

EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

(YÜKSEK LİSANS TEZİ)

**PLASTİK ŞEKİL VERME İLE MONTE EDİLEN
YATAK SİSTEMLERİNDE OLUŞAN KUVVETLERİN
SAPTANMASI**

Serkan ÇAKIR

Tez Danışmanı : Doç. Dr. K. Turgut GÜRSEL

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Bilim Dalı Kodu : 625.03.00

Sunuş Tarihi : 19.01.2011

Bornova-İZMİR

2011

Serkan ÇAKIR tarafından **Yüksek Lisans** tezi olarak sunulan “**Plastik Şekil Verme İle Monte Edilen Yatak Sistemlerinde Oluşan Kuvvetlerin Saptanması**” başlıklı bu çalışma E.Ü. Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği ile E.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Eğitim ve Öğretim Yönergesi’nin ilgili hükümleri uyarınca tarafımızdan değerlendirilerek savunmaya değer bulunmuş ve 19.01.2011 tarihinde yapılan tez savunma sınavında aday oybirliği/oyçokluğu ile başarılı bulunmuştur.

Jüri Üyeleri:

İmza

Jüri Başkanı	: Doç. Dr. K. Turgut GÜRSEL	
Raportör Üye	: Doç. Dr. Hasan YILDIZ	
Üye	: Prof. Dr. Ramazan KARAKUZU	

ÖZET

PLASTİK ŞEKİL VERME İLE MONTE EDİLEN YATAK SİSTEMLERİNDE OLUŞAN KUVVETLERİN SAPTANMASI

ÇAKIR, Serkan

Yüksek Lisans Tezi, Makina Mühendisliği Bölümü

Tez Yöneticisi: Doç. Dr. K. Turgut GÜRSEL

Ocak 2011, 166 sayfa

Taşıtlarda kullanılan yönlendirme ve süspansiyon sistemleri, taşıtların sürüş güvenliğini sağlayan elemanlardır. Bu sistemlere ait mekanizmaların kusursuz olarak çalışabilmesi, içerdikleri farklı işlevlere sahip birçok küresel yatağa bağlıdır. Küresel yataklar boşluksuz olarak, hatta bir miktar sıkı birleştirilerek ilgili sisteme montajları yapılır. Diğer yandan aşırı sıkılık, yüksek moment değerlerine ve dolayısıyla ek işlemlere neden olurken; düşük sıkılık mafsal içerisinde boşluk oluşturmaktadır. Her ikisi de istenmeyen durumlardır. Uzun ömürlü, az sürtünmeli ve istenen çalışma açılarını her yol koşulunda sağlayacak küresel yatak tasarımı, uzun test süreçleri ve birçok tekrar içeren örnek imalatların sonrasında elde edilebilmektedir. Taşıtların yönlendirme sistemlerinin önemli uzuvları olan rotiller de, küresel yatak tasarımlarının sonrasında, imalat yöntemlerinden plastik şekil verme ile montajı yapılarak üretilir.

Bu çalışmada, hareket iletimini sağlayan parçanın (rotil) imalatı sırasında kullanılan, plastik şekil vermeyi temel alan imal yöntemlerinden haddeleme işleminin özel bir alt bölümü olan **sıvama** prosesi ayrıntılı olarak incelenmiştir. Sıvama işlemi sonucu yatak sistemleri içerisinde oluşan basma kuvvetleri, belirli sayısal simülasyonlar aracılığıyla çeşitli parametreleri (sıvama anma basıncı, röle dairesel hızı) değiştirilerek farklı değerlerdeki etkileri irdelenmiştir. Geliştirilen sıvama simülasyonundan elde edilen sonuçlar, bu tez kapsamında geliştirilmiş test yönteminden elde edilen sonuçlar ile doğrulanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Plastik şekil verme, sıvama, sıkıştırma kuvveti, rotil, küresel yatak.

ABSTRACT**DETERMINATION OF RESIDUAL FORCES IN BEARING
SYSTEMS ASSEMBLED BY PLASTIC DEFORMATION**

ÇAKIR, Serkan

MSc. Thesis, Mechanical Engineering Department.

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. K. Turgut GÜRSEL

January 2011, 166 pages

Steering and suspension systems are components that provide driving safety in vehicles. Correct working of the mechanisms of these systems, consist of many ball-joints that have different functions. The ball-joints are assembled to systems in press-fit without any gaps, but even with residual forces. On the other hand excessive tightness causes high moments, which requires additional processes of manufacturing. But low tightness also creates gaps in joints. None of these conditions are desired. Manufacturing a ball-race that shall have long-life, low-friction and provides required working angles in every road condition, can be designed after long test processes and sample productions including lots of improvements. Suspension ball-races that are important elements of steering systems in vehicles can be manufactured by assembling with plastic deformation after designing the ball-joint.

The edge-form rolling process is used in the manufacturing of the suspension ball-race supplying the motion transmission. In this study, this process that is a subsection of rolling process of manufacturing methods based on plastic deformation was examined comprehensively. Effects of pressure forces occurring in bearing systems after edge-form rolling were studied at different values by changing various parameters (operation pressure of edge form rolling, annular velocity of roller) by means of specific numerical simulations. The results obtained from the developed edge-form rolling simulation were confirmed by results of the test method developed in this research.

Key Words: Plastic deformation, edge-form rolling, residual forces, suspension ball-race, ball-joint.

TEŞEKKÜR

Tez sürecinde sonlu elemanlar metodunun endüstriyel uygulamalarında bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım Müh. Dr. Onur KIRLI'ya, projenin nümerik simülasyon kısmında FEA departmanı imkânlarından yararlanmamı sağlayan Ozan CENGİZ ve Musa ÖZÇELİK'e, proje süresinde Ege Üniversite Biyomekanik Laboratuvarının imkânlarından yararlanmamı sağlayan ve kıymetli görüşlerinden yararlandığım Doç. Dr. Hasan YILDIZ'a, TÜBİTAK projesinin ve tezin yapılandırılma aşamasında bana yardımcı olan değerli tez danışmanım Doç. Dr. Turgut K. GÜRSEL'e teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Bu tezin deneysel bölümü, TÜBİTAK 1002 Hızlı Destek Programı'ndan 109M758 numaralı projemize verilen destek aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. Tezin yazarı ve danışmanı TÜBİTAK'a verilen bu destek kapsamında teşekkür ederler.

İÇİNDEKİLERSayfa

ÖZET	v
ABSTRACT	vii
TEŞEKKÜR	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	xv
ÇİZELGELER DİZİNİ	xxvii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xxviii
1. GİRİŞ	1
1.1 Araştırmanın Amacı.....	1
1.2 Literatür Araştırması.....	3
2. PLASTİK ŞEKİL VERME	9
2.1 Plastik Şekil Verme Yöntemlerinin Sınıflandırılması	10
2.1.1 Kütle üretimi.....	10
2.1.2 Sac levha (boru) üretimi	15
3. SÜSPANSİYON SİSTEMİ.....	25
3.1 Süspansiyon Sistemi Elemanları.....	28

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
3.1.1 Yaylar	28
3.1.2 Amortisörler	28
3.1.3 Denge (viraj) çubuğu	30
3.1.4 Salıncak kolları	32
3.1.5 Rotil	34
4. İMALAT ve SIVAMA	37
4.1 Küresel Bağlantılar ve Rotilin Tasarım Süreci	37
4.2 Küresel Bağlantılarda İmalat Süreci	38
4.4 Küresel Bağlantıya Gelen Yükler	44
5. SIVAMA İŞLEMİNE SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE YAKLAŞIM	46
5.1 Sonlu Elemanlar Yöntemi	46
5.2 Sıvama İşleminin Sayısal Simülasyonu	58
5.2.1 Rotil gövdesinin (housing) modellenmesi	60
5.2.2 Rölelerin (roller) modellenmesi	61
5.2.3 Rotil kapakçığının (cap) modellenmesi	62

İÇİNDEKİLER (devam)

Sayfa

5.2.4 Sistemin modellenmesi	63
5.2.5 Malzemenin tanımlanması.....	64
5.2.6 Sıcaklığın sıvama işlemine etkisi.....	80
5.2.7 Sıvama işleminde sınır şartları.....	80
5.2.8 Sıvama simülasyonunun aşamaları	82
5.2.9 Sıvama basıncının uygulanma süresinin sıvama simülasyonuna etkisi	85
5.2.10 Sıvama simülasyonuna farklı bir yaklaşım.....	88
6. PLASTİK DEFORMASYON SONRASI OLUŞAN SIKIŞTIRMA KUVVETLERİNİN TEST YÖNTEMLERİ İLE SAPTANMASI	91
6.1 Deney Düzenek Tasarımı	93
6.2 Deney Düzenekini Oluşturan Elemanlar ve Görevleri	95
6.3 Deney Düzenekinin Çalışma Prensipleri.....	97
6.4 Tasarım Sonrası Sonlu Elemanlar Analizi	101
6.4.1 Sıvama işlemi esnasında uygulanan sıvama kuvveti sonucu aparatta oluşan gerilmeler	101
6.4.2 Sıvama işlemi sonrası yataklarda oluşan sıkıştırma kuvvetlerinin üst aparata uygulanması sonucu oluşan gerilmeler	102

İÇİNDEKİLER (devam)

Sayfa

7. SIVAMA İŞLEMİ SONRASI OLUŞAN SIKIŞTIRMA KUVVETLERİNDE SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ SONUÇLARI İLE TEST SONUÇLARININ KARŞILAŞTIRILMASI	108
7.1 Test Yöntemi ile Elde Edilen Veriler	109
7.1.1 Sıvama basıncının değişiminin sıkıştırma kuvvetine etkisi	109
7.1.2 Röle hızlarındaki değişimin sıkıştırma kuvvetine etkisi	116
7.2 Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Elde Edilen Veriler	117
7.2.1 Sıvama basıncındaki değişimin sıkıştırma kuvvetlerine etkisi	117
7.2.2 Röle hızlarındaki değişimin sıkıştırma kuvvetlerine etkisi	122
7.3 Sonuçların Karşılaştırılması.....	126
8. SONUÇLAR, YORUMLAR ve TARTIŞMALAR	128
KAYNAKLAR DİZİNİ	135

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1 Plastik şekil verme işlemlerinde bir malzemeye uygulanabilecek kuvvetler	9
2.1.a Çekme.....	9
2.1.b Basma	9
2.1.c Kayma	9
2.2 Haddeleme	10
2.3 Açık dövme.....	11
2.4 Kapalı dövme	11
2.5 Ekstrüzyon	12
2.6 Ekstrüzyon işleminin üç boyutlu gösterimi.....	12
2.7 Direkt ekstrüzyon.....	13
2.8 Endirekt ekstrüzyon	13
2.9 Hidrostatik ekstrüzyon	14
2.10 Tel ve çubuk çekme	14
2.11 Çubuk çekme	15
2.12 Kesme.....	15
2.13 Zımbalama	16

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.14 Bükme.....	16
2.15 Derin çekme	17
2.16 Gererek şekillendirme	18
2.17 Lastik ile şekillendirme	18
2.18 Damgalama	19
2.19 Patlatarak şekillendirme.....	20
2.20 Basınç ile şekillendirme.....	20
2.21 Sıvama	21
2.22 Standart sıvama yönteminin şematik gösterimi	22
2.23 Sıvanmış iş parçaları.....	23
2.24 Küresel yataklarda sıvama	24
3.1 Araç üzerindeki süspansiyon sistemi	25
3.2 Araçta meydana gelen salınımlar	26
3.3 Bir otomobilin titreşim modeli.....	29
3.4 Lastik takoz, yay ve amortisörün bağlantı elemanları ile görünüşü.....	30

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
3.5 Denge çubuğu	31
3.6 Denge çubuğunun süspansiyon bağlantıları	32
3.7 Renault Clio alt salıncak kolu, rotili ve aksonu	33
3.8 Süspansiyon sistemi ve salıncak kollarının sistemdeki yerleri.....	33
3.9 Rotiller.....	35
3.10 Üst ve alt rotillerin süspansiyon sistemindeki yerleri	35
3.11 Rotillerin süspansiyon sistemdeki yeri.....	36
4.1 Plastik yatak montajı	38
4.2 Sıvama tezgâhı.....	39
4.3 Sıvanmamış rotıl gövdesi (X90 SBJ).....	40
4.4 Alt kapak sıvaması.....	41
4.5 Başarılı şekilde sıvanmış küresel yatak (X90 SBJ)	41
4.6 Eski ve yeni tip rot başları	42
4.7 Montaj işlemi bitmiş rotıl (X90 SBJ).....	43
4.8 Sıvama işlemi sonrası sıkıştırma kuvvetlerinin oluştuğu bölgeler	44
4.8.a Eksenel çekiye çalışan rotıl	44

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
4.8.b Eksenel basıya çalışan rotil.....	44
4.9 Rotile gelen yükler	45
5.1 Herhangi bir parçanın sonlu elemanlar yöntemi ile daha basit alt bölgelere ayrılması	47
5.2 Çeşitli malzeme modellerinin gösterimi.....	52
5.2.a Elasto-plastik.....	52
5.2.b Elasto-viskoplastik	52
5.3 Ağ yapısı değişimi.....	54
5.3.a Bozulmamış ağ yapısı.....	54
5.3.b Rezoning uygulanmadan aşırı derecede bozulmuş ağ yapısı.....	54
5.3.c Rezoning uygulandıktan sonra oluşturulmuş ağ yapısı	54
5.4 Hareketin tanımlandırılması.....	55
5.5 Ağ yapısı oluşturulmuş iş parçasının haddelenmesi	56
5.6 Doğrusal olmayan problem örnekleri.....	57
5.6.a Temas ve sürtünme problemleri.....	57
5.6.b Merkezkaç kuvvet problemleri	57
5.6.c İzleyen kuvvet problemleri	57

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
5.7 Rotil gövdesi (X90 SBJ).....	59
5.7.a Rotil gövdesine ait CAD gösterimi.....	59
5.7.b Gerçek rotıl gövdesi	59
5.8 Rotil gövdesinin (Housing) iki boyutlu ağ yapısı	60
5.9 Üç boyutlu ağ yapısı oluşturulmuş rotıl gövdesi (housing)	60
5.10 Röle 06'nın iki boyutlu taslak çizimi	61
5.11 Sıvama işlemi sırasında kullanılan Röle 06'nın üç boyutlu modeli	62
5.12 Rotil kapakçığı.....	62
5.12.a Rotil kapakçığının üç boyutlu modeli	62
5.12.b Gerçek rotıl kapakçığı	62
5.13 Sıvama simülasyonu için modellenen sistem	63
5.14 Ege Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümü Biyomekanik Laboratuvarı'nda bulunan test cihazı.....	65
5.15 Basma deneyinde oluşan deformasyon modları	67
5.16 Rotil gövdesi üzerinden çıkarılabilecek maksimum malzeme hacmi....	68
5.17 Rotil üzerinden elde edilen ve ASM Standartlarına uygun test numunesi.....	69

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
5.18 Rotil gövdesi içinde küresel mafsala yatak olarak kullanılan POM malzemenin mühendislik ve gerçek gerilme - birim şekil değiştirme değerlerinin karşılaştırması.....	71
5.19 Rotil ve röleler arasındaki temas yüzeylerinde oluşan gerilmeler	72
5.20 Rotil gövdesinden alınan numuneye ait C15 E malzemesinin plastisite eğrisi.....	73
5.21 Basma deneyi sonrası numunelerde oluşan deformasyon modları	73
5.22 Elastisite modüllerin karşılaştırılması	74
5.23 Yeniden tasarlanan basma testi numunesi	75
5.24 Yeniden tasarlanan çekme testi numunesi	75
5.25 Çekme ve basma numuneleri	76
5.26 C15 E malzemesine ait çekme deneyi sonuçları	77
5.27 C15 E malzemesine ait basma deneyi sonuçları	77
5.28 Başarılı olan basma testinde ekstansiyometre kullanımı farkının gösterimi	78
5.29 Piecewise malzeme modelinin gösterimi	79
5.30 MSC Superform 2005 programında sıvama işlemine ait sınır şartları	81

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
5.31 Rôle arasındaki mesafenin sıvama işlemine etkisi nedeniyle oluşan form.....	84
5.32 MSC Superform 2005 yazılımında başarılı bir şekilde bitirilmiş sıvama analizinde sıvanan rotıl bölgesinin görünümü	85
5.33 Sıvama kuvvetinin aniden uygulanması sonucu başarılı bir şekilde bitirilemeyen analizin sıvama kuvveti – zaman dağılımı diyagramı	86
5.34 Başarılı bir şekilde bitirilen analizde sıvama basıncının zamana göre dağılımı	87
5.35 Sıvama simülasyonunda kullanılan sıvama kuvveti – zaman değerleri.....	88
5.36 ABAQUS’de modellenen sistem.....	89
5.37 ABAQUS ile yapılan analiz sonrası rotıl gövdesi kesit görünüşü.....	90
5.38 ABAQUS programı ile yapılan analizde rotıl gövdesinin son hali	90
6.1 PKW sıvama tezgâhının izometrik görünüşü	92
6.2 PKW sıvama tezgâhının önden görünüşü	92
6.3 Rotil gövdesinin tamamen sabitlenmesi.....	93
6.4 İmal edilen özel sıvama aparatının röleler ile birlikte yapılan kinematik analizinin izometrik görünümü	94

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
6.5	Sıvama aparatının izometrik CAD görünümü 94
6.6	Sıvama ara aparatının torna tezgâhında imal edilmesi 95
6.7	Sıvama aparatının sıvama tezgâhına monte edilmiş hali ve kesit görünüşü 95
6.8	İç yüzeyi pürüzsüz hale getirilmiş rotil 97
6.9	İç yüzeyinden talaş alınmış rotlin en kesit görünümü 98
6.10	İç yüzeyinden talaş alınmış rotil gövdesi ve yanıl yüzeyleri ile teması en az seviyeye indirilen kapakçık ve rijit silindir 98
6.11	Sıvama aparatının ön-kesit görünüşü 99
6.12	Sıvama deneyinde kullanılan 10000 kg kapasiteli 0,0001 hassasiyete sahip yük hücresi 100
6.13	Yük hücresine uyumlu indikatör 100
6.14	Tasarımı gerçekleştirilen aparat ve yük hücresinin ağ yapıları 101
6.15	35000 N sıvama basıncı uygulandığında ara aparatta oluşan gerilmelerin gösterimi 102
6.15.a	Ara aparatın önden görünümü 102
6.15.b	Ara aparatta gerilmelerin maksimum olduğu bölgeler 102

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
6.16	Artık kalan kuvvetin 30000 N olması durumunda üst aparatta oluşan gerilmeler..... 103
6.16.a	Üst aparatta oluşan gerilmeler 103
6.16.b	Üst aparatta oluşan maksimum gerilmeler 103
6.17	Yük hücresinin üzerine yük geldiğinde oluşan gerilmeler ve yanal yer değiştirmeler 104
6.18	Üst aparata ait imalat resmi 105
6.19	Ara aparata ait imalat resmi..... 105
6.20	Alt aparata ait imalat resmi..... 106
6.21	Rijit silindire ait imalat resmi 106
6.22	Sıvama aparatı, yük hücresi ve indikatörün sıvama tezgâhına montajı..... 107
7.1	Sıvama tezgâhına ait elektronik kumanda paneli 109
7.2	Deney 1'e ait sıkıştırma kuvvetindeki değişim 111
7.3	Deney 2'e ait sıkıştırma kuvvetindeki değişim 112
7.4	Deney 3'e ait sıkıştırma kuvvetindeki değişim 113
7.5	Deney 4'e ait sıkıştırma kuvvetindeki değişim 114

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
7.6 Sıvama kuvvetlerinin değişimi ile rotillerde oluşan sıvama farklılıkları	116
7.7 Sıvama işlemi esnasında kapakçığın Z ekseninde oluşan reaksiyon kuvvetleri	117
7.8 Sıvama işlemi ve sonrasında rotıl kapakçığının rotıl gövdesinde temas ettiği bölgeler	118
7.9 Sıvama kuvvetinin sıkıştırma kuvvetine olan etkisi.....	120
7.10.a Sıvama işleminde kuvvet değişimi ile rotilin aldığı formlar	121
7.10.b Sıvama işleminde kuvvet değişimi ile rotilin aldığı formlar	122
7.11 Sıvama işleminde tur sayısının sıkıştırma kuvvetine olan etkisi	123
7.12.a Sıvama işlemi sonrası tur sayısı değişimi ile rotilde oluşan formlar	124
7.12.b Sıvama işlemi sonrası tur sayısı değişimi ile rotilde oluşan formlar	125
7.13 Deney sonuçları ile sonlu elemanlar analiz sonuçlarının karşılaştırılması	126
7.14 Başarılı şekilde sonuçlanamayan sıvama işlemleri	127

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
7.14.a 23136 N’da başarısız olarak gerçekleşen sıvama işlemi sonrası alınan kesit	127
7.14.b 14500 N’da başarısız şekilde sonlanan simülasyondan alınan kesit	127

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
6.1 Sıvama işlemi yapıldığı anda ara aparatta oluşacak gerilmeler	102
6.2 Sıvama sonrası üst aparatta oluşacak gerilmeler	103
7.1 Deney 1'e ait test verileri	110
7.2 Deney 2'e ait test verileri	112
7.3 Deney 3'e ait test verileri	113
7.4 Deney 4'e ait test verileri	114
7.5 Sıvama analizinde sıvama kuvvetinin sıkıştırma kuvvetine olan etkisi	120
7.6 Sıvama analizinde tur sayısının sıkıştırma kuvvetine olan etkisi	123

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
D	Test numune çapı.
ε	Birim şekil değiştirme.
$\varepsilon_{gerçek}$	Gerçek birim şekil değiştirme.
$\varepsilon_{mühendislik}$	Mühendislik birim şekil değiştirmesi.
$\sigma_{mühendislik}$	Mühendislik gerilmesi.
L	Test numunesinin son boyu.
L_0	Test numunesinin ilk boyu.
ΔL	Test numunesinde ilk ve son boy arasındaki farkı.
γ	Kayma şekil değiştirmesi.
ϕ	Kayma açısı.
a	Malzemeye ait kenar uzunluğu.
b	Malzemeye ait komşu kenar uzunluğu.

1. GİRİŞ

1.1 Araştırmanın Amacı

Otomotiv endüstrisinde kullanılan parçaların imalatı; maliyet ve kalite açılarından incelendiğinde, imalat öncesi fizibilite çalışmaları, imalat yöntemleri ve imalat sonrası parçaya kazandırılan dayanım özellikleri, imalat sürecini etkileyen ve birbirinden ayrı düşünülemeyen temel parametrelerdir. Bu parametrelerin birbirileri ile uyumlu şekilde seçilmesi önem teşkil etmektedir.

Genel olarak taşıtlarda kullanılan yönlendirme ve süspansiyon sistemleri, taşıtların sürüş güvenliğini sağlayan elemanlardır. Bu sistemlere ait mekanizmaların kusursuz olarak çalışabilmesi, içerdikleri farklı işlevlere sahip birçok küresel yatağa bağlıdır. Küresel yataklar boşluksuz olarak, hatta bir miktar sıkı birleştirilerek ilgili sisteme montajları yapılır. Diğer yandan aşırı sıkılık, yüksek moment değerlerine ve dolayısıyla ek işlemlere neden olurken; düşük sıkılık mafsalları içerisinde boşluk oluşturmaktadır. Her ikisi de istenmeyen durumlar oluşturmaktadır. Uzun ömürlü, az sürtünmeli ve istenen çalışma açılarını her yol koşulunda sağlayacak küresel yatak tasarımı, uzun test süreçleri ve birçok tekrar içeren örnek imalatların sonrasında elde edilebilmektedir. Taşıtların yönlendirme sistemlerinin önemli bir uzvu olan rotiller de küresel yatak tasarımlarının sonrasında, imalat yöntemlerinden plastik şekil verme ile montajı yapılarak üretilir.

Tez kapsamında hareket iletimini sağlayan parçanın (rotıl) imalatı sırasında kullanılan, plastik şekil vermeyi temel alan imal yöntemlerinden haddeleme işleminin özel bir alt bölümü olan **sıvama** prosesi ayrıntılı olarak incelenmiştir. Sıvama işlemi sonucu yatak sistemleri içerisinde oluşan basma kuvvetleri, çeşitli test metotları yardımıyla saptanmaya çalışılmıştır. Ayrıca belirli sayısal simülasyonlar aracılığıyla bulunan analiz sonuçları, test metotları ile bulunan değerlerle doğrulanarak, ilgili basınç değerlerini belirlemeyi sağlayan bir simülasyon yöntemi geliştirilmiştir.

Gerçekleştirilen bu araştırma yöntemi ile herhangi bir otomobil rotilinin boyutlarının değişimi ile beraber veya yeni bir rotilin tasarımına bağlı olarak yapılan prototip imalatında, montaj işlemi sırasında sıvama tezgâhında rölenin tur sayısının ve uyguladığı basınç kuvvetlerinin değerleri değiştirilerek parça üzerinde oluşan (başka bir deyişle sıvama işlemi ile plastik deformasyon sonucu oluşan basınç (artık) gerilmelerinin oluşturduğu) sıkıştırma kuvvetlerinin değişimi incelenmiştir. Bunun sonrasında yönlendirme ve süspansiyon sistemlerinin önemli bir parçası olan rotilin tasarımında, taşıtların manevra yeteneğini ve sürüş güvenliğini arttıracak yeni düzenlemeler yapılabilecektir. Ayrıca, bu yöntemin uygulanması ile ilgili elemanın üretim maliyetlerinde de önemli düşüşler beklenmektedir.

İlgili firmada küresel bağlantıların alt veya üst kapakçığının montajı yapılırken, sıvama tezgâhı üzerinde **röleler arasındaki mesafe, röle tipleri, sıvama basıncı, röle tur sayısı, röle hızları** vs. gibi çeşitli parametrelerin değiştirilmesi, öngörülmeleyen etkiler yaratmakta ve bunun sonucu olarak da sıvama işlemi başarısızlıkla sonuçlanabilmektedir. Bu da doğal olarak hem malzeme hem de zaman israfına yol açmaktadır. Örnek olarak, imalat aşamasındaki sıvama esnasında röleler arasındaki mesafenin azalması sonucu, sıvanan gövdenin kenarlarında çentikler oluşmaktadır.

Tezin temel amacında, bu ve benzeri birçok öngörülemeyen hatayı sıvama işlemini simüle ederek, sıvama öncesi bağımsız olan bu tip parametrelerin sıvanan gövde üzerindeki etkilerini saptayıp, sıvama işleminde optimizasyona ulaşılması hedeflenmektedir.

1.2 Literatür Araştırması

Zhang ve diğerleri [2006] çalışmalarında, şerit levha haddeleme işleminin simülasyonu için üç boyutlu bir model geliştirmişlerdir. Bu model; rijit-plastik sonlu elemanlar, sonlu farklar ve elastik sonlu elemanlar gibi yöntemler kullanılarak çözülmüş ve levhada oluşan plastik deformasyonlar, sıcaklık dağılımı, düzleşme gibi parametreler hesaplanmıştır. Modelde haddeleme sırasında oluşan aşınmalar da dikkate alınmıştır. Bu model sayesinde haddeleme basıncının dağılımı ve rölelerle parçalar arasında oluşan temas basıncı da hesaplanabilmektedir. Dolayısıyla araştırmamızın başlangıç aşamasında sıkça başvurulabilecek bir makale niteliğindedir.

Gün [2007] tezinde, sıvama yöntemlerinin anlaşılması için, öncelikle imalat yöntemlerini genel olarak sınıflandırmış ve bu sınıflandırma içinde farklı sıvama yöntemlerinin konumunu ve kullanım alanlarını irdelemiştir. Buna istinaden, sıvama yöntemlerinin kendi alt yöntemleri, bu yöntemlerin oluşma sebepleri, farkları ve istenen ürüne göre hangi yöntemin uygun olacağı tezde anlatılmıştır. Ardından örnek bir sıvama makinesinin tasarımı incelenerek, bu tip makinelerin tasarımlarındaki ayrıntılar, kapasiteleri, karşılaşılabilecek problemler ve ayrıca sıvama prosesi anlatılmıştır. Verilen bilgilerin paralelinde, sıvama makinelerinin teknolojik gelişimleri, gelecekte nasıl bir şekil alacakları ve bu konuda ülkemizde yapılan çalışmalar, sonuçlar bölümünde değerlendirilmiştir.

Li ve diğerleri [2008] çalışmalarında röleleri elastik cisim, iş parçalarını da elastoplastik cisim kabul ederek, haddeleme problemlerini bir sürtünmeli elastoplastik temas problemi olarak incelemişlerdir. Bu çalışmada, tel haddeleme işleminin simülasyonunda yapılan kabuller ile iki boyutlu elastoplastik sonlu birim şekil değiştirme için bir sınır eleman metodu ve sürtünmeli temas problemlerinin sonlu deformasyon analizi tartışılmıştır.

Palumbo ve diğerleri [2008] çalışmalarında, yüksek sıcaklıklarda magnezyum saclar üzerinde eğilme ve çekme gerilmelerinin birleşik etkisini incelenmişlerdir. Sadece eğilme bölgesinde, sacı ısıtabilen belirli bir ekipman kullanılarak deneysel/sayısal bir yaklaşım uyarlanmıştır. Araştırmada sonlu

elemanlar analizi yardımıyla belirlenen işlem parametrelerine (eğilme yarıçapı ve sıcaklık) odaklanılmaktadır. Eğilme bölgesindeki plastik birim şekil değiştirme dağılımı ile gerilmedeki kritik şartların oluşumu eşleştirilmiş ve iki boyutlu termo-mekanik modeller kullanılarak elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir.

Jiang ve diğerleri [2008] haddeleme işleminde çok önemli bir rol oynayan sürtünmenin, haddeleme doğrultusundaki ve buna dik doğrultudaki etkilerini de dikkate alarak, soğuk şerit levha haddelemesinin simülasyonunu gerçekleştirmişlerdir. Sürtünmenin etkileri, rijit-plastik sonlu elemanlar ve etkin fonksiyon (influential function) yöntemleri kullanılarak modellenmiştir. Sonuçlar, sürtünmenin her iki yönde de (haddelemeye paralel ve dik) haddeleme mekaniğini, levha profilini ve şeklini etkilediğini göstermiştir.

Chen [2006] araştırmasında, bir rijit-plastik sonlu elemanlar analiz yazılımı olan DEFORM-2D ve 3D kullanımı ile sac haddeleme işlemi esnasında hadde aralığında metal sacın plastik deformasyonunu simüle etmiştir. Çalışma, özellikle iç boşluk hataları içeren gözenekli metal sacların deformasyonu üzerine odaklanmaktadır. Elde edilen sayısal sonuçlar ile çeşitli haddeleme şartları için göreceli yoğunluk dağılımı, boşluk kapanma davranışı, deformasyon mekanizması ve iç boşlukların çevresindeki gerilme – birim şekil değiştirme dağılımı araştırılmaktadır. Kalınlık azalımının nihaî boşlukların boyutları üzerindeki etkisi, sürtünme faktörleri ve göreceli yoğunluklar sistematik olarak tartışılmaktadır.

Xiong ve diğerleri [2005] araştırmalarında, sabit ve sürekli (hacimli) metal şekillendirme işlemlerinin sayısal analizleri için yeni bir yaklaşımı irdelemişlerdir. Bu yaklaşım, çok az sıkıştırılabilir rijit-plastik malzemeler için çekirdek parçacık metodunda birleşik akış formülasyonunu yeniden üreterek faydalanılmasına dayanmaktadır. Önerilen yaklaşımın etkinliği, teorik tahminler ile sonlu elemanlar hesaplamaları ve deneysel veriler karşılaştırılarak, düz haddeleme, çubukların sıkıştırılması ve silindirik takozların şişirilmesi gibi üç ayrı metal şekillendirme işlemi için tartışılmaktadır.

Dyja ve diğerkleri [2004] çalışmalarında, gerdirmeli geçişlerde (in stretching passes) bimetal çubukların haddeleme işleminin teorik ve deneysel analiz sonuçlarını irdelemişlerdir. Bimetal ubukların bileşenleri arasında farklı akma gerilmesi oranları vardır. Burada sıcak gerdirmeli geçiş haddelemesinde nümerik bir model önerilmiştir. Bu modelde, bimetal bir malzemenin deformasyonu üç-boyutlu rijit-plastik sonlu elemanlar yöntemi ile analiz edilmiştir. Deneylein sonuçları, Cu-elik ve Cu-Al ubukların deformasyon bölgesindeki gerilme dağılımlarının sonlu elemanlar analiz sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Analiz sonuçları ve deneysel verilerin sonuçları, bimetal çubukların haddelenmesinde hadde geçiş tasarımı için önerilen matematiksel modelin yeterliliğini doğrulamaktadır.

Milenin ve diğerkleri [2004] araştırmalarında, çok-geçişli (multi-pass) haddelemenin matematiksel olarak modellenmesini gerçekleştirmişlerdir. Çok-geçişli haddeleme esnasında oluklu rölelerdeki izotermal olmayan metal sıvama problemi sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak özölmüştür. Örnek olarak da 150mm×100mm boyutundaki köşebent çeliğinin, haddeleme esnasında 6. geçişteki sayısal modelleme ve analiz sonuçları tartışılmıştır.

Yea ve diğerkleri [2003] makalelerinde, dairesel haddeleme işlemini, üç boyutlu sabit olmayan akışı ve dairesel iş parçasının kalınlık ile yarıçapının sürekli değişimini dikkate alarak incelemişlerdir. Çalışmada ele alınan, özellikle dairesel haddeleme işlemi için özel olarak hazırlanmış bir sonlu elemanlar yöntemi kodu olan SHAPE-RRTM, T-şekilli dairesel haddeleme işlemlerinde, düz bölgelerde yayılım, basınç dağılımı ve hadde kuvvetini tahmin etmek için kullanılır. Uygulanan yöntem, dairesel ürünlerin analizi, işlenmesi, dairesel araç ve ekipmanların tasarımında başarılı olarak kullanılabilen bir çözüm aracı olarak önerilmektedir.

Jiang ve diğerkleri [2003] çalışmalarında, rölentin aşınması sırasında sürtünme değişimini de dikkate alarak ince şerit haddelemeyi analiz etmek için üç boyutlu rijit-plastik sonlu elemanlar yöntemini kullanmışlardır. Makalede, hesaplanan sonuçlar ile ölçölen değerlerin bir karşılaştırması yapılmış ve

sürtünme değişimli ince şeritin soğuk haddelenmesinde şekil, profil ve pürüzsüzlüğün etkileri de tartışılmıştır.

Jiang ve Tieu [2002], ABAQUS/Explicit kodunu kullanarak, ince şerit haddelemede hadde aşınımını analiz etmiş ve hadde merdanelerinde aşınma bölgesindeki deformasyonun modellenmesine gerilmeli ve gerilmesiz durumları hesaba katarak odaklanmışlardır. Bir elastoplastik sonlu elemanlar modeli, elastik giriş alanındaki biçimi ve çıkış alanındaki elastik geri kazanımı simüle etmek için geliştirilmiştir. Bu çalışmada geliştirilen yöntem, haddeleme aşınmasında şeritlerin deformasyon özelliklerini modelleyebilmekte, şeritin elastik geri kazanımını tahmin edebilmekte ve hatasız hadde boşluğunun hazırlanması esnasında nihaî ürünü doğru bir şekilde belirleyebilmektedir.

Jiang ve Tieu [2001] çalışmalarında, deformasyon alanında farklı sürtünme katsayıları ile elde edilen kayma gerilmesi modellerinin kullanılması aracılığıyla, sürtünme değişimlerinin haddeleme basıncına, ileri kaymaya ve üç boyutlu rijit-plastik sonlu elemanlar yöntemi tarafından elde edilen simülasyon sonuçlarına odaklanmışlardır. Araştırmaları göstermiştir ki, deformasyon bölgesinde değişimli sürtünmeden oluşan kayma gerilmesi modeli, deneylerden elde edilen değerler ile karşılaştırıldığında tatmin edici sonuçlar sağlamakta ve diğer metotların sonuçlarından daha kesin sonuçlar vermektedir. Uygun ağ yapısı simülasyonda etkinliği ve kesinliği artırmaktadır.

Jiang ve Tieu [2000] bu araştırmalarında, bir üç boyutlu “hafif-sıkıştırılabilir” rijit visko-plastik sonlu elemanlar yöntemini kullanarak, sıcak haddeleme ile destekli şerit levha üretimini analiz etmişlerdir. Sonuçları göstermiştir ki, şerit genişliğince destek yüksekliğinin dağılımı üniform değildir ve levha şeritinin kalınlığı ve haddeleme sırasında inceltme miktarı arttırıldığı zaman, destek yüksekliği azalmakta (pulling down) ve genişleme artmaktadır. Sürtünme değişimlerinin simülasyonun yakınsamasına etkisi saptanmıştır. Desteklenmiş şerit haddelemenin simülasyon sonuçları ile elde edilen deneysel değerlerin uyum içinde olduğu belirlenmiştir.

MacCormack ve Monaghan [2002] çalışmalarında, Ti-6AL-4V malzeme numunesinden yapılmış havacılıkta kullanılan bağlama elemanlarının baş taraflarına üç haddeleme darbesinde şerit şekil verilme metodunu incelemişlerdir. Karmaşık olan bu proses, aşırı kompleks şerit geometrilerin haddeleme ve ekstrüzyon (ileri ve geri) işlemlerinin birleşimidir. Çalışmada üç safha içerisinde birim şekil değişimi, hasar, akış çizgileri DEFORM yazılımı ile analiz edilerek, üretim işlemi ayrıntılı bir şekilde irdelenmiştir.

Lee ve Chen [2000] çalışmalarında, analitik ve genelleştirilmiş bir sürtünme yasası formüle etmiş ve haddeleme işlemi için üç boyutlu geniş birim şekil değiştirmeli elastoplastik sonlu elemanlar analizi gerçekleştirmişlerdir. İş parçası ve röle arasındaki temas/sürtünme problemleri, bu yeni sürtünme kanunu kullanılarak ayrıntılı olarak incelenmiştir. Röle kuvvetlerini ve röle tork gelişimini içeren sayısal sonuçlar, normal ve kayma gerilmeleri saptanarak tartışılmıştır.

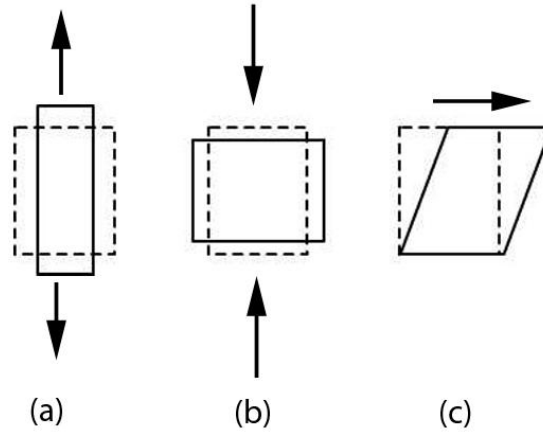
Lagrangian ve Eulerian sonlu elemanlar formülasyon modeli kullanılarak geniş birim şekil değiştirme ve metal şekillendirme uygulamaları analiz edilirken birçok problem ortaya çıkmaktadır. Daha genel bir metot olarak Keyfi Lagrangian-Eulerian (KLE) metodu birçok zorluğun aşılması için geliştirilmiştir. Gadala ve Wang [2000], çalışmalarında literatürdeki mevcut formülasyon ve geliştirilmiş bu formülasyon arasındaki farklara ilişkin olarak KLE formülasyonunun kısa bir tanımlamasına yer vermişlerdir. Genel KLE metodu, kama biçimindeki kalıplar arasındaki sıkıştırmayı simüle etmek için uygulanır. Çeşitli haddeleme parametrelerinin simülasyon üzerindeki etkisi, düzlemsel şekil değiştirmenin geçerli olduğu bir şerit haddeleme örneği ile incelenmektedir.

Üçgen ve dörtyüzlü mini-elemanların nümerik karakterlerini haddeleme simülasyonu aracılığı ile irdleyen Lee ve diğerleri [2009], hesaplama verimliliği için benimsenmiş sabitleştiriciden (stabilizer) kaynaklanan nümerik belirsizlik ile teorik arka planı hesaba katmışlardır. Çalışmanın sonunda, dörtyüzlü mini-elemanların nümerik olarak açık olmadığı durumlarda akıllı yeniden ağ yapısı oluşturma tekniği yardımı ile dört yüzlü mini-elemanların oldukça doğru çözümler verebildikleri gözlemlenmiştir.

Endüstride delikli eksenel parçaların, boru malzemedan boru şişirme işlemi ile üretilmesi çok kullanılan yöntemlerden birisidir. Tüzün [2004] tezinde, dışa doğru, içe doğru, aynı anda hem içe hem dışa doğru boru şişirme ve boru genişletme işlemlerinin sonlu elemanlar analizlerini gerçekleştirmiştir. Analizler sırasında, önerilen yöntemlere göre tasarlanmış ara aşamalardaki parça ve kalıp geometrileri kullanılmıştır. Şişirme işlemi sırasında boru üzerinde oluşan gerilmeler, yer değiştirmeler ve kalıpların dolumu gözlenmiş ve çıkan sonuçlara göre boru şişirme işlem tasarımının ve kalıp şekillerinin değerlendirmesi yapılmıştır.

2. PLASTİK ŞEKİL VERME

Bir katı cismin şeklini başka bir şekle dönüştürmek amacı ile uygulanan ve bu işlem sırasında cismin malzemesinde kütle ve bileşim değişikliğine yol açmayan üretim yöntemlerine **plastik şekil verme yöntemleri** denir. Tüm plastik şekil verme işlemlerinde malzeme çekme, basma ve kayma (Şekil 2.1) gibi üç temel şekil değişiminden birinin veya birkaçının etkisinde kalır.



Şekil 2.1 Plastik şekil verme işlemlerinde bir malzemeye uygulanabilecek kuvvetler
(a) Çekme (b) Basma (c) Kayma

Herhangi bir şekil değiştirme işlemi uygulanan bir cisimde meydana gelen birim şekil değiştirme, bu cismin şekil değiştirme işleminden önceki ve sonraki boyutlarına bağlı olarak tarif edilir. Basma ve çekmede birim şekil değiştirme;

$$\varepsilon = \frac{l - l_0}{l_0} \quad (2.1)$$

şeklinde ifade edilir. Bu ifadeden de görüleceği gibi ε değeri basmada negatif, çekmede ise pozitifdir. Kaymada ise şekil değiştirme (veya kayma);

$$\gamma = \frac{a}{b} = \tan \phi \quad (2.2)$$

şeklinde ifade edilmektedir.

2.1 Plastik Şekil Verme Yöntemlerinin Sınıflandırılması

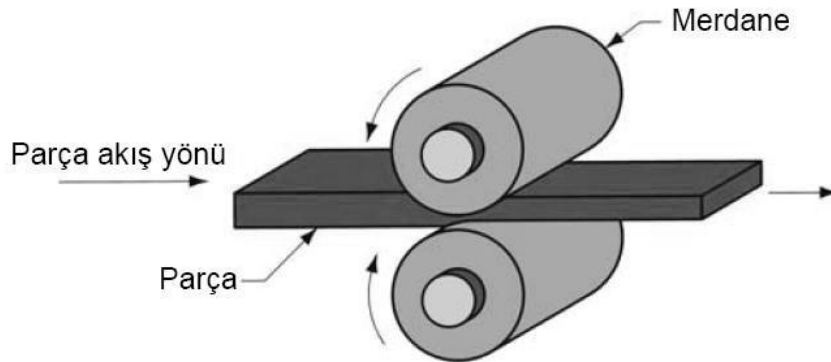
Metal sanayide ağırlıklı olarak kullanılan plastik şekil verme yöntemleri, genel olarak üretimde kullanılan malzemenin yüzey/hacim oranına göre sınıflandırılmaktadır.

2.1.1 Kütle üretimi

"Kütle" terimi, yüzey/hacim oranı düşük olan parçalar anlamına gelmekte ve büyük deformasyonların uygulandığı masrif şekil değişiklikleri ile karakterize edilmektedirler. Genellikle başlangıçtaki parça şekilleri, silindirik kütükler ve dikdörtgen kesitli çubuklardan oluşmaktadır.

i) Haddeleme

İki tane döner merdanenin basma kuvvetinin etkisiyle araya giren malzemeye soğuk ya da sıcak olarak plastik şekil verme işlemine **haddeleme** denir (Şekil 2.2). Haddeleme işleminde, üretim hızlı ve sürekli, işlem ve ürün kontrolü kolay olduğundan haddeleme, plastik şekillendirme teknikleri içerisinde en çok kullanılan yöntemdir. Haddeleme yoluyla; kare, yuvarlak, yassı, çokgen kesit ve L-köşebent, T, I ve U kesitli profiller ile ray gibi mamuller üretilmektedir.

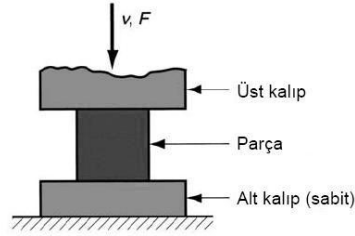


Şekil 2.2 Haddeleme

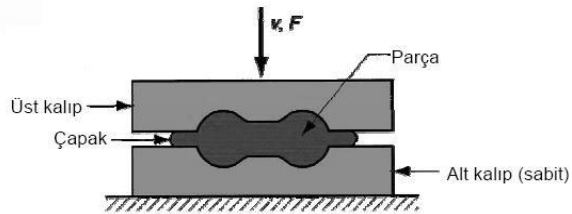
ii) Dövme

Plastik şekil verme usullerinin en eski yöntemlerinden biri olan **dövme**, metalleri faydalı bir şekle sokmak için çekiç veya pres yardımı ile yalnızca basma kuvvetlerinin etkisi altında genellikle sıcak, yarı sıcak veya soğuk olarak şekillendirme işlemidir.

Açık dövme işleminde parça, malzemenin en az sınırlama oluşacak şekilde akmasını sağlamak üzere, iki düz kalıp arasında sıkıştırılır (Şekil 2.3). Kapalı dövme işleminde ise kalıp, parçayı içine alacak boşluk veya bölümler içerir (Şekil 2.4).



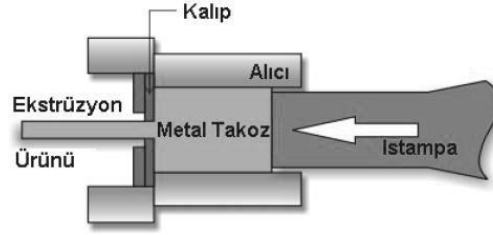
Şekil 2.3 Açık dövme (Vural, 2007)



Şekil 2.4 Kapalı dövme (Vural, 2007)

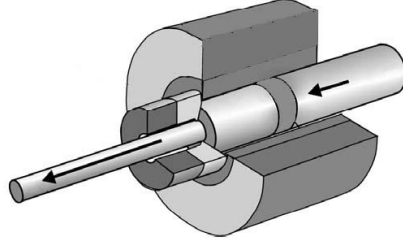
iii) Ekstrüzyon

Silindirik bir metal bloğun (takoz), bir kovan (alıcı) içine yerleştirilerek ıstampa vasıtası ile uygulanan basma kuvveti etkisiyle, matris deliğinden geçirilmesine **ekstrüzyon** denir (Şekil 2.5 ve 2.6). Bu yöntemle çubuk, boru ve şerit gibi uzun ürünler elde edilir (Çapan, 2003).



Şekil 2.5 Ekstrüzyon (Ay, 2005)

Genel olarak ekstrüzyon, silindirik çubuk ve tüplerin imalatında kullanılır. Fakat alüminyum gibi kolayca şekil değiştirebilen malzemeler kullanılarak, düzgün kesitli olmayan parçaların imalatı da mümkün olmaktadır.

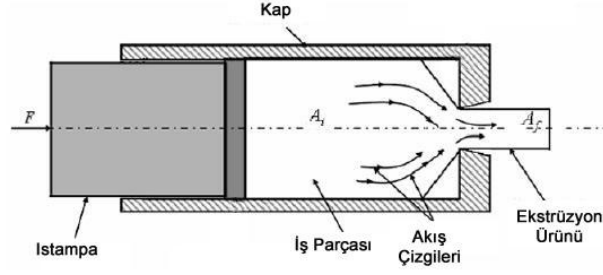


Şekil 2.6 Ekstrüzyon işleminin üç boyutlu gösterimi

Şekillenen malzemenin çıkış yerine göre ekstrüzyon işlemi üç ana gruba ayrılır.

- **Direkt ekstrüzyon**

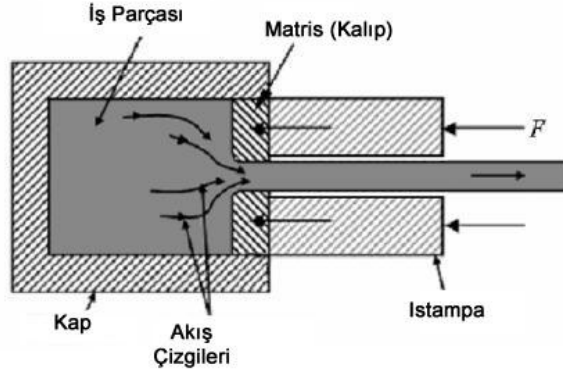
Metal takoz alıcı kap içine konarak ıstampayla bastırılarak matris içerisinden geçirilir. Bu yöntemde (Şekil 2.7) metal takozun son safhalarında kuvvet ihtiyacı çok artmakta ve “artık malzeme” kalıbın içine giremediğinden kesilip atılması gerekmektedir. Hacmin %18-20’si artık malzemedir. Takozla alıcı kovan arasında sürtünme çok yüksektir ve kuvvet ihtiyacı da fazladır.



Şekil 2.7 Direkt ekstrüzyon

- **Endirekt ekstrüzyon**

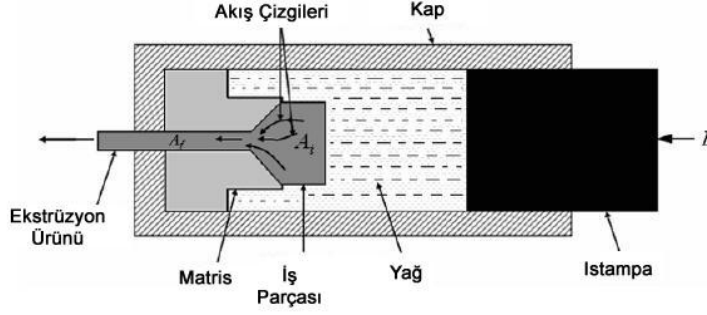
Direkt ekstrüzyondan farkı, metal takozun sabit durması, kalıbın metal takozla doğru ilerlemesidir. Böylece alıcı kovanla metal takoz arasında sürtünme olmaz. Ürün ıstampanın içinde kalmak zorundadır (Şekil 2.8). “Artık malzeme” hacmin %5-6’sı kadardır. Kuvvet ihtiyacı direkt ekstrüzyondakinin %75’i kadardır ve sürtünme yoktur.



Şekil 2.8 Endirekt ekstrüzyon

- **Hidrostatik ekstrüzyon**

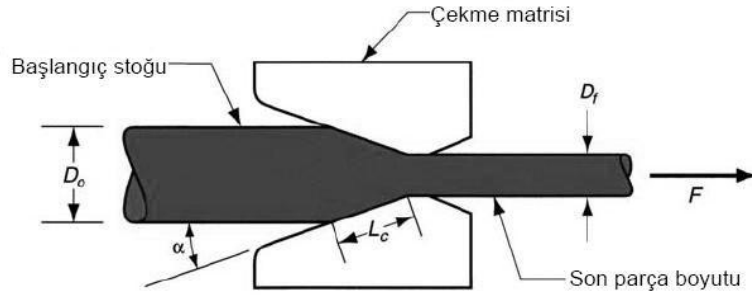
Alıcı ile takoz arasındaki sürtünmenin bir akışkan vasıtasıyla yok edildiği yöntemdir. Bu yöntem, direkt ekstrüzyona benzer mekanizmaya sahiptir (Şekil 2.9).



Şekil 2.9 Hidrostatik ekstrüzyon (Schuler, 1998)

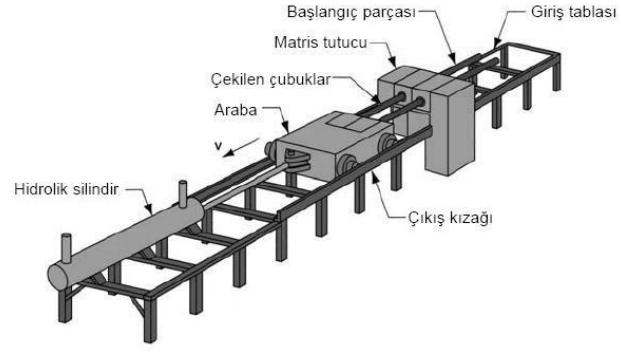
iv) Tel ve çubuk çekme

Metalin bir kalıptan geçirilmesi için, diğer taraftan bir çekme kuvveti yardımı ile çekilmesi işlemidir (Şekil 2.10).



Şekil 2.10 Tel ve çubuk çekme (Çiğdem, 2006)

Çubuk gibi kangal halinde sarılmayan malzemelerin şekillendirildiği çekme tezgâhları prensip olarak Şekil 2.11'deki gibidir. Yüzey hazırlama işleminden sonra, çekilecek çubuğun ucu sivriltilerek (uç açma) matristen geçirilir ve çekme arabasına çeneler vasıtası ile bağlanır. Çekme arabası zincirli veya hidrolik bir mekanizma ile hareket ettirilir (Çapan, 2003).



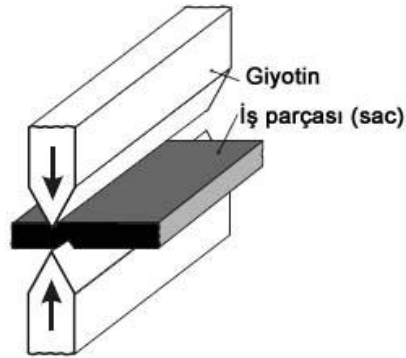
Şekil 2.11 Çubuk çekme (Ay, 2005)

2.1.2 Sac levha (boru) üretimi

Kütle şekillendirmeden farklı olarak yüksek yüzey/hacim oranına sahip başlangıç malzemesine plastik şekil verilmekte ve bu işlem presler aracılığı ile yapıldığından genellikle **pres işi** olarak da adlandırılmaktadır. Bunlar sırasıyla kesme, bükme ve kıvrırma, derin çekme, gerdirmе, lastikle şekillendirme, damgalama, patlamalı şekillendirme, basınçla şekillendirme ve sıvamadır.

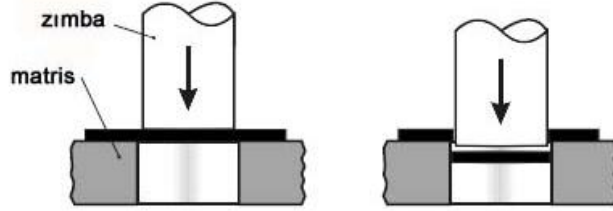
i) Kesme

Kesme ya da diğer bir deyimle makaslama, hareket eden iki kesme ağızı tarafından metalin kesilerek ayrılmasıdır (Şekil 2.12).



Şekil 2.12 Kesme (Çapan, 2003)

Kesmede bıçaklar birbirine doğru hareket etmeye başlayınca, sacın her iki yüzünde de tatbik edilen kuvvet dolayısıyla bir plastik şekil değişimi başlar ve kopma mukavemeti değerine erişilince kopma meydana gelir. Bir zımba ve buna uyan matris arasına konan bir sacın zımba ve matris arasında zorlanarak kesilmesine “**zımbalama**” adı verilir (Şekil 2.13).



Şekil 2.13 Zımbalama

ii) Bükme ve kıvrırma

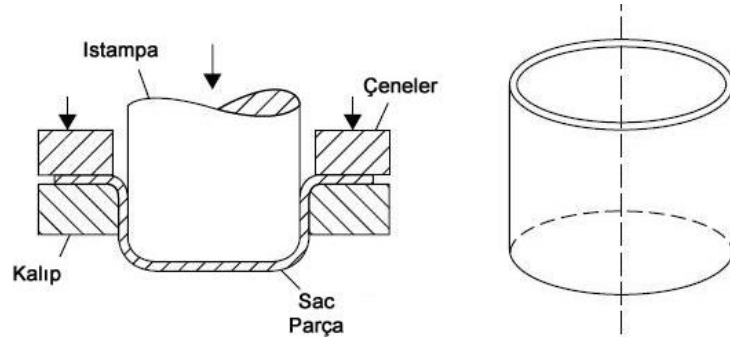
Bir sac parçasının bir kısmının bulunduğu düzlemle verilmiş bir açı yapan başka bir düzleme gelmesini sağlamak için yapılan işleme “**bükme**” denir (Şekil 2.14). Kıvrırma ise, sonsuz sayıda bükme işleminin kapalı veya açık eğri meydana getirmesi olarak tarif edilebilir.



Şekil 2.14 Bükme

iii) Derin çekme

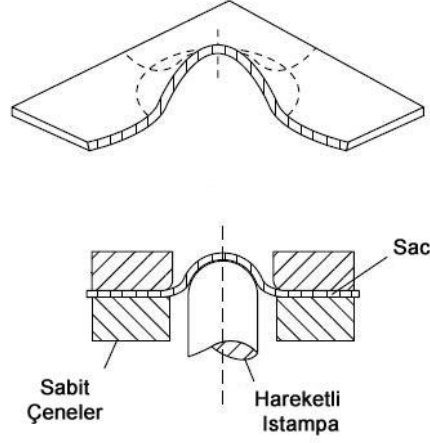
Sac levhalardan kap şeklinde parçalar elde etmekte kullanılan yöntemlerin en önemlisi derin çekmedir. İmal edilecek olan parçanın açılmış şekline uygun bir sac parçası çekme matrisi üzerine konur. Pot çemberi adı verilen bir bastırıcı sac levhayı tutar ve bir ıstampa sac parçasını matris (kalıp) deliğinden geçirerek, iş parçasının elde edilmesini sağlar (Şekil 2.15).



Şekil 2.15 Derin çekme (Schuler, 1998)

iv) Gerdirme

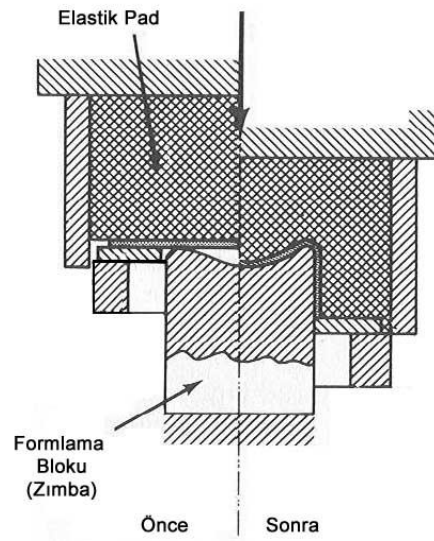
Uçak ve otomobil endüstrilerinde uygulanan bir yöntemdir. İş parçası çeneler vasıtası ile sabitlenerek, hareketli ıstampa yardımı ile iş parçası üzerinde plastik deformasyon sağlanarak yapılan şekillendirme işlemine “**gerdirmе**” veya “**gererek şekillendirme**” denir (Şekil 2.16).



Şekil 2.16 Gererek şekillendirme (Vural,2007)

v) Lastikle şekillendirme

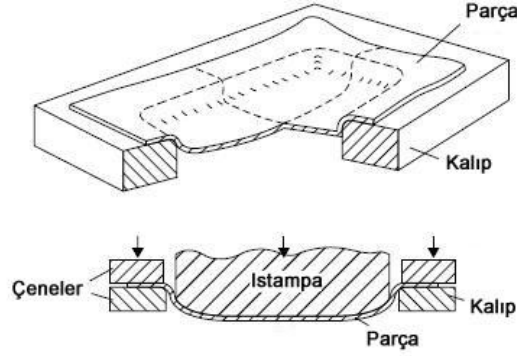
Matris, metal yerine lastik veya poliüretan olduğu takdirde maliyette azalma sağlanacağı gibi, şekillendirilen sacın metal matris yerine yumuşak bir malzemeyle temas etmesi nedeni ile yüzeyinde herhangi bir çizilme olmaz. Yüzeyde hassasiyet istenen durumlarda plastik şekil verme işlemlerinden **lastik ile şekillendirme** uygulanır (Şekil 2.17).



Şekil 2.17 Lastik ile şekillendirme (Çiğdem, 2006)

vi) Damgalama

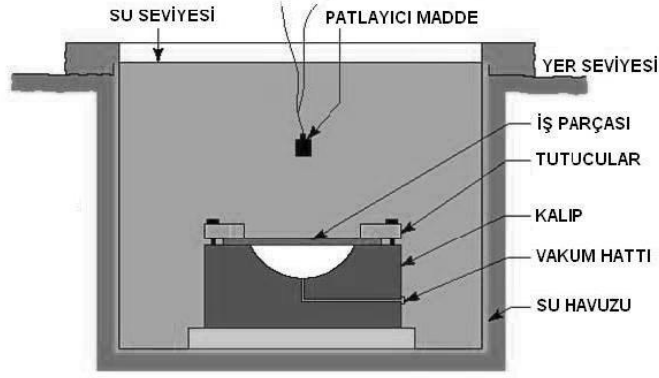
Sac parçasının iki parçalı bir kalıp içerisinde yığılarak, yükseltilerek ve akarak şekil değiştirmesi işlemine “**damgalama**” adı verilir (Şekil 2.18). Bu işlem soğuk dövmenin bir tatbikatıdır. Genellikle madenî para, madalyon ve süs eşyası imalinde uygulanır.



Şekil 2.18 Damgalama

vii) Patlamalı şekillendirme

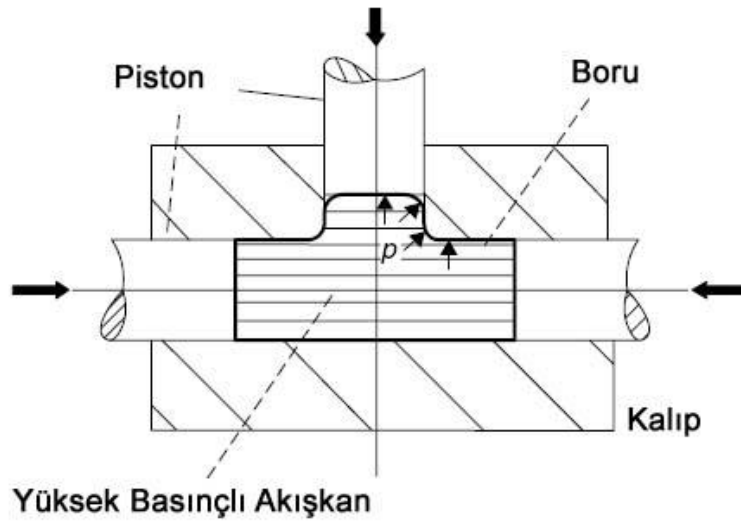
İş parçasının yakınında ve doğru konumda infilak eden belirli bir miktar patlayıcı maddenin oluşturduğu şok dalgası iş parçasının şekillendirilmesini sağlar. Genellikle mevcut tezgâhlarda şekillendirilemeyecek kadar büyük konveks biçimli parçaların şekillendirilmesinde kullanılır. İnfilak ile şekillendirme için çevre ortamının yoğunluğunun yüksek ve sıkıştırılabilirliğinin az olması istenir. Bu nedenle işlem çoğunlukla hava yerine su içinde gerçekleştirilir (Şekil 2.19) (Gün,2007).



Şekil 2.19 Patlatarak şekillendirme (Gün, 2007)

viii) Basınç ile şekillendirme (Hidroform)

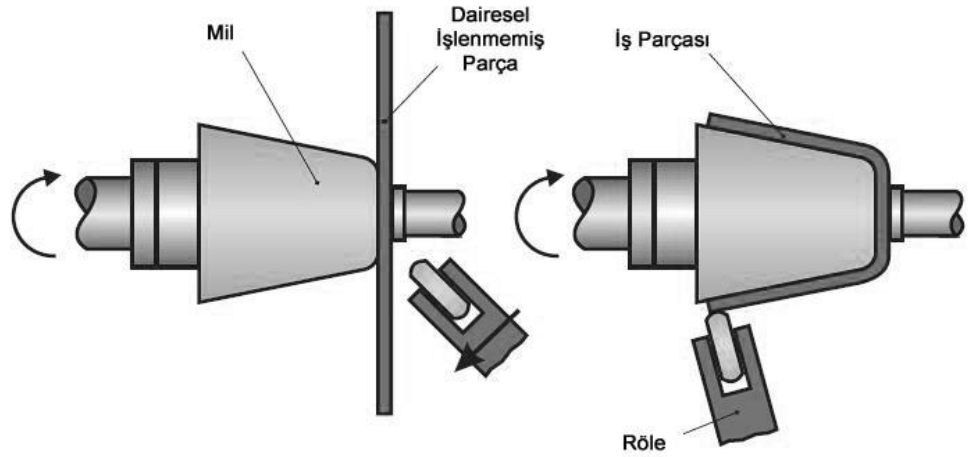
Yüksek basınçta bir akışkanla doldurulan iş parçasının, kalıp çeperlerine doğru itilmesi suretiyle, kalıp ve akışkan arasında sıkıştırılarak kalıbın şeklini alması işlemine “**basınçla şekillendirme**” ya da “**hidroform**” denir (Şekil 2.20). Boru malzemelere ve sacdan imal edilmiş farklı geometrilerdeki profillere uygulanarak, diğer imalat yöntemleriyle üretilmesi nispeten maliyetli veya zor olan parçaların bu yöntemle çok daha kolay ve ucuza imal edilebilmesi sağlanabilir.



Şekil 2.20 Basınç ile şekillendirme

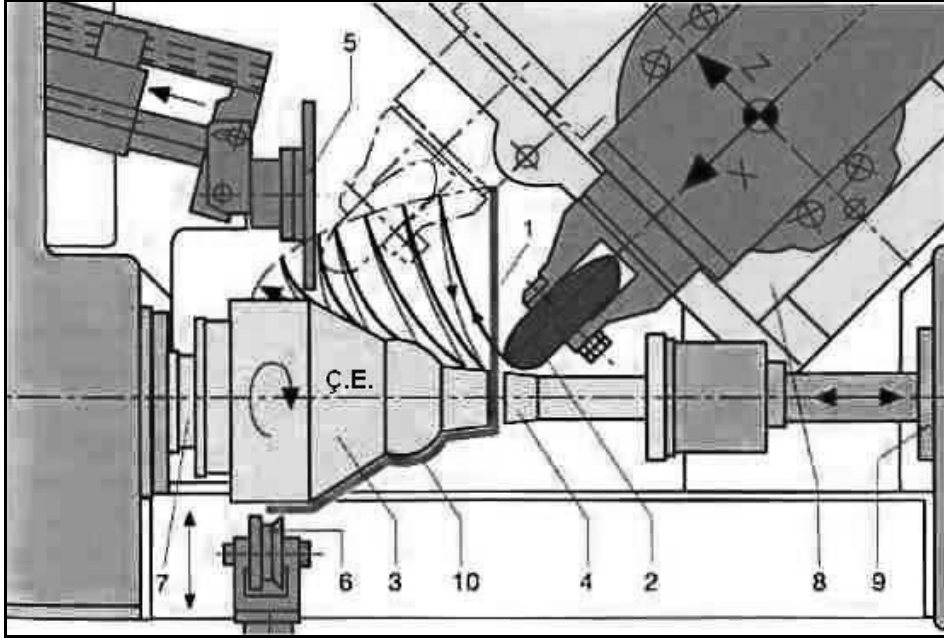
ix) Sıvama

Sıvama, sac veya boru biçimli malzemelerin, kendi eksenleri etrafında döndürülürken, çeşitli takımlar ile uygulanan radyal veya eksenel yönde kuvvetler neticesinde şekillendirilmesidir (Şekil 2.21). Sıvama ile işlenecek parçalar dönme eksenine göre simetrikler; örneğin dairesel kesilmiş plakalar, borular, v.b. gibi geometridedirler. Sıvama, bu tanıma uygun olan fakat birbirinden farklı birçok yöntemi kapsar. İşlem esnasında, sıvama tipine göre, malzeme belirli bir kalıbın üzerine sıvanarak şekillendirilebileceği gibi belirli bir kalıp geometrisi olmadan, boşlukta da şekillendirilebilir. Şekillendirme, işlemin gereklerine göre soğuk veya sıcak olarak yapılır. Sıvama ile imalat, talaş kaldırılmaması ve imalat hızının yüksek olması, sıvamayı cazip kılan temel etmenlerdir (Gün, 2007).



Şekil 2.21 Sıvama

Şekillendirme için kullanılan takımlar ya iş parçasına temas ile dönen veya hiç dönmeyen sabit tiptedirler. Dönen takımlar endüstride “röle” veya “top” olarak, dönmeyen takımlar ise “kaşık” olarak isimlendirilirler.



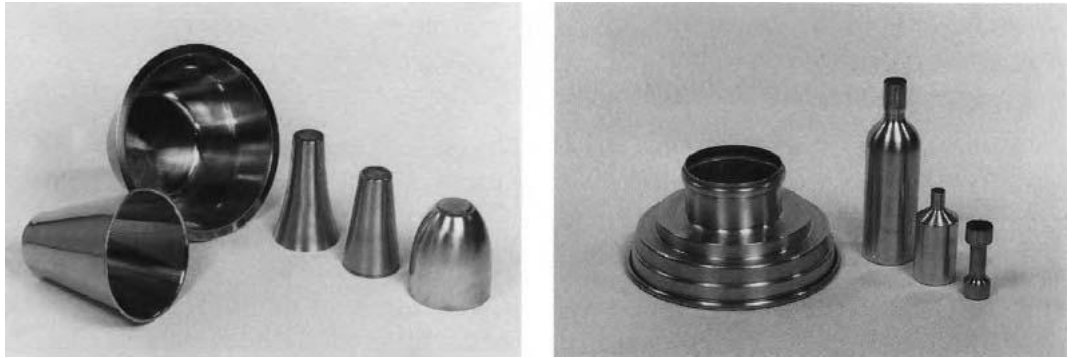
Şekil 2.22 Standart sıvama yönteminin şematik gösterimi (Gün, 2007)

- (1) İş parçası (2) Sıvama rölesi (3) Sıvama kalıbı (4) Karşı baskı elemanı (5) Destek plakası (6) Kesme aparatı (7) Ana mil (8) Röle montaj grubu (9) Karşı baskı grubu (10) Sıvanmış iş parçası

Standart sıvamanın genel çalışma prensibi Şekil 2.22’de görülmektedir. Sıvama kalıbı (3), fener mili grubu olarak da tabir edilen bir güç aktarım mekanizmasının ana miline (7) bağlanmıştır. Ana mil dönme eksenini ve karşı baskı grubu (9) dönme eksenini ortak ve bu eksen makinenin çalışma eksenini (Ç.E.) olarak kabul edilir. İş parçasının merkez eksenini de bu çalışma eksenine sabitlenmelidir. Burada, örneğin, disk biçiminde kesilmiş veya derin çekme ile imal edilmiş bir iş parçası (1), karşı baskı grubuna (9) bağlı bir baskı elemanı (4) vasıtasıyla sıvama kalıbına (3) bastırılır ve bu iki eleman arasında sabitlenir. Böylece iş parçası makineye bağlanmış/yüklenmiş olur. Daha sonra fener mili grubuna bağlı ana motor dönmeye başlar ve dolayısıyla, sıvama kalıbı, iş parçası ve karşı baskı grubu da dönmeye başlarlar. X ve Z eksenlerinde hareket kabiliyetine sahip şekillendirme rölesi (2) dönmekte olan iş parçasını şekillendirir. Bu esnada röle de iş parçasına temasından dolayı sürtünme kuvveti etkisiyle dönmektedir. Şekillendirme işlemi, iş parçasının kalıba tamamen sıvanmasıyla (10) sona erer. Bu çalışma prensibi tüm sıvama tiplerinde benzerdir ancak rölenin

Çalışma eksenleri, makine konstrüksiyonu ve röle sayıları gibi özellikler sıvama tipine ve yapılan işleme göre farklılıklar gösterir.

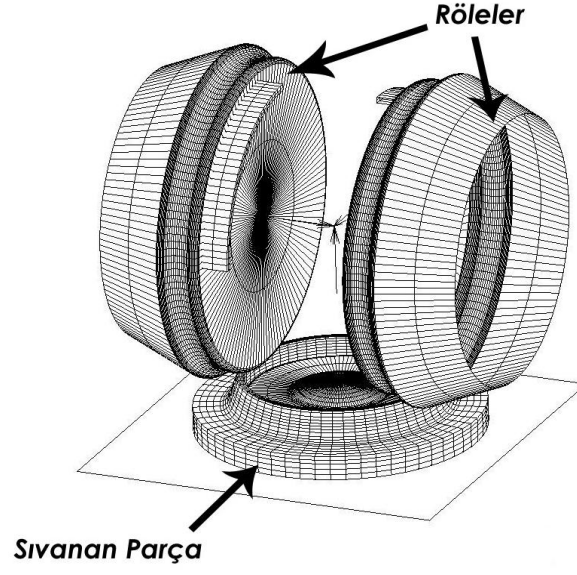
Standart sıvama işlemleri çok pasolu olarak yapılır. Sıvama esnasında bir destek plakası (5), iş parçasının aniden kıvrılmasını önlemek için kullanılır. Sıvama işleminin sonu genellekle ek bir aparat (6) kullanılarak, iş parçasının sınırları kesilir ve/veya düzeltilir (şekil 2.23).



şekil 2.23 Sıvanmış iş parçaları (Gün, 2007)

Tez kapsamında incelenen ve tezin yürütüldüğü firmada yapılan “**sıvama**” işlemi ile literatürde araştırmalar sonucu elde edilen “sıvama” işlemleri uygulama bakımından birbirinden farklılık arz etmektedir. “**Spinning**” olarak şekil 2.21’de ifade edilen sıvama işlemi, işlenmemiş sac metal malzemeye plastik şekil vererek kalıp üzerine kaplanması işlemidir. Fakat tez ile ilgili “sıvama” veya ilgili firma içersindeki terim ile “**edge-form rolling**” imalat yöntemi, araçlarda kullanılan küresel yatakların imalat sonrası montaj işlemindeki safhadır.

Küresel yataklardaki sıvama işlemi, belirli bir sıvama basınç kuvveti altında sabit bir hızda dönen röleler aracılığı ile iş parçasının kenarlarına plastik şekil vererek şekillendirme işlemidir (şekil 2.24).



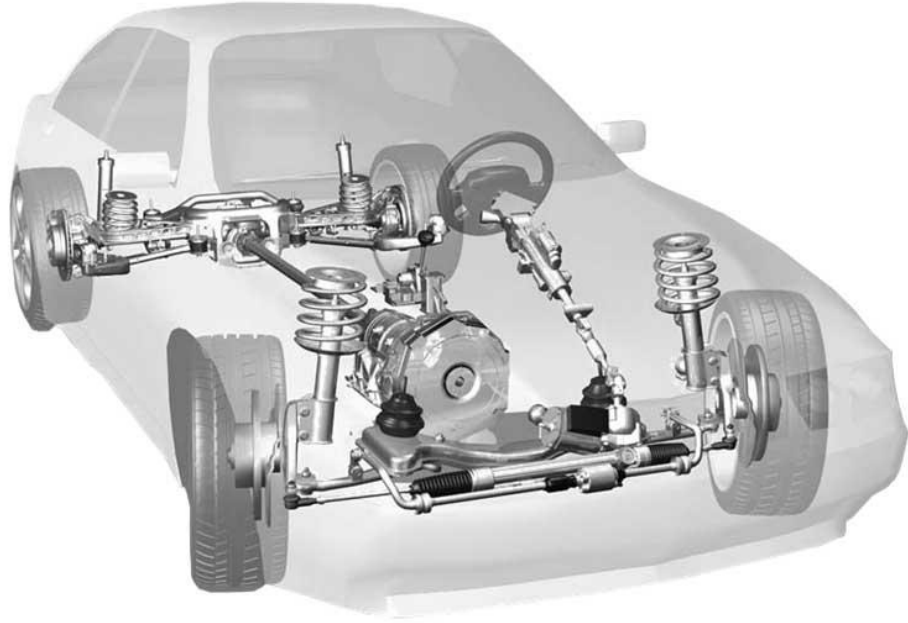
Şekil 2.24 Küresel yataklarda sıvama

Bu bağlamda “Edge-Form Rolling” veya sıvama işleminin ayrıntıları, imalat süreci ile küresel yatağın mekanik davranışı arasında sıkı bir ilişki olduğundan, izleyen bölümlerde tümleşik olarak incelenmiştir.

3. SÜSPANSİYON SİSTEMİ

Araç gövdesi ile tekerlekler arasına yerleştirilen süspansiyon sistemi, yolun yapısından kaynaklanan titreşimleri sönmölemek üzere tasarlanmıştır. Süspansiyon sistemi sürüş konforu ve güvenliği açısından ihtiyaç duyulan bir sistemdir.

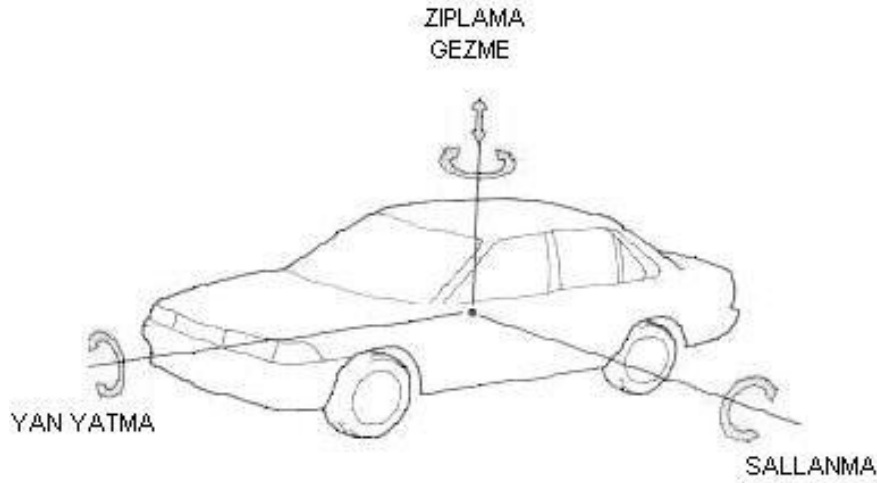
Otomobilin yol tutuş yetenekleri sürüş güvenliğinin sağlanmasındaki en önemli faktördür. Otomobilin yerle bağlantısı ve yol tutuşu birçok parçanın birlikte çalışmasıyla sağlanır. Yürüyen aksam, direksiyon sistemi, süspansiyon sistemi, fren sistemi ve tekerlekler belli bir düzen ile karosere bağlıdır. Süspansiyon sistemi (Şekil 3.1) otomobilin ağırlığını taşıdığı gibi lastiklerin yola tutunmasını da sağlamalıdır. Otomobilin yol tutuşu hayati önem taşır; çünkü aracın aktif güvenliği, dengesi ve konforu bu sistemin sağlıklı çalışmasına bağlıdır (MEGEP, 2005).



Şekil 3.1 Araç üzerindeki süspansiyon sistemi (ZF, 2010)

Süspansiyon sisteminin görevleri şunlardır:

- Sürüş esnasında lastikler ile birlikte çalışarak yolcuları veya taşınan yükü korumak ve sürüş konforunu iyileştirmek amacıyla yol yüzeyinin yapısından kaynaklanan titreşimleri, salınımları ve anî şokları sönümleyerek yumuşatır. Aynı zamanda şasi ve karoseriyi de korumuş olur.
- Yol yüzeyi ile tekerlekler arasındaki sürtünmeye bağlı olarak ortaya çıkan sürüş ve fren kuvvetlerini gövdeye aktarır.
- Akslar üzerinde gövdeyi taşır ve gövde ile tekerlekler arasındaki uygun kinematik ilişkiyi sağlar.
- Yol ile tekerlekler arasında teması kaybetmeden güvenli dönüş yapmayı sağlar.
- Seyir halindeki bir araca yoldan ve havadan birçok kuvvet etki etmektedir; işte bu kuvvetler Şekil 3.2’de görüldüğü gibi araçta bazı salınımlara neden olur.



Şekil 3.2 Araçta meydana gelen salınımlar (Staudt, 2000)

Sallantı: Aracın ağırlık merkezine göre ön ve arkasının aşağı yukarı hareket etmesidir. Bu sallantı özellikle, aracın pürüzlü ve kasisli, çok çukurlu stabilize yollarda kullanıldığı durumlarda meydana gelir.

Yan Yatma: Bozuk bir yolda araç döndüğünde veya hareket halinde iken aracın bir tarafındaki yay kısılırken diğeri uzamaya başlar. Bunu sonucunda aracın gövdesi bir taraftan diğere tarafa yanal hareketler yapar.

Zıplama: Aracın tümüyle aşağı yukarı hareketidir. Düzgün olmayan yollarda yüksek hızlarda araç kullanıldığı zaman meydana gelir. Yaylar yumuşak olduğunda da zıplama da artar.

Gezme: Aracın ağırlık merkezine bağlı olarak eksenal merkezden sağa ya da sola hareketidir.

3.1 Süspansiyon Sisteminin Elemanları

3.1.1 Yaylar

Araçta tekerlekler hariç aracın bütün yükünü üzerlerinde taşırlar. Yapılarındaki esneklik sayesinde tekerleğin tümseklerde şasiye yaklaşp, çukurlarda şasiden uzaklaşmasına izin vererek sarsıntıların hissedilmesini en aza indirirler.

Yaylar enerji depolayan elemanlardır. Seyir halindeki taşıtta yoldan gelen darbeler, tekerlekler aracılığı ile çok kısa zaman içerisinde yaylara kinetik enerji olarak iletilir. Yaylar bu enerjiyi sıkışmak suretiyle potansiyel enerji olarak üzerinde depolar. Bir süre sonra yaylar, oldukça yavaş bir salınım hareketiyle potansiyel enerjiyi kinetik enerjiye dönüştürerek bırakır. Böylece yoldan gelen darbeler şasiye geçmeden yaylar üzerinde sönmülmüş olur.

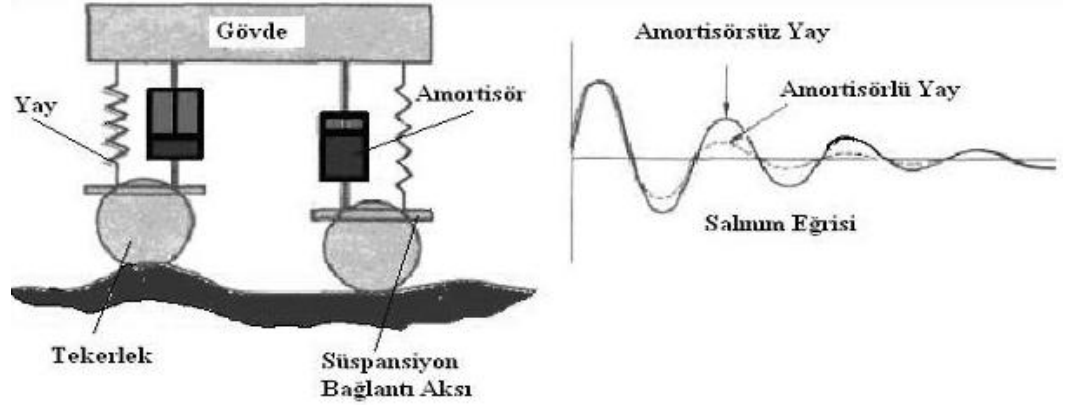
Yayların başlıca görevleri;

- Araca ait olan ağırlık ve kütle kuvvetlerini üzerinde depolar.
- Sürüş konforu için yoldan gelen darbeleri karşılar ve yumuşak titreşimlere dönüştürür.
- Sürüş güvenliği için tekerleklerin yol yüzeyine iyi tutunmasını sağlar.

3.1.2 Amortisörler

Amortisörler, yaylar üzerine gelen yükü emerek (absorbe ederek) tersi yönde iletme görevini üstlenirler. Araç yol yüzeyindeki darbelere maruz kaldığında süspansiyon yayları uzayarak ya da kısalarak bu darbeleri karşılar. Darbeleri karşılamaları esnasında bir süre salınım hareketi yapar. Gerçekte bir yayın kısa bir salınımdan sonra durması beklenir. Aynı zamanda yayların hem yeter derecede sert hem de eğilebilir özellikte olmaları gerekmektedir. Bunun yanı sıra yayların sıkışması ve gevşemesi hallerinde araçta aşırı ve sürekli sarsıntılara

yol açmaması emniyet ve konfor için zorunludur. Bu nedenle sarsıntı ve darbeyi şasiye iletmeyen yayın yavaşça gevşemesi ve sıkışmasını sağlayan, kontrolsüz salınımı kısa sürede durduracak donanımın ihtiyacı vardır (Şekil 3.3). Bu görevi amortisörler gerçekleştirir.

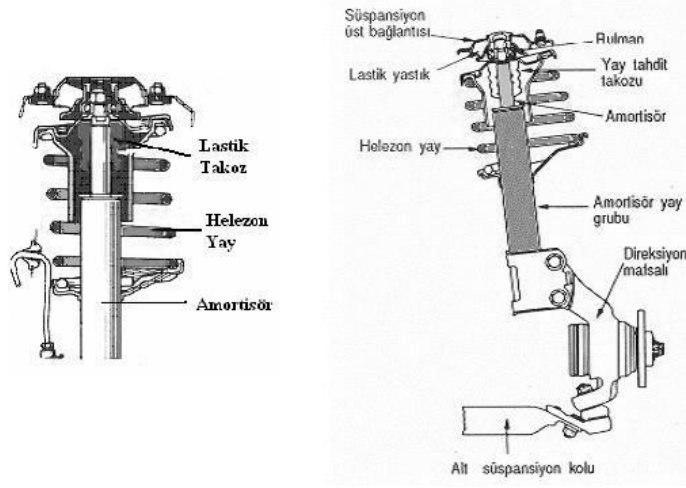


Şekil 3.3 Bir otomobilin titreşim modeli (Fildiş, 2001)

Amortisörün görevleri;

- Yayların üzerindeki enerjiyi absorbe ederek salınım süresini kısaltır.
- Lastiklerin her durumda zeminle temasını sağlayarak sürüş emniyetini sağlar.
- Lastiklerin daha iyi yol tutuşunu sağlayarak direksiyon hâkimiyetini kolaylaştırır.
- Yatmayı, kaymayı, zıplamayı, fren sırasında dalmayı ve hızlanma sırasında ön tarafın yükselmesini arka tarafın çökmesini azaltarak sürüş konforunu artırır.

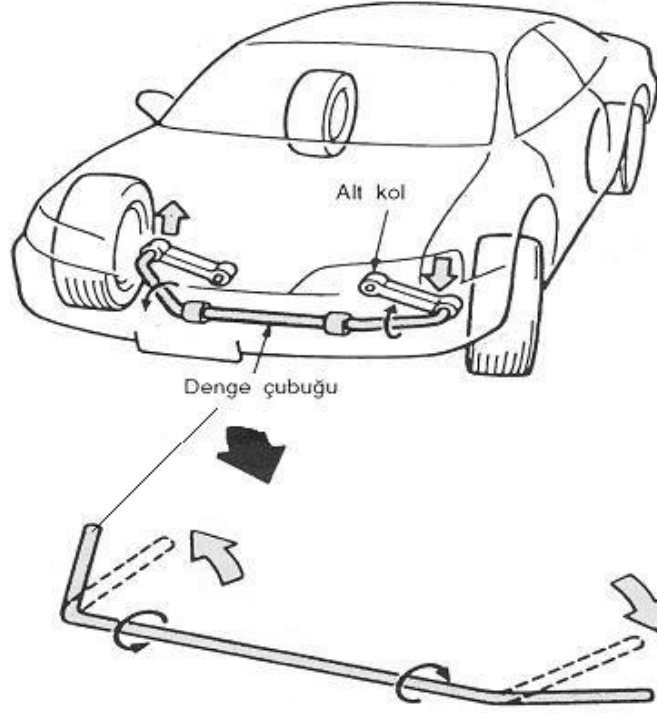
Amortisörler aracın dingil yapısına ve kullanılan yaylara göre değişik şekillerde bağlanabilir. Helezon yay ile bir bütün olarak bağlandığı gibi bağımsız olarak da monte edilebilir. Amortisörler arka süspansiyonlarda aks kovanı veya salıncak ile şasi arasına ön süspansiyon da ise direksiyon mafsalı ile şasi (Şekil 3.4) veya kaportaya bağlanır (MEGEP, 2005).



Şekil 3.4 Lastik takoz, yay ve amortisörün bağlantı elemanları ile görünüşü (MEGEP, 2005)

3.1.3 Denge (viraj) çubuğu

Denge çubuğu, aracın dönüş esnasında meydana gelen merkezkaç kuvvetine bağlı olarak yana yatması sonucu savrulmasını önlemek için kullanılır (Şekil 3.5). Denge çubukları virajın iç tarafında kalan (aynı aks üzerinde karşı taraftaki) tekerleği de yere bastırmak suretiyle, emniyetli bir dönüş yapma imkânı sağlar. Viraj çubuğu, önden ve arkadan kaymaları da en aza indirir. Lastiklerin yola tutunma yeteneklerini artırır.



Şekil 3.5 Denge çubuğu (Yüce, 1997)

Ön süspansiyonda denge çubuğu lastik yastıklar ve bağlantılar üzerinden alt salıncağın uçlarına tutturulmuştur. Denge çubuğunun orta kısmı lastik yastıklar vasıtasıyla aracın gövdesine ve şasiye bağlanmıştır. Özellikle amortisör kule gergileri ile uyum içinde çalışır. Burulma kuvvetlerine karşı koyabilecek yapıda olan viraj denge çubukları tek parça halinde “U” şeklinde yapılmıştır. Eğer sağ ve sol tekerlekler eşit miktarda, aynı yönde ve zamanda aşağı yukarı hareket ederlerse denge çubuğu burulmaz. Normalde araç dönerken dış yay sıkışır, iç yay açılır. Bu yüzden, denge çubuğunun bir ucu yukarı doğru burulurken diğer ucu ise aşağı doğru burulur. Çubuk burulmaya karşı koymaya çalışır. Bu direnç aracın savrulmasını azaltır ve gövdeyi mümkün olduğunca düz tutmaya çalışır (Şekil 3.5). Fazla kasisli yollarda tek bir lastiğin havada kalması gibi dezavantajları vardır, bu da iyi bir süspansiyon sistemi ile giderilebilir.

Şekil 3.6 Denge çubuğunun süspansiyon bağlantıları (Altıparmak, 2000)

Arka süspansiyonda ise viraj çubukları yanal kontrol çubuğu olarak adlandırılır. Şekil 3.6'da arka aksta kullanılan yanal kontrol çubuğu görülmektedir. Her iki ucundan arka aksı gövdeye bağlar. Aks ile gövde arasında oluşan yanal kuvvetleri üzerine almaktadır.

3.1.4 Salıncak kolları

Salıncak kolları süspansiyon sisteminin bir parçası olup ön süspansiyon sistemlerinde aks taşıyıcısı, direksiyon sistemi elemanları, denge çubuğu, yay ve amortisörlerle bir bütün oluşturur. Salıncaklar, tekerlekleri düzgün konumda tutar, çeşitli yönlerden gelen kuvvetlere karşı hareketlerini sınırlar ancak yukarı ve aşağı yöndeki hareketlere izin verir. Şekil 3.7'de önden çekişli otomobillerin ön süspansiyonlarında kullanılan alt salıncak donanım aksona rotül ile montajlı olarak görülmektedir.



Şekil 3.7 Renault Clio alt salıncak kolu, rotili ve aksonu (Kırlı, 2009)

Her tekerlek için, aracın boyuna olan eksenine dik bir üst bir de alt salıncak bulunur. Genel olarak üst salıncak tek, alt salıncak ise iki koldan oluşmaktadır ve araç eksenini boyunca uzanan bir gergi çubuğu tarafından desteklenmektedir. Üst salıncığın bir ucu burçlar ile süspansiyon çatısına, diğer ucu ise bir rotül vasıtasıyla aks taşıyıcısına tutturulmuştur (Şekil 3.8).

Şekil 3.8 Süspansiyon sistemi ve salıncak kollarının sistemdeki yerleri (Altıparmak, 2000)

Alt salıncak kollarının her birinin bir ucu burçlar vasıtasıyla süspansiyon çatısına tutturulmuştur. Diğer uçları ise bir rotıl ve burç vasıtasıyla aks taşıyıcısına tutturulmuştur. Gergi çubuğu aracın boyuna yöndeki kuvvetlerini taşır. Bir ucu bir burç vasıtasıyla süspansiyon taşıyıcısına, diğer ucu ise başka bir burç vasıtasıyla aks taşıyıcısına tutturulmuştur. Helezon yay ve amortisörün üst uçları üst destek vasıtasıyla aracın gövdesine bağlanmıştır. Denge çubuğu, iki ucundan, bir bağlantı ve mafsalları vasıtasıyla 2 nolu alt salıncağa tutturulmuştur. Denge çubuğu ise ortasındaki iki noktadan süspansiyon taşıyıcısına lastik burçlar vasıtasıyla tutturulmuştur. Aracın maruz kaldığı kuvvetler şu parçalar tarafından karşılanır:

Dikey kuvvetler: Helezon yaylar, amortisörler, amortisör kulesi, lastik takozlar

Boyuna Kuvvetler: Gergi çubukları ve burçlar.

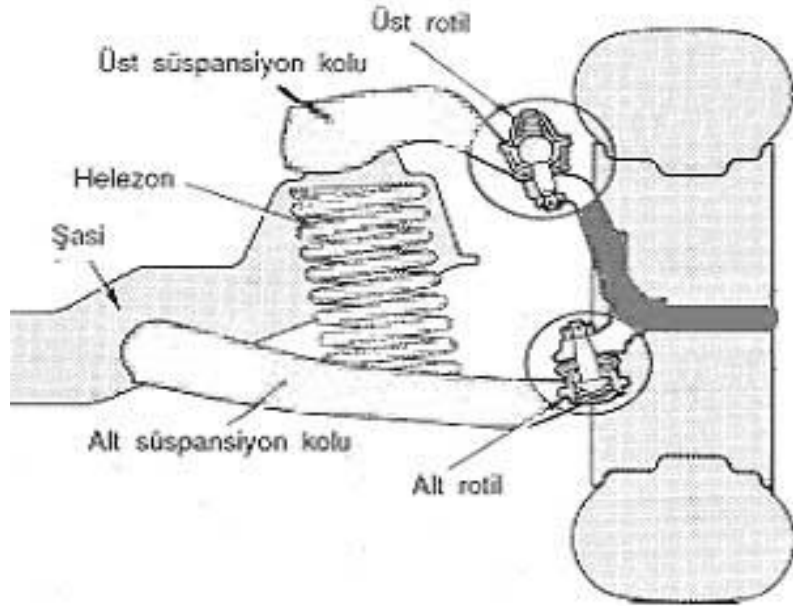
Yanal Kuvvetler: Salıncaklar ve burçlar.

3.1.5 Rotil

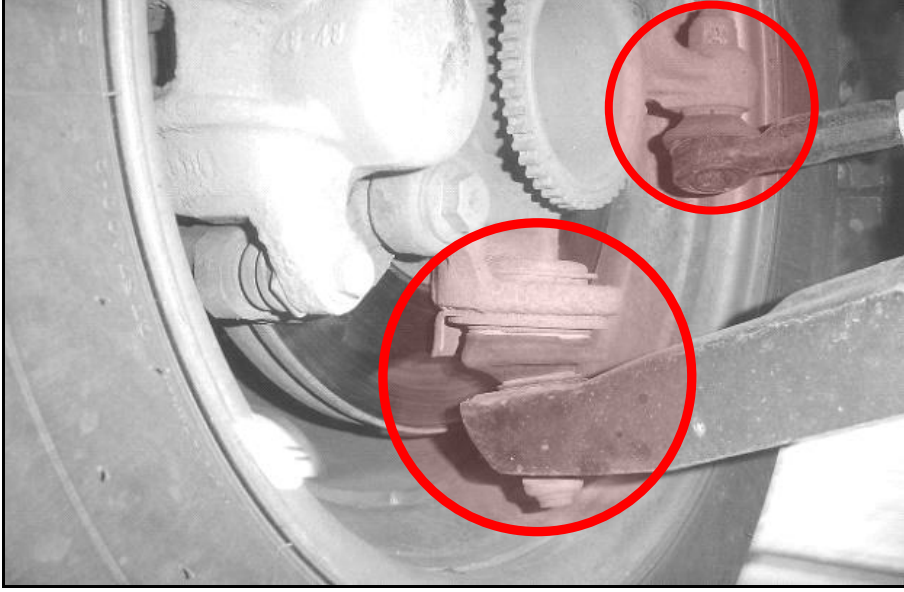
Rotiller tekerleklerle gelen düşey ve yatay kuvvetleri taşır ve aracın dönmesi esnasında direksiyon çatallarına pim vazifesi görür. Direksiyon sistemine bağlı olarak hareketi rot kolundan alır ve direksiyon mafsallına iletir. Rotillerin içi temas yüzeylerinin yağlanması için gres ile doldurulur. Ancak binek otomobillerde kullanılan rotiller genelde yağlanmayan tiptir. Bu nedenle aşınmayı azaltmak için toz kapağının sızdırmaz olması gerekmektedir (Şekil 3.9).

Şekil 3.9 Rotiller (Elbir, 2007)

Şekil 3.10 ve 3.11’de görüldüğü gibi rotiller direksiyon mafsallını alt ve üst salıncaklara bağlamaktadır. Her rotilin bir ucu ayarlanabilir durumdadır. Bu bakımdan rotillerin boyları değişebilir. Ön düzen açılarında toe-in ayrıca buradan yapılmaktadır.



Şekil 3.10 Üst ve alt rotillerin süspansiyon sistemindeki yerleri (Anlaş, 1996)



Şekil 3.11 Rotillerin süspansiyon sistemdeki yeri (Ford, 2008)

Taşıtta normalin dışında düzensiz lastik aşınması, aracın bir tarafa çekmesi, direksiyonun titremesi, yol darbelerini hissettirmesi ve aracın kontrol dışı yolda gezmesi süspansiyon sisteminin, direksiyon sisteminin ve lastiklerin kontrol edilmesini gerektirir.

Dış darbelerden dolayı salıncak kollarında eğilme, burulma, lastik takozlarının aşınması, yırtılması, salıncak kollarının bağlantılarının gevşemesi, bunun sonucunda ses yapması gibi arızalarla karşılaşılabilir. Salıncaklardaki gevşeklik ya da lastik takozlarının durumu bir levye yardımıyla kontrol edilir, gevşek bağlantılar sıkılır, aşınmış lastik takozlar değiştirilir.

Rotiller ve imalat süreçleri birbiri ile ilişkili konular olduğundan diğer bölümlerde ayrıntılı olarak incelenmiştir.

4. İMALAT ve SIVAMA

Sivama işlemi ele alınmadan önce, süspansiyon sisteminde kullanılan rotil ve yönlendirme sisteminde kullanılan rot başı gibi elemanlardan oluşan **küresel bağlantıları** imalat ve tasarım süreçlerinin ayrıntılı şekilde incelenmesi, konunun bütünlüğü açısından faydalı görülmüştür.

4.1 Küresel Bağlantılar ve Rotilin Tasarım Süreci

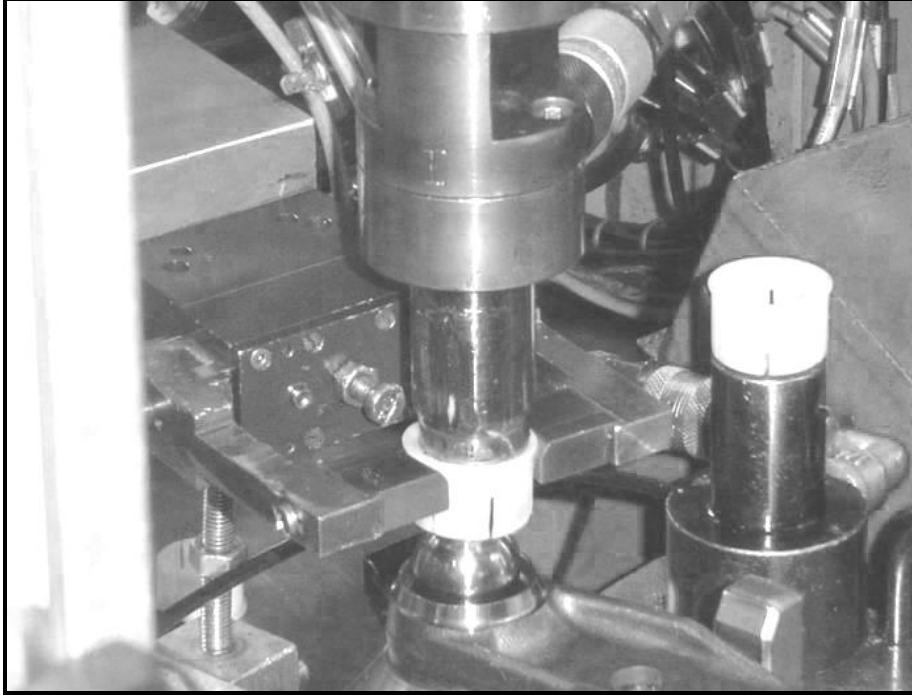
Türkiye’de otomotiv imalatı 2006 yılında “1,2 milyon” adet iken, 2015 yılında “2 milyon” adet olarak hedeflenmektedir. Bir binek araçta 20 adet küresel bağlantı olduğu düşünülürse, 2015 yılında küresel bağlantı pazarında 16 milyon adetlik bir artış beklenmektedir. Dolayısıyla pazardaki bu hızlı yükselişi karşılayacak, hızlı ve hatasız tasarım ve imalat süreçlerine gereksinim duyulmaktadır.

Orijinal parçadan daha kısa bir süreç olan “yedek parça” tasarım sürecini ele alırsak, bir rotil için yedek parça tasarımı hiçbir problemle karşılaşılmazsa yaklaşık 6 ay sürmektedir. Bu tasarım süresinin %70’ini testler oluşturmaktadır. Süreç orijinal parçanın tersine mühendislik yöntemleri ile “nokta bulutu” şeklinde bilgisayar ortamına aktarılması ile başlar. Rotil gövdesi ve mafsalları milinin CAD verisi oluşturulur, ürün geliştirme çalışmaları ve testler aracılığıyla istenen değerlere ulaşacak ölçüler ve toleranslar tespit edilmeye çalışılır. Rotilin tasarımına uygun toz lastiği ve halkalar seçilir. Yapılan tasarımın teknik resimleri belirlendikten sonra tedarikçi araştırması yapılır ve tasarım ihtiyaç duyduğu yarı mamuller istenen özelliklerde temin edilebiliyorsa testler için numune üretimi yapılır. Numuneler üzerinden boyut kontrolü, sızdırmazlık, elastik esneme ve kapak çıkma testlerine başlanır. Test sonuçları müşteri şartlarını sağlamazsa, hem tasarımda hem de imalatla birçok değişiklik gerçekleştirilerek testler tekrar edilir. Yapılan çalışmaların hedefi bu değişiklik sürecini kısaltmaktır. Tasarım, üretim aşamasına aktarılmadan önce sonlu elemanlar analizi (SEA) ile parçanın

testlerdeki başarısını önceden anlamak, test sürecini kısaltmak ve geliştirme çalışmalarına katkıda bulunmak amacıyla yapılır (Kırlı, 2009).

4.2 Küresel Bağlantılarda İmalat Süreci

Araçlarda kullanılan küresel bağlantılar çok değişik tasarımlara ve kullanım yerlerine sahip olmalarına rağmen, birbirlerine benzer imalat süreçlerine sahiptirler. İlk olarak dövme veya döküm sonrası imal edilen gövdeler, talaşlı imalat ile işlenip, uygun toleranslarda şekillendirildikten sonra; plastik yatak montajı yapılır (Şekil 4.1).



Şekil 4.1 Plastik yatak montajı

Mafsal milleri ile gövde arasını dolduran plastik yatak (POM) montajı yapıldıktan sonra, küresel yatak tasarımına göre değişen alt kapak veya kapama halkası **sıvama** işlemi ile monte edilir. Sıvama işlemi, isteğe bağlı özel olarak tasarlanmış sıvama tezgâhlarında (Şekil 4.2) gerçekleştirilir.



Şekil 4.2 Sıvama tezgâhı

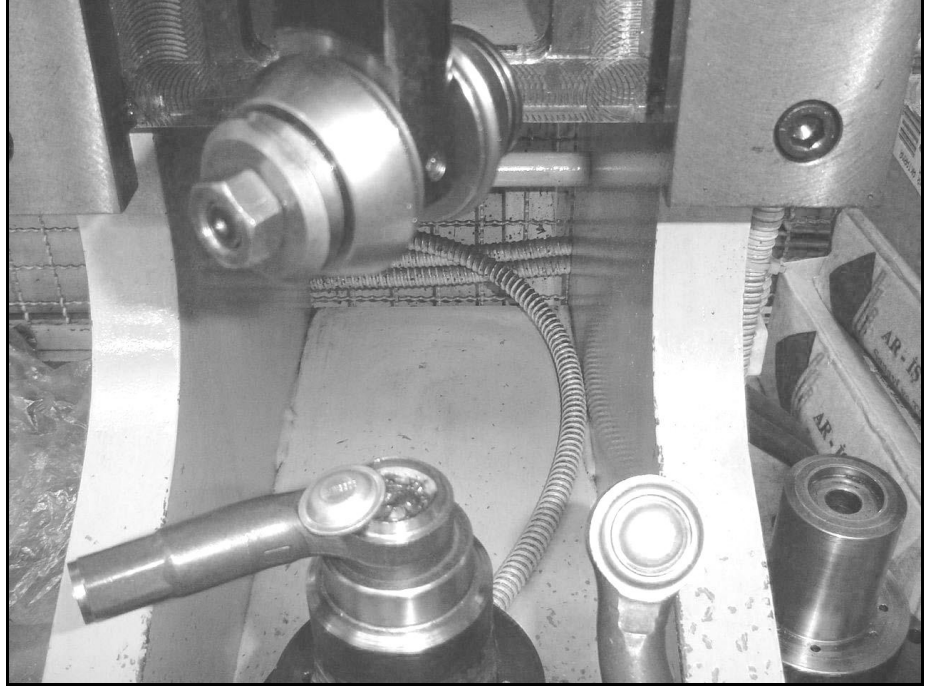
Sıvama, gövde ve mafsalları arasında yerleştirilen plastik yatağı kapakçık ile sıkıştırarak gövde kenarları üzerinde plastik şekil verme işlemidir. Sıvama, plastik şekil verme işlemlerinden haddeleme işlemine benzerlik göstermekte fakat yapısal olarak farklılık arz ettiğinden haddeleme işleminin bir alt konusu olarak incelenmiştir. Haddeleme işleminin mekaniği matematiksel olarak modellenenirken, henüz literatürde sıvama işlemi hakkında bir bulguya rastlanamamıştır.

Gövdesi üzerine kapakçık yerleştirilen rotül sıvama tezgâhına konur. Sıvanmamış rotül (Şekil 4.3) tezgâhta malafa üzerine yerleştirildikten sonra plastik şekil verme işlemine başlanır.



Şekil 4.3 Sıvanmamış rotol gövdesi (X90 SBJ)

Sıvama işlemi başladıktan sonra elektrik motoruna bağlı röleler, motor gücü ile orantılı olarak 490 devir/dakika hız ile kendi eksenleri etrafında dairesel hareket yaparlar. Aynı süre zarfında hidrolik motordan gelen (nominal) basınç ile rölelere 9.5 ile 10.5 kN arasında kuvvet uygulanarak plastik şekil değişimi sağlanmaktadır. Sıvama işlemi yaklaşık olarak 1 saniye içerisinde gerçekleşmekte ve gövde kenarları soğuk sıvanarak gerekli formun sağlanması hedeflenmektedir (Şekil 4.4 - 4.5).

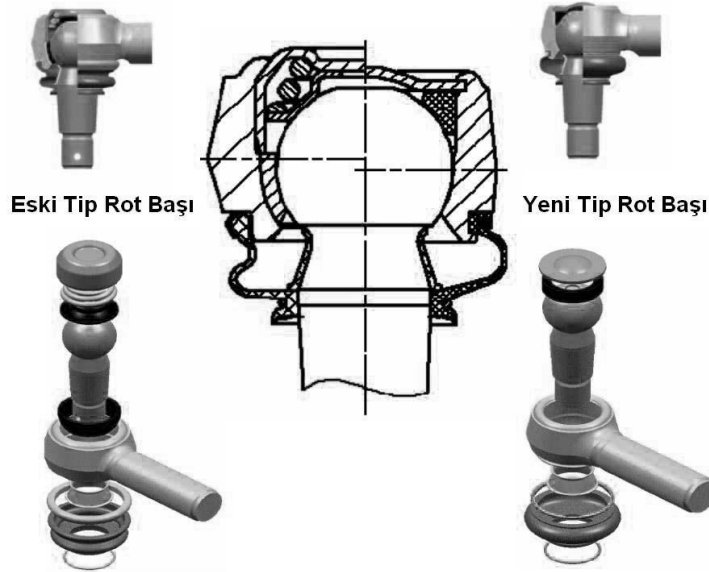


Şekil 4.4 Alt kapak sıvaması



Şekil 4.5 Başarılı şekilde sıvanmış küresel yatak (X90 SBJ)

Sıvama tezgâhında sıvama işlemi bittikten sonra, sıvanmış rotıl üzerine toz lastiği geçirilerek lastiği tutan halkaların montajı yapılır. İmalat sürecinde, POM yatağın montajı ve sıvama kapağının kapatılması esnasında plastik yatak üzerine elastik ve plastik deformasyonuna sebep olacak yükler gelmektedir. Bu işlemler yatağın, mafsal mili ve gövde arasında sıkışmasına ve ön yüklemeli olarak çalışmasına sebep olmaktadır. Bu nedenle, montajı yapılmış rotiller bir süre fırınlanarak, POM yatağın montaj yükleri altında plastik olarak deforme olması sağlanır ve ön yüklemenin etkisi azaltılmaya çalışılır. Tez çalışmasının beraber yürütüldüğü firmada önceki tasarımlarda (Şekil 4.6) ön yükleme, sistem içerisindeki bir yay ile sağlanabilmekte iken, bu tasarım çok bileşen içermesi ve montajda ortaya çıkan sorunlar sebebi ile terk edilmiştir. Yeni tasarımlarda ulaşılmak istenen amaç, küresel yataklarda bileşen sayısını azaltarak imalat maliyeti düşürürken parçanın dayanımı artırmaktır (Şekil 4.7).



Şekil 4.6 Eski ve yeni tip rot başları (ZF, 2010)

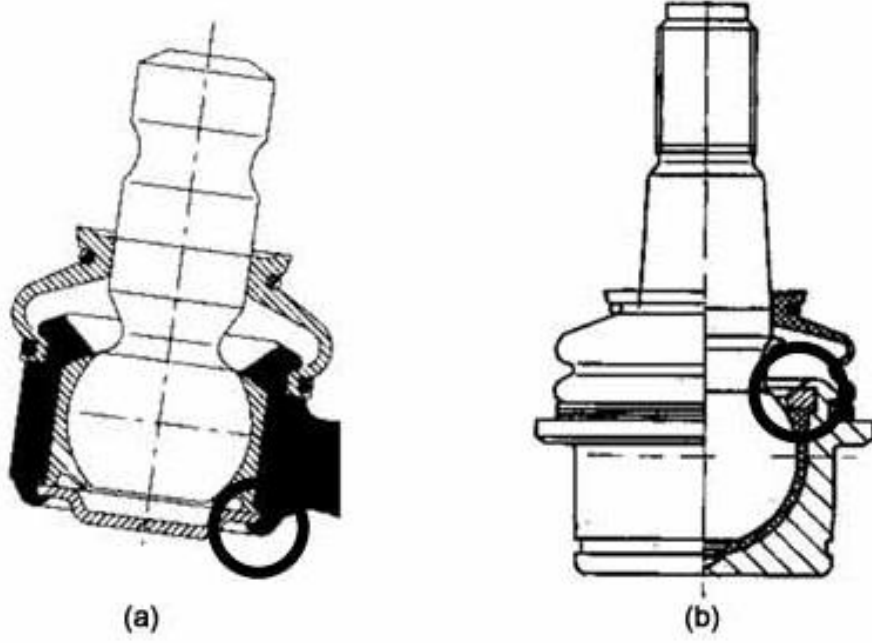
Tüm bu imalat parametreleri; rotinin görevini uzun süre yerine getirebilmesi için gerekli olan katılık değerlerini etkilemektedir. Testlerden çıkan değerler; genelde imalat sürecinin basamaklarındaki parametreleri değiştirerek kontrol altında tutulmaya çalışılmaktadır. Tasarım esnasında belirlenen imalat toleransları ile plastik yatak montaj yükleri, sıvama basıncı ve sıvama rölelerinin kesitleri ile kapak baskı kuvveti, ısıtma işlem süresi ve sıcaklığı ile de test

değerlerinin tümü kontrol edilebilmektedir. Fakat bu parametrelerin değişik kombinasyonları ile defalarca denemeler yapmak çok uzun zaman almakta ve kontrolsüz bir süreç oluşturmaktadır. (Kırlı, 2009)



Şekil 4.7 Montaj işlemi bitmiş rotul (X90 SBJ)

Küresel yataklar, boşluksuz olarak hatta bir miktar sıkı birleştirilerek ilgili sisteme montajları yapılır. Diğer yandan aşırı sıkılık, yüksek moment değerlerine ve dolayısıyla ek işlemlere neden olurken; düşük sıkılık mafsalları içerisinde boşluk oluşturmaktadır. Her ikisi de istenmeyen durumlar olmak ile beraber uzun ömürlü, az sürtünmeli ve istenen çalışma açılarını her yol koşulunda sağlayacak küresel yatak tasarımı, uzun test süreçleri ve birçok tekrar içeren örnek imalatların sonrasında elde edilebilmektedir. Bu bağlamda sıvama işlemi sonrası oluşan sıkıştırma kuvvetleri küçümsenmeyecek derecede önem arz etmektedir. Oluşan bu sıkıştırma kuvvetlerinin nicelik değerleri aracın konfor düzeyini etkilemektedir (Şekil 4.8).



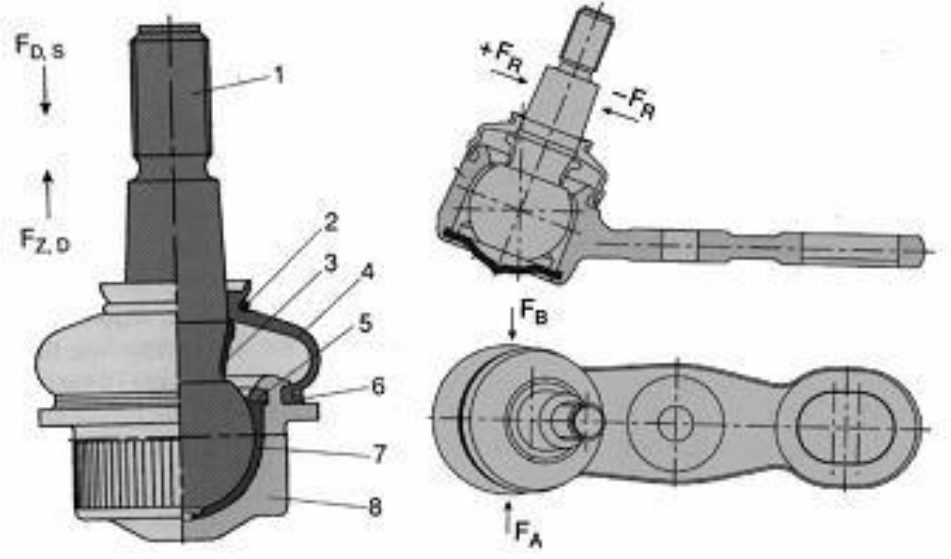
Şekil 4.8 Sıvama işlemi sonrası sıkıştırma kuvvetlerinin oluştuğu bölgeler

(a) Eksenel çekiye çalışan rotıl (b) Eksenel basıya çalışan rotıl

4.3 Küresel Bağlantıya Gelen Yükler

Taşıt çukur veya tümsekle karşılaştığında rotıl; $F_{D,S}$ ve $F_{Z,D}$ yükleri ile viraj dönerken $+F_R$ ve $-F_R$ yükleriyle, ivmelenme ve frenleme durumlarında ise F_A ve F_B yükleri ile karşılaşmaktadır (Şekil 4.9).

Bu nedenle, küresel bağlantılara değişik doğrultularda ve boyutlarda yükler gelmektedir. Araçtaki konumu itibari ile Şekil 4.9'daki rotıl parçası yol koşullarının yarattığı yüklerin yanı sıra, değişken iklim ve çevre koşullarının da etkilerine maruz kalmaktadır. Tüm bu yükler parça üzerindeki en zayıf halka olan Şekil 4.9'da "7" numara ile gösterilen plastik POM yatak tarafından taşınabilmelidir.



Şekil 4.9 Rotile gelen yükler

5. SIVAMA İŞLEMİNE SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE YAKLAŞIM

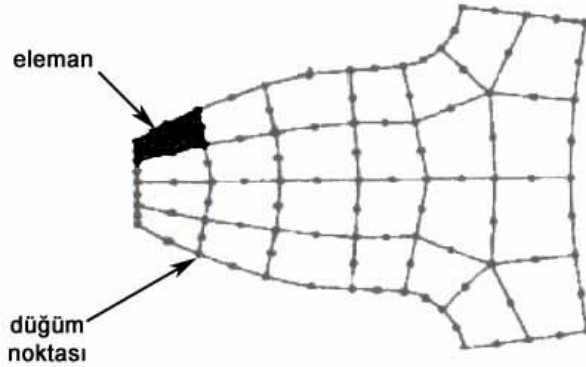
5.1 Sonlu Elemanlar Yöntemi

Kâinatta oluşan her olay, fiziksel kanunlar yardımıyla ve matematiksel yöntemler ile anlaşılmaya çalışılır. Her hadise kendine ait büyüklükler yardımıyla cebirsel, diferansiyel veya integral denklemler yardımıyla büyük oranda ifade edilebilir. Pratikte karşılaşılan problemler ne kadar karmaşık olursa olsun, tarihin her devrinde o devrin ihtiyaçlarına cevap verecek derecede modellenmeye çalışılmış ve her devirde alınan örnekler yardımıyla insanın kullanımına arz edilmiştir. Mekanik, termal veya aerodinamik yüklere maruz, değişik şekilli delikler bulunan bir kanaldaki basınç dağılımını belirlemek, deniz suyundaki kirlilik oranını belirlemek, atmosferdeki basınç dağılımını belirlemek veya atmosferdeki çeşitli hareketleri, bir hortum veya kasırganın oluşum mekanizmasını anlamak ve önceden belirlemek üzere havanın modelini oluşturmak gibi birçok karmaşık problem bulunmaktadır. Problemin en azından bir kısmının anlaşılmış olması bile pratik birçok yararlar sağlamaktadır. Burada, önceden yapılan çözümlemelerin sonradan yanlışlığının anlaşılmış olmasının bile pratik sonuçlar açısından fazla bir önemi bulunmamaktadır (Sarıkanat, 2007).

İnsanlar, çevresinde meydana gelen olayları ya da karşılaştıkları problemleri çoğu zaman kolayca kavrayıp doğrudan çözemezler. Bu yüzden karmaşık bir problem, bilinen veya kavranması daha kolay alt problemlere ayrılarak daha anlaşılır bir hale getirilir. Oluşturulan alt problemler çözülüp birleştirilerek esas problemin çözümü yapılabilir. Örneğin; gerilme analizi üzerinde çalışan mühendisler, gerilme problemini basit kiriş, plak, silindir, küre gibi geometrisi bilinen şekillerle sınırlarlar. Bu elde edilen sonuçlar çoğu kez problemin yaklaşık çözümüdür ve bazen doğrudan bazen de bir katsayı ile düzeltilerek kullanılır. Mühendislik uygulamalarında problemlerin karmaşıklığı sebebiyle genellikle problemlerin tam çözümü yerine, kabul edilebilir seviyede bir yaklaşık çözüm tercih edilir. Öyle problemler vardır ki, tam çözüm imkânsız kabul edilir ve yaklaşık çözüm tek yol olarak benimsenir (Kırlı, 2009).

Sonlu elemanlar yöntemi; karmaşık olan problemlerin daha basit alt problemlere ayrılarak her birinin kendi içinde çözülmesiyle tam çözümün bulunduğu bir çözüm şeklidir. Bu metot bilgisayar çağının bir ürünüdür. Bilgisayar teknolojisinin gelişmesiyle birlikte veri iletim hızlarının sürekli olarak artmasına bağlı olarak bu metotla çözüm yapan yazılımların sayısı gittikçe artmaktadır. Günümüzde çeşitli analizler için bu yazılımların kullanımı yaygınlaşmıştır. Sonlu elemanlar yönteminin üç temel niteliği vardır:

- i. Geometrik olarak karmaşık olan çözüm bölgesi sonlu elemanlar olarak adlandırılan geometrik olarak basit alt bölgelere ayrılır (Şekil 5.1).
- ii. Her elemandaki sürekli fonksiyonlar, cebirsel polinomların lineer kombinasyonu olarak tanımlanabileceği kabul edilir.
- iii. Her eleman içinde sürekli olan tanım denklemlerinin belirli noktalardaki (düğüm noktaları) değerlerinin elde edilmesi problemin çözümünde yeterli kabul edilir.



Şekil 5.1 Herhangi bir parçanın sonlu elemanlar yöntemi ile daha basit alt bölgelere ayrılması

Kullanılan yaklaşım fonksiyonları, interpolasyon teorisinin genel kavramları kullanılarak polinomlardan seçilir. Seçilen polinomların derecesi ise çözülecek problemin tanım denkleminin derecesine ve çözüm yapılacak elemandaki düğüm sayısına bağlıdır.

Sürekli bir ortamda alan değişkenleri (gerilme, yer değiştirme, basınç, sıcaklık vs.) sonsuz sayıda farklı değere sahiptir. Eğer sürekli bir ortamın belirli bir bölgesinin de aynı şekilde sürekli ortam özelliği gösterdiği biliniyorsa, bu alt bölgede alan değişkenlerinin değişimi sonlu sayıda bilinmeyen olan bir fonksiyon ile tanımlanabilir. Bilinmeyen sayısının az ya da çok olmasına göre seçilen fonksiyon lineer ya da yüksek mertebeden olabilir. Sürekli ortamın alt bölgeleri de aynı karakteristik özellikleri gösteren bölgeler olduğundan, bu bölgelere ait alan denklem takımları birleştirildiğinde bütün sistemi ifade eden denklem takımı elde edilir. Denklem takımının çözümü ile sürekli ortamdaki alan değişkenleri sayısal olarak elde edilir (Reddy, 2004).

Sonlu elemanlar yönteminin kullanılması ve bilgisayarların sanayiye girmesiyle, bugüne kadar ancak pahalı deneysel yöntemlerle incelenebilen birçok makine elemanının (motor blokları, pistonlar vs.) kolayca incelenebilmesi, hatta çizim esnasında mukavemet analizlerinin kısa bir sürede yapılarak optimum dizaynın gerçekleştirilmesi mümkün olabilmektedir.

Sonlu elemanlar yöntemini diğer nümerik metotlardan üstün kılan başlıca unsurlar şöyle sıralanabilir.

- a) Kullanılan sonlu elemanların boyutlarının ve şekillerinin değişkenliği nedeniyle ele alınan bir cismin karmaşık geometrisi tam olarak temsil edilebilir.
- b) Bir veya birden çok delik içeren bölgeler veya köşeli karmaşık şekilli geometriye sahip elemanlar kolaylıkla incelenebilir.
- c) Değişik malzeme ve geometrik özellikleri bulunan cisimler incelenebilir.
- d) Sebep sonuç ilişkisine ait problemler, genel direngenlik matrisi ile birbirine bağlanan genelleştirilmiş kuvvetler ve yer değiştirmeler cinsinden formüle edilebilir. Sonlu elemanlar yönteminin bu özelliği problemlerin anlaşılmasını ve çözülmesini hem mümkün kılar hem de basitleştirir.
- e) Karmaşık sınır şartları kolayca uygulanabilir.

Çeşitli yapısal analiz denklemlerinin çözümünde, sonlu elemanlar yöntemi sayısal yer değiştirme (deplasman) metodu esaslı geliştirilmiştir. Yazılımlarda kullanılan katılık metodolojisi sistemin katılığının içinden kuvvet-yer değiştirme ilişkisini adreslemektedir. Herhangi bir doğrusal statik problemi sonlu elemanlar yönteminde Denklem 5.1 aracılığıyla ifade edilebilir.

$$K \cdot u = f \quad (5.1)$$

K sistemin katılık matrisi, u düğümlere ait yer değiştirmeler ve f 'de kuvvet vektörüdür. Sistemin hem yer değiştirmelere, hem de kuvvetlere göre sınır şartlarının yazıldığı farz edilirse;

$$\begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} \\ K_{21} & K_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} f_1 \\ f_2 \end{Bmatrix} \quad (5.2)$$

Denklem 5.1 ve 5.2 yardımıyla ifade edilebilir. u_1 bilinmeyen yer değiştirme vektörü, f_1 bilinen kuvvet vektörü, u_2 bilinen yer değiştirme vektörü ve f_2 reaksiyon kuvvetidir. u yer değiştirme vektörünün saptanmasından sonra, her elemandaki birim şekil değiştirmeler, her elemanın düğümlerine ait yer değiştirmelere göre birim şekil değiştirme – yer değiştirme ilişkisinden Denklem 5.3'deki gibi hesaplanmaktadır (MSC Marc, 2008).

$$\varepsilon_{e1} = \beta u_{e1} \quad (5.3)$$

Eleman içindeki gerilmeler ise, Denklem 5.4 yardımı ile gerilme-birim şekil değiştirme ilişkisinden elde edilir.

$$\sigma_{e1} = L \varepsilon_{e1} \quad (5.4)$$

Burada σ_{e1} elemandaki gerilmeler, ε_{e1} ise eleman içerisindeki birim şekil değiştirmelerdir. u_{e1} elemanın düğün noktaları ile ilişkili yer değiştirme vektörüdür. β ve L ise sırası ile birim şekil değiştirme – yer değiştirme ve

gerilme – yer değiştirme ilişkileridir.

Dinamik bir problemde ise, kütle ve sönümlemenin etkisi sisteme dâhil edilmelidir. Lineer dinamik bir sistemi ifade eden denklem

$$M\ddot{u} + N\dot{u} + Ku = f \quad (5.5)$$

şeklindedir. Burada M sistemin katılık matrisi, N ise sönümleme matrisidir. $\ddot{u}$ ivme vektörü, $\dot{u}$ ise hız vektörüdür. Sönümsüz (dampersiz) bir sistem ise;

$$M\ddot{u} + Ku = f \quad (5.6)$$

ile ifade edilir. Sönümsüz bir sistemin serbest salınım hareketi ise

$$M\ddot{u} + Ku = 0 \quad (5.7)$$

şeklinde ifade edilir. Benzer problemlerde uygun diferansiyel denklemlerle modellenip sonlu elemanlar yöntemi ile yaklaşım yapılabilir.

Sonlu elemanlar yöntemi, lineer problemlerin yanı sıra non-lineer problemlerin yaklaşımında da kullanılabilir. Non-lineer sonlu eleman yönteminin gelişmesi, çoğunlukla nükleer, uzay endüstrisi ve çekirdek fiziğinden etkilenmiştir. Çekirdek fiziğinde, non-lineerlikler esasen yüksek sıcaklıklardaki malzeme davranışlarından kaynaklanmaktadır. Uzay endüstrisindeki non-lineerlik ise çeşitlilik göstermektedir. Non-lineer sonlu eleman teknikleri metal şekillendirme usullerinde, akışkan-katı etkileşiminde ve akışkan dolaşımında yaygın olarak kullanılmaktadır. Son yıllarda sonlu elemanlar yönteminin biyomekanik ve elektromanyetik bilim alanlarında kullanımında da önemli derecede artış gözlemlenmektedir (MSC Superform, 2005).

Eğer kuvvet - yer değiştirme arasındaki ilişki mevcut duruma (diğer bir ifade ile mevcut yer değiştirmeler, kuvvet ve gerilme-birim şekil değiştirme ilişkisine) bağımlı ise bu problem **non-lineer** bir problemdir. u genel yer değiştirme vektörü, P genel kuvvet vektörü ve K katılık matrisi olarak

düşünüldüğünde, herhangi bir non-lineer problem için kuvvet-yer değiştirme arasındaki ilişki;

$$P = K(P, u).u \quad (5.8)$$

şeklinde ifade edilir. Denklem 5.8'den görüldüğü gibi lineer problemler, non-lineer problemlerin bir altkümesini oluşturmaktadır. Örneğin lineer sonlu elemanlar yönteminin uygulamalarında

$$P = K.u \quad (5.9)$$

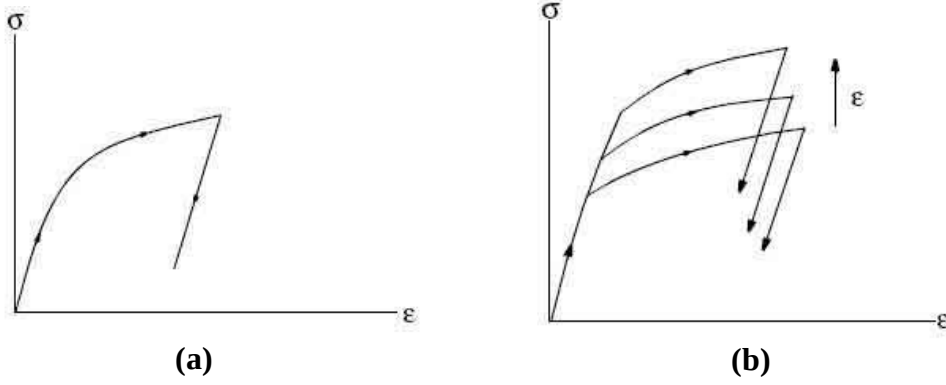
kullanıldığı bilinmektedir. Denklemden de görüldüğü gibi K katılık matrisi hem u hem de P 'den bağımsızdır. Şayet K katılık matrisi, yer değiştirme ve yüklemelere bağımlı olmayan diğer durum değişkenlerine (sıcaklık, radyasyon, nem vs.) bağlı ise problem hâlâ lineerdir.

Problemlerin non-lineer olabilmesinin başlıca üç kaynağı vardır.

- Malzeme
- Geometri
- Sınır Şartları

Malzeme non-lineerliği, gerilme ve birim şekil değiştirme arasındaki non-lineer ilişkisinden kaynaklanmaktadır. Mikroskobik açıdan malzemenin makroskobik davranışı veya sürekliliğinin sağlanması için bugüne kadar önemli çalışmalara teşebbüs edilmiş, fakat çoğunlukla kabul edilen temel kanunlar uygulanmaktadır. Genellikle deneysel verilerin elde edilmesindeki zorluk malzeme davranışının matematiksel modellenmesini zorlaştıran bir durumdur. Bol miktarda malzeme modeli, elastomer ve metaller gibi uygun malzemeleri için mevcuttur. Uygulanma alanlarının genişliğine göre diğer önemli malzeme modelleri: kompozitler, viskoplastikler, kum, beton, toz ve köpükler. Örnek olarak

Şekil 5.2’de elasto-plastik ve elasto-viskoplastik modellerinin davranışları resmedilmiştir.



Şekil 5.2 Çeşitli malzeme modellerinin gösterimi (MSC Marc, 2008)

(a) Elasto-plastik (b) Elasto-viskoplastik

Geometrik non-lineerlik, bir taraftan birim şekil değiştirme ve yer değiştirme arasındaki non-lineer ilişkiden kaynaklanırken, diğer taraftan gerilmeler ve kuvvetler arasındaki non-lineer ilişkiden meydana gelir. Şayet gerilme miktarı birim şekil değiştirme miktarının eşleniği ise her iki non-lineer kaynağı aynı forma sahiptir. Bu tipteki non-lineerlik matematiksel olarak iyi tanımlanmış, fakat nümerik olarak işlenmesi genellikle zordur.

İmalat, çarpma ve darbe problemlerinde olduğu gibi yüksek birim şekil değiştirme (large strain) içeren problem tiplerinde yüksek birim şekil değiştirme kinematikinden dolayı, geometrik ve malzeme non-lineerliği içerisindeki matematiksel ayırım aynı değildir (MSC Nastran, 2005).

Geometrik non-lineerlik iki çeşit olaydan kaynaklanmaktadır;

- i. Yapısal davranışta değişim
- ii. Yapısal kararlılıkta kayıp

Buna bağımlı olarak büyük deformasyon (large deformation) problemleri iki ana sınıfta toplanır.

- Büyük yer değiştirme, küçük birim şekil değiştirme (large displacement, small strain) problemleri.
- Büyük yer değiştirme, büyük birim şekil değiştirme (large displacement, large strain) problemleri.

Büyük yer değiştirme, küçük birim şekil değiştirme problemleri için gerilme-birim şekil değiştirme kanunlarında değişiklikler göstermesi ihmal edilebilir fakat birim şekil değiştirme-yer değiştirme ilişkilerindeki non-lineer terimlerden gelen katkılar ihmal edilemez. Büyük yer değiştirme, büyük birim şekil değiştirmeler için ise kurucu ilişkinin referansın doğru yapısında tanımlanmalı ve tanımlanan bu yapıdan denklik denklemlerinin yazıldığı referansa dönüştürülmelidir.

Deformasyon kinematiği aşağıdaki yaklaşımlarla tanımlanabilmektedir.

- a. Lagrangian Formülasyonu
- b. Eulerian Formülasyonu
- c. Keyfi Eulerian-Lagrangian (KEL) Formülasyonu (Arbitrary Eulerian-Lagrangian (AEL) Formulation)

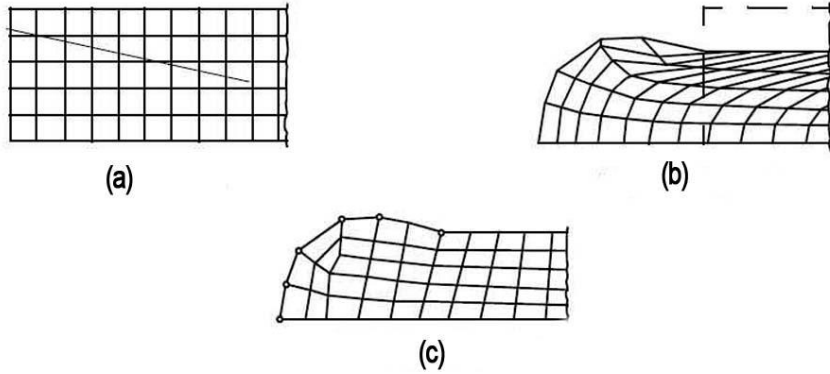
Yaklaşımların herhangi birisinin seçimi, problemin fiziksel modellenmesinin uygunluğu, kurucu denklemlerin bütünleşmesi ve rezonlama (yeniden ağ yapısı oluşturma) ihtiyaçlarına göre yapılır.

- a. Lagrangian Formülasyonu

Lagrangian metodunda, sonlu eleman ağ yapısı malzemeye bağlı, malzeme ile birlikte uzay boyunca hareket eder. Bu durumda malzemenin herhangi özel bir noktasına gerilme veya şekil değiştirmenin yerleştirilmesinde zorluk oluşmaz ve

serbest yüzeylerin davranışları olağandır. Langrarian yaklaşımı kabukların ve kirişlerin, süreksiz problemlerle tanımlanan yapısal elementlerin deformasyonunu ifade etmektedir.

Bu metot aynı zamanda ekstrüzyon ve haddeleme gibi kararlı hal işlemlerini de analiz edebilmektedir. Langrarian metodunun eksiklikleri, akışkan problemlerinde ortaya çıkan modelleme güçlükleri ve nesnenin ağ yapısındaki bozulmanın nesne deformasyonuna özdeş olmasıdır. Ağ yapısının bozulması Şekil 5.3'deki gösterilmiştir. Fakat uyarlamalı ağ yapısı oluşturma (adaptive meshing) ve yeniden ağ yapısı oluşturma (rezoning) alanındaki son gelişmeler, ağ yapısındaki aşırı bozulmalardan dolayı analizlerin durmasını engellemiştir (Şekil 5.3).



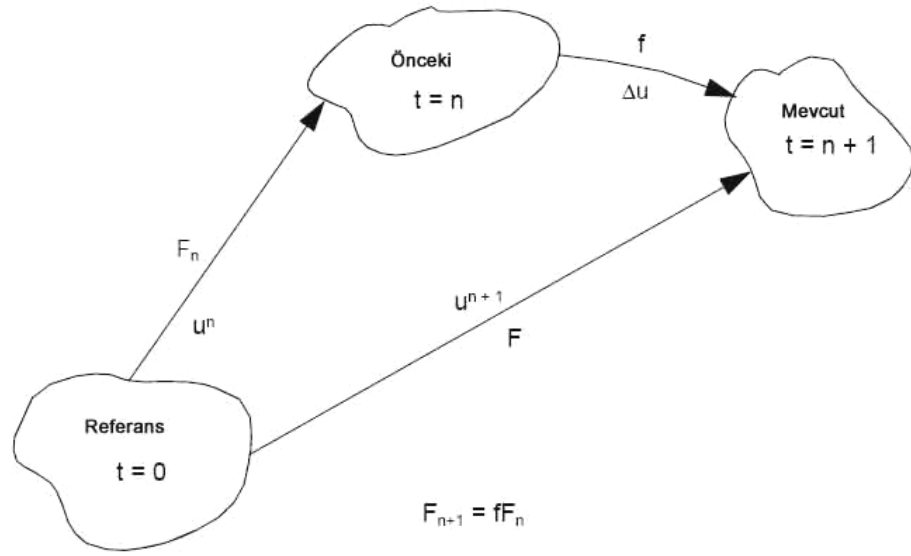
Şekil 5.3 Ağ yapısının değişimi

- (a)** Bozulmamış ağ yapısı **(b)** Rezoning uygulanmadan aşırı derecede bozulmuş ağ yapısı
(c) Rezoning uygulandıktan sonra oluşturulmuş ağ yapısı

Lagrangian yaklaşımı iki ana kategoride sınıflandırılabilir

- Toplam Langrarian Yöntemi (Total Langrarian Method)
- Güncellenmiş Langrarian Yöntemi (Updated Langrarian Method)

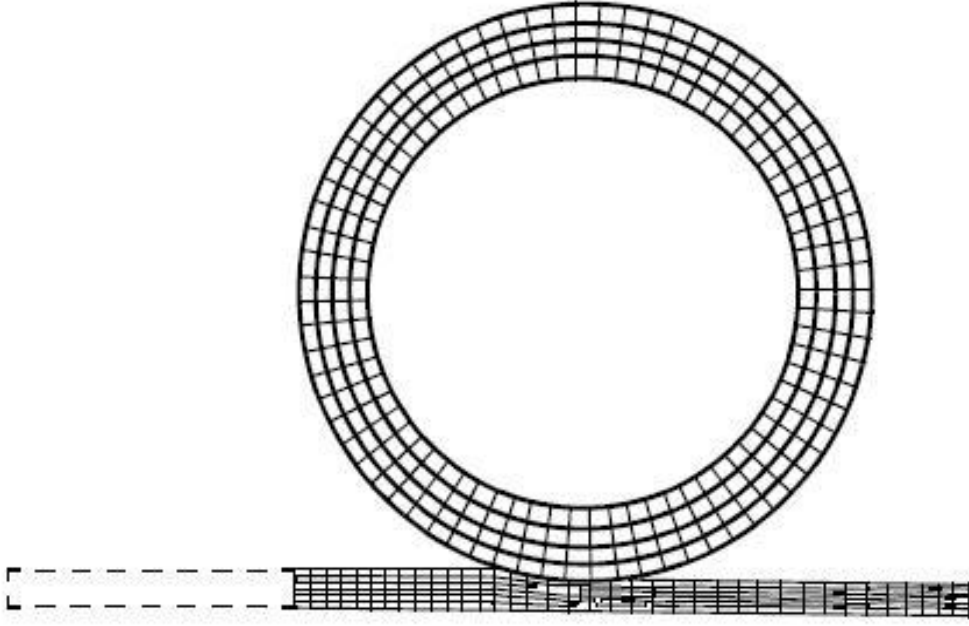
Toplam Langrarian Metodunda, denklik referans gibi orijinal deforme olmamış durum ile birlikte ifade edilir. Güncellenmiş Langrarian yaklaşımında ise mevcut yapılandırma referans durum olarak bulunmaktadır. Deformasyon kinematiği ve hareketin tanımlanması Şekil 5.4’de gösterilmiştir (MSC Marc, 2008).



Şekil 5.4 Hareketin tanımlandırılması (MSC Marc, 2008)

b. Eulerian Formülasyonu

Akışkan hareketi analizlerinde Langrarian yaklaşımı, ağ yapısının malzeme ile birlikte taşınması sonucu ağ yapısında aşırı şekilde bozulmaların ortaya çıkması ile sonuçlanmaktadır. Bu nedenle Eulerian formülasyon metodu, cismin hareketini tanımlamak için kullanılmaktadır. Bu metot ile sonlu eleman ağ yapısı uzayda sabitlenir, malzeme ise ağ yapısı üzerinden akar. Bu yaklaşım özellikle ekstrüzyon ve haddeleme işlemleri gibi kararlı hal süreçlerinin analizleri için uygunluk göstermektedir (Şekil 5.5).

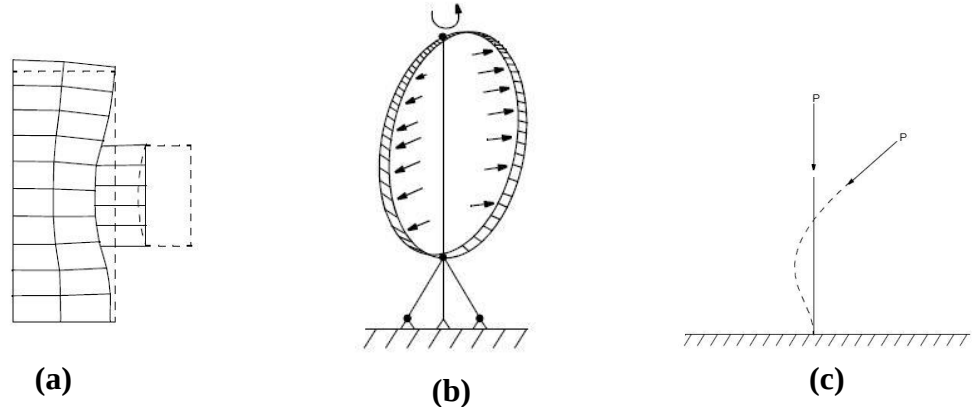


Şekil 5.5 Ağ yapısı oluşturulmuş iş parçasının haddelenmesi (MSC Superform, 2005)

c. Keyfi Lagrangian - Eulerian (KLE) Formülasyon (Arbitrary Lagrangian - Eulerian (ALE) Formulation)

Keyfi Eulerian-Lagrangian (KEL) Formülasyon referans sisteminde, gridler malzemeden bağımsız olarak hareket eder fakat herhangi bir sürede malzeme yayılım hareketi göstermektedir.

Temas ve sürtünme problemleri non-lineer sınır şartlarının oluşmasına neden olurlar (Şekil 5.6 (a)). Bu tip non-lineerlikler (Örnek olarak, metal şekillendirme, mekanik parçaların çakışması, pnömatik tekerlek teması, çarpma gibi) uygulamada farklı durumlarda kendini göstermektedir.. Yapı üzerindeki yükler eğer yapının yer değiştirmesi ile değişiyorsa, non-lineerliğe sebep olmaktadır. Bu yükler merkezkaç kuvvet alanında olduğu gibi konservatif olabilir (Şekil 5.6 (b)). Bazen de bir konsol kiriş üzerindeki izleyen kuvvet gibi non-konservatif olabilir (Şekil 5.6 (c)).



Şekil 5.6 Doğrusal olmayan problem örnekleri

- (a)** Temas ve sürtünme problemleri **(b)** Merkezkaç kuvvet problemleri
(c) İzleyen kuvvet problemleri

Non-linear analizler ise genellikle lineer analizlerden daha karmaşıktır. Herhangi bir non-linear problem hiçbir zaman lineer denklem kümeleri ile formülize edilemez. Genel olarak, non-linear problemlerin çözümleri her zaman artışı çözüm yöntemlerine ihtiyaç duyarlar ve bazen de her basamak sonunda denklemin sağlandığından emin olabilmek için her yük/zaman artışı iterasyona (veya tekrara) gereksinim duyulur. Süperpozisyon yöntemi non-linear problemlerde uygulanamamaktadır. MSC MARC tarafından desteklenen iteratif metotlar şunlardır:

- Full Newton-Raphson Yöntemi
- Düzeltilmiş Newton-Raphson Yöntemi (Modified Newton-Raphson)
- Birim Şekil Değiştirme Düzeltmeli Newton-Raphson Yöntemi
- Doğrudan yerine koyma Yöntemi (Direct Substitution)

Non-linear problemin her zaman tek bir çözümü olmayabilir. Bazen de problem hatasız bir şekilde tanımlanmasına rağmen, non-linear problemin hiçbir çözümü olmaz. Non-linear analizler çeşitlerinde makul hesaplama ve muhakeme sürelerine gereksinim duyulur.

5.2 Sıvama İşleminin Sayısal Simülasyonu

Sonlu elemanlar yönteminin genel uygulanabilirliği, onu geniş bir alanda çok çeşitli problemler için güçlü ve esnek bir kullanım aracı haline getirmiştir. Bu nedenle mekanik problemlerinin çözümü için çok sayıda yazılım geliştirilmiştir. Herhangi bir probleme yaklaşım yapılırken dikkat edilecek en önemli husus, bilgisayarlar üzerinde geliştirilen bir sayısal analiz programının problem tipine uygunluk sağlamasıdır. Sürekli olarak geliştirilen ve yenilenen analiz programları, mühendisliğin hemen her dalında farklı problem tiplerine (implicit, explicit, linear, non-linear vs.) göre uygulanabilen araçlar haline getirilmektedir.

Kullanım alanları arasında; statik ve dinamik yapı analizleri, statik ve dinamik diğer analizler, termal analizler, elektromanyetik alan analizleri, akışkanlar mekaniği analizleri, akustik, optimizasyon, yapı burkulma analizleri, non-linear plastik deformasyon ve yapısal analizleri sayılabilir.

Sonlu elemanlar yönteminin teorik yaklaşımında olduğu gibi, herhangi bir analiz programının problemleri çözümlemesi üç aşamada gerçekleşir. Bu aşamalar;

- Ön işlem (Pre-processing)
- İşlem (Processing)
- Son işlemdir (Post-processing)

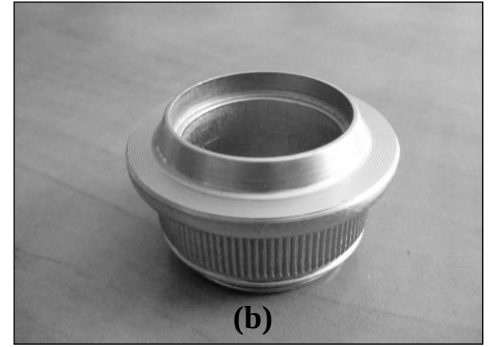
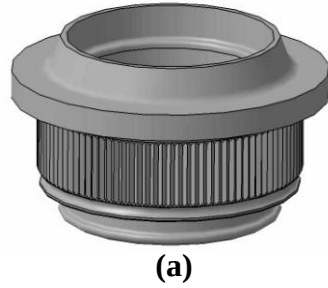
Ön işlem aşamasında çözüm esnasında gerekli olan verilerin oluşturulması için hazırlık yapılır. Bu aşamada program kullanıcısı, koordinat sisteminin seçimi, eleman tipinin belirlenmesi, interpolasyon fonksiyonlarının seçimi, malzeme modeli ve malzeme özelliklerinin belirlenmesi, katı modelin oluşturulması ve incelenmesi gereken yerlerin sonlu elemanlara bölünerek ayrılması işlemlerini yapar. Ayrıca işlem aşamasında çözüme yardımcı olan sınır şartları, analiz tipleri, analiz opsiyonları ve sonlu elemanlar yöntemindeki çözücü tipinin seçilmesi bu safha içinde gerçekleşmektedir.

İşlem aşamasında ise, ön işlem safhasında girilen verilere göre sonlu elemanlar yönteminin teorik yaklaşımında olduğu gibi ilgili düğüm noktalarındaki değerler hesaplanmaktadır.

Son işlem safhasında ise ilgili düğüm noktalarına ait tüm parametrik değerler okunarak veya görsel hale getirilerek, problemin çözümlenmesi tamamlanır.

5.2.1 Rotil gövdesinin (housing) modellenmesi

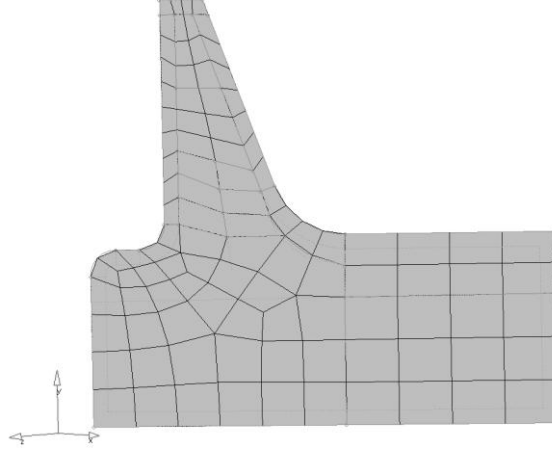
Öncelikle geriye mühendislik (reverse engineering) yöntemi ile üzerinde çalışılması uygun görülen rotilin CAD verisinden gövdesinin kesitini barındıran bir model hazırlanmış ve bu model üzerinden yaklaşım yapılmıştır (Şekil 5.7).



Şekil 5.7 Rotil gövdesi (X90 SBJ)

(a) Rotil gövdesine ait CAD gösterimi **(b)** Gerçek rotul gövdesi

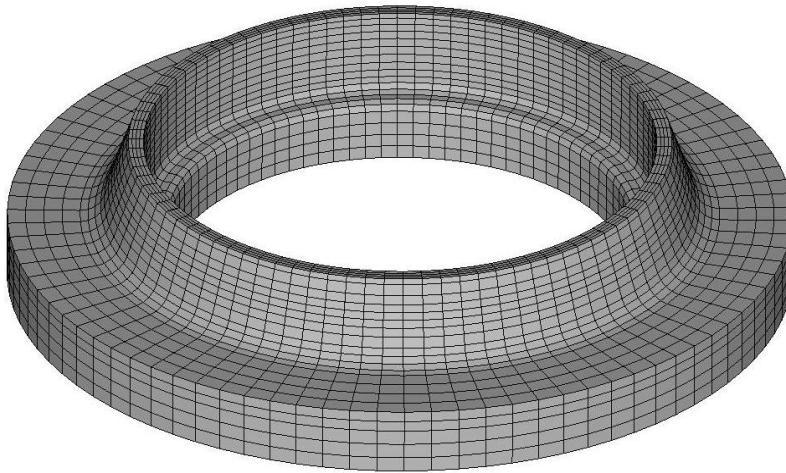
Sıvama işleminde sıvanan rotul gövdesinin (housing), Altair HyperMesh yazılımında iki boyutlu ağ yapısı oluşturulmuştur. Fakat sıvama işleminin ilerideki safhalarında özellikle sıvanan bölgenin aşırı deformasyona uğraması sonucu eleman hataları oluşmaması için farklı bir ağ yapısı kullanılmıştır (Şekil 5.8).



Şekil 5.8 Rotil gövdesinin (housing) iki boyutlu ağ yapısı

Analiz aşamasında işlemlerin daha hızlı ilerleyebilmesi amacı ile gerilme ve birim şekil değiştirmelerin etkili olmadığı yerler sisteme dâhil edilmemiştir. Böylece modelleme yapılırken optimum eleman sayısına ulaşılmaya çalışılmıştır. Ağ yapısı oluşturulan iki boyutlu modelin, HyperMesh veya Mentat GUI yazılımlarından herhangi biri kullanılarak üç boyutlu ağ yapısı hazırlanır.

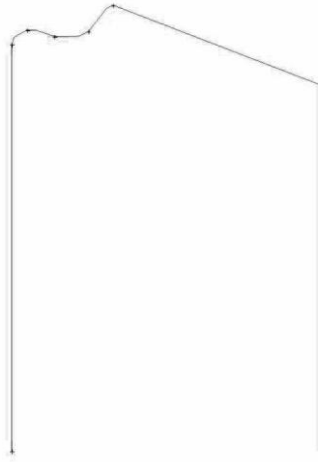
Sadece sıvanan bölgede ağ yapısı oluşturularak, rotul gövdesinde Hex8 (6 kenarlı ve 8 düğüm noktalı hexagonal eleman ve full-integration) tipinde toplam 6000 eleman kullanılmıştır (Şekil 5.9).



Şekil 5.9 Üç boyutlu ağ yapısı oluşturulmuş rotul gövdesi (housing)

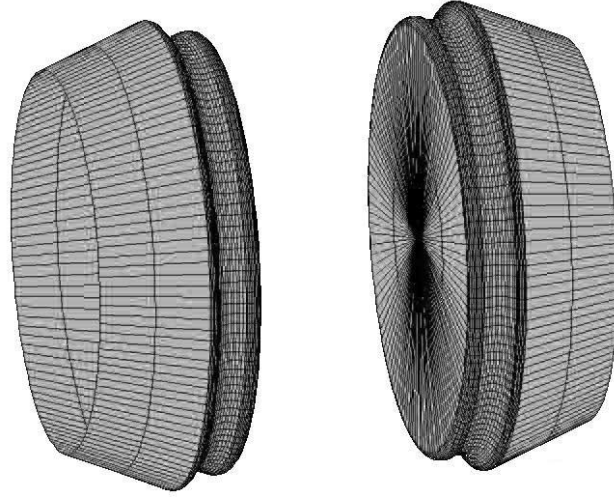
5.2.2 Rölelerin (roller) modellenmesi

Küresel yataklar, araç tiplerine ve araçta kullanım yerlerine göre farklılık gösterdiğinden, sıvama röleleri de farklılık göstermektedir. Söz konusu tezin, hem simülasyon hem de test aşamalarında, binek araçların süspansiyon sisteminde bulunan X90 SBJ (Suspension Ball-Joint) rotil tipi kullanılmıştır. Buna bağlı olarak da bu tip rotil gövdelerinin, sıvama tezgâhında **Röle 06** kodlu röleler ile plastik şekil verme işlemi gerçekleştirilmektedir (şekil 5.10 – 5.11).



şekil 5.10 Röle 06'nın iki boyutlu taslak çizimi

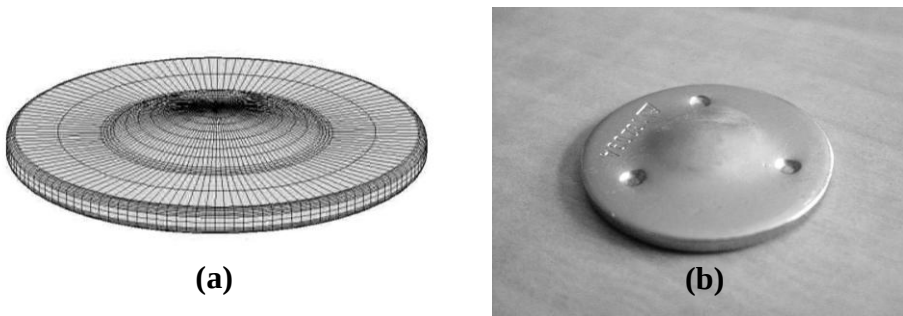
Sıvama işlemini gerçekleştiren rölelerin, iki boyutlu taslak çizimi belirli bir eksen etrafında döndürülerek üç boyutlu model haline getirilir. Uygulamada sıvama işlemi sırasında rölelerde şekil değişiminin olmadığı kabul edilmektedir. Hem analizin hızlı bir şekilde ilerlemesi için (farklı bir açıdan bakılırsa eleman sayısı azaltılarak katılık matrisinin küçültmesi), hem de şekil değişiminin olmadığı kabul edildiği için plastik şekil değiştiren röleler analizde **rijit** olarak kabul edilmiştir.



Şekil 5.11 Sıvama işlemi sırasında kullanılan Röle 06'nın üç boyutlu modeli

5.2.3 Rotil kapakçığının (cap) modellenmesi

Sıvanan bölge ile plastik yatak arasında teması engelleyerek küresel yatakları sıkıştırarak kapatan rotıl kapakçığı, gerekli toleranslar dâhilinde modeli hazırlanarak üç boyutlu model hale getirilir. Üzerinde yapılan araştırmalar ve rotıl üzerinden alınan kesitler incelenerek, sıvama sonrası rotıl kapakçığının kalınlığında azalma olmadığı sonucuna varılmıştır. Diğer bir ifade ile sıvama işlemi sonrası arta kalan sıkıştırma kuvvetlerinin kapakçık malzemesinin akma dayanıma ulaşmadığı sonucuna varsayıldığından, analizin daha hızlı ilerleyebilmesi için rotıl kapakçığı da **rijit** kabul edilerek modellenmiştir (Şekil 5.12).

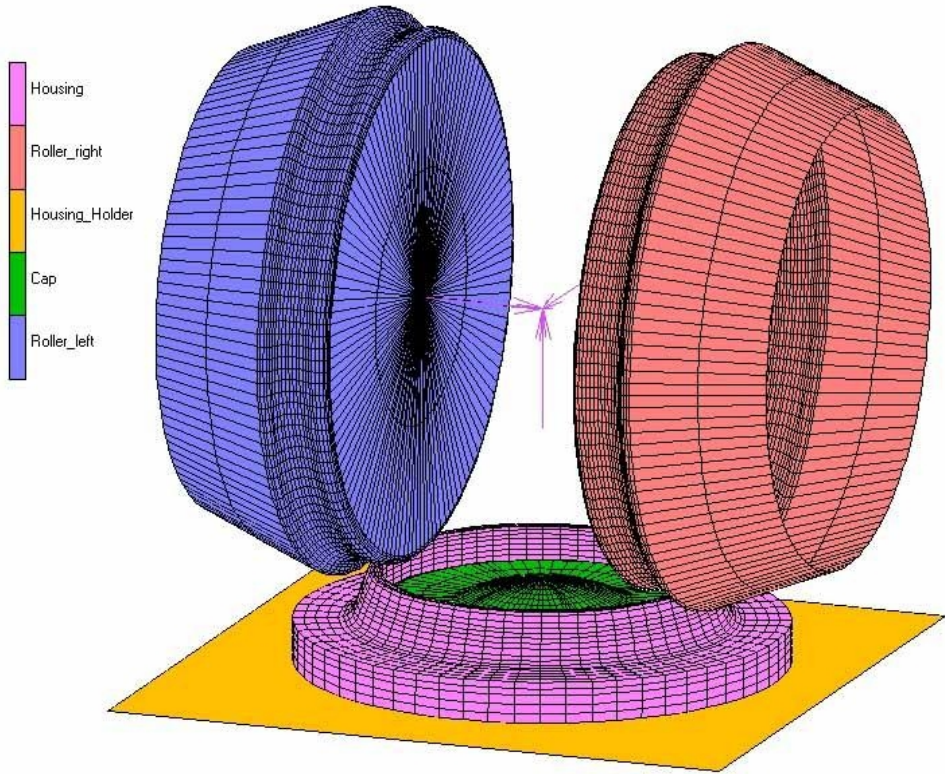


Şekil 5.12 Rotil kapakçığı

(a) Rotil kapakçığının üç boyutlu modeli (b) Gerçek rotıl kapakçığı

5.2.4 Sistemin modellenmesi

Modelleme işlemi sonrası; rölle, rotil gövdesi ve rotil kapakçığı sisteme dâhil edilip, uygulamadaki sıvama işleminde olduğu gibi koordinat sisteminin değerleri girilerek analizin modelleme safhası tamamlanır (Şekil 5.13). Modelleme kısmında da belirtildiği gibi sayısal simülasyonun hızlı bir şekilde ilerlemesi için, sadece belirgin şekil değişiminin olduğu yerlerde model sonlu elemanlara ayrılmış, diğer bölgeler rijit olarak kabul edilmiştir. Bu bağlamda sıvama işleminde, elemanların ve rijit kabul edilen yüzeylerin tanımlandığı temas tabloları (contact table) önceden belirlenmiş ilişki içerisinde oluşturulmuştur.



Şekil 5.13 Sıvama simülasyonu için modellenen sistem

5.2.5 Malzemenin tanımlanması

5.2.5.1 Sıvama işlemi deneyinde kullanılan rotil gövdesinin malzemesi

Sıvama analizinde, sıvama uzayı oluşturulduktan sonra karşılaşılan bir sorun ise, röleler tarafından sıvama bölgesine uygulanan toplam basınçtır. Gerçek sıvama işleminde röleler tarafından gövdelere uygulanan basınç 9.5 ile 10.5 kN arasında değişir iken, çalışmanın başlarında aynı plastik deformasyonu sağlamak için sıvama simülasyonunda röleler tarafından uygulanan değer yaklaşık olarak 36 kN çıkmaktadır. Simülasyondaki sıvama işleminin sonucu ile uygulamadaki sıvama işleminin sonucunun farklı olmasının sebebi, sıvama analizinde kullanılan C15 E malzemesinin program kütüphanesinden seçilmesidir. Gerçek yapılan sıvama işleminde ise rotil gövdesinin imalat aşamasında iken bazı haddeleme, dövme vs gibi işlemler sonrası farklı mekanik özelliklerine kazandığı bilinmektedir. Yani diğer bir ifade ile gerilme – birim şekil değiştirme diyagramında plastik bölgesinin farklılık göstermesinden kaynaklanmaktadır.

Herhangi bir malzemeye akma dayanımının üzerinde bir gerilme uygulandığında, ilgili malzeme üzerindeki dislokasyon hareketleri artacağından, malzemenin gerilme – birim şekil değiştirme grafiği farklılık oluşturmaktadır. Başka bir ifade ile artık malzeme farklı bir plastik eğriye sahip olmaktadır. Buda dövme, haddeleme gibi plastik şekil değişimine maruz kalan malzemelerin yapısal olarak neden değiştiğini göstermektedir.

Bu sorun karşısında, malzemenin gerçek plastik şekil değişimi davranışını analizde kullanılan malzemeye uyarlamak için, rotil gövdesinin haddeleme, dövme vs. imalat prosesleri sonrası kazandığı yeni gerilme - birim şekil değiştirme değerlerinin saptanması amacı ile Ege Üniversitesi Makina Mühendisliği Biyomekanik Laboratuvarında bir grup deneyler yapılmıştır.



Şekil 5.14 Ege Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümü Biyomekanik Laboratuvarı'nda bulunan test cihazı

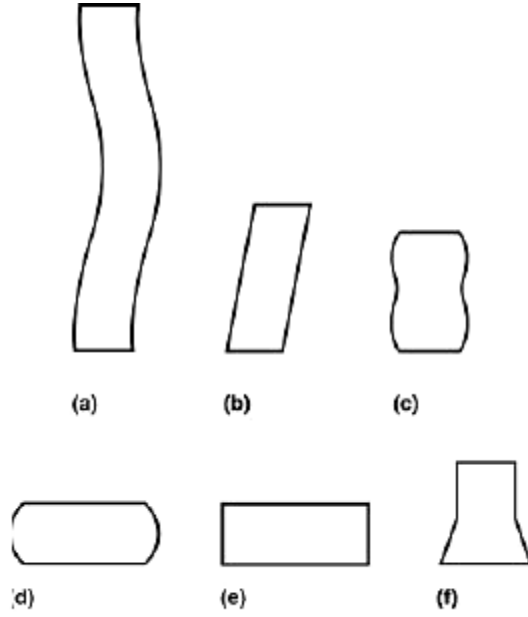
İlk olarak malzemenin gerçek gerilme-gerçek birim şekil değiştirme diyagramlarının bulunabilmesi amaçlanmıştır. Sıvanmamış bir rotıl gövdesine basma deneyi uygulanarak mühendislik gerilmesi - mühendislik birim şekil değiştirme eğrisinden gerçek gerilme - gerçek birim şekil değiştirme eğrisine geçiş yapılması hedeflenmiş fakat ilk basma deneyi başarısızlıkla sonuçlanmıştır. Bunun sebebi ise, sıvama işleminin sınır şartlarının ayrıntılı olarak incelenmediğinden matematiksel olarak ifade edildiğinde açıkça görülmektedir.

Röleler, sıvanan rotıl gövdesi üzerinde yaklaşık 1 saniye içinde belirli bir eksen etrafında 10 tur atarken, sıvanan bölgede temas ettikleri alanlara anlık olarak sıvama basıncı uygular. Temas yüzeyinin küçüklüğü ve sıvama basıncının büyüklüğü göz önünde tutulursa, plastik şekil değişiminin çok rahat bir şekilde gerçekleştiği gözlemlenir. İlk basma deneyindeki başarısızlık ise, sıvanan bölgeye uygulanan kuvvetin (yaklaşık 90 kN) dairesel olan rotıl alanına dağıtıldığında istenilen plastik şekil değişimini oluşturamamasıdır. Başarısızlıkla sonuçlanan deney sonrası, gerilme – birim şekil değiştirme diyagramı incelendiğinde, gerekli plastik şekil değişiminin oluşması için 100 kN'dan çok daha yüksek kuvvet gerektiği anlaşılmış ve basma deneyinin yapıldığı cihazın (load-cell) kapasitesi 100 kN olduğu için farklı bir test numunesine geçiş zorunlu olmuştur.

Deney sonrası, basma deneyi ile ilgili standartlar araştırılarak farklı bir basma numunesi hazırlanmıştır. İmalat sonrası elde edilen rotıl malzemesinin malzeme özellikleri ile aynı olan ve standartlara uygun numune oluşturulması zorunludur. Bu bağlamda, ingot malzemeyi imalat işlemlerinde uygulanan plastik şekil verme işlemlerine maruz bırakarak aynı malzeme özelliğini kazandırmak imkânsızdır. Bu nedenle yeniden numune oluşturmak yerine sıvama işlemi öncesine kadar çeşitli imalat proseslerine (haddeleme, dövme vs) maruz kalan rotıl gövdesi üzerinden numune çıkarılması daha yararlı görülmüştür.

Sıvama işlemi yapısal olarak incelendiğinde **basma kuvveti** eksenli bir plastik şekil verme işlemi olduğu bilinmektedir. Basma deneyi standartları hakkında yapılan araştırmalar, rotıl gövde parçası üzerinden alınan numunenin belirli bir çap/boy oranında bulunmasını zorunlu kılmaktadır.

Basma deneyleri, malzemenin plastik deformasyonu ezilmesi ve kırılması hakkında yararlı bilgiler sağlamaktadır. Fakat geçerli bir test sonucunda malzeme davranışını doğru bir şekilde saptayabilmek için belirli önlemler alınmalıdır. Şekil 5.15’de basma testlerinde meydana gelen deformasyon modları verilmektedir. Örneğin, Şekil 5.15 (a)’da gösterilen burkulma modu, test numunesinin uzunluk/genişlik oranı çok büyük olduğunda oluşur. Oluşan bu mod, elastik ve plastik burkulma analizleri ile düzeltilebilir. Bu analizler aşağıda belirtilen test numunelerine ait uzunluk/çap oranlarından tahmin edilebilir. L/D değeri 5.0’den daha az ise, numune burkulmaya karşı güvenlidir ve bu değere sahip numune gevrek ve sünek malzemelerin basma testlerinde kullanılır. Diğer taraftan sünek malzemelerdeki deneyimle, L/D oranının 2.5 ile 5.0 arasında olması halinde tatmin etmeyen deformasyon tepkileri oluşturduğu bilinmektedir. Bu geometriler için eksantrik yükleme ve paralel olmayan basmalar Şekil 5.15 (b)’de gösterildiği gibi kayma çarpılması (shear distortion) oluşturmaktadır. Bu nedenle, L/D oranı 2.0’den küçük olan numuneler, burkulmadan sakınmak ve basma deneylerinde malzemelerin plastik deformasyon davranışını doğru şekilde saptamak için kullanılır.



Şekil 5.15 Basma deneyinde oluşan deformasyon modları (ASM Standarts, 2006)

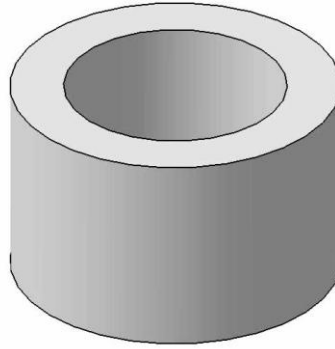
(a) Burkulma ($L/D > 5$) **(b)** Kayma ($L/D > 2.5$) **(c)** Çift fiçilaşma, ($L/D > 2.0$ ve temas yüzeylerinde sürtünme oluşmaktadır) **(d)** Fiçilaşma ($L/D < 2.0$ ve sürtünme temas yüzeylerinde oluşmaktadır) **(e)** Homojen basma, ($L/D < 2.0$ ve temas yüzeylerinde sürtünme oluşmamaktadır) **(f)** Yumuşatılmış malzemenin sıkıştırılabilir kararsızlığı.

Sürtünme, sünek malzemelerin basma testlerinde ayrıca başka bir tür deformasyona neden olur. Test numunesinin yüzeyleri ile sıkıştırmak için kullanılan yüzeyler arasındaki sürtünme, silindirik yüzeylerin bel vermesi veya fiçilaşmasına yol açan temas yüzeylerindeki yanal akışları engeller. Bu şartlar altında, L/D oranları 2.0 üzerinde değerlere sahip test numunesi için Şekil 5.15 (c)'de gösterildiği gibi çift fiçilaşma, L/D oranlarının 2.0'dan küçük olan test numuneleri için Şekil 5.15 (d)'de gösterildiği gibi tekil fiçilaşmasına sebep olur.

Fiçilaşma deformasyonunun non-uniform (örneğin test numunesi boyunca gerilme ve birim şekil değiştirme değerlerinin değişiklik göstermesi) olduğunu göstermektedir. Bu gibi basma deneyleri, bir malzemenin elastik ve plastik özelliklerinin ölçülmesi için geçerli değildir. Fakat fiçilaşma, bir malzemenin lokal (önceden saptanmış) kırılma özelliklerinin ölçülmesi için yararlı olabilmektedir. Şayet basma testi numune ve sıkıştırma plakaları arasında sürtünme olmadan gerçekleştirilebilirse, Şekil 5.15 (e)'de gösterildiği gibi

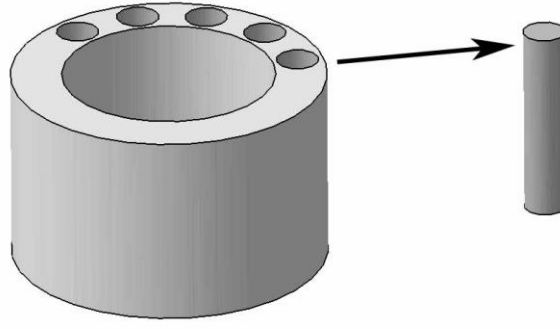
fiçilaşma oluşmamaktadır ve deformasyon uniform (homojen) olarak dağılır. Eksenel basmada düzensiz deformasyon son formu ise, gerilmede boyun vermenin antitezi (karşıtı) olan kararsızlıktır. Bu durumda kararsızlık malzemenin yumuşamasından dolayı meydana gelir ve Şekil 5.15 (f)'de gösterildiği gibi yerel genişlererek aniden şeklini alır.

Standartlar üzerinde yapılan araştırmalar, test numunesinin çok küçük olması nedeni ile ASM standartları üzerinde karar kılınmıştır. Sıvama yapılan rotıl gövdesi üzerinden test numunesi için çıkarılabilecek maksimum hacim çıkarılması hedeflenmiş ve gövde üzerinden talaş alınarak uniform test numunesi alınabilecek bir forma getirilmiştir (Şekil 5.16).



Şekil 5.16 Rotil gövdesi üzerinden çıkarılabilecek maksimum malzeme hacmi

Üzerinden maksimum hacim çıkarılan rotul gövdesinden lazer yardımı ile ASM Standartlarına uygun numuneler elde edilmiştir. Yukarıda bahsedilen deformasyon modlarından uzunluk/çap oranını 2 olarak karar kılınmıştır. Böylece öngörülen deformasyon modlarının grafikteki hata oluşturma payı en aza indirilmesi hedeflenmiştir (Şekil 5.17).



Şekil 5.17 Rotil üzerinden elde edilen ve ASM Standartlarına uygun test numunesi

Elde edilen numunelerde Ege Üniversitesi Biyomekanik Laboratuvarında 5 adet numune üzerinde basma deneyi yapılmıştır. Sonlu elemanlar analizinde kullanılacak malzemenin malzeme test verilerinin mühendislik gerilmesi ve mühendislik birim şekil değişimi eğrisi olduğunu düşünülebilirse, tek eksenli test verileri için Denklem 5.10 ve 5.11 tanımlanır. Ölçülen uzamalar test numunesinin orijinal uzunluğu ile oranlanır ve Denklem 5.10 elde edilir.

$$\varepsilon_{\text{mühendislik}} = \Delta L / L_0 \quad (5.10)$$

Ölçülen kuvvetler test numunesinin orijinal kesit alanı ile oranlanır ve denklem 5.11 elde edilir.

$$\sigma_{\text{mühendislik}} = F / A_0 \quad (5.11)$$

Toplam dönmenin veya toplam birim şekil değişiminin %5 in altında olduğu analizler için mühendislik değerleri olduğu gibi kullanılabilir. Bazı modellerde, kesin karakteristikler yinede türetilmelidir.

Yüksek plastik deformasyonlar içeren analizler için tek eksenli test verileri, olduğu gibi (mühendislik değerleri olarak) kullanılamazlar. Mühendislik birim şekil değişimleri ve gerilmeleri, birim şekil değişimi değeri yaklaşık %5'in altında değilse, geçerliliklerini yitirirler. Böyle büyük birim şekil değişimi simülasyonları

için gerçek gerilme ve birim şekil değişimi tanımları kullanılır. Bu, doğrusal olmayan birim şekil değişimi değeri parçanın son boyuna bağlıdır. Fakat bu malzeme modelleri sadece %5'in aralığındaki birim şekil değişimi için geçerli oldukları için mühendislik verisinin dönüşümü çok gerekli değildir (Kırlı, 2009).

Sıvama işlemi sayısal simülasyonunda birim şekil değişiminin %5'in üstünde olduğu için Mühendislik Gerilmesi - Birim şekil değişimi eğrisini Gerçek Gerilme – Birim şekil değiştirme eğrisine dönüştürülmesi zorunlu kılınmıştır.

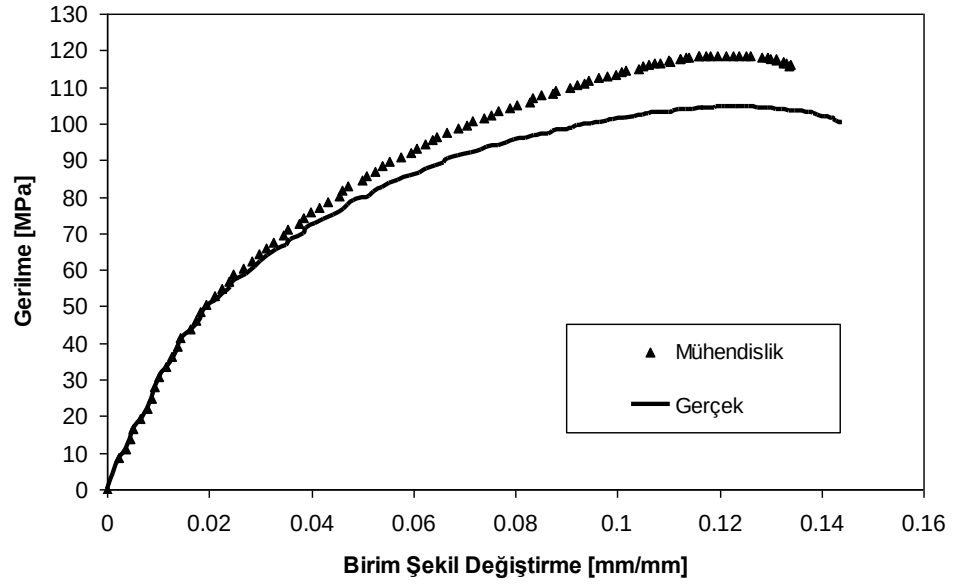
Gerçek birim şekil değişimi şu şekilde tanımlanır:

$$\varepsilon_{gerçek} = \int \Delta L / L \quad (5.12)$$

İntegral alınırsa gerçek birim şekil değişimi direkt olarak şu şekilde ifade edilebilir.

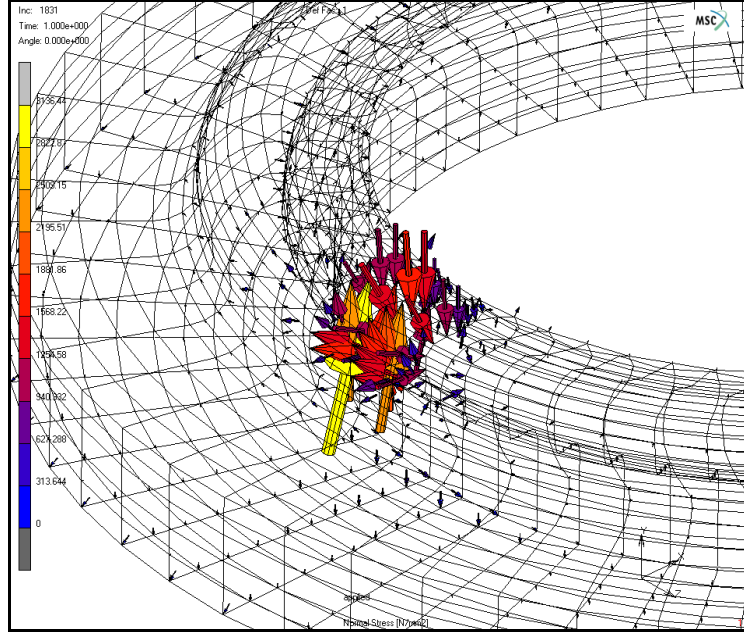
$$\varepsilon_{gerçek} = \ln(1 + \varepsilon_{mühendislik}) \quad (5.13)$$

(5.11) ve (5.12) denklemleri kullanılarak tek eksenli test verisi kısa bir sürede gerçek gerilme/birim şekil değişimi diyagramına çevrilebilir. Şekil 5.18'de mühendislik gerilmesi/mühendislik birim şekil değişimi gerçek gerilme/gerçek birim şekil değişimi diyagramı ile karşılaştırılmaktadır. Doğrusal olmayan elastisitede mühendislik gerilmeleri ve birim şekil değişimleri karşılıklı olarak gerçek değerleri ile değiştirilebilirler. Tablolar, analizde aktif hale getirilmiş seçeneklere göre mühendislik ya da gerçek veriler içerebilirler.



Şekil 5.18 Rotil gövdesi içinde küresel mafsala yatak olarak kullanılan POM malzemenin mühendislik ve gerçek gerilme - birim şekil değiştirme değerlerinin karşılaştırılması (Kırlı, 2009)

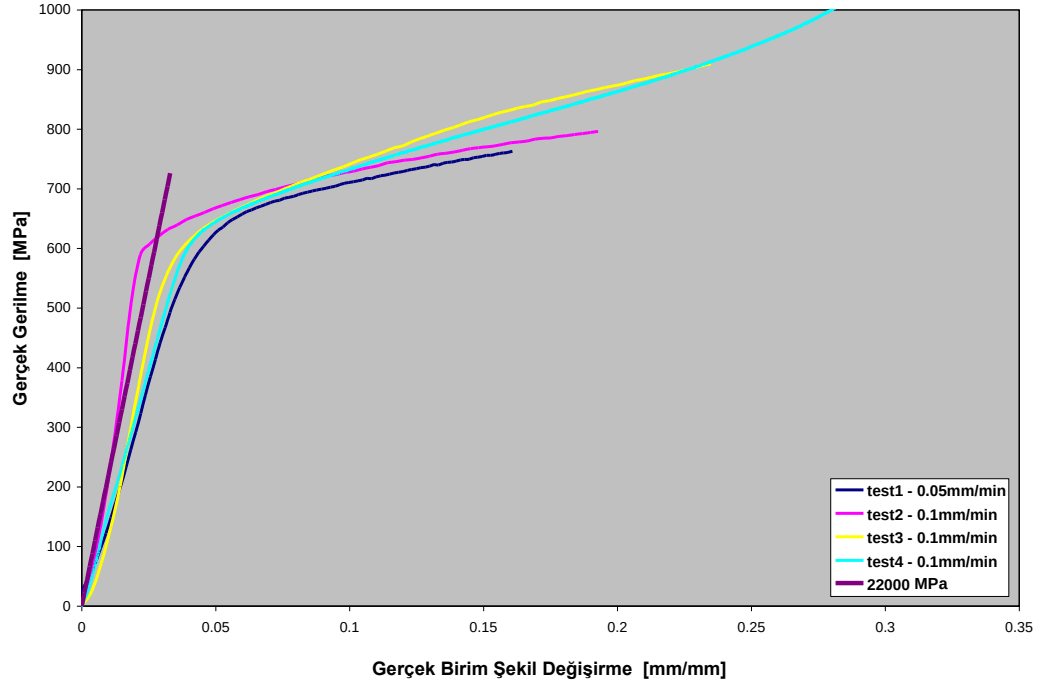
Analiz sonuçları incelendiğinde ilginç ayrıntılar göze çarpmaktadır. Simülasyon ortamında temas yüzeylerinin mükemmel düzeyde kullanılamaması, röleler ile şekil verme esnasında malzemenin temas edilen belirli bölgelerinde çekme gerilmelerinin oluşumuna neden olmuştur (Şekil 5.19). Aslında rotıl model üzerine gelen kuvvetlerin uygulanma şekillerine bakıldığında, bu durum rahatça gözlemlenmektedir. Rotil gövdesinin plastik şekil değiştiren bölümünde kısmen de olsa küçük bir eğim mevcuttur. Bu eğim üzerine gelen basma kuvveti (sıvama basıncı) o bölgede eğilme gerilmesine sebep olmaktadır. Dolayısıyla eğilme gerilmesi olduğu üst bölgelerde çekme, alt bölgelerde ise basma gerilmeleri ortaya çıkmaktadır (Şekil 5.19).



Şekil 5.19 Rotil ve röleler arasındaki temas yüzeylerinde oluşan gerilmeler

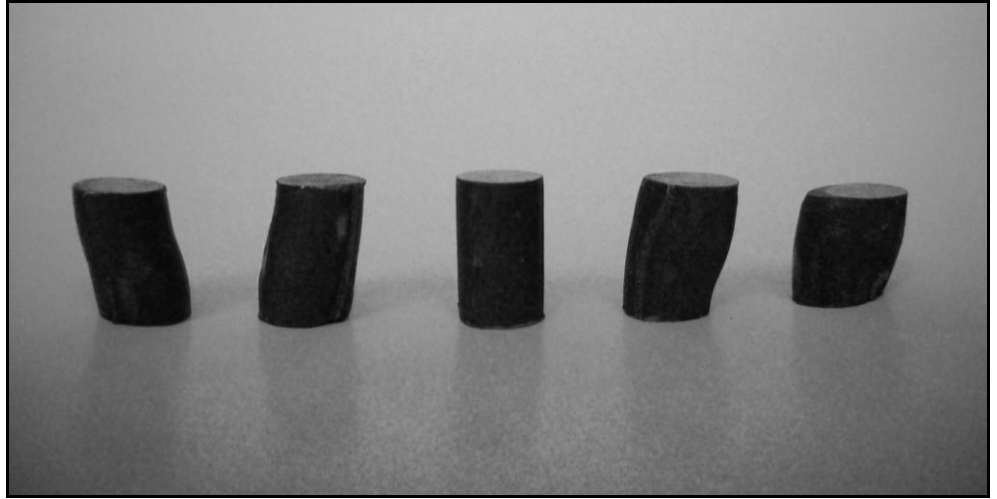
C15 E malzemesinin çekme gerilmesi için öngörülen gerçek gerilme – gerçek birim şekil değiştirme diyagramının bulunması zorunlu olmuştur. Fakat standartlar çekme deneylerinin belirli bir uzunluk ve genişlik aralığına sahip numunelerde yapılmasını zorunlu kıldığından, basma deneyinde olduğu gibi serbest davranılamamaktadır. Bu nedenle rotul üzerinden istenilen çap ve boy oranlarında numune alınamadığından, zorunlu olarak ingot malzemelerden alınan kalıpların dövme işleminden geçirilerek çekme deneyi numunesinin oluşturulması gereklidir. Bu sebeple tezin yürütüldüğü firmanın veri tabanından alınan aynı malzemenin çekme test verileri kullanılmıştır.

Deneyler sonucu elde edilen gerilme – birim şekil değiştirme verileri simülasyon programına tümleşik olarak girilmeye çalışılmış fakat MSC yazılımlarının hiçbir modülünde **izotropik malzeme** için çekme ve basma eğrilerinin tümleşik girilmesi seçeneğine rastlanmamıştır. Birçok simülasyon programında malzemenin plastik eğrisi tanımlanırken, malzemenin çekme veya basma plastik eğrisi orijine göre simetrik alınarak malzemenin diğer mekanik davranışı belirlenmektedir. Bundan dolayı simülasyonda ağırlıklı olarak basma gerilmesi uygulandığından C15 E malzemesinin basma deneyinin plastik bölge eğrisi referans alınmıştır. C15 E malzemesinden yapılmış rotul üzerinden alınan numuneye ait plastisite eğrisi Şekil 5.20’de verilmiştir.



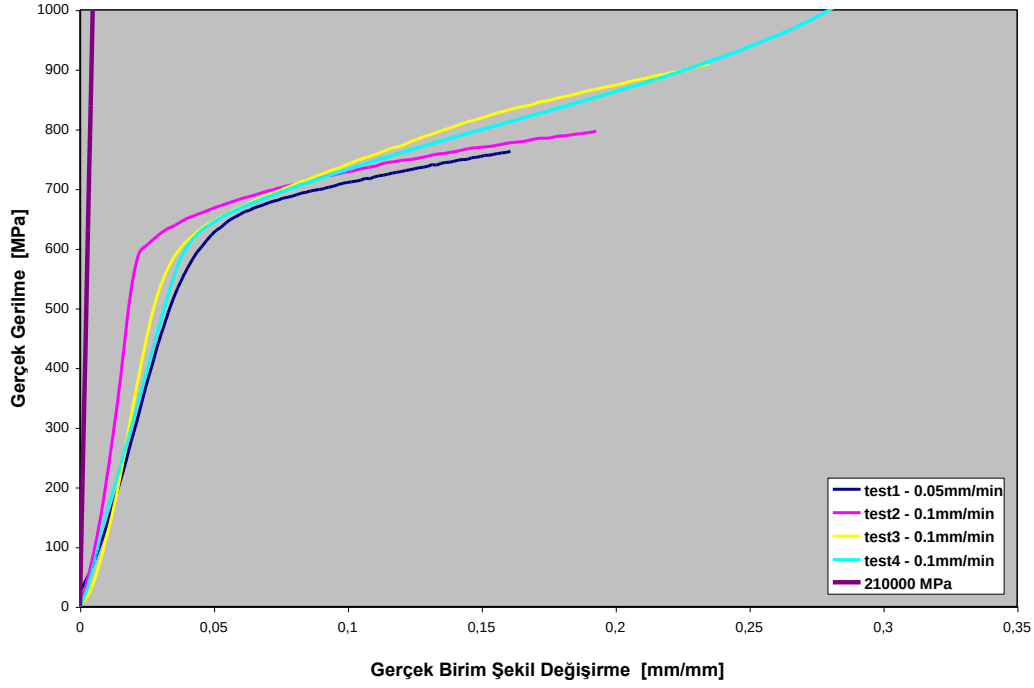
Şekil 5.20 Rotil gövdesinden alınan numuneye ait C15 E malzemesinin plastisite eğrisi

Rotil gövdesinden alınan numuneler ile yapılan basma deneyi sonrası elde edilen deformasyon modları Şekil 5.21’de verilmiştir.



Şekil 5.21 Basma deneyi sonrası numunelerde oluşan deformasyon modları

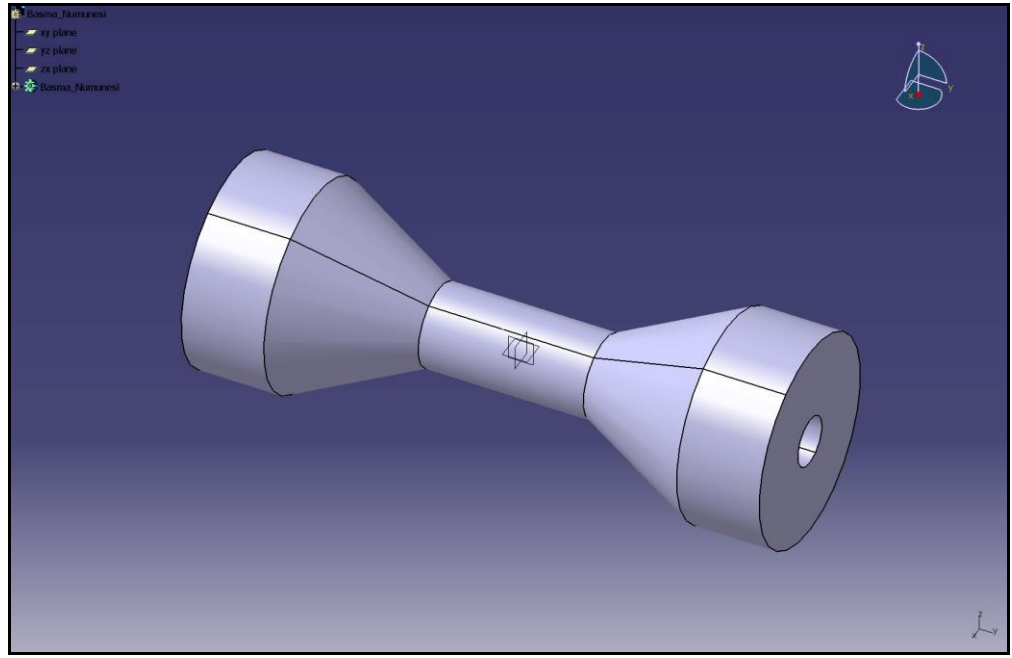
Numunelerdeki eksen kaçıklığından dolayı deformasyon modlarında basma deneyinin doğruluğunun kontrolü için deneylerde ortaya çıkan elastisite modül ile literatürde aynı malzeme için verilen elastisite modül karşılaştırılır.



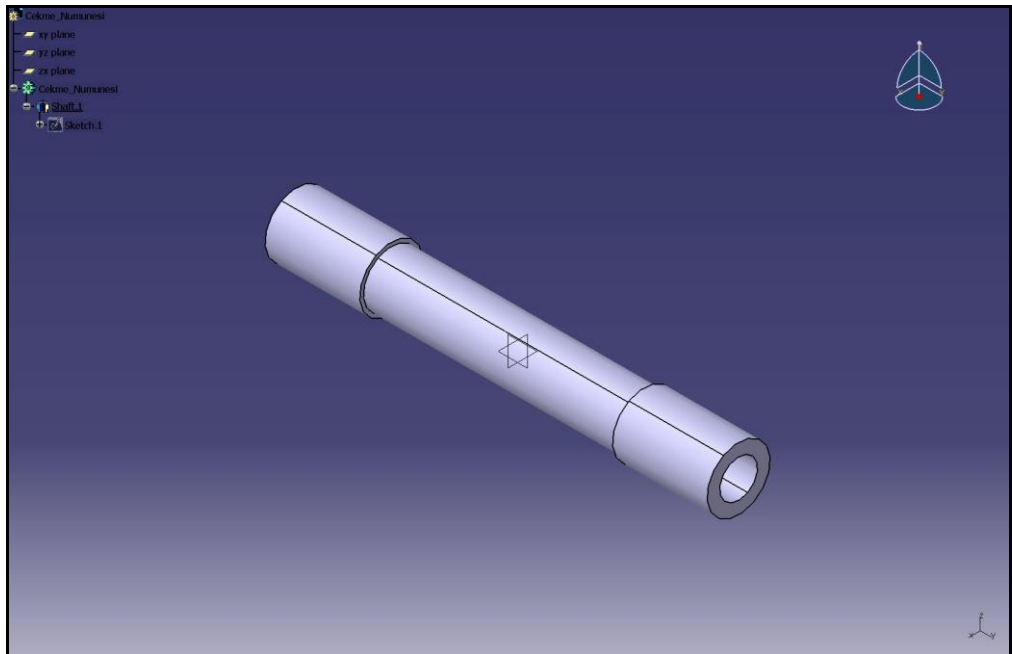
Şekil 5.22 Elastisite modüllerinin karşılaştırılması

Yapılan deneyden elde edilen 15000 ile 30000 MPa arasında değişmektedir. Gerçekte ise 210000 MPa elastisite modülüne sahip olduğu bilinen C15 E malzemesinin, bu deney sonundaki deformasyon modlarındaki farklılık ve basma deneyinde uç yüzeylerde kayma oluşması sonucu oluşan şekil değiştirmelerden sonra alınan sonuçlar anlamsız kalmaktadır (Şekil 5.22).

Deneylerden elde edilen verilerde hatayı en aza indirebilmek için, test esnasında uç yüzeylerdeki kaymaları en aza indirmek gerekmektedir. Test cihazının kapasitesi de göz önüne alınarak, basma ve çekme deneylerinde kullanmak üzere dövülmüş C15 E malzemeden iki farklı basma (Şekil 5.23) ve çekme (Şekil 5.24) numuneleri tasarlanmıştır.



Şekil 5.23 Yeniden tasarlanan basma testi numunesi



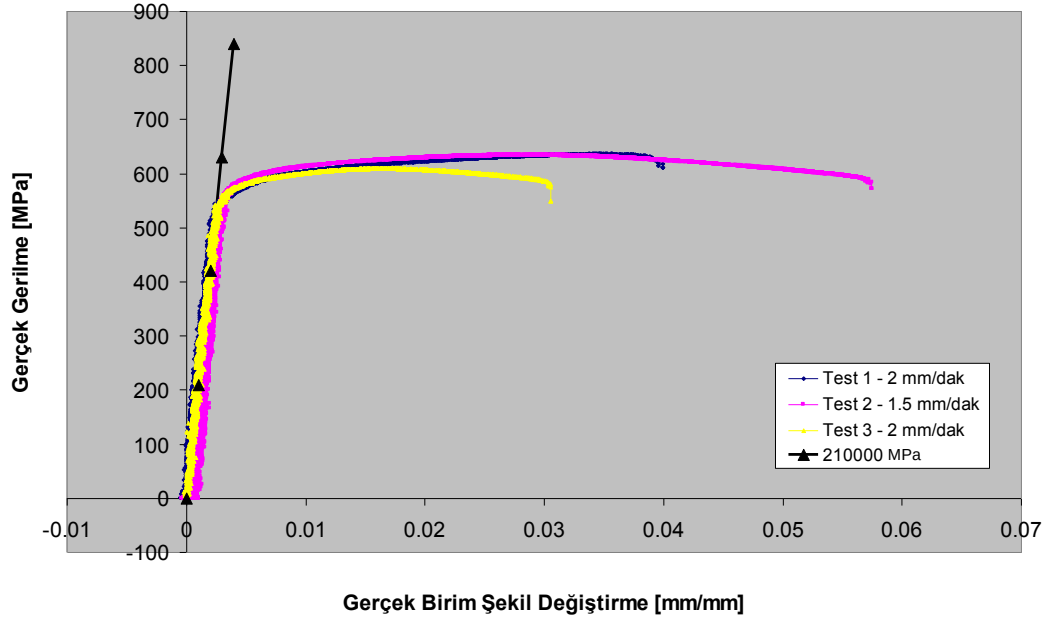
Şekil 5.24 Yeniden tasarlanan çekme testi numunesi

Başarısız sonuçlar elde edilen iki deneyden sonra tasarlanan numunelerde kayma gerilmelerinin azalacağı tahmin edilmiştir. Deney numuneleri, belirli toleranslar dâhilinde tasarlandıktan sonra torna tezgâhında imal edilmiştir (Şekil 5.25).

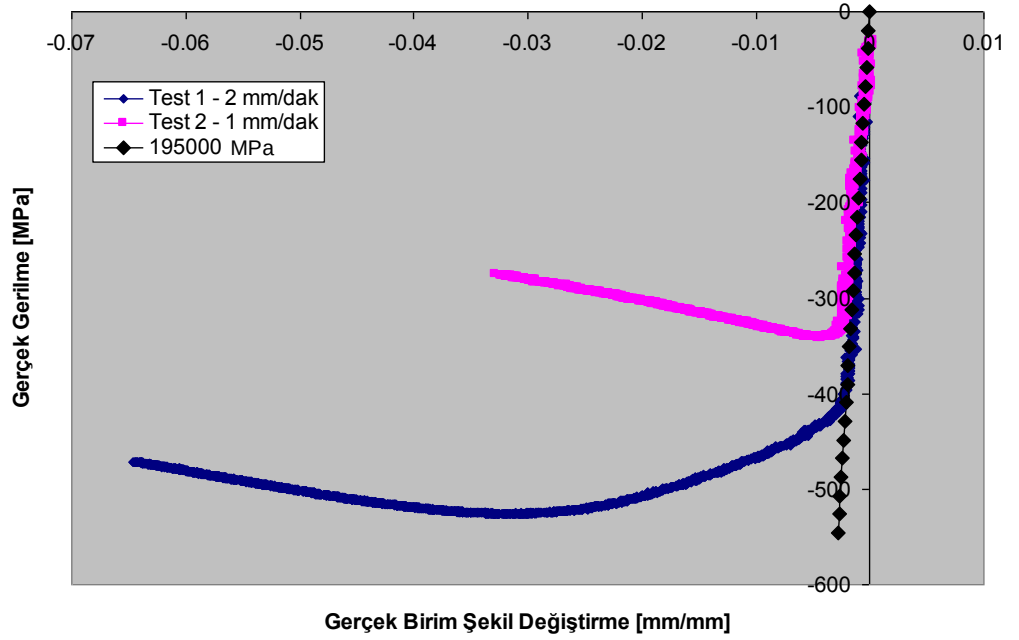


Şekil 5.25 Çekme ve basma numuneleri

Ayrıca, basma ve çekme deneylerinden daha iyi sonuçlar alabilmek için cihaz üzerindeki ekstansiyometre kullanılmıştır. Böylece gerilme - birim şekil değiştirme diyagramı bir önceki teste göre çok daha iyi sonuçlar vermiştir. Yapılan test sonrası C15 E malzemeye ait olan çekme ve basma eğrileri Şekil 5.26 ve 5.27’de verilmektedir. Elastisite modüllerinin karşılaştırılması sonucu deneyde kullanılan malzeme ile katalog değerleri arasında çok büyük farkın olmadığı saptanmıştır.

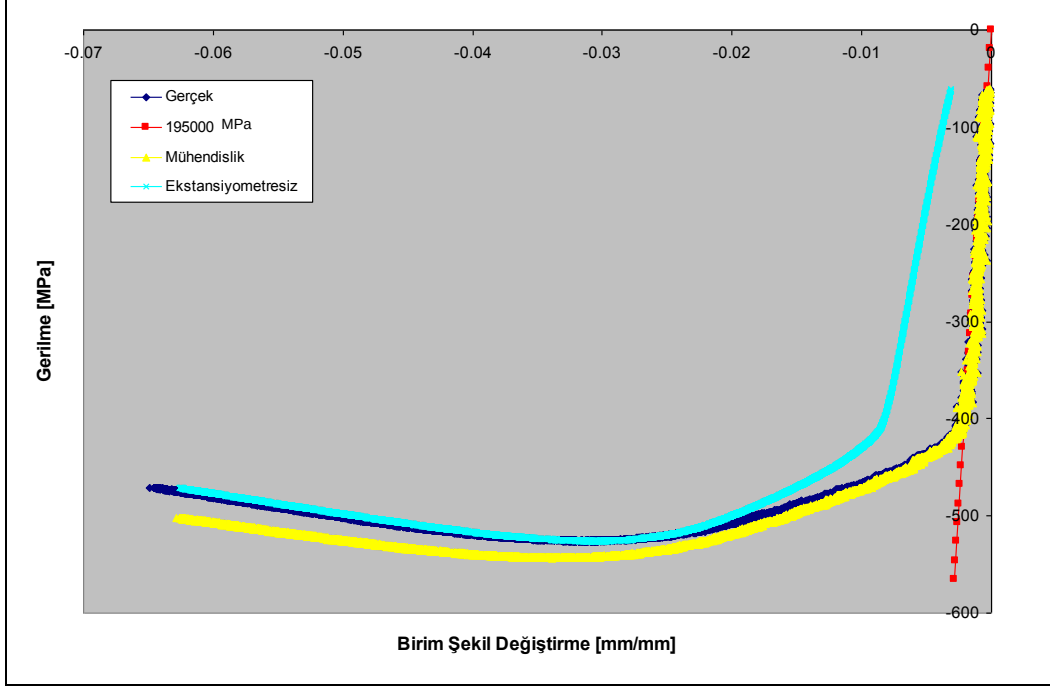


Şekil 5.26 C15 E malzemesine ait çekme deneyi sonuçları



Şekil 5.27 C15 E malzemesine ait basma deneyi sonuçları

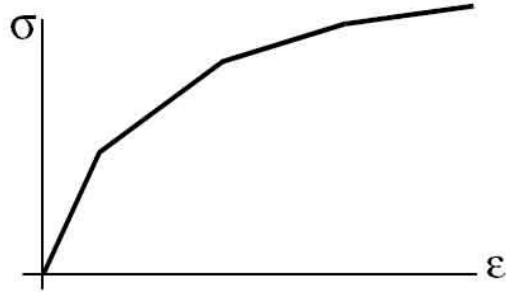
Ayrıca yapılan bu deneyde test cihazında okunan **stroke** – **strain** değerleri ile ekstansiyometre değerlerinin birbirinden çok farklı olduğu gözlemlenmiştir (Şekil 5.28). Dolayısıyla basma ve çekme deneylerinde ekstansiyometre kullanımının daha doğru sonuçlar verdiği saptanmıştır.



Şekil 5.28 Başarılı olan basma testinde ekstansiyometre kullanımı farkının gösterimi

5.2.5.2 Sıvama simülasyonunda kullanılan malzeme modeli

Genel olarak metallerin doğrusal olmayan sonlu eleman simülasyonlarında kullanılan **piecewise linear** (parçalı doğrusal) malzeme modelini tanımlamak için elastisite modülü, Poisson oranı ve malzemenin plastik bölgesinin gerçek birim şekil değiştirme gerilme eğrisi gereklidir. Test sonuçlarından elde edilen mühendislik birim şekil değiştirmesi ve mühendislik gerilmesi piecewise doğrusal elastik ve doğrusal olmayan plastik malzeme modeli tanımlama için gerçek gerilme gerçek birim şekil değiştirme eğrisine dönüştürülmelidir. Bu malzeme modeli, malzemenin elastik bölgesinin elastisite modülü ile tanımlanan doğrusal bir eğri ile tanımlamakta, plastik bölgeyi ise test sonuçlarından dönüştürdüğümüz başlangıç noktası akma sınırı olan eğri ile tanımlamaktadır.



Şekil 5.29 Piecewise malzeme modelinin gösterimi

Sıvama işlemi gibi şekil değiştirme içeren bir sonlu elemanlar analizinde, piecewise malzeme modelleme yapılırken, sıvama işlemi yapılma esnasında kullanılan sıcaklık ve hızdaki test sonuçları kullanılmak zorundadır. Malzemenin plastik bölgesinde bu iki parametre malzeme plastik eğrisini etkileyen önemli faktörlerdir. Malzemeye ait gerçek gerilme ve gerçek birim şekil değiştirme eğrisi dönüştürülmesinin ardından malzemenin elastik bölgesi için yine bu sıcaklıktaki elastisite modülü ve akma sınırı literatürden alınan veriler girilir. Plastik bölgedeki gerçek gerilme ve birim şekil değiştirme eğrisindeki bu akma değerine denk gelen noktaya kadar olan veriler silinir ve eğri akma noktası sıfır birim şekil değiştirme olacakmış gibi ötelenir ve literatürden elde edilen elastisite modülü ile çakışması sağlanır. Böylece bilgisayar ortamında tanımlanan malzeme, gerçek hayattaki malzeme modeline benzetilmiş olur.

Analizi gerçekleştirebilmek için oluşturulan malzeme modeli; elastik bölgedeki elastisite modülü ve Poisson oranından oluşan elastisite, plastik bölgedeki plastisite eğrilerinden oluşur. Her iki bölge için dikkat edilmesi gereken nokta, oluşturulan bu tanımlamanın yalnızca sıvama işleminin yapıldığı sıcaklıkta geçerli olduğudur.

Analiz sürecinde araştırılması gereken diğer parametreler ise, ortaya çıkan sıcaklık ve hız değerleridir. Bilindiği üzere sıvama işlemi soğuk olarak yapılan bir plastik şekil verme işlemidir. Fakat sıvama işleminin çok kısa bir süre içerisinde ve yüksek basınç değerleri ile gerçekleşmesi, röle ve rotül gövdesi arasındaki sürtünme sonrasında belirli miktarda ısı ortaya çıkarmaktadır. Oluşan bu ısının

nicelik olarak ölçülmesi ve malzemeye olan etkisi, **sıcaklığın sıvama işlemine etkisi** bölümünde incelenmiştir.

Ayrıca Şekil 5.26 incelendiğinde, birim şekil değiştirme hızlarının değişiminin dövülmüş C15 E malzemesinin gerilme değerlerini çok etkilemediği sonucuna varılmıştır. Bu da malzemenin birim şekil değiştirme hızına (strain rate) bağımlı olmadığını gösterir. Sıvama parametrelerinden biri olan **röle hızlarındaki değişimin** sıvama sonrası ortaya çıkan artık gerilmelere etkisi, malzemenin birim şekil değiştirme hızının oluşan gerçek gerilmelere etkisi ile ilişkili olduğu düşünülmektedir. Bu durum, sıvama işlemi esnasında röle hızlarındaki değişimin artık gerilmeler üzerindeki etkisinin incelendiği bölümde ayrıntılı olarak irdelenmiştir.

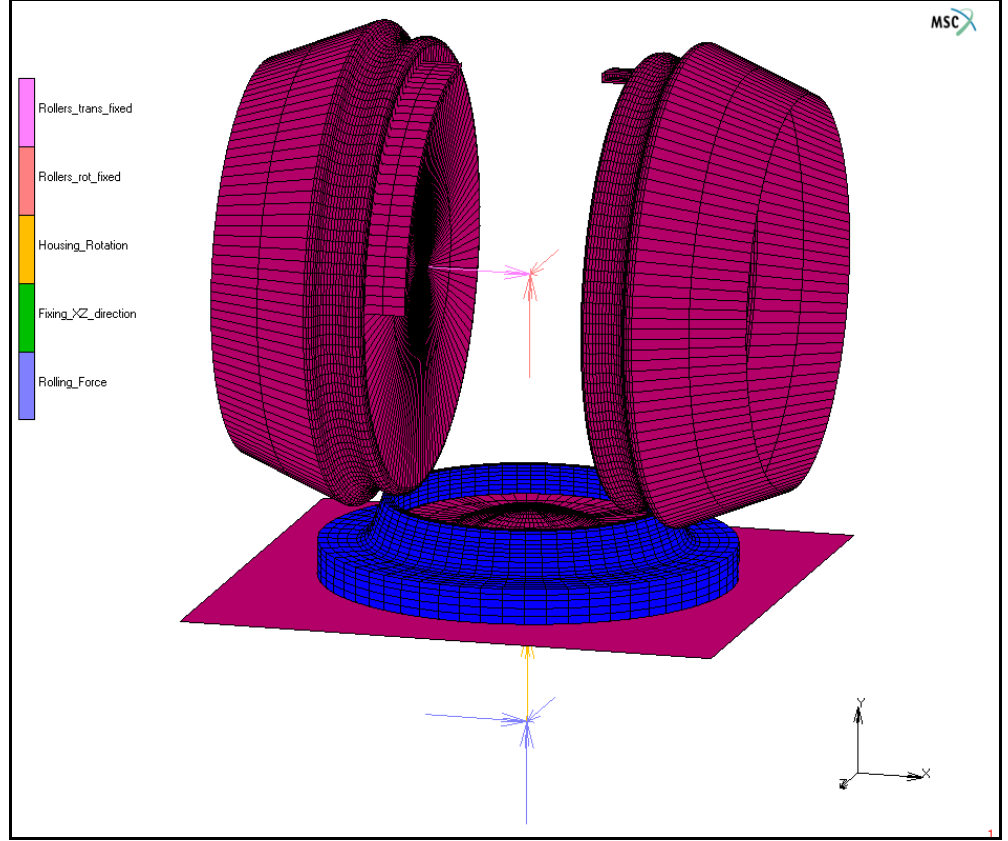
5.2.6 Sıcaklığın sıvama işlemine etkisi

Sıvama işlemi esnasında sürtünmeden dolayı ortaya çıkan ısıнын malzemenin mekanik özelliklerine etkisinin olup olmadığı araştırılmıştır. Bilindiği üzere efektif bir sıcaklığa maruz kalan malzemede akma dayanımında düşüş gözlenir. Bu bağlamda, sıvama işlemi esnasında optik termometre kullanılarak çeşitli ölçümler yapılmıştır. Yapılan incelemeler sonucu rotlin sıvanan gövdesinde sıcaklığın 50-60 °C arasında değişim gösterdiği ve bu sıcaklığın malzemenin akma dayanımına kayda değer bir etkisinin olmadığı sonucuna varılmıştır.

5.2.7 Sıvama işleminde sınır şartları

Sıvama tezgâhında malafa üzerine konan rotil gövdesi, yerden belirli bir mesafedeki üst kısma konarak sıvama işlemine başlanır. Önceden ayarlanan sıvama basıncı değerinde, röleler ilk olarak mesafe kontrollü olarak rotil gövdesine yaklaşır. Daha sonra da ayarlanan sıvama basıncı ile röleler elektrik

motor vasıtası ile gelen güç ile 490 devir/dakika hızla 1 saniye içerisinde dönerek rotül gövdesinin kapak üzerine montaj sağlanır.



Şekil 5.30 MSC Superform 2005 programında sıvama işlemine ait sınır şartları

İşlem, sıvama simülasyonunda (Şekil 5.30) ise mevcut sınır şartları göz önüne alınarak gerçekleştirilmiştir. Sıvama uzayının nasıl oluşturulduğu “**sıvama simülasyonun aşamaları**” bölümünde ayrıntılı olarak irdelenmiştir.

5.2.8 Sıvama simülasyonunun aşamaları

Sıvama analizinde modelleme işlemi tamamlandıktan sonra ilk amaç, rölelerin sıvanacak parça (rotıl gövdesi) üzerinde kendi eksenleri (lokal eksenler) etrafında dönmelerini sağlamaktır. Tek röle ile dönme hareketi sağlanabilmekte ve üzerine sistemin sıvama basıncı uygulandığında, röle ve sistemin merkezi arası mesafe varlığından rölede moment oluşmaktadır. Analizin ilerleyen safhalarında röle, dairesel hareketin dışına çıkarak hem kendi ekseninde hem de sıvanan parça üzerinde rotasyonel hareket oluşturmaktadır. Karşılaşılan bu sorun, her iki tarafa röle koyarak ve tek kontrol düğümü ile moment oluşumu engellenerek çözümlenmiştir. Fakat bu çözüm de başka bir sorunu ortaya çıkarmıştır. Tek kontrol düğüm noktası ve farklı yardımcı düğümler aracılığıyla röleler farklı yönlerde dönememektedir.

Mevcut durum karşısında sorun, röleleri Y ekseninde belirli bir hızla döndürerek üzerlerine sistem basıncını uygulamak yerine, sıvanan parça (rotıl gövdesi) kendi ekseninde aynı hızla döndürülerek sistem basıncının sıvanan parça üzerinden verilmesi ile çözülmüştür. Özellikle sürtünme aracılığıyla rölelerin kendi eksenleri etrafında dönebilmeleri için rölelerin sadece X eksen çevresinde dönmelerine izin verilmiş, diğer serbestlik dereceleri ise yok edilerek mevcut sınır şartlarına ulaşılmıştır.

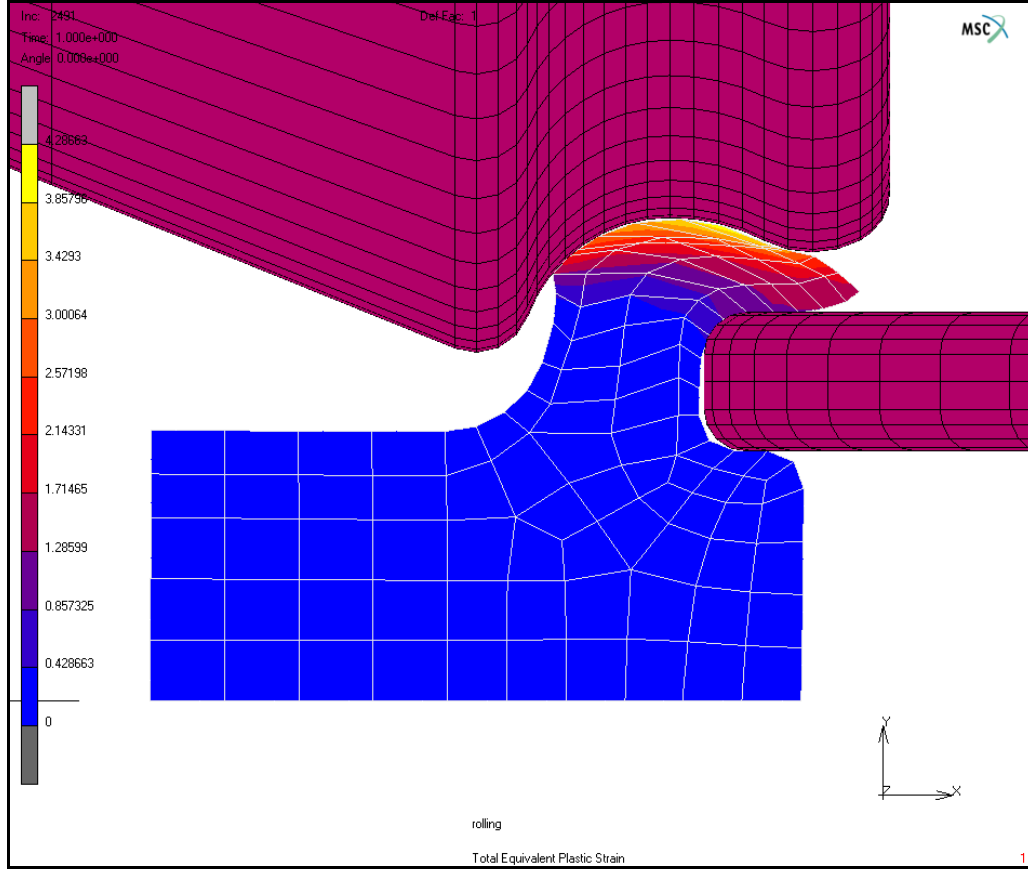
Sıvama analizinde ikinci olarak hedeflenen, gerçek boyutta modeli hazırlanmış röleler ile sıvama işleminin gerçekleşmesidir. Uygulamalarda karşılaşılan hatalardan başlıcaları, üzerinden sıvama basıncı uygulanan rölelerin, sıvanan bölgedeki elemanları aşırı miktarda ezmesi sonucu eleman tiplerinin eski hallerini kaybederek farklı elemanlara dönüşmesi ve elemanların iç içe geçerek analizin belirli bir adımdan sonra ilerleyememesine sebep olmasıdır. Karşılaşılan bu sorun, sıvanan parçanın mevcut ağ yapısının değişimi sonucu kısmen de olsa çözüm üretmekte fakat analiz başarılı bir şekilde sonlanamamaktadır.

Ağ yapısının değişimi nedeniyle karşılaşılan başka bir sorun da, analizin belirli bir sonucu yakınsamamasından kaynaklanan hatadır. Teoride olduğu gibi problemin çözümünde de ne kadar çok adım tanımlanırsa, onun o kadar

hassaslaştığı saptanmıştır. Bu nedenle sıvama analizlerinde, çözümlemedeki adım sayısı (increment) artırılarak, ıraksama problemi giderilmesi hedeflenmiştir.

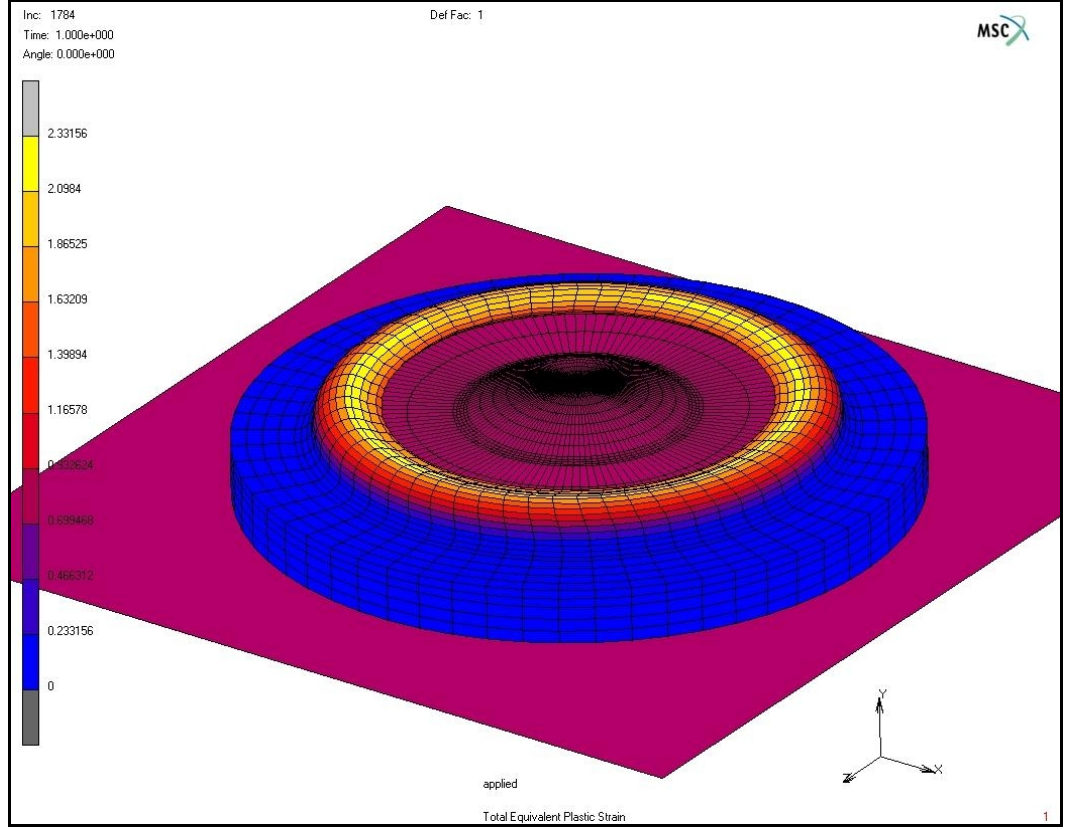
MARC programında elemanların belirli adım sayısından sonra aşırı derecede bozulması nedeni ile analiz başarısız bir şekilde sonlanmıştır. Bu durumu önlemek amacı ile elemanların aşırı derecede bozulduğu veya analizin sonuca ulaşamadığı işlemlerde MARC yazılımının “**remesh**” komutu kullanılmış ve analizin önceki iterasyonlara göre daha belirgin bir ilerleme kaydettiği gözlemlenmiştir. **Remesh** algoritması, ağ yapısı oluşturulup mevcut sınır şartları uygulanan analizlerde elemanların aşırı derecede deformasyona uğraması nedeniyle analizin durmasını engellemek için, bozulan ağ yapısını önceden belirlenmiş parametreler aracı ile otomatik olarak yeniden oluşturmaya dayanır. Kendi seçenekleri içerisinde belirtilen adımda elemanları tekrar oluşturarak analizin ilerlemesine katkıda bulunmaktadır. Fakat çok sayıdaki iterasyon nedeniyle, remesh seçeneği kullanılan analizlerde, yeniden üretilen elemanlar sonrası sistemde birim şekil değiştirme (strain) kaybı oluşmaktadır. Örneğin adım sayısı 1000 olan bir analizde elemanlardaki aşırı derecede ezilmeleri önleme amacı ile 100 adımda bir yeniden ağ yapısı oluşturulursa, sistemde 10 defa yeniden ağ yapısı oluşturulmuş olacaktır. Böyle bir analizde belirgin bir birim şekil değiştirme kaybı görülür. Çalışmanın sonunda sonlu elemanlar yöntemi sonuçları ile deneysel sonuçlar arasında büyük bir farkın oluşacağı öngörüldüğünden, “remesh” seçeneğinden vazgeçilmiş ve farklı parametreler kullanılarak analizlere devam edilmiştir.

İlerleyen analizlerde röleler arasındaki mesafenin, hem analiz süresini hem de sıvanan bölgenin şeklini etkilediği belirlenmiştir. Analizin başarılı şekilde sonuçlanabilmesi için, röleler arasındaki mesafenin belirli bir aralığın dışına çıkmaması sağlanmıştır. Sıvanan bölgeler, röleler arasındaki mesafenin azalması ile aynı sıkıştırma kuvveti altında daha fazla kapanacağı bilinmektedir. Röleler arasındaki mesafenin sıvanan bölgedeki şekil değişimine olan etkisi de açık bir şekilde görülmektedir (Şekil 5.31).



Şekil 5.31 Röle arasındaki mesafenin sıvama işlemine etkisi nedeniyle oluşan form

Sıvama analizlerinde farklı çözücülerin (solver) kullanılmasının, analizin süresine olan etkisi de incelenmiştir. Problemin tipi ve analizin çeşitliliğine göre, sıvama işleminde uzmanlaşmış programlara geçiş yapıldığında analiz sürelerinin daha kısa, sonuçların ise uygulama sonuçlarına daha yakın olduğu saptanmıştır. Bu bağlamda, MSC MARC MENTAT programı arayüzünde modellenen sistem, yine aynı MENTAT arayüzüne sahip formlama üzerine geliştirilmiş MSC Superform 2005 yazılımında adım sayısı artırılarak çözülmüştür. Bu yazılım ile plastik şekillendirme işlemlerinde daha etkin sonuçlar alındığı belirlenmiştir. Böylece oluşturulan sıvama uzayı MSC Superform 2005 programında mevcut sınır şartları ile geliştirilerek analize hazır hale getirilmiştir. Elde edilen sonuç Şekil 5.32’de gösterilmektedir.



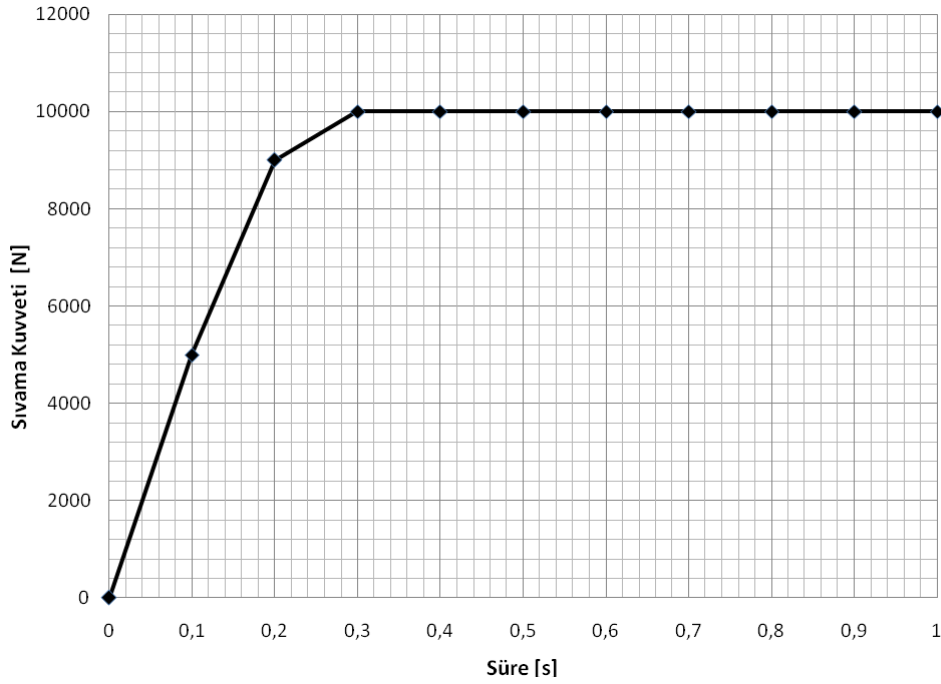
Şekil 5.32 MSC Superform 2005 yazılımında başarılı bir şekilde bitirilmiş sıvama analizinde sıvanan rotıl bölgesinin görünümü

5.2.9 Sıvama basıncının uygulanma süresinin sıvama simülasyonuna etkisi

Sıvama analizi sürecinde sıvanan parça (rotıl gövdesi) üzerine uygulanan sıvama basıncının zamana (veya adım sayısına) göre dağılımı ve analize olan etkisi belirgin bir şekilde tespit edilmiştir.

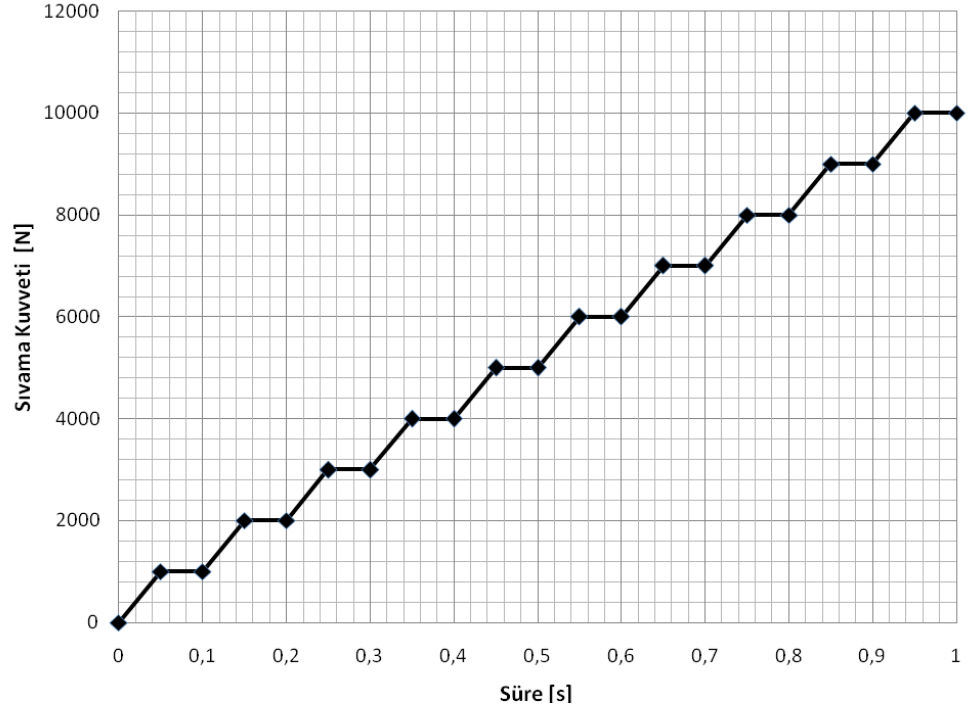
Sıvama işlemi, rotıl gövdesinin sıvanması ve sıvanan bölgenin bastırılması (ütülenmesi) şeklinde iki bölümden oluşur. **Sıvama** işlemi gerekli plastik şekil değişimini esas alırken, “**ütüleme**”de sabit kuvvet altında sıvanan bölgelerdeki istenen formu sağlamak amaçlanmaktadır. Bu bağlamda, analiz yapan programlarda sıvama rölelerinin zamana göre uyguladığı basıncı gösteren diyagramlarda, kuvvetin doğrusal olarak arttığı yerler sıvamanın olduğu,

kuvvetin sabit kaldığı yerler ise ütülemenin gerçekleştiği yerleri göstermektedir. Bu tez kapsamında geliştirilen algoritmalarda diğer parametreleri sabit tutularak sıvama ve “ütüleme” sürelerinin etkisi incelenmiştir. Sıvama basınç kuvvet eğrisinin eğiminin yüksek olması (diğer bir ifade ile sıvama basıncının aniden aşırı şekilde uygulanması), belirli bir adımdan sonra analizin durmasına sebep olmuştur (Şekil 5.33).



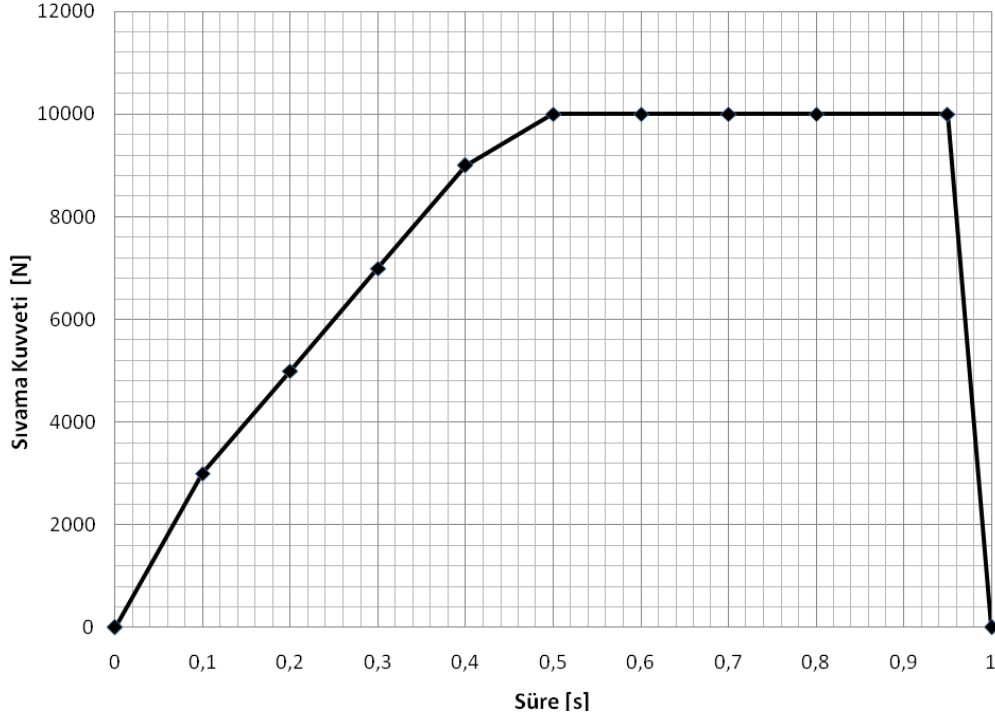
Şekil 5.33 Sıvama kuvvetinin aniden uygulanması sonucu başarılı bir şekilde bitirilemeyen analizin sıvama kuvveti – zaman dağılımı diyagramı

Fakat sıvama analizinde, şayet sıvama ve “ütüleme” işlemleri eşit sürelerle uygulanırsa (diğer bir ifade ile analizde röleler her turda ilk önce sıvama işlemini gerçekleştirip daha sonra ütüleme işlemini yaparsa), analizin sorunsuz bir şekilde ilerlediği gözlemlenmiştir (Şekil 5.34).



Şekil 5.34 Başarılı bir şekilde bitirilen analizde sıvama basıncının zamana göre dağılımı

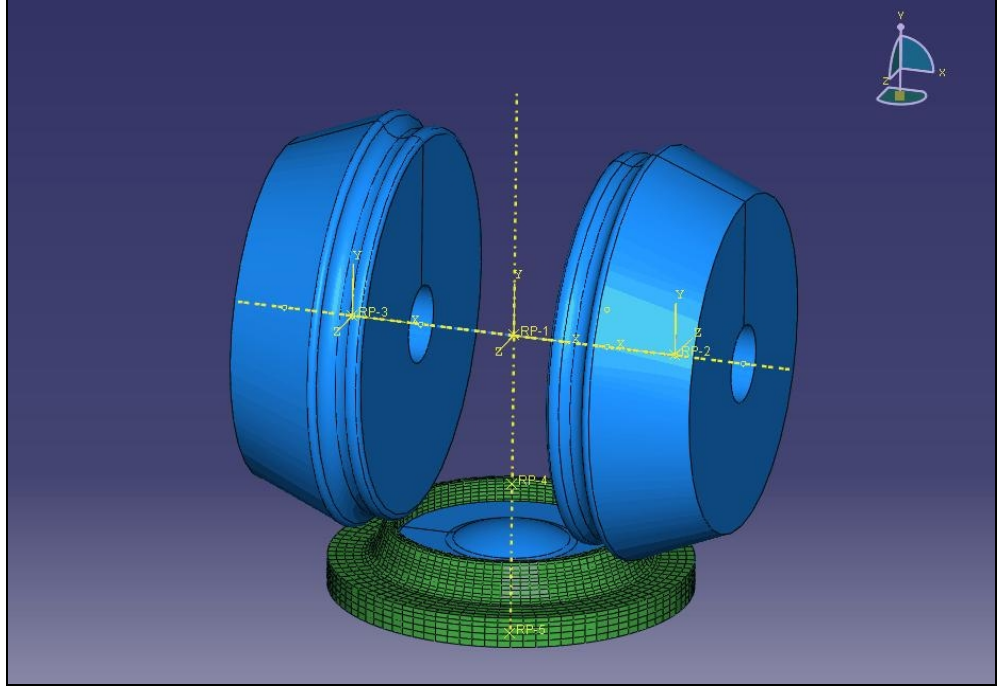
Son olarak, sıvama işleminde diğer parametreler sabit tutularak farklı sıvama basınç eğrileri uygulanmış ve sıvama basıncının uygulanma süresinin analize olan etkisi incelenmiştir. Daha sonra analizde etkili olan sıvama kuvveti – zaman eğrisi kullanılarak işleme devam edilmiştir (Şekil 5.35). Dikkat edilirse sıvama kuvveti analizin sonlarına doğru sıfır değerine yakınsamaktadır. Bunun sebebi, uygulamada sıvama işlemi bittikten sonra rölelerin sıvama kuvveti uygulamayarak referans noktalarına dönmeleridir.



Şekil 5.35 Sıvama simülasyonunada kullanılan sıvama kuvveti – zaman değerleri

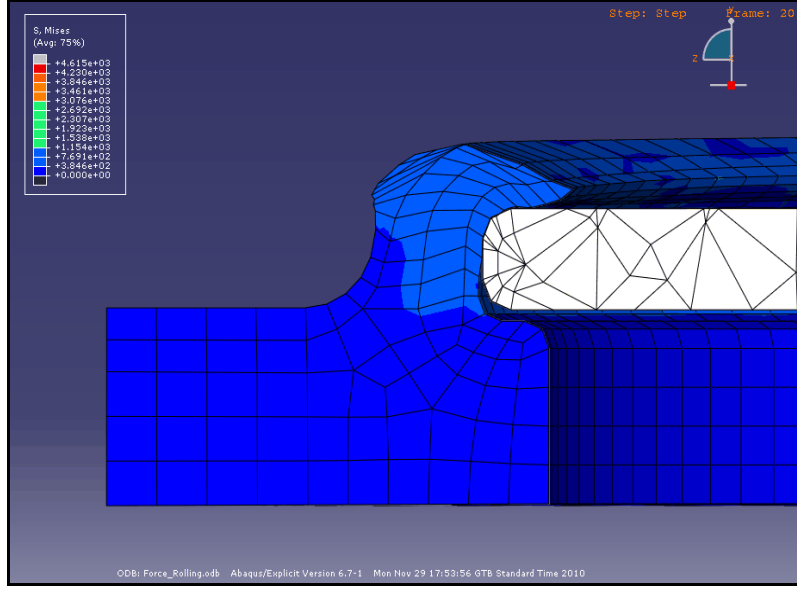
5.2.10 Sıvama simülasyonuna farklı bir yaklaşım

MSC Superform yazılımında istenilen sıvama formu sağlandıktan sonra, farklı bir yazılım aracılığıyla yeni bir sıvama simülasyonu üzerinde çalışılmıştır. Superform programında implicit olarak yapılan analiz değiştirilerek, mevcut sınır şartları dâhilinde ABAQUS programında explicit olarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 5.36).



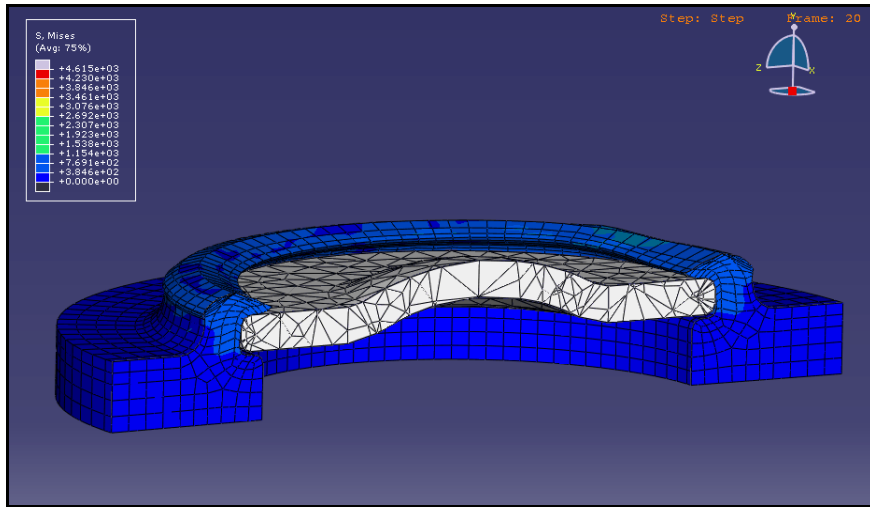
Şekil 5.36 ABAQUS’de modellenen sistem

Sıvama simülasyonunun ikinci bir yazılım kullanılarak gerçekleştirilmesindeki amaç, Superform programında **implicit** olarak yapılan analizin, ABAQUS yazılımında **explicit** olarak çözülmesidir. Böylece sıvama parametreleri değiştirildikten sonra aynı kapasitedeki bilgisayarlar yardımıyla sonuçlara daha erken ulaşmak mümkün olabilir. **Explicit** analiz türlerinde çözümleme algoritması; sistemin kütle matrisi atılarak sonucun belli bir miktar hata ihtiva etmesi ve daha hızlı analiz etmesi üzerine kuruludur (ABAQUS, 2007). Sonlu eleman yöntemi kullanılarak yapılan çalışmalarda explicit yöntemin yaygın olarak kullanıldığı ve gittikçe kullanım alanlarının arttığı görülmektedir. Özellikle metal şekillendirme, penetrasyon, balistik inceleme gibi hızın ve gerilmenin beraber düşünüldüğü, problemlerin doğrusal olmadığı durumlarda explicit algoritmalar ile çok daha iyi sonuçlar alınabilmektedir.



Şekil 5.37 ABAQUS ile yapılan analiz sonrası rotul gövdesi kesit görünüşü

Tez kapsamında ABAQUS yazılımında explicit olarak analiz edilen sistem, belirli sayıda iterasyon yapılarak belirli bir safhaya getirilmiştir. Superform programının ilk aşamalarında olduğu gibi elemanların aşırı derecede deformasyona uğrayıp bozulmaları, analizin belirli bir safhadan sonra durmasına sebep olmuştur. Lakin tez süresinin kısıtlı olması nedeniyle ABAQUS üzerinde hazırlanan sıvama uzayının mevcut şekilde bırakılarak daha sonra geliştirilmesine karar verilmiştir. ABAQUS’de hazırlanan sıvama simülasyonunda belirli seviyede plastik deformasyona uğramış rotul gövdesinin son hali Şekil 5.37 ve 5.38’de gösterilmiştir.

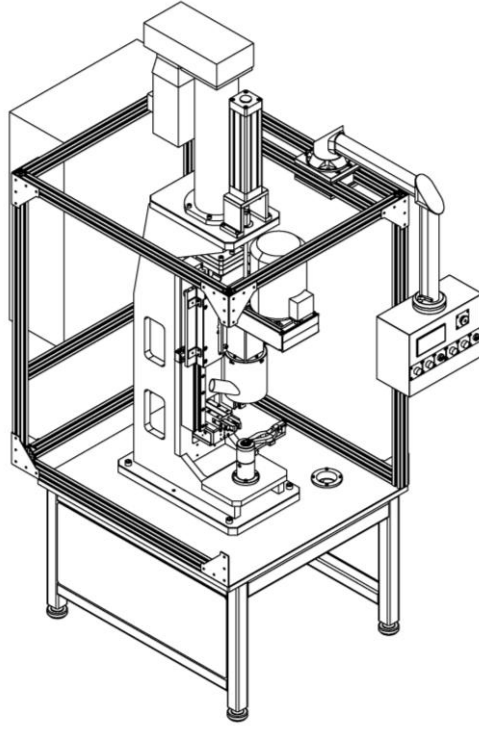


Şekil 5.38 ABAQUS programı ile yapılan analizde rotul gövdesinin son hali

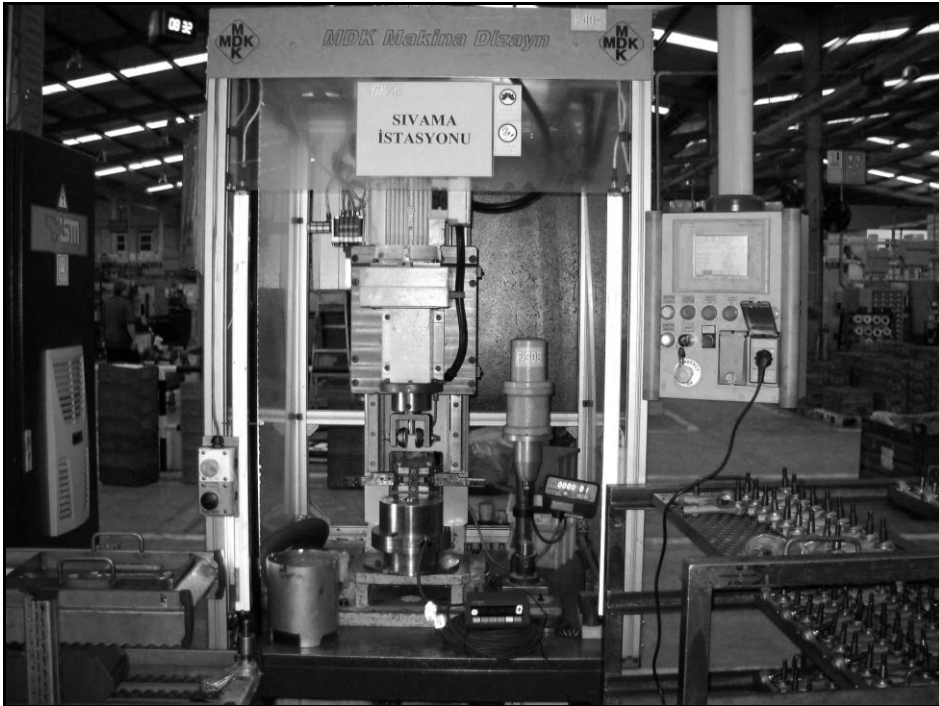
6. PLASTİK DEFORMASYON SONRASI OLUŞAN SIKIŞTIRMA KUVVETLERİNİN TEST YÖNTEMLERİ İLE SAPTANMASI

Sıvama işleminin yapıldığı sıvama tezgâhı (Şekil 6.1 ve 6.2), özel bir tasarım olup sipariş üzerine imal edilmiş seri imalat yapan bir tezgâhtır. Tezgâhın çalışma prensibi şu şekildedir:

Sıvama işlemi yapılacak numunede, süspansiyon sistemindeki yerine göre, röle tipleri ve röleler arasındaki mesafe değişiklik arz etmektedir. Tez kapsamında incelenen rotil numune ise X90 SBJ (Suspension Ball Joint) olarak belirlenmiştir. Sıvama işlemi yapılacak rotil gövdesine, POM yatak ve kapak konulduktan sonra rotil, tezgâh üzerindeki numuneye göre tasarlanmış malafaya yerleştirilir. Sıvama işlemine başlamadan önce, POM yataklara kapakçık üzerinden iletilmek üzere röleler arasından pnömatik piston vasıtası ile 0,5 ile 3 kN arasında sabit bir ön-basınç uygulanmaktadır. Ön basıncın uygulanması esnasında, röleler kendi eksenleri çevresinde dairesel harekete başlayarak 490 devir/dakika dairesel hızla ve z ekseninde hareket ederek, elektrik kumanda panelinde girilen basınç değerine uygun olarak sıvama işlemini gerçekleştirilir. Sıvama tezgâhının en önemli özelliği, sıvama rölelerinin sıvamayı ilk olarak mesafe kontrollü, ardından basınç kontrollü olarak gerçekleştirmesidir. Diğer bir ifade ile röleler z-ekseninde mesafe kontrollü olarak hareket eder ve önceden girilmiş basınç değerinde sıvama işlemini gerçekleştirir (MDK Makine, 2010).



Şekil 6.1 PKW sıvama tezgâhının izometrik görünüşü (MDK Makine, 2010)

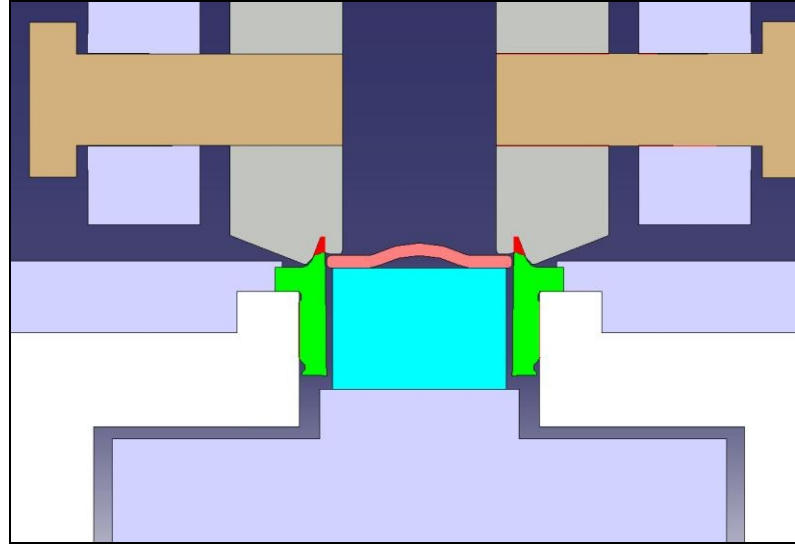


Şekil 6.2 PKW sıvama tezgâhının önden görünüşü

Sıvama işlemi açısından, mevcut sistemin parametrik özellikleri dikkate alınarak deney düzeneği oluşturulmuştur (Şekil 6.2 – 6.7).

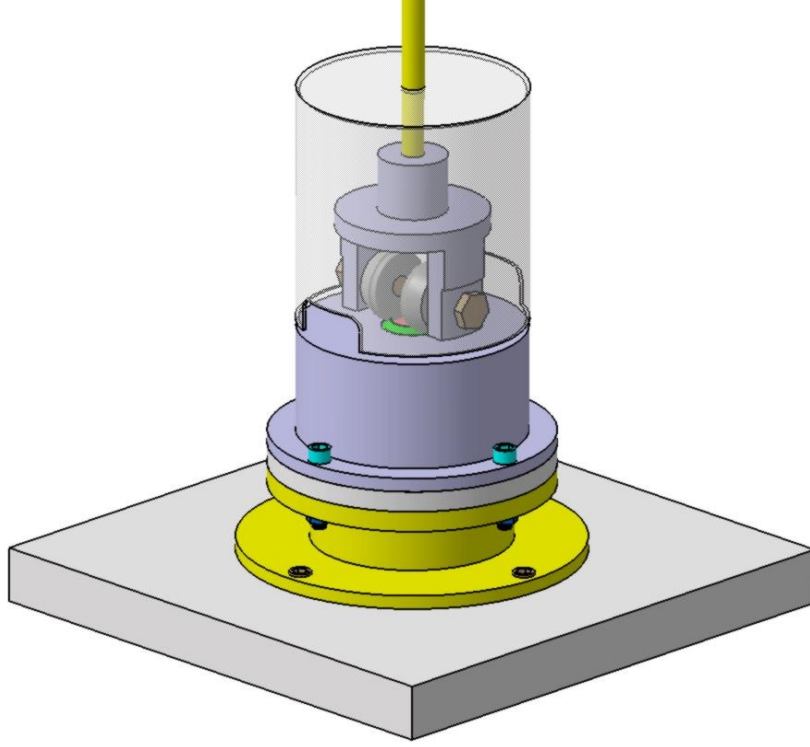
6.1 Deney Düzenek Tasarımı

Mevcut malafanın imal edilme prensibi seri üretimde kolaylık sağlanması içindir. Deney düzeneği ve düzenekteki malafanın imalat prensibi ise, rotil gövdesinin serbestlik derecelerinin yok edilerek sabitlenmesini tam olarak sağlamaktır (Şekil 6.3). Buradaki en önemli amaç, serbestlik derecesi yok edilen rotil gövdesi üzerinden plastik şekil değiştirme sonrası baskı kuvvetlerini saptayabilmektir.

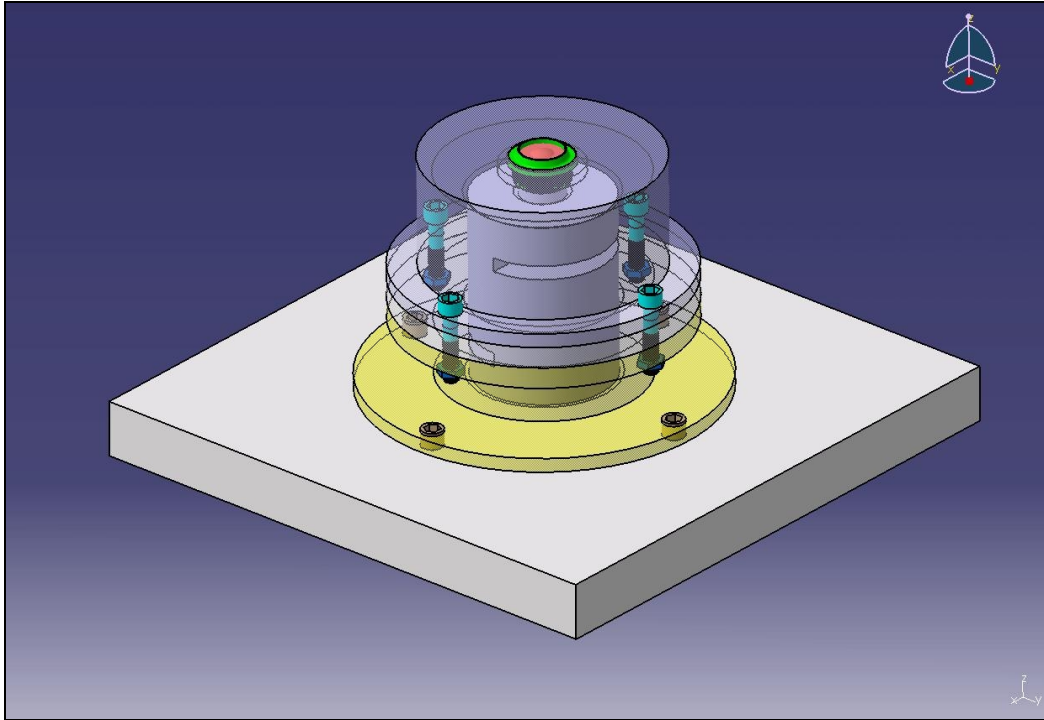


Şekil 6.3 Rotil gövdesinin tamamen sabitlenmesi

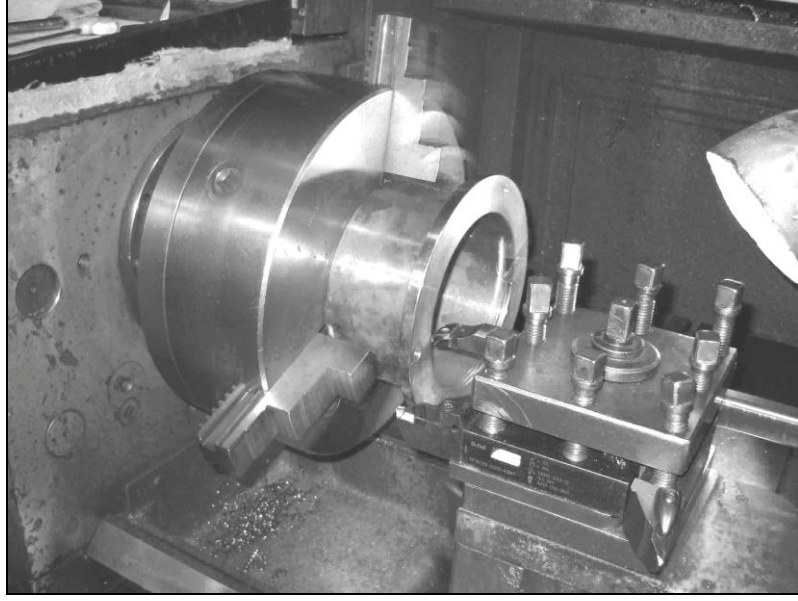
Sıvanan rotil gövdesinin iç kısmındaki elemanlarda oluşan sıkıştırma kuvvetlerinin mertebesinin bilinmemesi, tezin deneysel kısmında çok yüksek sıvama basınçlarına kadar ölçüm yapabilen ve ölçüm aralığı hassasiyetine sahip olan bir ölçüm cihazının kullanılmasını zorunlu kılmaktadır. Bu bağlamda ilgili deney düzeneği Şekil 6.4 ve 6.5'deki gibi tasarlanarak, gerekli toleranslar dâhilinde torna ve freze tezgâhlarında (Şekil 6.6) imal edilmiştir.



Şekil 6.4 İmal edilen özel sıvama aparatının röleler ile birlikte yapılan kinematik analizinin izometrik görünümü



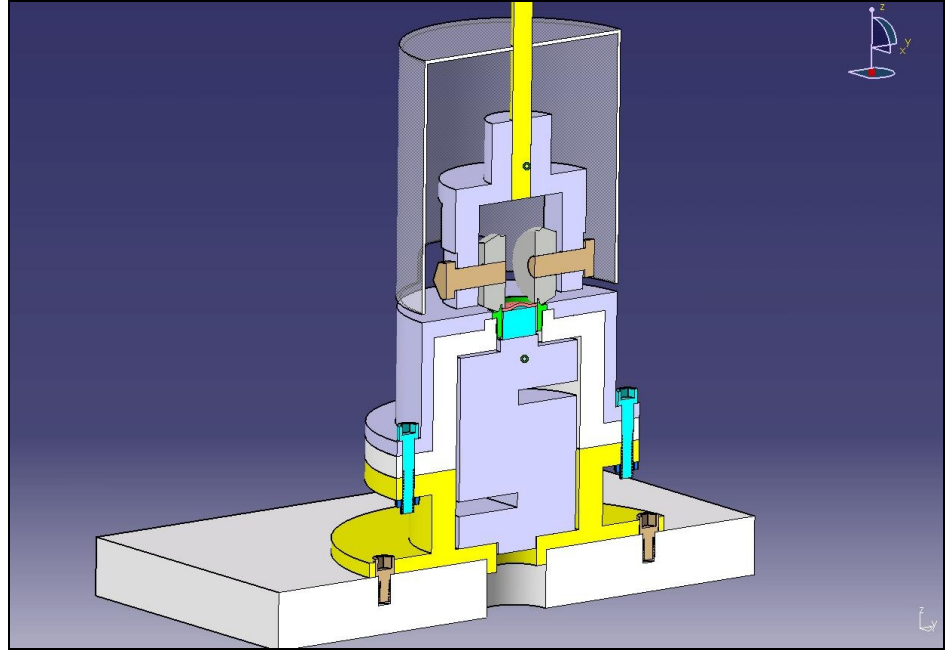
Şekil 6.5 Sıvama aparatının izometrik CAD görünümü



Şekil 6.6 Sıvama ara aparatının torna tezgâhında imal edilmesi

6.2 Deney Düzenekini Oluşturan Elemanlar ve Görevleri

Tez kapsamında oluşturulmuş ilgili düzenek, sıvama tezgâhına Şekil 6.7'deki gibi monte edilmiştir. Genel olarak düzenek aşağıdaki elemanlardan oluşmaktadır.



Şekil 6.7 Sıvama aparatının sıvama tezgâhına monte edilmiş hali ve kesit görünüşü

1. **Röleler:** Sıvama işlemini gerçekleştirerek işlenen parçaların sıkı montajını sağlayan dönen elemanlardır.
2. **Rotil Gövdesi:** Sıvanan temel parçadır (Şekil 6.8 ve 6.9).
3. **Rotil Kapakçığı:** Sıvama sonrasında POM yatak ile sıvanan bölge arasına sıkıştırılarak rotilin kapanmasını ve yataklarda belirli bir sıkılık sağlar (Şekil 6.10).
4. **Ara Aparat:** Sıvama işlemi sırasında rotıl gövdesini sıkıca kavrayarak sıvama işleminin başarılı bir şekilde gerçekleşmesini sağlar. Ayrıca üst aparat ile temas ederek sıvama işlemi sonrası rotıl gövdesinin sıkıştırma kuvvetlerinin etkisi ile yer değiştirmesini engellemektir.
5. **Alt Aparat:** Sıvama işlemi sırasında;
 - a. Üst ve ara aparatların birbirine sabitlenmesini sağlamak,
 - b. Yük hücresinin sabitlenmesi sağlamak ve yük hücreğine yataklık yapmak,
 - c. Alt çıkıntı aracılığıyla merkezleme görevi yapmasını sağlamak ve sıvama esnasında ekzantrisiteyi gidermek için kullanılmıştır.
6. **Üst Aparat:** Sıvama işlemi sırasında sıvanan rotıl gövdesini sabitlet, sıvama işlemi sonrasında yük hücresi ve rijit silindir arasında oluşan sıkıştırma kuvvetinin etkisiyle sıvanmış rotıl gövdesinin z eksenine doğrultusunda yukarı doğru çıkmasını engeller.
7. **Rijit Silindir:** Sıvama işlemi sırasında ve sonrasında oluşan kuvvetlerin alt kısımda bulunan sensöre iletilmesini sağlar (Şekil 6.10).
8. **Cıvatalar:** M8x30 ve M10x40 olmak üzere her iki çeşitten üçer cıvata kullanılmıştır. Tezgâh ve parçada oluşabilecek çentik etkisinden kaçınmak amacıyla, minimum sayıda deliğin açılması öngörülmüştür. Her üç

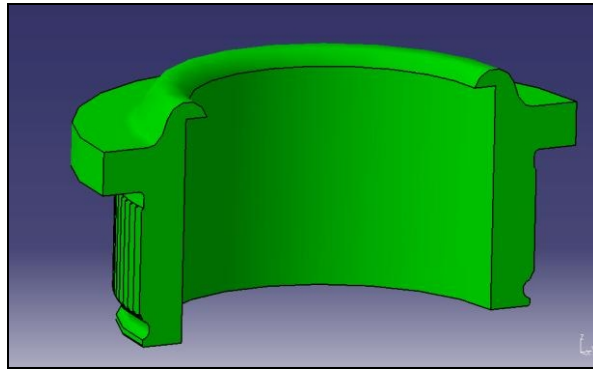
noktadan bir düzlem geçmesi nedeni ile sıvama tezgâhına M8x30'luk üç tane cıvata ile düzeneğin bağlantısı sağlanmıştır. Üst, alt ve ara aparatların birbirine bağlanarak rotıl gövdesinin tam olarak sabitlenebilmesi için M10x40'lık üç cıvata kullanılmış ve böylece tüm parçaların birbirlerine kilitlenmeleri sağlanmıştır.

9. Yük Hücresi: Rijit silindirden iletilen aksenal kuvvetlerin ölçülmesinde kullanılmıştır (Şekil 6.12).

10. İndikatör: Yük hücresinden gelen sinyali, son kullanıcıya ekranda dijital göstererek ölçüm işleminin sonlanmasını sağlar (Şekil 6.13).

6.3 Deney Düzeneğinin Çalışma Prensibi

Deneyde kullanılacak, iç yüzeyleri üniform olmayan rotıl gövdelerinden talaş kaldırılarak, gövde iç yüzeyleri tamamen üniform hale getirilmiştir (Şekil 6.8). Böylece içlerindeki rotıl kapakçığının ve rijit silindirin z-ekseni doğrultusunda (düşey) hareketi mümkün olduğunca kolaylaştırılmış olacaktır.

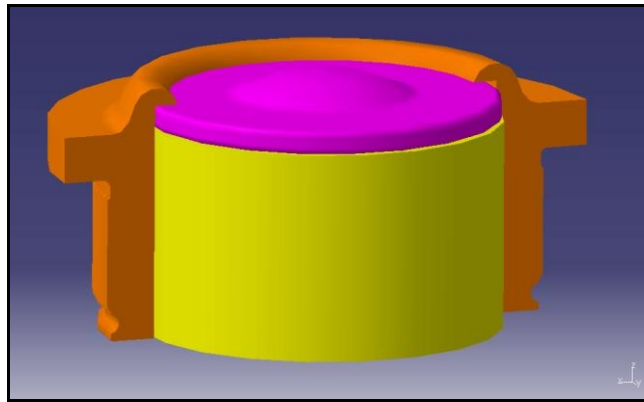


Şekil 6.8 İç yüzeyi pürüzsüz hale getirilmiş rotıl

Parlatılarak pürüzsüz hale getirilmiş rotil gövdesinin içerisine, ilk olarak tüm sıkıştırma kuvvetini iletmesi için rijit silindir, daha sonra da rotil kapakçığı yerleştirilmiştir. **Rijit silindir**, rotil kapakçığının yüksekliğini sabitlerken, ayrıca sıvama sırasında ve sonrasında oluşan kuvvetlerin sensöre iletilmesini sağlayacaktır. Burada dikkat edilmesi gereken önemli bir nokta, rotil gövdesinin iç yüzeyi ile kapakçığın ve rijit silindirin yanıl yüzeylerinin arasında teması en aza indirmek olacaktır (Şekil 6.9 ve 6.10). Böylelikle elemanların yanıl yüzeyleri arasında oluşan sürtünme kuvveti en aza indirilerek, eksenel yönde (z-ekseni) ölçüm yapan sensöre tüm kuvvetlerin iletilmesi hedeflemiştir.

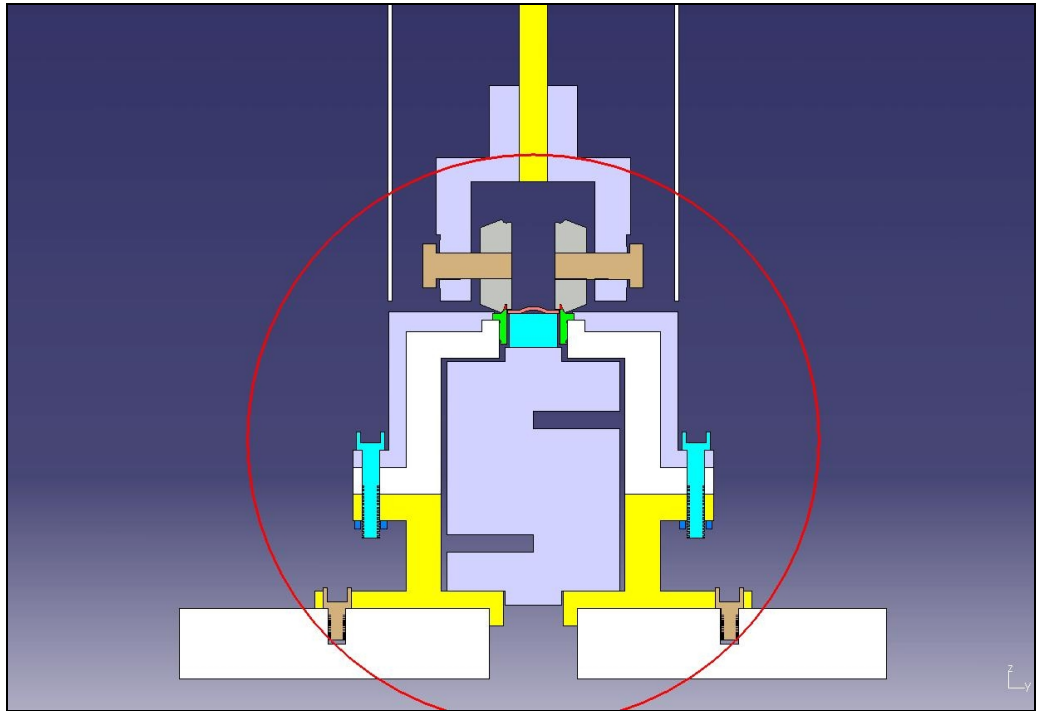


Şekil 6.9 İç yüzeyinden talaş alınmış rotilin en kesit görünümü



Şekil 6.10 İç yüzeyinden talaş alınmış rotil gövdesi ve yanıl yüzeyleri ile teması en az seviyeye indirilen kapakçık ve rijit silindir

Sıvama işleminde rotıl, ara aparata oturtulur ve sıvama işlemi gerçekleştirilir. Alt ve üst aparat, cıvatalar aracılığıyla bağlandığından rotıl gövdesi her üç ekseninde de öteleme ve dönmeye karşı tam olarak sabitlenir (Şekil 6.11). Sabitlenen rotıl gövdesi içerisinde sıvama sırasında ve sonrasında plastik deformasyon sonucu oluşan kuvvetler, (z eksenine doğrultusunda) önce rotıl kapakçığına daha sonra da rijit silindire (engelsiz olarak) iletildikten sonra, aksinel yönde ölçüm yapabilen kuvvet sensöründe (yük hücresi) kuvvet iletimi tamamlanır. Yük hücresi (Şekil 6.12) kullanıldığından, hem rotıl kapakçığının hem de rijit silindirin yanal yüzeyleri yağlanıp sadece z ekseninde hareket serbestliği verilerek, ölçümün Şekil 6.11'deki gibi olabildiğince hassas bir şekilde gerçekleştirilmesi hedeflenmiştir. Sıvama işlemi bitiminde plastik şekil değişimine uğrayan bölgelerin rijit silindir üzerinden yük hücresine iletilen kuvvetler, sıvama aparatı üzerinden açılan deliklerden kablolar vasıtasıyla yük hücresi indikatöründe (Şekil 6.13) değerler kilogram cinsinden okunur. Okunan değerler simülasyondaki birim sistemine çevrilerek işlem tamamlanmış olur.



Şekil 6.11 Sıvama aparatının ön-kesit görünüşü



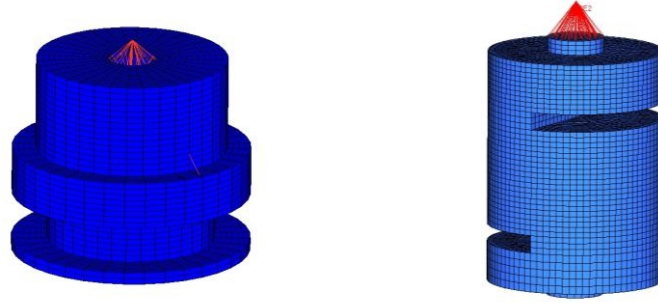
Şekil 6.12 Sıvama deneyinde kullanılan 10000 kg kapasiteli 0,0001 hassasiyete sahip yük hücresi



Şekil 6.13 Yük hücresine uyumlu indikatör

6.4 Tasarım Sonrası Sonlu Elemanlar Analizi

Tasarımı biten deney düzeneğinin sıvama işlemine olan dayanıklılığını test ederek tekrar tekrar malafa imal etmektense, tasarlanan düzeneği sonlu elemanlar yöntemi ile sınır şartlarını kontrol edip uygulayarak, elde edilen sonuçlara göre tasarımı değiştirmek daha hızlı ve düşük maliyetli bir çözüm olmuştur. Bu bağlamda ilk olarak, tasarlanan geometriler HyperMesh programında ağ yapıları oluşturularak analiz için hazır hale getirilmişlerdir (Şekil 6.14). Aşağıda ağ yapıları hazırlanan sıvama aparatlarının farklı iki durum için yapılmış analizlerine yer verilmiştir.



Şekil 6.14 Tasarımı gerçekleştirilen aparat ve yük hücresinin ağ yapıları

6.4.1 Sıvama işlemi esnasında uygulanan sıvama kuvveti sonucu aparatta oluşan gerilmeler

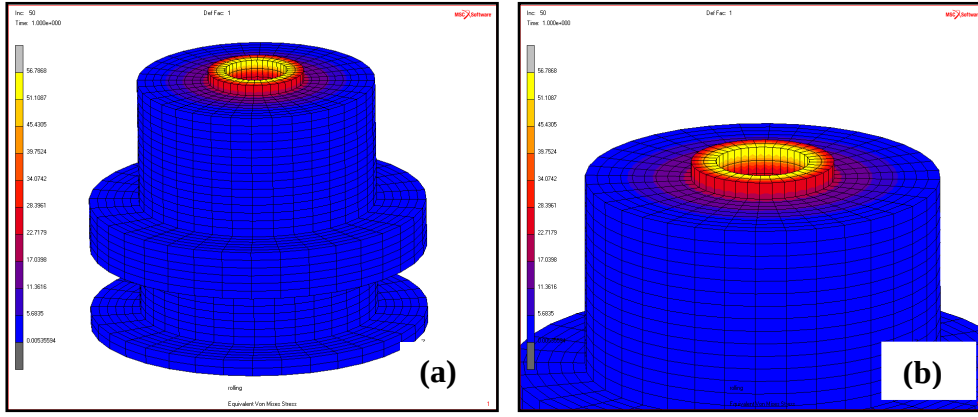
Bu çalışmada, temel amacı olan sıvama işleminde sıvama basıncının artması ile yatak kuvvetlerinde oluşan sıkıştırma kuvvetlerinin değişiminin incelenmesi hedeflenmektedir. Bu nedenle sıvama basıncı artırılarak ara aparatın üzerinde oluşan gerilme dağılımı incelenmiştir ve sonuçlar Çizelge 6.1’de verilmiştir.

Sıvama tezgâhının maksimum sıvama kapasitesi 40000 N’dur. Fakat bu basınçta sıvama yapılamamaktadır. Öngörülen 35000 N maksimum sıvama basıncı ile parça üzerinde 56,78 MPa gerilme elde edilmiştir. Aparat ve elemanları

1040 ve 1050 çeliklerinden imal edildiğinden sıvama işleminde güvenli bir şekilde kullanılmıştır (Şekil 6.15).

Çizelge 6.1 Sıvama işlemi yapıldığı anda ara aparatta oluşacak gerilmeler

Sıvama basıncı [N]	Aparatta oluşacak maksimum gerilme [MPa]
20000	32,44
35000	56,78



Şekil 6.15 35000 N sıvama basıncı uygulandığında ara aparatta oluşan gerilmelerin gösterimi

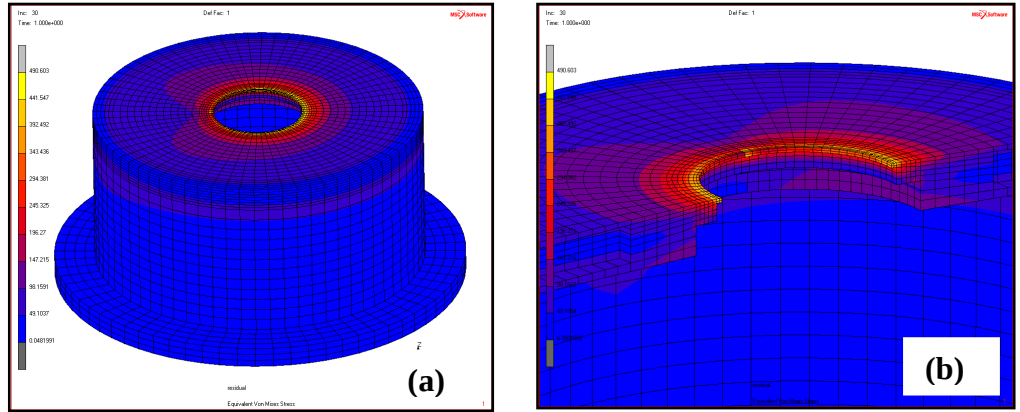
(a) Ara aparatın önden görünümü **(b)** Ara aparatta gerilmelerin maksimum olduğu bölgeler

6.4.2 Sıvama işlemi sonrası yataklarda oluşan sıkıştırma kuvvetlerinin üst aparata uygulanması sonucu oluşan gerilmeler

Sıvama işlemi bittikten sonra POM yatak malzemesinin yerini dolduran rijit silindir ile yük hücresi arasında oluşan sıkıştırma kuvveti, rotıl gövdesini z yönünde yukarı doğru itecektir. Üst aparat ise bu hareketi engelleyerek sıkıştırma işleminin devamını sağlar. Analizde ise oluşan bu artık kuvvetin malzemeye olan etkisi incelenmiştir. Bu analiz yapılırken, artık kuvvet iteratif olarak artırılır ve bu kuvvete göre oluşan gerilmeler hesaplanır. Çizelge 6.2’de ve Şekil 6.16’da farklı artık kuvvet değerlerinde oluşan farklı gerilmeler verilmiştir.

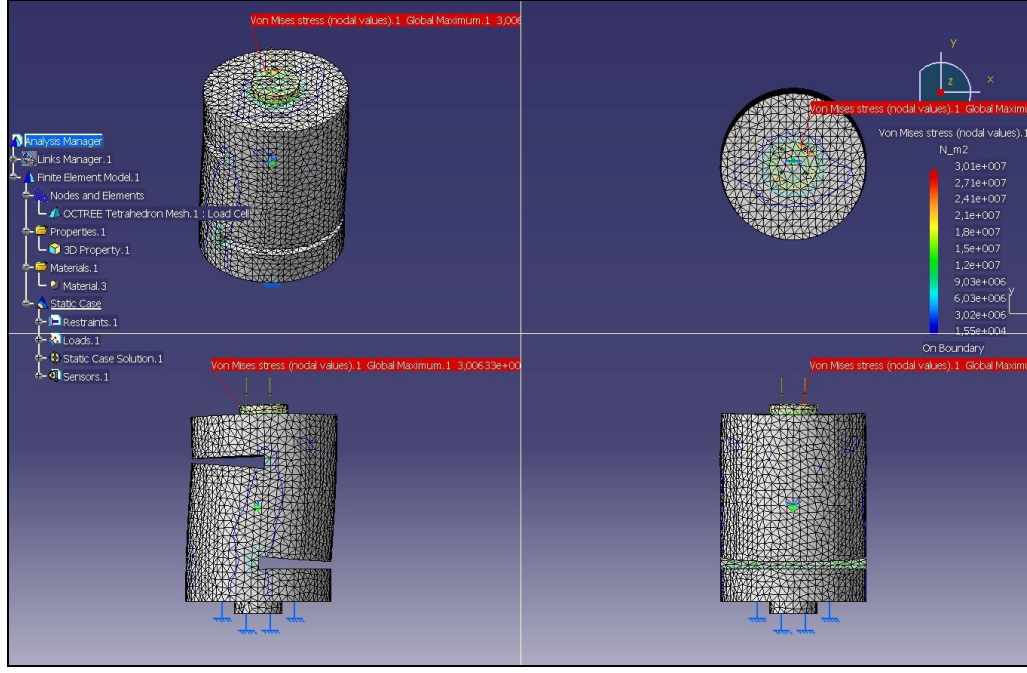
Çizelge 6.2 Sıvama sonrası üst aparatta oluşacak gerilmeler

Artık kalan kuvvet [N]	Artık kuvvetin oluşturduğu gerilme [MPa]
3000	30,73
4000	40,98
5000	51,22
10000	102,45
15000	247,30
25000	411,39
30000	490,603

**Şekil 6.16** Artık kalan kuvvetin 30000 N olması durumunda üst aparatta oluşan gerilmeler

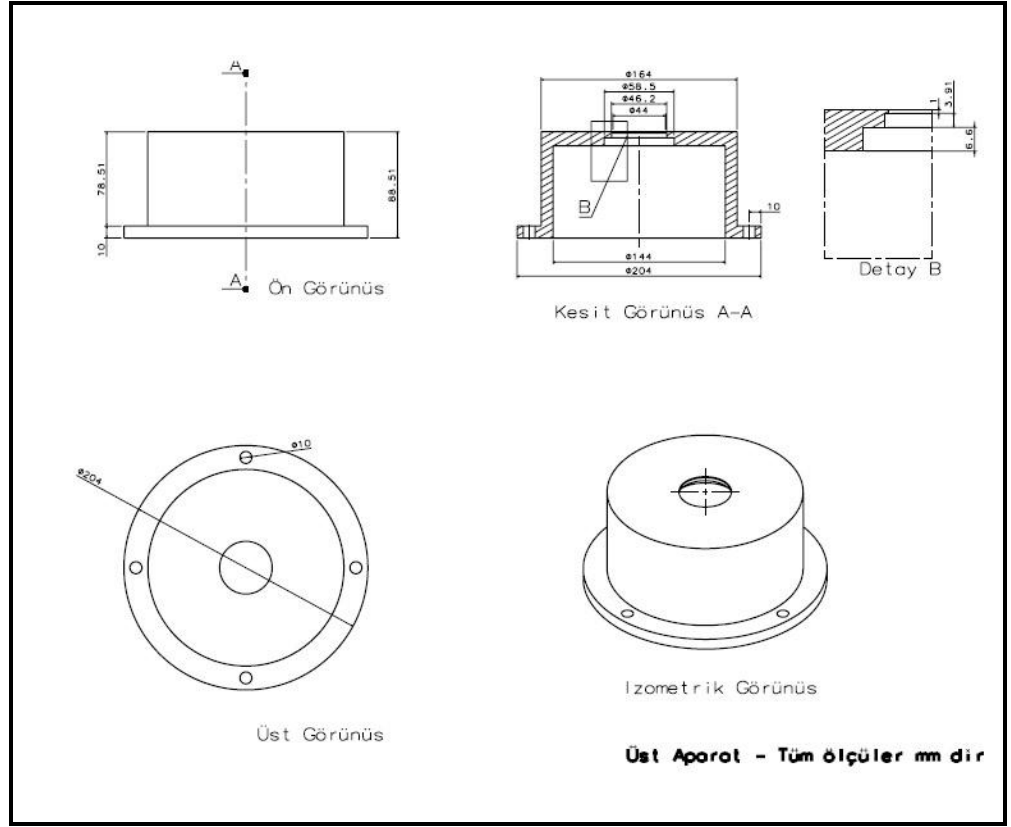
(a) Üst aparatta oluşan gerilmeler (b) Üst aparatta oluşan maksimum gerilmeler

Son olarak yük hücresinin üzerine maksimum kuvvet uygulandığında, yük hücresinde oluşabilecek yanal deformasyonun miktarı analiz edilmiştir. Bu bağlamda aşırı şekilde oluşabilecek yanal elastik deformasyon, alt ve ara aparatın yüzeyine teması halinde ölçme düzeneğinde hatalı ölçümlere sebebiyet verebilmektedir. Oluşturulan ağ yapısına mevcut sınır şartları uygulandığında, paslanmaz çelikten yapılmış olan yük hücresinde deformasyon miktarlarının çok küçük olduğu saptanmış ve tasarımın güvenli olduğuna karar verilmiştir (Şekil 6.17).

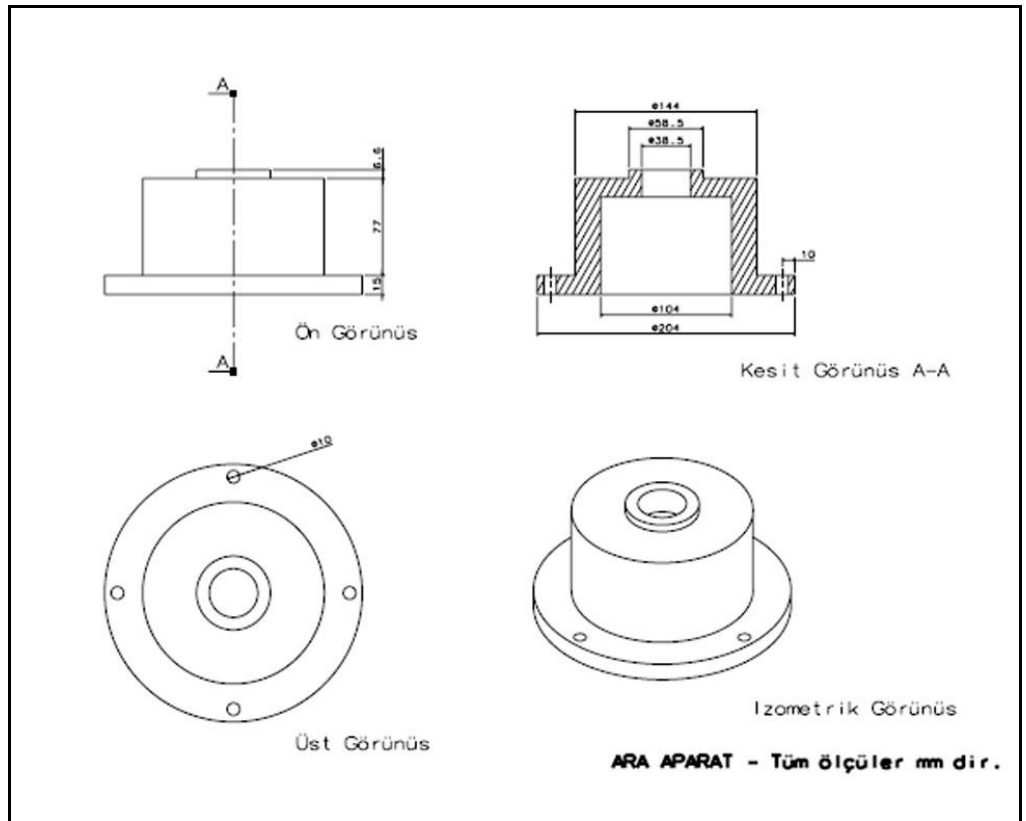


Şekil 6.17 Yük hücresinin üzerine yük geldiğinde oluşan gerilmeler ve yanıl yer değıştirmeler

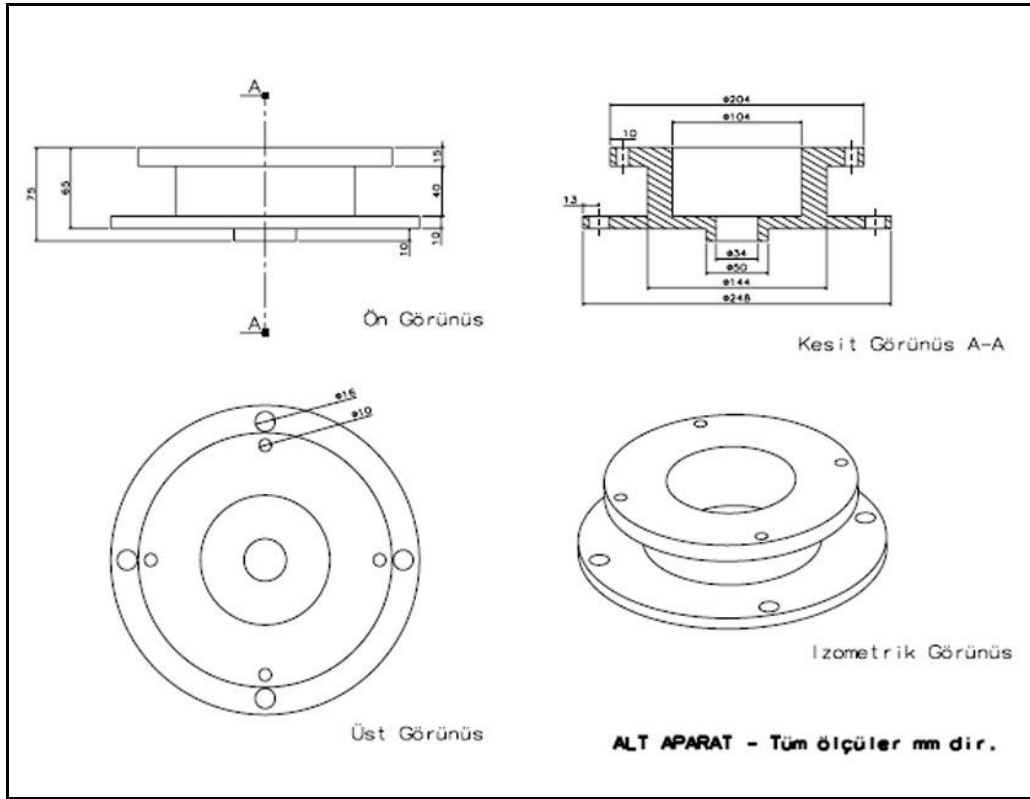
Sonuç olarak yapılan analizlerden deney düzeneğinin güvenli olduğuna karar verilmiş ve imalatları gerçekleştirilmiştir. Toleranslara uygun olarak imal edilen üst aparata, ara aparata, alt aparata ve rijit silindire ait imalat resimleri Şekil 6.18 – 6.21’de verilmiştir.



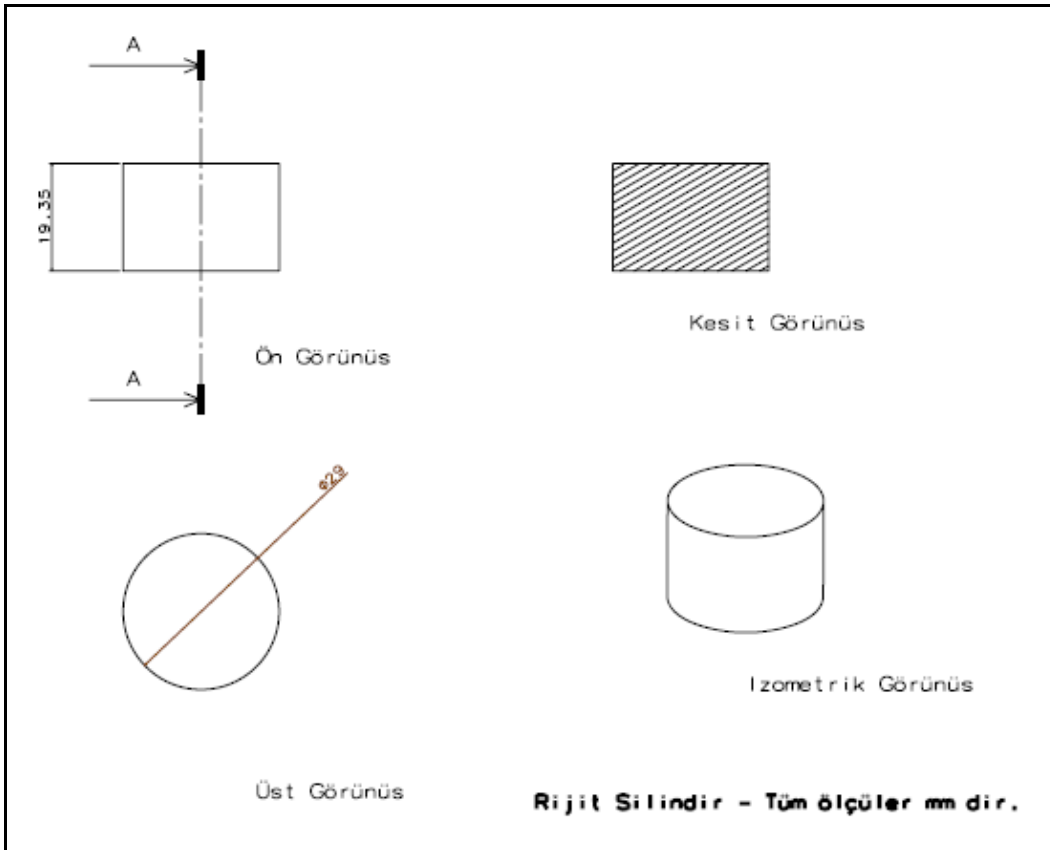
Şekil 6.18 Üst aparata ait imalat resmi



Şekil 6.19 Ara aparata ait imalat resmi

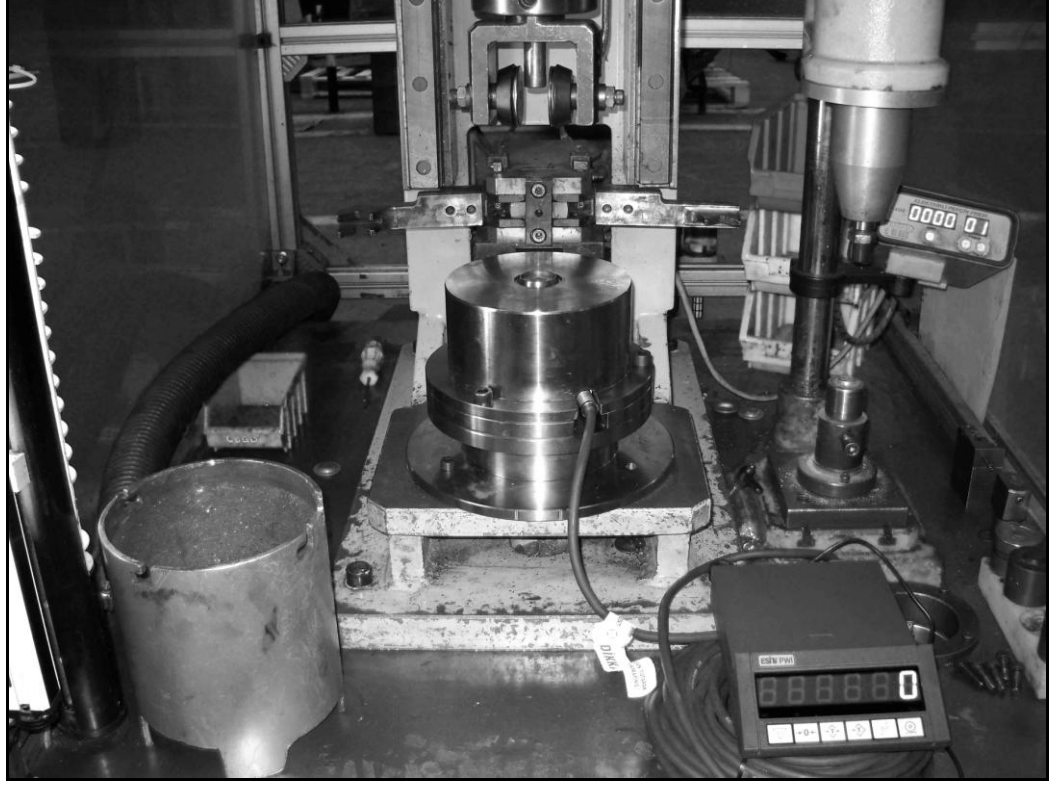


Şekil 6.20 Alt aparata ait imalat resmi



Şekil 6.21 Rijit silindire ait imalat resmi

İmal edilen aparat, tezgâh üzerine Şekil 6.22’de olduğu gibi yük hücresi ve indikatör ile bağlanarak test düzeneği tamamlanmıştır.



Şekil 6.22 Sıvama aparatı, yük hücresi ve indikatörün sıvama tezgâhına montajı

7. SIVAMA İŞLEMİ SONRASI OLUŞAN SIKIŞTIRMA KUVVETLERİNDE SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ SONUÇLARI İLE TEST SONUÇLARININ KARŞILAŞTIRILMASI

Sıvama simülasyonu uzayı oluşturulduktan sonra, tez kapsamında incelenmesi gereken parametreler değiştirilerek sıvama sonrası yatak bölgelerinde arta kalan kuvvetlerin saptanması amaçlanmıştır. Tezin bu bölümünde sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak **sıvama basıncının** ve **rölelerin dönme hızlarının** (tur sayılarının) değiştirilmesi ile plastik şekil verme sonrası yataklarda oluşan sıkıştırma kuvvetleri başarılı bir şekilde saptanmış ve deneeylerden elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılarak analiz algoritmasının doğruluğu ispatlanmaya çalışılmıştır. Tez kapsamında bu iki önemli parametre ayrıntılı olarak incelenmiştir.

Uygulamada, sıvama işlemi yapılırken sıvama tezgâhının elektronik kumanda paneline girilen sıvama basıncının nominal değeri (başka bir ifade ile o anda ulaşabileceği maksimum kuvvet) operatör tarafından doğrudan bilinmemektedir. Operatör istenilen sıvama basıncının belirli bir aralıkta girilmesini sağlar ve buna bağlı olarak tezgâh üzerinde elektronik kumanda paneli (Şekil 7.1), girilen aralık arasında basınç üretir. Görüldüğü gibi tez kapsamında ilk olarak test aşamasına geçilmiş ve parametrik olarak üretilen sıvama basıncı değerleri alınarak simülasyon ortamında kullanılmış ve değişen sıvama basıncının etkileri incelenmiştir.



Şekil 7.1 Sıvama tezgâhına ait elektronik kumanda paneli

7.1 Test Yöntemi ile Elde Edilen Veriler

Bölüm 6’da ayrıntılı olarak anlatılan sıvama işlemi deney düzeneği, ilgili parametre değişimlerini sağlayacak şekilde üretilerek kurulmuştur. Bazı deneylerde röle arasındaki mesafenin farklı olması sağlanarak, bu mesafenin sıkıştırma kuvvetine etkisinin olup olmadığı da araştırılmıştır.

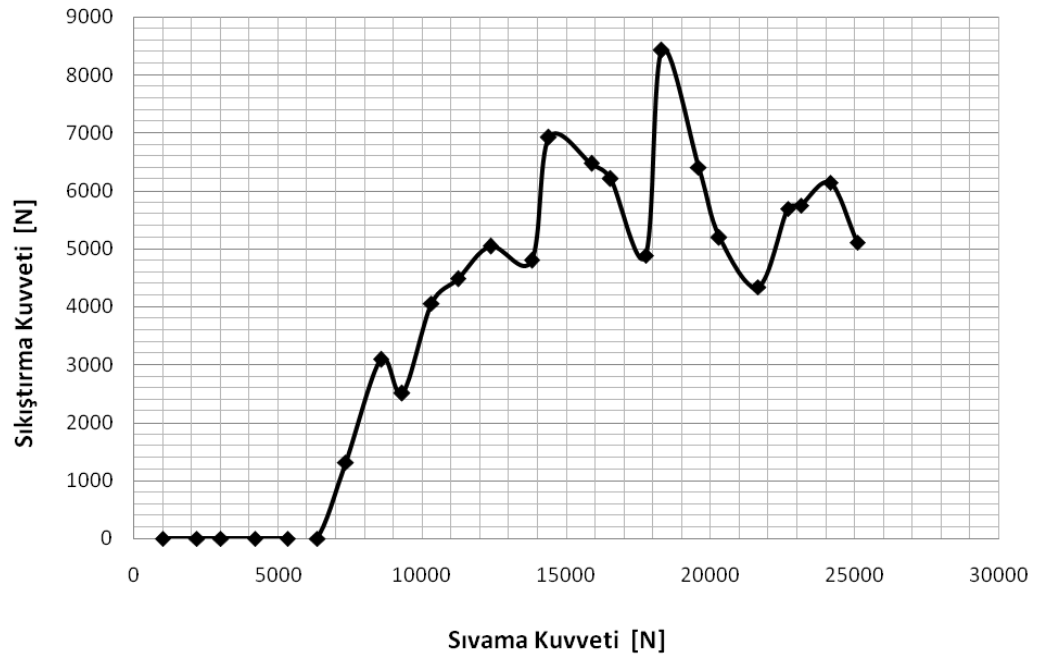
7.1.1 Sıvama basıncının değişiminin sıkıştırma kuvvetine etkisi

Sıvama basıncının sıkıştırma kuvvetlerine olan etkisi, tez kapsamında yapılan 4 farklı deneyde incelenmiştir. Bu deneylerin bazılarında röle arasındaki mesafe değiştirilmiş ve toplam sıvama sürelerinde de farklılıklar saptanmıştır. Toplam sıvama süresi, rölelerin başlangıç noktasından malafa üzerine gelmesi ve sıvama işleminin gerçekleşmesinden oluşmaktadır. Yapılan deneylerde sıvama basıncının sıkıştırma kuvvetlerine olan etkisine ilişkin veriler Çizelge 7.1 – 7.4 ve Şekil 7.2 - 7.5 ile gösterilmiştir.

Çizelge 7.1 Deney 1'e ait test verileri

Deney No: 1

	SIVAMA KUVVETLERİ			OKUNAN KUVVET	SÜRE		RÖLELER ARASI
	Min	Max	Uygulanan	Sıkıştırma	Sivama	Toplam	Mesafe
No	N	N	N	N	s	s	mm
1	500	1500	1000	0	1	5,34	24,3
2	1500	2500	2187	0	1	5,78	24,3
3	2500	3500	3000	0	1	6,32	24,3
4	3500	4500	4191	0	1	6,844	24,3
5	4500	5500	5326	0	1	6,24	24,3
6	5500	6500	6352	0	1	6,316	24,3
7	6500	7500	7337	1314,54	1	6,126	24,3
8	7500	8500	8557	3090,15	1	5,76	24,3
9	8500	9500	9296	2511,36	1	6,02	24,3
10	9500	10500	10322	4061,34	1	5,721	24,3
11	10500	11500	11239	4483,17	1	5,831	24,3
12	11500	12500	12365	5042,34	1	5,74	24,3
13	12500	13500	13794	4797,09	1	5,74	24,3
14	13500	14500	14383	6925,86	1	5,54	24,3
15	14500	15500	15864	6474,6	1	5,274	24,3
16	15500	16500	16528	6209,73	1	5,407	24,3
17	16500	17500	17748	4885,38	1	5,205	24,3
18	17500	18500	18297	8426,79	1	5,335	24,3
19	18500	19500	19586	6405,93	1	5,114	24,3
20	19000	21000	20299	5199,3	1	5,31	24,3
21	20000	22000	21643	4336,02	1	4,99	24,3
22	21000	23000	22686	5689,8	1	4,914	24,3
23	22000	24000	23136	5748,66	1	4,883	24,3
24	23000	25000	24147	6141,06	1	4,915	24,3
25	24000	26000	25093	5111,01	1	5,224	24,3

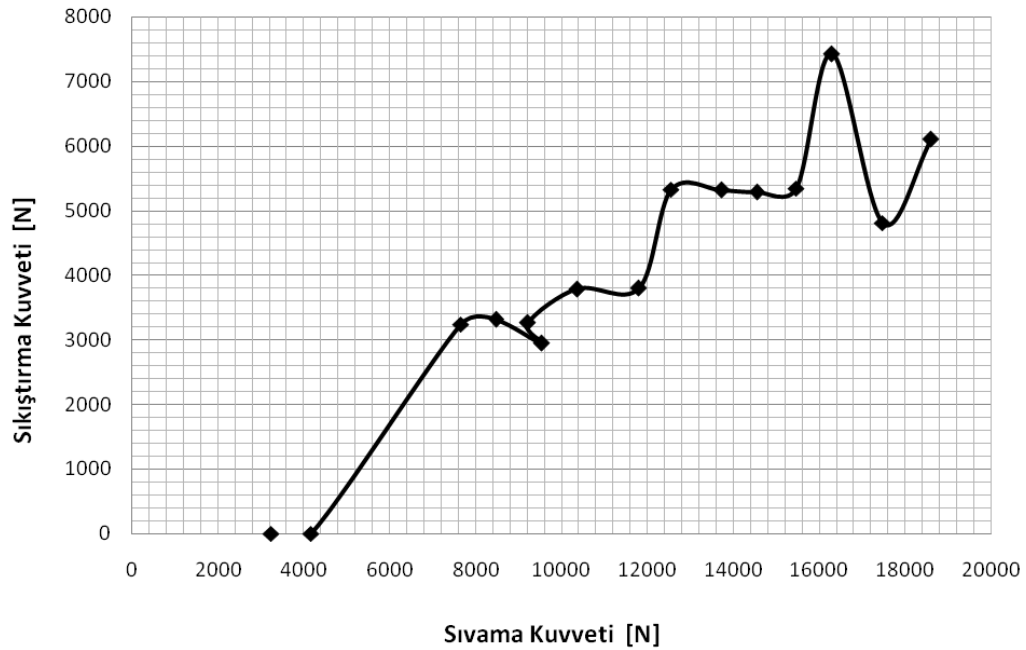


Şekil 7.2 Deney 1'e ait sıkıştırma kuvvetindeki değişim

Çizelge 7.2 Deney 2'e ait test verileri

Deney No: 2

No	SIVAMA KUVVETLERİ			OKUNAN KUVVET	SÜRE		RÖLELER ARASI
	Min	Max	Uygulanan	Sıkıştırma	Sivama	Toplam	Mesafe
	N	N	N	N	s	s	mm
26	2000	4000	3242	0	1	5,721	24,3
27	3000	5000	4161	0	1	5,689	24,3
28	6000	8000	7653	3237,3	1	6,364	24,3
29	7000	9000	8475	3315,78	1	6,098	24,3
30	8000	10000	9538	2943	1	6,052	24,3
31	8300	10500	9210	3266,73	1	5,903	24,3
32	9000	11000	10364	3786,66	1	5,88	24,3
34	10000	12000	11793	3796,47	1	5,879	24,3
35	11000	13000	12548	5326,83	1	5,905	24,3
36	12000	14000	13723	5317,02	1	5,94	24,3
37	13000	15000	14544	5287,59	1	5,662	24,3
38	14000	16000	15460	5346,45	1	5,41	24,3
39	15000	17000	16289	7426,17	1	5,529	24,3
40	16000	18000	17476	4806,9	1	5,42	24,3
41	17000	19000	18601	6101,82	1	5,22	24,3

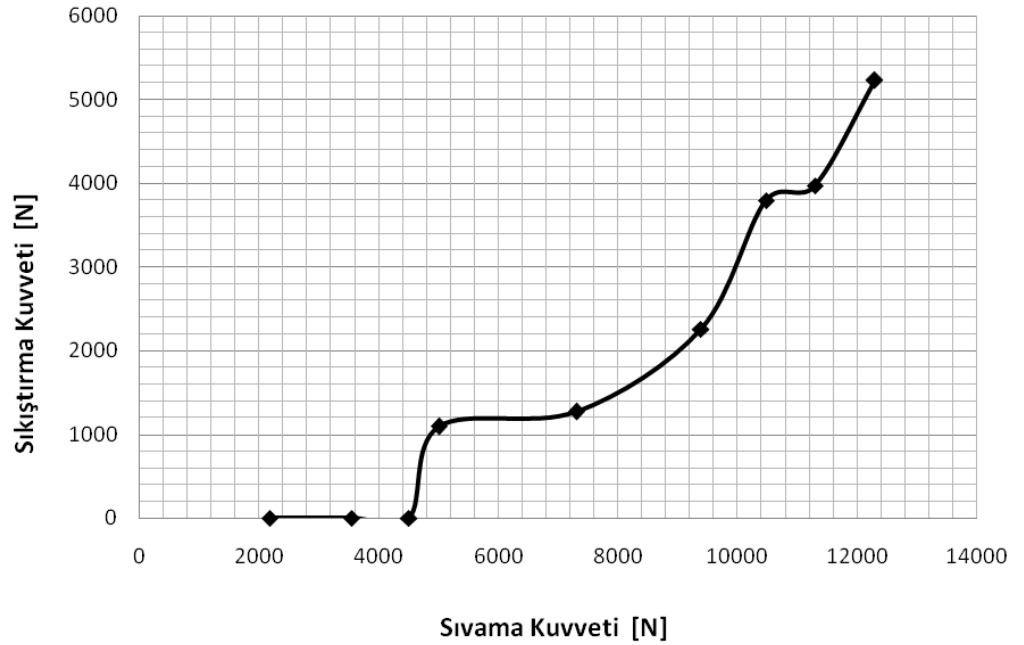


Şekil 7.3 Deney 2'e ait sıkıştırma kuvvetindeki değişim

Çizelge 7.3 Deney 3'e ait test verileri

Deney No: 3

SIVAMA KUVVETLERİ			OKUNAN KUVVET	SÜRE	RÖLELER ARASI
Min	Max	Uygulanan	Sıkıştırma	Sivama	Mesafe
N	N	N	N	s	mm
2000	3000	2172	0	1	24,2
3000	4000	3542	0	1	24,2
4000	5000	4500	0	1	24,2
5000	8000	5000	1098,72	1	24,2
7000	9000	7300	1275,3	1	24,2
8300	10500	9379	2256,3	1	24,2
9000	11000	10470	3796,47	1	24,2
10000	12000	11290	3973,05	1	24,2
11000	13000	12286	5228,73	1	24,2

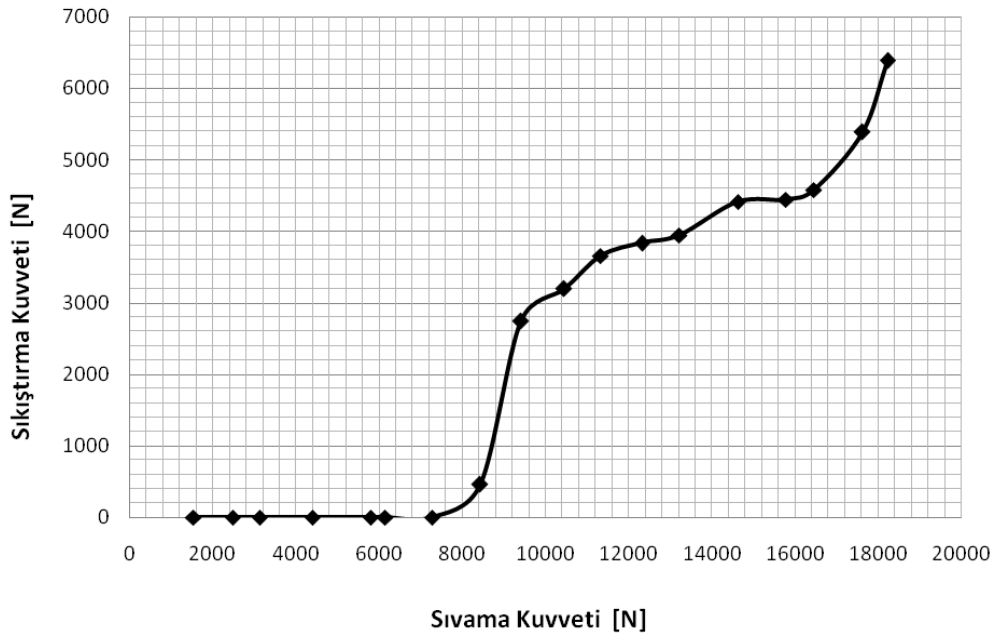


Şekil 7.4 Deney 3'e ait sıkıştırma kuvvetindeki değişim

Çizelge 7.4 Deney 4'e ait test verileri

Deney No: 4

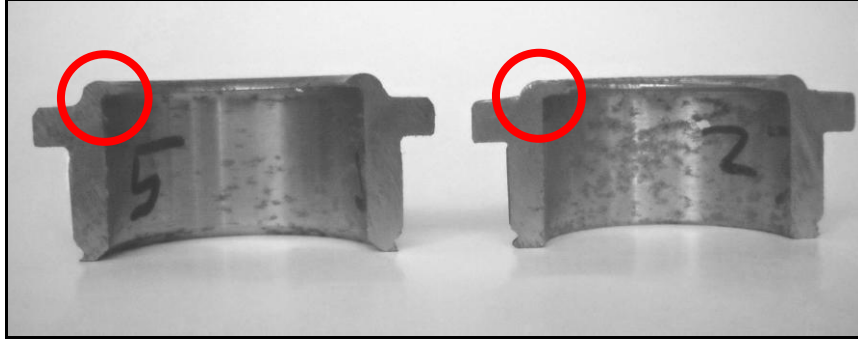
SIVAMA KUVVETLERİ			OKUNAN KUVVET	SÜRE		RÖLELER ARASI
Min	Max	Uygulanan	Sıkıştırma	Sivama	Toplam	Mesafe
N	N	N	N	s	s	mm
1000	2000	1523	0	1	4,234	24,5
2000	3000	2478	0	1	5,744	24,5
3000	4000	3125	0	1	4,952	24,5
4000	5000	4395	0	1	5,124	24,5
5000	6000	5789	0	1	3,987	24,5
6000	7000	6145	0	1	4,143	24,5
7000	8000	7263	0	1	3,559	24,5
8000	9000	8416	461,1	1	5,451	24,5
9000	10000	9405	2747	1	5,021	24,5
10000	11000	10444	3198	1	4,995	24,5
11000	12000	11328	3659	1	5,017	24,5
12000	13000	12323	3836	1	5,363	24,5
13000	14000	13209	3944	1	4,444	24,5
14000	15000	14630	4415	1	4,915	24,5
15000	16000	15773	4444	1	5,157	24,5
16000	17000	16456	4581	1	4,892	24,5
17000	18000	17616	5386	1	4,933	24,5
18000	19000	18223	6386	1	4,472	24,5



Şekil 7.5 Deney 4'e ait sıkıştırma kuvvetindeki değişim

Çizelge 7.1 – 7.4 ve Şekil 7.2 – 7.5’de görüldüğü gibi, sıvama sonrası oluşan sıkıştırma kuvveti plastik şekil değişiminin yüksek olduğu rotıl gövdesinin uç kısımlarında giderek artmaktadır. Şekil değişiminin daha az olduğu (5500 N’un altında) sıvama kuvvetlerinde, sıkıştırma kuvvetleri oluşmamaktadır. Rotil gövdelerinde POM malzeme ile kapakçık arasında sıvama sonrası oluşan sıkıştırma kuvvetinin dış kuvvetler arttığında arttığı gözlemlenmiştir. Bu artış doğrusal değildir ve yüksek kuvvetlerde dalgalanmalar meydana gelmektedir. Diğer bir ifade ile daha küçük sıvama kuvvetlerinde yüksek çıkabilen sıkıştırma kuvvetleri tespit edilmiştir. Bunun en önemli sebebi, rotıl bölgesinin uzayda serbestlik derecesini sıfırlayan kesit uzunluğunun değişmesidir. Bu uzunluğun büyük olduğu değerlerde sıkıştırma kuvvetleri küçük, uzunluğun çok küçük olduğu değerlerde (3,93 mm’den küçük olmamak şartı ile) sıkıştırma kuvvetleri aşırı şekilde büyük çıkmaktadır. Kesitin farklılaşması ise tamamen üretimden oluşan hatalardan kaynaklanmaktadır. Bu nedenle 1. ve 2. deneylerde oluşan dalgalanmaları elimine etmek için, rotıl kesitleri birbirine yakın değerlerde olan numuneler teste alınmış ve 3. ile 4. deneylerde dalgalanmaların önüne belli bir oranda geçilmiştir. Sıvama işleminde sıvama basıncının artması ile sıkıştırma kuvvetlerinin doğrusal olmadan arttığı da çok açık bir şekilde (Şekil 7.4 – 7.5) gözlemlenmiştir.

Farklı sıvama basınçları uygulanmış en kesitler Şekil 7.6’da gösterildiği gibidir. Sol taraftaki rotıl 5326 N kuvvet altında sıvanırken, sağ taraftaki rotıl ise 23136 N kuvvet altında sıvama işlemine tâbi tutulmuştur. Sıvama tezgâhı basınç kontrollü olarak çalışmakta ve parça en kesitlerinden de gözlemlendiği gibi, sıvama basıncının yüksek olduğu değerlerde rotıl bölgeleri daha fazla plastik deformasyona uğramaktadır. Sıvama sonrası iki rotıl arasındaki yükseklik farkı bunun bir nevi kanıtıdır.



Şekil 7.6 Sıvama kuvvetlerinin değişimi ile rotillerde oluşan sıvama farklılıkları

7.1.2 Röle hızlarındaki değişimin sıkıştırma kuvvetine etkisi

Tezin başlangıç aşamasında sıvama tezgâhı üzerindeki elektronik kumanda panelinin tüm sıvama parametrelerini kontrol ettiği düşünülmüştü. Fakat tezgâh üreticisi MDK Makina Firması ile görüşülüp tezgâh hakkında ayrıntılı bilgi alındığında, bazı parametrelerin opsiyonel olmadığı anlaşılmıştır.

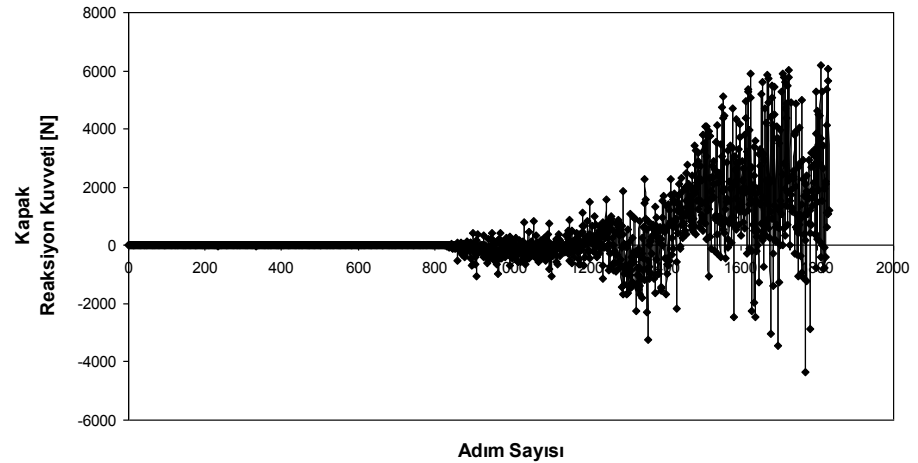
Sıvama tezgâhı üzerindeki rölelerin, tezgâh arkasındaki 1000 devir/dakika kapasiteli elektrik motorundan iletilen hızın, dişli çarklar vasıtası ile düşürülerek 490 devir/dakika hızda dönmesi sağlanmaktadır. Tur sayısı elektronik panel vasıtası ile değiştirilememektedir. Dolayısıyla mevcut tur sayısının değiştirilmesi için iki farklı seçenek ortaya çıkmıştır. İlk olarak, sıvama tezgâhı üzerine “**faz değiştirici**” takarak motor devir sayısında değişime gitmek veya sıvama tezgâhının dişli mekanizmasında hesaplamalar yaparak tur sayısını değiştirmek. Her iki seçenek de sıvama tezgâhındaki mevcut sistemin değişikliğine dayandığı ve dolayısıyla ilgili firmanın üretimini aksatacağı öngörüldüğünden “röle hızlarındaki değişimin sıkıştırma kuvvetlerine etkisi” test bölümünde incelenememiş ve sadece sonlu elemanlar yöntemi ile yaklaşımlar yapılmak zorunda kalınmıştır. Fakat çekme – basma deneylerinde farklı birim şekil değiştirme hızlarının malzemenin gerilme değerlerini etkilemediği, dolayısıyla bunun sıkıştırma kuvvetlerine olan etkisinin çok sınırlı olacağı sonucuna varılmıştır.

7.2 Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Elde Edilen Veriler

Sıvama işleminde dört farklı test yapıldıktan sonra, sıvama tezgâhından alınan anlık sıvama kuvvetlerinin sonlu elemanlar yönteminde sınır koşulu olarak kullanılması hedeflenmiştir. Lakin üzerinde çalışılan analizin doğrusal olmaması ve her bir analizin yüksek konfigürasyondaki bilgisayarlarda dahi bir hafta sürmesi incelemeleri zorlaştırmıştır. Bu nedenle sıvama simülasyonunda, kuvvetler ara değerler (örnek olarak 8000 N ile 9000 N arasında 8500 N kuvvet değeri gibi) alınıp sınır koşulu olarak kabul edilerek elde edilen eğrilerin karşılaştırılması sağlanmıştır.

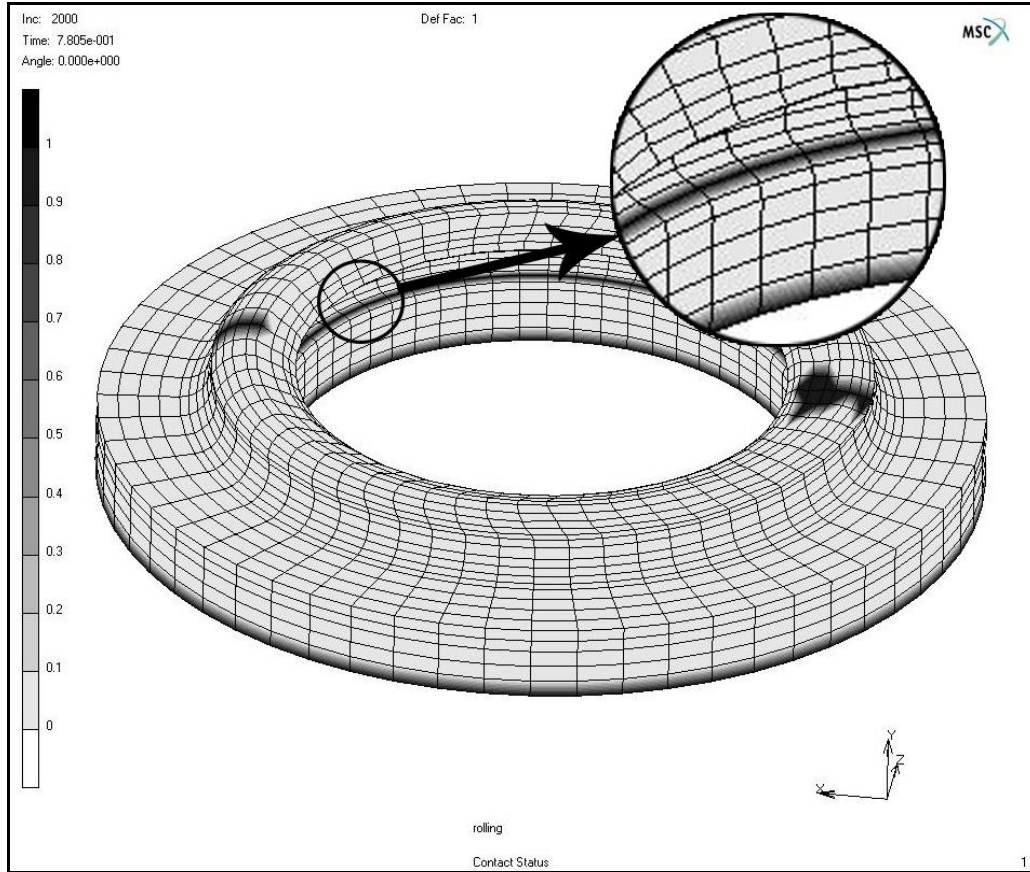
7.2.1 Sıvama basıncındaki değişimin sıkıştırma kuvvetlerine etkisi

Sıvama simülasyonuna başlandığında, oluşturulan sistemde sonlu elemanlar yöntemi ile yaklaşım yapılırken, sıkıştırma kuvvetinin tespit edilmesinde kapakçıktan gelen reaksiyon kuvvetinin ölçülmesi hedeflenmiştir. Fakat doğrusal olmayan bu analiz tipinde, kapakçıktan gelen reaksiyon kuvveti aşırı derecede kaotik sonuçlar vermektedir (Şekil 7.7). Sıkıştırma kuvvetinin bazen artı bir sonraki adımda eksi kuvvet vermesi fiziksel açıdan çelişki oluşturmuştur. Bu nedenle işlem sonrası safhada sıkıştırma kuvvetinin tespitinde farklı bir yol izlenmiştir.



Şekil 7.7 Sıvama işlemi esnasında kapakçığın Z ekseninde oluşan reaksiyon kuvvetleri

Sıvama işleminin bitiminin hemen ardından plastik şekil değişimine uğrayan rotil bölgesinde, kapakçık üzerine iletilen kuvvetler nedeniyle kapak ile rotil iç yüzeyi arasında temas bölgeleri oluşmaktadır (Şekil 7.8). Yazılımın sunduğu seçeneklerden biri olan temas bölgelerinde temas yüzeyine dik olan kuvvetlerin toplamı sağlanarak kapakçık üzerine gelen sıkıştırma kuvvetleri hesaplanabilmektedir. Fakat temasa giren 60 düğüm noktasının üzerinden teker teker değer okumak ve farklı parametreler için bu işlemi tekrarlamak çok zaman almaktadır. MSC Superform yazılımının sunduğu “**procedure**” seçeneği kullanılarak bir makro yazılmış ve böylelikle farklı parametrelerin kullanıldığı analizlerde bu değerler kolaylıkla belirlenmiştir.



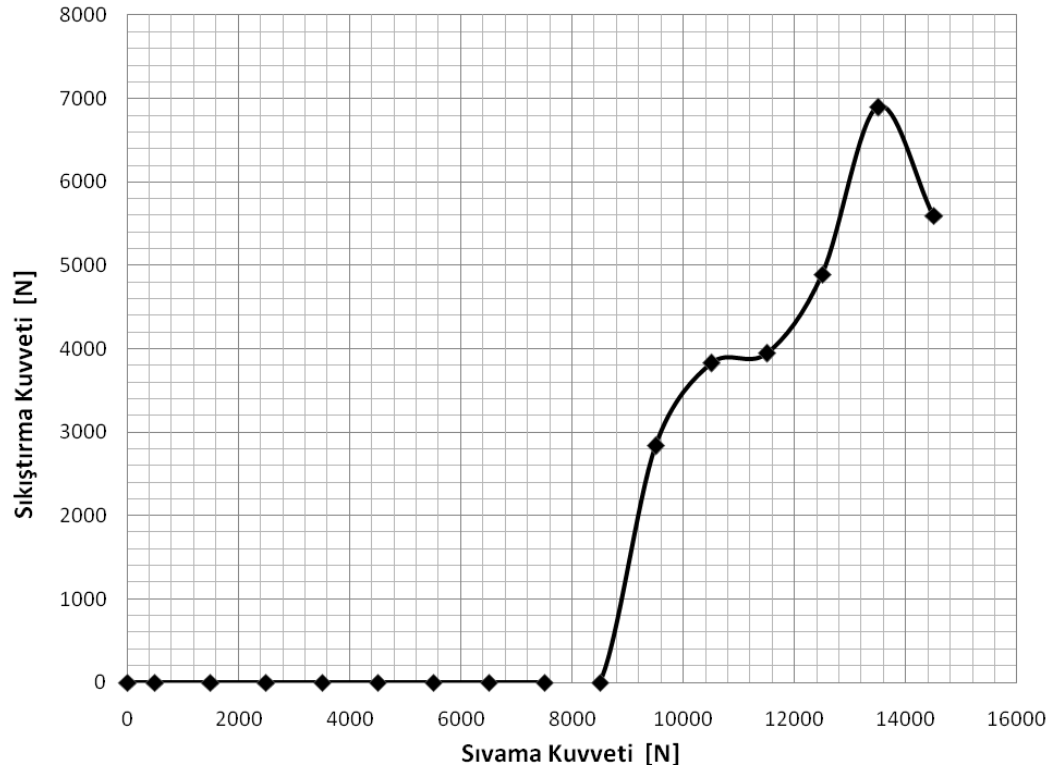
Şekil 7.8 Sıvama işlemi ve sonrasında rotil kapakçığının rotil gövdesinde temas ettiği bölgeler

Analiz tipinin doğrusal olmaması ve elemanların aşırı şekilde deformasyona uğraması nedeniyle kuvvetlerin aşırı olarak yükseldiği değerlerde analizler başarılı bir şekilde sonuçlanmamıştır (Çizelge 7.5). Analizlerde şekil değişimi **“adaptive plastic strain”** (plastik şekil değişimine girdikten sonra çözüm adım sayısının bilgisayar algoritması tarafından belirlenmesini sağlayan opsiyon) olarak seçilmesine rağmen hedeflenen şekilde bitirilememiştir. Ayrıca “adaptive plastic strain” seçeneğinin kullanımında, adım sayısı ile süre orantılı olduğundan yüksek kuvvet değerlerindeki analizlerin süresi beklenenden uzun olmaktadır. Sıvama kuvveti ile sıkıştırma kuvveti arasındaki ilişki Çizelge 7.5 ve Şekil 7.9’da ayrıntılı olarak gösterilmiştir.

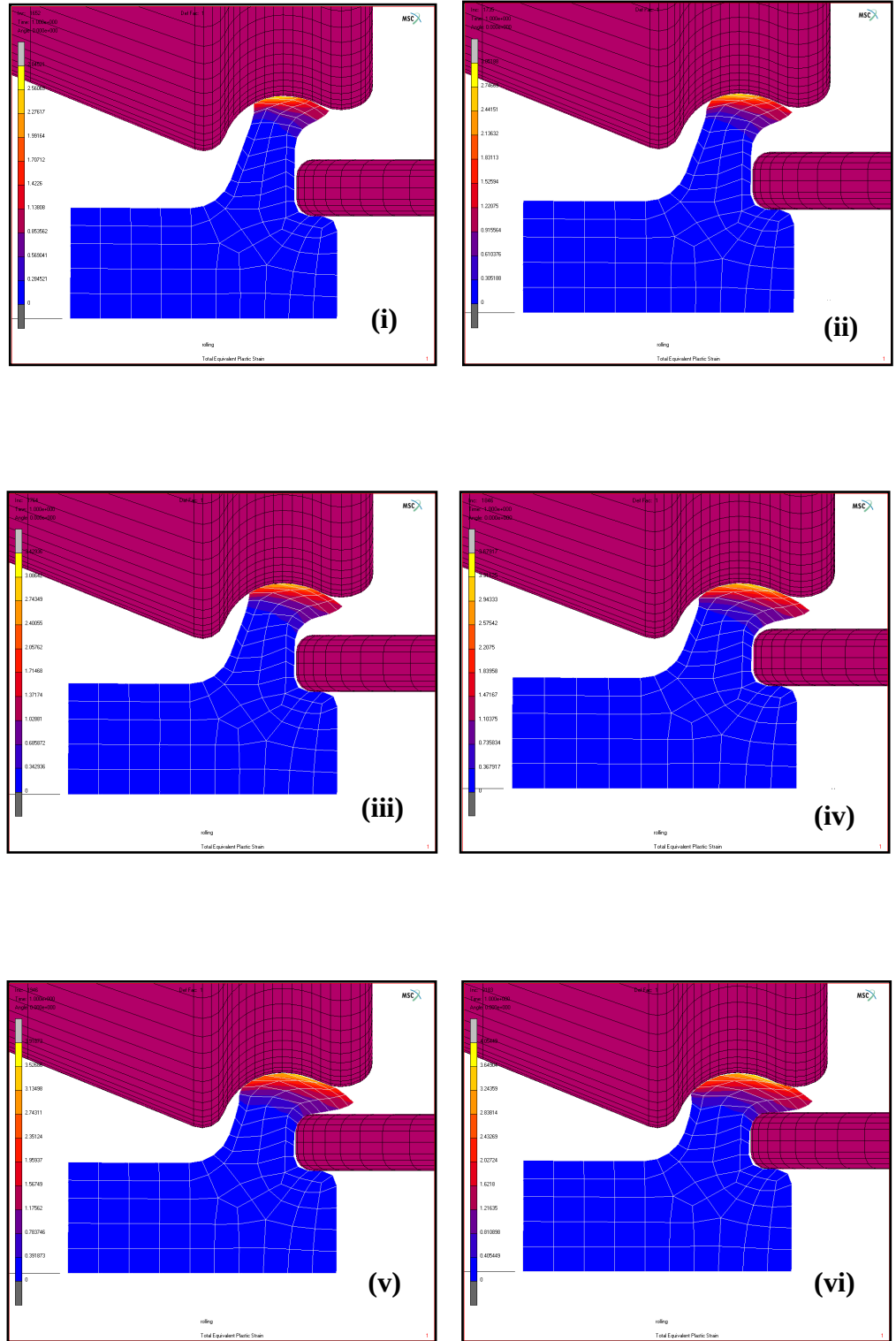
Sıvama basıncının değişimi ile rotil bölgesindeki şekillendirmenin kesit görünümdeki değişimler Şekil 7.10’da verilmiştir. Sıvama basıncının yüksek olduğu durumlarda malzeme gittikçe ezilmekte ve dolayısıyla 12500 N’u aşan kuvvetlerde analizler başarılı bir şekilde bitirilememektedir.

Çizelge 7.5 Sıvama analizinde sıvama kuvvetinin sıkıştırma kuvvetine olan etkisi

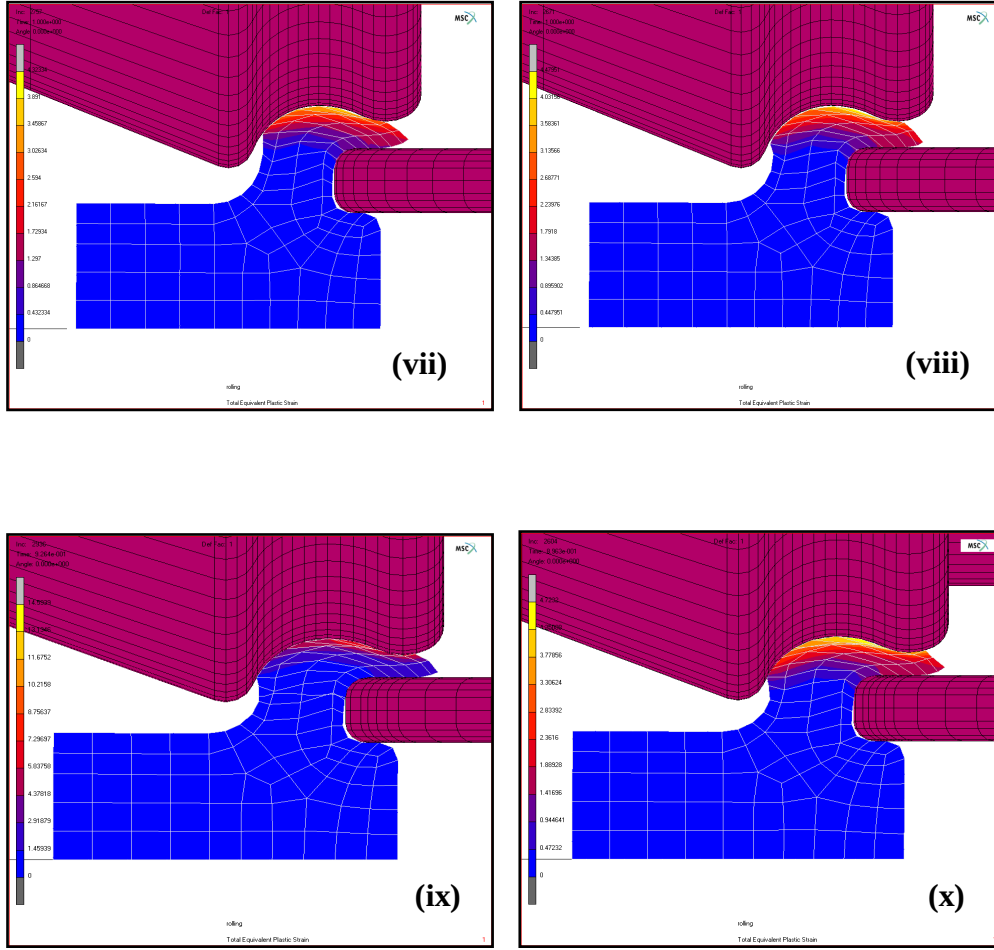
Sıvama Kuvveti [N]	Sıkıştırma Kuvveti [N]	Analiz Başarı Durumu
0	0	% 100
500	0	% 100
1500	0	% 100
2500	0	% 100
3500	0	% 100
4500	0	% 100
5500	0	% 100
6500	0	% 100
7500	0	% 100
8500	0	% 100
9500	2833,83987	% 100
10500	3825,6354	% 100
11500	3946,8889	% 100
12500	4892,1678	% 100
13500	6895,673	% 92,6
14500	5594,94671	% 89,6



Şekil 7.9 Sıvama kuvvetinin sıkıştırma kuvvetine olan etkisi



Şekil 7.10 (a) Sıvama işleminde kuvvet değişimi ile rotilin aldığı formlar
(i) 5500 N **(ii)** 6500 N **(iii)** 7500 N **(iv)** 8500 N **(v)** 9500 N **(vi)** 10500 N



Şekil 7.10 (b) Sıvama işleminde kuvvet değişimi ile rotinin aldığı formlar

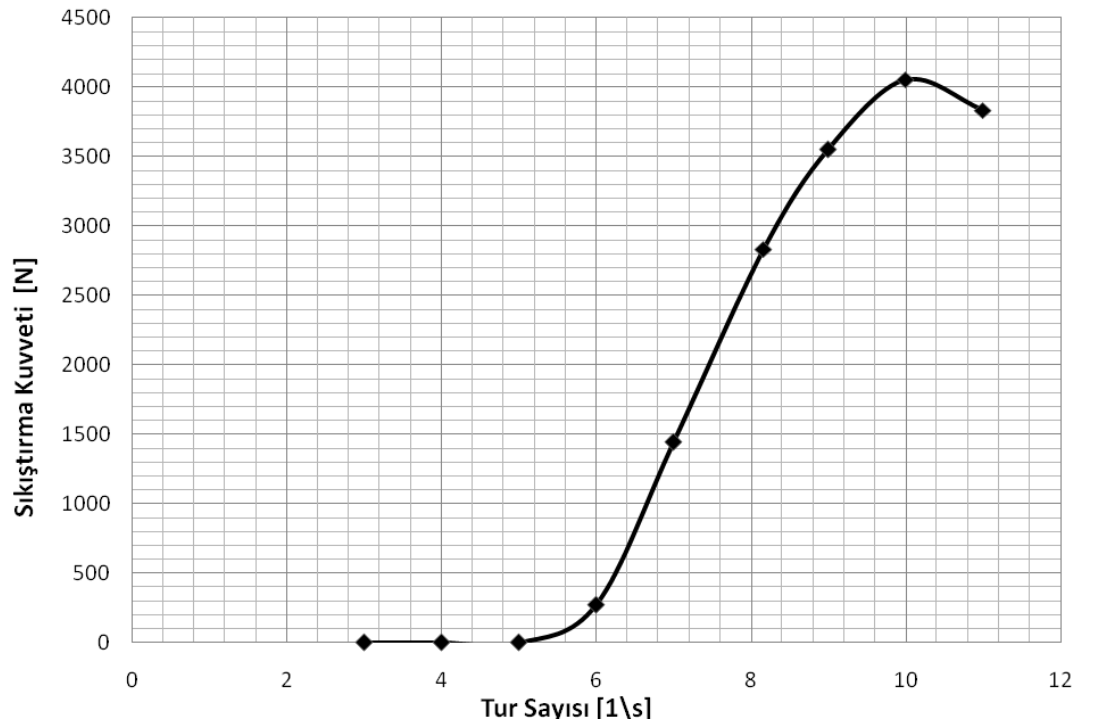
(vii) 11500 N **(viii)** 12500 N **(ix)** 13500 **(x)** 14500 N

7.2.2 Röle hızlarındaki değişimin sıkıştırma kuvvetlerine etkisi

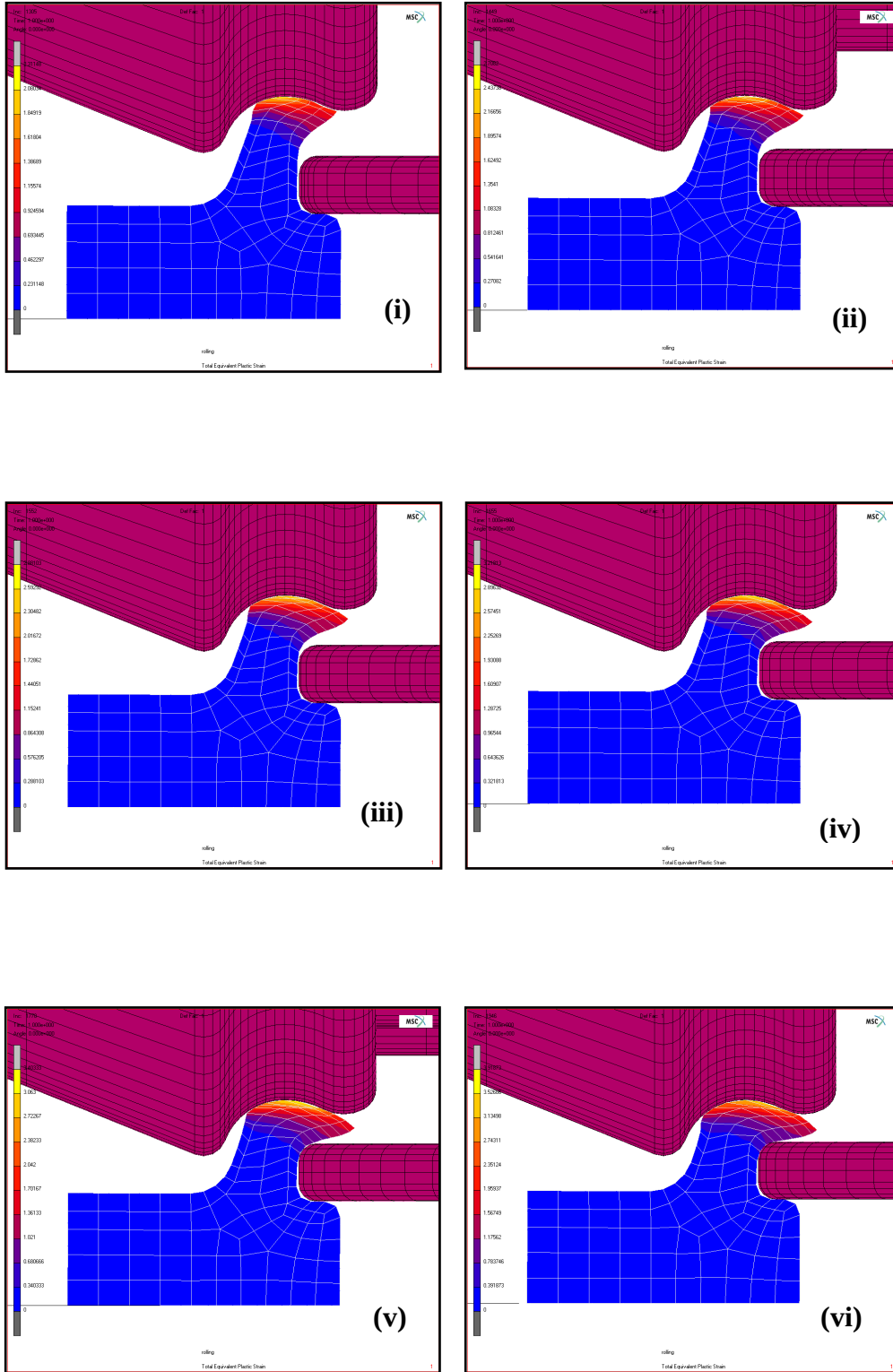
Önceki bölümlerde açıklandığı gibi deney aşamasında röle hızları değiştirilemediğinden sadece sonlu elemanlar yöntemi ile röle hızları değiştirilerek sıkıştırma kuvvetleri incelenmiştir. Röle hızının veya tur sayılarındaki değişimin sıkıştırma kuvvetine olan etkisi Çizelge 7.6 ve Şekil 7.11’de gösterilmiştir. Ayrıca tur sayısının değişimi ile rotinin sıvanan bölgesindeki kesit değişimi Şekil 7.12’de ayrıntılı olarak verilmektedir.

Çizelge 7.6 Sıvama analizinde tur sayısının sıkıştırma kuvvetine olan etkisi

Tur Sayısı [1/s]	Sıkıştırma Kuvveti [N]	Analiz Başarı Durumu
3	0	% 100
4	0	% 100
5	0	% 100
6	274,537	% 100
7	1446,529	% 100
8,16	2833,83987	% 100
9	3553,276	% 100
10	4053,593	% 100
11	3833,3674	% 100

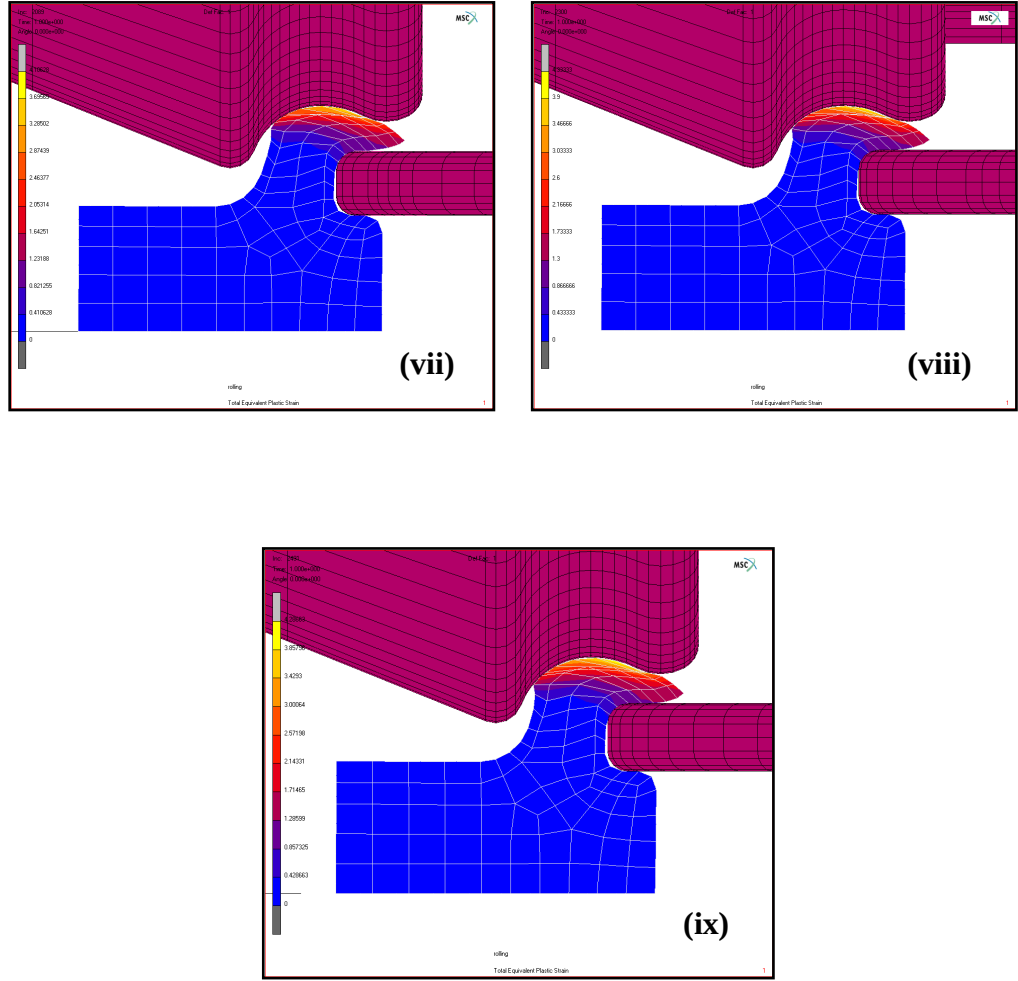


Şekil 7.11 Sıvama işleminde tur sayısının sıkıştırma kuvvetine olan etkisi



Şekil 7.12 (a) Sıvama işlemi sonrası tur sayısı değişimi ile rotilde oluşan formlar

(i) 3 tur/s (ii) 4 tur/s (iii) 5 tur/s (iv) 6 tur/s (v) 7 tur/s (vi) 8.16 tur/s

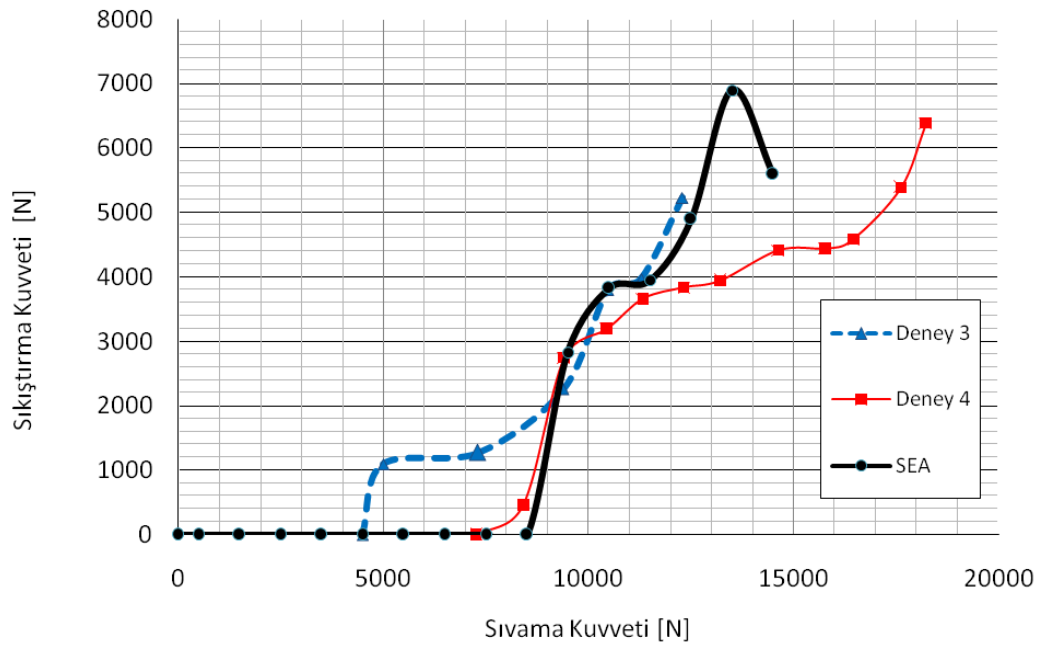


Şekil 7.12 (b) Sıvama işlemi sonrası tur sayısı değişimi ile rotilde oluşan formlar

(vii) 9 tur/s (viii) 10 tur/s (ix) 11 tur/s

7.3 Sonuçların Karşılaştırılması

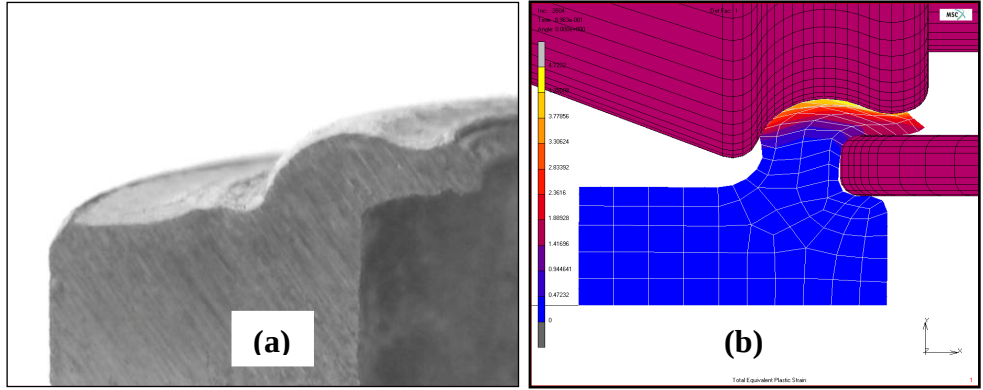
Belirli aralıklarla yapılan iki deneye ait sonuçlar ve sonlu elemanlar yönteminden elde edilen verilerin değişimleri Şekil 7.13’de gösterilmiştir. Deney verilerinden de gözlemlendiği gibi sıvama işleminde sıkıştırma kuvvetinin oluşması için en az 7500 N değerinde bir kuvvet ile sıvama yapılmalıdır. Sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilen verilerde ise bu değer 8500 N’a çıkmaktadır.



Şekil 7.13 Deney sonuçları ile sonlu elemanlar analiz sonuçlarının karşılaştırılması

DeneySEL verilerde 18000 N’a kadar düzgün bir şekilde sıvama işlemi yapılabilmektedir. 18000 N değeri aşılmaya başlandığında, röleler aşırı sürtünmeden dolayı istenilen moment değerlerini karşılayamamakta ve sıvama işlemi tur sayısı hedeflenen değerlere ulaşılmadan başarısız bir şekilde sonlanmaktadır. Buradaki sıvama basıncının çok yüksek değerlerde olması, rölelerin rotül bölgesinde sıvanması istenmeyen bölgeler ile etkileşime girmesine neden olmaktadır. Şekil 7.14 (a)’da 23136 N gibi aşırı yüksek değerlerde sıvama

işlemi yapmanın gereksiz olduğu gözlemlenmektedir. Analizde ise deneydeki verilerden farklı olarak sıvama işlemi 12500 N değerinden sonra başarılı bir şekilde sonuçlanamamıştır. Yani sıvama işleminde yüksek kuvvet değerlerinde malzeme yapısındaki aşırı deformasyon nedeniyle işlem başarılı bir şekilde bitirilememektedir. Sıvama simülasyonunda 14500 N kuvvet altında işlem başarısız bir şekilde yarıda kalmış ve ilgili rotül kesiti Şekil 7.14 (b)'de ayrıntılı olarak gösterilmiştir.



Şekil 7.14 Başarılı şekilde sonuçlanamayan sıvama işlemleri

(a) 23136 N’da başarısız olarak gerçekleşen sıvama işlemi sonrası alınan kesit

(b) 14500 N’da başarısız şekilde sonuçlanan simülasyondan alınan kesit

8. SONUÇLAR, YORUMLAR ve TARTIŞMALAR

Bu çalışma kapsamında incelenen rotillerdeki sıvama parametrelerinin yani sıvama basıncı (kuvveti) ve röle hızlarındaki değişimin küresel yataklardaki sıkıştırma kuvvetlerine olan etkisi ayrıntılı bir şekilde araştırılmıştır.

Deneysel olarak incelenen bölümde, sıvama işlemi sonrası sıkıştırma sağlanabilmesi için uygulanması gereken nominal kuvvet miktarının gerektiği belirli bir değerin (7500 N) altında olmaması anlaşılmıştır. Bu değerden sonra doğrusal olarak artırılan sıvama basıncına karşılık, sıkıştırma kuvvetlerindeki artış doğrusal şekilde olmamaktadır. Özellikle birinci ve ikinci deney sonuçlarında elde edilen kuvvet dalgalanmaları, bağıl olarak rotili tutan kesit kalınlığının değişiminden kaynaklanmaktadır. Deneysel düzeneğin yapısal tasarımında rotil kesitinin her yerde sabit olacağı düşünülmüş, fakat rotil üretiminden kaynaklanan hatalar kesit boyutunu değiştirdiğinden, birinci ve ikinci deneylerde sıkıştırma kuvvetlerinde dalgalanmalara oluşmuştur. Bu dalgalamanın diğer bir sebebi ise plastik şekil değiştirmedeki doğrusal olmayan davranışlardır. Rotil kesitindeki farklılıkları sıvama basıncına etkisini azaltabilmek için, üçüncü ve dördüncü deneylerde özdeş rotil kesitleri seçilmeye çalışılarak sadece sıvama kuvvetinin etkisinin irdelenmesi hedeflenmiştir. Bu çalışma sonrası üçüncü ve dördüncü deneylerde elde edilen veriler ise doğrusal olmamakla beraber düzgün bir artış göstermektedir. Şayet rotil üzerindeki üretim hataları tamamen yok edildiğinde sıkıştırma kuvvetinin değişim eğrisi daha düzgün bir şekilde elde edilebilirdi.

Deneysel bölümde sıvama işlemi yapılırken basıncın çok yüksek değerlere örneğin 18000 N'dan yüksek değerlere çıkması, sıvama işleminin durmasına neden olmaktadır. Yüksek basınç değerlerinde sürtünme katsayısı arttığından röleler nominal tur sayısını tamamlayamadan sıvama işlemi durmaktadır. Bu nedenle mevcut olarak kullanılan sıvama basıncı, sıkıştırma kuvvetinin oluşturulması için üretim aşamasındaki anlamı daha belirgin olarak gözlemlenmiştir.

Sıvama analizinin başlangıç aşamalarında MSC MARC programı kullanılarak rotül gövdesine plastik şekil verilmesi hedeflenmiştir. MSC MARC programının doğrusal olmayan implicit analizlerde başarılı olması göz önüne alınarak, analizin uzayı oluşturulduğunda iyi sonuçlar alınması hedeflenmiştir. Fakat MARC programında istenilen parametreler oluşturulduktan sonra, çeşitli iterasyonların ardından plastik şekil vermede hedeflenen form sağlanamadığından dolayı simülasyon programında farklı bir çıkış noktası bulma yoluna gidilmiştir. MARC programında oluşturulan sıvama uzayı ve parametrik değerler ile dosyada format değişimi sağlanarak MSC Superform 2005 programına geçiş yapılmış ve birkaç iterasyon sonrası istenilen form sağlanmıştır. Yapılan bu çalışma sonrasında şekillendirme işlemlerinin form verme üzerinde uzmanlaşmış yazılımlar ile yapılmasının uygun olduğu sonucuna varılmıştır.

Sıvama simülasyonunda malzeme modeli olarak “parçalı doğrusal” (piecewise linear) malzeme modeli kullanılmış, fakat birçok sınırlama ile karşılaşmıştır. Parçalı doğrusal malzeme modelinde girilen elastisite modülü ile plastik deformasyon eğrisi birleştirilerek belirli sayıda veri vasıtasıyla malzemenin gerilme altında hareketinin davranışı gözlemlenir. Fakat birçok programda olduğu gibi parçalı doğrusal malzeme modelinde de çekme ve basma eğrilerinin bağımsız olarak girilememesi, herhangi bir eğrinin orijine göre simetrisi alınarak malzeme davranışının kabulü nedeniyle, aynı anda çekme ve basma gerilmelerini kapsayan analizlerde belirli hatalar ortaya çıkmaktadır. Sıvama analizlerinde yüksek oranda basma ve az da olsa çekme gerilmeleri içerdiğinden, analiz sonuçlarının az da olsa hata içerdiği varsayılmaktadır. Sıvama simülasyonunda malzeme modeli oluşturulurken gerçek gerilme – birim şekil değiştirme eğrilerinin elde edilmesi için basma ve çekme testleri yapılmış, elde edilen çekme ve basma akma gerilmeleri arasında yaklaşık 100 MPa değerinde fark olduğu saptanmıştır. Çalışmanın ilk safhalarında şekillendirmenin 35000 N değerlerinde olması, akma değerlerinin farklı olmasının önemini yeterince göstermektedir.

Ayrıca malzemenin modellemesi aşamasında rotil üzerinden alınan test numuneleri ile basma deneyleri yapılmış, fakat numunelerin çok küçük olması test cihazında ekstansiyometre kullanılamamasına sebep olmuştur. Gerçek gerilme – birim şekil değiştirme değerlerinin dönüşümü yapıldığında test numunelerinin elastisite modüllerinin 15000 ile 30000 MPa değerleri arasında olduğu saptanmıştır. C15 E malzemesinin elastisite modülü 210000 MPa’dır ve ayrıca basma deneyi sonrası test numunelerinin burkulma modları incelendiğinde test verilerinin uygun olmadığına karar verilmiştir. Test numuneleri uç yüzeylerinde oluşan kayma gerilmesini engellemek için tekrar tasarlanmış ve hedeflenen burkulma modlarına yaklaşım yapılabilmektedir. Yeniden tasarlanan test numuneleri dövülmüş C15 E malzemeden imal edilmiştir. Böylece basma ve çekme testleri yapılırken test cihazındaki ekstansiyometre kullanılabilmiş ve gerçek gerilme – birim şekil değiştirme eğrilerinin dönüşümü yapıldıktan sonra malzemenin elastisite modülünün 195000 MPa değerlerinde olduğu saptanmıştır. Gerekli dönüşümler sonrasında uygun bir gerilme – birim şekil değiştirme eğrisi ortaya çıkmıştır. Deneyler sonrası ekstansiyometre kullanılarak elde edilen test verilerinin ekstansiyometre kullanılmadan elde edilen verilerden daha sağlıklı olduğu çok açık bir şekilde ispatlanmıştır.

Malzeme modelinin hazırlanmasının başlangıç aşamasında, simülasyonda çok yüksek kuvvetlerde (35000 N) istenilen şekil değişiminin sağlanması farklı sorunlar ortaya çıkarmıştır. Uygulamada sıvama işleminin 1 saniye gibi kısa bir sürede gerçekleşmesi, malzemede birim şekil değiştirme hızının etkili olup olmadığı sorusunu ortaya çıkarmıştır. Yapılan çekme ve basma testlerinde birim şekil değiştirme hızının etkili olmadığı, dönüşüm yapılan gerçek gerilme – birim şekil değiştirme çizelgelerinde ayrıntılı bir şekilde irdelenmiştir. Tez kapsamında yapılan deneylerin sonrasında birim şekil değiştirme hızının kullanılan malzeme üzerinde etkili olduğu ortaya konulsa idi, malzeme modelinde değişikliğe gidilmesi söz konusu olacaktı. Bu durumda birim şekil değiştirme hızının etkili olduğu malzeme modeli “Johnson Cook” kullanılacak, C15 E malzemesi için gerekli olan katsayılar literatürden alınıp algoritmanın girdi değerleri oluşturulacaktı. Fakat yapılan testler sonucu gerçek gerilme – birim şekil değiştirme değerlerine ulaşılmış ve rotil gövdesinde kullanılan C15 E malzemesinde birim şekil değiştirme hızlarının **etkili olmadığı** belirlenmiştir.

MSC Superform programında sıvama analizi için **doğrusal olmayan implicit** yaklaşımı kullanılmıştır. Kullanılan bu algoritma dışında ABAQUS programında explicit yaklaşım yapılarak, algoritmalar arasında ortaya çıkan fark ayrıntılı bir şekilde irdelenmiştir. ABAQUS yazılımı ile yapılan yaklaşım başarılı bir şekilde sonlanamamasına rağmen gerekli form sağlanabilmiştir. ABAQUS yazılımında kullanılan algoritmanın explicit yaklaşımı, aynı eleman sayısına sahip implicit yaklaşıma göre süre bakımından çok daha kısadır. Ayrıca ABAQUS yazılımının kullanıcıya sunduğu işlem öncesi elemanları, Superform programına göre daha etkilidir. Sıvama simülasyonunda rölelerin kendi eksenleri çevresinde dönebilmeleri Superform programında bazı parametrelere bağımlı iken, ABAQUS programında sadece kendi eksenlerinde dönebilmelerini sağlayan bağlama elemanları bulunmaktadır. Fakat şekillendirme işleminde uzmanlaşmış Superform programında daha etkili sonuçlar alındığı (diğer bir ifade ile plastik şekillendirme işlemi daha kolay olduğu) alındığı için mevcut yazılım ile analizlere devam edilmiştir.

Günümüzde ise sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapılan çalışmalar incelendiğinde penetrasyon, patlama gibi yüksek birim şekil değiştirme hızı içeren analizlere explicit yaklaşım yapıldığında çok daha etkili sonuçlar alındığı bilinmektedir. Sıvama işleminde rölelerin yaklaşık olarak 1 saniyede 8.16 tur atmasından dolayı işlem yüksek oranda birim şekil değiştirme hızı içermektedir. Bu nedenle daha sonraki çalışmalarda explicit yaklaşım yapılarak etkili sonuçların alınması beklenmektedir. Ayrıca explicit yöntemin çözüm süresinin implicit yöntemde göre daha kısa olması, firmalarda yapılan AR-GE çalışmalarının üretim bölümlerine sunduğu imkânları da etkileyecektir. Örnek olarak üzerinde çalışılan plastik şekil verme sonrası küresel yataklarda oluşan sıkıştırma kuvvetlerinin saptanmalı konulu çalışmada, sıvama üzerinde etkili olan parametrelerdeki değişimin üretime sokulmadan etkilerinin gözlemlenmesi implicit yöntemde yaklaşım 24 saat sürerken, aynı eleman sayısında explicit yöntem ile 4 saate kadar inmektedir.

Doğrusal olmayan sıvama simülasyonunda işlemin daha hızlı olabilmesi amacı ile şekillendirilen rotıl gövdesinin belirli bir bölümü haricinde tüm parçalar rijit olarak kabul edilmiştir. Böylece işlem esnasında sistemin katılık matrisi küçültülmüştür. Problemin çözümlenmesinde gerekli adım sayısının katılık matrisi oluşturulur. Fakat şekillendirmenin esas aldığı analizlerde, adım sayısının tahmini oldukça zor olduğundan çözüm esnasında adım sayısının algoritma tarafından belirlenmesine karar verilmiştir. Sıvama simülasyonunda ortaya çıkan aşırı şekil değişimleri sıvama basınçlarının büyüklüklerine göre farklılıklar göstermiş ve 2700'leri bulan adım sayısı ile analizler başarılı bir şekilde sonuçlanmıştır. Sıvama kuvvetinin büyüklüğü arttıkça, problemin doğrusal olmama derecesi artmış ve 15500 N'dan sonraki sıvama basıncı değerlerinde analizler 10 gün sürmesine rağmen, analiz sürecinin %65,7 oranında başarısız bir şekilde sonuçlandığı gözlemlenmiştir. Sıvama basıncının artması, şekillendirmenin fazla olmasına ve buna bağlı olarak algoritmanın çözüm sürelerinin doğrusal olmayan bir şekilde artmasına sebep olmuştur. Bilgisayar kapasitelerinin arttığı bir dönemde bu gibi problemlerin aynı algoritma ile kısılması beklenmektedir.

Özellikle 15500 N'dan sonraki değerlerde malzemenin aşırı şekilde deformasyona uğraması, çözüm algoritmasının adım sayısını kendisi belirlemesine rağmen analizlerin başarısızlıkla sonuçlanmasına neden olmuştur. Aşırı şekilde bozulan ağ yapısı, program modüllerindeki "remesh" opsiyonu kullanılarak aşılmaya çalışılmış, fakat "remesh" özelliği malzeme üzerinde toplam birim şekil değiştirme değerlerinde düşüşe sebebiyet verdiğinden öngörülen opsiyondan vazgeçilmiştir. "Remesh" özelliğinin her 100 adımda bir tekrarlandığı düşünülürse, yüksek bir oranda birim şekil değiştirme değerlerinin düştüğü anlaşılr. Fakat programın güncel versiyonlarında bu özellik kayıp olmaksızın kullanılabildiği takdirde 20000 N'lardaki sıvama basıncı değişimleri de saptanabilir. Şekillendirme üzerinde uzmanlaşmış DEFORM ve Superform programının güncel versiyonu Simufact Forming yazılımı ile daha efektif sonuçlar alınabileceği düşünülmektedir. Sonlu elemanlar yöntemi durmadan kendini yenileyen bir yöntem olduğundan, bu çözüm yöntemini aracı olarak kullanan yazılımların kendilerini geliştirmeleri olağandır. Fakat tezin beraber yürütüldüğü ilgili firma, her iki programın da lisansına sahip olmadığı için güncel versiyonları

üzerlerinde çalışılamamış ve Superform programının 2005 versiyonu ile teze devam edilmiştir.

Algoritma üzerinde tartışılabilecek diğer bir önemli konu ise işlem sonrası evrede ortaya çıkmıştır. Bu evrede, sıkıştırma kuvvetleri okunurken rölelerden gelen kuvvetin analiz sonrasında okunmamasının gerekliliğidir. Deneysel aşamada sıvama işleminden sonra röleler yukarı çıkmakta ve sıkıştırma kuvvetleri sadece plastik şekil verme işlemi sonrası arta kalan basınç kuvvetleri tarafından oluşmaktadır. Fakat kuvvet – zaman diyagramında analizin sonuna doğru kuvvet sıfıra yaklaştığında, sıkıştırma kuvvetlerinin de sıfıra yaklaştığı gözlemlenmektedir. Bunun başlıca sebebi, algoritmada rijit olarak kabul edilen kapakçığın üzerinde elastik deformasyon sağlanamadığı için plastik şekil değişimine uğrayan bölgelerin temas bölgelerinde temas kuvvetleri toplamının çok düşük olmasıdır. Deney verilerinden elde edilen görünüşlerde kapak üzerinde plastik deformasyon izlerine rastlanmıştır. Fakat analizde rijit kabul edilen kapakçık için ağ yapısı oluşturularak analiz yapılmak istenirse, sistemdeki eleman sayısı iki katına çıkmakta ve analiz sırasında kapakçığın da şekil değiştireceği düşünülürse, algoritmanın çözüm süresinin mevcut sürenin iki katından daha fazla olması beklenmektedir. Rijit olarak kabul edilen kapakçık, algoritmada sıvama sonrası “geriye yaylanma” (spring-back) etkisi ile üzerine etkilediği düşünülmektedir. Bu yüzden mevcut analizde sıvama işleminin sonuna kadar sıvama basıncının sistem üzerinde kalması sağlanarak “geriye yaylanma” (spring-back) etkisi en aza indirilmiştir. Ayrıca sıvama simülasyonuna daha ileri bir yaklaşım yapabilmek için, analiz sonuna doğru sıvama basıncının sonlanması ve sıkıştırma kuvvetinin sağlanabilmesi için kapakçık ağ yapısı oluşturularak kapakçığın elastik deformasyona uğraması sağlanmalıdır. Lakin mevcut bilgisayar kapasiteleri göz önüne alındığında, hedeflenen ağ yapısı ve sınır şartları ile yapılan analizlerin sürelerinin çok uzun olacağı bilinmektedir.

Sonuç olarak, sıvama simülasyonunda hedeflenen şekillendirme sağlanmış, sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak elde edilen sıkıştırma kuvvetlerine ait veriler deneysel bölümde elde edilen verilerle doğrulanmıştır. Ayrıca sıvama işleminin yapıldığı firmalarda sıvamaya ait problemlerle karşılaşıldığında, sonlu elemanlar ile yaklaşım yapılarak sorunun giderilmesi amacıyla çözüm uzayı

oluşturulmuştur. Sıvama uzayı oluşturulduktan sonra sıvamayı etkileyen diğerk parametreler, yani röleler arasındaki mesafe, rölelerin eksenel yöndeki hızının artması vs. gibi sıvama işleminde optimizasyona yönelik konular ortaya çıkmıştır. Tezin devamında araçlarda konfor düzeyini etkileyen küresel yatakların (diğerk bir ifade ile rotil ve çeşitlerinin)  retiminde diğerk optimizasyon parametrelerinin araştırılması, hem araç konfor düzeyinde, hem de araç süspansiyon sisteminin güvenliğinde yeniliklere öncülük etmesi beklenmektedir.

KAYNAKLAR DİZİNİ

ABAQUS, 2007, Version 6.6, Documentation Files, 154p.

Altıparmak, D., 2000, Şasi Ders Notları, Ankara, 82s.

Anlaş, İ., 1996 Şasi, MEB Yayınları, Altıncı Baskı, İstanbul, 68s.

Ay, İ., 2005, Üretim Yöntemleri Ders Notları, Balıkesir Üniversitesi.

Chen, D.C., 2006, Rigid-plastic finite element analysis of plastic deformation of porous metal sheets containing internal void defects, Journal of Materials Processing Technology, 180: 193–200.

Çapan, E., 2003, Metallerde Plastik Şekil Verme, Çağlayan Yayınevi, 34s.

Çiğdem, M., 2006, İmal Usulleri, Seçkin Yayınevi, 25s.

Dyja, H., Mróz, S. ve Milenin, A., 2004, Theoretical and experimental analysis of the rolling process of bimetallic rods Cu-steel and Cu-Al, Journal of Materials Processing Technology , 153–154,100–107.

Elbir, G., 2007, Ürünlerin Tanıtımı Süspansiyon Sistemleri, Ditaş Dergisi,

Fildiş, M., 2001, Motorculuk Bölümü Şasi İş ve İşlem Yaprakları, MEB Yayınları, Dördüncü Baskı, İstanbul,76s.

Ford, 2008, Otomotiv Teknolojisinin Temelleri, Teknik Servis Eğitim Dökümanı.

Gadala, M.S. ve Wang, J., 2000, Elasto-plastic finite element simulation of rolling and compression between wedge-shaped dies, Journal of Materials Processing Technology, 97: 132-147.

Gün, B., 2007, Sıvama Yöntemleri ve Sıvama Makinası Tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Jiang, Z.Y. ve Tieu, A.K., 2000, 3-D finite element modelling of ribbed strip rolling, International Journal of Machine Tools & Manufacture , 40: 2139–2154.

Jiang, Z.Y. ve Tieu, A.K., 2001, A simulation of three-dimensional metal rolling process by rigid-plastic finite element method, Journal of Materials Processing Technology , 112: 144–155.

Jiang, Z.Y. ve Tieu, A.K., 2002, Elastic–plastic finite element method simulation of thin strip with tension in cold rolling, Journal of Materials Processing Technology, 130–131, 511–515.

Jiang, Z.Y., Tieu, A.K., Zhang, X.M., Lu, C. ve Sun, W.H., 2003, Finite element simulation of cold rolling of thin strip, Journal of Materials Processing Technology , 140: 542–547.

Jiang, Z.Y., Xiong, S.W., Tieu, A.K. ve Wang, Q.J., 2008, Modelling of the effect of friction on cold strip rolling, Journal of Materials Processing Technology, PROTEC-11582.

Kırlı, O., 2009, Yönlendirme Sistemlerinin Yataklarında Kullanılan Acetal/Polyoxymethylene (POM) Malzemesinin Farklı Sıcaklarda, Bası Yüğü Altında Mekanik Özelliklerinin Değişiminin DeneySEL ve Sayısal Similasyonu, Doktora Tezi, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 141s.

Lee, J.D. ve Chen, Y.P., 2000, Non-steady-state elastic-plastic behavior of metal forming (rolling) with a generalized friction law, Theoretical and Applied Fracture Mechanics , 33: 93-99.

Lee, M., Chung, S., Jang, S.M. ve Joun, M.S., 2009, Three-dimensional simulation of forging using tetrahedral and hexahedral elements, Finite Elements in Analysis and Design , 45: 745-754.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Li Y., Huang, Q., Shen, G., Xiao, H., Pang, S. ve Wang, J., 2008, Simulation of strip rolling using elastoplastic contact BEM with friction, Journal of Iron and Steel Research, International, 15(1): 34-38.

MacCormack, C. ve Monaghan, J., 2002, 2D and 3D finite element analysis of a three stage forging sequence, Journal of Materials Processing Technology, 127:48–56.

MDK Makine, 2010, Eğitim Dökümanları, İzmir.

MEGEP. T.C. Milli Eğitim Bakanlığı, 2005, Mesleki Eğitim ve Öğretim Sistemini Güçlendirme Projesi, Süspansiyon Sistemleri, Ankara.

Milenin, A.A., Dyja, H. ve Mróz, S., 2004, Simulation of metal forming during multi-pass rolling of shape bars, Journal of Materials Processing Technology, 153–154, 108–114.

MSC. Marc, 2008, Help Documents, MSC Marc Mentat 2008 r1, 432p.

MSC. Nastran, 2005, Release Guide, MSC Nastran 2005 r2, 154p.

MSC. Superform, 2005, Help Documents, MSC Superform GUI 2005, 217p.

Palumbo, G., Sorgente, D. ve Tricarico, L., 2008, Numerical-experimental analysis of thin magnesium alloy stripes subjected to stretch-bending, Journal of Materials Processing Technology, PROTEC-11564.

Reddy, J.N., 2004, An Introduction to Nonlinear Finite Element Analysis, Oxford University Press .

Sarıkanat, M., 2007, Trabeküler Kemikğin Üç Boyutlu Anizotropik Modellenmesi, Doktora Tezi, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 102s.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Schuler, 1998, Metal Forming Handbook, Springer, 49p.

Staudt, W., 2000, Motorlu Taşıt Tekniği, MEB Yayınları, İkinci Baskı, 76p.

Tüzün, A., 2004, Analysis of Tube Upsetting, Master of Science Thesis, The Graduate School of Natural and Applied Sciences of METU, Ankara.

Vural, M., 2007, Üretim Yöntemleri Ders Notları, İstanbul Teknik Üniversitesi.

www.zf.com, (Erişim Tarihi : 15.06.2010)

Xionga, S., Li, C.S., Rodrigues, J.M.C. ve Martins, P.A.F., 2005, Steady and non-steady state analysis of bulk forming processes by the reproducing kernel particle method, Finite Elements in Analysis and Design , 41: 599–614.

Yea, Y., Ko, Y., Kim N. ve Lee, J., 2003, Prediction of spread, pressure distribution and roll force in ring rolling process using rigid–plastic finite element method, Journal of Materials Processing Technology , 140: 478–486.

Yüce, A., 1997, Günümüzde Otomotiv Teknolojisi, Kızılay Yayınevi Ankara, 43s.

ZF Lemförder Aks Modülleri Sanayi ve Tic. A.Ş., 2010 Standart Dokümanları ve Bilgilendirme Sunumları, İzmir.

Zhang, G., Xiao, H. ve Wang, C., 2006, Three-Dimensional Model for Strip Hot Rolling, Journal of Iron and Steel Research, International, 13(1): 23-26.