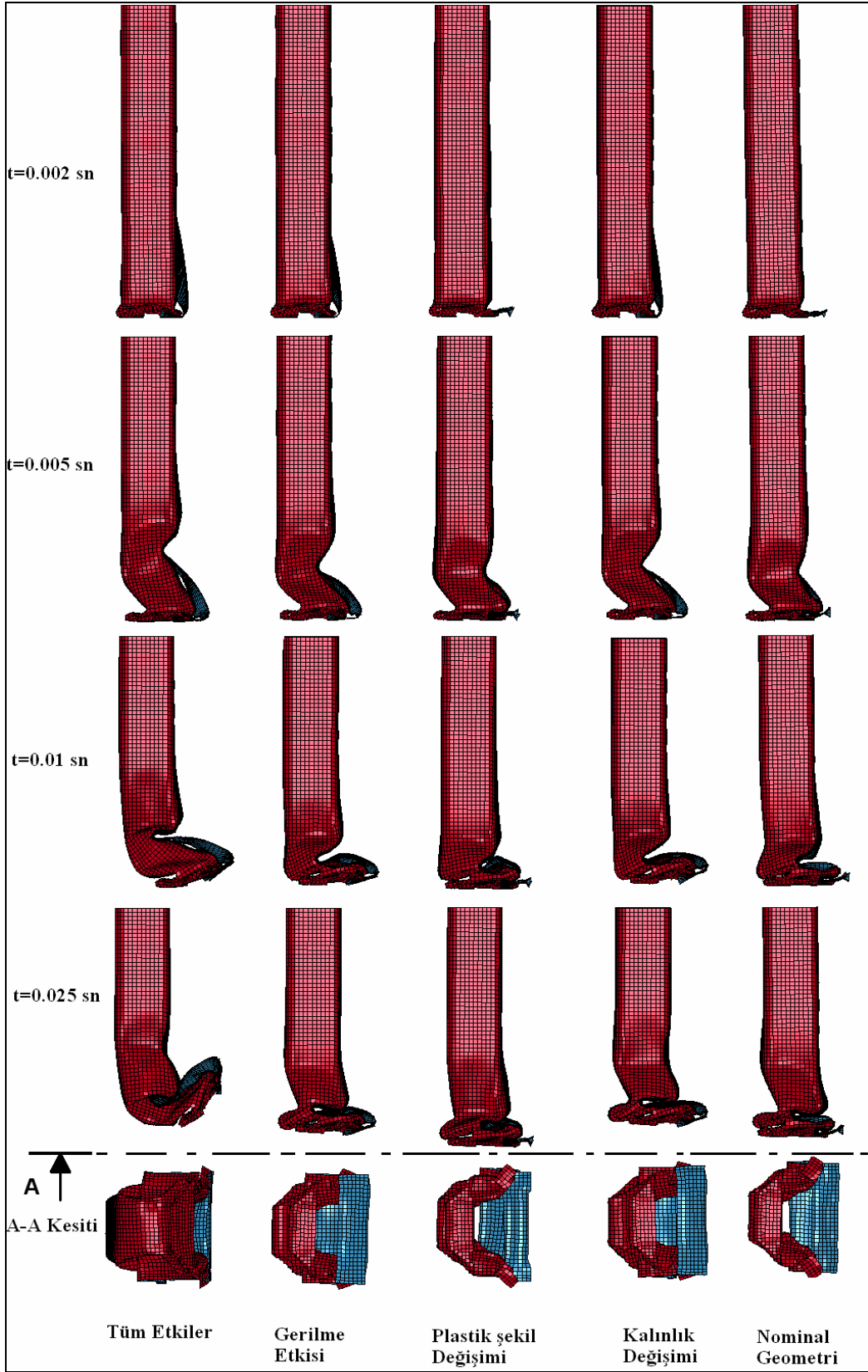
Şekil 3.23'ün devamı;



(c)



(d)



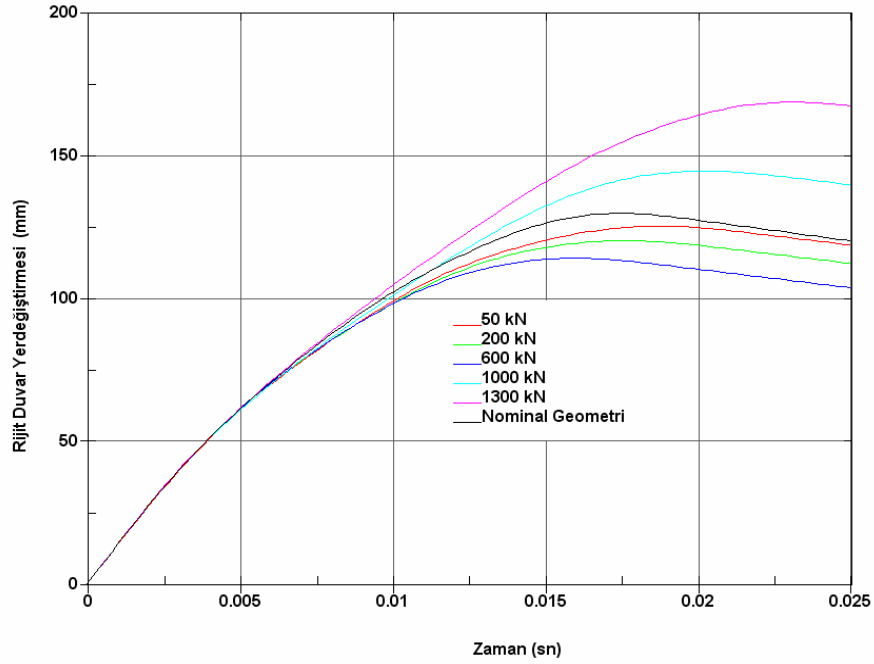
Şekil 3.24. Şekil verme etkilerinin nominal geometriye eşleştirilmesiyle oluşturulan modellerin deformasyon modları

Nominal geometri ile şekil verme etkilerinin incelendiği çarpma analizlerinin sonuçlarına bakıldığında, deforme olmuş ağ ile yapılan analizlerdeki gibi plastik şekil verme ve kalınlık değişiminin etkin parametreler olarak ortaya çıktığı görülmektedir. Örneğin, sonuçlar rijit duvar yer değiştirmesi açısından değerlendirilirse plastik şekil değişimini dikkate alan modelde elde edilen rijit duvar eksenel yer değiştirmesi nominal geometriyi esas alan modelinkine göre azaltmakta iken kalınlık değişimini esas alan modelde bu değer artmaktadır (Şekil 3.23a). Gerilmenin etkisi ise yine düşük seviyelerde, rijit duvar yer değiştirmesini arttırıcı yönde olmaktadır. Tüm şekil verme etkileri açısından bakılırsa, rijit duvar yer değiştirmesi beklenenin aksine nominal geometrininkine göre artarak kalınlık değişiminin yaptığı yer değiştirmeye yakın bir değere ulaşmaktadır. Bu durum, Şekil 3.24’de de görüldüğü gibi, parçanın tüm etkiler altında global eğilme yapmasından kaynaklanmaktadır. Çünkü global eğilme parçanın direncini düşürürken, deformasyona katılan malzeme miktarının düşmesi sebebiyle de enerji sönümlenme miktarında önemli düşüslere sebep olabilmektedir [18]. İç enerji değişimleri grafiğine (Şekil 3.23b) bakıldığında, yine rijit duvarın aynı miktarda yer değiştirmesi için yalnız plastik şekil değişiminin dikkate alındığı modelin en fazla enerjiyi sönümlendiği, kalınlık incelmesinin dikkate alındığı modelin ise en az enerjiyi sönümlendiği görülmektedir. Rijit duvar çarpma kuvveti ve ortalama çarpma kuvveti bazında ise, beklenildiği gibi, maksimum çarpma kuvvetini tüm etkilerin ve plastik şekil değişimi etkisinin dikkate alındığı modeller vermektedir. Çarpma kuvvetinin değeri kalınlık değişimini esas alan modelde nominal geometriden daha düşük değere ulaşmaktadır (Şekil 3.23c-d).

1000 kN baskı plakası yükü ile şekillendirilmiş 1 mm kalınlıklı parçaya ait çarpma analizlerinden elde edilen ve Şekil 3.23 ve Şekil 3.24’te sunulan sonuçlar Simunovic [9] tarafından, ful araç üzerinde, aracın ön kirişi için elde edilen sonuçlarla uyum göstermektedir. Bu çalışmada ön kiriş için elde edilen değerlerde tüm şekil verme etkilerini içeren durumun şekil verme etkisinin dikkate alınmadığı duruma göre daha fazla deformasyona izin verdiği ve maksimum çarpma kuvvetinin daha yüksek çıktığı belirlenmiştir.

50, 200, 600, 1300 kN baskı plakası yüklemelerinden elde edilen şekil verme etkilerinin de nominal geometriye aktarılması durumunda ortaya çıkacak sonuçları yalnızca tüm etkiler açısından karşılaştırmak için çarpma analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu analizlere ait sonuçlar Şekil 3.25’de görülmektedir. Şekil 3.25a’da görüldüğü üzere tüm etkiler bazında 600 kN baskı plakası yüküne kadar rijit duvar yer değiştirmesi nominal

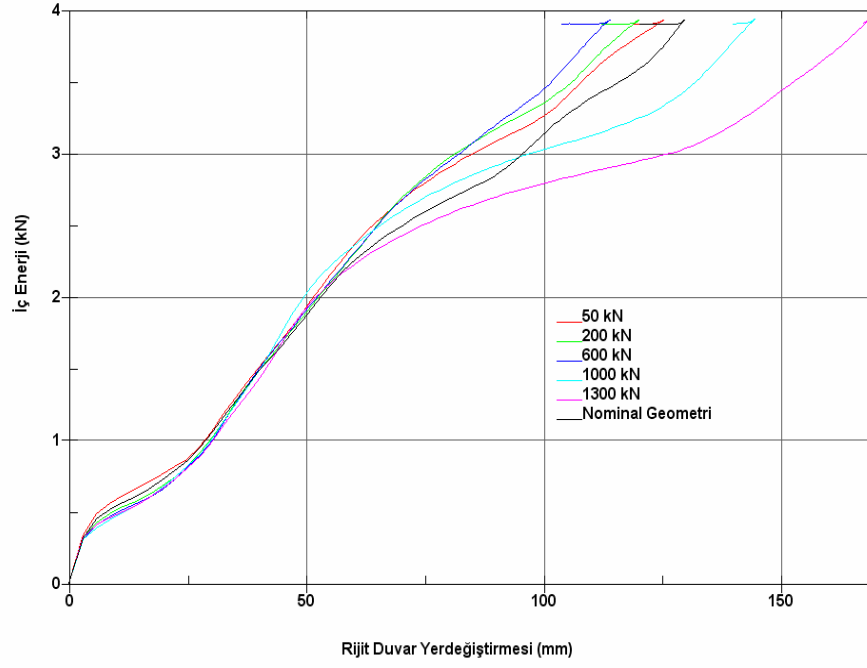
geometriye göre daha düşük kalmakta ve baskı plakası yükü artıkça rijit duvar yer değiştirmesi azalmaktadır. Fakat 1000 ve 1300 kN yüklemelerde parçada meydana gelen global eğilme sebebiyle rijit duvar yer değiştirmesi artarak nominal geometriyi esas alan modelinkinden daha büyük olmaktadır. Buna paralel olarak aynı miktar yer değiştirme için 1000 ve 1300 kN'luk yüklemelerinde sönümlenen enerji miktarı düşmektedir (Şekil 3.25b). En fazla enerji sönümleme 600 kN baskı plakası yükünde oluşmaktadır. Kuvvetler açısından 50 mm yer değiştirme değerine kadar eğriler arasında önemli bir fark görülmemektedir (Şekil 3.25c-d). 50 mm'den sonra 1300 kN için rijit duvar kuvveti diğerlerinden çok daha düşük seviyelerde seyretmektedir. Ayrıca, Şekil 3.25a'dan 600 kN baskı plakası yüküne kadar plastik şekil değişiminin etkin olduğu, daha büyük yüklerde ise kalınlık incelmesinin etkin olduğu sonucu çıkarılabilir.



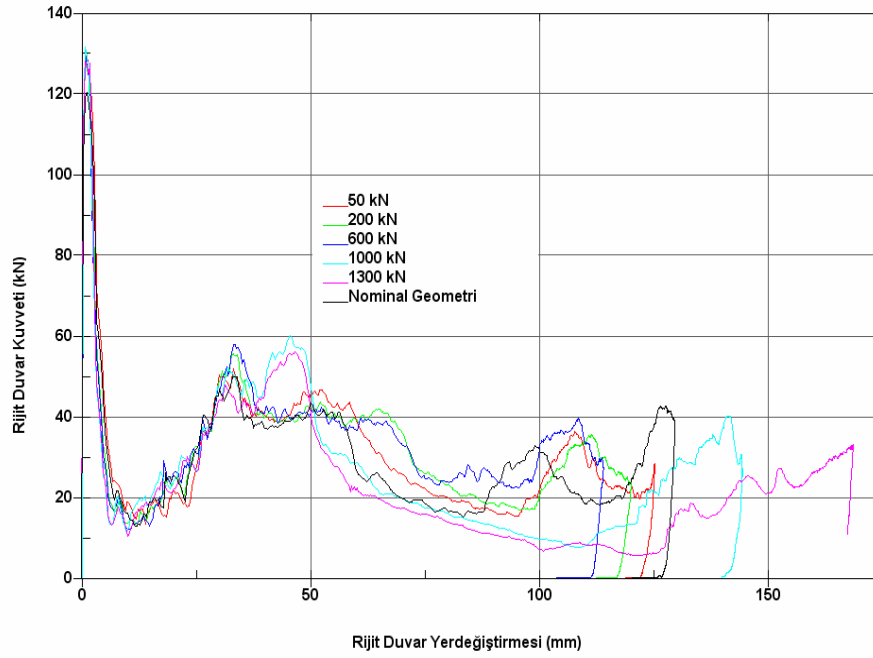
(a)

Şekil 3.25. Farklı baskı plakası yüklemeleri etkisinde bulunan 1mm kalınlıklı parçaya ait şekil verme verilerinin tümünün nominal geometriye eşlenmesi, (a) Rijit duvarın yer değiştirmesi, (b) İç enerji değişimi, (c) Rijit duvar kuvveti, (d) Ortalama çarpma kuvveti verilerinin karşılaştırılması

Şekil 3.25'in devamı;

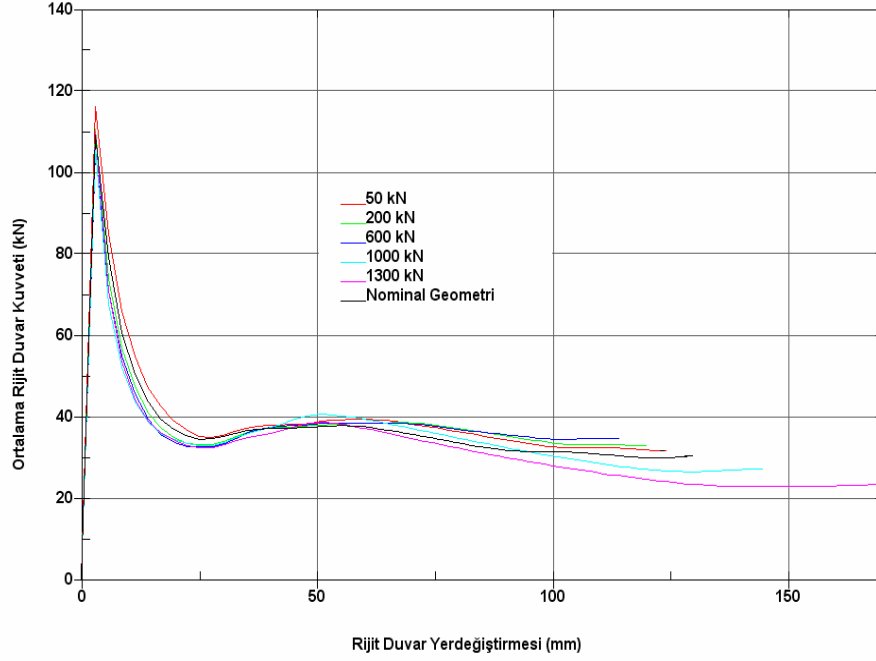


(b)



(c)

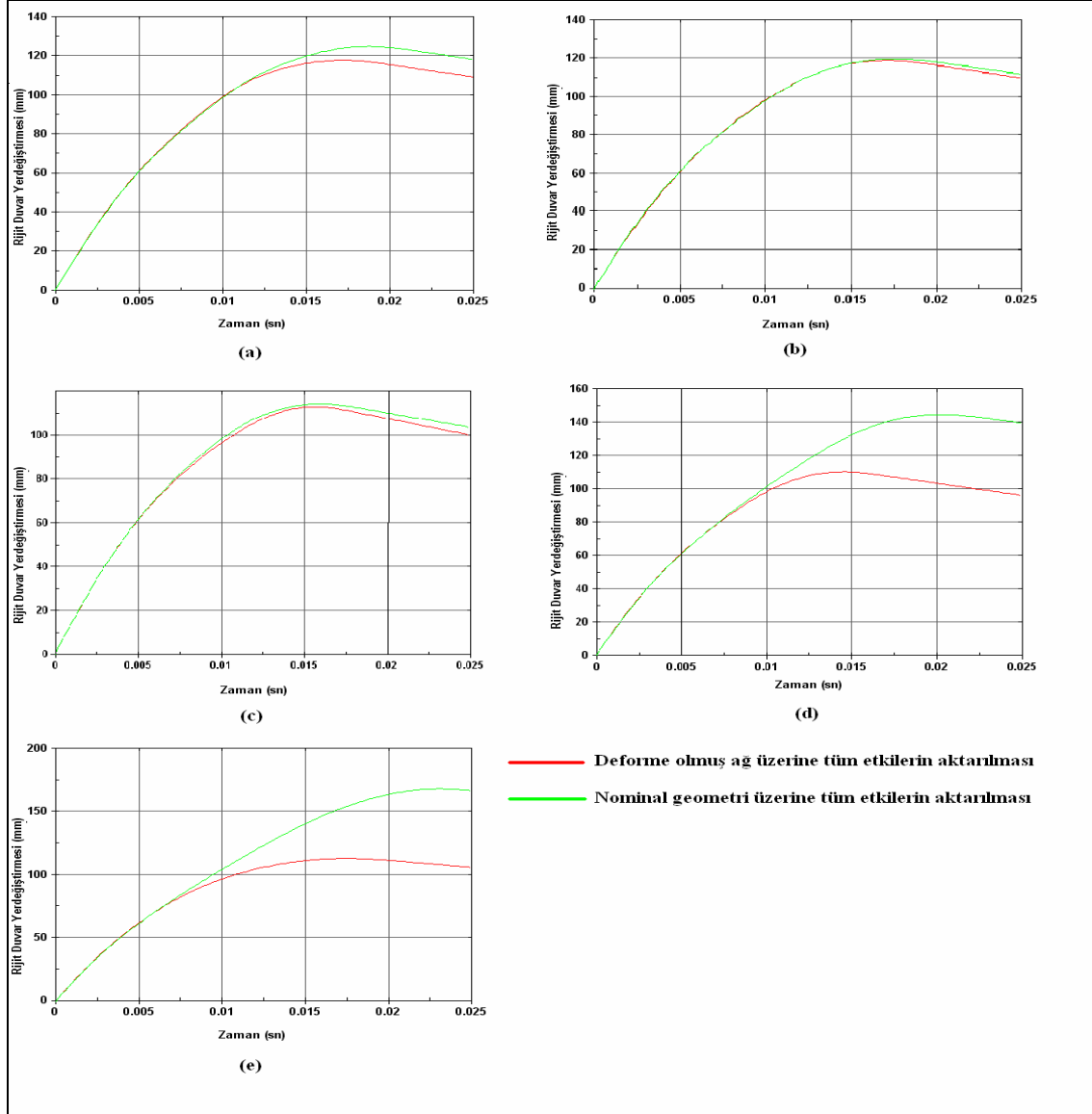
Şekil 3.25'in devamı;



(d)

Deforme olmuş ağ ile nominal ağ arasında tüm şekil verme etkilerinin dahil edildiği çarpma analizlerinin sonuçlarının rijit duvar yer değiştirmeleri açısından karşılaştırmaları her bir baskı plakası yükü için Şekil 3.26'da verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi 50, 200 ve 600 kN yüklemeleri için deforme olmuş ve nominal ağ ile elde edilen yer değiştirmeler hemen hemen aynıdır. Fakat 1000 ve 1300 kN baskı plakası yüklemelerine karşılık gelen modellere ait sonuçlar arasında önemli farklar oluşmaktadır. 50, 200 ve 600 kN yüklemelerinde şekil verme etkilerinin ilave edilmediği durumlarda, geometrik etki ve nominal geometri arasında, rijit duvar yer değiştirmesi açısından önemli farklar bulunmaktadır (Şekil 3.3a, Şekil 3.4a, Şekil 3.5a). Dikkat edileceği üzere 50, 200 ve 600 kN yüklemeleri için şekil verme etkilerinin ilave edilmediği durumlarda oluşan bu farklar, şekil verme etkilerinin tümü ilave edilince ortadan kalkmaktadır (Şekil 3.26a-c). Bu sonuç Cowell tarafından yapılan çalışma da bulunan sonuçlarla örtüşmektedir [40]. Cowell, hassas ve kaba ağ olmak üzere hem deforme olmuş hem de nominal geometriye sahip iki tip ağ üzerinde hidroform yöntemi ile üretilmiş bir tüpün şekil verme etkileri dahil edildiği ve dahil edilmediği durumlar için çarpma analizleri gerçekleştirmiştir. Şekil verme etkilerinin dahil edilmediği durumda hem hassas hem de kaba ağ için deforme olmuş ve

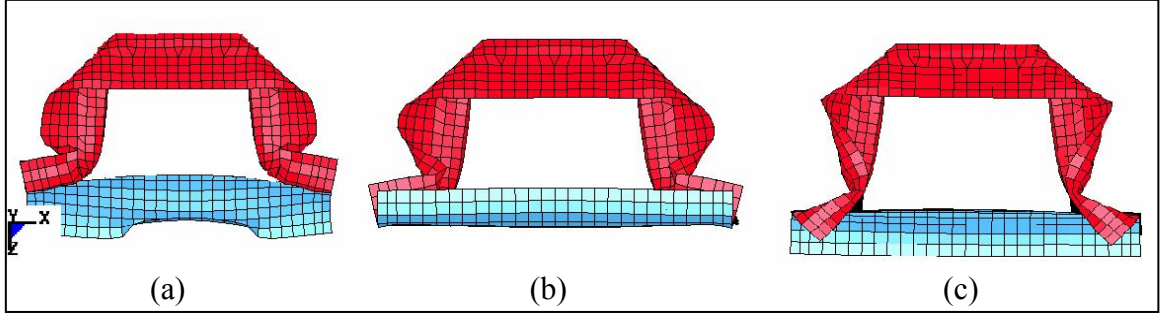
nominal ağ arasında rijit duvar yer değiştirmesi açısından önemli farklar bulunmuştur. şekil verme etkileri ilave edilince hem hassas hem de kaba ağ için, deforme olmuş ve nominal ağ arasında hemen hemen aynı rijit duvar yer değiştirmesi elde edilmiştir.



şekil 3.26. Farklı baskı plakası kuvvetleri etkisinde şekil verilen parçalara ait tüm şekil verme etkilerinin dikkate alındığı deforme olmuş ağ ve nominal ağ kullanılması durumunda rijit duvar yer değişimleri, (a) 50 kN, (b) 200 kN, (c) 600 kN, (d) 1000 kN, (e) 1300 kN

1000 ve 1300 kN baskı plakası yüklemelerinde, tüm şekil verme etkilerinin ilave edildiği çarpma analizlerinde, nominal ağ ile deforme olmuş ağ arasında oluşan farkın, kanalın kapağa göre yüksek baskı plakası yükü altında, boyunda oluşan kısalmadan (Şekil 3.8) ve ağ yüzeyinde yüksek basınçtan dolayı meydana gelen küçük düzensizliklerden kaynaklandığı düşünülebilir. Bu etkiler, ilk çarpma anında maksimum çarpma kuvvetinde düşüşe sebebiyet vermektedir (Şekil 3.9). Bu durum nominal ağın kullanıldığı çarpma analizinde parçayı global eğilme gibi bir eğilme modundan korumuş olabilir. Ayrıca yapılan incelemede çarpmanın başlangıçındaki deformasyon modlarının birbirinden farklı olduğu görülmüştür.

Bu tez çalışmasında kullanılan parça için genel olarak çarpma analizlerinde üç çeşit başlangıç modu olduğu tespit edilmiştir. Birinci deformasyon modunda kanalın kanatçıklarının ön uç kısımları yukarı (-z yönünde) açılmakta iken kanalın uç kısmı aşağı (+z yönünde) bükülmektedir. İkinci deformasyon modunda kapak uç ve kanalın kanatçıkları yukarı doğru bükülmektedir. Üçüncüsünde ise hem kanatçıkların uç kısmı hem de kapak aşağı doğru bükülerek deformasyona başlamaktadır. Bu üç çeşit başlangıç deformasyon modu Şekil 3.27'de gösterilmektedir.

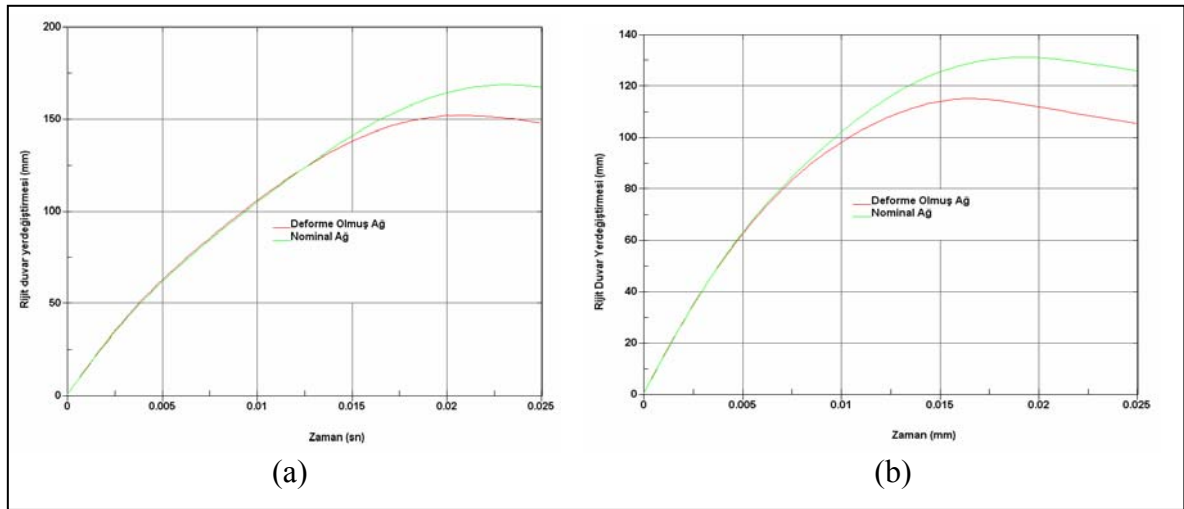


Şekil 3.27. Çarpma analizlerinde başlangıç deformasyon modları, (a) Birinci çeşit deformasyon modu, (b) İkinci çeşit deformasyon modu, (c) Üçüncü çeşit deformasyon modu

50, 200 ve 600 kN baskı plakası yüklemeleri için hem deforme olmuş ağ hem de nominal ağ ile şekil verme etkilerini ilave ederek yapılan tüm çarpma analizlerinde başlangıç deformasyon modlarının aynı olduğu ve birinci deformasyon moduna uyduğu görülmüştür. Fakat 1000 ve 1300 kN yüklemelerinde ise deforme olmuş ağ ve nominal ağ ile yapılan çarpma analizlerinde başlangıç deformasyon modunun birbirinden farklı olduğu tespit edilmiştir.

Bu bilgiler ışığında 1300 kN'luk baskı plakası ile üretilen parçalar için yapılan çarpma analizlerinde başlangıç deformasyon modunun, parçanın çarpma davranışını nasıl etkilediğini tespit etmek için bir dizi çarpma analizleri yapılmıştır. İkinci ve üçüncü çeşit başlangıç deformasyon modu için analizler, hem deforme olmuş hem de nominal ağ için gerçekleştirilmiştir. Çarpma anında parçada istenilen başlangıç deformasyon modu, kapağın uç kısmındaki düğümlere ait koordinatların $\pm z$ eksenini yönünde 0.5 mm değiştirilmesi ile sağlanmıştır. Bu şekilde düğümlerin koordinatlarının değiştirilmesi maksimum çarpma kuvvetinde bir azalmaya sebep olmaktadır. Bu da çarpma analizi sonuçlarında belli yanılgılara yol açabilir.

Bu analizler sonucunda elde edilen rijit duvar yer değiştirmesinin zamana göre değişimini veren grafikler Şekil 3.28'de verilmektedir.



Şekil 3.28. Başlangıç deformasyon modunun 1300 kN baskı plakası yükü ile üretilmiş 1 mm kalınlıklı parçada deforme olmuş ağ ve nominal ağ kullanılması durumlarında çarpmaya etkisi, (a) İkinci çeşit başlangıç deformasyon modu, (b) Üçüncü çeşit başlangıç modu

Şekilden de görüldüğü gibi başlangıç deformasyon modu çarpma davranışını önemli derecede etkileyebilir. Örneğin deforme olmuş ağ için ikinci çeşit başlangıç deformasyon modunda rijit duvar 150 mm eksenel yer değiştirirken, üçüncü çeşit deformasyon modunda yaklaşık 120 mm yer değiştirme yapmaktadır. Ayrıca ikinci çeşit başlangıç deformasyon modunda parça hem deforme olmuş ağ hem de nominal ağ için eğilmeye maruz kalmaktadır. Oysaki üçüncü çeşit başlangıç modunda eğilme oluşmamaktadır. Şekil 3.28'de deforme olmuş ağ ve nominal ağ arasındaki fark, önceden de belirtildiği gibi

deforme olmuş ağ için şekil verme esnasında yüksek baskı plakası yükünden dolayı parçanın boyunda meydana gelen kısalma sebebiyle olduğu düşünülmektedir.

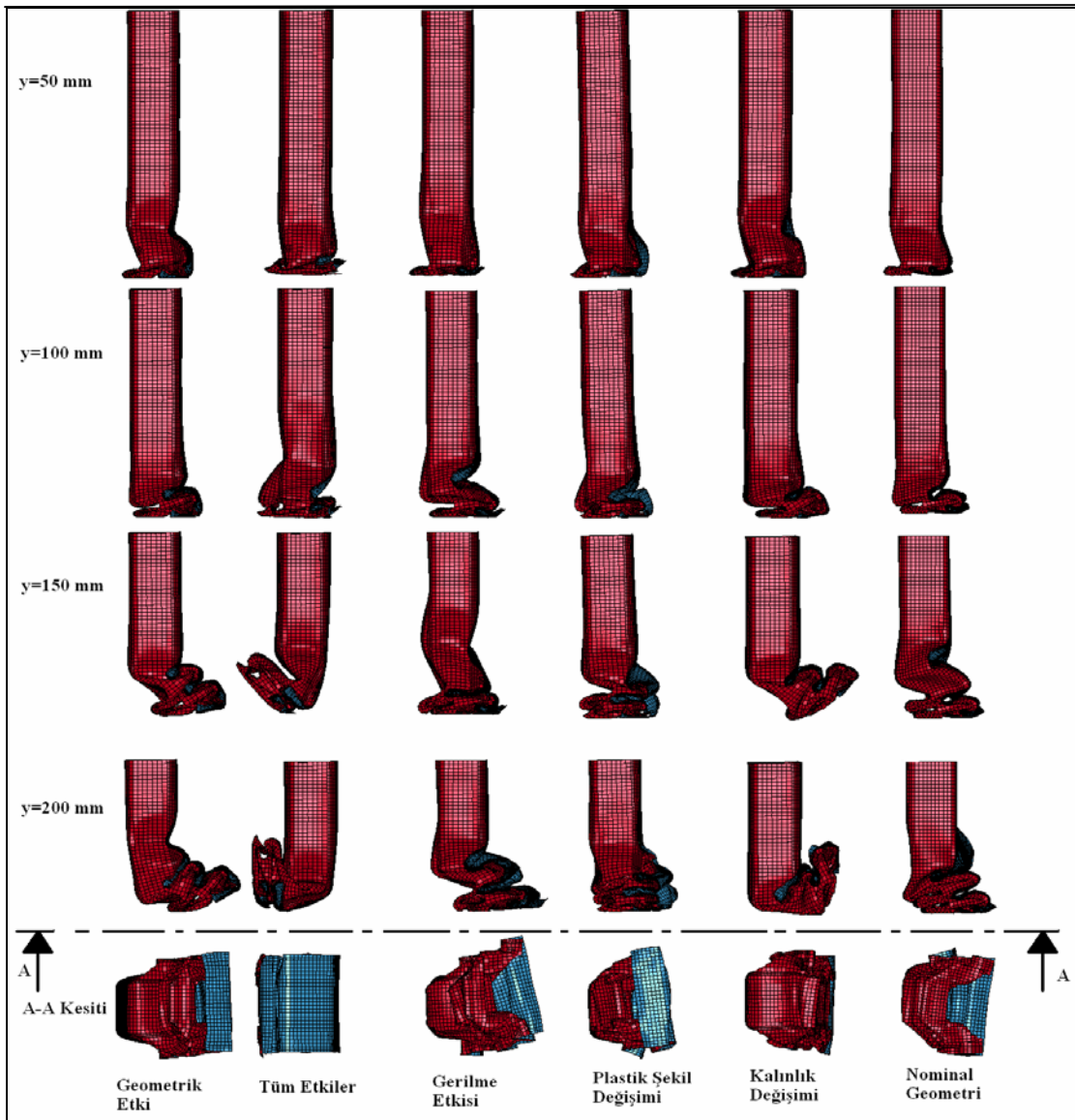
3.3. Statik Çarpma Analizleri

Statik çarpma analizlerinde rijit duvar, tanımlanan bir eğri boyunca hareket ettiği için her bir şekil verme etkisinin dikkate alındığı modellerde rijit duvarın zamanla yaptığı yer değiştirme aynı olmaktadır. Bu yüzden bu bölümde rijit duvar yer değiştirmesinin zamanla değişimini gösteren grafik verilmeyecektir. Bu bölümde yalnızca 1000 kN baskı plakası ile şekillendirilmiş 1 mm kalınlıklı parça için elde edilen sonuçlar verilecektir. Şekil 3.29'da statik analizler esnasında belirli rijit duvar yer değiştirme aralıklarında, şekil verme etkilerinin her biri için deformasyon modlarının görünüşü verilmiştir. 50 mm rijit duvar yer değiştirmesinde şekil verme etkilerinin her birinin esas alındığı modellere ait deformasyon modunun hemen hemen aynı olduğu, 100 mm yer değiştirmede ise tüm etkilerin dikkate alındığı modelde global bir eğilme başladığı görülmektedir. 200 mm yer değiştirme sonunda geometrik etki, tüm etkiler ve kalınlık değişimini dikkate alan modellerde global eğilmeler oluşmaktadır. En düzgün deformasyon ise nominal geometri ve plastik şekil değişimini esas alan modellerde gerçekleşmektedir. Rijit duvar çarpma kuvvetinin rijit duvar yer değiştirmesi açısından değişimini gösteren grafik Şekil 3.30'da verilmiştir. Şekil verme etkileri için rijit duvar kuvvetleri karmaşık bir değişim göstermektedir. Fakat yinede belli yer değişimi aralıklarında pik değerler verdiği görülmektedir. Statik çarpmada çarpma kuvveti başlangıç anı için plastik şekil değişimi ve tüm etkilerin dikkate alındığı modellerde diğer etkilerin esas alındığı modellerden yüksek çıkmaktadır. Gerilme, geometrik etki, kalınlık değişimi ve nominal geometrinin esas alındığı modeller başlangıç anında yakın çarpma kuvveti değerleri vermektedir.

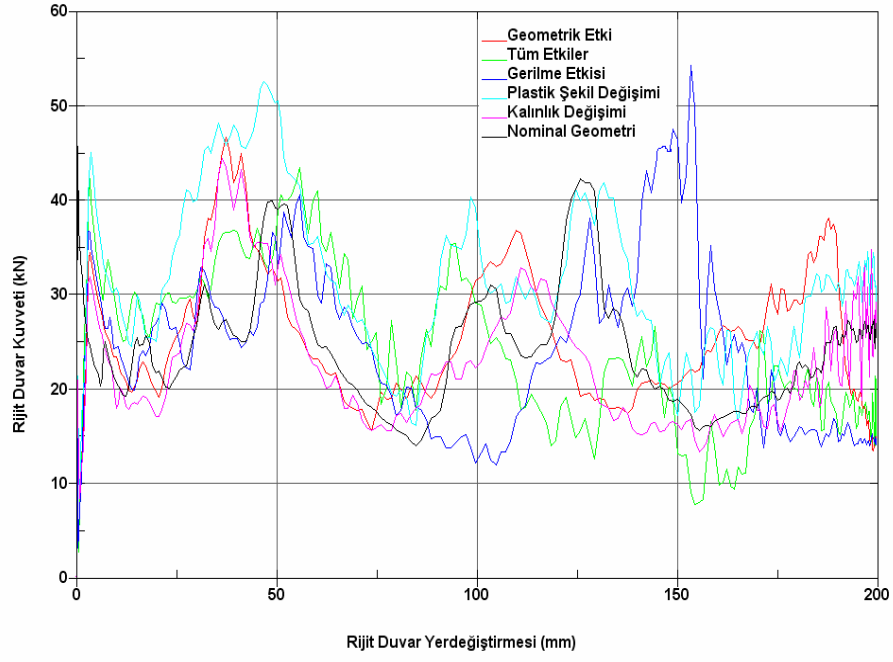
Statik çarpmada iç enerji değişimi Şekil 3.31'de verilmektedir. Şekilden, şekil verme etkilerinin statik çarpmaya etkisi, iç enerji değişimleri açısından açık bir şekilde görülebilmektedir. 200 mm'lik yer değişimi için en fazla iç enerji değişimi plastik şekil değişiminin dikkate alındığı modelde gerçekleşmiştir. Geometrik etki ve gerilmeyi esas alan modeller aynı iç enerji değişimi yaparken, tüm etkilerin dikkate alındığı model plastik şekil değişiminin esas alındığı modeldekinden sonra en fazla iç enerji değişimine sahiptir. Kalınlık değişimini esas alan model ise en az iç enerji değişimine sahip olmaktadır.

Nominal geometriye dayalı modelde ise kalınlık değişiminden sonraki ikinci en az i enerji değişimi olmaktadır.

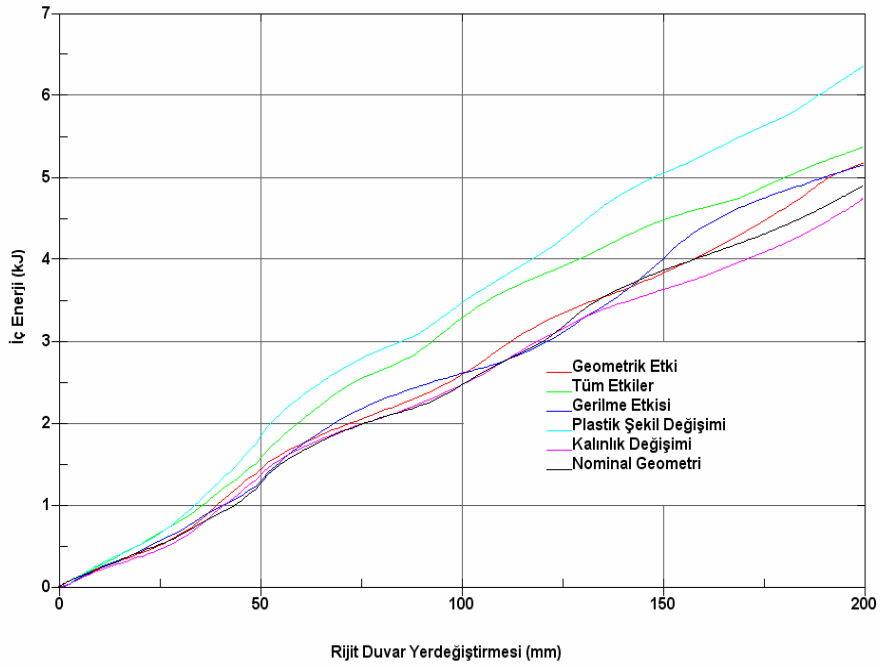
Ortalama arpma kuvvetinin rijit duvar yer deęiřirmesi ile deęiřimi Őekil 3.32’de verilmiřtir. Burada 50 mm mesafe içinde Őekil verme etkilerinin her birini esas alan modeller nominal geometrinin esas alındıęı modelden daha dūřuk ortalama çarpma kuvveti vermektedir. 50 mm’lik yer deęiřirme sonrasında ise plastik Őekil vermeyi temel alan model en yüksek ortalama çarpma kuvveti deęerlerini vermektedir.



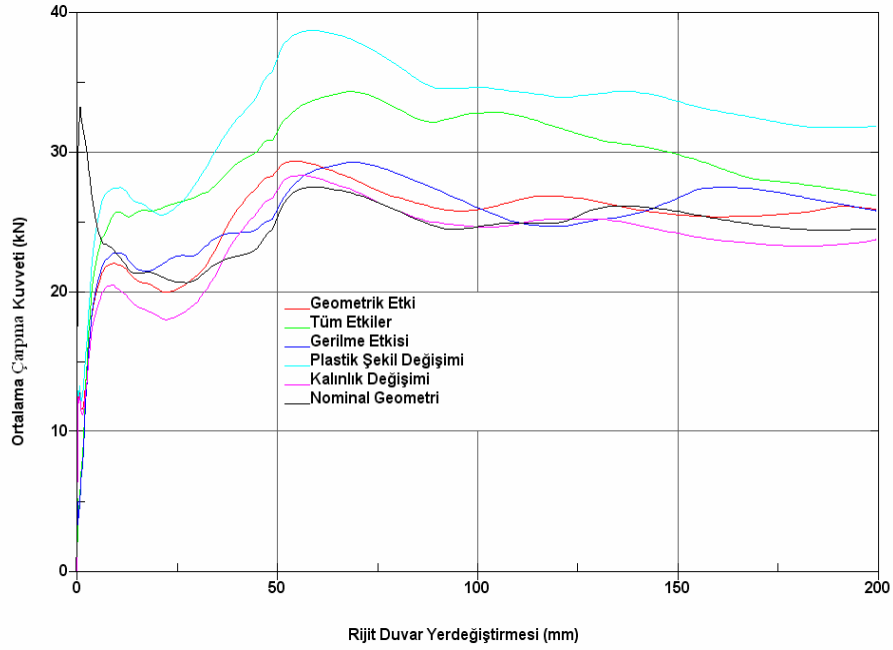
Şekil 3.29. Statik arpma analizlerinde rijit duvar yer değişirmesine bağlı deformasyon modları



Şekil 3.30. Çarpma kuvvetinin rijit duvar yer değiştirmesiyle değişimi



Şekil 3.31. İç enerjinin rijit duvar yer değiştirmesi ile değişimi

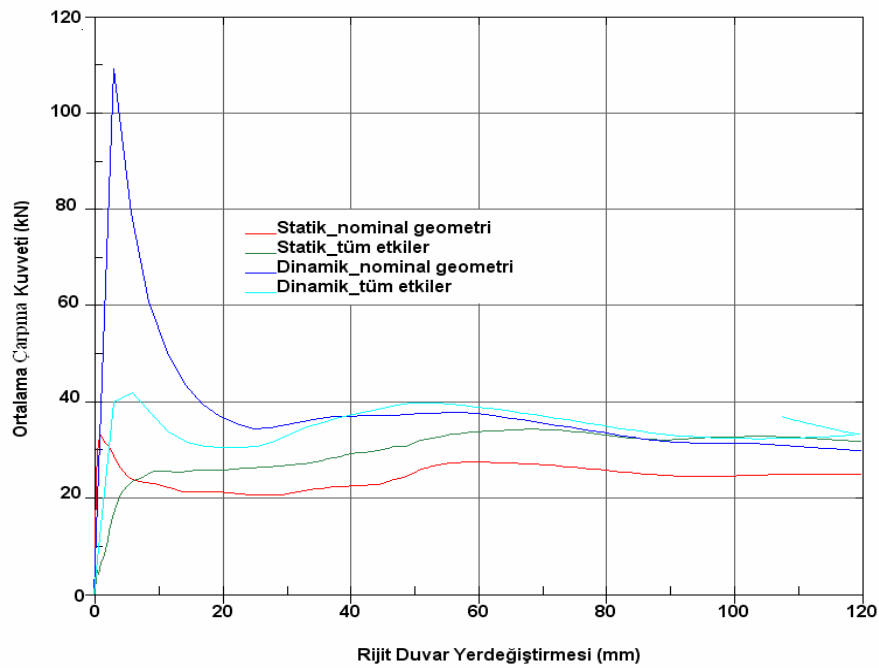


Şekil 3.32. Ortalama çarpma kuvvetinin rijit duvar yer değiştirmesi ile değişimi

Statik çarpma analizlerinden elde edilen grafiklerde, şekil verme etkilerinin çarpmaya yaptığı etkiler daha belirgin bir şekilde görülmektedir. Örneğin Şekil 3.31'de iç enerjinin rijit duvar yer değiştirmesine göre değişimini veren grafiğe bakıldığında 200 mm'lik rijit duvar yer değiştirmesi için plastik şekil verme etkisini içeren modelle gerçekleştirilen statik çarpma analizinde diğer modellere göre daha fazla iç enerji değişimi oluşmaktadır. En az iç enerji, dinamik çarpma analizlerinde olduğu gibi, kalınlık değişimini dikkate alan modelde oluşmaktadır. Çarpma kuvveti ve ortalama çarpma kuvveti (Şekil 3.30 ve Şekil 3.32) grafiklerinde ise başlangıç anında nominal geometriyi esas alan modelde çarpma kuvvetleri daha yüksek olmaktadır. Bunun nedeni, Şekil 3.8'de açıklandığı gibi, kanal boyunda şekil verme esnasında kapağa göre kısalma oluşmasıdır. Yinede başlangıç kısmında, plastik şekil değişimi diğer şekil verme etkilerine göre daha yüksek çarpma ve ortalama çarpma kuvvetine sebep olmaktadır. 50 mm rijit duvar yer değiştirmesinden sonraki kısımlarda, plastik şekil değişimi ve tüm etkilerin dikkate alındığı modellerde ortalama kuvveti diğer şekil verme ve nominal geometrinin esas alındığı modellerinkinden daha yüksek değerlerde seyretmektedir.

Statik çarpma analizlerinin dinamik analizlerle ortalama çarpma kuvveti açısından, tüm etkilerin ve nominal geometrinin esas alındığı, 1000 kN baskı plakası yüküyle şekillendirilmiş parça için karşılaştırıldığı grafik Şekil 3.33'de verilmiştir. Şekilde de

görüldüğü gibi dinamik çarpmada maksimum kuvvetin değeri statik çarpmaya göre çok yüksek olmaktadır. Nominal geometri bazında dinamik çarpmada maksimum ortalama çarpma kuvveti 110 kN olurken , statik analizde 30 kN olmaktadır. Statik analizlerde yük başlangıç anında parçaya dinamik analizlere göre çok düşük hızda uygulanmaktadır (Şekil 2.14). Bu sebeple parçanın yanal yüzeylerinde oluşan atalet kuvveti düşük kalmaktadır. Tüm şekil verme etkilerini içeren durumlarda da ortalama çarpma kuvveti statik çarpma analizleri için düşük değerler almaktadır.



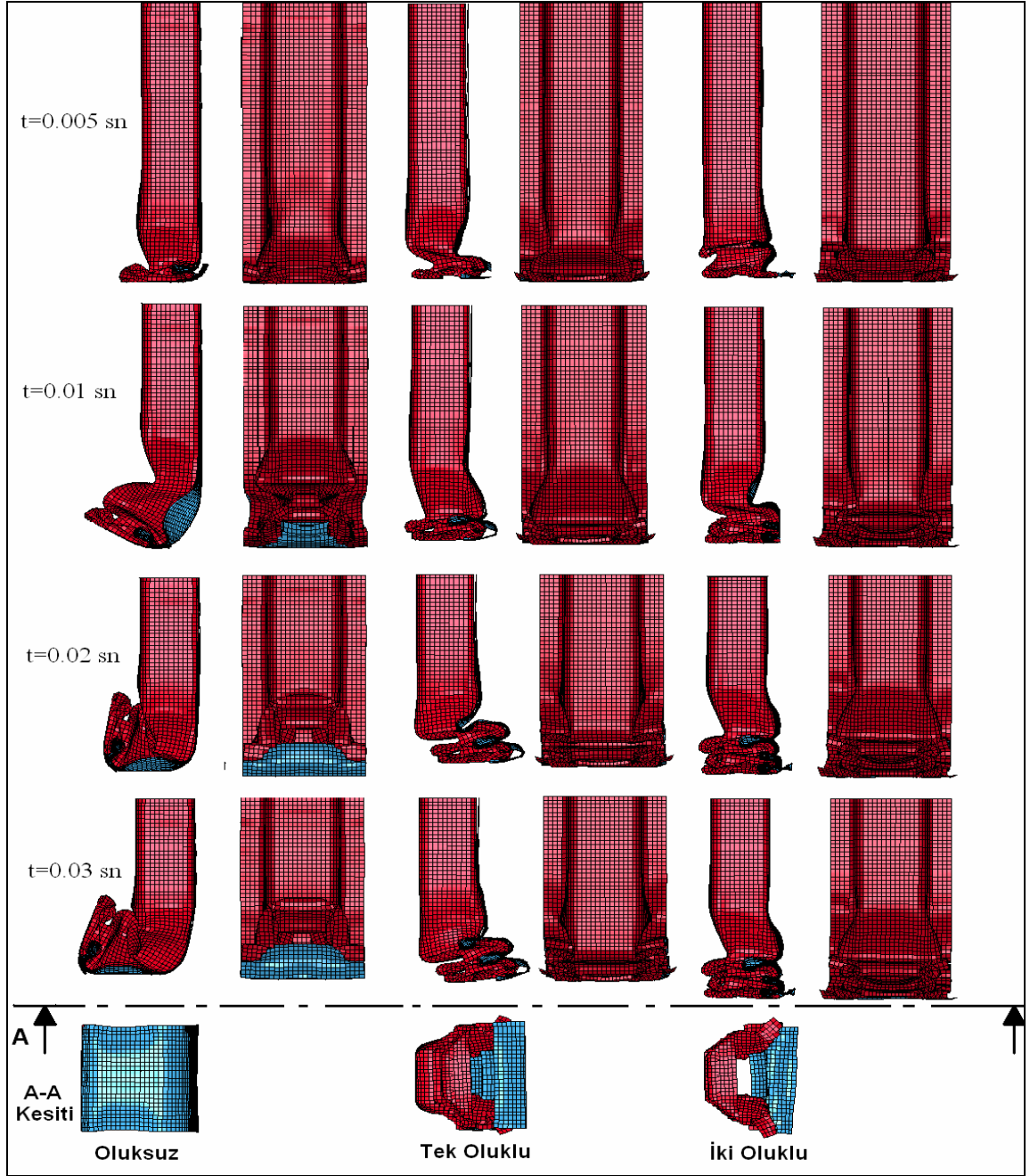
Şekil 3.33. Statik ve dinamik çarpma analiz sonuçlarının karşılaştırılması

3.4. Oluğun Deformasyon Şekline Etkisinin İncelenmesi

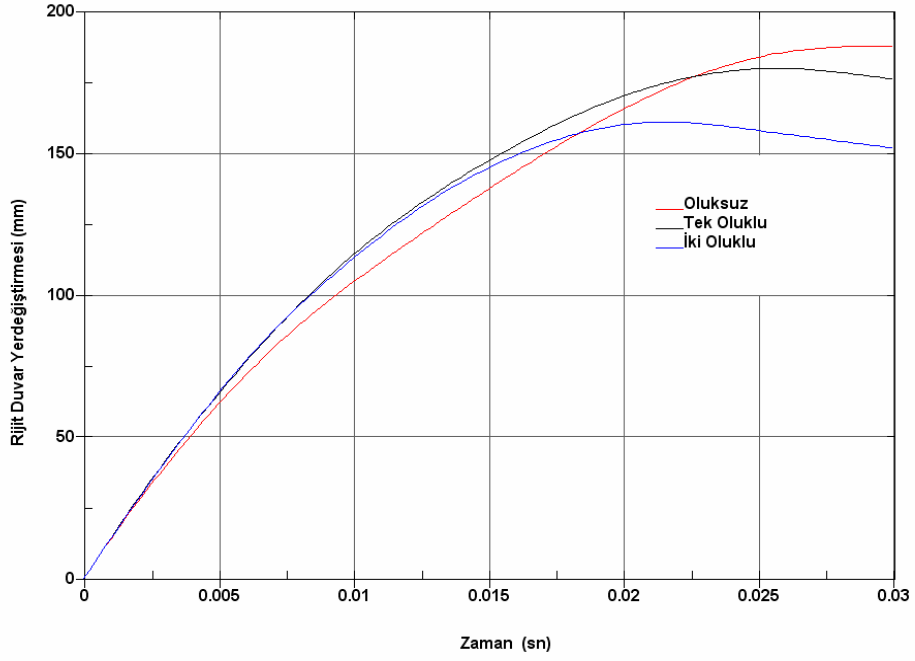
Parçanın ön uç kısmında kullanılan oluğun çarpma deformasyonunu nasıl etkilediğinin araştırıldığı bu kısımda, dinamik analizler 1 mm kalınlık parça için gerçekleştirilmiş ve nominal geometri ile oluşturulan ağ kullanılmıştır. Rijit duvarın 45 kg kütle ve 15 m/s'lik bir başlangıç hızına sahip olduğu kabul edilmiştir.

Oluksuz, tek oluklu ve iki oluklu parçalar için belli zaman aralıklarındaki deformasyon modları Şekil 3.34'te verilmiştir. Şekilde de görüldüğü gibi tek oluklu parça global bir eğilme yapmakta, iki oluklu parça ise çok daha düzenli bir deformasyon modu sağlamaktadır.

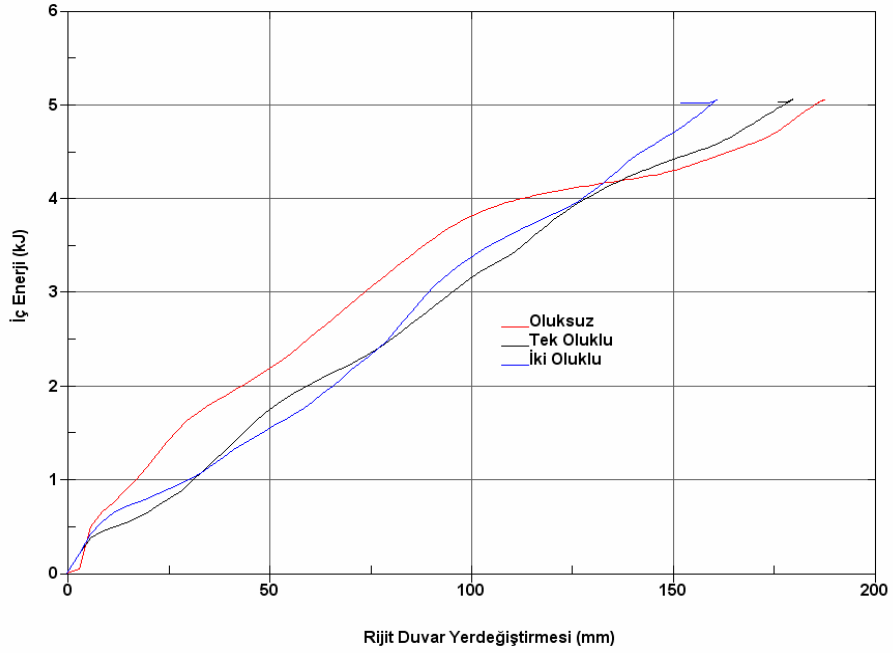
Şekil 3.35’de her durum için rijit duvar yer değiştirmesinin zamana göre değişimi, iç enerjinin rijit duvar yer değiştirmesi ile değişimi, rijit duvar kuvvetinin ve ortalama çarpma kuvvetinin rijit duvarla yer değiştirmesi ile değişimi verilmektedir. Şekil 3.35a grafiğinden görüleceği üzere oluksuz parça daha fazla rijit duvar yer değiştirmesine izin vermektedir. Bu durum oluksuz parçanın global olarak eğilmesinden kaynaklanmaktadır. Parça global olarak eğilmeye başladıktan sonra hem enerji sönümlemesi azalmakta (Şekil 3.35b) hem de diğerlerinden daha uzun sürede rijit duvarı durdurabilmektedir (Şekil 3.35c-d). Ayrıca arpma kuvveti grafiklerinden grldği gibi oluksuz parçanın maksimum çarpma kuvveti diğer iki parçaya göre yüksek olmaktadır. Tek oluklu ve iki oluklu parçada maksimum çarpma kuvveti hemen hemen aynı değerleri vermekte ve düz bir davranış sergilemektedir (Şekil 3.35c). Buradan oluğun parçanın aksenal deformasyon modunun kararlılığını arttırdığı ve maksimum çarpma kuvvetini dşrdği sonuuna varılmaktadır.



Şekil 3.34. Parçanın oluksuz, tek oluklu ve iki oluklu olması durumunda oluşan deformasyon modları



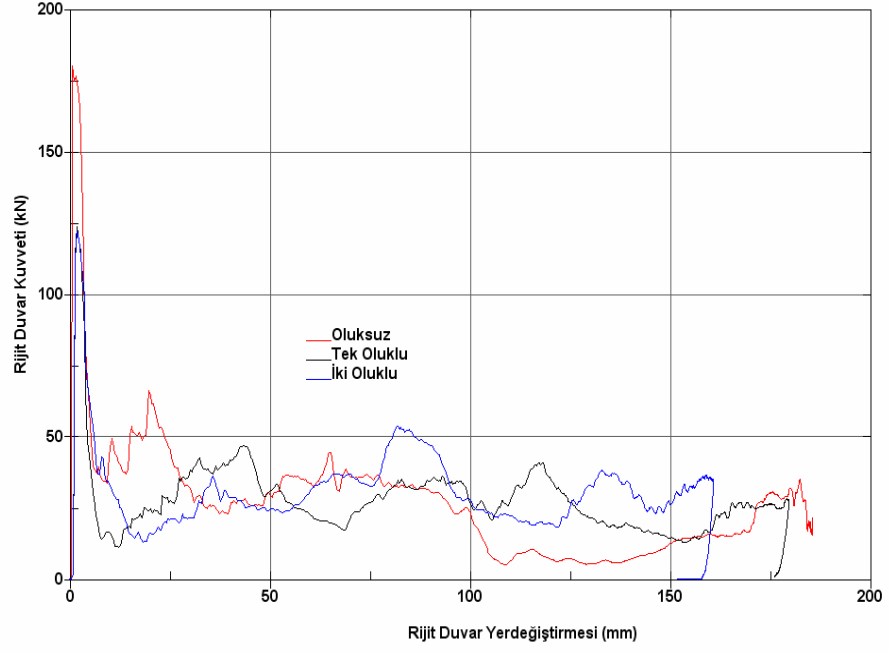
(a)



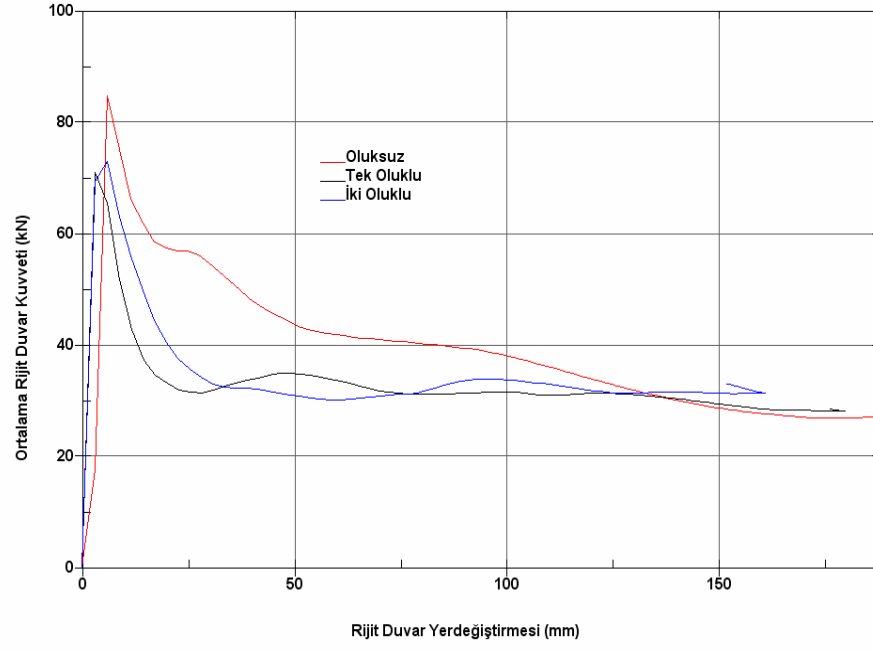
(b)

Şekil 3.35. Parçada oluk bulunmasının etkileri, (a) Rijit duvarın yer değiştirmesi, (b) İç enerji değişimi, (c) Rijit duvar kuvveti, (d) Ortalama çarpma kuvveti verilerinin karşılaştırılması

Şekil 3.35'in devamı;



(c)

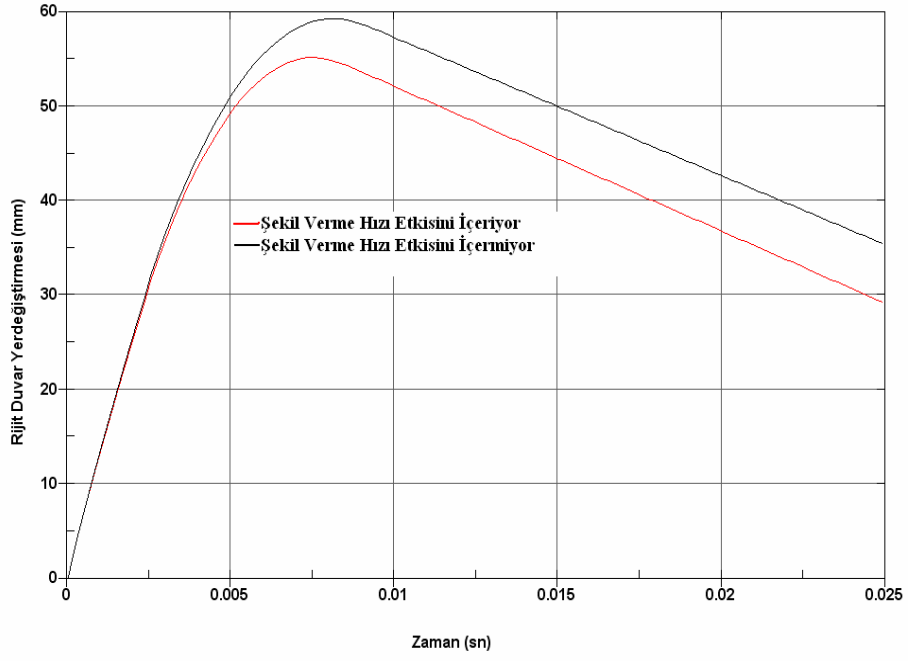


(d)

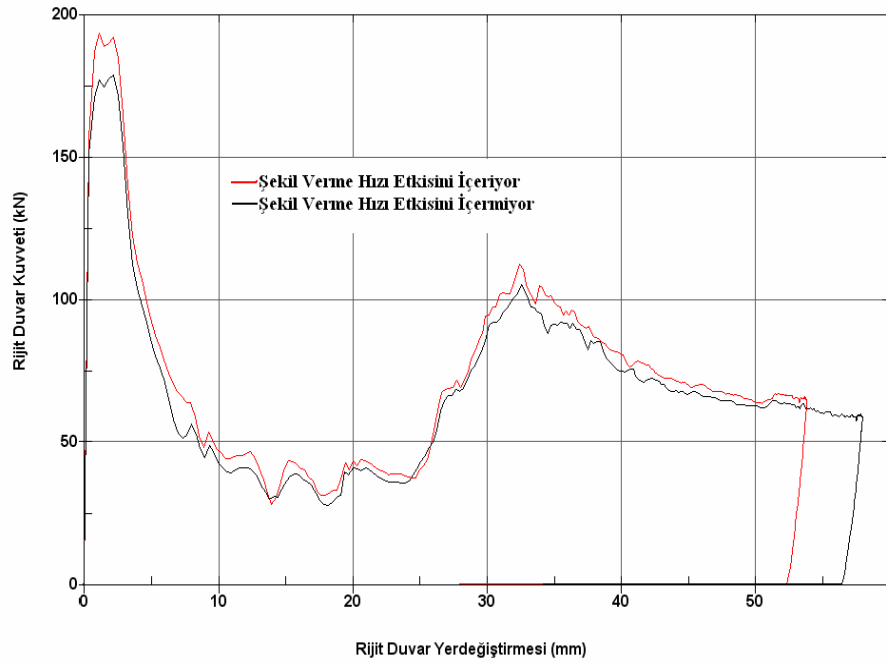
3.5. Şekil Verme Hızının Çarpma Davranışına Etkisinin İncelenmesi

Nominal geometriye sahip 1.5 mm kalınlıklı parça için şekil verme hızının, kullanılan malzeme ve malzeme modeli açısından çarpma davranışına etkisini gösteren grafikler aşağıda verilmektedir. Rijit duvar 35 kg kütle ve 15 m/s'lik hıza sahiptir.

Şekil verme hızıyla, Şekil 2.2'den de görüldüğü gibi, DP 430 çeliğinin mukavemeti artmaktadır. Bu sebeple çarpma modelinde, şekil verme hızı modele ilave edilince doğal olarak parçanın daha rijit davranış sergilemesi beklenmektedir. DP 430 çeliği için şekil verme hızının ilave edildiği ve edilmediği durumlar için, rijit duvar yer değiştirmesinin zamanla değişimi Şekil 3.36a'da, rijit duvar kuvvetinin rijit duvar yer değişimine göre değişimi Şekil 3.36b'de verilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere şekil verme hızı dikkate alındığında parça, beklenildiği gibi, şekil verme hızı dikkate alınmayan parçaya göre daha rijit bir davranış sergilemektedir. Şekil verme hızı dikkate alınan parça, şekil verme hızı dikkate alınmayan parçaya göre yaklaşık 10 mm daha az rijit duvar yer değiştirmesine izin vermekte ve %8-10 arası daha fazla maksimum çarpma kuvveti oluşturmaktadır. Simunovic'in [29] tam araç modeli üzerinde şekil verme hızlarının etkisini incelemek için yaptığı çalışmada, şekil verme hızının ilave edildiği modelde maksimum çarpma kuvveti artarken aracın durma zamanı ve mesafesi düşmektedir. Bu sonuç burada yapılan çalışmadan elde edilen sonucu desteklemektedir.



(a)



(b)

Şekil 3.36. Şekil verme hızının çarpmaya davranışına etkisi, (a) Rijit duvarın zamanla yaptığı yer değiştirme eğrisi, (b) Rijit duvar kuvvetinin rijit duvar yer değiştirmesi ile değişimi

4. SONUÇLAR

Şekil verme işleminin çarpma performansı üzerine etkilerinin incelendiği bu tez çalışmasında şu sonuçlara varılmaktadır.

- Şapka kesitli parçalar için tek adımlı derin çekme işleminde en büyük kalınlık incelmeleri ve plastik şekil değişimleri kanalın yanal yüzeylerinde ve oluğun çevresinde olmuştur.
- Şekil verme etkileri parçanın çarpma performansını önemli derecede etkilediği ortaya çıkmıştır.
- Yapılan çalışmalardan şekil verme işleminden gelen plastik şekil değişimi ve kalınlık değişiminin parçanın çarpma davranışı üzerinde etkili olduğu tespit edilmiştir. Plastik şekil değişimi parçanın daha rijit davranmasına yol açarken, kalınlık incelmesi parçanın rijitliğini azaltmaktadır.
- Artık gerilmelerin diğer şekil verme etkilerine göre çarpmaya önemli derecede etkisi yoktur.
- Geometrik etkinin düşük baskı plakası yüklemelerinde etkin olduğu ve parçanın rijitliğini azaltıcı yönde etki yaptığı tespit edilirken, yüksek baskı plakası yüklemelerinde ise etkisi olmadığı görülmüştür.
- Baskı plakası yükünün artması ile şekil verme etkilerinin büyüklüğü artmaktadır. Buna paralel olarak, kalınlık değişimi, artık gerilme ve plastik şekil değişiminin bireysel olarak çarpmaya etkisi artmaktadır. Fakat baskı plakası yükünün artması ile deforme olmuş ağır kullanıldığı analizlerde, tüm etkiler açısından çarpma performansında önemli bir değişim oluşmamaktadır. Nominal geometrinin kullanıldığı analizlerde ise tüm etkiler açısından

belli bir baskı plakası yüküne kadar çarpma performansında önemli bir fark görülmemesine rağmen, daha yüksek baskı plakası yüklemelerinde büyük farklar ortaya çıkmaktadır.

- Belli bir baskı plakası yüküne kadar tüm etkiler açısından deforme olmuş ağ ve nominal ağ çarpma analizlerinde aynı davranışı sergilemiştir. Fakat daha yüksek baskı plakası yüklemelerinde nominal ağ ve deforme olmuş ağ arasında farklı bir davranış ortaya çıkmıştır. Bu farkın yüksek baskı plakası yüklemelerinde kanalın boyunda meydana gelen kısaltmalar sebebiyle ortaya çıktığı düşünülmektedir.
- Şekil verme etkilerinin statik olarak çarpmaya etkisinin araştırıldığı analizlerden elde edilen sonuçlar, dinamik analizlerden elde edilen sonuçlara benzer eğilimler vermiştir.
- Dinamik çarpma analizlerindeki ortalama çarpma kuvveti, statik çarpma analizlerinden elde edilen ortalama çarpma kuvvetinden çok daha yüksek çıkmaktadır. Bu durum atalet kuvvetlerinin ve şekil değiştirme hızının dinamik çarpma üzerinde önemli etkiler sahip olduğunu göstermektedir.
- Kanalın ön kısmına yakın oluk kullanılması çarpma anında parçanın deformasyon modunu düzgülendirdiği ve maksimum çarpma kuvvetini önemli bir miktarda azalttığı belirlenmiştir. Ayrıca oluk sayısının artması ile deformasyon modu daha da düzgüleneşmektedir. Eğer parçanın tüm uzunluğu boyunca belli aralıklarla oluk kullanılırsa ideal bir eksenel deformasyon modunun meydana geleceği beklenilmektedir.
- Şekil verme hızı çarpma anında parçanın mukavemetini arttırmaktadır ve daha rijit bir davranış sergilemesine yol açmaktadır.
- Çarpma başlangıcındaki deformasyon modunun parçanın çarpma davranışına önemli etkisi olduğu görülmüştür.

5. ÖNERİLER

- Baskı plakası yüklemelerinin artmasıyla oluşan şekil verme etkilerinin statik analizler üzerine etkisi araştırılabilir.
- Bu tez çalışmasında hem dinamik hem de statik çarpma analizleri ekspilisit olarak gerçekleştirilmiştir. Ayrıca şekil verme etkileri hem statik hem de dinamik impilisit olarak incelenebilir. Böylece ekspilisit ve impilisit çözüm arasındaki farkların çarpma analizleri açısından karşılaştırılma olanağı bulunmuş olur.
- Tez içinde yüksek baskı plakası yüklemelerinde kanalın boyundaki kısalma sebebiyle çarpma esnasında deformasyon modu ve çarpma kuvvetinde önemli değişiklikler olduğu tespit edilmiştir. Bu sebeple çarpma analizlerinde kanalın veya kapağın birbirlerine göre boy farklarının etkileri üzerine bir optimizasyon çalışması gerekmektedir. Ayrıca kanalın üzerinde kullanılan oluğun bir benzerinin kapak üzerinde olmasının çarpma performansına etkisinin ne olduğu ve kanal üzerindeki oluk sayısı ile oluklar arasındaki mesafenin etkisi araştırılabilir.
- Burada statik çarpma analizlerinde şekil verme etkileri sadece deforme olmuş ağ için incelenmiştir. Aynı analizler nominal ağ üzerinden de gerçekleştirilebilir. Elde edilen sonuçlar nominal ağ ve deforme olmuş ağ ile yapılan dinamik çarpma analizleri arasında meydana gelen farkları daha iyi anlama imkanı sağlayabilir.
- Yine bu tez çalışmasında şekil verme etkilerinin ya bireysel olarak ya da tümü birlikte etkimesi durumu için çarpma analizleri gerçekleştirilmiştir. Çarpma analizlerinde plastik şekil değişimi-gerilme, kalınlık değişimi-gerilme ve plastik şekil değişimi-kalınlık değişimi gibi şekil verme etkilerinin çeşitli varyasyonlarının çarpmaya etkimesi inceleyebilir. Elde edilen sonuçlardan şekil verme etkilerinin birbirleriyle olan etkileşimleri hakkında bilgi elde edilebilir.

- Şekil verme etkilerinin ilave edildiği durumda çeşitli kütle ve hızdaki rijit duvarla çarpma analizleri gerçekleştirilebilir. Böylece rijit duvar hızı ve kütlelerinin değiştirilmesinin şekil verme etkileri altında parçanın çarpma davranışına etkileri belirlenebilir.
- Tez boyunca yapılan tüm statik ve dinamik çarpma analizleri eksnel olarak gerçekleştirilmiştir. Bu durum bazı şekil verme etkilerinin çarpma üzerine gerçek performanslarını etkilemiş olabilir. Bu sebeple rijit parçaya duvar belli açılarla çarptırılarak, şekil vermenin çarpma üzerine etkileri hakkında farklı bir bakış açısı sağlanabilir.
- Sonuçlar kısmında da belirtildiği gibi yüksek baskı plakası yüklemelerinde deforme olmuş ağ ve nominal ağ arasında tüm şekil verme etkilerin içerildiği durum açısından önemli farklar çıkmaktadır. Bunun nedeninin araştırılmasına yönelik derin çekme analizinin dizayn aşamasında, kanal boyunda meydana gelecek kısaltmalar hesaba katılarak saç parça biraz uzun olacak şekilde tasarlanır. Derin çekme analizinden sonra kanal istenilen nominal ölçülere gelmesi için kanatçıklarının yanında ön ve arka ucundan kırpma analizine tabi tutulabilir. Bu durum için çarpma analizleri gerçekleştirilerek yüksek baskı plakası yüklemeleri altında nominal ve deforme olmuş ağ arasındaki farkın nedenleri araştırılabilir.
- Çalışmada derin çekme analizi sonunda kanal kalıptan çıkarılmadan kapak monte edilmiştir. Akabinde geri yaylanma analizi gerçekleştirilmiştir. Fakat gerçekte kanal kalıptan çıkarıldıktan sonra kenarları tekrar bastırılıp kapak monte edilir. Yani kanal kalıptan çıktıktan ve kapak eklendikten sonra olmak üzere iki farklı geri yaylanma olayına maruz kalır. Gerçekte yapılan prosedüre göre tezdeki analizler tekrarlanabilir ve bu sayede iki yöntem arasındaki farklar belirlenebilir.

6. KAYNAKLAR

1. Langseth M., Crashworthiness of Light-Weight Automotive Structures 2001–2006, NorLight Conference, 2003, Trondheim.
2. Huh H., Kim K.P., Kim S.H., Song J.H., Kim H.S. ve Hong S.K., Crashworthiness Assessment of Front Side Members in an Auto-Body Considering the Fabrication Histories, International Journal of Mechanical Science, 45 (2003) 1645–1660.
3. Chen G., Liu S.D., Knoerr L., Sato K. ve Liu J., Residual Forming Effects on Full Vehicle Frontal Impact and Body-in-White Durability Analyses, SAE 2002 World Congress, Detroit, Michigan, March 4-7, 2002, Paper No:2002-01-0640.
4. Dutton T., Iregbu S., Sturt R., Kellicut A., Cowell B. ve Kavikondala K., The Effect of Forming on the Crashworthiness of Vehicles with Hydroformed Frame Siderails, SAE, Paper No:1999-01-3208 (1999).
5. Oliveira D.A., Worswick M.J., Grantab R., Williams B.W. ve Mayer R., Effect of Forming Process Variables on the Crashworthiness of Aluminum Alloy Tubes, International Journal of Impact Engineering, 32 (2006) 826–846.
6. Lee M.G., Han C.S., Chung K., Youn J.R. ve Kang T.J., Influence of Back Stresses in Parts Forming on Crashworthiness, Journal of Materials Processing Technology, 168 (2005) 49–55.
7. Broene W., Improving Crash Analysis Through the Estimation of Residual Strains Brought About by Forming Metal, 7. International LS-DYNA Users Conference, 2002, Dearborn, Michigan, 77-96.
8. Dutton T., Sturt R., Richardson P. ve Knight A., The Effect of Forming on Automotive Crash Results, SAE, Paper No:2001-01-3050 (2001).
9. Simunovic S., Shaw J. ve Aramayo G.A., Steel Processing Effects on Impact Deformation of UltraLight Steel Auto Body, SAE, Paper No:2001-01-1056 (2001).
10. Nagel G., Impact and Energy Absorption of Straight and Tapered Rectangular Tubes, PhD Thesis, The School of Civil Engineering Queensland University, Queensland, 2005.

11. Alghamdi A.A.A., Collapsible Impact Energy Absorbers: an Overview, Thin-Walled Structures, 39 (2001) 189–213.
12. Lu G. ve Yu T., Energy Absorption of Structures and Materials, Woodhead Publishing Limited, Cambridge, 2003.
13. Jones N., Structural Impact, Cambridge University Press, Cambridge, 1989.
14. Andrews K.R.F., England G.L. ve Ghani E., Classification of the Axial Collapse of Cylindrical Tubes under Quasi-Static Loading, International Journal of Mechanical Science, 25, 9-10(1983) 687-696.
15. Çolakoğlu A.M., Mechanical Energy Absorption Using Tube Inversion, Doktora Tezi, O.D.T.Ü., Ankara, 1996.
16. Miscow F. ve Al-Qureshi H.A., Mechanics of Static and Dynamic Inversion Processes, International Journal of Mechanical Science, 39, 2 (1997) 147-161.
17. Jiang P., Wang W. ve Zhang G.J., Size Effects in the Axial Tearing of Circular Tubes During Quasi-Static and Impact Loadings, International Journal of Mechanical Science, 32 (2006) 2048–2065.
18. Reyes A., Langseth M. ve Hopperstad O.S., Crashworthiness of Aluminum Extrusions Subjected to Oblique Loading: Experiments and Numerical Analyses, International Journal of Mechanical Science, 44 (2002) 1965-1984.
19. Chen W. ve Wierzbicki T., Relative Merits of Single-Cell, Multi-Cell and Foam-Filled Thin-Walled Structures in Energy Absorption, Thin-Walled Structures, 39 (2001) 287-306.
20. Anonim, 2001, Theory of ANSYS (Help files), ANSYS.
21. Yoshida T., Katayama T., Hashimoto K. ve Kuriyama Y., Shape Control Techniques for High Strength Steel in Sheet Metal Forming, Nippon Steel Technical Report, No. 88, July 2003.
22. Stein J., The Effect of Process Variables on Sheet Metal Springback, SAE, Paper No: 982299 (1998).
23. Hallquist J.O., LS-DYNA Theoretical Manual, Livermore Software Technology Corporation, 1998.
24. Anonim, 2002, LS-POST v 1.0 (manual).

25. Zhong Z. H., Finite Element Procedures for Contact-Impact Problems, Oxford University Press, Oxford, 1993.
26. Joseph C.D., Experimental Measurement and Finite Element Simulation of Springback in Stamping Aluminum Alloy Sheets for Auto-Body Panel Application, PhD Thesis, Mississippi State University, Mississippi, 2003.
27. Krusper A., Influences of the Forming Process on the Crash Performans- Finite Element Analysis, MSc Thesis, Chalmers University of Technology, Göteborg, 2003.
28. Fairchild M., Jankowski U., Sans M., General Considerations for the Influence of Mesh Density in LS-DYNA, 5th European LS-DYNA User Conference, May 2005, Birmingham, 3-46.
29. Simunovic S., Shaw J. ve Aramayo G.A., Material Modeling Effects on Impact Deformation of Ultralight Steel Auto Body, SAE, Paper No: 2000-01-2715 (2000).
30. Maker B.N. ve Zhu X., Input Parameters for Metal Forming Simulation Using LS-DYNA, Livermore Software Technology Corporation, October 2000.
31. Maker B.N., Input Parameters for Springback Simulation Using LS-DYNA, Livermore Software Technology Corporation, 2001.
32. Maker B.N. ve Zhu X., A Procedure for Springback Analysis Using LS-DYNA, Livermore Software Technology Corporation, 2003.
33. Maker B.N., Implicit Springback Calculation Using LS-DYNA, 5th International *LS-DYNA* Users Conference, 1998, Southfield, Michigan.
34. Anonim, 2001, LS-DYNA Keyword User's Manual, Livermore Software Technology Corporation, Vol. I.
35. Tarigopula V., Langseth M., Hopperstad O.S. ve Clausen A.H., Axial Crushing of Thin-walled High-strength Steel Sections, International Journal of Impact Engineering, 32 (2006) 847–882.
36. Kim H.S. ve Wierzbicki T., Closed-Form Solution for Crushing Response of Three-dimensional Thin-walled “S” Frames with Rectangular Cross-sections, International Journal of Impact Engineering, 30 (2004) 87–112.
37. Dagson N., Influence of the Forming Process on the Crash Response of a Roof Rail Component, MSc Thesis, Linköping University, Linköping, 2001.

38. Nagel G.M. ve Thambiratnam D.P., Computer Simulation and Energy Absorption of Tapered Thin-Walled Rectangular Tubes, Thin-Walled Structures, 43 (2005) 1225–1242.
39. Nagel G.M. ve Thambiratnam D.P., A Numerical Study on the Impact Response and Energy Absorption of Tapered Thin-Walled Tubes, International Journal of Mechanical Sciences, 46 (2004) 201–216.
40. Cowell B., The Effect of Forming and Parameter Mapping on Further Simulation, 6. International LS-DYNA Users Conference, Detroit, 2000.

ÖZGEÇMİŞ

Recep GÜMRÜK; 1980 yılında TRABZON'un Yomra ilçesinde doğdu. İlk ve orta okulu Yomra'da tamamladı. 1997 yılında Yomra lisesinden mezun oldu ve aynı yıl Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği bölümünü kazandı. 2001 yılında bölüm birincisi olarak mezun oldu ve Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim dalında yüksek lisans programına kaydoldu. 2003 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsünde araştırma görevlisi olarak göreve başladı. 2004-2005 eğitim yılını Socrates Erasmus programı vasıtasıyla Belçika'nın Ghent üniversitesinde tamamladı. İngilizce bilmektedir. Halen araştırma görevlisi olarak görev yapmaktadır.