



**T.C.
DÜZCE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ROTBAŞI SIVAMA İŞLEMİNİN TASARIMI VE ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HAKAN KUTLAK

HAZİRAN 2015

DÜZCE

KABUL VE ONAY BELGESİ

Hakan Kutlak tarafından hazırlanan **Rotbaşı Sıvama İşleminin Tasarımı ve Analizi** isimli lisansüstü tez çalışması, Düzce Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 11.05.2015 tarih ve 2015/482 sayılı kararı ile oluşturulan jüri tarafından **Makine Mühendisliği** Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan
Prof. Dr. İlyas UYGUR
Düzce Üniversitesi

Üye
Doç. Dr. Suat SARIDEMİR
Düzce Üniversitesi

Üye
Yrd. Doç. Dr. Hasan ÖKTEM
Kocaeli Üniversitesi

Tezin Savunulduğu Tarih : 01.06.2015

ONAY

Bu tez ile Düzce Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu **Hakan Kutlak**'ın **Makine Mühendisliği** Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans derecesini almasını onamıştır.

Prof. Dr. Haldun MÜDERRİSOĞLU
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

BEYAN

Bu tez çalışmasının kendi çalışmam olduğunu, tezin planlanmasından yazımına kadar bütün aşamalarda etik dışı davranışımın olmadığını, bu tezdeki bütün bilgileri akademik ve etik kurallar içinde elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara kaynak gösterdiğimi ve bu kaynakları da kaynaklar listesine aldığımı, yine bu tezin çalışılması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını beyan ederim.

01 Haziran 2015

Hakan Kutlak

Sevgili Aileme ve Özlem Şengül'e

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans öğrenimim ve bu tezin hazırlanmasında süresince gösterdiği her türlü destek ve yardımdan dolayı çok değerli hocam Prof. Dr. İlyas UYGUR'a en içten dileklerle teşekkür ederim.

Tez çalışmam boyunca değerli katkılarını esirgemeyen Yrd. Doç. Dr. Arif ÖZKAN 'na da şükranlarımı sunarım.

Bu çalışma kapsamında sundukları lisanlı Simufact Forming® yazılımı, eğitim ve teknik destekten dolayı NETFORM Mühendislik şirketinden Mert AYGEM Bey'e ve lisanslı Siemens NX® yazılımını kullanmama ve bu çalışmayı yapmama izin veren ve tüm mekanik, imalat ve tasarımları yapıp test etmeme imkan sağlayan Teknorot Otomotiv Ürünleri San. ve Tic. A.Ş. şirketine en içten dileklerle teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca JMatPro® yazılımını kullanmamıza izin verdikleri ve JMatPro® yazılımında oluşturduğumuz 1040 malzeme verisinin doğrulamasını yaptıkları için ONATUS şirketine, üç makaralı sıvama aparatının tasarımı ve imalatı esnasında verdikleri destekten dolayı MACROMECHA firmasından Sabri EVCİ Bey'e şükranlarımı sunarım.

Bu çalışma boyunca yardımlarını ve desteklerini esirgemeyen sevgili aileme ve çalışma arkadaşlarıma sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

01 Haziran 2015

Hakan Kutlak

İÇİNDEKİLER	<u>Sayfa</u>
TEŞEKKÜR SAYFASI	i
İÇİNDEKİLER	ii
ŞEKİL LİSTESİ	iii
ÇİZELGE LİSTESİ	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	vii
ÖZET	1
ABSTRACT	2
EXTENDED ABSTRACT	3
1. GİRİŞ	4
1.1.AMAÇ VE KAPSAM	4
1.1.1. Plastik Şekillendirme Yöntemleri	5
<i>1.1.1.1.Kütle Şekillendirme Yöntemleri</i>	5
<i>1.1.1.1.1. Haddeleme</i>	6
<i>1.1.1.1.2. Dövme</i>	8
<i>1.1.1.1.3. Ekstrüzyon</i>	13
<i>1.1.1.1.4. Tel ve Çubuk Çekme</i>	15
<i>1.1.1.1.5. Sivama</i>	17
2. MATERYAL VE YÖNTEM	27
2.1. ÜÇ MAKARALI SIVAMA APARATININ TASARIMI	27
2.2. SIVAMA OPERASYONUNUN SONLU ELEMANLAR ANALİZİ	28
2.2.1. Parçaların Modellenmesi	29
2.2.2. Rotbaşına ve Makaralara Ağ Örgüsü (Mesh) Atama	30
2.2.3. 1040 Malzemesinin Malzeme Analizi ve Rotbaşına Malzeme Atama ...	32
2.2.4. Sonlu Elemanlar Analizi için Yükleme ve Sınır Şartları	35
3. BULGULAR VE TARTIŞMA	37
4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	49
5. KAYNAKLAR	50
ÖZGEÇMİŞ	53

ŞEKİL LİSTESİ

		<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.1.	Yassı haddeleme yöntemi	6
Şekil 1.2.	Haddeleme tipleri	8
Şekil 1.3.	Açık kalıp dövme	8
Şekil 1.4.	Kapalı kalıpta çapaklı ve çapaksız dövme	9
Şekil 1.5.	Fıçılama olarak adlandırılan durumu gösteren, açık kalıpta dövmede silindirik bir parçanın gerçek deformasyonu	9
Şekil 1.6.	Bir açık kalıpta dövme işleminde ideal koşullar altında bir silindirik parçanın homojen deformasyonu	10
Şekil 1.7.	Kapalı kalıpta dövmede işlem sırası	10
Şekil 1.8.	Parçadaki metal tane akışının karşılaştırılması	11
Şekil 1.9.	(a) geleneksel ve (b) hassas dövme ile elde edilen kesitler	11
Şekil 1.10.	Çift kalıpla çapaksız dövme	11
Şekil 1.11.	Baş şişirme (yığma dövme) işleminin aşamaları	12
Şekil 1.12.	Merdane ile dövme	12
Şekil 1.13.	Dolu çubuk kütlelerin çapını düşürmek için döner kalıpla çekme yönteminde kalıplar	12
Şekil 1.14.	Orbital dövmede deformasyon çevriminin sonunda alt kalıp parçayı çıkarmak için yükselir	13
Şekil 1.15.	Kapalı kalıpta dövmeden sonra çapağı uzaklaştırmak için budama işlemi (çapak kesme işlemi)	13
Şekil 1.16.	Direkt ekstrüzyon	14
Şekil 1.17.	(a) İçi boş ve yarı boş kesit elde etmede direkt ekstrüzyon, (b) içi boş, (c) yarı boş kesitler	14
Şekil 1.18.	(a) Dolu kesit, (b) içi boş kesit üretmek için indirekt ekstrüzyon	14
Şekil 1.19.	Darbeli ekstrüzyon	15
Şekil 1.20.	Çubuk - tel çekme işlemi	15
Şekil 1.21.	Metal çubukların çekilmesinde kullanılan hidrolik tahrikli çekme tezgahı	16
Şekil 1.22.	Sürekli tel çekme işlemi	16
Şekil 1.23.	Rotbaşına gelen kuvvetler	26
Şekil 1.24.	Sıvama operasyonu incelenen rotbaşı	26
Şekil 2.1.	Üç makaralı sıvama aparatının 3 boyutlu modeli	27

Şekil 2.2.	Makaranın 3 boyutlu modeli	27
Şekil 2.3.	Üç makaralı sıvama aparatının fotoğrafı	28
Şekil 2.4.	Rotbaşının ve ikili makara düzeninin 3 boyutlu modelleri	29
Şekil 2.5.	Rotbaşının ve üçlü makara düzeninin 3 boyutlu modelleri	30
Şekil 2.6.	Rotbaşının ve ikili makara düzeninin sonlu elemanlar analizi için matematiksel ifadesi (ağ örgüleri)	31
Şekil 2.7.	Rotbaşının ve üç makara düzeninin sonlu elemanlar analizi için matematiksel ifadesi (ağ örgüleri)	32
Şekil 2.8.	Mikroyapı, faz dağılım oranları, ferrit tane boyutu, başlangıç östenit/perlit oranı	33
Şekil 2.9.	1040 malzemesinin çekme deney numunesi	33
Şekil 2.10.	1040 malzemesinin gerilim-gerinim eğrileri	33
Şekil 2.11.	1040 JmatPro, C45 JMatPro ve DD12 malzemelerinin gerilim-gerinim eğrileri	34
Şekil 2.12.	Tutucu ve makaraların dönme eksenleri	35
Şekil 3.1.	Üç makaralı sıvama aparatı ile sıvanmış rotbaşının 5. simülasyon sonucu elde edilen efektif plastik gerinim değeri	37
Şekil 3.2.	Üç makaralı sıvama aparatı ile sıvanmış rotbaşının 5. simülasyon sonucu elde edilen maksimum efektif gerilim değeri	37
Şekil 3.3.	Üç makaralı sıvama aparatı ile sıvanmış rotbaşının 5. simülasyon sonucu elde edilen maksimum sıcaklık değeri	38
Şekil 3.4.	Üç makaralı sıvama aparatı ile sıvanmış rotbaşının 5. simülasyon sonucu elde edilen z ekseninde malzemenin yerdeğiştirme miktarı	38
Şekil 3.5.	İki makaralı sıvama aparatı ile sıvanmış rotbaşının simülasyon sonucu elde edilen efektif plastik gerinim değeri	40
Şekil 3.6.	İki makaralı sıvama aparatı ile sıvanmış rotbaşının simülasyon sonucu elde edilen efektif plastik gerilim değeri	40
Şekil 3.7.	İki makaralı sıvama aparatı ile sıvanmış rotbaşının simülasyon sonucu elde edilen maksimum sıcaklık değeri	40
Şekil 3.8.	İki makaralı sıvama aparatı ile sıvanmış rotbaşının simülasyon sonucu elde edilen z ekseninde malzemenin yerdeğiştirme miktarı	41
Şekil 3.9.	Üç makaralı sıvama aparatı ile sıvanmış rotbaşlarının kapak çıkma değerleri	42

Şekil 3.10.	İki makaralı sıvama aparatı ile sıvanmış rotbaşlarının kapak çıkma değerleri	42
Şekil 3.11.	Üç ve İki makaralı sıvama aparatlarının rotbaşlarına temas ettiği noktaları	43
Şekil 3.12.	İki makaralı sıvama aparatı ayar düzeni	44
Şekil 3.13.	Üç makaralı sıvama aparatı ve tezgah bağlantı aparatı 3 boyutlu modeli	45
Şekil 3.14.	1040 JMatPro malzeme verisi ve mikroyapı testleri sonucunda elde edilmiş 1040 malzeme verisi karşılaştırma grafiği	46
Şekil 3.15.	Üç makaralı sıvama aparatı ile sıvanmış rotbaşının gerçek sıvama fotoğrafı ve 5. simülasyonun (nihai) sonucu	47
Şekil 3.16.	İki makaralı sıvama aparatı ile sıvanmış rotbaşının gerçek sıvama fotoğrafı ve simülasyonun sonucu	47
Şekil 3.17.	Üç ve iki makaralı sıvama aparatı ile sıvanmış rotbaşının gerçek sıvama fotoğrafları.	48
Şekil 3.18.	İki makaralı sıvama aparatı ile sıvanmış rotbaşındaki bir sıvama hatası	48

ÇİZELGE LİSTESİ

		<u>Sayfa No</u>
Çizelge 1.1.	Talaşlı İmalat Yöntemleri	4
Çizelge 1.2.	Standart Sıvama, Bağımlı-Et Kalınlığı Değişimli Sıvama ve Bağımsız-Et Kalınlığı Değişimli Sıvama Yöntemleri	18
Çizelge 2.1.	Sıvama İşleminde Etkin Olan Parametre Grupları	28
Çizelge 2.2.	1040 Malzeme Çekme Deneyi Sonuçları	34
Çizelge 2.3.	1040 JMatPro Malzemesinin Kimyasal Özellikleri Tablosu	34
Çizelge 2.4.	C45 JMatPro Malzemesinin Kimyasal Özellikleri Tablosu	34
Çizelge 2.5.	Üç Makaralı Sıvama Aparatı Simülasyonunu Oluşturan Parçaların Kontak Tablosu	36
Çizelge 2.6.	İki Makaralı Sıvama Aparatı Simülasyonunu Oluşturan Parçaların Kontak Tablosu	36
Çizelge 3.1.	Rotbaşının Üç Makaralı Sıvama Aparatı İle Simülasyon Sonuçları Tablosu	39
Çizelge 3.2.	Rotbaşının İki Makaralı Sıvama Aparatı İle Simülasyon Sonuçları Tablosu	41
Çizelge 3.3.	Rotbaşının İki ve üç Makaralı Sıvama Aparatı İle Simülasyon Sonuçları	40
Çizelge 3.4.	Üç Makaralı Sıvama Aparatının Sağladığı Mukavemet Artışı Tablosu	42
Çizelge 3.5.	Sıvama Formundaki Kesitlerin İncelenme Tablosu	42
Çizelge 3.6.	Üç Makaralı Sıvama Aparatına Geçiş İle Kazanılan Yıllık Rotil Rotbaşı Hurda Maliyeti	45
Çizelge 3.7.	Üç Makaralı Sıvama Aparatına Geçiş İle Kazanılan Yıllık İşçilik Maliyeti	45

SİMGELER VE KISALTMALAR

AR-GE	Araştırma Geliştirme
°C	Santigrad Derece
CAD	Computer Aided Design (Bilgisayar Destekli Tasarım)
CAE	Computer Aided Engineering (Bilgisayar Destekli Mühendislik)
CAM	Computer Aided Manufacturing (Bilgisayar Destekli İmalat)
dk	Dakika
kgf	Kilogramkuvvet
kN	Kilonewton
mm	Milimetre
mm/sn	Milimetre/Saniye
mm/dk	Milimetre/Dakika
M.Ö	Milattan Önce
MPa	Megapascal
MPF	Multi-Point Forming
Parça/sn	Parça/Saniye
POM	Polioksimetilen
r	Radüs
Rpm	Devir/dakika
SMED	Single Minute Exchange of Die
sn	Saniye
µm	Mikron
TL	Türk Lirası
₺	Türk Lirası
€	Euro
%	Yüzde

ÖZET

ROTBAŞI SIVAMA İŞLEMİNİN TASARIMI VE ANALİZİ

Hakan KUTLAK

Düzce Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Prof. Dr. İlyas UYGUR

Haziran 2015, 64 sayfa

Taşıtlarda kullanılan ön düzen ve süspansiyon sistemi; konfor ve güvenlik için gerekli elemandır. Bu sistemin mükemmel bir şekilde tasarlanması ve üretilmesi, diğer sistemler ile birlikte senkronize bir şekilde çalışması zorunludur. Bir yönlendirme ve süspansiyon elemanı olan ve hareket iletimini sağlayan rotbaşının imalatı esnasında plastik şekil vermeyi temel alan imalat yöntemlerinden haddeme işleminin özel bir alt bölümü olan sıvama (kenar form verme) işlemi özel önem arz etmektedir. Bu araştırma kapsamında, üç makaralı sıvama aparatı tasarlanmış, Simufact Forming® programı ile iki ve üç makaralı sıvama aparatı ile rotbaşının sıvama operasyonunun sonlu elemanlar analizi yapılmıştır. Üç makaralı sıvama aparatının, iki makaralı sıvama aparatına göre avantajları belirlenmiştir. Plastik şekillendirme esnasında ortaya çıkan gerilim ve gerinim analizleri yapılmış ve ayrıca rotbaşının sıvama formunda meydana gelen kesit incelemeleri analiz edilmiştir.

Anahtar sözcükler: Gerilim ve Gerinim Analizi, Rotbaşı, Sıvama, Simufact Forming®

ABSTRACT

DESIGN AND ANALYSIS OF EDGE FORMING PROCESS OF TIE ROD END

Hakan Kutlak

Duzce University

Graduate School of Natural and Applied Sciences, Department of Mechanical
Engineering

Master of Science Thesis

Supervisor: Prof. Dr. İlyas UYGUR

June 2015, 64 pages

Steering and suspension systems are components of the vehicles which provides driving safety. This system needs to be perfectly designed and produced in order to work synchronized with other systems. During the manufacturing of a tie rod end supplying the motion transmission, the edge-form rolling process which is a subsection of rolling process of manufacturing methods based on plastic deformation was examined. Within the scope of this research, the edge-form rolling apparatus with three rollers was designed and the finite element analysis of the edge-form rolling process with the edge-form rolling apparatuses with two and three rollers was made by using Simufact Forming® software. The advantages of the edge-form rolling apparatus with three rollers compared with the edge-form apparatus with two rollers. An analysis of stress and strain emerging during to the plastic deformation was made and also cross sectional change in thickness occurring on the edge-form of the tie rod end was analyzed.

Keywords: Stress and Strain Analysis, Tie Rod End, Edge-Form Rolling, Simufact Forming®

EXTENDED ABSTRACT

DESIGN AND ANALYSIS OF EDGE FORMING PROCESS OF TIE ROD END

Hakan KUTLAK

Duzce University

Graduate School of Natural and Applied Sciences, Department of Mechanical Engineering

Master of Science Thesis

Supervisor: Prof. Dr. İlyas UYGUR

June 2015, 64 pages

1. INTRODUCTION:

Steering and suspension systems are components of the vehicles which provides driving safety. This system needs to be perfectly designed and produced in order to work synchronized with other systems. During the manufacturing of a tie rod end supplying the motion transmission, the edge-form rolling process which is a subsection of rolling process of manufacturing methods based on plastic deformation was examined.

2. MATERIAL AND METHODS:

The edge-form rolling apparatus with three rollers was designed and the finite element analysis of the edge-form rolling process with the edge-form rolling apparatuses with two and three rollers was made by using Simufact Forming® software.

3. RESULTS AND DISCUSSIONS:

The advantages of the edge-form rolling apparatus with three rollers compared with the edge-form apparatus with two rollers. An analysis of stress and strain emerging during to the plastic deformation was made and also cross sectional change in thickness occurring on the edge-form of the tie rod end was analyzed.

4. CONCLUSION AND OUTLOOK:

As a result, better edge-forming by using the edge-form rolling apparatus with three rollers was obtained. In addition, the edge-form rolling apparatus with three rollers solves forming problems such as crack, crush, scratch and tear. Besides that, when the tie rod end by using the edge-form rolling apparatus with three rollers is formed, strenght of the edge forming of the tie rod end is increased. Moreover, a quick mounting method to mount the edge-form rolling apparatus with three rollers to the forming pres was developed. So, 66% labour efficiency in setup time was obtained.

1. GİRİŞ

1.1. AMAÇ VE KAPSAM

Sıvama yöntemleri için yapılan tüm tanımlamalarda belirtilen ortak öncelikli unsur talaşsız metal şekillendirme yöntemleri olmalarıdır. Metal şekillendirme yöntemleri, uygulama şekline göre; “Talaşlı İmalat Yöntemleri” ve “Talaşsız İmalat Yöntemleri” olarak iki kategoride sınıflandırılabilir [1].

Talaşlı imalat yöntemleri, malzemedan talaş kaldırmak suretiyle malzemeye şekil verilen yöntemlerdir. Bu yöntemlerde giren ürün ve çıkan ürün arasında bir kütle kaybı söz konusudur. En genel yaklaşımda, talaşlı imalat yöntemleri; tormalama, frezeleme, delik işleme, kesme, planya-vergelleme ve taşlama olmak üzere altı sınıfa ayrılır. Talaşlı imalat yöntemleri, Çizelge 1.1’de genel olarak gösterilmiştir.

Çizelge 1.1 Talaşlı İmalat Yöntemleri [1].



Talaşsız imalat yöntemlerinde, (sıvama, eğme, bükme, dövme, döküm, v.b.) işlenecek malzemedan talaş kaldırılmaz. Bunun yerine genel olarak malzemenin mekanik ve fiziksel özelliklerinden yararlanılarak şekil verme işlemi yapılır. Talaşsız imalat yöntemleri işlenecek malzemenin fiziksel durumuna göre; sıcak imalat yöntemleri ve soğuk imalat yöntemleri olarak temelde iki alt kategoriye ayrılabilir. Sıcak imalat yöntemlerine; döküm, sıcak dövme, sıcak çekme, sıcak haddeleme, kaynak ve boğaz sıvama örnek olarak verilebilir. Soğuk imalat yöntemlerine ise soğuk haddeleme, sıvama, derin çekme, soğuk dövme, soğuk çekme, çeşitli sac ve boru şekillendirme metotları örnek olarak verilebilir. Burada sıvama yöntemi hem sıcak şekillendirme hem de soğuk şekillendirme içinde yer alan tekniklere sahiptir.

Bugünün makine endüstrisinde kullanılan ürünlerin birçoğu hammaddeden direkt olarak tek bir imalat yöntemiyle üretilmemektedir. Bunun yerine talaşlı ve/veya talaşsız imalat yöntemlerinin belirli bir sıra ile kullanılması sonucunda ortaya çıkmaktadır. Örneğin; bir çelik jant çemberinin imalatında hammaddeden itibaren; döküm, haddeleme, uç kapatma-kaynak, çapak alma, kalibrasyon presleme, segman yuvası sıvama, sıvama ile uzatma, kulak sıvama, o'ring yuvası-kaynak ve tornalama işlemleri sırasıyla kullanılarak son ürün elde edilmektedir [2].

Üreticiler için en uygun yöntem, şüphesiz istenilen özelliklerdeki ürünü en ucuza ve en kısa zamanda imal edebildikleri yöntemdir. Seri imalatta, bunu sağlamak için genel eğilim talaşlı imalat yöntemleri yerine mümkün olduğunca talaşsız imalat yöntemlerini seçmek ve üretim için kullanılan operasyon sayısını azaltmaya çalışmaktır. Örneğin, metrik diş açılacak bir mil, genel olarak tornada işlenirken, seri imalatta; cıvata, saplama, v.b. parçaların üzerindeki dişler genel olarak ovalama ile şekillendirilir [3].

Çoğu uygulamalar için talaşlı imalat yöntemlerinin önemli dezavantajları şu şekilde sıralanabilir [3]:

- a. Talaşlı imalat esnasında oluşan talaşla birlikte bir malzeme kaybı söz konusudur. Bu da imalat maliyetini artıran bir faktördür.
- b. Genelde paso veya yavaş ilerlemek gerektiğinden imalat zamanı çoğu uygulama için nispeten uzundur.
- c. Talaş kaldırmak suretiyle hızlı aşınan takım ucunun belirli aralıklarla değiştirilmesi gerekir ve bu da ek maliyet getirir.
- d. Çoğu uygulama için operasyon sayıları talaşsız yöntemlere nispeten fazladır.
- e. Bazı geometrik şekillere, talaşlı imalat ile ulaşmak imkânsız veya çok zordur.

Buna karşılık, talaşsız imalat yöntemlerinin de yüksek ilk yatırım maliyeti, teknolojik zorluklar v.b. gibi dezavantajları ortaya çıkabilir [3].

1.1.1. Plastik Şekillendirme Yöntemleri

1.1.1.1. Kütle Şekillendirme Yöntemleri

Metal işlemede talaşsız şekillendirme yöntemleri sırası ile haddeleme ve haddeleme ile ilgili diğer şekil verme yöntemleri, dövme ve dövme ile ilgili şekil verme yöntemleri, ekstrüzyon, tel ve çubuk çekme, sac metal şekillendirme yöntemidir. Talaşsız

şekillendirmenin önemi, sıcak işlemede önemli şekil değişiklikleri gerçekleştirilir. Soğuk işlemede şekil değişimi esnasında dayanım artar. Az bir miktar veya hiç atık malzeme oluşmaz ve net şekile yakın veya net şekilde parça imalatı gerçekleştirilebilir. Parçalar bu yöntemler ile imal edildikten sonra hiç ya da çok az talaşlı imalata ihtiyaç duyar [4].

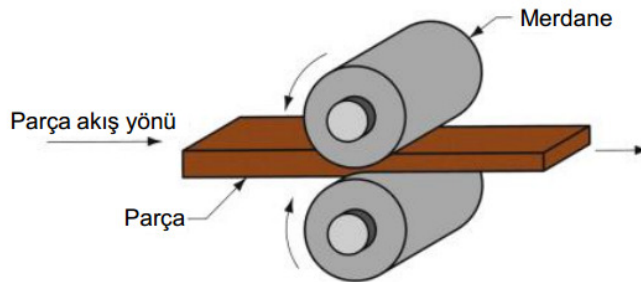
Başlangıç formu sac olmayıp, kütle olan metal parçaları şekillendirerek önemli şekil değişimine neden olan metal şekil verme işlemleri, başlangıç formları silindirik çubuk veya kütüklere, dikdörtgen kesitli kütükler veya slablara uygulanır. Bu yöntemler metale istenilen şekil için doğru plastik akmaya neden olan yeterli gerilmeyi sağlar. Soğuk, ılık ve sıcak işlemler halinde uygulanırlar.

Beş temel kütle şekillendirme yöntemi [4];

1. Haddelme yönteminde slab veya levha karşılıklı merdaneler arasında sıkıştırılır.
2. Dövme yönteminde parça karşılıklı kalıplar arasında sıkıştırılır ve şekillendirilir.
3. Ekstrüzyon yönteminde parça bir açık kalıptan geçecek şekilde sıkıştırılarak açık kalıbın şeklini alır.
4. Tel ve çubuk çekme yönteminde ise tel ve çubuğun çapı bir kalıp açıklığı içinden çekilerek azaltılır.
5. Sac metal şekillendirme genellikle 0,4 mm ile 6 mm arasındaki ince saclarda ve 6 mm büyük levhalarda yapılan soğuk şekillendirme yöntemidir.

1.1.1.1 Haddelme

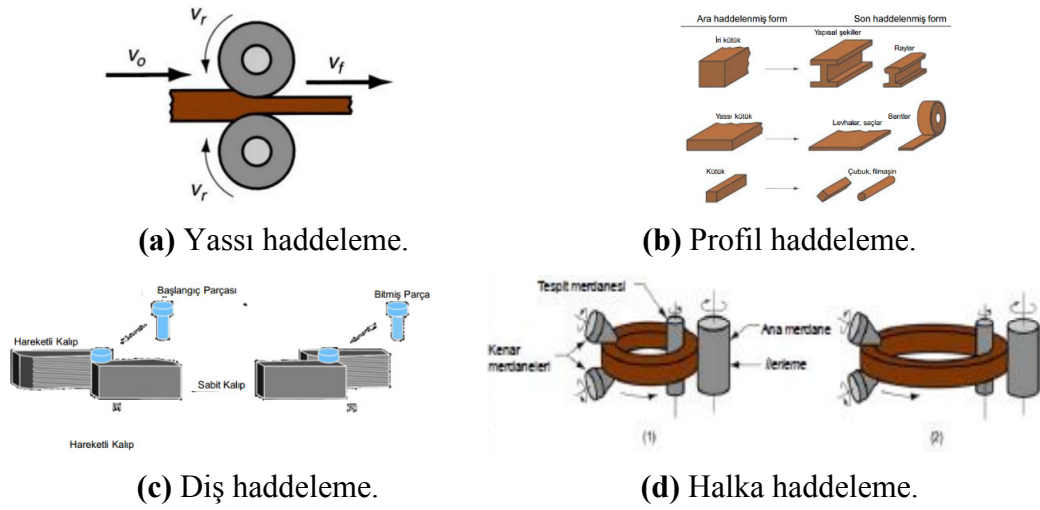
Parça kalınlığının, karşılıklı iki merdane tarafından uygulanan basınç kuvvetleri ile düşürüldüğü şekillendirme yöntemi Şekil 1.1’de verilmiştir [4].



Şekil 1.1. Yassı haddelme yöntemi [4].

Haddeleme işlemi esnasında dönen merdaneler iki temel fonksiyonu yerine getirir. Parça ve merdaneler arasındaki sürtünme ile parçayı aralığa çeker ve aynı zamanda kesiti azaltacak şekilde parçayı sıkıştırır. Parça geometrisine göre yassı haddeleme yöntemi dikdörtgen kesitin kalınlığını düşürmek için kullanılır. Profil haddelemede ise kare kesit, örneğin I profil haline şekillendirilir. Parça sıcaklığına göre sıcak haddeleme yöntemi büyük deformasyon miktarları gerektiğinde kullanılan en yaygın türdür. Soğuk haddelemede ise son şekle sahip sac ve levhalar üretilir [4].

Haddeleme, yassı haddeleme, profil haddeleme, dış haddeleme ve halka haddeleme olarak dörde ayrılmaktadır. Yassı haddelemede girişte malzeme aralığa doğru çekilir ve merdane malzemedan daha hızlıdır. Çıkışta malzeme aralıktan geriye doğru itilir ve merdane malzemedan daha yavaştır. Temas yayı içinde nötr nokta haricinde kayma ve sürtünme meydana gelir. Eğri içinde sadece bu noktada iş parçası ile merdane hızı eşitlenir. Girişteki sürtünme, olası maksimum taslak miktarını kontrol eder. Profil haddelemede, parça düz yerine profil haline şekillendirilir. Parça istenilen şeklin tersine sahip haddelerin arasından geçirilerek gerçekleştirilir. I kiriş, L kiriş, U kanal gibi konstrüksiyon profilleri, demiryolu vagonları için raylar, yuvarlak ve kare kesitli çubuklar profil haddeleme metodu ile üretilmektedir. Dış haddeleme yöntemi, dış oluşturmak üzere silindirik parçaların iki kalıp arasında haddelendiği metal şekillendirme yöntemidir. Cıvata ve vidaların seri üretiminde kullanılan soğuk işleme yöntemidir. Talaş kaldırarak dış açma yöntemine göre avantajları; daha yüksek üretim hızları, daha iyi malzeme kullanımı, soğuk sertleştirme (pekleşme) nedeniyle daha güçlü dişler ve daha yüksek yorulma direnci sağlanmaktadır. Halka haddeleme yöntemi küçük çaplı ve kalın cidarlı halkanın daha ince cidarlı ve daha büyük çaplı bir halka formuna haddelendiği şekillendirme yöntemidir. Kalın cidarlı halka sıkıştırıldıkça deforme olan metal, halkanın çapının büyümesine sağlayacak şekilde uzar. Büyük çaplı halkalar için sıcak işleme yöntemi ve daha küçük halkalar için soğuk işleme yöntemi uygulanır. Bilye ve merdane yatak kılavuzları, demiryolu vagonları için çelik tekerlekler ve borular, basınçlı kaplar ve dönen makineler için halkalar uygulama alanıdır. Malzeme tasarrufu, ideal tane yönlenmesi, soğuk sertleştirme yolu ile dayanım artışı bu haddeleme yönteminin üstünlükleridir. Şekil 1.2'de haddeleme tiplerinin şekilleri gösterilmiştir [4].

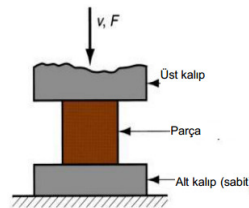


Şekil 1.2. Haddelenme tipleri [4].

1.1.1.1.2 Dövme

Parçanın iki kalıp arasında sıkıştırıldığı deformasyon yöntemidir. Metal şekillendirme yöntemlerinden en eskisi olan dövme işlemi, yaklaşık M.Ö. 5000 yıllık bir geçmişe sahiptir. Motor krank milleri, biyel kolları, dişliler, moment kolları, uçakların yapısal parçaları, jet motoru parçaları dövme yöntemi ile imal edilmektedir. Ayrıca metal endüstrisi, sonradan talaş kaldırılarak son şekline ve boyutuna getirilecek büyük parçaların başlangıçtaki büyük formlarını elde etmek için dövme yöntemini kullanmaktadır.

Dövme soğuk ve sıcak dövme olarak ikiye ayrılmaktadır. Sıcak veya ılık dövme önemli oranda deformasyon gerektiğinde ve parça malzemesinin dayanımını düşürüp sünekliğini arttırmak için ihtiyacından dolayı kullanılan en yaygın yöntemdir. Soğuk dövmenin üstünlüğü ise şekil değiştirme sertleştirmesinden kaynaklı dayanımın artmasıdır. Dövme işlemi darbe veya pres dövme ile yapılmaktadır. Dövme şahmerdanı darbe yükü uygulamaktadır. Dövme presisi ise yavaş basınç uygulamaktadır. Açık kalıpta dövme parça malzemenin en az sınırlama oluşacak şekilde akmasını sağlamak üzere iki kalıp arasında sıkıştırılır. Şekil 1.3.'de açık kalıp dövmenin resmi verilmiştir.



Şekil 1.3. Açık kalıp dövme [4].

Kapalı kalıpta dövme, kalıp parçayı içine alacak bölüm ve boşluk içerir. Metalin akışı, çapak oluşacak şekilde gerçekleştirilir. Çapaklı dövmede ise parça tamamen kalıp içinde şekillendirilir. Çapak oluşmamaktadır. Şekil 1.4’de açık kapalı kalıpta çapaklı ve çapaklız dövmenin resmi verilmiştir.



(a) Kapalı kalıpta çapaklı dövme. (b) Kapalı kalıpta çapaklız dövme.

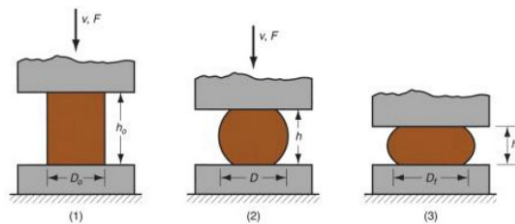
Şekil 1.4. Kapalı kalıpta çapaklı ve çapaklız dövme [4].

Açık kalıpta dövme, parçanın iki düz kalıp arasında sıkıştırılması parçanın silindirik kesite sahip olduğu ve eksenini boyu sıkıştırıldığı basınç testine benzemektedir. Deformasyon işlemi, parçanın boyunu kısaltırken çapını büyütür. Açık kalıp ile dövmenin yaygın adı yığma veya yığma dövmesidir. Sürtünmesiz açık kalıp dövmede, parça ile kalıp yüzeyleri arasında sürtünme oluşmaz ve homojen deformasyon oluşursa, bu durumda parça boyunca radyal akma üniformdur ve gerçek birim şekil değiştirme ifadesi:

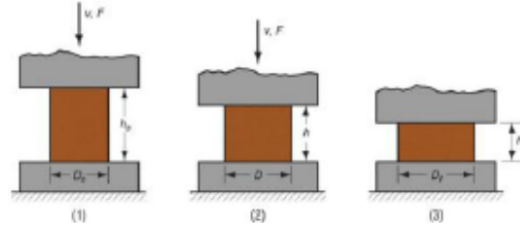
$$\varepsilon = \ln \frac{h_0}{h} \quad (1.1)$$

Burada h_0 = başlangıç boyu; h = sıkıştırma sırasında herhangi bir noktadaki boydur. h = son değer, h_f olduğunda gerçek birim şekil değiştirme maksimum değerinde olur.

Şekil 1.5’de fıçılama olarak adlandırılan durumu gösteren, açık kalıpta dövmede silindirik bir parçanın gerçek deformasyonu gösterilmektedir. Şekil 1.6’da bir açık kalıpta dövme işleminde ideal koşullar altında bir silindirik parçanın homojen deformasyonu gösterilmektedir.

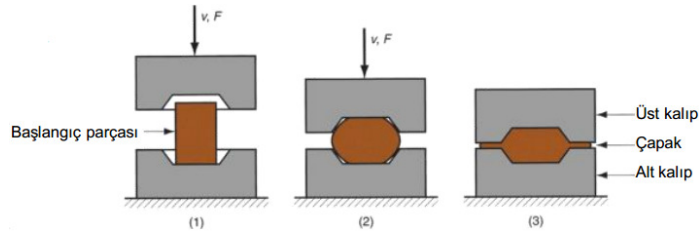


Şekil 1.5. Fıçılama olarak adlandırılan durumu gösteren, açık kalıpta dövmede silindirik bir parçanın gerçek deformasyonu: (1) işlemin başlangıcı, (2) kısmi şekil değiştirme, (3) son şekil [4].



Şekil 1.6. Bir açık kalıpta dövme işleminde ideal koşullar altında bir silindirik parçanın homojen deformasyonu (1) parça orijinal boy ve çapındayken işlemin başlangıcı, (2) kısmi sıkıştırma ve (3) son şekil [4].

Kapalı kalıpla dövme, parçanın istenilen şeklinin tersine sahip kalıplar tarafından yapılan dövmedir. Metalin kalıp boşluğunun dışında, kalıp plakaları arasındaki küçük boşlukların içine doğru akmasıyla çapak oluşur. Çapağın sonradan kesilmesi gerekir. Ancak çapak sıkıştırma esnasında önemli bir fonksiyon üstlenir. Çapak oluştuğunda sürtünme, metalin kalıp boşluğunu doldurmasını sağlayacak şekilde, aralığa metalin daha fazla akmasına direnç gösterir. Sıcak dövmede metalin akışı kalıp plakaları arasındaki soğutma tarafından daha da sınırlanır. Şekil 1.7’de kapalı kalıpta dövmede işlemindeki işlem sırası verilmiştir.



Şekil 1.7. Kapalı kalıpta dövmede işlem sırası: (1) Ham parça ile ilk temasın hemen öncesi, (2) kısmi sıkıştırma ve (3) kalıp plakaları arasındaki boşlukta çapak oluşmasına neden olan son kalıp kapanışı [4].

Kapalı kalıpta dövme uygulaması, her adımda kalıp boşluklarının ayrıldığı, genellikle çok sayıda dövme adımı gerektirir. Başlangıç adımları, daha üniform deformasyon ve sonraki adımlarda istenen metalurjik yapı için metali yeniden dağıtır. Son adımlar, parçayı son geometriye getirir. Kapalı kalıpta dövme genellikle elverişsiz koşullar altında deneyimli operatör tarafından manuel olarak gerçekleştirilir.

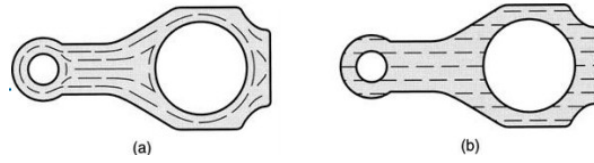
Kapalı kalıpta dövmenin dolu bloktan talaşlı işlemeye göre üstünlükleri;

- Daha yüksek üretim hızları
- Daha az atık metal
- Daha yüksek dayanım
- Metalde olumlu tane yönelmesi

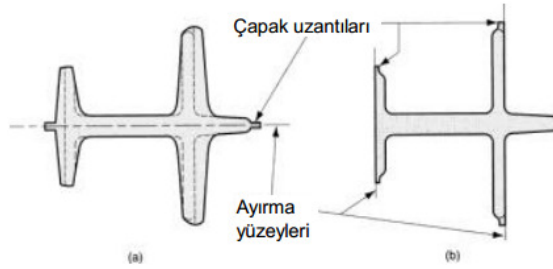
Kapalı kalıpta dövmenin dolu bloktan talaşlı işleme göre sınırları;

- Dar toleransa sahip değildir.
- Doğruluğa ve istenen özelliklere ulaşmak için genellikle talaşlı imalat gerektirir.

Şekil 1.8’de parçadaki metal tane akışı, Şekil 1.9’da geleneksel ve hassas dövme ile elde edilen kesitler verilmiştir. Şekil 1.9 (a)’daki kesikli çizgiler, geleneksel dövmeden sonra kesitin hassas dövmeyle denk hale getirilmesi için sonradan talaş kaldırılması gereken bölümü göstermektedir.

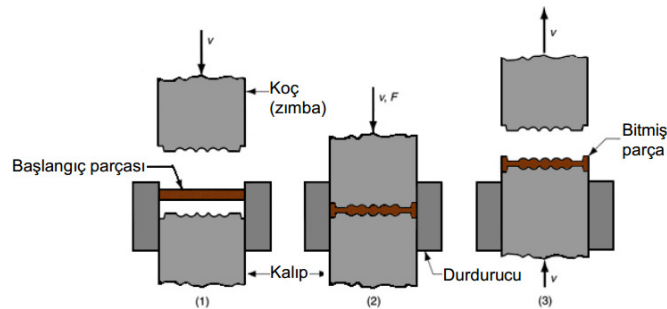


Şekil 1.8. Parçadaki metal tane akışının karşılaştırılması: (a) yüzey talaş kaldırılması sıcak dövme ve (b) tamamen talaş kaldırılarak oluşturulmuş [4].



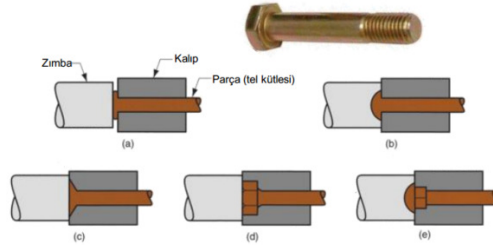
Şekil 1.9. (a) Geleneksel ve (b) hassas dövme ile elde edilen kesitler [4].

Çapaksız dövmede, parçanın kalıp boşluğunun çapak oluşmasına izin vermediği koç ile kalıp arasındaki sıkıştırma. Başlangıç parça hacmi çok dar toleranslarla kalıp boşluğuna eşit olmalıdır. Kapalı kalıpta dövmeyle göre hassas işlem, kontrolü daha çok gerektirir. En çok basit ve simetrik parça kontrollerine uygundur. Çoğunlukla hassas dövme işlemi olarak sınıflandırılır. Şekil 1.10’da çift kalıpla çapaksız dövme adımları gösterilmiştir [4].



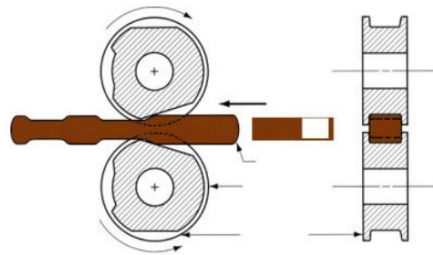
Şekil 1.10. Çift kalıpla çapaksız dövme: (1) parça ile ilk temastan hemen öncesi, (2) sıkıştırma ve (3) alt kalıbın itici fonksiyonu yaparak parçayı kalıptan çıkarması [4].

Yığma ve baş şişirme yönteminde çivi, cıvata ve benzer hırdavat ürünlerinin başlarının oluşturulmasında kullanılan dövme yöntemidir. Diğer dövme yöntemlerine göre çok sayıda parça üretilir. Baş şişirici ve baş şekillendirici denilen makinalarda soğuk, ılık veya sıcak olarak gerçekleştirilir. Tel ve çubuk kütlesi makinenin içine beslenir, parçanın ucu şişirilir ve daha sonra belirli uzunlukta kesilir. Cıvata ve vidalarda sonradan dişleri oluşturmak için diş haddelme yapılır. Şekil 1.11’de baş şişirme kalıp (yığma dövme) kalıp tipleri gösterilmiştir.

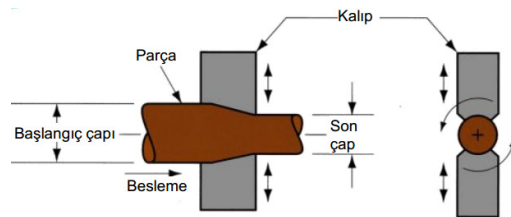


Şekil 1.11. Baş şişirme (yığma dövme) işleminin aşamaları: (a) açık kalıpları kullanarak bir çivi başı oluşturma, (b) zimba tarafından oluşturulan yuvarlak baş, (c) ve (d) kalıp tarafından oluşturulan vidalar için iki yagın baş türü, (e) zimba ve kalıp tarafından oluşturulan taşıyıcı cıvata başı [4].

Döner kalıpla çekme yönteminde, parça kalıp içine itildikçe, radyal olarak döverek eğim oluşturan döner kalıplarla gerçekleştirilir. Boru veya dolu çubuk kütlelerin çaplarını küçültmekte kullanılır. Bazen borusal parçanın şeklini ve iç çapının ölçüsünü kontrol için mandrel gerekir. Şekil 1.12’de merdane ile dövme, Şekil 1.13’de döner kalıpla dövme yöntemleri gösterilmiştir.

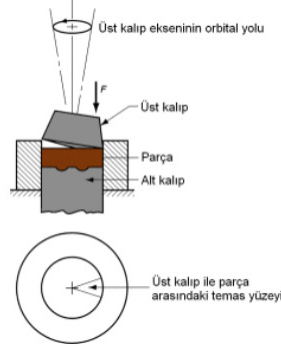


Şekil 1.12. Merdane ile dövme [4].



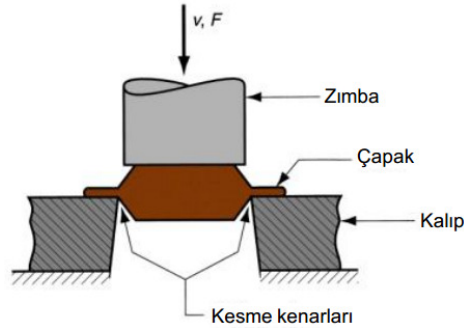
Şekil 1.13. Dolu çubuk kütlelerin çapını düşürmek için döner kalıpla çekme yönteminde kalıplar dönerken parçayı ezer. Radyal dövmede, parça dönerken kalıplar parçayı ezecek şekilde sabit yönde kalır [4].

Orbital dövme yönteminde deformasyon, aynı anda hem döndürülen hem de parçaya bastırılan konik şekilli bir üst kalıp aracılığıyla gerçekleştirilir. Şekil 1.14’de orbital dövmede deformasyon çevrimi gösterilmiştir.



Şekil 1.14. Orbital dövmede deformasyon çevriminin sonunda alt kalıp parçayı çıkarmak için yükselir [4].

Budama (çapak kesme işlemi) kapalı kalıpta dövmede, çapakların parçadan uzaklaştırılması için kesilme işlemidir. Genellikle parça sıcakken yapılır. Bu nedenle dövme istasyonuna ayrı bir budama presine dahil edilir. Budama taşlama ve testere ile kesme gibi farklı yöntemlerle de yapılabilir. Şekil 1.15’de kalıp ile yapılan çevre kesme işlemi gösterilmiştir.

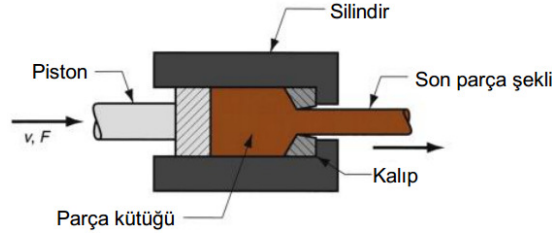


Şekil 1.15. Kapalı kalıpta dövmeden sonra çapağı uzaklaştırmak için budama işlemi (çapak kesme işlemi) [4].

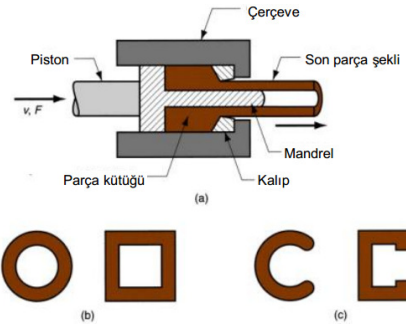
1.1.1.1.3 Ekstrüzyon

İstenilen kesit şeklini elde etmek için parçanın bir kalıp boşluğunda akmaya zorlandığı basınçlı şekillendirme yöntemidir. Yöntem bir diş macununun tüpten dışarıya çıkması için sıkıştırılmasına benzemektedir. Genel olarak ekstrüzyon aynı kesite sahip uzun parçaların üretiminde kullanılır. Ekstrüzyon işlemi direk, indirek ve darbeli ekstrüzyon olarak üçe ayrılmaktadır. Direkt ekstrüzyon işlemi ileri ekstrüzyon olarak adlandırılır. Piston kalıp açıklığına yaklaştığında, kalıp açıklığından geçemeyen küçük bir kütük parçası kalır. Kütükçük olarak adlandırılan bu fazla kısmın, ekstrüzyondan çıkan

mamülün sonu kesilerek ayrılmalıdır. Başlangıç kütük kesiti genellikle yuvarlaktır. Ekstrüzyon ürününün son şekli, kalıp açıklığı tarafından belirlenir. Şekil 1.16’da direkt ekstrüzyon işlemi ve Şekil 1.17’de direkt ekstrüzyon işlemi ile içi boş, yarı boş kesitli ürün elde etme işlemi gösterilmiştir.

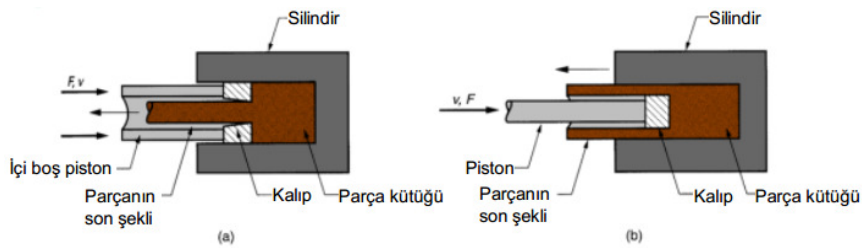


Şekil 1.16. Direkt ekstrüzyon [4].



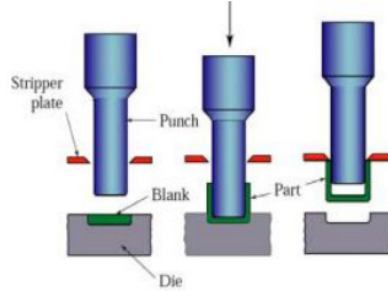
Şekil 1.17. (a) İçi boş ve yarı boş kesit elde etmede direkt ekstrüzyon, (b) içi boş, (c) yarı boş kesitler [4].

İndirekt ekstrüzyon, geriye ekstrüzyon veya ters ekstrüzyon olarak da adlandırılır. İçi boş pistonun düşük rijitliği ve ekstrüzyon ürünlerini parçadan çıkarırken desteklemekteki zorluk indirekt ekstrüzyonun sınırlamalarıdır. Şekil 1.18’de dolu ve içi boş kesitte ürün üretmek için indirekt ekstrüzyon işlemi gösterilmiştir.



Şekil 1.18. (a) Dolu kesit, (b) içi boş kesit üretmek için indirekt ekstrüzyon [4].

Darbeli ekstrüzyon, indirekt ekstrüzyona benzer soğuk ekstrüzyon işlemidir. Genellikle 2 parça/sn hızda demir dışı metal şekillendirilir. İnce cidarlı tüp biçimlerini elde etmek mümkündür. Çekilen parçalar sıkıştığı için sıyrıcı ile kalıptan çıkarılır. Şekil 1.19’da darbeli ekstrüzyon işlemi gösterilmiştir.



Şekil 1.19. Darbeli ekstrüzyon [4].

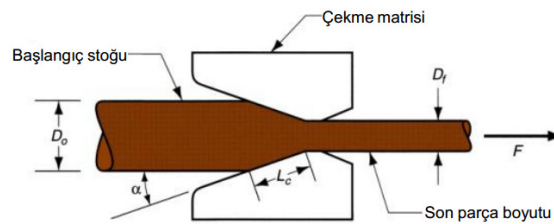
Ekstrüzyonun üstünlükleri;

- Özellikle sıcak ekstrüzyonda değişik şekillerin oluşturulması mümkündür. Bu işlemin sınırı, parça kesitinin tüm uzunluk boyunca üniform olması gerekmesidir.
- Soğuk ve sıcak ekstrüzyonda tane yapısı ve dayanım iyileştirilebilir.
- Özellikle soğuk ekstrüzyonda dar toleranslar mümkündür.
- Bazı uygulamalarda, hiç veya çok az atık oluşur.

Sıcak ekstrüzyon kütüğün yeniden kristalleştirme sıcaklığının üzerinde ısıtılarak yapılmaktadır. Sıcak ekstrüzyon daha fazla redüksiyona ve daha karmaşık şekillere izin verecek tarzda metalin dayanımı düşer ve sünekliği artar. Soğuk ekstrüzyon genellikle ayrıık parçaların üretiminde kullanılır [4].

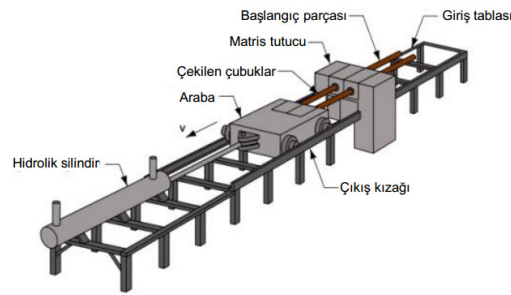
1.1.1.1.4 Tel ve Çubuk Çekme

Tel ve çubuk çekme işleminde bir çubuk veya telin kesiti, bir kalıp (matris) açıklığı içinden çekilerek küçültülür. Ekstrüzyona benzerdir ancak çekmede parça matris boyunca çekilir. Ekstrüzyonda ise itilir. Çekmede, çekme gerilmeleri uygulanmasına rağmen basma da önemli rol oynar. Çünkü metal matris açıklığından geçerken sıkıştırılır. Şekil 1.20’de çubuk - tel çekme işlemi gösterilmiştir.



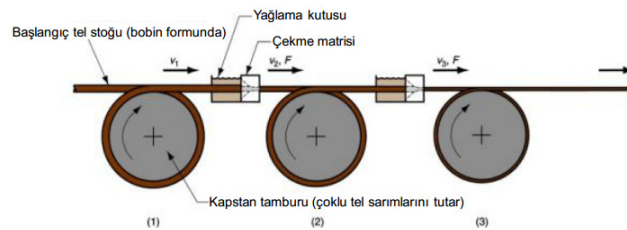
Şekil 1.20. Çubuk - tel çekme işlemi [4].

Çubuk çekme ile tel çekme arasındaki fark çekilen malzemenin boyutundadır. Çubuk çekmede çubuk çapı büyüktür. Tel çekmede küçük çaplı malzeme kullanılır. Tel boyutunda 0,03 mm'ye kadar ölçüler mümkündür. Mekanizması aynı olmasına rağmen yöntem, ekipman ve terminoloji farklıdır. Çekme uygulaması genellikle soğuk işleme olarak gerçekleştirilir ve çoğu kez yuvarlak kesitler kullanılır. Tel çekme ürünleri; çitler için tel bloğu, elbise askıları ve alışveriş arabalarıdır. Çubuk çekme ürünleri; çiviler, vidalar, perçinler ve yaylardır. Kalın malzemedan çekilen çubuklar; talaş kaldırma, dövme ve diğer işlemler için kullanılan metal çubuklardır. Şekil 1.21'de metal çubukların çekilmesinde kullanılan hidrolik tahrikli çekme tezgahı gösterilmiştir.



Şekil 1.21. Metal çubukların çekilmesinde kullanılan hidrolik tahrikli çekme tezgahı [4].

Kalın çubuk çekme işlemi, tek kademedeki kesit küçültme olarak uygulanır. Malzeme bir matris açıklığından çekilir. Başlangıç malzeme boyutu büyük çaplı düz bir silindirdir. Parti tipi işlem gerektirir. Tel çekme işlemi toplayıcı tamburlarla ayrılmış, çoklu çekme matrislerini içeren sürekli çekme makinaları ile yapılmaktadır. Herbir tambur (kapstan) sonraki matrise doğru tel malzemesini çekmek için uygun kuvvet sağlar. Herbir matris küçük bir redüksiyon oluşturur. Böylece seri sonunda istenen toplam redüksiyona ulaşılır. Soğuk sertleşmesi azaltmak için bazen matrisler arasında tavlama gerekir. Şekil 1.22'de sürekli tel çekme işlemi gösterilmiştir.



Şekil 1.22. Sürekli tel çekme işlemi [4].

Parçanın çekmeye hazırlanması aşamasında malzemenin sünekliğini arttırmak için tavlama işlemi yapılmakta, çekme matrisi ve parça yüzeyinin hasarını önlemek için

temizleme işlemi, çekme matrisine girebilmesi için başlangıç ucunun çapında küçültülme işlemi yapılmaktadır. Sıvama teknikleri, sac ve boru biçimli metal malzemelerden, talaşlı imalat yöntemleriyle üretilen birçok ürünün talaşsız olarak imal edilmesine imkân sağlamaktadır. Sıvama yöntemleri, birbiriyle ortak temel özellikleri paylaşan fakat uygulamada birbirinden ayırt edici unsurları bulunan birçok farklı yöntemi içinde barındırmaktadır. Bir malzemenin sıvama yöntemi ile işlenmesi esnasında bu yöntemlerden bir tanesi veya birkaçı bir arada kullanılabilir. [3].

1.1.1.1.5 Sıvama

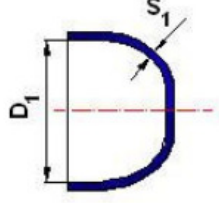
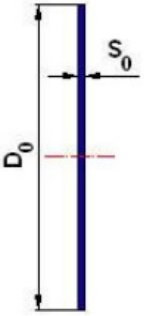
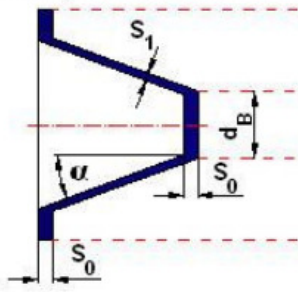
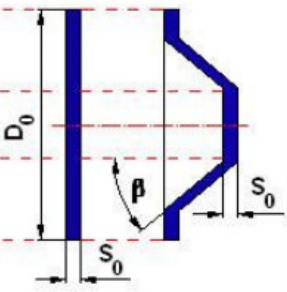
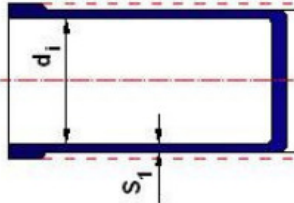
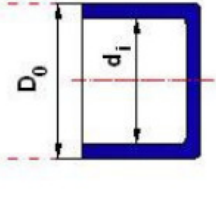
Sıvama sac, boru biçimli veya dövülmüş parçanın kendi ekseni etrafında dönen çeşitli aparatlar ile uygulanan radyal ve/veya aksel yönde kuvvetler neticesinde şekillendirilmesidir. Sıvama ile işlenecek parçalar dönme eksenine göre simetriklerdir. Sıvama, bu tanıma uygun olan fakat birbirinden farklı birçok 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 imalatta, talaş kaldırılmaması ve imalat hızının yüksek olması, sıvamayı cazip kılan temel etmenlerdir [3].

Sıvama teknikleri, endüstriyel kullanımına göre şu 5 kategoriye ayrılır [5]:

1. Standart Sıvama (Standard Spinning)
2. Bağımlı-Et Kalınlığı Değişimli Sıvama (Shear Forming)
3. Bağımsız-Et Kalınlığı Değişimli Sıvama (Flow Forming)
4. Boğaz Sıvama (Necking-In)
5. Profil Sıvama (Profiling)

Bu beş yöntemden, ilk 3 tanesi, en karakteristik sıvama tipleridir. Diğer iki yöntem ise, yani “Boğaz Sıvama” ve “Profil Sıvama”, bazı yabancı kaynaklarda kendi başlarına ayrı birer konu olarak da rastlanabilir. “Standart Sıvama”, “Bağımlı-Et Kalınlığı Değişimli Sıvama” ve “Bağımsız-Et Kalınlığı Değişimli Sıvama” yöntemlerinin farkı; DIN 8582, DIN 8583 ve DIN 8584 standartlarına göre Çizelge 1.2’deki gibi gösterilmektedir.

Çizelge 1.2 Standart Sıvama, Bağımlı-Et Kalınlığı Değişimli Sıvama ve Bağımsız-Et Kalınlığı Değişimli Sıvama Yöntemleri [3].

STANDART		YÖNTEM	İŞLENMEMİŞ PARÇA	ET KALINLIĞI
BASMA İLE FORM VERME DIN 8582	ÇEKME İLE FORM VERME DIN 8584, T4	STANDART SIVAMA 		$S_1 = S_0$
KALINLIK DEĞİŞİMLİ SIVAMA DIN 8582	SIVAMA DIN 8583, T2	BAĞIMLI-ET KALINLIĞI DEĞİŞİMLİ SIVAMA 		$S_1 = S_0 \frac{\sin \alpha}{\sin \beta}$
		BAĞIMSIZ-ET KALINLIĞI DEĞİŞİMLİ SIVAMA 		$S_1 = \frac{1}{2} (D_1 - d_i)$

DIN 8584 ve DIN 8583 standartlarına göre, standart sıvama ile et kalınlığı değişimli sıvama tipleri arasında mekanik olarak temelde 2 fark vardır:

1. Standart sıvamada, malzeme üzerindeki plastik deformasyon çekme ve basma kuvvetlerinin sonucunda ortaya çıkar. Et kalınlığı değişimli sıvama tiplerinde ise deformasyon, sadece basma kuvveti sonucunda ortaya çıkar.
2. Standart sıvamada, işlem görmemiş malzeme ve işlem görmüş malzemenin tamamında et kalınlığı hemen hemen sabit iken et kalınlığı değişimli sıvamada farklı noktalarda farklı et kalınlıkları elde edilebilir.

Uygulamada bu beş yöntemin bazılarının beraber kullanıldığı örnekler sıklıkla görülebilir. Bağımlı-et kalınlığı değişimli sıvama genel olarak, konik, silindirik veya küresel kesitlerin oluşturulması için kullanılan bir yöntemdir. Bağımsız-et kalınlığı değişimli sıvamada ise, konik veya silindirik parçaların et kalınlıkları, malzemenin dayanabileceği sınırlara kadar azaltılabilir [3].

Diğer bir sıvama yöntemi de çok noktalı şekillendirme ile parça üretimidir. Çok noktalı şekillendirmede (Multi-Point Forming – MPF), metal sacların yüzeylerinin üç boyutlu şekillendirilmesinde kullanılabilen esnek bir yöntemdir. Geleneksel yöntemlerin kullanıldığı üretimde sac metale verilecek belirli bir form, sadece o formu verebilmesi için özel olarak hazırlanmış kalıp ile sağlanabilmektedir. Kalıpların tasarımı ve üretimi masraflı ve vakit alan bir iştir ayrıca büyük oranda işçinin ve tasarımcının tecrübesine bağlıdır [6].

Sonlu elemanlar metodu, günümüzde karmaşık mühendislik problemlerinin hassas olarak çözülmesinde etkin olarak kullanılan bir sayısal metottur. İlk defa 1956 yılında uçak gövdelerinin gerilme analizi için geliştirilmiş olan bu metodun, daha sonraki on yıl içerisinde uygulamalı bilimler ve mühendislik problemlerinin çözümünde de başarı ile kullanılabilceği anlaşılmıştır. Daha sonraki yıllarda ise sonlu elemanlar metodu ve çözüm teknikleri hızlı gelişmeler kaydetmiş ve günümüzde bir çok pratik problemin çözümü için kullanılan en iyi metotlardan birisi olmuştur. Metodun değişik mühendislik alanı için bu kadar popüler olmasının ana sebeplerinden birisi de genel bir bilgisayar programının yalnız giriş verilerini değiştirerek herhangi bir özel problemin çözümü için kullanılabilmesidir. Sonlu elemanlar metodundaki temel düşünce, karmaşık bir probleme, problemi basite indirgeyerek bir çözüm bulmaktır. Esas problemin daha basit bir probleme indirgenmiş olması nedeni ile kesin sonuç yerine yaklaşık bir sonuç elde edilmektedir. Ancak bu sonucun çözüm için daha fazla çaba harcayarak iyileştirilmesi ve kesin sonuca çok yaklaşılması, hatta kesin sonuca ulaşılması mümkün olmaktadır. Elde bulunan konvansiyonel matematiksel araçların kesin sonucu, hatta yaklaşık bir sonucu dahi bulmakta yetersiz kalması durumunda ise sonlu elemanlar metodu kullanılabilcek tek metod olmaktadır. Sonlu elemanlar metodu, yapısal mekanik problemlerinin yanısıra, ısı iletimi, akışkanlar mekaniği, elektrik ve manyetik alanlar ile ilgili mühendislik problemlerinin çözümü için de başarı ile kullanılmaktadır. Metodun bu kadar çok uygulama alanı bulmasının nedenlerinden birisi, değişik

mühendislik problemlerinin arasındaki benzerliklerdir. Sonlu elemanlar metodunda katı, sıvı veya gaz gibi gerçek cisimler veya kontinyum, birbirine bağlanmış sonlu eleman adı verilen alt bölümler ile tarif edilmektedir. Bu elemanlar birbirlerine düğüm noktası adı verilen özel noktalardan bağlanmışlardır. Düğüm noktaları genellikle elemanların birbirine bağlandıkları yerler olan eleman sınırlarında bulunmaktadır. Kontinyumun içerisindeki deplasman, gerilme, sıcaklık, basınç, hız vs. gibi değişkenlerin gerçekte nasıl değiştiği bilinemediğinden, bunların basit fonksiyonlar ile yaklaşık olarak ifade edilebildikleri varsayılmaktadır. Bu yaklaşık fonksiyonlar, değişkenlerin düğüm noktalarındaki değerleri cinsinden ifade edilmektedir. Sistem için denge denklemleri vs. gibi yeni denklemler yazıldığı zaman, bilinmeyenleri değişkenlerin düğüm noktalarındaki değerleri olan ve ortak çözümleri gereken yeni denklemler ortaya çıkmaktadır. Genellikle matris denklemleri şeklinde olan bu denklemlerin çözülmesi ile de değişkenlerin düğüm noktalarındaki değerleri elde edilmektedir. Yaklaşık fonksiyonların, değişkenlerin düğüm noktalarındaki değerleri cinsinden ifade edilmiş olmaları nedeni ile de, bu fonksiyonların eleman içerisindeki ve sonuç olarak bütün kontinyum içerisindeki değerleri bulunmakta, ve istenilen sonuçlar elde edilmiş olmaktadır. Özel problemlerin çözümü için genel bir programın kullanılabilmesi, sonlu elemanlar metodunun güçlü ve çok amaçlı bir araç olmasına neden olmuş ve çok sayıda genel amaçlı sonlu elemanlar program paketi geliştirilmiştir. Bu paketlerden bazıları oldukça genel amaçlı olup, değişik mühendislik alanlarındaki problemlerin çözümünü için çok az veya hiçbir değişikliğe gerek duyulmadan kullanılabilir [7].

Sonlu elemanlar metodu ile tasarım aşamasında bir çok mekanik ve fiziksel değerler analiz edilerek, öngörülü imalat yapılarak, deneme yanılma yöntemiyle ortaya çıkacak zaman, enerji ve güç kaybı önlenmektedir. Çok farklı imalat sektöründe farklı makine parçalarının analizleri sonlu elemanlar yöntemi ile yapılmaktadır.

Simufact Forming® programının sonlu elemanlar çözücü programı Marc®'dır. Marc® yerdeğiştirme metodunu temel alınarak geliştirilmiştir. Marc®'da kullanılan rijitlik metodolojisi, sistemin rijitliği sayesinde kuvvet-yerdeğiştirme ilişkilerini adresler. Doğrusal statik problem için kuvvet yerdeğiştirme ilişkisi aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$Ku = f \quad (1.2)$$

K rijitlik matrisi, u düğüm yerdeğiştirmesi ve f kuvvet vektörüdür.

Yapının, hem yerdeğiştirme hem de kuvvetlerde sınır koşullarını belirttiği varsayılarak, 1.3 nolu ana denklem aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} \\ K_{21} & K_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} f_1 \\ f_2 \end{Bmatrix} \quad (1.3)$$

u_1 bilinmeyen yerdeğiştirme vektörüdür, f_1 belirtilmiş kuvvet vektörüdür, u_2 belirtilmiş yerdeğiştirme vektörüdür ve f_2 reaksiyon kuvvet vektörüdür. Yerdeğiştirme vektörü u çözüldükten sonra, her bir elementteki gerinimler, element düğüm yerdeğiştirmesi açısından gerinim yerdeğiştirme ilişkisi aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$\varepsilon_{e1} = \beta u_{e1} \quad (1.4)$$

Elementteki gerilimler, gerilim gerinim ilişkilerinden elde edilebilir:

$$\sigma_{e1} = L \varepsilon_{e1} \quad (1.5)$$

σ_{e1} ve ε_{e1} elementteki gerilim ve gerinimlerdir ve u_{e1} element düğüm noktaları ile ilgili yerdeğiştirme vektörüdür; β ve L sırası ile gerinim yerdeğiştirme ve gerilim gerinim ilişkileridir [8].

Dinamik bir problemde, kütle ve sönümlenmenin etkileri sistem içerisine dahil edilmelidir. Bir doğrusal dinamik sistemi yöneten denklem:

$$M\ddot{u} + D\dot{u} + Ku = f \quad (1.6)$$

M sistem kütle matrisidir, D sönümleme matrisidir. 1.7 nolu denklem ivme vektörüdür ve u hız vektörüdür. Sönümlenmemiş dinamik sistemi yöneten denklem:

$$M\ddot{u} + Ku = f \quad (1.7)$$

Sönümlenmemiş serbest titreşimi yöneten denklem:

$$M\ddot{u} + Ku = 0 \quad (1.8)$$

Yapısal sistemin doğal frekansları ve model şekilleri aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanabilir:

$$K\phi - \omega^2 M\phi = 0 \quad (1.9)$$

Diğer prosedürleri yöneten denklemler benzerdir. Örneğin, geçiçi ısı transferi analizinin ana denklemi :

$$C^T T + K^T T = Q \quad (1.10)$$

C^T ısı kapasite matrisidir, K^T termal iletkenlik matrisidir, Q termal yük vektörüdür, T düğüm sıcaklık vektörüdür ve t sıcaklığın zaman türevidir. 1.10 nolu denklem sadeleştirilir ise:

$$K^T T = Q \quad (1.11)$$

Sabit durum problemi için, 1.11 nolu sabit durum ısı transferini yöneten denklem ve 1.2 nolu statik gerilim analizi denklemi aynı şekli alır. Benzer şekilde, hidrodinamik hareket problemi, sabit durum ısı transferi problemine benzerdir. Bu problem 1.11 nolu denkleme benzer bir denklem tarafından yönetilir [8].

Çift termo-elektrik analizinde elektrik probleminin matris denklemi:

$$K^E(T)V = I \quad (1.12)$$

Termal problemi yöneten denklem:

$$C^T(T)T + K^T(T)T = Q + Q^E \quad (1.13)$$

1.12 ve 1.13 nolu her iki denklemde, V voltajdır, $K^E(T)$ sıcaklık-bağımlı-elektrik-iletkenlik matrisidir, I düğüm-akım vektörüdür. $C^T(T)$ sıcaklık bağımlı ısı-kapasite matrisidir ve $K^T(T)$ termal iletkenlik matrisidir. T düğüm sıcaklık vektörüdür, Q ısı-akış vektörüdür ve Q^E elektrik akımının sonucu olarak içsel ısı üretme vektörüdür. Elektrik ve termal problemler $K^E(T)$ ve Q^E ile birleştirilir.

Termal-mekanik problemler için matris denklemi aşağıda verilmiştir:

$$M\ddot{u} + D\dot{u} + K(T, u, t) = F \quad (1.14)$$

$$C^T(T)T + K^T(T)T = Q + Q^I + Q^F \quad (1.15)$$

1.14 ve 1.15 nolu denklemlerde, sönümlenme matrisi D , rijitlik matrisi K , ısı-kapasite matrisi C^T ve termal iletkenlik matrisi K^T 'nin tümü sıcaklığa bağımlıdır. Q^I elastikiyetsiz deformasyondan dolayı üretilen içsel ısıdır. Isı transferi problemi ve

mekanik problem arasındaki eşleşme sıcaklık-bağımlı mekanik özellikler ve üretilen içsel ısıdan dolayıdır. Eğer güncellenmiş Lagrangian analizi gerçekleştirilir ise, K ve K^T önceki yerdeğişime bağımlıdır.

Yapısal sistemin sadeleştirilmiş sonlu elemanlar hareket denklemi:

$$Ma + Dv + Ku = F \quad (1.16)$$

M kütle matrisi, a ivme, D sönümlenme matrisi, v hız, K rijitlik matrisi, u yerdeğiştirme, F kuvvet olarak ifade edilir [8].

Değişken formlu bir kalıp kullanarak sacların şekillendirilmesi fikri; tasarım tekrarlamalarını hızlı ve neredeyse masrafsız olarak yapmaya imkan vermektedir. MPF metodu sayesinde farklı formlardaki sac metallerin tek bir kalıp sistemi kullanılarak şekillendirilmesi mümkün olmaktadır. Havacılık, uzay, gemi ve otomotiv endüstrileri gibi modern endüstrilerde yüzey panellerinin şekillendirilmesi önemli rol oynamaktadır. Bu endüstrilerdeki ihtiyaç sonucunda MPF teknolojisinde son yıllarda birçok gelişmeler olmuştur [9-16].

Çok noktalı şekillendirmede geleneksel kalıpların yerini alt ve üst olmak üzere bir çift pim matrisi alır ve bu pimlerin bağıl pozisyonu hedeflenen forma göre değişiklik gösterebilmektedir. Her bir pimin pozisyonunun kontrolü sonucu pim matrisi çok noktalı kalıba dönüşür. Bu çok noktalı kalıp sayesinde farklı şekillerdeki üç boyutlu sac metal parçaların şekillendirilmesi yapılabilmektedir [6].

Klasik birçok noktalı şekillendirmede sistem dört ana bileşenden oluşmaktadır: Pres, uygun bir CAD/CAE/CAM yazılımı, bilgisayar kontrol sistemi ve form ölçüm sistemi. Pres sistemin temel elemanıdır. CAD/CAE/CAM yazılımı çok noktalı kalıbın üç boyutlu formunu meydana getirir ve şekil verme işlemi esnasında oluşabilecek kusurları öngörmek amacıyla sayısal analizleri yürütür. Bu sırada CAD yardımıyla oluşturulan form bilgisayar kontrol sisteminin komutuyla çok noktalı kalıpta oluşturulur. Ölçüm sistemi ise oluşturulan parçayı ölçer ve kapalı çevrim sistemlerde CAD programına geri bildirim göndererek geri esneme kayıplarının önlenmesini sağlar [9, 17-20].

Literatürde çok noktalı şekillendirme ile yapılan çalışmalar incelendiğinde parça yüzey kalitesi, kırışma, çukurlaşma, kalıp maliyetleri, geri esneme telafisi gibi konular üzerinde yoğunlaşıldığı tespit edilmiştir [11, 21].

Liu ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, elastik yastık kullanımının çok noktalı sac şekillendirme analizlerindeki etkilerini araştırmış ve simülasyon ortamında elastik yastık kullanım şartlarını optimize etmişlerdir. Optimizasyonu yapılmak istenen parametreler, elastik yastığın kalınlığı ve sürtünme katsayısıdır. Bu parametrelerin iyileştirilmesi ile çok noktalı şekillendirme ile elde edilecek parça yüzey kalitesinin artırılması amaçlanmaktadır [22].

Maier ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, çok noktalı şekillendirme ile üretilen sac metal parçanın üretimi esnasında geri esneme telafisi için sisteme geri besleme yapan bir data toplama yazılımı geliştirmişlerdir. Bu yazılım ile çok noktalı şekillendirme yöntemi ile geri esnemesiz sac metal parça üretimi mümkün olabilmektedir [23].

Fuxing ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, titanyum alaşımlı sac parçanın çok noktalı şekillendirme ile simülasyon ortamında üretimini gerçekleştirmişlerdir. Çok noktalı şekillendirmenin en temel problemlerinden olan kırılma ve çukurlaşma problemi ile titanyum alaşımlı malzeme kullanıldığında karşılaşılmamıştır. Ayrıca elastik yastık ve pot çemberi kullanımı da çıkan parçanın form alma kalitesini olumlu yönde etkilemektedir [13].

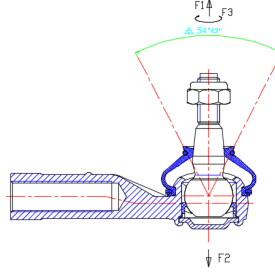
Jia ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, bölgesel çok noktalı şekillendirme ile çok büyük boyutlardaki sac metal parçaların şekillendirilmesine yeni bir yaklaşım getirmişlerdir. Bu metod ile büyük sac metal parçaların şekillendirilmesi kademeli olarak MPF presi ile yapılmaktadır [14, 24-26].

Liu ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, çok noktalı şekillendirme tiplerinden olan gererek şekillendirme yöntemi ile sac parça üretiminin sanal analizleri gerçekleştirilmiştir. Elastik yastık kullanımı ve geri esneme telafisinin gererek şekillendirmede nasıl kullanıldığı ve verimi araştırılmıştır. Elastik yastığın kalınlığı 8 mm, sürtünme faktörü ise 0,1'dir [15].

Literatürdeki çalışmalar sonuç olarak; çok noktalı şekillendirme teknolojisinin kalıp maliyetini azalttığı, esnek kullanım sistemi sağladığı ve parçada eşit deformasyon dağılımı elde etmek için elverişli olduğu belirtilmiştir. Dolayısıyla AR-GE prototip çalışmaları için uygun bir sac metal şekillendirme yöntemidir. Fakat parça boyutsal hassasiyeti, yüzey kalitesi ve geri esneme telafisi konularında gelişime açıktır [6].

Dongsheng Qian ve arkadaşları Simufact Forming® yazılımı ile büyük küre şeklindeki valf gövdesinin proses optimizasyonunu sonlu elemanlar yöntemi ile yapmıştır [27]. Şanay, Pam-Stamp 2G sonlu elemanlar yazılımı ile Nakazima testi simülasyonu yaparak sac metal şekillendirmesinde plastik kararsızlık ve şekillendirme limitlerinin belirlenmesi konusunu incelemiştir [28]. Gürsel ve Çalır iki makaralı sıvama aparatı ile bir rotül sıvama operasyonunu inceleyerek sıvama ile monte edilen mekanizmalarda oluşan sıkıştırma kuvvetlerinin saptanması konusunda bir çalışma gerçekleştirmiştir. Literatürde değişik uygulama ve örnekleri bulunan bir çok araç parçası bulunmasına rağmen, rotbaşı ile ilgili bir detaylı çalışmaya rastlanılmamıştır. Direksiyon ve süspansiyon sistemleri, taşıtların sürüş güvenliğini ve sürüş konforunu sağlayan elemanlardır. Bu sistemlerin mekanizmaları kusursuz çalışabilmek için, farklı işlevlere sahip birçok küresel mafsal mili içerir. Bu küresel mafsalın içerisinde yataklama görevi yapan POM (polioksimetilen) malzemeden yapılmış parçalar mevcuttur. Küresel yataklar boşluksuz, hatta bir miktar sıkı birleştirilerek sisteme montajları yapılır. Diğer yandan aşırı sıkılık yüksek moment değerlerine ve dolayısıyla ek işlemlere neden olurken; zayıf sıkılık mafsal içerisinde boşluk yaratmaktadır. Her iki durumda da küresel bağlantının ömrü azalır ve araç, emniyet açısından riskli hale gelebilir. Küresel yatak ve mafsal sisteminin fazla sıkıştırılması, yüksek moment değerleri oluştururken, sürüş konforunu önemli oranda azaltır. Fakat düşük moment değerleri ise sürüş güvenliğini giderek azaltmaktadır [29].

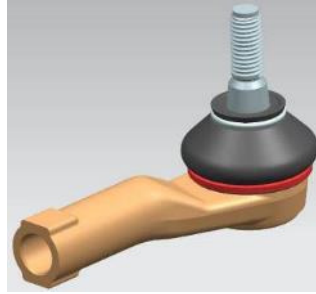
Küresel bağlantılara değişik doğrultularda ve boyutlarda yükler gelir. Örneğin, araçtaki konumu itibari ile Şekil 1.23'deki rotbaşı yol koşullarının yarattığı dinamik yüklerin yanı sıra, değişken iklim ve çevre koşullarının da etkilerine maruz kalmaktadır. Tüm bu yükler parça üzerindeki en zayıf halka olan ve Şekil 1.24'de gösterilen kapak tarafından karşılanabilmelidir. Taşıt, yollardaki çukur ve tümseklerden geçerken, rotül F1 ve F2 yüklerine, virajlarda aşık \pm F3 dönme momentine ve ivmelenme yüklerine maruz kalmaktadır. F3 dönme momenti rotülün çalışma torkunu belirleyen değerdir ve ayrı olarak analiz edilir. F2 kuvveti sıvamanın mukavemetini analiz etmek için uygulanır ve ayrı olarak analiz edilir. Günümüzde rotül tasarımı ve imalatında izlenen yöntem, çok sayıda tekrar içeren örnek imalatlar aracılığıyla, yani deneme-yanılma yoluyla belirli tecrübeler sonucu elde edilen değerlere ulaşılmasına dayanmaktadır [29]. Sıvamanın mukavemet değerleri, parçanın ömür süresi açısından önem teşkil etmekte ve konunun ayrıntılı bir şekilde incelenmesini gerekli kılmaktadır.



Şekil 1.23. Rotbaşına gelen kuvvetler.

Bu çalışmada, bir yönlendirme ve süspansiyon elemanı olan ve hareket iletimini sağlayan rotbaşının imalatı esnasında, plastik şekil vermeyi temel alan imalat yöntemlerinden haddeme işleminin özel bir alt bölümü olan sıvama (kenar form verme) işlemi incelenmiştir. Bu araştırma kapsamında, üç makaralı sıvama aparatı tasarlanmış, Simufact Forming® programı ile iki ve üç makaralı sıvama aparatı ile rotbaşının sıvama operasyonunun sonlu elemanlar analizi yapılmıştır. Üç makaralı sıvama aparatının, iki makaralı sıvama aparatına göre avantajları belirlenmiştir. Plastik şekillendirme esnasında ortaya çıkan gerilim ve gerinim analizleri yapılmış ve ayrıca rotbaşının sıvama formunda meydana gelen kesit incelmeleri analiz edilmiştir.

Bu çalışmada sıvamada irdelenen rotbaşının Siemens NX® programında çizilmiş tipik modeli Şekil 1.24'te verilmiştir.



Şekil 1.24. Sıvama operasyonu incelenen rotbaşı.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1. ÜÇ MAKARALI SIVAMA APARATININ TASARIMI

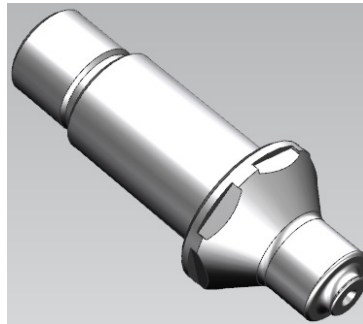
Üç makaralı sıvama aparatı ile rotbaşının sıvama operasyonunun sonlu elemanlar analizinin yapılabilmesi için öncelikle aparatın tasarımı Siemens NX® programında yapılmıştır. Aşağıda verilen Şekil 2.1’de üç makaralı sıvama aparatının 3 boyutlu modeli verilmiştir.



(a) Ön görünüş. (b) Patlatılmış montaj görünüşü. (c) Komple görünüş.

Şekil 2.1. Üç makaralı sıvama aparatının 3 boyutlu modeli.

Aşağıda verilen Şekil 2.2’de gerçekte sıvama işlemini gerçekleştiren makaranın 3 boyutlu tasarım modeli verilmiştir. Sıvama işlemi, bu üç makaranın rotbaşının gövdesinin sıvama kenarını aynı anda plastik deformasyon gerçekleştirmesi ile meydana gelmektedir.



Şekil 2.2. Makaranın 3 boyutlu modeli.

Üç makaralı sıvama aparatının ağırlığını azaltmak için aparatın gövdesi yüksek mukavemetin, korozyona direncin ve hafifliğin tercih edildiği yerlerde kullanılan

alüminyum 7075 malzemesinden imal edilmiştir. Sürekli olarak sürtünmeye maruz kalan makaralar ise ledeburitik iç yapıya ve %12 Krom'a sahip soğuk iş çeliği sınıfındaki yüksek aşınma mukavemetinin yanısıra yüksek sertlik değerinde iyi bir tokluğa sahip olan 1.2379 (X 155 CrVMo 12 1) kalite çelikten imal edilerek 60-63 Rockwell sertlik değeri aralığında ısıl işlem ile sertleştirilmiştir. Şekil 2.3'de imal edilmiş olan üç makaralı sıvama aparatının fotoğrafı verilmiştir.

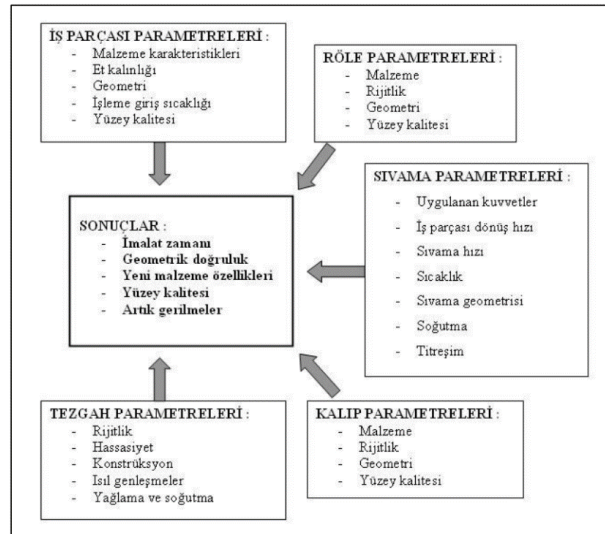


Şekil 2.3. Üç makaralı sıvama aparatının fotoğrafı.

2.2. SIVAMA OPERASYONUNUN SONLU ELEMANLAR ANALİZİ

Sıvama işlemleri, gerek en basiti olsun gerekse en karmaşık olanı, muhteviyatında olayı etkileyen birçok parametreyi barındırmaktadır ve bu parametrelerin büyük çoğunluğunun değeri sıvama işlemi esnasında her an değişmektedir. Bundan dolayı bugün için dünyada, herhangi bir sıvama işlemini tam olarak tanımlayabilen bir matematiksel ifade bulunmamaktadır. Sıvama işleminde etkin olan parametreler Çizelge 2.1 'de gruplandırılmıştır [5].

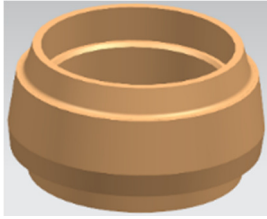
Çizelge 2.1. Sıvama İşleminde Etkin Olan Parametre Grupları.



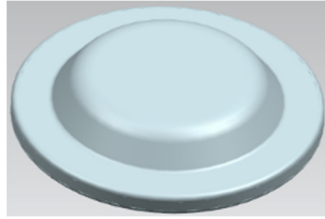
Sıvama işlemleri gibi hesaplanması zor fiziksel olaylar için Sonlu Elemanlar Yöntemi geniş kullanım olanakları sunmaktadır. Sonlu elemanlar yönteminin genel uygulanabilirliği, onu geniş bir sahada problemler için güçlü ve esnek bir kullanım aracı haline getirmiştir. Bu nedenle tasarım ve mekanik problemlerin çözümü için çok sayıda yapısal program geliştirilmiştir. Herhangi bir problem çözümlenirken dikkat edilecek en önemli husus, kullanılan sayısal analiz programının ve algoritmasının problem tipine uygunluk sağlamasıdır [30]. Sürekli olarak geliştirilen ve yenilenen farklı analiz programları, mühendisliğin hemen her dalındaki farklı problem tiplerinde (implicit, explicit, linear, non-linear v.s.) kullanılabilir [31].

2.2.1 Parçaların Modellenmesi

Rotbaşı ve ikili makara düzeni Şekil 2.4 a, b, c ve d’de gösterildiği gibi orijinal parçaların ölçülerine göre Siemens NX® yazılımı ile modellenmiştir. Sonlu elemanlar analizi esnasında çözüm süresini kısaltmak için Şekil 2.4’deki rotbaşı gövdesinin sap kısmı ile yarık bölgesi ve makaraların form verme işlemini gerçekleştiren bölgesi hariç diğer yataklama bölgeleri 3 boyutlu katı modellerden çıkarılmıştır.



(a) Gövde katı modeli.



(b) Kapak katı modeli.



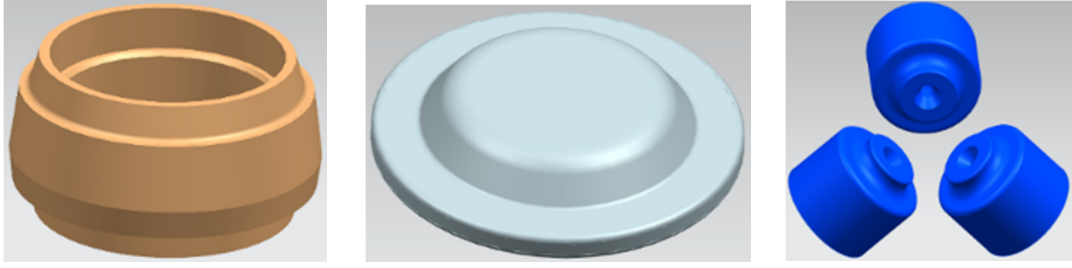
(c) İkili makara katı modeli.



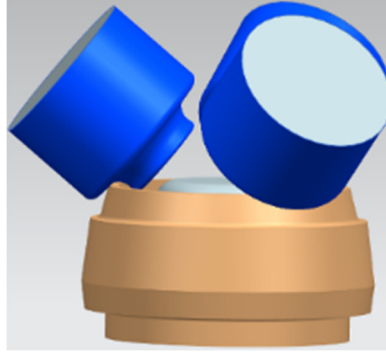
(d) Rotbaşının ikili makara ile birlikte montaj katı modeli.

Şekil 2.4. Rotbaşının ve ikili makara düzeninin 3 boyutlu modelleri.

Rotbaşı ve üçlü makara düzeni Şekil 2.5 a, b, c ve d’de gösterildiği gibi orijinal parçaların ölçülerine göre Siemens NX® yazılımı ile modellenmiştir. Sonlu elemanlar analizi esnasında çözüm süresini kısaltmak için Şekil 2.5’deki rotbaşı gövdesinin sap kısmı ile yarık bölgesi ve makaraların form verme işlemini gerçekleştiren bölgesi hariç diğer yataklama bölgeleri 3 boyutlu katı modellerden çıkarılmıştır.



(a) Gövde katı modeli. (b) Kapak katı modeli. (c) Üçlü makara katı modeli

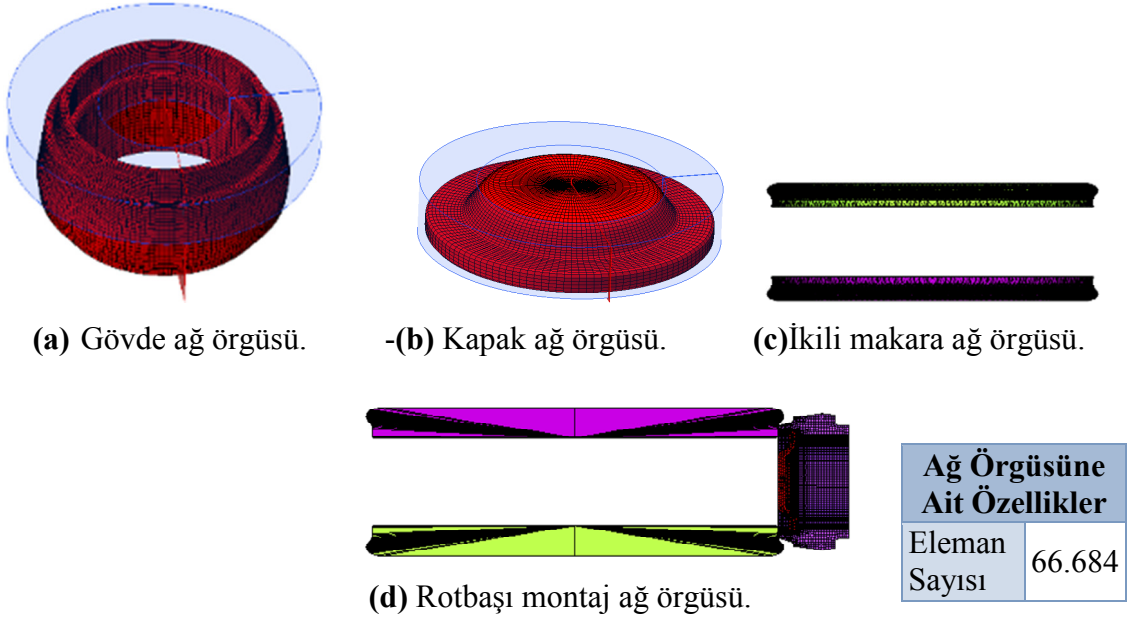


(d) Rotbaşının üçlü makara ile birlikte montaj katı modeli.

Şekil 2.5. Rotbaşının ve üçlü makara düzeninin 3 boyutlu modelleri.

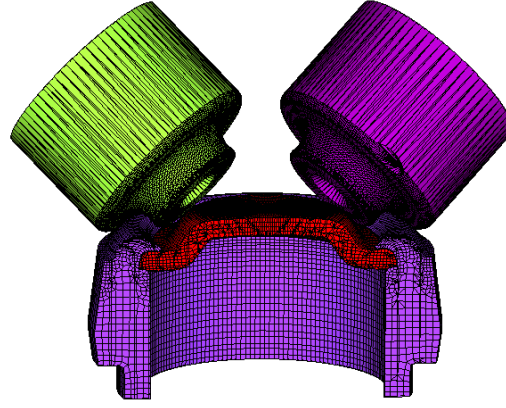
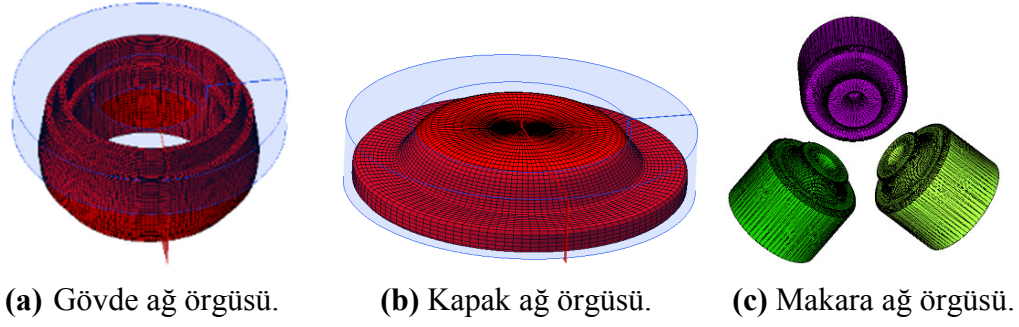
2.2.2 Rotbaşına ve Makaralara Ağ Örgüsü (Mesh) Atama

Rotbaşının gövdesine Simufact Forming® programında, makaralara Siemens NX® programında ağ örgüsü (mesh) ataması yapılmıştır. Ancak ağ örgüsünün boyutunu küçültmek çözüm işleminin süresini artırmasına rağmen çözüm sonucunun doğruluğunu arttırmaktadır. Bu nedenle daha sık bir ağ örgüsü oluşturulmuştur. Bu çalışmada Şekil 2.6 a ve b’de gösterildiği gibi gövde ve kapak için özel bir ağ örgüsü türü olan Ring Mesh Hexahedral element tipi atanmıştır ve gövde ağ elemanlarının boyutu 0,7 mm’dir. Analizler esnasında programın yeniden ağ oluşturma (remesh) özelliğini kullanabilmek için sıvama formunun gerçekleştirileceği sıvama kenarı bölgesinde Şekil 2.6 a ve b’deki mavi renkli kafes bölgesindeki ağ elemanlarının boyut 0,35 mm olarak atanmıştır. Şekil 2.6 c’de gösterilen makaraların ağ ataması Siemens NX® programında Tetrahedron ağ örgüsü ve ağ elemanlarının boyutu 0,01 mm olarak yüzey ağ örgüsü olarak atanmıştır.



Şekil 2.6. Rotbaşının ve ikili makara düzeninin sonlu elemanlar analizi için matematiksel ifadesi (ağ örgüleri).

Rotbaşının gövdesine Simufact Forming® programında, makaralara Siemens NX® programında ağ örgüsü (mesh) ataması yapılmıştır. Ancak ağ örgüsünün boyutunu küçültmek çözüm işleminin süresini artırmasına rağmen çözüm sonucunun doğruluğunu arttırmaktadır. Bu nedenle daha sık bir ağ örgüsü oluşturulmuştur. Bu çalışmada Şekil 2.7 a ve b’de gösterildiği gibi gövde ve kapak için özel bir ağ örgüsü türü olan Ring Mesh Hexahedral element tipi atanmıştır ve gövde ağ elemanlarının boyutu 0,7 mm’dir. Analizler esnasında programın yeniden ağ oluşturma (remesh) özelliğini kullanabilmek için sıvama formunun gerçekleştirileceği sıvama kenarı bölgesinde Şekil 2.7 a ve b’deki mavi renkli kafes bölgesindeki ağ elemanlarının boyut 0,35 mm olarak atanmıştır. Şekil 2.7 c’de gösterilen makaraların ağ ataması Siemens NX® programında Tetrahedron ağ örgüsü ve ağ elemanlarının boyutu 0,01 mm olarak yüzey ağ örgüsü olarak atanmıştır.

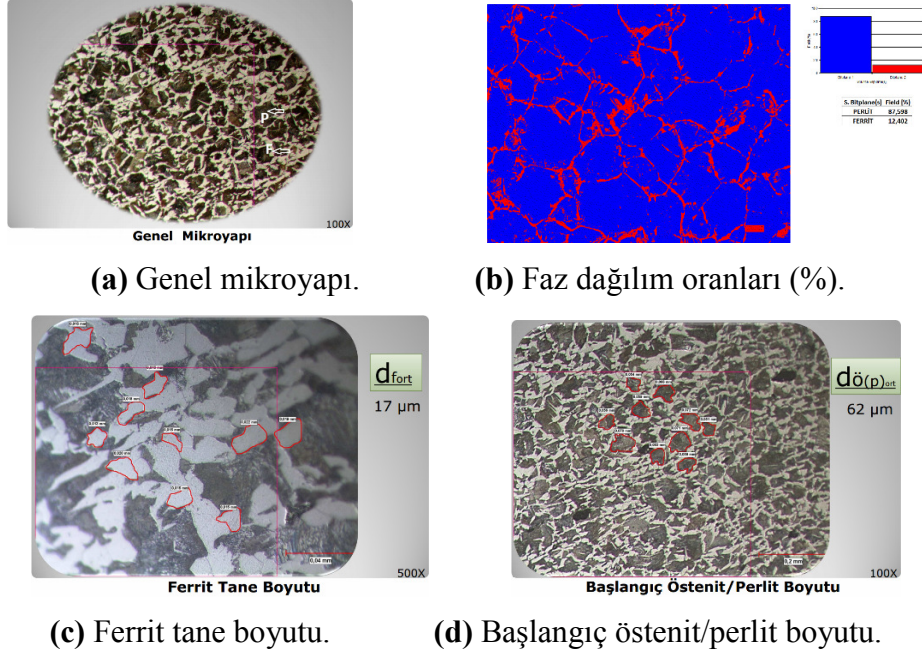


Ağ Örgüsüne Ait Özellikler	
Eleman Sayısı	66.684

Şekil 2.7. Rotbaşının ve üç makara düzeninin sonlu elemanlar analizi için matematiksel ifadesi (ağ örgüleri).

2.2.3 1040 Malzemesinin Malzeme Analizi ve Rotbaşına Malzeme Atama

TS EN ISO 643:2012 nolu çelikler için görünür tane büyüklüğünün mikrografik tayini standartına göre çapı 30 mm boyu 250 mm olan 1040 dolu malzeme indüksiyon fırınında 1100 °C 'de ısıtıldıktan sonra kenara alınarak soğutulmuş ve daha sonra boylamasına tam ortadan ikiye kesilmiştir. Kesilen numune kolay tutulması için bakalit içine gömülmüştür. Ardından zımbara makinesinde en kaba zımparadan, en ince zımparaya kadar zımparalanmıştır. Zımparalanmış numune 2 adet yumuşak keçe ile parlatılarak içinde %3 nitrik asit ve %97 alkol bulunan bir kap içersinde 2 sn tutulmuş ve yıkanarak, kurutulmuştur. Kurutulmuş numune mikroskop altında incelenerek Şekil 2.8'de gösterilen genel mikroyapı, faz dağılım oranları, ferrit tane boyutu, başlangıç östenit/perlit boyutu belirlenmiştir. Şekil 2.8 b'de verildiği gibi perlit oranı %87,598 ve ferrit oranı ise %12,402 olarak, Şekil 2.8 c'de ferrit tane boyutu ortalama 17 µm olarak, Şekil 2.8 d'de başlangıç östenit/perlit boyutu ise 62 µm olarak bulunmuştur.

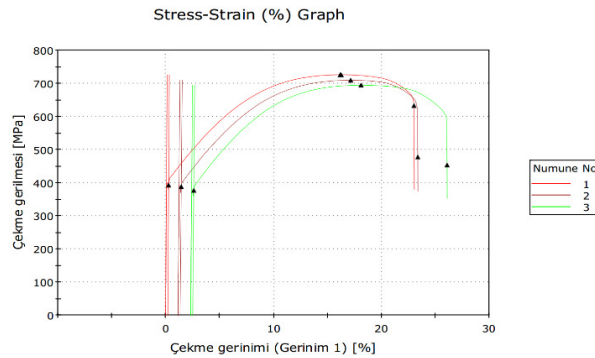


Şekil 2.8. Mikroyapı, faz dağılım oranları, ferrit tane boyutu, başlangıç östenit/perlit oranı.

Şekil 2.9’da fotoğrafı verilen 1040 malzemesinin çekme 3 adet numunesi hazırlanarak çekme cihazında Şekil 2.10’da gösterilen gerilim-gerinim eğrileri elde edilmiştir. Ayrıca Çizelge 2.2’de gösterilen 1040 malzemesinin çekme dayanımı, çekme uzaması, %0,2’deki akma dayanımı ve kopma uzaması değerleri elde edilmiştir. Çekme deneyleri TS EN ISO 6892-1 nolu metalik malzemeler için çekme deneyi standartına göre yapılmıştır. Malzemelerin akma dayanımını belirlemek için 3 adet çekme numunesi kullanılarak ortalama değerleri alınmıştır.



Şekil 2.9. 1040 malzemesinin çekme deney numunesi.



Şekil 2.10. 1040 malzemesinin gerilim-gerinim eğrileri.

Çizelge 2.2. 1040 Malzeme Çekme Deneyi Sonuçları.

	Çekme Dayanımı [MPa]	Çekme Dayanımındaki Kuvvet [kgf]	Çekme Uzaması [mm]	%0.2 Akma Dayanımı [MPa]	Kopma Uzaması [%]	Kopma Uzaması [mm]
1	725,73	5812,27	8,07	393,31	22,98	11,49
2	709,02	5678,42	7,98	388,82	22,19	11,10
3	693,83	5556,74	7,88	377,62	23,75	11,88

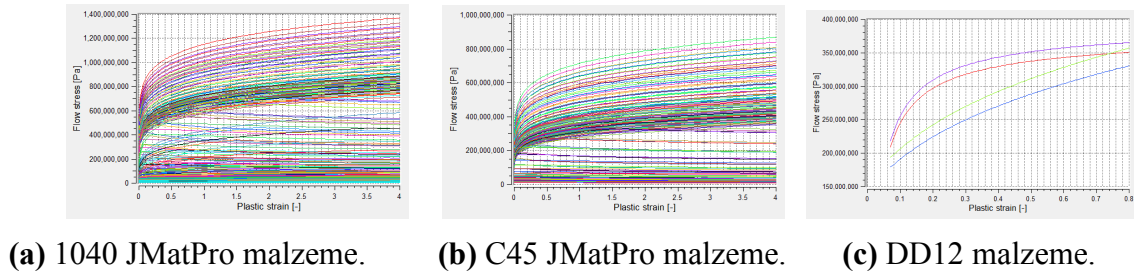
Gövdeye malzemenin yukarıdaki Çizelge 2.2’de verilen akma dayanımının ortalama değeri 387 MPa ve Çizelge 2.3’de verilen kimyasal özelliklerden hareket ile JMatPro® programında oluşturulan 1040 malzemesinin Simufact Forming® programında malzeme ataması yapılarak simülasyon sonuçları incelenmiştir. 1040 malzeme verisini oluşturuluncaya kadar ki dönemde 1040 malzemeye en yakın olarak Simufact Forming® programı içerisinde bulunan JMatPro® programında oluşturulmuş olan Çizelge 2.4’de kimyasal özellikleri verilmiş olan C45 malzemesi kullanılmıştır. Ancak rotbaşının gerçek malzemesi ile uyumlu olmadığı için nihai simülasyonlarda kullanılmamıştır. Kapak içinde Simufact Forming® programı içinde hazır olarak bulunan Erdemir’in 6223 kalite sacının uluslararası karşılığı olan DD12 malzemesinin ataması yapılmıştır. Şekil 2.11’de C45, 1040 ve DD12 malzemelerinin JMatPro® programından elde edilmiş Gerilim-Gerinim Eğrileri (Stress-Strain eğrileri) verilmiştir.

Çizelge 2.3. 1040 JMatPro Malzemesinin Kimyasal Özellikleri Tablosu.

C	Mn	Si	Cr	S	P	Kalan
0,391	0,77	0,242	0,191	0,0087	0,0089	98,388

Çizelge 2.4. C45 JMatPro Malzemesinin Kimyasal Özellikleri Tablosu.

C	Mn	Si	Cr	S	P	Kalan
0,44	0,66	0,22	0,15	0,029	0,022	98,479

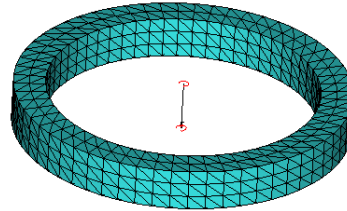


Şekil 2.11. 1040 JmatPro, C45 JMatPro, ve DD12 malzemelerinin gerilim-gerinim eğrileri.

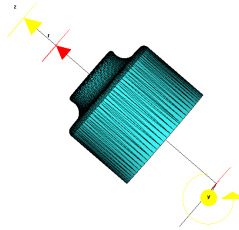
Gerçek durumda makaralar 1.2379 kalitede 60-63 Rockwell sertlik aralığında imal edildiklerinden sıvama işlemi esnasında deforme olmadıkları için sonlu elemanlar analizinde ısı iletimi olmaksızın rijit kalıp olarak tanımlanmıştır.

2.2.4 Sonlu Elemanlar Analizi İçin Yükleme ve Sınır Şartları

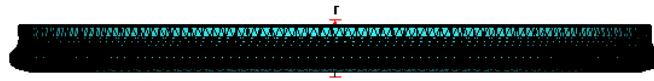
Simülasyonun ilk aşamalarında çözüm süresini kısaltmak için rotbaşının dönme devri 100 rpm girilerek sonlu eleman çözüm sonuçları elde edilmiştir. Optimum ilerleme miktarı belirlendikten sonra üç makaralı sıvama aparatında rotbaşının dönme devri 1000 rpm iki makaralı sıvama aparatında ise 700 rpm olarak girilerek tekrar sonlu elemanlar çözüm sonucu elde edilmiştir. Gerçek durumda dönme işlemini sıvama aparatları yapmaktadır ancak makaralara hem kendi ekseninde serbest dönüşü hemde tüm makaraların ortak ekseninde döndürebilmesine program izin vermediği için Şekil 2.12’de görüldüğü gibi aparat yerine gövde döndürülmüştür. Gövdeye dönme hareketi, gövdeye aynı zamanda ilerleme hareketini ileten tutucu tarafından iletilmektedir.



(a) Tutucunun Z dönme eksenini.



(b) Üç makaralı sıvama aparatının makaralarının serbest dönme eksenini.



(c) İki makaralı sıvama aparatının makaralarının serbest dönme eksenini.

Şekil 2.12. Tutucu ve makaraların dönme eksenleri.

İlk analizlerde kapak rijit olarak kabul edilmiştir. Ancak son yapılan analizde kapak deforme edilebilir olarak tanımlanmıştır ve gövde ile kapak arasına dokunma kontak tipi tanımlanarak analiz gerçekleştirilmiştir. Üç makaralı sıvama aparatı simülasyonunu oluşturan parçaların kontak tablosu aşağıdaki Çizelge 2.5’de verilmiştir.

Çizelge 2.5. Üç Makaralı Sıvama Aparatı Simülasyonunu Oluşturan Parçaların Kontak Tablosu.

GÖVDE	KONTAK KURULAN PARÇA	KONTAK YÖNÜ	KONTAK TİPİ
Gövde	Tutucu	1. 2. ye	Yapışık
Gövde	Makara1	1. 2. ye	Dokunma
Gövde	Makara2	1. 2. ye	Dokunma
Gövde	Makara3	1. 2. ye	Dokunma
Gövde	Kapak	1. 2. ye	Dokunma
Kapak	Gövde	1. 2. ye	Dokunma

Çizelge 2.6. İki Makaralı Sıvama Aparatı Simülasyonunu Oluşturan Parçaların Kontak Tablosu.

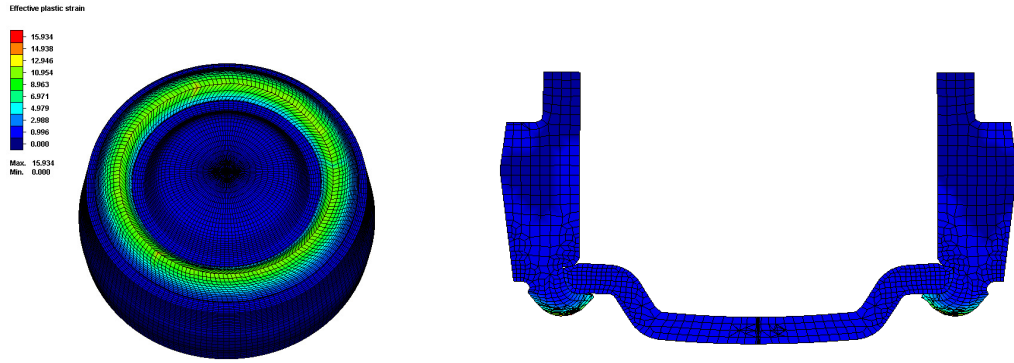
GÖVDE	KONTAK KURULAN PARÇA	KONTAK YÖNÜ	KONTAK TİPİ
Gövde	Tutucu	1. 2. ye	Yapışık
Gövde	Makara1	1. 2. ye	Dokunma
Gövde	Makara2	1. 2. ye	Dokunma
Gövde	Kapak	1. 2. ye	Dokunma
Kapak	Gövde	1. 2. ye	Dokunma

Yukarıdaki Çizelge 2.6’da iki makaralı sıvama aparatı simülasyonunu oluşturan parçaların kontak tablosu verilmiştir.

Simülasyonlar 20 °C’lik oda sıcaklığı koşullarında gerçekleştirilmiştir. Ayrıca rotbaşının içine sıkılan yağın sıvama operasyonu esnasından taşarak sıvama kenarlarına gelmesinden dolayı genellikle malzeme akış gerilimini aşmayan kontak gerilimleri ile sürtünme koşulları tanımlamak için kullanılan Coulomb sürtünme kanununa göre 0,1’lik sürtünme katsayı tanımlanmıştır.

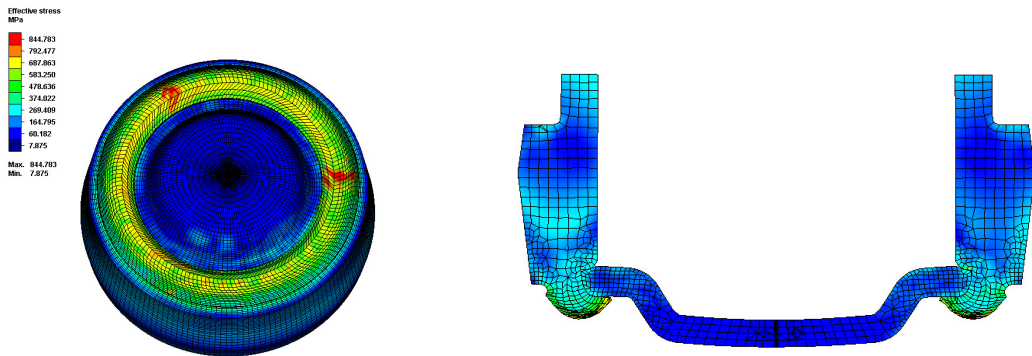
3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Şekil 3.1’de üç makaralı sıvama aparatı ile sıvanmış rotbaşının 5. simülasyonu sonucunda elde edilen 15,934 mm efektif plastik gerinim değeri verilmiştir ve kırmızı renkteki bölgeler maksimum efektif plastik gerinimin olduğu bölgeleri göstermektedir. Gürsel ve Çakır iki makaralı sıvama aparatı ile bir rotin sıvama operasyonunu inceleyerek sıvama ile monte edilen mekanizmalarda oluşan sıkıştırma kuvvetlerinin saptanması konusunda yaptıkları çalışmada 0,1 mm/dk hızda sıvadıkları C15E malzemesinden imal edilen rotinin 4 nolu testinde maksimum 1000 MPa efektif gerilimde yaklaşık 0,275 mm’lik gerinim değeri elde etmiştir [29].



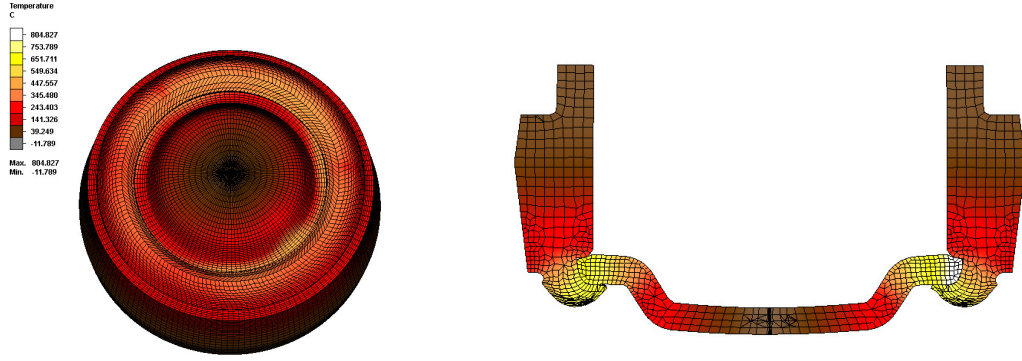
Şekil 3.1. Üç makaralı sıvama aparatı ile sıvanmış rotbaşının 5. simülasyon sonucu elde edilen efektif plastik gerinim değeri.

Şekil 3.2’de üç makaralı sıvama aparatı ile sıvanmış rotbaşının 5. simülasyonu sonucunda elde edilen 844,783 MPa maksimum efektif plastik gerilim değeri verilmiştir ve kırmızı renkteki bölgeler maksimum efektif plastik gerilimin olduğu bölgeleri göstermektedir.



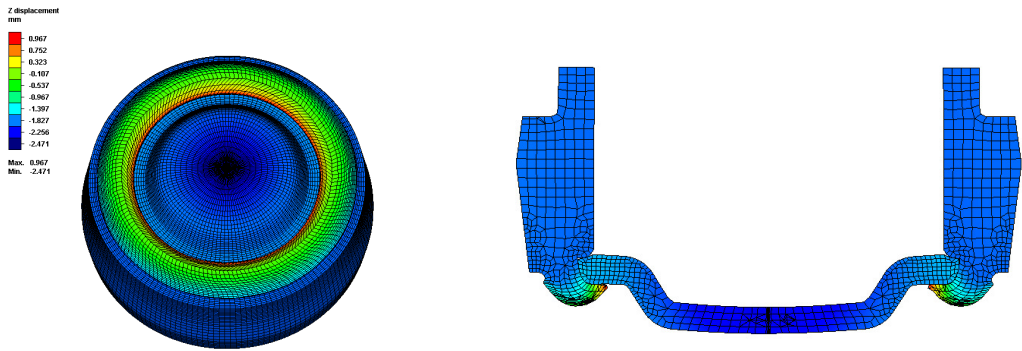
Şekil 3.2. Üç makaralı sıvama aparatı ile sıvanmış rotbaşının 5. simülasyon sonucu elde edilen maksimum efektif gerilim değeri.

Şekil 3.3’de üç makaralı sıvama aparatı ile sıvanmış rotbaşının 5. simülasyon sonucunda elde edilen 804,827 °C maksimum sıcaklık değeri verilmiştir ve beyaz renkteki bölgeler maksimum sıcaklığa ulaşan bölgelerdir. Burada yoğun deformasyon bölgelerinde sıcaklık 500-800 °C arasında değiştiği görülmektedir.



Şekil 3.3. Üç makaralı sıvama aparatı ile sıvanmış rotbaşının 5. simülasyon sonucu elde edilen maksimum sıcaklık değeri.

Şekil 3.4’de üç makaralı sıvama aparatı ile sıvanmış rotbaşının 5. simülasyon sonucunda elde edilen 0,967 mm z eksenini yönünde malzemenin yerdeğiştirme miktarı verilmiştir ve kırmızı renkli bölgeler z eksenini yönündeki maksimum yerdeğiştirme miktarını göstermektedir.



Şekil 3.4. Üç makaralı sıvama aparatı ile sıvanmış rotbaşının 5. simülasyon sonucu elde edilen z ekseninde malzemenin yerdeğiştirme miktarı.

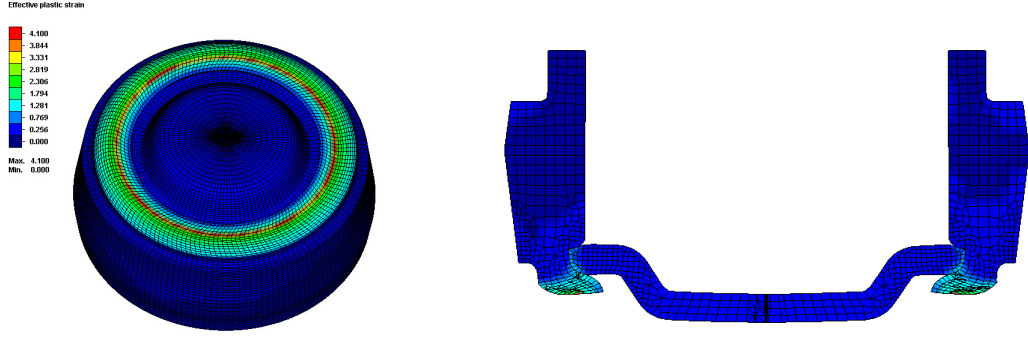
Rotbaşının üç makaralı sıvama aparatı ile yapılan simülasyon sonuçları Çizelge 3.1’de verilmiştir. 4. simülasyonda istenilen sonuçlar elde edilmiştir. Ancak gerçek sıvama operasyonunda kapakta deforme olduğu tespit edildiğinden, 5. simülasyonda kapak deforme edilebilir olarak ayarlanmıştır. Ayrıca gerçek durumda kullanılmakta olan 1040 malzemesinin kimyasal özelliklerinden ve akma dayanımından hareket ile JMatPro®

programında malzemenin her bir farklı sıcaklık durumundaki gerilim-gerinim eğrilerinin çıkarıldığı malzeme verisi oluşturularak yeniden simülasyon yapılmıştır. Bu simülasyon sonucunda gerçekte sıvamasını yaptığımız rotbaşları ile aynı sıvama formu sağlanabilmiştir.

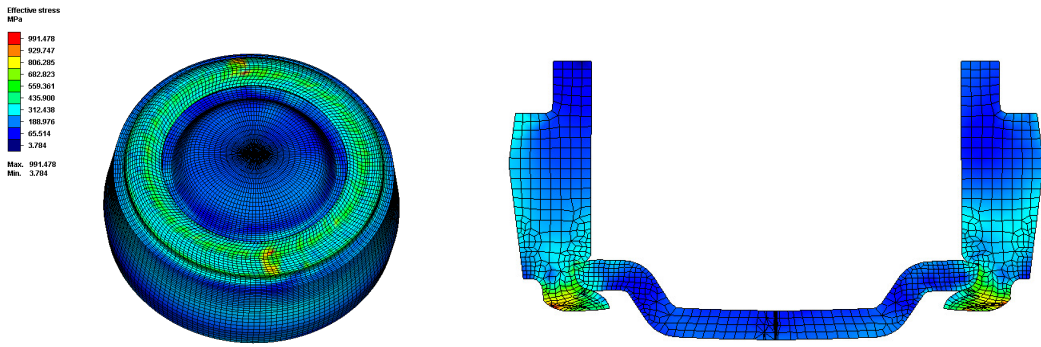
Çizelge 3.1. Rotbaşının Üç Makaralı Sıvama Aparatı İle Simülasyon Sonuçları Tablosu.

SIRA NO	ZAMAN (sn)	Z YÖNÜNDEKİ HIZ (mm/sn)	AÇISAL HIZ (Rpm)	MALZEME	KAPAK KALIP TİPİ	MAKSİMUM EFEKTİF GERİNİM DEĞERİ (mm)	MİNİMUM EFEKTİF GERİLİM DEĞERİ (MPa)	MAKSİMUM EFEKTİF GERİLİM DEĞERİ (MPa)	EFEKTİF GERİLİM DEĞERİ	SONUÇ
1	0,0	0	100	C45 (JMatPro)	İSİ İLETİMİ OLMASIZIN RIJİT KALIP	4,393	38,296	613,830		İLERLEME MİKTARI YETERLİ GELMİŞTİR. ANCAK AÇISAL HIZ (DÖNME HIZI) YETERLİ OLMAMASINDAN DOLAYI MAKARALAR GÖVDE ÜZERİNDE TAM 1 TURU TAMAMLAYAMADIĞI İÇİN GERÇEK DURUM İLE AYNI SIVAMA İŞLEMİ VE PLASTİK DEFORMASYON GERÇEKLEŞTİRİLEMEMİŞTİR.
	0,1	-2,12	100							
	1,0	-2,12	100							
	1,1	0	100							
	1,6	0	100							
2	0,0	-2,25	100	C45 (JMatPro)	İSİ İLETİMİ OLMASIZIN RIJİT KALIP	5,079	18,568	644,418		İLERLEME MİKTARININ VE AÇISAL HIZIN (DÖNME HIZININ) YETERLİ OLMAMASINDAN DOLAYI İSTENİLEN KAPAMA İŞLEMİ VE PLASTİK DEFORMASYON GERÇEKLEŞTİRİLEMEMİŞTİR.
	0,8	-2,25	100							
	0,8	0	100							
	1,3	0	100							
3	0,0	0	1000	C45 (JMatPro)	İSİ İLETİMİ OLMASIZIN RIJİT KALIP	11,368	36,159	586,869		İLERLEME MİKTARININ FAZLA OLMASINDAN DOLAYI MALZEME MAKARALARIN UÇLUCUNDA DIŞARI DOĞRU AKMIŞTIR. İSTENİLEN SIVAMA İŞLEMİ VE PLASTİK DEFORMASYON GERÇEKLEŞTİRİLEMEMİŞTİR.
	0,1	-2,12	1000							
	1,0	-2,12	1000							
	1,1	0	1000							
	1,6	0	1000							
4	0,0	0	1000	C45 (JMatPro)	İSİ İLETİMİ OLMASIZIN RIJİT KALIP	16,674	16,518	593,741		İLERLEME MİKTARI VE AÇISAL HIZ (DÖNME HIZI) YETERLİ OLDUĞUNDAN İSTENİLEN SIVAMA İŞLEMİ VE PLASTİK DEFORMASYON GERÇEKLEŞTİRİLMİŞTİR.
	0,1	-1,97	1000							
	1,0	-1,97	1000							
	1,1	0	1000							
	1,6	0	1000							
5	0,0	0	1000	1040 (JMatPro)	DEFORME EDİLEBİLİR KALIP	15,934	7,875	844,783		GERÇEK DURUMDA KAPAĞIN DA DEFORME OLDUĞU TESPİT EDİLDİĞİNDEN VE GERÇEK DURUMDA KULLANILAN 1040 MALZEMESİ KİMPASAL GİZELEKLERİ VE AKMA DAYANIMINDAN HAREKET İLE JMATPRO PROGRAMINDA MALZEME VERİSİ OLUŞTURULMUŞTUR. İLERLEME MİKTARI VE AÇISAL HIZ (DÖNME HIZI) YETERLİ OLDUĞUNDAN İSTENİLEN SIVAMA İŞLEMİ VE PLASTİK DEFORMASYON %100 GERÇEKLEŞTİRİLMİŞTİR.
	0,1	-1,97	1000							
	1,0	-1,97	1000							
	1,1	0	1000							
	1,6	0	1000							

Yukarıdaki üçlü sıvama aparatı için yapılan tüm analizler ikili sistem içinde yapılmıştır. İki makaralı sıvama aparatı ile sıvanmış rotbaşının simülasyon sonucunda elde edilen 4,10 mm efektif plastik gerinim değeri Şekil 3.5'te gösterilmiştir ve kırmızı renkteki bölgeler maksimum efektif plastik gerinimin olduğu bölgeleri göstermektedir Gürsel ve Çakır iki makaralı sıvama aparatı ile bir rotil sıvama operasyonunu inceleyerek sıvama ile monte edilen mekanizmalarda oluşan sıkıştırma kuvvetlerinin saptanması konusunda yaptıkları çalışmada 0,1 mm/dk hızda sıvadıkları C15E malzemesinden imal edilen rotilin 4 nolu testinde maksimum 1000 MPa efektif gerilimde yaklaşık 0,275 mm'lik gerinim değeri elde etmiştir [29]. Bu çalışmada da, benzer malzeme için analiz yapıldığında iki makaralı sıvama aparatı ile sıvanmış rotbaşının simülasyon sonucunda elde edilen 991,478 MPa efektif plastik gerilim değeri Şekil 3.6'da gösterilmiştir ve kırmızı renkteki bölgeler maksimum efektif plastik gerilimin olduğu bölgeleri göstermektedir.

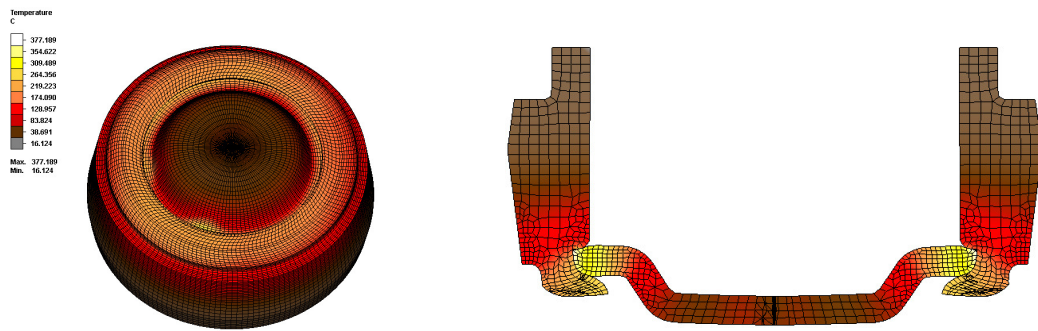


Şekil 3.5. İki makaralı sıvama aparatı ile sıvanmış rotbaşının simülasyon sonucu elde edilen efektif plastik gerinim değeri.



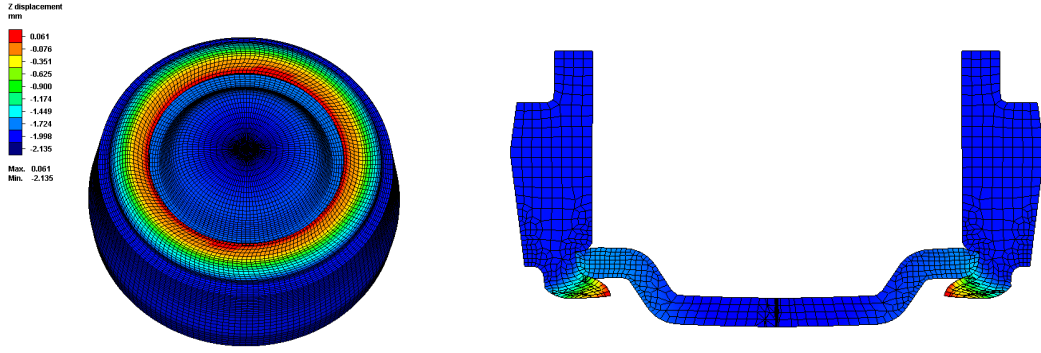
Şekil 3.6. İki makaralı sıvama aparatı ile sıvanmış rotbaşının simülasyon sonucu elde edilen efektif plastik gerilim değeri.

Ayrıca iki makaralı sıvama aparatı ile sıvanmış rotbaşının sıcaklık simülasyon sonucunda elde edilen 377,189 °C maksimum sıcaklık değeri elde edilmiştir ve beyaz renkteki bölgeler maksimum sıcaklığa ulaşan bölgelerdir (Şekil 3.7.)



Şekil 3.7. İki makaralı sıvama aparatı ile sıvanmış rotbaşının simülasyon sonucu elde edilen maksimum sıcaklık değeri.

Şekil 3.8’de iki makaralı sıvama aparatı ile sıvanmış rotbaşının simülasyon sonucunda elde edilen 0,061 mm z ekseninde malzemenin yerdeğiştirme miktarı verilmiştir ve kırmızı renkli bölgeler z eksenini yönündeki maksimum yerdeğiştirme miktarını göstermektedir



Şekil 3.8. İki makaralı sıvama aparatı ile sıvanmış rotbaşının simülasyon sonucu elde edilen z ekseninde malzemenin yerdeğiştirme miktarı.

Çizelge 3.2’de rotbaşının iki makaralı sıvama aparatı ile simülasyon sonuçları tablosu verilmiştir. Bu simülasyonda üç makaralı sıvama aparatından elde edilmiş bilgiler ışığında tek bir analizde gerçek durumdaki sıvama (plastik deformasyon) değeri elde edilmiştir.

Çizelge 3.2. Rotbaşının İki Makaralı Sıvama Aparatı İle Simülasyon Sonuçları.

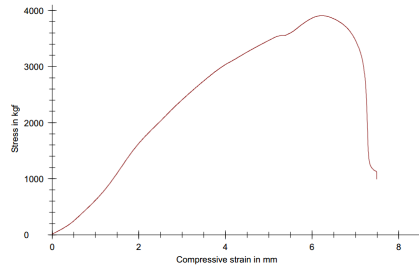
ZAMAN (sn)	Z YÖNÜNDEKİ HIZ (mm/sn)	AÇISAL HIZ (Rpm)	MALZEME	KAPAK KALIP TİPİ	MAKSİMUM EFEKTİF GERİLİM DEĞERİ (mm)	MINİMUM EFEKTİF GERİLİM DEĞERİ (MPa)	MAKSİMUM EFEKTİF GERİLİM DEĞERİ (MPa)	EFEKTİF GERİLİM DEĞERİ	SONUÇ
0,0	0	700	1040 (JMatPro)	DEFORME EDİLEBİLİR KALIP	4,10	3,784	991,478		GERÇEK DURUMDA KAPAĞINDA DEFORME OLDUĞU TESPİT EDİLDİĞİNDEN VE GERÇEK DURUMDA KULLANILAN 1040 MALZEMESİ KİMYASAL ÖZELLİKLERİ VE AKMA DAYANIMINDAN HAREKET İLE JMATPRO PROGRAMINDA MALZEME VERİSİ OLUŞTURULMUŞTUR. İLERLEME MİKTARI VE AÇISAL HIZ (DÖNME HIZ) YETERLİ OLDUĞUNDAN İSTENİLEN SIVAMA İŞLEMİ VE PLASTİK DEFORMASYON %100 GERÇEKLEŞTİRİLMİŞTİR.
0,1	-1,97	700							
1,0	-1,97	700							
1,1	0	700							
1,6	0	700							

İkili ve üçlü sıvama aparatının tipik analiz karşılaştırma değerleri Çizelge 3.3’te özet olarak verilmiştir. Çizelge 3.3’te görüldüğü gibi ikili sıvama aparatı ile maximum şekillendime gerilimi aşağı yukarı aynı değerde iken, ikili sistemde en yüksek şekillendirme deformasyonu 4 mm civarında, üçlü sıvama aparatında ise 16 mm civarındadır. Bu durum yaklaşık üç kattan daha fazla deformasyonun olduğunu göstermektedir. Bir başka deyişle ikili sıvama aparatında aynı deformasyon miktarını elde etmek için çok daha fazla gerilime ve deformasyon gücüne ihtiyaç olduğu söylenebilir. Çok daha düşük deformasyon değeri ise Z yönünde gözlemlenmiştir. Bu yöndeki sıvama deformasyonu ise kapak çıkış kuvvetini etkilediğinden sonuçları da kritiktir. Ayrıca artan sabit sürtünme elemanı sayısı sıcaklık değerlerindeki artışı, bu durum malzeme akma dayanımını düşürmek suretiyle her iki yöndeki deformasyon miktarını önemli ölçüde artırmıştır.

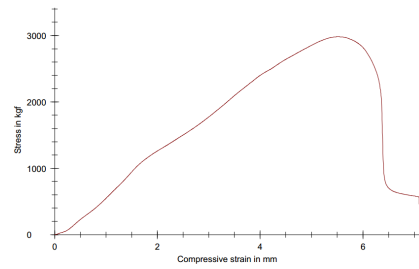
Çizelge 3.3. Rotbaşının İki ve Üç Makaralı Sıvama Aparatı İle Simülasyon Sonuçları.

Karşılaştırma Kriterleri	İkili Sıvama Tasarım Analiz Değerleri	Üçlü Sıvama Tasarım Analiz Değerleri
Maximum Gerilim (MPa)	991,478	844,783
Maximum Deformasyon (mm)	4,1	15,934
Z yönünde Deformasyon (mm)	0,061	0,967
Maximum Sıcaklık (°C)	337,189	804,827

Ayrıca iki ve üç makaralı sıvama aparatları ile sıvanmış rotbaşlarının TS 9444 nolu karayolu - taşıyıcı sistemler - rotül standartına göre yapılmış kapak çıkma testi sonucu gerilim-deformasyon değerleri Şekil 3.9 ve 3.10'da gösterilmiştir. İki sistemin karşılaştırma tablosu ise Çizelge 3.4' te verilmiştir. Çizelge 3.4'te görüldüğü gibi üç makaralı sıvama aparatı rotbaşlarının kapak çıkma kuvveti değerini %24 arttırmaktadır.



Şekil 3.9. Üç makaralı sıvama aparatı ile sıvanmış rotbaşlarının kapak çıkma değerleri.



Şekil 3.10. İki makaralı sıvama aparatı ile sıvanmış rotbaşlarının kapak çıkma değerleri.

Çizelge 3.4. Üç Makaralı Sıvama Aparatının Sağladığı Mukavemet Artışı.

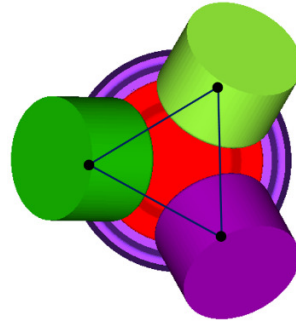
ÜÇLÜ SIVAMA	İKİLİ SIVAMA	Mukavemet Artışı [kgf]	Mukavemet Artışı [%]
Maksimum Kuvvet [kgf]	Maksimum Kuvvet [kgf]		
3908,25	2981,8	926,45	24

Çizelge 3.5'teki tabloya göre üç makaralı sıvama aparatı ile yapılan sıvamanın kesit kalınlığı %6,4 oranında ikili sıvama aparatına göre daha az kesit incelmesi göstermiştir. Özellikle mekanik kuvvetlere maruz kalan kesit değişimleri malzeme dayanımlarını doğrudan etkilediğinden, bu durum özellikle kapak çıkma kuvvetinde büyük avantaj sağlamıştır. Bir başka deyişle düşük kesit değerleri daha düşük mekanik özellikler anlamına gelmektedir.

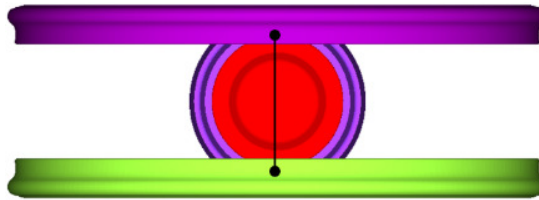
Çizelge 3.5. Sıvama Formundaki Kesitlerin İncelenme Tablosu.

	Üç Makaralı Sıvama Aparatı	İki Makaralı Sıvama Aparatı	Sıvama Formunun Et Kalınlığındaki Artış Oranı
Sıvama Formunun Et Kalınlığı Ölçüsü	1,682	1,581	6,4 %

Şekil 3.11'de ikili ve üçlü sıvama toplarının rotbaşına temas noktaları gösterilmiştir. Şekilden de görüleceği gibi iki makaralı sıvama aparatı rotbaşı üzerine iki noktadan temas ederken üç makaralı sıvama aparatı rotbaşına üç noktadan temas etmektedir. Bu durum kuvvetin üç noktaya eşit olarak dağılmasını ve üç makaralı sıvama aparatının, rotbaşının sıvama kenarlarına daha iyi bir şekilde temas ederek daha kaliteli sıvama işlemini gerçekleştirdiği simülasyon sonuçlarından elde edilmiştir.

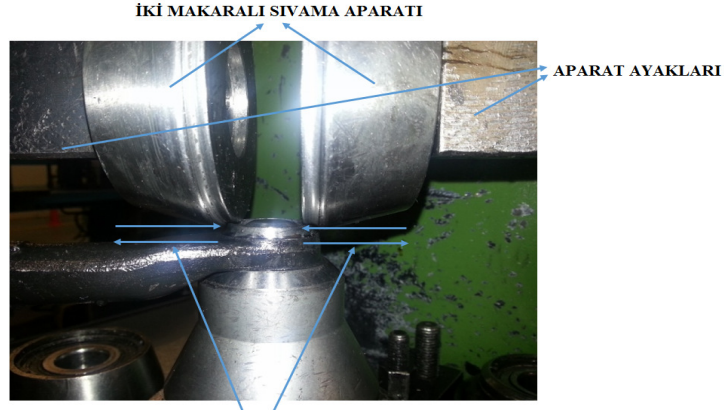


(a) Üç makaralı sıvama aparatının rotbaşına temas ettiği noktalar.



(b) İki makaralı sıvama aparatının rotbaşına temas ettiği noktalar.

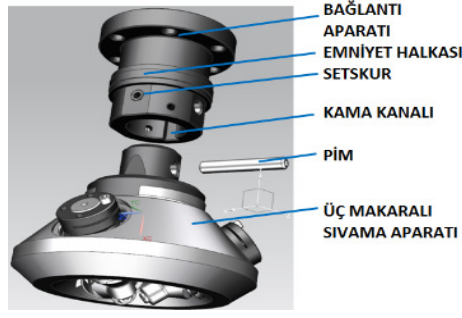
Şekil 3.11. Üç ve iki makaralı sıvama aparatlarının rotbaşlarına temas ettiği noktalar.



ESKİDEN OPERATÖR ROTBAŞININ SIVAMA KENAR ÇAPINA GÖRE
MAKARALARI AYARLAYABİLMEK İÇİN FOTOGRAFTAKİ GİBİ
APARAT AYAKLARINI İLERİ GERİ HAREKET ETTİRMEK ZORUNDA İDİ.

Şekil 3.12. İki makaralı sıvama aparatı ayar düzeni.

Şekil 3.12’de görüldüğü üzere eski durumda operatör iki makaralı sıvama aparatının makaralarını, rotbaşının sıvama kenar çapına ayarlayabilmek için aparatın civatalarını söktükten sonra aparatın ayaklarını ileri geri iterek ayarlamak zorundadır. Ayrıca operatör bu makaralar her ürüne uygun olmadığı için makaraları aparat üzerinden allen anahtar ile söküp yeni makaraları takmak zorundadır. Bu işlemler her ürün değişiminde operatörün 15 dk’lık bir süre kaybetmesine neden olmaktadır. Şekil 3.13’de görebileceği gibi birinci adımda üç makaralı sıvama aparatının üzerindeki kama, tezgah üzerinde bağlı konumda bulunan bağlantı aparatına kama kanalı yardımı ve el ile yerleştirilmektedir. İkinci adımda pim bağlantı aparatının ve üç makaralı sıvama aparatının deliğinde geçirilmektedir. Üçüncü adımda bağlantı aparatı üzerindeki setskur bir allen anahtar yardımı ile sıkılmaktadır. Dördüncü adımda setskurun hemen üzerinde bulunan emniyet halkası aşağıya doğru indirilerek 1000 rpm’de dönen aparattan pim yerinden çıkmaması garanti altına alınmaktadır. Böylece dört adımda aparat tezgaha bağlanmış olmaktadır. Sıvama aparatı üzerindeki makaraların sıvama radüslerinin tam ortasından geçen çemberin çapı, sıvanacak olan rotbaşının sıvama kenar çapı ile aynı olduğundan operatör hiçbir ayar işlemi yapmadan sıvama işlemine başlayabilmektedir. Bu tasarım, tezgah hazırlık zamanının %66 oranında azaltılmasına olanak sağlamaktadır. Bununla birlikte iki makaralı sıvama aparatının makara pozisyon ayarı için her ürün değişiminde hurdalamak zorunda olduğu ortalama 4 adet parçanın hurdaya ayrılması problemi de ortadan kaldırılmıştır. Yeni aparat düzeninde ayar olmadığı için ürün hurdası da olmamaktadır.



Şekil 3.13. Üç makaralı sıvama aparatı ve tezgah bağlantı aparatı 3 boyutlu modeli.

Çizelge 3.6 ve 3.7’de görülen üç makaralı sıvama aparatının kullanılmaya başlanması ile rotıl ve rotbaşların yıllık hurda maliyetinde 489.456 TL/yıl ve yıllık işçilik maliyetinde 28.137 TL/yıl, ve toplamda 517.593 TL/yıl fırsat maliyeti gerçek kazanca dönüştürülmüştür. Ayrıca dolaylı maliyetlerde bunların dışındadır. İş kaza riskleri, daha fazla güç ihtiyacı için fazla enerji, malzeme kusurlarından kaynaklanan müşteri memnuniyetsizlikleride de buna ilave edildiğinde, yapılan analiz, tasarım ve imalat, seri üretim yapan firma için çok ciddi bir tasarruf sağlamıştır.

Çizelge 3.6. Üç Makaralı Sıvama Aparatına Geçiş İle Kazanılan Yıllık Rotil Rotbaşı Hurda Maliyeti.

1 €	2.8137 ₺	(02.01.2015)					
Bir Hatta (Ekipte) Bir Ürün Değişimi Esnasında Yapılan Ortalama Hurda Sayısı	Bir Vardiyada Bir Hatta (Ekipte) Yapılan Ortalama Ürün Değişim Sayısı	Üç Vardiyadaki Toplam Rotil Rotbaşı Ekip Sayısı	Üç Vardiyada 8 Ekip İle Hurda Edilen Parça Sayısı	Bir Rotbaşın Ortalama Üretim Maliyeti (€)	Bir Rotbaşın Ortalama Üretim Maliyeti (TL)	2015 Yılındaki İş Günü Sayısı	Yıllık Kazanılan Toplam Rotil Rotbaşı Hurda Maliyeti (TL)
4	6	8	192	3 €	8,44 ₺	302 gün	489456 ₺

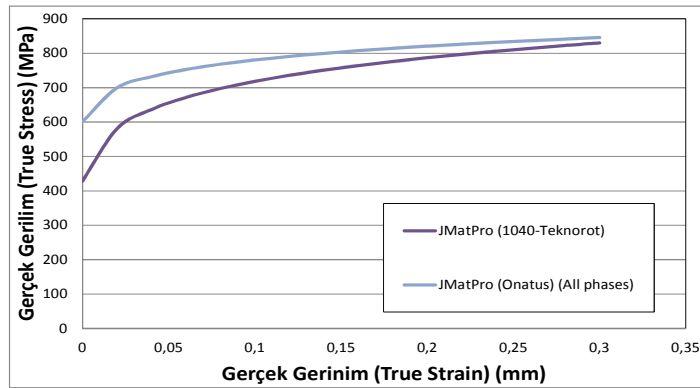
Çizelge 3.7. Üç Makaralı Sıvama Aparatına Geçiş İle Kazanılan Yıllık İşçilik Maliyeti.

Bir Operatörün İki Makaralı Sıvama Aparatı İle Bir Ayar İçin Harcadığı Ortalama Süre	Bir Operatörün Üç Makaralı Sıvama Aparatı İle Bir Ayar İçin Harcadığı Ortalama Süre	Yeni Aparat Tasarımı İle Kazanılan Süre	Bir Vardiyada Bir Hatta (Ekipte) Yapılan Ortalama Ürün Değişim Sayısı	Üç Vardiyadaki Toplam Rotil Rotbaşı Ekip Sayısı	Üç Vardiyada 8 Ekipden Kazanılan Süre	2015 Yılındaki İş Günü Sayısı	Yıllık Toplam Kazanılan Süre	Yıllık Toplam Kazanılan İşçilik Maliyeti
15 dk	5 dk	10 dk	6	8	480 dk	302 gün	144960 dk	28137 ₺
Bir İşçinin Bir Yıllık Giydirilmiş İşçilik Maliyeti (€):	10000 €							
1 €	2,8137 ₺							
Bir İşçinin Bir Yıllık Giydirilmiş Maliyeti (TL):	28137 ₺							
2015 Yılındaki İş Günü Sayısı:	302 gün							
1 Vardiyadaki Çalışma Süresi:	8 saat							
Bir İşçinin Bir Dakikalık Giydirilmiş Maliyeti (TL/dk):	0,19 ₺							

Üç makaralı aparat tasarımı gerçekleştirilirken aparatın sıvama tezgahına hızlı bir şekilde bağlanıp sökülebilmesi için Japonların hızlı kalıp bağlama sistemi olan ve adının İngilizce Single Minute Exchange of Die kelimelerinin baş harflerinden alan SMED çalışması uygulanmıştır. Yalın üretim metodlarından biri olan SMED tip, model, kalıp, aparat değişim ve ayarlarından kaynaklanan zaman kayıplarını tekli dakikalara (10 dakikanın altına) azaltmayı hedefleyen sistematik bir yaklaşımdır. Tekli dakikalarda kalıp değişimi (SMED) ile ikili sıvama aparatı ile minimum 15 dk yapılan sıvama tezgahı hazırlık süresi, rotbaşlarının sıvama kenar çaplarına göre aparatın sadece tek bir

pim ve setskur ile yerine yerleştirilebilmesini sağlayacak bağlantı aparatı tasarlanmıştır. Üç makaralı sıvama aparatı ile hazırlık süresi 5 dk'ya indirilmiş ve sıvama tezgahı hazırlık süresinde %66 oranında bir süre iyileştirmesi yapılmıştır.

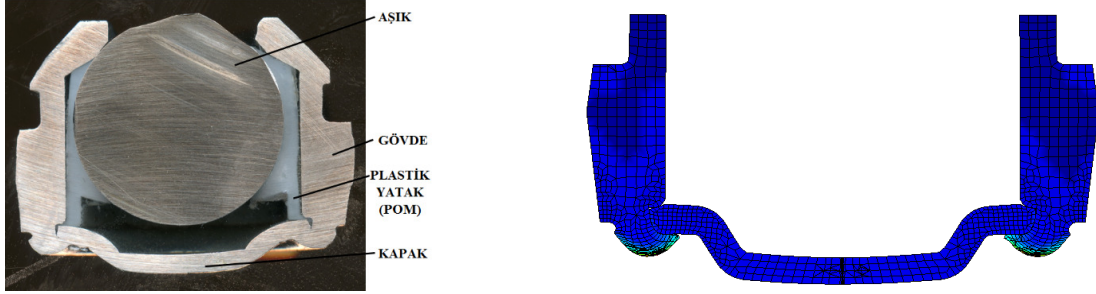
Bir rotbaşı üretiminde en kritik operasyon olan sıvama operasyonunun analizinde sonuçların gerçek durum ile aynı şekilde ortaya çıkması için kritik rol oynayan malzeme verisi, JMatPro® yazılımı ile elde edilmiş olan 1040 malzemesinin mikroyapı analizi sonucunda elde edilen veriler ışığında JMatPro® yazılımının yetkili satıcısı ve malzeme analiz şirketi olan ONATUS tarafından doğrulaması yapılmıştır. Şekil 3.14'deki grafikte JMatPro yazılımı ile oluşturulan 1040 malzeme verisinin, mikroyapı analizleri sonucunda elde edilen 1040 malzeme verisine yakın gerilim-gerinim değerleri verdiği görülmektedir. Bu çalışmada rotbaşının hem elastik şekil değiştirme bölgesindeki geri yaylanma özelliği yani doğrusal malzeme hareketi (linear analysis) hem de plastik şekil değiştirme bölgesindeki doğrusal olmayan (nonlinear analysis) malzeme hareketleri incelenmiştir.



Şekil 3.14. 1040 JMatPro malzeme verisi ve mikroyapı testleri sonucunda elde edilmiş 1040 malzeme verisi karşılaştırma grafiği.

Rotbaşının sıvama işleminin gerçek sıvama durumu ile aynı durumu yansıtabilmesi için analizde kullanılacak olan malzemenin tüm özelliklerinin simülasyon içerisinde kullanılan malzeme verisine yansıtılması gerektiği belirlenmiştir. Şekil 3.15'de fotoğrafı verilen üç makaralı sıvama aparatı ile sıvanmış olan rotbaşında görüldüğü gibi, sıvama işlemi esnasında kapakta da deformasyon gerçekleşmektedir. Bu tespit son analizde uygulanmış ve kapakta gözlemlenen deformasyonun gerçek durum ile aynı olduğu tespit edilmiştir. Bununla birlikte bu simülasyon çalışması sonucunda sıvama işlemini gerçekleştirmek için 23 kN'luk kuvvete ihtiyaç olduğu belirlenmiştir Yeni bir makine yatırımı yapmak istendiğinde gerekli olan servo pres kuvvetini belirlemek için bu tip simülasyon yazılımları yararlı olmaktadır. Son analizde 844,783 MPa gerilim ve 7,875

mm gerinim değeri sonucuna ulaşılmıştır. Bu çalışmanın neticesinde, üç makaralı sıvama aparatınının makaralarında radüslerin tasarım doğrulaması yapılmıştır. Makaranın radüs ölçülerinin sıvama formunun oluşumuna etkileri saptanmış ve analizden elde edilen sonuçlar ile makaraların tasarımında geliştirme çalışmaları gerçekleştirilebileceği bulgusuna ulaşılmıştır.

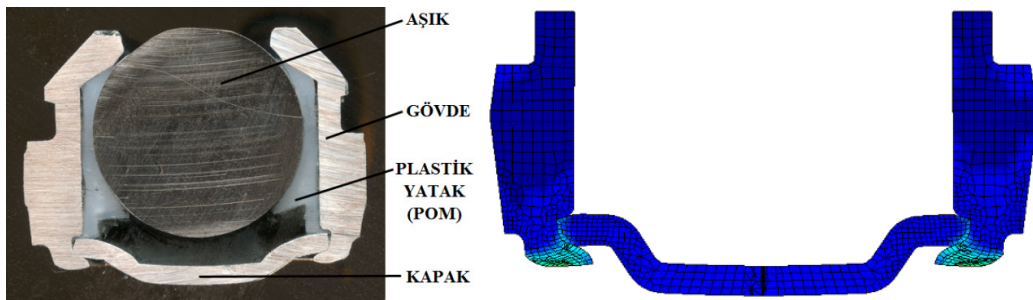


(a) Rotbaşının gerçek sıvama fotoğrafı.

(b) 5. Simülasyonun sonucu.

Şekil 3.15. Üç makaralı sıvama aparatı ile sıvanmış rotbaşının gerçek sıvama fotoğrafı ve 5. simülasyonun (nihai) sonucu.

Şekil 3.16’da fotoğrafı verilen iki makaralı sıvama aparatı ile sıvanmış olan rotbaşında göreceleği üzere, sıvama işlemi esnasında kapakta da deformasyon gerçekleşmektedir. Bu tespit son analizde uygulanmış ve kapakta gözlemlenen deformasyonun gerçek durum ile aynı olduğu tespit edilmiştir. Bununla birlikte bu simülasyon çalışması sonucunda sıvama işlemini gerçekleştirmek için 19,4 kN’luk kuvvete ihtiyaç olduğu belirlenmiştir. Analizde 991,478 MPa gerilim ve 4,1 mm gerinim değeri sonucuna ulaşılmıştır. Ayrıca gerçek durumda ve simülasyonda rotbaşının sıvama formunun iki makaralı sıvama aparatında tam olarak oluşmadığı tespit edilmiştir. Ayrıca üç makaralı sıvama aparatı ile sıvama işlemi esnasında üç makara olmasından dolayı rotbaşında sıcaklığın, iki makaralı sıvama aparatı ile sıvanan rotbaşından 427,638 °C daha yüksek olduğu ve bu sıcaklığın artışının plastik şekillendirme işlemini kolaylaştırdığı saptanmıştır.

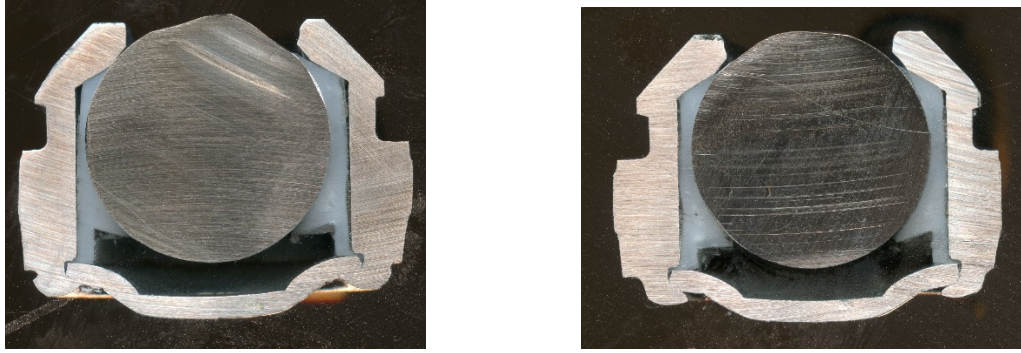


(a) Rotbaşının gerçek sıvama fotoğrafı.

(b) Simülasyonun sonucu.

Şekil 3.16. İki makaralı sıvama aparatı ile sıvanmış rotbaşının gerçek sıvama fotoğrafı ve simülasyonun sonucu.

Şekil 3.17’de üç makaralı sıvama aparatı ve iki makaralı sıvama aparatı ile sıvanmış rotbaşının fotoğrafları verilmiştir.



(a) Üç makaralı sıvama aparatı ile sıvama. (b) İki makaralı sıvama aparatı ile sıvama.

Şekil 3.17. Üç ve iki makaralı sıvama aparatı ile sıvanmış rotbaşının gerçek sıvama fotoğrafları.

Yukarıdaki sonuçlara göre, iki makaralı sıvama aparatı ile yapılan sıvama gerilim değeri, üç makaralı sıvama aparatı ile yapılan sıvama gerilim değerinden daha yüksektir. Bunun nedeni iki makaralı sıvama aparatı haddelme işlemi yaparak sıvama formunu oluşturmaktadır. Haddelme yapılarak oluşturulan sıvama formunda sıvama kenarlarında çatlak ya da yırtılma görülme riski yüksektir. Ancak üç makaralı sıvama aparatında, istenildiği gibi yaklaşık R3 mm’lik bir radüs oluşturularak plastik şekil verme işlemi gerçekleştirildiği için rotbaşının sıvama formuna mukavemet kazandırmaktadır. Ayrıca üç makaralı sıvama aparatı ile yapılan sıvama Şekil 3.18’de verilen ezik, çatlak, yırtılma, sıvama formunun tam oluşmaması gibi sıvama hatalarının oluşmasına da engel olarak rotbaşının üretim kalite seviyesinin artmasına olanak sağlamaktadır.



Şekil 3.18. İki makaralı sıvama aparatı ile sıvanmış rotbaşındaki bir sıvama hatası.

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada üç makaralı sıvama aparatının tasarım ve imalatı yapılmış ve iki makaralı sıvama aparatına göre avantajları ve üstünlükleri belirlenmiştir. Bu bağlamda aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

1. İki ve üç makaralı rotbaşı sıvama aparatı tasarım programı ile tasarlanıp, sonlu elemanlar bilgisayar programı ile analizleri yapıldıktan sonra imalatı gerçekleştirilmiştir.
2. Yapılan analizlerde ikili ve üçlü tasarımlarda yaklaşık aynı gerilim değerlerinde; iki makaralı sıvama aparatı için en yüksek 4,1 mm deformasyon değeri, en yüksek 337 °C lik sıcaklık değeri elde edilirken, üç makaralı sıvama aparatı tasarımında bu değerler 16 mm ve 805 °C olmaktadır. Bu daha düşük şekillendirme kuvvetine ihtiyaç duyulacağı anlamına gelmektedir.
3. Bu çalışmada tasarlanıp üretilen, üç makaralı sıvama aparatı ile sıvanan rotbaşlarının kapak çıkma kuvveti değeri %24 oranında artmıştır.
4. Üç makaralı sıvama aparatı ile yapılan sıvama işleminde, iki makaralı sıvama aparatına göre %6,4 oranında daha az kesit incelmeleri gözlenmiştir.
5. Üç makaralı sıvama aparatı ile tezgah hazırlık zamanı %66 oranında azaltılmıştır.
6. Üç makaralı sıvama aparatının kullanılmaya başlanması ile rottil ve rotbaşların yıllık hurda maliyetinde 489.456 TL/yıl'lık ve yıllık işçilik maliyetinde 28.137 TL/yıl'lık, ve toplamda 517.593 TL/yıl'lık fırsat maliyeti gerçek kazanç dönüştürülmüştür. Ayrıca dolaylı maliyetlerde bunların dışındadır.
7. Üç makaralı sıvama aparatı ile ezik, çatlak, yırtılma, sıvama formunun tam oluşmaması gibi sıvama hatalarının oluşmasına da engel olunmuş ve rotbaşının üretim kalite seviyesinin artmasına olanak sağlanmıştır.
8. Bu çalışmanın devamında sıvama operasyonu ile rotbaşının içinde bulunan aşık ve yatağın kaç kgf'lik yük altında sıkıştığını ve rotbaşı gövdesi içerisinde ne kadarlık gerilim oluştuğu belirlenerek, rotbaşının kontak analizi ve tork değeri belirleme işlemlerinin incelenmesi yapılabilir.

5. KAYNAKLAR

- [1] Akkurt M., İ.T.Ü. Makine Fakültesi, Makine Bilgisi, *Birsen Yayınevi*, İstanbul, (1997).
- [2] *The Spinning and Flow Forming of Wheels (3rd Edition)*, Leico GmbH & Co., Ahlen, (1996).
- [3] Gün, B., Sıvama Yöntemleri ve Sıvama Makinesi Tasarımı, *Yüksek Lisans Tezi*, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, (2007).
- [4] Vural, M., EÜT 231 Üretim Yöntemleri, Ders Notu, İTÜ Makine Fakültesi.
- [5] M. Runge, Spinning and Flow Forming, Verlag Moderne Industrie, Lech, (1993).
- [6] Durgun, İ., Doruk, E., Çok Noktalı Şekillendirme İle Parça Üretimi, Mühendislik ve Teknoloji Bilimleri Dergisi, Bartın Üniversitesi, Cilt 2, 2 (2014) 81-109.
- [7] Arıkan, A. S., Sonlu Elemanlar Metodunun Mühendislik Uygulamaları, Makine Mühendisleri Odası Seminer Notları, 35.
- [8] Finite Element Technology in Marc, Marc® 2013 Volume A: Theory and User Information, (2013) 829-830.
- [9] Walczyk, D. R., Lakshmikanthan, J., Kirk, D. R., Development of Reconfigurable Tool for Forming Aircraft Body Panels, *Journal of Manufacturing Systems*, 17 (1998) 287-296.
- [10] Li, M. Z., Cai, Z.Y., Sui, Z., Yan, Q.G., Multi-Point Forming Technology for Sheet Metal Parts, *Journal of Materials Processing Technology*, 129 (2002) 333-338.
- [11] Li, Q., Lu, C., Fu, W., Tieu, K., Li, M., Gong, X., Optimization of Cushion Conditions in Micro Multi-Point Sheet Forming, *Journal of Materials Processing Technology*, 212 (2012) 672-677.
- [12] Maier, C., Banu, M., Paunoiu, V., Sheet Metal Forming Analysis with Multi-Point Reconfigurable Die Using Data Mining Technique, University of Galati, (2007) ISSN 1221-4566,
- [13] Fuxing, T., Mingzhe, L., Zhongyi, C., Xiangji, L., Formability Analysis on The Process of Multi-Point Forming for Titanium Alloy Retiary Sheet, *Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 41 (2009) 1059-1065.
- [14] Liu, W., Jia, S.S., Zhang, C. M., Li, M. Z., Generation and Suppression of Local Severe Plastic Deformation in Sectional Multi-Point Forming, *Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 32 (2007) 705-710.

- [15] Liu W., Yang, Y.Y., Li, M. Z., Numerical Simulation of Multi-Point Stretch Forming and Controlling on Accuracy of Formed Workpiece, *Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 50 (2010) 61-66.
- [16] Wang, S., Cai, Z., Li, M., Numerical Investigation of The Influence of Punch Element in Multi-Point Stretch Forming Process, *Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 49 (2010) 475-483.
- [17] Paunoiu, V., Cekan, P., Gavan, E., Nicoara, D., Numerical Simulations in Reconfigurable Multipoint Forming, *Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 1 (2008) 181-184.
- [18] Paunoiu, V., Teodor, V., Epureanu, A., Spring Back Compensation in Reconfigurable Multipoint Forming, Proceedings of The 8th WSEAS International Conference on System Science and Simulation in Engineering, (2014) Greece.
- [19] Emmens, W. C., Sebastiani, G., Van Den Boogaard, A. H., The Technology of Incremental Sheet Forming – A Brief Review of The History, *Journal of Materials Processing Technology*, 210 (2010) 981-997.
- [20] Dai, K., Wang, Z. R., Fang Y., CNC Incremental Sheet Forming of an Axially Symmetric Specimen and The Locus of Optimization, *Journal of Materials Processing Technology*, 102 (2000) 164-167.
- [21] Wang, S., Cai, Z., Li, M., Lan, W., Numerical Simulation on The Local Stress and Local Deformation in Multi-Point Stretch Forming Process, *Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 60, 9 (2011) 901-911.
- [22] Paunoiu, V., Epureanu, A., Nicoara, D., Ciocan, O., A Review of the Sheet Metal Forming Methods Using Reconfigurable Dies, *Technologies in Machine Building*, (2006) 45-50.
- [23] Cai, Z., Li, M., Optimum Path Forming Technique for Sheet Metal and its Realization in Multi-Point Forming, *Journal of Materials Processing Technology*, 110 (2001) 136-141.
- [24] Kormaz, Z., Gavas, M., Sac Metallerin Çok Noktalı Derin Çekme Yöntemiyle Şekillendirilmesi, *Teknoloji*, 3 (2005) 271-278.
- [25] Jurisevic, B., Kuzman, K., Junkar, M., Water Jetting Technology: A Alternative in Incremental Sheet Metal Forming, *Journal of Materials Processing Technology*, 31 (2006) 18-23.

- [26] Okoye, C. N., Jiang, J. H., Hu, Z. D., Application of Electromagnetic-Assisted Stamping (EMAS) Technique in Incremental Sheet Metal Forming, *Journal of Machine Tools & Manufacture*, 46 (2006) 1248-1252.
- [27] Qian, D., Mao, H., Deng, J., and Yue, J., Processing Optimization for Large Spherical Valve body based on FE Simulation, Science Direct, *Procedia Engineering* 81 (2014) 2481-2487.
- [28] Şanay, B., Sac Metal Şekillendirmesinde Plastik Kararsızlık ve Şekillendirme Limitlerinin Belirlenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, (2010).
- [29] Gürsel, K.T., ve Çalır, S., Sıvama ile Monte Edilen Mekanizmalarda Oluşan Sıkıştırma Kuvvetlerinin Saptanması, *Mühendislik Bilimleri Dergisi*, Pamukkale Üniversitesi, Cilt 17, 3 (2011) 143-156.
- [30] Owen, D.R.J., and Hinton, E., *Finite Elements in Plasticity Theory and Practice*, Pineridge Press Limited, (1982).
- [31] Kobayashi S., Oh, S., and Altan, T., *Metal Forming and the Finite Element Method*, Oxford University Press, (1989).

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : Hakan KUTLAK
Uyruğu : TC
Doğum tarihi ve yeri : 04.06.1979 - ESKİŞEHİR
Telefon : 0 536 953 64 74
Faks :
E-posta : hkutlak@gmail.com

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Yüksek Lisans	Düzce Üniversitesi	2015
Lisans	Eskişehir Osmangazi Üniversitesi	2001
Lise	Yunus Emre Teknik Lisesi	1997

İş Deneyimi (Toplam iş deneyimi süresi 11 yıl 7 aydır.)

Yıl	Yer	Görev
2011-2015	Teknorot Otomotiv Ürünleri San. ve Tic.AŞ.	İş Analiz Sorumlusu
2011-2010	Merkotek Otomotiv San. Tic.AŞ.	Ürün Geliştirme ve Metot Müdürü
2010-2009	Candy Hoover(Renta Elek. Ev Alet.)Yeni Ürün Devreye Alma Uzmanı	
2009-2008	FIAT – TOFAŞ	Yeni Ürün Devreye Alma Uzmanı
2003-2008	Arıkan Kriko ve Makine San.Tic.AŞ.	Metot Şefi

Yabancı Dil

İngilizce (YDS : 61,25)

Yayınlar

1. Kutlak, H., Uygur, İ., Polietilen Rotil Yatağının Çekme Kuvveti Altında ANSYS İle Mukavemet Analizi, *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 1 (2013) 39-46.
2. Kutlak, H., Uygur, İ., Ticari Araç Sac Salıncak Düzeninin Sonlu Elemanlar Metodu ile Yorulma Analizi, *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 2 (2014) 235-250.
3. Kutlak, H., Uygur, İ., Üç Makaralı Sıvama Aparatı ile Rotbaşının Sıvama Prosesi Analizi Makalesi, *Düzce Üniv. İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi*, 1 (2015) 57-64.