

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**DÖVME KALIPLARINDA KALIBIN DOLMASINI
ETKİLEYEN FAKTÖRLERİN İNCELENMESİ VE SONLU
ELEMENLAR YÖNTEMİ İLE AKIŞ ANALİZLERİNİN
YAPILMASI**

Mak. Müh. Savaş ADİLOĞLU

F.B.E. Makine Mühendisliği Anabilim Dalı İmal Usulleri Programında Hazırlanan

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı: Prof. M. Emin YURCİ

İSTANBUL, 2008

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ.....	v
ŞEKİL LİSTESİ	vi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	x
ÖNSÖZ.....	xi
ÖZET.....	xii
ABSTRACT	xiii
1. GİRİŞ	1
1.1 Açık Kalıpla Dövme.....	1
1.2 Kapalı Kalıpla Çapaklı ve Çapaksız Dövme.....	4
1.3 Hassas Dövme	7
1.4 Dövme Haddeleri İle Şekillendirme.....	9
1.5 Orbital Dövme.....	12
1.6 İzotermal Dövme.....	13
1.7 Radyal Dövme.....	14
1.8 Yüksek Enerjili Dövme	16
1.8.1 Zaman Bağımlılığı.....	17
1.8.2 Sıcaklık Bağımlılığı.....	18
1.9 Damgalama.....	19
1.10 Yatay Dövme.....	20
1.10.1 Yatay Dövme Kuralları	21
1.11 Dövme Yönteminin Avantajları	22
1.11.1 Parça Bütünlüğü	22
1.11.1.1 Yönelimsel Mukavemet	22
1.11.2 Tanecik Akışı Karşılaştırması	23
1.11.3 Parça Esnekliği.....	24
1.11.4 Ekonomik Avantajları	25

2.	SONLU ELEMENLAR YÖNTEMİ	26
2.1	Çeşitli Yapısal Prosedürler İçin Genel Eşitlikler	26
2.2	Sistem ve Eleman Rijitlik Matrisleri	26
2.3	Yük Vektörleri.....	28
2.4	Lineer Olmayan Etkiler	28
2.4.1	Lineer Olmayan Malzeme Etkileri	28
2.4.2	Geometrik Süreksizlikler.....	29
2.4.3	Lineer Olmayan Sınır Koşulları	29
2.5	Çözüm Prosedürleri	29
2.6	Gerilim Analizleri İçin Yakınsama Kontrolleri	30
2.6.1	Hata Kontrolü	31
2.6.2	Deplasman Kontrolü	31
2.7	Tanımsızlık Oranı.....	32
2.8	Lineer Denklemlerin Çözümü	33
2.8.1	Direkt Metodlar	33
2.8.2	İteratif Metodlar	33
2.8.3	Ön Şartlandırıcılar	34
2.8.4	Depo Metodları	34
2.8.5	İteratif Çözücüler.....	35
2.8.6	Temel Teori	35
3.	SONLU ELEMENLAR PAKET PROGRAMI İLE MODELLEME SÜRECİ	37
3.1	Yapılacak İş Çeşidinin Seçilmesi	37
3.1.1	Eksenel Simetrik Analiz.....	38
3.1.2	İki Boyutlu Analiz.....	39
3.1.3	Üç Boyutlu Analiz.....	39
3.2	CAD Arayüzü.....	39
3.3	Ağ Üretimi.....	41
3.3.1	Direkt Ağ Yapım Tekniği	43
3.3.2	Geometrik Ağ Yapım Tekniği.....	43
3.4	Malzeme Özellikleri	44
3.5	Başlangıç ve Sınır Koşulları.....	45

3.6	Kontak.....	47
3.7	Yeniden Ağ Oluşturma.....	48
3.7.1	İki Boyutlu Yeniden Ağ Oluşturma	49
3.7.2	Üç Boyutlu Yeniden Ağ Oluşturma	49
3.8	Yükleme Durumu ve İş	50
3.9	Sonuçlar.....	51
4.	KALIP BOŞLUĞUNUN DOLDURULMASINI ETKİLEYEN FAKTÖRLER.....	54
4.1	Ön Şekillendirme Dizaynı	54
4.2	Sürtünme ve Yağlama	58
4.3	Dövme Sıcaklığı.....	62
4.4	Kalıp Sıcaklığı ve Yüzeyi	63
4.5	Dövülebilirlik ve Akma Dayanımı	64
4.6	Şekil ve Boyut Faktörleri	67
5.	ANALİZLER	70
5.1	Birinci Analiz	70
5.2	İkinci Analiz.....	78
5.3	Üçüncü Analiz.....	84
6.	SONUÇLAR	89
	KAYNAKLAR.....	86
	ÖZGEÇMİŞ	92

SİMGE LİSTESİ

d	Çubuğun çapı
D	Çubuğun gireceği kalıbın iç çapı
ℓ	Çubuğun kalıp dışında kalan serbest kısmının uzunluğu
m	Sürtünme faktörü
p	Kalıptaki normal basınç
R_{max}	Maksimum yüzde kesit daralması
s	Çapak kalınlığı
σ_A	Akma gerilimi
τ_s	Ortalama sürtünme gerilimi
K	Sistemin rijitlik matrisi
u	Nodal deplasman
f	Kuvvet vektörü
ϵ_{el}	Elemanın gerinimi
μ_{el}	Elemanın nodal deplasman vektörü
β	Gerinim-deplasman ilişkisi
L	Gerilim-gerinim ilişkisi
σ_{el}	Elemanın gerilim değeri
K^{el}	Elemanın rijitlik matrisi
V^{el}	Elemanın hacmi
C^{el}	Kapasite matrisi
f_{point}	Noktasal yük vektörü
$f_{surface}$	Yüzeye yayılı yük vektörü
f_{body}	Hacimsel yük vektörü
f^*	Diğer yük tipleri için kullanılan notasyon
p	Basınç
du	Artımlı deplasman
df	Artımlı kuvvet vektörü
I	Dahili nodal yük vektörü
F	Kuvvet vektörü
TOL_1	Kontrol toleransı
$\ F\ _\infty$	F'in en yüksek gerçek değerdeki parçası
∂u	Deplasman iterasyon vektörü
R	Tanımsızlık oranı
C	Sistem çözümü sonucu çıkan en büyük değer ile en küçük değer arasındaki oran

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 1.1 Açık kalıpla dövme kalıpları	2
Şekil 1.2 Yığma işlemi	3
Şekil 1.3 Uzatma başlıkları	3
Şekil 1.4 Çentik açılarak yapılan bir uzatma	4
Şekil 1.5 Halka çapı büyütme	4
Şekil 1.6 Kapalı kalıpla çapaklı dövme	5
Şekil 1.7 Biyel kalıp seti	6
Şekil 1.8 Kapalı kalıpla çapaksız dövme	7
Şekil 1.9 Hassas dövme kalıpları	8
Şekil 1.10 Dövme haddeleriyle şekillendirme	10
Şekil 1.11 Matrislerin açık konumu	11
Şekil 1.12 Matristeki farklı gravürler ve şekillendirme kademeleri	11
Şekil 1.13 Çapraz kamalı haddeleme	11
Şekil 1.14 Orbital dövme	12
Şekil 1.15 Orbital dövme alıştırmaları	12
Şekil 1.16 Orbital dövme ile imal edilen parçaların akış şekilleri	13
Şekil 1.17 Bir milin dört çekiçle radyal dövülmesi	14
Şekil 1.18 Radyal dövme makinası	15
Şekil 1.19 Bir tüpün radyal dövülmesi	15
Şekil 1.20 Temel gerinim oranı eğrisi	17
Şekil 1.21 Sertlik ve gerçek gerinim oranı eğrisi	17
Şekil 1.22 Sıcaklığın sürünme üzerine etkisi	18
Şekil 1.23 Damgalama kalıbı	19
Şekil 1.24 Yatay dövme	20
Şekil 1.25 Birinci yatay dövme kuralı	21
Şekil 1.26 İkinci yatay dövme kuralı	21
Şekil 1.27 Üçüncü yatay dövme kuralı	22
Şekil 1.28 Üçüncü yatay dövme kuralı özel hali	22
Şekil 1.29 Dövme ile imal edilen parçanın tane yapısı	23
Şekil 1.30 Talaş kaldırma yoluyla imal edilen parçanın tane yapısı	24
Şekil 1.31 Döküm yoluyla imal edilen parçanın tane yapısı	24

Şekil 1.32 Talaşlı işlem ile oluşturulan parçadaki malzeme kaybı	25
Şekil 2.1 Matris sisteminin kurulmasının şematik gösterimi	27
Şekil 2.2 Full Newton-Raphson metodu	30
Şekil 2.3 Deplasman kontrolü	31
Şekil 2.4 Sonlu elemanlar programı akış şeması	36
Şekil 3.1 Yapılacak iş çeşidinin seçildiği menü	38
Şekil 3.2 Eksenel simetrik analizi yapılabilecek olan model geometrisi	38
Şekil 3.3 İki boyutlu analizi yapılabilecek olan model geometrisi	39
Şekil 3.4 Üç Boyutlu Analizi Yapılabilecek Olan Model Geometrisi	40
Şekil 3.5 Kalıp iş parçası çizimi	40
Şekil 3.6 Ağ üretimi menüsü	41
Şekil 3.7 SuperForm'da tanımlı elemanlar	42
Şekil 3.8 SuperForm'da tanımlı elemanlar	42
Şekil 3.9 Kaba ağ örneği	43
Şekil 3.10 Automesh ile atılan ağ	44
Şekil 3.11 Malzeme özellikleri menüsü	45
Şekil 3.12 Başlangıç koşulları menüsü	46
Şekil 3.13 Sınır koşulları Menüsü	47
Şekil 3.14 Kontak menüsü	48
Şekil 3.15 Kontak işlemi tamamlanmış model	48
Şekil 3.16 Yükleme durumu menüsü	50
Şekil 3.17 İş menüsü	51
Şekil 3.18 Sonuçlar menüsü	52
Şekil 3.19 Analizi yapılan parçanın sıcaklık dağılımı.....	52
Şekil 3.20 Particle tracking analizi sonucu	53
Şekil 4.1 Kaynaklı civata	55
Şekil 4.2 Ön şekillendirilmiş parça	55
Şekil 4.3 İş parçasının birbirine sürtünmesi	55
Şekil 4.4 Parçanın mikroskop altında hata oluşumunun gözlenmesi (sol) ve parçanın sayısal şeklindeki hata oluşumu	56
Şekil 4.5 Hatasız parça	56
Şekil 4.6 İlk ön şekillendirme parçası (sol) ve son ön şekillendirme parçası (sağ)	56
Şekil 4.7 Hatalı parça (sol) ve hatasız parça (sağ)	56

Şekil 4.8 İlk ön şekil	57
Şekil 4.9 Parçanın kendisiyle sürtünmesi.....	57
Şekil 4.10 Proses sonundaki eksik dolma	57
Şekil 4.11 Yeni ön şekil	58
Şekil 4.12 Proses sonundaki hatasız parça.....	58
Şekil 4.13 Yağ filminin mikroskopik görünümü	59
Şekil 4.14 Kalıp ile iş parçası arasındaki sürtünme arayüzü	60
Şekil 4.15 Simülasyon ile deneysel sonuçların karşılaştırılmasında kullanılan büyüklükler..	61
Şekil 4.16 Sonuçların karşılaştırılması	62
Şekil 4.17 Deneysel olarak dört farklı alaşım ile basılan ve artan dövme zorluğunu gösteren biyeller	66
Şekil 4.18 Çapak dizaynlarının kalıp konumuna göre dizaynları	67
Şekil 4.19 Parçanın yatay ve dikey kalınlıklarının dövme zorlukları üzerindeki etkisi	68
Şekil 4.20 Şekil faktörünün dövme zorlukları üzerindeki etkisi	68
Şekil 4.21 Çapak boyutlarının düzenlenmesi	69
Şekil 5.1 Kalıp köşelerinin yuvarlatılmadığı kalıp ve iş parçası modeli.....	70
Şekil 5.2 Parçanın kendi kendine sürtünmeye başlaması.....	71
Şekil 5.3 İlerlemiş kendi kendine sürtünme durumu.....	71
Şekil 5.4 Prosesin sonu ve parçada oluşan çatlak görünümü.....	71
Şekil 5.5 Uygulamada meydana gelen katlanma hatası	72
Şekil 5.6 Kalıp köşelerinin yuvarlatıldığı kalıp ve iş parçası modeli.....	72
Şekil 5.7 Artım 116	73
Şekil 5.8 Artım 170	73
Şekil 5.9 Artım 171	73
Şekil 5.10 Prosesin sonu ve tam bir kalıp dolumu	74
Şekil 5.11 Yeni ön şekilli iş parçası ve kalıp modeli	74
Şekil 5.12 Artım 71	75
Şekil 5.13 Artım 74	75
Şekil 5.14 Artım 80	75
Şekil 5.15 Prosesin sonunda tam bir kalıp dolumu	76
Şekil 5.16 Proses sonunda tam dolmuş uygulama parçası	76
Şekil 5.17 Parçanın üç boyutlu çizimi.....	76
Şekil 5.18 Istampaya gelen kuvvet-artım sayısı grafiği (850 °C).....	77

Şekil 5.19	Istampaya gelen kuvvet-artım sayısı grafiği (1050 °C)	77
Şekil 5.20	Kalıp ve iş parçası modeli	78
Şekil 5.21	Proses sonucunda tam dolmamış kalıp	79
Şekil 5.22	Kalıp ve yeni iş parçası modeli	80
Şekil 5.23	Proses sonucunda tam olarak dolmuş kalıp	81
Şekil 5.24	Kalıp ve yeni ön şekilli iş parçası modeli	81
Şekil 5.25	Kullanılan yeni ön şekilli iş parçasıyla tam olarak dolmuş kalıp	82
Şekil 5.26	Kullanılan yeni çapak dizaynıyla tam olarak dolmuş kalıp	82
Şekil 5.27	Parçanın üç boyutlu çizimi.....	83
Şekil 5.28	İkinci etap analizdeki sıcaklık dağılımı	83
Şekil 5.29	Yeni ön şekilli ve çapak dizaynı parçanın sıcaklık dağılımı.....	84
Şekil 5.30	Kalıp ve iş parçası modeli	85
Şekil 5.31	Prosesin sonunda parçada oluşan çatlak görünümü	85
Şekil 5.32	Hatadan dolayı oluşan eksik dolma	86
Şekil 5.33	Kalıp ve yeni ön şekilli iş parçası modeli	86
Şekil 5.34	Proses sonucunda hatasız olarak oluşan parça	87
Şekil 5.35	Parçanın üç boyutlu çizimi.....	87
Şekil 5.36	İlk analizin sıcaklık dağılımı	87
Şekil 5.37	Yeni ön şekilli parçanın sıcaklık dağılımı.....	88

ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 1.1 Çeşitli çelikler için R_{max} değerleri	16
Çizelge 4.1 Dövülebilirlik ve akış mukavemetinin kalıp doldurma üzerindeki etkisini gösteren diyagram	64
Çizelge 4.2 Farklı malzemeler ile biyel yapımının sonuçları	65
Çizelge 4.3 Farklı malzemeler ile göbek yapımının sonuçları	66

ÖNSÖZ

Tezimi hazırladığım süre zarfında, desteğini ve bilgisini benden esirgemeyen değerli hocam Prof. Mehmet Emin YURCI'ye sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca tez süresince teknik destek sağlayan BİAS, Birinci Otomotiv ve PARSAN firmalarına ilgilerinden dolayı teşekkür ederim. Son olarak, her zaman yanımda olup beni destekledikleri için aileme de teşekkürlerim sonsuzdur.

ÖZET

Gelişen günümüz teknolojisinde üretimin en verimli şekilde yapılması, rekabet şansı ve azalan doğal kaynaklar açısından düşünüldüğünde, yüksek bir önem arz etmektedir. Dövme teknolojisi perspektifinden bakıldığında amaç, optimum hammadde ve enerji ile kalıbı hatasız bir şekilde dolduracak dövme aşamalarının belirlenmesidir. Bu sayede, parça başına az bir miktar olsa bile, sağlanan enerji ve hammadde ekonomisiyle seri üretimlerde çok büyük tasarruflar elde edilmektedir.

Yapılan yüksek lisans tezi, dövme kalıplarında kalıp dolumu üzerindeki etkileri araştırmaya odaklanmış bir çalışmadır. Bu etkileri araştırmak için sonlu elemanlar yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemi kullanmak için MSC firmasının SuperForm adlı sonlu elemanlar paket programından faydalanılmıştır.

Ortaya çıkan bu çalışmada ilk önce dövme yöntemlerinden bahsedilmiştir. Daha sonra dövme makinaları tanıtılmıştır. Üçüncü bölümde kullanılan sonlu elemanlar paket programı tanıtılmıştır. Ardından kalıp boşluğunun doldurulmasını etkileyen faktörler incelenmiş ve bölümün ilgili kısımlarında bu alanda daha önce yapılmış çalışmalara değinilmiştir. Analizler kısmında ise eksenel simetrik analiz yardımıyla, belirlenen örnek parçaların kalıp dolumu analizleri yapılmıştır.

Anahtar kelimeler: dövme teknolojisi, kalıp dolumu, sonlu elemanlar

ABSTRACT

Considering the competition in the markets and the decreasing natural sources in today's improving technological world, it is essential to make the production in the most possible efficient way. Through the perspective of forging technology, the goal is to define the steps of the forging process that will result in a flawless filling of the die, by using an optimum amount of material and with minimum energy. Consequently, a very big energy and material saving can be achieved in total as a result of mass productions.

The present study is focused on the effects on the filling of the forging dies during the forging process. To investigate these effects, the method of finite elements has been applied and the commercial program of MSC company called Super form has been used.

In the study, firstly different methods of forging has been mentioned continued by the introduction of discrete types of forging machines. The third section is reserved for the explanation of commercial program used. After that, the factors that effect the filling of the die cavity has been investigated and in the relevant parts of the section the previous studies has been cited. In the analysis section, the analysis has been made for the filling of the dies of the sample pieces by using the axisymmetric method

Key words: forging technology, die filling, finite elements.

1. GİRİŞ

Dövme, birbirinden çok farklı tipte kalıplar ve çok farklı tipte dövme makinaları kullanılarak iş parçasının basma kuvvetleri etkisiyle plastik şekil değiştirmeye zorlandığı bir yöntemdir. Dövme işleminin kökenleri milattan önceki (4000-8000) yıllara kadar uzanmaktadır. Bu yöntem, taştan yapılan aletlerle mücevherat ve bozuk para yapımı gibi işlerde kullanılmaktaydı.

Günümüzdeki tipik dövme ürünleri; civatalar, perçinler, biyeler, türbin shaftları, dişli çarklar, el aletleri ve makinacılık, havacılık, demiryolu işletmeleri gibi ulaşım endüstrilerinde ve çeşitli sanayii dallarında kullanılan ekipmanlardır.

Dövme işlemleri sıcak (yeniden kristalleşme sıcaklığının üstünde), yarı sıcak (yeniden kristalleşme sıcaklığının hemen altında) ve soğuk (genellikle oda sıcaklığında veya bu sıcaklığa yakın) olarak yapılır. Malzemenin yüksek dayanımından dolayı, soğuk dövme çok yüksek kuvvetlere ihtiyaç duyar ve bu işlemi gerçekleştirebilmek için iş parçası oda şartlarında yeterli esnekliğe sahip olmalıdır. Soğuk dövülmüş parçalar iyi yüzey kalitesine ve boyut hassasiyetine sahiptir. Sıcak dövme daha küçük kuvvetlere ihtiyaç duyar ancak yüzey kalitesi ve boyut hassasiyeti o kadar iyi değildir.

Yapılan bu çalışmada dövme kalıplarının dolmasını etkileyen faktörler araştırılmıştır. Daha sonra bu bilgiler ışığında, örnek parçalar üzerinde sonlu elemanlar paket programı kullanılarak akış analizleri yapılmıştır. Bu analizler sonucunda parçaların eksiksiz dolmasını sağlayacak olan optimum işlem parametreleri tesbit edilmeye çalışılmış ve buna uygun bir kalıp akışı elde edilmeye çalışılmıştır. İncelenen faktörlere, bu konuda yapılmış olan diğer çalışmalara ve kullanılan sonlu elemanlar paket programına ilerleyen bölümlerde değinilmiştir.

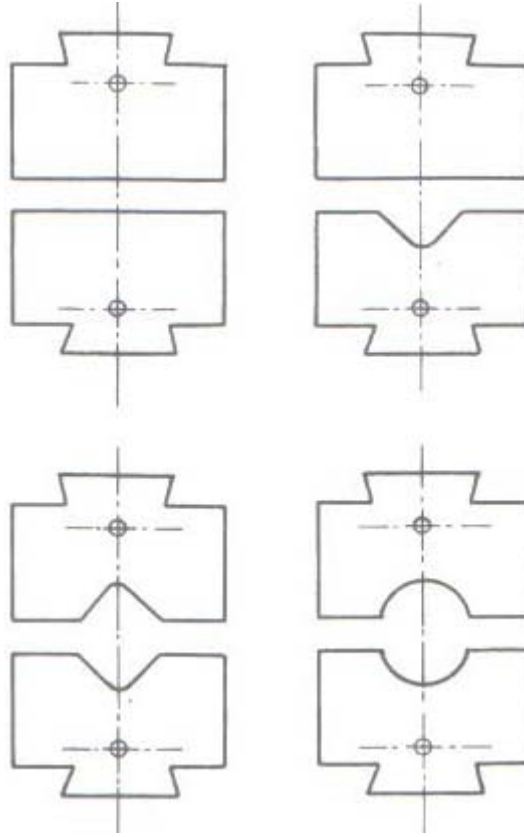
1.1 Açık Kalıpla Dövme

Açık kalıpla dövme işlemi, iş parçasının düzlemsel veya basit şekilli kalıplar ile dövüldüğü bir sıcak şekil verme yöntemidir. Açık kalıpla dövme işleminde metal, verilecek şekile göre çeşitli kalıplarla sınırlandırılmadığı için diğer dövme yöntemlerinden ayrılır [1]. Açık kalıpla dövme yöntemi şu hallerde kullanılır[6];

- Dövülecek parça, kapalı kalıpla dövmek için çok büyükse,

- Çalışılan metalin talaşlı üretimle elde edilemeyecek mekanik özelliklere sahip olması isteniyorsa,
- İhtiyaç duyulan miktar çok az ise ve kapalı kalıbın maliyetini karşılamıyorsa,
- Teslimat tarihi, kapalı kalıp yapmaya izin vermeyecek kadar kısaysa.

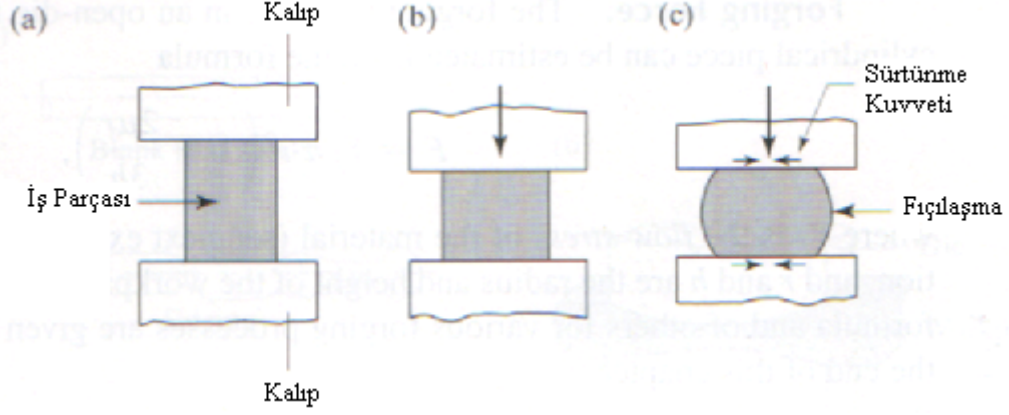
Açık kalıpla dövme işleminde genellikle kullanılan kalıp tipleri Şekil 1.1’de verilmiştir. Bu kalıplara, dövme makinasının örsüne ve koçuna tespit edilebilmeleri için, genellikle kırlangıç kuyukları işlenir. Bu kalıplar, çift olarak kullanıldığı gibi, düz bir kalıpla da kullanılabilir.



Şekil 1.1 Açık kalıpla dövme kalıpları (Dövme Teknolojisi)

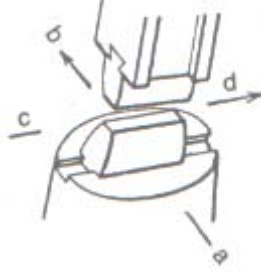
Açık kalıpla yapılabilecek en basit operasyon, silindirik bir parçayı yığmaktır. Şekil 1.2’de görülen bu işleminde b’de iş parçası üniform bir şekilde deformasyona uğratılmıştır. Bu durum, sürtünmenin sıfır olduğu çok özel koşullarda sağlanabilir. Gerçek operasyonlarda ise c’de görüldüğü gibi fiçilaşma meydana gelir. Bu durum, kalıpla iş parçası arasındaki sürtünmeden veya sıcak iş parçasının görece olarak soğuk bir kalıpta basılmasıyla meydana gelir. Her iki durumda da fiçilaşma, iş parçasının kalıba yakın yerlerinde ki akmanın güçleşmesinden ileri gelir. Sürtünmeden dolayı

meydana gelen fiçilaşma yağlamayla, ısıl etkiyle gerçekleşen fiçilaşma ise kalıpların ısıtılmasıyla indirgenebilir veya tamamen ortadan kaldırılabilir.

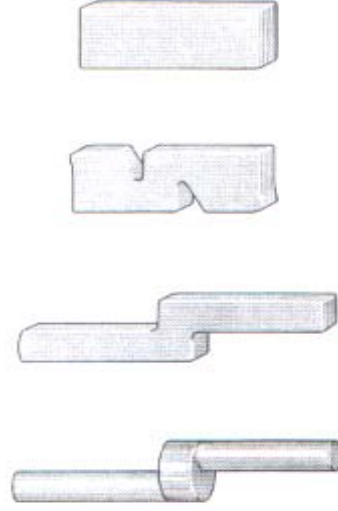


Şekil 1.2 Yığıma işlemi (Manufacturing Engineering and Technology)

Uzatma, iş parçasının kesitini küçülterek uzunluğunu arttırmak amacıyla uygulanan bir işlemdir. Bu işlem esnasında, iş parçasının eni bir miktar büyür. Bu etkiyi gidermek için iş parçası 90° döndürülerek cd doğrultusunda tekrar dövülür (Şekil 1.3). Parça uzatılırken, uzatılan yüzeyler dalgalı olur. Bu durum, parça uzatılan doğrultuya dik dövülerek giderilir. Şekil 1.4’de çentik açılarak yapılan bir uzatma örneği verilmiştir.

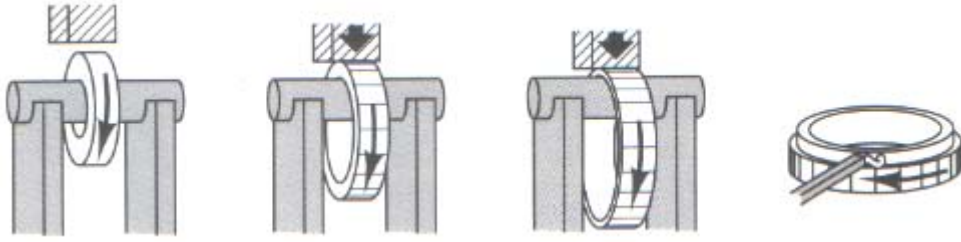


Şekil 1.3 Uzatma başlıkları (ASM Metal Handbook&Volume 5&Forging)



Şekil 1.4 Çentik açılarak yapılan bir uzatma (ASM Metal Handbook&Volume 5&Forging)

Halka çapı büyötmek için, iş parçası bir malafa ile bir düzlemsel kalıp arasında dövölür (Şekil 1.5). Bu işlemde düzlemsel kalıbın boyuna doğrultusu, malafa eksenine paraleldir. Düzlemsel kalıbın boyuna doğrultusu, malafa eksenine dik olduğunda ise halkanın et kalınlığı azalırken boyu uzar.



Şekil 1.5 Halka çapı büyötmö (Materials and Process in Manufacturing)

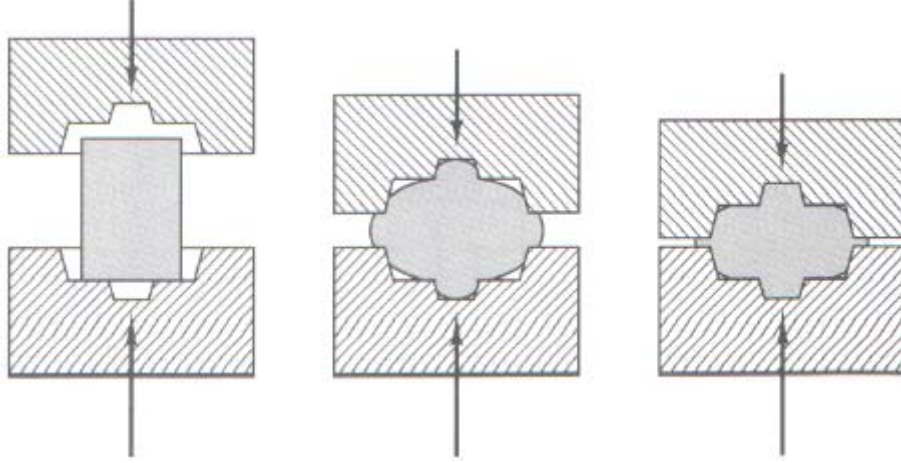
Açık dövme kalıplarının ömrü, kapalı kalıplardan daha uzundur [4]. Bu kalıpların iki bakım arasındaki ömrü 600 saat kadardır. Dövme kalıplarının zamanla bozulan yüzeyi bakıma alınıp planya ve freze ile düzeltilerek yüzeyler arasındaki paralellik yeniden sağlanır. Kalıplar 8-10 kez bakıma alınacak şekilde tasarlanır ve bir bakım esnasında 5-6 mm talaş kaldırılır. Bu sayede bir kalıp için 4800-6000 saatlik bir çalışma ömrü sağlanır.

1.2 Kapalı Kalıpla Çapaklı ve Çapaksız Dövme

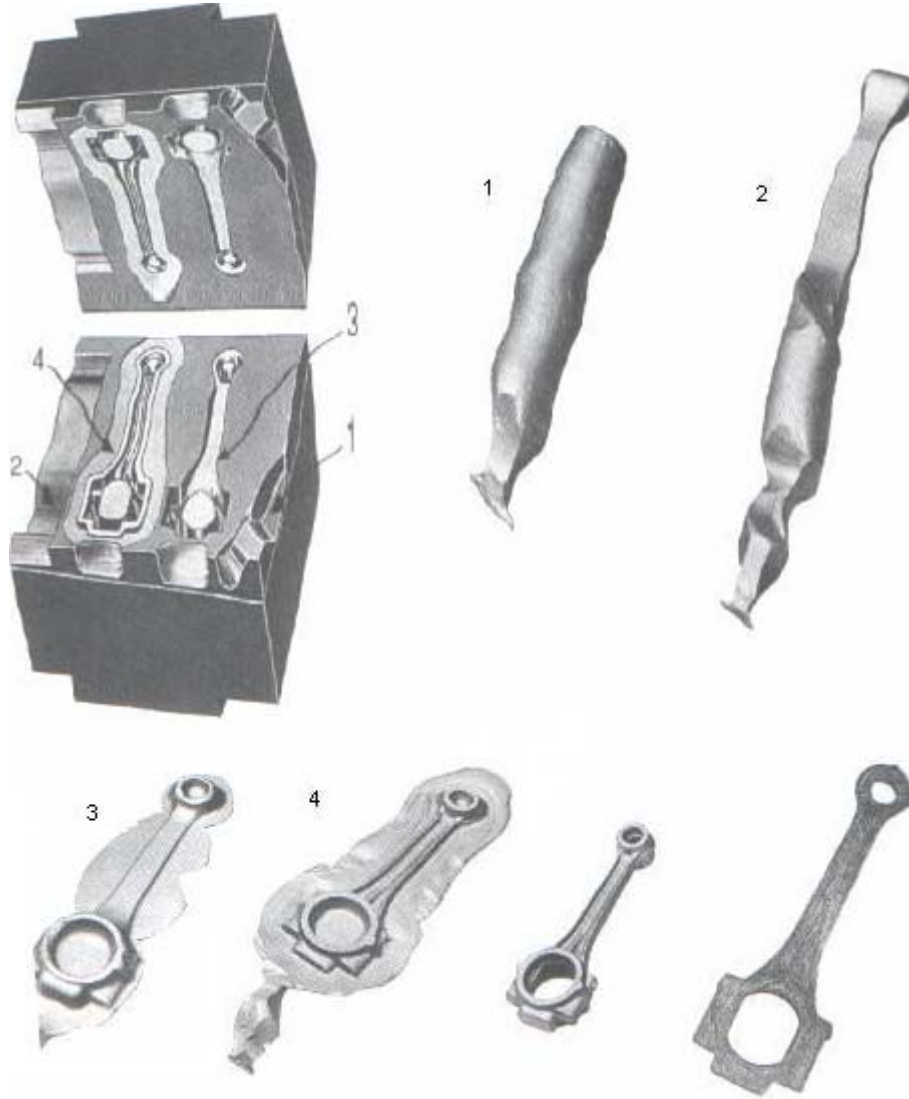
Kapalı kalıpla çapaklı dövme işlemi sıcak olarak uygulanan bir işlemdir. Genellikle iki parçadan üretilen kalıp kapandığı zaman arada kalan gravür, üretilmek istenen parçanın şeklindedir. Şekil 1.6'da görüldüğü üzere işlenmiş bir kalıp ile metal akışı kontrol altına

alınarak istenilen boyutlarda bir parça elde edilir. Bu işlem esnasında az miktarda bir malzeme kalıbın dışına çıkmaya zorlanır ve bu şekilde kalıp kapandıkça çapak inceler. Çapak çok çabuk soğur ve deformasyona karşı aşırı bir direnç gösterir ve bu şekilde kalıbın içindeki basıncı arttırarak metalin kalıbın dolmayan yerlerine doğru akma eğiliminde olmasını sağlayarak eksiksiz dolmaya yardımcı olur [2].

Şekil 1.7 tipik bir kalıp setini gösterir; kalıbın bir yarısı çekice, diğer yarısı örse bağlıdır. Isıtılmış metal, alt kalıp boşluğunda pozisyonlandırılır ve üst kalıp tarafından dövülür. Bu kalıp seti ile malzemeye ara şekiller verilerek dövme işlemi kademelendirilir ve uygun bir malzeme dağılımı sağlanarak malzemenin kalıp içindeki akışı kolaylaştırılır. Bu sayede her kademede kalıp boşluğu tam olarak doldurulur.



Şekil 1.6 Kapalı kalıpla çapaklı dövme (Materials and Process in Manufacturing)

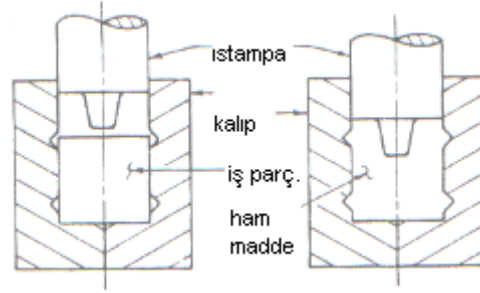


Şekil 1.7 Biyel kalıp seti (Materials and Process in Manufacturing)

Şekil 1.7’de dövme işlemi; 1- uzatma, 2- toplama, 3- kaba dövme, 4- son dövme olarak kademelendirilmiş ve daha sonra parçanın çapağı alınmıştır. Uzatma ve toplama malzemeyi çubuğun istenilen yerlerine yaymak için kullanılır. Uzatma, yapıldığı bölgeden malzemenin uzaklaştırılması anlamına gelir; toplama ise, malzemeyi istenilen belli bir bölgede biriktirmeyi amaçlar. Kaba dövme işleminde ise parça bloklanarak kaba bir form elde edilir. Kaba dövme kademesinden elde edilen parçanın bitmiş parçaya kıyasla biraz yüksek ve dar olması, son dövme kademesindeki şekil değişiminin başlıca basit basma ile sağlanması ve böylece çok yüksek gerilmelerin doğmamasını sağlar [4]. Kaba dövme gravüründe çapak kanalı yoktur. Bu nedenle kaba dövmede

çapak alt ve üst kalıpların düzlemsel yüzeyleri arasında oluşur. Son dövme işlemiyle parçaya istenilen form kazandırılır.

Kapalı kalıpla çapaksız dövme yönteminde tam olarak sınırlandırılmış bir kalıp boşluğu içerisinde metal deformasyona uğratılır (Şekil 1.8). Bu yöntemde iş parçasının büyüklüğü çok hassas bir doğrulukta olmalıdır ve kalıbın tamamen dolması, geriye artık metal kalmaması şartı ile sağlanmalıdır. Ayrıca, kalıbın tamamen dolması için çapak oluşumundan faydalanılmadığından kapalı kalıpla çapaksız dövme işlemi büyük oranda kalıp dizaynına dayanır. Yukarıda bahsedildiği üzere iş parçasının basılmasından önceki hacmi; kalıbın tamamen dolmasının, fazla dolma olup çok büyük basınçlara mahal verilmeden sağlanması açısından önemlidir. Kalıp için doğru miktarda malzeme ve indirgenmiş dövme zamanı için uygulanabilecek olan bir teknik, yuvarlanmış ve ekstrude edilmiş iş parçalarının kullanılmasıdır [1].

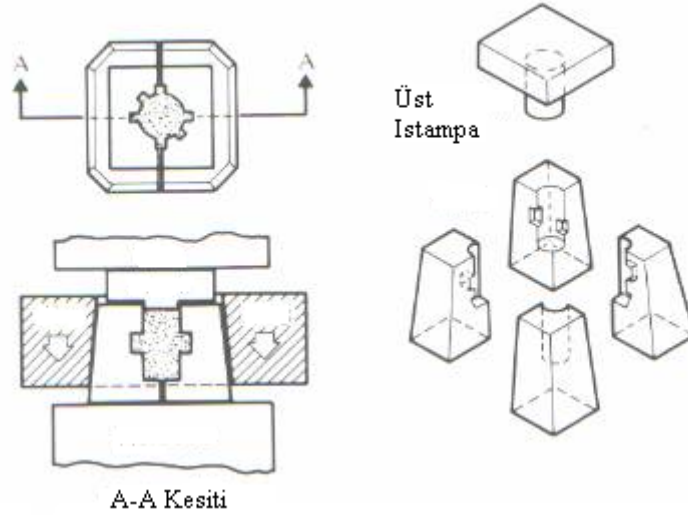
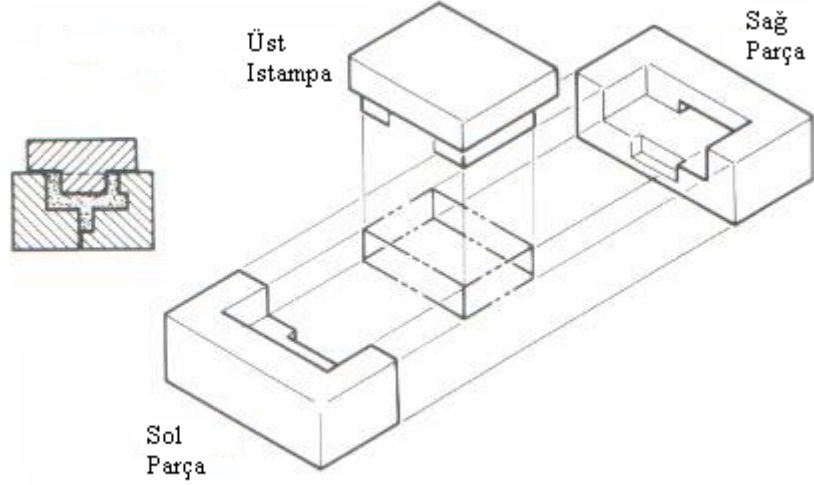


Şekil 1.8 Kapalı kalıpla çapaksız dövme (Metallere Plastil Şekil Verme)

1.3 Hassas Dövme

Hassas dövme, kapalı kalıpta ileri bir çapaksız dövme tekniğidir. Bu dövme yöntemi, parça dövüldükten sonra çok az veya hiç talaş kaldırmaya gerek duyulmayacak şekilde tasarlanmıştır. 0° ile 1° arasında çekme açıları, ince bölgeler, düşük radyüsler ve pürüzsüz yüzeyler ile karakterize edilir. Tipik hassas dövme ürünleri dişliler, biyeller ve türbin kanatlarıdır.

Şekil 1.9'da gösterildiği gibi bu yöntemde, birden çok parçadan oluşan kalıplar kullanılır. Ayrıca bu yöntemle üretilen parçalar dikişsiz yüzeylere, çoklu ayırım çizgilerine sahip olabilirler ve bu yöntem optimum tane akışına izin verir [1]. Geleneksel dövme ve talaşlı üretim ile karşılaştırıldığında aynı malzemedен hassas dövme ile üretilen bir parça çok yüksek bir dayanım/ağırlık oranına sahiptir.



Şekil 1.9 Hassas dövme kalıpları (Processes and Materials of Manufacture)

Hassas dövmede üretimin yapıldığı kalıplar, kapalı kalıpla dövme kalıplarından daha yüksek tamlıkta kalıplara ihtiyaç duymaktadır. Ayrıca bu prosesle çok yüksek kuvvetler ile parça üzerinde ince detaylar elde edilmek istendiğinden yüksek kapasiteli ekipmana ihtiyaç duyulmaktadır. Kalıp aşınması hassas dövmede ön plana çıkan bir faktördür ve bu nedenle, nispeten düşük sıcaklıklarda ve düşük dövme kuvvetleriyle şekillendirilebilen metaller tercih edilmektedir [4]. Alüminyum ve magnezyum alaşımları görece olarak düşük dövme yükü ve sıcaklıklar istediğinden hassas dövme için uygundur. Alüminyum parçaların dövülmesinde kalıp yağlayıcısı kullanılmalıdır. Çünkü alüminyum şekillendirilirken çelik gibi form tutmaz. Alüminyum için optimum metal akışını sağlamak için iş parçası yaklaşık 425°C'ye kadar ısıtılır ve kalıp sıcaklığı 370°C ile 400°C arasında tutulur [1].

Hassas dövme, özel ve daha kompleks kalıplara, iş parçasının hacim ve şeklinin tam kontrolüne, kalıp boşluğunda parçanın doğru pozisyonlanmasına ihtiyaç duyar ve bu yüzden yüksek yatırımları beraberinde getirir. Fakat, daha az kayıp malzeme vardır ve çok daha az alt işlem gerektirir. Çünkü dövülen parça son şekle çok yakındır. Bu yüzden konvansiyonel dövme ile hassas dövme, üretim hacmini göz önüne alan bir ekonomi analizine ihtiyaç duyar.

Hassas dövmenin avantajları şunlardır;

- Yüksek bir dayanım/ağırlık oranı vardır,
- Parçalar minimum çekme açıları ile yapılabilir,
- Yanal çıkıntılar ve cepler talaşlı işleme gerek duymadan üretilir,
- Küçük kenar radyüslerine sahip dövme parçalar üretilebilir,
- Ayırma çizgilerinin yerleşimi kontrolü en iyi tane akışını ve metalurjik özellikleri sağlar,
- Yüzey kalitesi çok iyidir.

Hassas dövmenin dezavantajları;

- Yavaş bir işlemdir ve daha çok pres zamanına ihtiyaç duyar,
- Kalıpları daha dayanıklı olmalıdır ve geleneksel yöntemlere göre daha büyük preslere ihtiyaç vardır,
- Yüksek basınç ve ısıtılmış kalıplar, kalıp ömrünü azaltır.

1.4 Dövme Haddeleri İle Şekillendirme

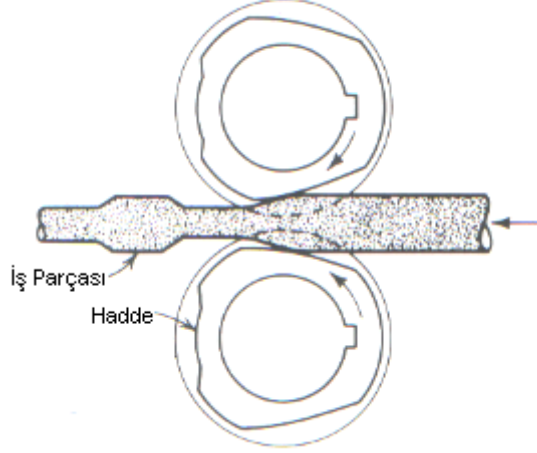
Bu işlem önceleri kapalı kalıpla dövme için taslak hazırlama (uzun ve ince parçaların ön şekillendirilmesi) amacı ile kullanılmıştır. Krank üretiminin ön şekillendirilmesi bu örneklerden birisidir. Daha sonra bu yöntem çok gelişmiş ve bitmiş parça üretiminde kullanılmaya başlanmıştır.

Bu gelişmenin nedenleri;

- Üretilen parçaların özellikleri çok iyidir,
- Dövme kusurları içermez ve çapak oluşumu yoktur,
- Lif yapısı uygun ve bütün kesitlerde süreklidir,
- İşlem sırasında merdaneler tarafından tufal giderildiğinden ürün yüzeyi düzgün ve tufalsızdır,

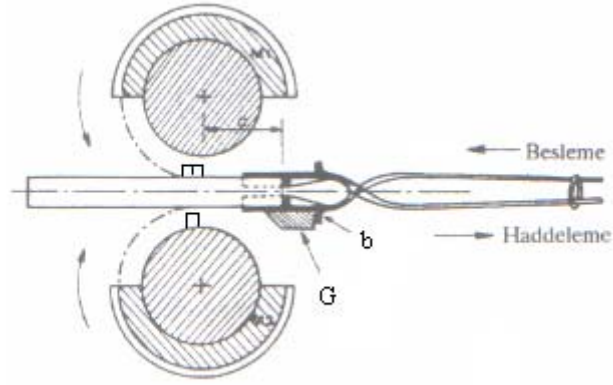
- Boyut toleransları sıcak haddeleme işlemindeki toleranslar mertebesindedir.

Klasik dövme haddeleriyle yapılan işlem; sıcak iş parçasının, üzerine verilecek şekle uygun gravürler açılmış iki matris arasından geçirilerek, istenilen şeklin verilmesini içermektedir. Her matris bir merdaneye tespit edilmiş durumdadır (Şekil 1.10).



Şekil 1.10 Dövme haddeleriyle şekillendirme (Processes and Materials of Manufacture)

Sürekli olarak aynı yönde dönen merdanelerin arasındaki uzaklığın ayarlanması mümkündür. Şekil 1.11’de görülen konumda matrisler açık durumda oldukları için, iş parçası, kıskaç vasıtası ile b dayaması ve G klavuzuna temas edene kadar ileri sürülebilir. M1 ve M2 matrisleri parçaya m ve n noktalarında değerek parçanın şekil değiştirmesini sağlarlar ve aynı zamanda parçayı haddeleme doğrultusunda iterler. Matrisler açık konuma geldiklerinde iş parçası besleme yönünde sürülür ve 90° döndürülür. Bu sayede, aynı gravürle, iş parçasına ard arda iki şekil değiştirme uygulanmış olur. Daha sonra aynı işlemler sırası ile diğer gravürlerde de tekrarlanarak üretim tamamlanır. Şekil 1.12’de bir çift matris ve bu matristeki farklı gravürlerle parçanın şekillendirme kademeleri görülmektedir.

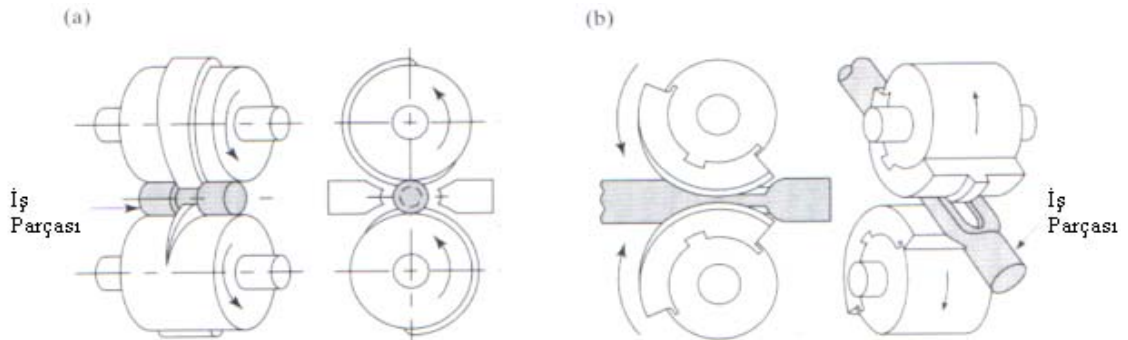


Şekil 1.11 Matrislerin açık konumu (Dövme Teknolojisi)



Şekil 1.12 Matristeki farklı gravürler ve şekillendirme kademeleri (Materials and Processes in Manufacturing)

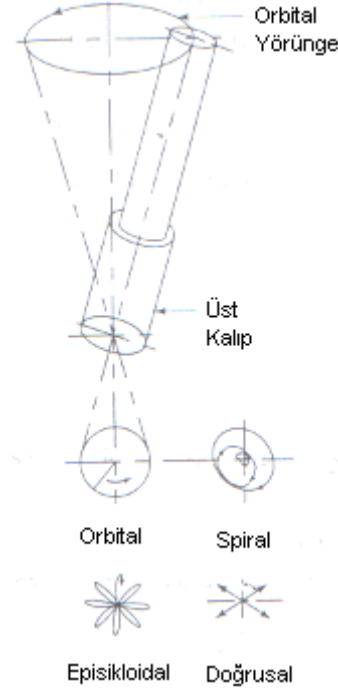
Çapraz kamalı haddeme işleminde ise iş parçasına, üzerinde birer kama bulunan iki merdane arasında şekil verilmektedir. Merdaneler dönerken iş parçasının orta kısmı şekil değiştirmektedir (Şekil 1.13). Bu yöntem ile konik miller, yaprak yaylar, sofrabıçakları ve el takımları üretilebilmektedir. Bu yöntemin bir sakıncası parça içinde boşluk oluşabilmesidir. Bu sakınca takım tasarımında alınacak önlemlerle bir dereceye kadar önlenmektedir.



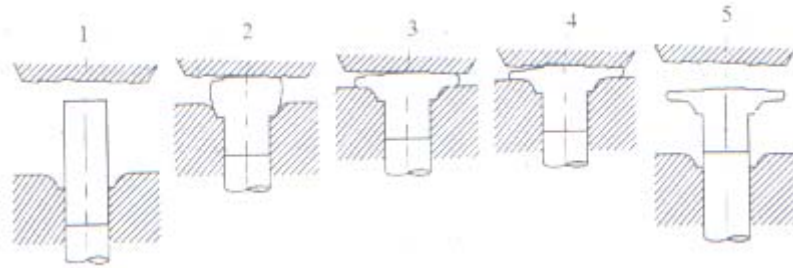
Şekil 1.13 Çapraz kamalı haddeme (Manufacturing Engineering and Technology)

1.5 Orbital Dövme

Orbital dövme, malzemenin yörüngesel hareket yapan bir üst ve herhangi bir rotasyon hareketi olmayan bir alt kalıp (matris) arasında dövülerek şekillendirilmesidir [4]. Alt matris aksenal olarak üst matrise doğru yükselirken üst kalıbın eksenel, spiral, doğrusal veya episikloidal hareketler yapar (Şekil 1.14). Bu işlem ile genellikle disk şeklinde parçalar ve düz konik dişli gibi konik parçalar dövülür (Şekil 1.15).



Şekil 1.14 Orbital dövme (Manufacturing Engineering and Technology)

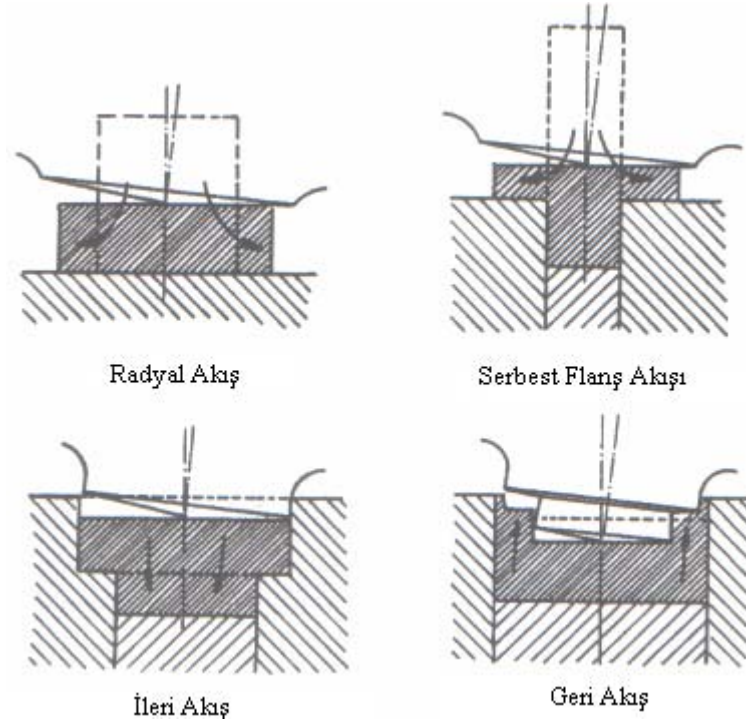


Şekil 1.15 Orbital dövme alıştırması (Manufacturing Engineering and Technology)

Yığımda parçaya uygulanan kuvvet kesit yüzeyinin tümüne etki etmekteyken, orbital dövme işleminde uygulanan kuvvet, kesit yüzeyinin sadece bir kısmına etki etmektedir. Bu şekilde, sürtünme büyük oranda giderilerek malzemenin radyal doğrultuda fazla dirençle karşılaşmadan hareket edebilmesi sağlanmış olmaktadır. Daha avantajlı sürtünme şartları ve temas yüzeyinin küçüklüğü, orbital dövme için gerekli

şekillendirme kuvvetinin konvansiyonel yığıma için gereken değerden çok daha küçük olmasını sağlamaktadır.

Orbital dövme ile şekillendirmede parçalar; radyal akış, serbest akış, ileri akış ve geri akış olmak üzere dört şekilde hareket etmektedirler (Şekil 1.16).



Şekil 1.16 Orbital dövme ile imal edilen parçaların akış şekilleri (Dövme Teknolojisi)

1.6 İzotermal Dövme

İzotermal dövme yöntemi, geliştirilmiş bir sıcak kalıpta dövme işlemi olarak ele alınabilmektedir [7]. Bu yöntem, uygun ısıtma tertibatları kullanılarak iş parçası ve kalıbın aynı sıcaklıkta tutulmasıyla karakterize edilmektedir. Böylece, yüksek sıcaklıkta, akma sınırı nisbeten düşük olan malzemenin kalıp boşluğunu tamamen doldurması sağlanmaktadır [5].

İzotermal dövmenin en genel uygulama alanı, mekaniksel ve ısıl olarak çok zorlu şartlarda çalışılan uzay sanayisidir. Bu alanda en çok kullanılan malzemeler; titanyum ve yüksek sıcaklıklara dayanımlı nikel esaslı alaşımlardır. Titanyum alaşımlarının dövülmesinde genellikle kalıp malzemesi olarak nikel esaslı alaşımlar kullanılmaktadır. Titanyum alaşımları genelde 950°C'de dövülmektedir. Nikel esaslı alaşımlardan yapılacak olan elemanlar için daha yüksek sıcaklıklara ihtiyaç vardır ve molibden esaslı

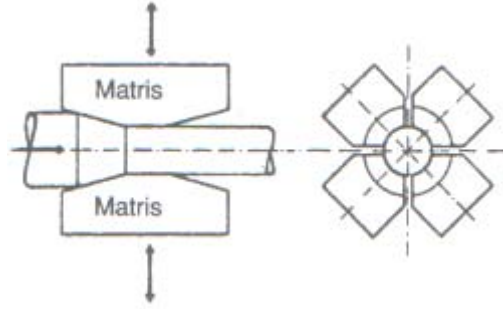
kalıp malzemelerine gereksinim duyulmaktadır. Molibden işlem esnasında dış havadan korunmalıdır.

İzotermal dövmenin konvansiyonel kalıpla dövmeye kıyasla üstünlükleri; dövme işleminden sonra çok az talaş kaldırmaya gerek kalması (bazen hiç talaş kaldırılmaz) ve dövme kuvvetinin 1/4 -1/5 oranında azaltılmasıdır. Bu yöntem ile adyabatik dövme yöntemlerine oranla çok daha karmaşık parçalar üretmek olanaklıdır. Tek bir operasyonda parçanın kesitinde %80 redüksiyona ulaşılabilir ve bu sayede ince yüzgeçlerin ve sırtların dövülmesi kolaylaşmaktadır.

İzotermal dövme işlemi 100-1000 arasında parçadan oluşan partilerde ekonomik olarak kullanılabilir. Bu işlemde hidrolik presler kullanılmaktadır.

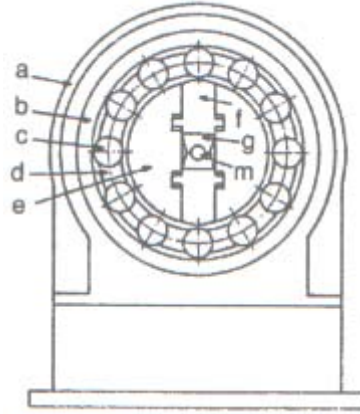
1.7 Radyal Dövme

Sıcak veya soğuk olarak uygulanabilen bu yöntemde dövme işlemi küçük çaplı işlerde iki, büyük çaplı işlerde ise dört çekicinin radyal hareketi ile sağlanmaktadır (Şekil 1.17). Genel olarak bu yöntem ile çubuklar ve tüp şeklinde parçalar dövülmektedir. Örnek olarak kademeli miller, tabanca ve tüfek namluları, çubuk çaplarının küçültülmesi, tüplerin iç yüzeylerine profil verilerek dövülmesi verilebilir.



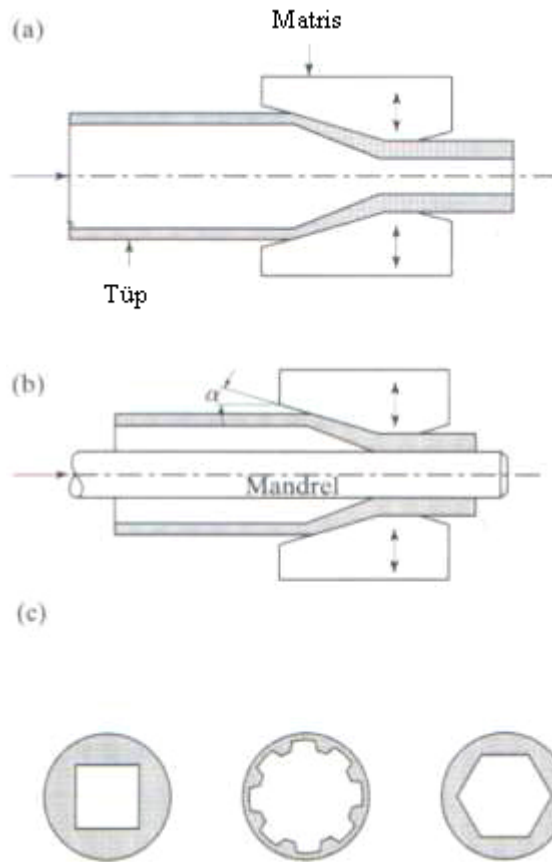
Şekil 1.17 Bir milin dört çekikle radyal dövülmesi (Dövme Teknolojisi)

Bu yöntemin basit bir işleyişi vardır. Makinanın gövdesi (a) dökme çeliktir. Makaralar (b), bir bilezik (d) ve dövme çelik bir ring (c) tarafından taşınır. Rotorun (e) dönme hareketi sırasında, çekiciler (f), merkezkaç kuvvetinin etkisiyle, yerleştirilmiş oldukları rotor kanalları içinde, radyal olarak serbestçe hareket ederek dışa doğru açılırlar. Dönme sırasında çekiciler, sinüsoid biçimli arka yüzeylerinin makaralara her çarpışında kapanmak zorunda kaldıkları için iş parçasının (m) dövülmesi de matrisler (g) tarafından sağlanmış olur (Şekil 1.18).



Şekil 1.18 Radyal dövme makinası (Dövme Teknolojisi)

Radyal dövme işleminde tüp biçimli parçalar dövülebilmektedir (Şekil 1.19). Şekilde görülen ilk örnekte mandrelsiz bir radyal dövme gözükmekte ve kalıp boşluğunda duvar kalınlığı artmaktadır. İkinci örnekte ise mandrelli radyal dövme yapılmaktadır ve duvar kalınlığı mandrel çapına bağlıdır. Son örnekte ise radyal dövme esnasında dış yüzey dairesel kalacak biçimde iç yüzeyin profilili olduğu parçalara yer verilmiştir.



Şekil 1.19 Bir tüpün radyal dövülmesi (Manufacturing Engineering and Technology)

Radyal dövme ile elde edilen parçaların boyut toleransları ± 0.05 mm ile ± 0.5 mm aralığındadır. Bu yöntem orta ve yüksek üretim oranları için (parçanın kompleksliğine bağlı olarak dakikada 50 adet parça üretimi mümkündür) uygundur.

Radyal dövme yöntemi ile alaşımlı veya alaşımsız çelikler, bakır ve titanyum, tungsten, berilyum ve süper alaşımlar şekillendirilebilmektedir [4]. Bu işlemin uygulandığı çeşitli çelikler için elde edilebilecek maksimum % kesit daralması R_{max} değerleri Tablo 1.1’de verilmiştir.

Çizelge 1.1 Çeşitli çelikler için R_{max} değerleri (Dövme Teknolojisi)

Karbonlu Çelikler	R_{max}
$C < \%0,20$	%60
$\%0,20 < C < \%0,50$	%50
$\%0,50 < C < \%0,80$	%40
Orta Alaşımlı Çelikler	R_{max}
$C < \%0,20$	%50
$\%0,20 < C < \%0,40$	%40
$\%0,40 < C < \%0,60$	%20
Takım Ve Hız Çelikleri	%20

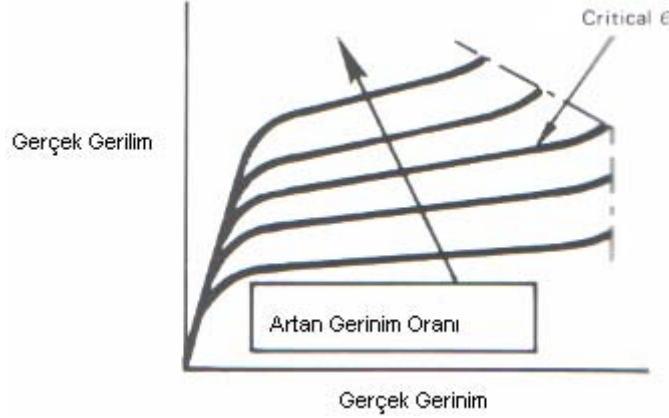
1.8 Yüksek Enerjili Dövme

Bu yöntem bazen yüksek hızlı dövme olarakta adlandırılır ve temelde sıcak veya soğuk olarak yapılan kapalı kalıpta çapaklı veya çapaksız olarak uygulanan bir yöntemdir. Bu yöntemde koçun vurma gücü ağırlığından çok, sahip olduğu hızdan ileri gelir. Bu işlemde darbe esnasındaki koç hızı 5080-20320 mm/sn’dir. Bu hız, güç düşmeli çekiçlerde 2540-8890 mm/sn ve yerçekimi düşmeli çekiçlerde 3810-4826 mm/sn’dir. Yüksek enerjili dövme yöntemiyle bir parça 12-20 sn arası bir sürede üretilir ve bir saatte 180-300 arası parça üretmek mümkündür [6]. Burada yüksek enerjili dövme terimi; birim zamanda önceki tekniklere göre iş parçasına verimli olarak daha çok enerji uygulanmasını belirtmek açısından kullanılmaktadır.

Yüksek enerjili dövme teorisi metalin plastik akışının zaman ve sıcaklık bağımlı olmasına dayanmaktadır.

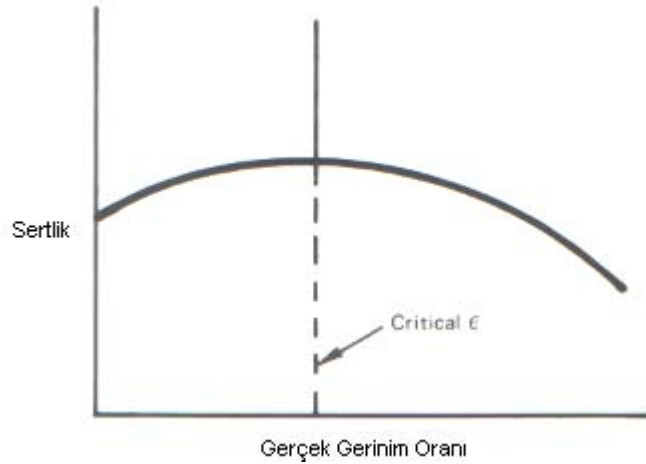
1.8.1 Zaman Bağımlılığı

Değişik metaller için temel gerinim oranı eğrisi Şekil 1.20’de verilmiştir. Gerçek gerilim, gerinim oranı arttıkça artar. Genelde, akma gerilimi yükselen gerinim oranı ile yükselir. Öte yandan kırılmaya etkiyen gerçek gerinim küçük bir miktar düşer. Ayrıca yüksek çalışma sıcaklıkları metalin gerinim oranı hassasiyetini yükseltir.



Şekil 1.20 Temel gerinim oranı eğrisi (Processes and Materials of Manufacture)

Bir metalin sertliği, gerçek gerilim-gerinim eğrisinin altındaki alan olarak düşünülebilir ve metalin enerjiyi emme yeteneğinin bir ölçüsüdür. Eğriyi gerçek gerinim oranı-sertlik olarak tekrar çizerek Şekil 1.21’de ki gibi olur. Bu grafik bütün metallerin sertliğinin kritik bir gerçek gerinim oranına kadar arttığını ve sonra düştüğünü gösterir. Sertlik, metalin şok altında, kırılmadan plastik olarak deformasyona uğraması kabiliyetidir. Yüksek sertliğe ve gerinim oranına sahip metaller yüksek enerjili şekillendirme için seçilebilirler.



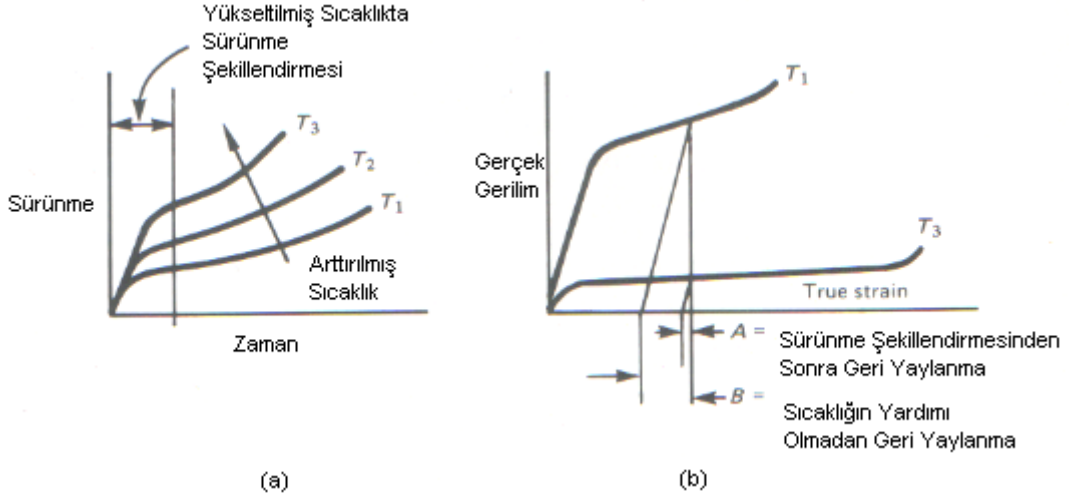
Şekil 1.21 Sertlik ve gerçek gerinim oranı eğrisi (Processes and Materials of Manufacture)

1.8.2 Sıcaklık Bağımlılığı

Yükseltilmiş sıcaklıklar malzemenin akma gerilimini düşürür. Bunun çok büyük bir faydası kırılmaya kadar olan gerçek gerininin çok yükseltilmiş olmasıdır. Arttırılmış olan bu gerçek gerinim boyun oluşumuna sebep olduğundan her zaman şekillendirmeye elverişli değildir.

Sıcaklıkta sertliği yükseltir. Kayma ve ikiz oluşumunun çok hızlı olduğu yüksek hızlı şekillendirmelerde sertliğin artımı faydalıdır.

Yükseltilmiş sıcaklıkta şekillendirmenin üçüncü faydası sürünmedir ya da kaymayı sağlayacak miktardan daha az bir gerilimle plastik deformasyonun olmasıdır. Bu olay, öncelikle bir yüksek sıcaklık fenomenidir ve sürünme-zaman eğrisi üç farklı sıcaklık için Şekil 1.22a’da verilmiştir.



Şekil 1.22 Sıcaklığın sürünme üzerine etkisi (Processes and Materials of Manufacture)

Sıcaklığı T_1 'den T_3 'e yükseltmek sürünmede çok yüksek bir artışa sebep olur. Pratik bir yükseltilmiş sıcaklıkta sürünme şekillendirmesi genellikle 10 dakikadan kısa bir sürede ve yaklaşık olarak 277°C 'de gerçekleştirilir. Sürünme şekillendirmesi, ince kalınlıkta metallerde geri yaylanmayı büyük oranda elimine eder ve burulma, distorsiyon gibi problemlerde iyileşme sağlar (Şekil 1.22b).

Yüksek enerjili dövmenin geleneksel dövme yöntemlerine karşı avantajları aşağıda sıralanmıştır;

- Kompleks bir parça tek bir strokta dövülebilir; ister işlenmemiş bir iş parçası olsun ya da ön şekil verilmiş bir parça,

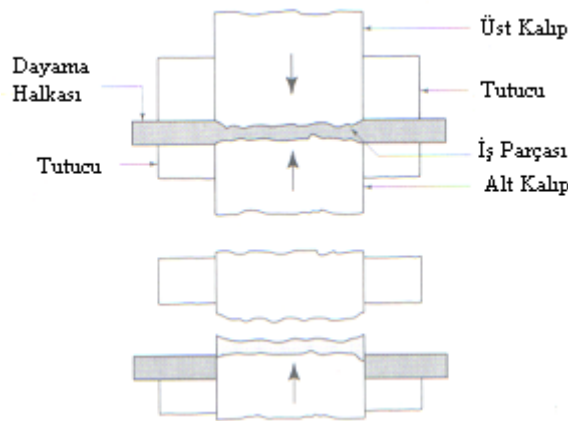
- Dövülebilirliği düşük birçok metal veya diğer dövme yöntemleriyle istenilen formun verilebilmesi çok zor olan metaller başarıyla dövülebilir,
- Ölçüsel doğruluk, yüzey detayları ve kalitesi çok iyidir,
- İç veya dış çekme açıları indirgenebilir veya bazı uygulamalarda tamamen kaldırılır,
- Derin ve ince parçalar dövülebilir. Çünkü işlemin hızlı olması kalıbın duvarlarından dışarı ısı kaybını minimize eder,
- Çok büyük ve zor deformasyonlar mümkündür. Hatta bazı malzemelerde çok iyi bir tane iyileşimi görülür,
- Operatörün yeteneğine daha az bağımlı bir metottur.

Yüksek enerjili dövmenin dezavantajları ve sınırlamaları aşağıda sıralanmıştır;

- Keskin köşeler ve radyüsler kalıbın çabuk aşınmasına sebep olur,
- Bu işlem ile daha çok simetrik (ancak bazı simetrik olmayan parçalar önceden form verilmiş iş parçaları ile dövülebilir) parçalar dövülebilir,
- Üretim hızı şahmerdanla dövme ve hidrolik presle dövme işlemiyle aynıdır. Ancak mekanik pres ile dövme işleminden yavaştır,
- Parça büyüklüğü karbon çeliği ile yapılan dövme işlemlerinde 11,25 Kg ile sınırlandırılmıştır,
- Kalıplar yüksek darbe gücüne dayanabilmeleri için çok iyi yapılmalıdır.

1.9 Damgalama

Damgalama bozuk para, madalya veya anahtar yapımında kullanılan bir kapalı kalıpla dövme tekniğidir (Şekil 1.23). Bu işlem genellikle soğuk olarak yapılmaktadır ve kalıp yüzeyleri iş parçasına damgalanmaktadır.



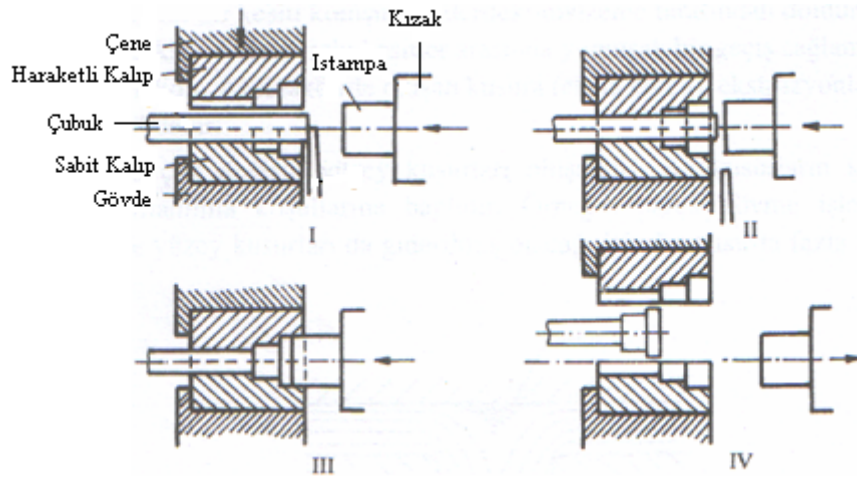
Şekil 1.23 Damgalama kalıbı (Manufacturing Engineering and Technology)

İnce detaylar elde etmek için gerekli olan basınç malzemenin akma sınırının 5-6 katı olabilir [3]. Ayrıca damgalama iş parçasında bir radyüsün küçültülmesi, son boyutların ölçüsel tamlığının sağlanması ve yüzey düzgünlüğünü sağlamak amaçlarıyla da kullanılır. Damgalama işlemi için büyük basınçlara ihtiyaç vardır ve kullanımı görece olarak yumuşak alaşımlarla sınırlandırılmıştır [10].

Yağlayıcılar, kalıp boşluklarına dolarak sıkıştırılmaz olduklarından ve kalıp yüzeyi detaylarının iş parçası üzerine repredüksiyonunu engellediklerinden dolayı damgalama kalıplarında kullanılmazlar.

1.10 Yatay Dövme

Bu yöntem, çubuk şeklinde iş parçasının eksenini doğrultusunda uygulanan basma kuvveti ile, arka ucunda veya herhangi bir kısmında, çapının büyütülmesi olarak tarif edilebilir. Bu işlem özel yığma makinalarında sıcak olarak uygulanır (Şekil 1.24).



Şekil 1.24 Yatay dövme (Dövme Teknolojisi)

Şekil 1.24’de gösterilmek istenen, biri sabit diğeri hareketli olan kalıp yarıları tarafından sıkıca kavranan çubuğun serbest ucu ıstampa yardımıyla kalıp boşluğunu doldurmaktadır.

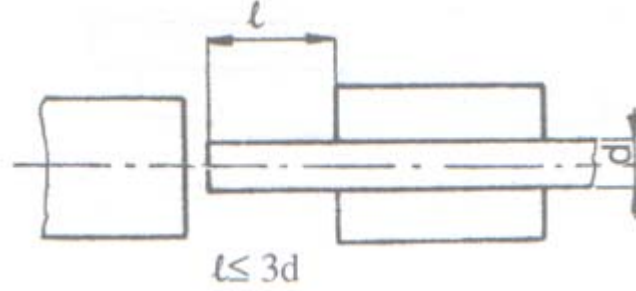
Bu yöntemle önceleri civata kafalarının tek vuruşta şekillendirilmesi gibi basit üretimler yapılmaktaydı. Günümüzde ise daha karmaşık şekilli parçalar elde edilebilmektedir. Örnek olarak; dişli çark taslakları, rulmanlı yatak bilezikleri ve aks milleri gösterilebilir [4]. Ayrıca, bu yöntem çekiç veya presle dövme için bir ön şekillendirme işlemi olarak da kullanılabilir.

Yatay dövme işlemi hızlı bir işlemdir. Bu işlemde kullanılan makinaların kapasiteleri 100 ile 300 ton arasındadır. Saatte ortalama 400 ile 600 parça üretebilirler ve iş parçası çapı 300 mm'ye kadar çıkabilmektedir.

1.10.1 Yatay Dövme Kuralları

1.10.1.1 Birinci Yatay Dövme Kuralı

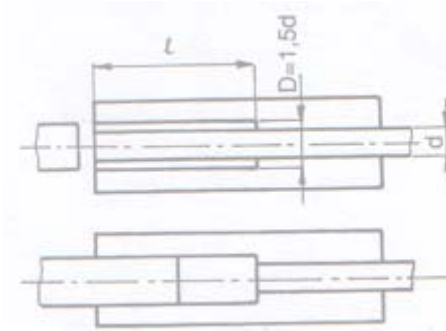
Dairesel bir çubuğun sıcak olarak yatay dövülmesinde, çubuğun kalıp dışında kalan serbest kısmının uzunluğu (ℓ) çapının (d) 3 katından büyük olmaması gerekmektedir (Şekil 1.25). Bunun dışına çıkan çalışmalarda, çubuğun burkulacağı deneysel olarak saptanmıştır [4]. Uygulamada en fazla $\ell = 2,5d$ alınmalıdır.



Şekil 1.25 Birinci yatay dövme kuralı (Dövme Teknolojisi)

1.10.1.2 İkinci Yatay Dövme Kuralı

Yatay dövme işlemi çapı $D = 1,5d$ olan bir boşlukta yapıldığı takdirde $\ell > 3d$ olabilmektedir (Şekil 1.26). Uygulamada $D = 1,4d$ alınmalıdır.

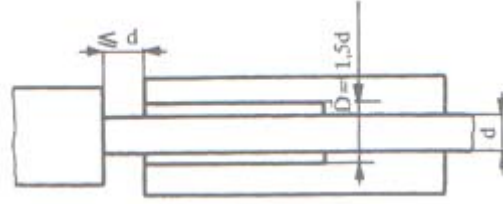


Şekil 1.26 İkinci yatay dövme kuralı (Dövme Teknolojisi)

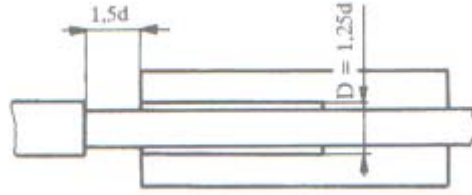
1.10.1.3 Üçüncü Yatay Dövme Kuralı

İkinci kuralın koşulları sağlanırken, çubuğun kalıplar arasından dışarı taşması halinde, taşan kısmın uzunluğu en çok çubuk çapına eşit olmalıdır (Şekil 1.27).

Bunun yanında eğer $D=1,5d$ yerine $D=1,25d$ alınırsa çubuğun kalıp dışına taşan kısmının uzunluğu $1,5d$ olabilmektedir (Şekil 1.28).



Şekil 1.27 Üçüncü yatay dövme kuralı (Dövme Teknolojisi)



Şekil 1.28 Üçüncü yatay dövme kuralı özel hali (Dövme Teknolojisi)

1.11 Dövme Yönteminin Avantajları

1.11.1 Parça Bütünlüğü

1.11.1.1 Yönelimsel Mukavemet

Koşulların büyük bir dikkatle kontrol altında tutulduğu dövme işlemiyle deformasyona uğratılan ısıtılmış metalden elde edilen iş parçası, daha önceden tahmin edilebilir uniform bir tane yapısına ve akış karakteristiğine sahiptir. Dövme yöntemiyle iş parçasının dentritik yapısında iyileşmeler sağlanarak iş parçasının üretiminden kaynaklanan hataları (porozite gibi) kendi bünyesinde eritir. Bu özellikler, daha iyi metallurjik ve mekanik özelliklere sebebiyet verip dövme işlemi bitirilen parçaya yönelimin düzgünlüğünden kaynaklanan yükseltgenmiş bir mukavemet sağlar.

1.11.1.2 Yapısal Mukavemet

Dövme yöntemi parçalara diğer şekil verme yöntemleriyle karşılaştırılmayacak derecede bir yapısal bütünlük sağlar. Bu yöntemle parçayı zayıflatın içsel boşluklar ve gaz boşlukları bertaraf edilir. Metallerde meydana gelen segregasyonları düzelterek kimyasal olarak uniform oluşumlara olanak sağlar. Önceden tahmin edilebilir yapısal bütünlük, parça inceleme gereksinimlerini indirger, talaş kaldırma ve ısıl işlem prosedürlerini basitleştirerek şekillendirecek yüzey ve yükleme koşulları arasında en iyi performansı garanti eder.

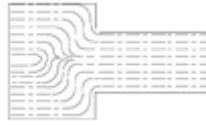
1.11.1.3 Darbe Mukavemeti

Dövme yöntemiyle üretilen parçalar çok yüksek gerilim, yük ve darbe değerlerine dayanıklı bir şekilde üretilebilirler. Tane yayılımının uygun dağılımı maksimum darbe mukavemeti ve yorulma direnci sağlar. Dövülen parçanın yüksek mekanik özellikleri sayesinde indirgenmiş kesit ağırlıkları ve bitmiş parçanın bütünlüğü ile uyum içerisinde bir ağırlık düşüşü sağlar.

1.11.2 Tanecik Akışı Karşılaştırması

1.11.2.2 Dövülmüş İş Parçası

Dövme işlemi sonucunda iş parçasında oluşan tane akışı maksimum mukavemeti işaret eden bir karakter gösterir. Bu durum, darbeye ve yorulmaya karşı direncide iyileştirecek özelliktedir (Şekil 1.29).



Şekil 1.29 Dövme ile imal edilen parçanın tane yapısı (www.scotforge.com)

1.11.2.2 Talaş Kaldırılan İş Parçası

Talaş kaldırma işlemi sonucunda elde edilen parçada tane akışı, kontur çizgileri boyunca yönelim göstermezler. Bunun sonucunda tane akışı çizgileri süresizdir, yorulma dayanımları ve gerilimlere karşı olan mukavemetleri düşüktür (Şekil 1.30).



Şekil 1.30 Talaş kaldırma yoluyla imal edilen parçanın tane yapısı (www.scotforge.com)

1.11.2.3 Döküm Yoluyla Oluşturulan İş Parçası

Düzenli tane akışı çizgilerine ve yönelimsel mukavemete bu imalat yöntemiyle ulaşılamaz (Şekil 1.31).



Şekil 1.31 Döküm yoluyla imal edilen parçanın tane yapısı (www.scotforge.com)

1.11.3 Parça Esnekliği

1.11.3.1 Boyut Çeşitliliği

Açık kalıpla dövme işleminde, dökülebilecek en büyük ingot ile sınırlı olmak üzere, 1 pounddan 400.00 pounda kadar büyüklükte parçalar dövülebilmektedir. Genellikle satın alınan açık kalıpta dövülen parçalara ek olarak dövme ile üretilen parçalar, sağlamlıkları ile veya diğer şekil verme metodları ile üretmek için çok büyük olmaları ile avantajlıdırlar.

1.11.3.2 Şekil Çeşitliliği

Şekil dizaynı büyük değişiklik gösterir. Basit çubuktan şaftlara, halka kombinasyonlarından özel şekillere kadar geniş bir skalada yayılmıştır. Daha detaylı olarak kapalı kalıp konfigürasyonları yaklaşımını gerektiren tekli, çoklu delik ve göbekler, dövme ek olarak kesme ve talaşlı işleme gereksinimi duyan daha özel şekillerdir. Şekil dizaynı dövme tedarikçisinin yaratıcı yeteneği ve hayal gücü ile sınırlıdır.

1.11.3.3 Metalurjik Spekturum

Dövme tam olarak bütün ferro alaşımlar ve non-ferro alaşımlar ile yapılabilir. Dövme prosesi; alaşım seçimi, sıcaklıklar, dövme metodu ve dövme işlemi sonrası istenilen metalurjik özelliklere ulaşmak için yapılacak işlemlerin belirlenmesiyle kolay bir biçimde başarıyla uygulanan bir sistemdir.

1.11.4 Ekonomik Avantajları

1.11.4.2 Malzeme Kazancı

Dövme yöntemi, çoğu şekil için daha az hacimde iş parçasına ihtiyaç duyduğu için, çok büyük bir miktarda malzeme kazancı sağlar. Şekil 1.32’de talaşlı işlem ile üretilecek olan parçada kaybedilen malzeme miktarı gösterilmiştir.



Şekil 1.32 Talaşlı işlem ile oluşturulan parçadaki malzeme kaybı (www.scotforge.com)

1.11.4.3 Talaşlı İşlem Ekonomisi

Dövme yöntemiyle üretilen parçalar istenen şekle çok yakın olduğu için daha az talaş kaldırılmaya ihtiyaç duyulacağı için dövme işlemi sonrası işlem zamanı ve takım ömürleri perspektifinden bakıldığında büyük kazanç sağlanmaktadır.

1.11.4.4 Ürün Verimliliği

Dövme yöntemiyle çok geniş bir büyüklük aralığında, belirli bir parçayı üretmek için kullanılacak çok çeşitli iş parçaları mevcuttur. Bu esneklik sayesinde parçalar dövme yöntemiyle çok hızlı bir şekilde ekonomik olarak üretilerler.

2. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ

2.11 Çeşitli Yapısal Prosedürler İçin Genel Eşitlikler

Sonlu elemanlar ile analiz yapan programlar deplasman metodu temelleri üzerinde geliştirilmişlerdir. Bu metodda kuvvet-deplasman ilişkisi sistemin rijitlik (stiffness) matrisi üzerinden tanımlanır. Lineer statik bir problemde kuvvet-deplasman ilişkisi; $K.u=f$ olarak tanımlanır.

Bu denklemde, K sistemin rijitlik matrisi, u nodal deplasman ve f ise kuvvet vektörünü sembolize eder.

Çözülecek olan sistemin deplasman ve kuvvet için önceden tanımlanmış sınır koşulları olduğu farz edilirse; genel denklem aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} \\ K_{21} & K_{22} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_1 \\ f_2 \end{pmatrix} \quad (2.1)$$

Bu denklemde u_1 bilinmeyen deplasman vektörünü, f_1 önceden tanımlanmış kuvvet vektörünü, u_2 önceden tanımlanmış deplasman vektörünü ve f_2 ise reaksiyon vektörünü ifade eder. Sistem, u deplasman vektörü için çözüldükten sonra herbir elemanın gerinimi (ε_{el}), elemanın nodal deplasmanı vasıtasıyla gerinim-deplasman ilişkisinden bulunabilir.

$$\varepsilon_{el} = \beta u_{el} \quad (2.2)$$

Elemanın gerilim değerleri gerilim-gerinim ilişkisinden yola çıkılarak elde edilir.

$$\sigma_{el} = L \varepsilon_{el} \quad (2.3)$$

Burada, σ_{el} elemanın gerilim değerlerini, ε_{el} ise gerinim değerlerini ifade eder. u_{el} , elemanın nodal noktasına ait deplasman vektörüdür. β , gerinim-deplasman ve L ise gerilim-gerinim ilişkisini ifade eder.

2.12 Sistem ve Eleman Rijitlik Matrisleri

Son olarak sistemdeki eleman matrislerinden kurulan sistem matrisine yer verilmiştir. Sistemin rijitlik matrisi K , elemanların rijitlik matrisleri vasıtasıyla ifade edilir.

$$K = \sum_{i=1}^N K_i^{el} \quad (2.4)$$

Denklemden N , sistemdeki eleman sayısıdır. Sistemin rijitlik matrisi diyagonal banta göre s,metriktir (Şekil 2.1). Eleman eleman iteratif çözücü kullanıldığı zaman, toplam rijitlik matrisi hiçbir zaman kurulamaz. Elemanın rijitlik matrisi aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$K^{el} = \int_{v^{el}} \beta^T L \beta dv^{el} \quad (2.5)$$

Bu denklemde v^{el} , elemanın hacmini, β gerinim-deplasman ilişkisini ve L gerilim-gerinim ilişkisini ifade eder.

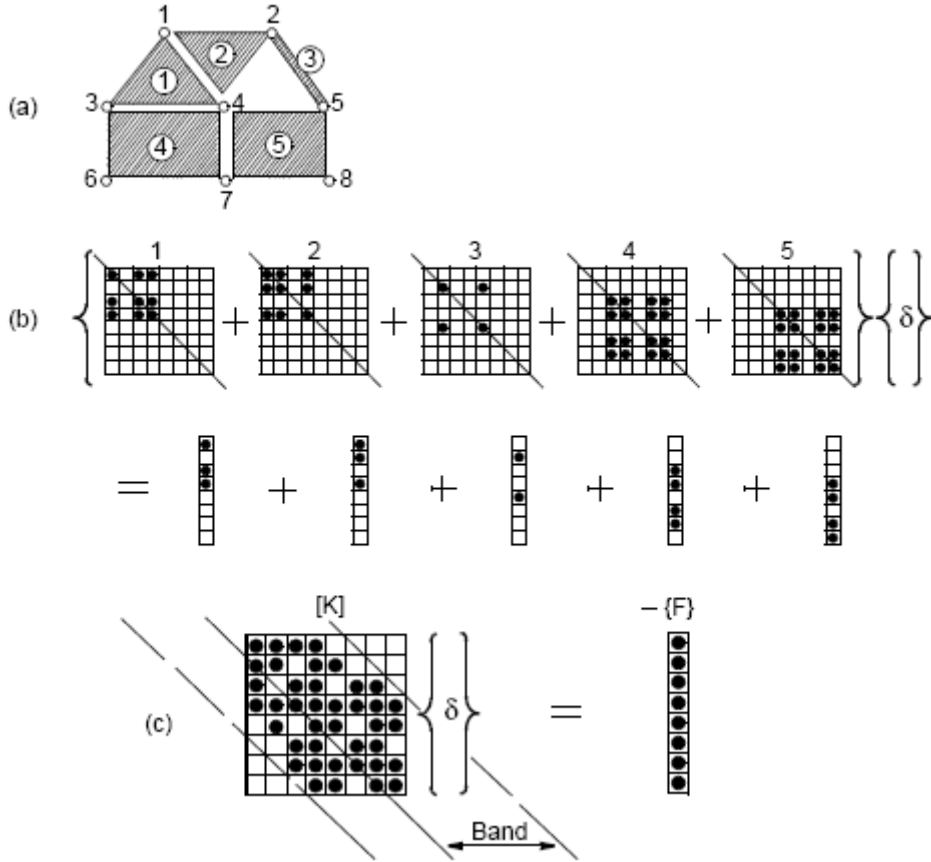
$$\varepsilon = \beta u \quad (2.6)$$

$$\sigma = L \varepsilon \quad (2.7)$$

Kapasite matrisi aşağıdaki şekilde olduğu gibi ifade edilebilir.

$$C^{el} = \int_{v^{el}} N^T \rho c N dv \quad (2.8)$$

Sonrasında 5 numaralı denklem, seçilen integrasyon noktalarına bağlı olarak çözülür. Eleman rijitlik matrisi tam olarak veya hiç işleme katılmayabilir. Kapasite matrisi her zaman tam olarak işleme katılır.



Şekil 2.1 Matris sisteminin kurulmasının şematik gösterimi (MSC. Superform Command Reference)

2.13 Yük Vektörleri

Birinci denklemdaki yük vektörü f , bünyesinde birden fazla yük çeşidini barındırır.

$$f = f_{point} \oplus f_{surface} \oplus f_{body} \oplus f^* \quad (2.9)$$

Bu denklemde f_{point} , noktasal yük vektörünü, $f_{surface}$, yüzeye yayılı yük vektörünü, f_{body} , hacimsel yük vektörünü ve f^* , diğer tüm yük tiplerini ifade eder. Örnek olarak ısı gerinimleri verilebilir.

Noktasal yükün, nodal serbestlik derecesiyle ilgisi vardır ve nodal kuvvet vektörüne direkt olarak eklenebilir. Ekvivalent nodal kuvvet vektörleri, $f_{surface}$ ve f_{body} ilk önce dağıtılmış yüklerden hesaplanmalıdır. Daha sonra nodal kuvvet vektörüne eklenir. Ekvivalent nodal kuvvetler, hacimsel yüzey alanına uygulanan dağıtılmış yükün nümerik integrasyonu ile hesaplanır ve aşağıdaki şekilde gösterilir.

$$f_{surface} = \int_A N^T \rho dA \quad (2.10)$$

$$f_{body} = \int_V N^T \rho dV \quad (2.11)$$

Denklemden ρ , basıncı göstermektedir.

2.14 Lineer Olmayan Etkiler

Bu kısımda üç adet doğrusal olmayan etki incelenecektir.

2.14.1 Lineer Olmayan Malzeme Etkileri

P.V. Marcal ve I.P. King plastisiteyi modelleyerek ilk gerçekçi lineer olmayan sonlu elemanlar çözüm tekniğini bulmuşlardır. Bu formülasyon malzeme tepkisinin elastik olduğu ve sonunda plastik malzeme tepkisinin olduğu sınırlarda geçerlidir. Formülasyonun yenilenmesi her bir integrasyon noktasında tanımlı ve farklı malzeme davranışlarına izin veren nümerik olarak integrasyonu yapılan elemanlara dayanır.

J.R. Rice ve D.M. Tracy tarafından elastik-plastik problemler için ilk rijitlik matrisi tanımlanmıştır. Bu rijitlik matrisi gerilim bölgesinin akan yüzey üzerinde kalmasını garanti eder. Yaklaşımın diğer bir özelliği koşulsuz stabilite sağlamasıdır. Kullanılan programda konvansiyonel Von-Mises akma yüzeyleri mevcuttur.

2.14.2 Geometrik Süreksizlikler

Geometrik lineersizlik problemleri için Lagranjyan veya Euleryan formülasyonlar seçilir.

2.14.3 Lineer Olmayan Sınır Koşulları

Lineer olmayan sınır koşulları kontak problemlerini ve lineer olmayan destek koşullarını içerir. Kontak seçeneği, deforme olabilen parçalar arasında ve deforme olabilen parçayla rijit yüzey arasında seçilir.

2.15 Çözüm Prosedürleri

Lineer olmayan bir problemde, sistem denklemi artımlı olarak çözülmelidir. Sistemin genel denklemi aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$Kdu=df$$

Denklemden du , artımlı deplasmanı ve df , artımlı kuvvet vektörünü ifade eder.

Genel olarak sonlu elemanlar tekniğinde üç adet lineer olmayan çözüm tekniği kullanılmaktadır. Bu yöntemler sırasıyla; Full Newton-Raphson, Modified Newton-Raphson ve Gerinim Düzeltme metodları olarak adlandırılırlar.

Full Newton-Raphson metodunda quadratik yakınsama özellikleri mevcuttur. Bu, ardı ardına yapılan iterasyonlarda görece hatanın quadratik olarak arttığını gösterir. Malzeme süreksizliği, kontak veya sürtünme sistemde mevcutsa bazı yaklaşıklıklar yakınsamayı yavaşlatır. Full Newton-Raphson metodu çoğu lineer olmayan problem için etkili sonuçlar verir. Fakat, direkt çözücü kullanıldığı zaman büyük üç boyutlu problemler için uygun değildir. Bu hesaplama yöntemi, iteratif çözücüler kullanıldığı zaman daha az karışıklık yaratır.

Yapısal analizlerde Newton-Raphson metodunun temeli dengenin sağlanması gereksinimidir.

$$I(u) = f \quad (2.12)$$

$$K(u)du = f - I(u) \quad (2.13)$$

Yukarıdaki denklemlerde u , nodal deplasman vektörünü, f , harici nodal yük vektörünü, I , dahili nodal yük vektörünü (içsel gerilimden kaynaklanan) ve K ise tanjansal rijitlik matrisini ifade eder. Dahili nodal yük vektörünü içsel gerilimden aşağıdaki gibi elde edilir.

$$I = \int_v \beta^T \sigma dv \quad (2.14)$$

Bu denklemde I , u 'nun bir fonksiyonudur. Çoğu durumda, f ise u 'nun bir fonksiyonudur.

Denklemler Full Newton-Raphson metodunu kullanmanın uygun olduğunu gösterirler.

Alınan son yaklaşık sonucun $du^{(i)}$ olduğu kabul edilirse (i , iterasyon numarasını ifade eder) 9 numaralı denklem aşağıdaki gibi yazılır.

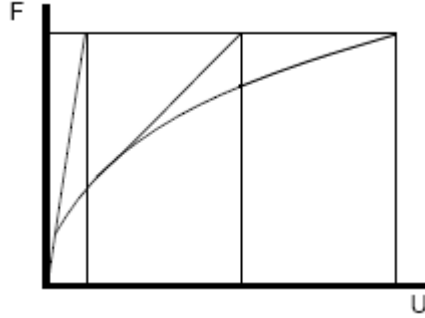
$$K(u^{(i)})du = f - I(u^{(i)}) \quad (2.15)$$

Yukarıdaki denklem du için çözülürse aşağıdaki uygun sonuç elde edilir.

$$u^{(i\oplus 1)} = u^{(i)} \oplus du \quad (2.16)$$

Bu denklemin sonucu sadece bir iterasyonu tamamlar ve bu işlem tekrarlanıp devam ettirilir.

Full Newton-Raphson metodu $K(u)$ rijitlik matrisinin her iterasyon için yeniden hesaplanmasına ihtiyaç duyar. Eğer yük artımlı olarak uygulanırsa, program rijitlik matrisini her artımın başında yeniden hesaplar veya seçilmiş artımlar için hesaplar (Şekil 2.2).



Şekil 2.2 Full Newton-Raphson metodu (MSC. Superform Command Reference)

2.16 Gerilim Analizleri İçin Yakınsama Kontrolleri

Sonlu elemanlar sisteminde lineer olmayan sistemin yakınsaması hatalar ve/veya deplasmanlar incelenerek değerlendirilir. Yakınsama kriteri sağlanmış olsa bile varsayılan yakınsayan artımdır. Bu durum, erken yükleme durumunda, kalıbın tam kapalı olduğu durumda ve tekrar yüksüz durumda yani sistemin bütün aşamalarında çözüm için çok kullanışlıdır. İterasyonlar arası hatanın yakınsama kriteri olarak kullanılması doğrudur. Çünkü hatalar, minimize edilmesi gereken ve dengede olmayan kuvveti ölçerler. Bu teknik, sıfır yük iterasyonlarının hata yükünü indirmediği Newton-

Raphson metodu için uygundur. Metodun ekstra faydası, yakınsamanın iterasyon yapılmadan sağlanabilmesidir.

2.16.1 Hata Kontrolü

$$\frac{\|F_{residual}\|_{\infty}}{\|F_{resident}\|_{\infty}} < TOL_1 \quad (2.17)$$

$$\|F_{residual}\|_{\infty} < TOL_1 \quad (2.18)$$

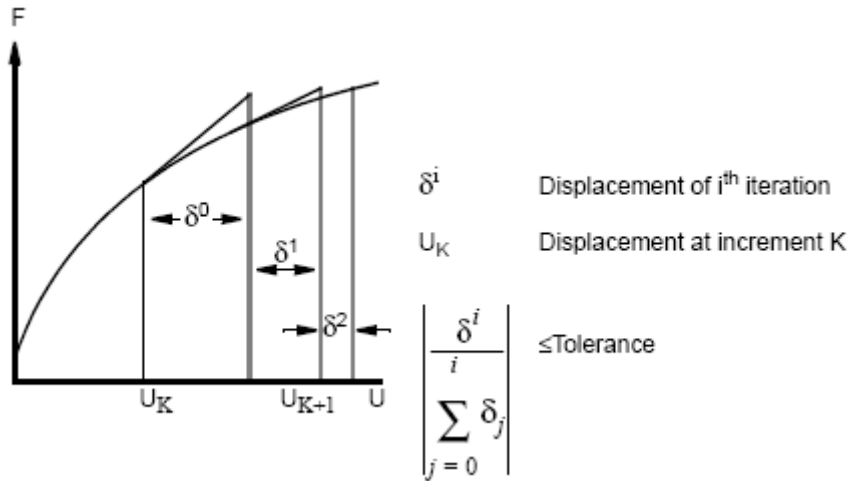
Yukarıda belirtilen ifadelerde F , kuvvet vektörünü ve TOL_1 ise kontrol toleransını göstermektedir. $\|F\|_{\infty}$, F 'in en yüksek gerçek değerdeki parçasını ifade eder. Serbest termal genişleme gibi bazı özel durumlarda herhangi bir reaksiyon kuvveti yoktur ve sistem içerisinde deplasman kontrolü kullanılabilir.

2.16.2 Deplasman Kontrolü

$$\frac{\|\partial u\|_{\infty}}{\|du\|_{\infty}} < TOL_1 \quad (2.19)$$

$$\|\partial u\|_{\infty} < TOL_1 \quad (2.20)$$

Yukarıda belirtilen ifadelerde du deplasman artım vektörünü; ∂u ise deplasman iterasyon vektörünü ifade eder. Bu metotta yakınsama, eğer son iterasyonun maksimum deplasman artımı gerçek deplasman değişimine göre çok küçükse sağlanır. Bu yaklaşımın tek dezavantajı çözümün doğruluğundan bağımsız olarak en az bir iterasyon sonrasında sonuçlanmasıdır (Şekil 2.3).



Şekil 2.3 Deplasman kontrolü (MSC. Superform Command Reference)

2.17 Tanımsızlık Oranı

Tanımsızlık oranı R , sistemin lineer denkleminin şartının bir ölçüsüdür. R , şart numarasıyla ilişkilidir, C ise sistemin çözümü sonucunda çıkan en büyük değer ile en küçük değer arasındaki orandır. Tanımsızlık oranı ise matris şart numarasının tersinin üst sınırıdır.

$$\frac{1}{R} \leq C \quad (2.21)$$

C ve R çözüm işleminin hatalarının büyüklüğün ifade eder. Eğer denklemin sağ tarafındaki hatalar sonuca göre E 'den küçükse, sonuçtaki hatalar δ 'dan küçük olur.

$$\delta \leq CE \quad (2.22)$$

Tanımsızlık oranı kullanılan direkt çözücünün bir ölçütüdür. Bu işlemde sürekli tekrarlanan bir algoritma, diyagonal terimleri tekrar tanımlar.

$$A_{kk}^{(k)} = A_{kk}^{(k-1)} - \sum_{l=1}^{k-1} A_{lk} A_{kl}, 1 \leq i \leq k-1 \quad (2.23)$$

Burada i , matrisin bir fonksiyonudur. A_{kk} , k^{th} serbestlik derecesinden diyagonaldır. Tanımsızlık oranı aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$R = \min \frac{A_{kk}^{(k)}}{A_{kk}^{(k-1)}} \quad (2.24)$$

Eğer bütün $A_{kk}^{(k)}$ ve $A_{kk}^{(k-1)}$ 'ler pozitif ise tanımsızlık oranı çözüm prosesindeki doğrulukta bir azalmaya işaret eder. Doğrulukta bu azalma bütün pozitif tanımlı matrisler için geçerlidir. Eleminasyon prosesindeki digitlerin azalması aşağıdaki ifadeye eşittir.

$$n_{lost} = -\log_{10} R \quad (2.25)$$

Tanımsızlık oranı ayrıca yapıdaki rijit body modlarını gösterir. Bu durumda eleminasyon prosesi diyagonal üzerinde sıfırlar üretir, $A_{kk}^{(k)} \cong 0$. Nümerik hatadan dolayı sıfırlar hiçbir zaman görünmez. Ancak, tanımsızlık oranı aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$R = 0(10^{-ndigit}) \quad (2.26)$$

Programın çoğu versiyonlarında $n_{digit} > 12$ 'dir. Eğer rijit body modları varsa $A_{kk}^{(k)}$ çok küçüktür veya negatiftir. Sıfır veya negatif olsun eğer bir diyagonal ile karşılaşırsa programın yürütülmesi durdurulur. Çünkü matris diyagonalleştirilmiş olup, tekildir.

Çözüm, pozitif olmayan veya tekil bir matrisle zorlanabilir. Bu durumda program diyagonal üzerinde rastlanan negatif veya küçük bir $A_{kk}^{(k)}$ değeri için durmaz.

2.18 Lineer Denklemlerin Çözümü

Sonlu elemanlar formülasyonu birçok lineer denkleme uygulanabilir. Sonuç, sistemin nümerik olarak çevrilmesiyle bulunur. Kullanılan programda bir sürü problemle karşılaşılır. Ancak, bunlar için birçok çözüm prosedürü mevcuttur.

Çoğu analiz gerçek, simetrik ve pozitif tanımlı olarak sonuçlanır. Yeterli sınır koşullarının varsayımıyla lineer yapısal problemlerde bu doğrudan tüm analizler için aynı şey söylenemez. Genel olarak sistemlerde direkt ve iteratif olarak iki ana çözüm yöntemi bulunur. Her yöntem depolama prosedürüne bağlı olarak iki adet çözücü ailesine sahiptir. Eğer yeterli hafıza varsa tüm bu çözümler kullanılabilir.

Genel olarak kullanılan kodlarda aşağıdaki çözümler tavsiye edilir.

- İki Boyutlu Problemler (MULTIFRONTAL SPARSE)
- SGI ve HP Kullanımı İçin (HARDWARE SPARSE)
- Üç Boyutlu Problemler (ITERATIVE SPARSE)

Eğer Hermann elemanları mevcutsa direkt çözümleri kullanmak gerekli olabilir.

2.18.1 Direkt Metodlar

Geleneksel olarak lineer denklemlerin çözümünde direkt çözüm metodları kullanılır. Bu metodlar tüm problemler için verdikleri sonucu güvenilirdirler. Pozitif tanımlı sistemlerde hesaplamalı zorluklar yoktur. Fakat, zayıf şartlandırılmış sistemlerde sonuç istenmeyen şekilde olabilir. Direkt metodların dezavantajlı yönleri çok fazla disk alanına ihtiyaç duymaları ve hesaplama zamanının uzun sürmesidir.

2.18.2 İteratif Metodlar

İteratif metodla büyük sistemlerin çözümünde alternatif bir yöntemdir. İteratif metodların tek büyük avantajı, çok büyük bir sistemde çözümü indirgenmiş bir çözüm zamanıyla bulmalarıdır. Bu durum donanım konfigürasyonundan bağımsız olarak doğrudur. Metodun dezavantajı, çözüm zamanının sadece problemin büyüklüğüne bağlı olmayıp aynı zamanda sistemin nümerik durumunda bağlı olmasıdır. Zayıf şartlandırılmış bir sistemde adımların arası yavaş olarak geçildiğinden hesaplama zamanı uzar.

İteratif çözümler söz konusu olduğu zaman fraktal boyutu ve şartlandırma numarası olarak iki konseptten bahsetmek mümkündür. Bunların ikisinde matematiksel konseptlerdir, hatta fraktal boyutu basit bir fiziksel konsepttir. Fraktal boyutu 1 ile 3 arasında bir değer alabilir ve bir çubuğun fraktal boyutu 1, kübenin ise 3'tür.

Şart numarası ise sistem çözümlerinin en alçak değerinin en yüksek değerine oranıyla ilgilidir. Bu numara tanımsızlık oranıylada ilgilidir ve direkt çözüm prosedürü kullanıldığında rapor edilir.

2.18.3 Ön Şartlandırıcılar

Ön şartlandırıcı seçimi sistemi güçlendirir ve iterasyon sayısını indirger. Tüm pozitif tanımlı sistemin N adet serbestlik noktası varsa N adet iterasyon yapılır ve iyi şartlandırılmış bir sistemde adım sayısı N tane iterasyonun karesinden küçüktür.

İteratif çözümlerde mevcut ön şartlandırıcılar aşağıda verilmiştir.

Tam olmayan Cholesky daha çok hafızaya ihtiyaç duyar. Ancak sistemi daha hızlı çözer. İteratif çözümler, çevrim tamamlandığında bulunacak bir hata kriterine ihtiyaç duyarlar. Kullanılacak olan hata kriteri, çözümdeki hatalar ile reaksiyon kuvveti arasındaki orana dayandırılır. Lineer denklemin sonucu elde edildikten sonra u^c hesaplanır.

$$Ku^c = F^c \quad (2.27)$$

Çözüm prosedüründen gelen hata aşağıda belirtilmiştir.

$$R^{es} = F^A - F^C = F^A - Ku^c \quad (2.28)$$

Sistem lineer ise (K değişmez) ve gerçek nümerik değerler uygulanırsa $R^{es} = 0$ çıkar.

R iteratif metotta sıfır olmaz, fakat ilerleyen iterasyonlarla beraber indirgenir. İstenen yakınsamaya ulaşıldığı zaman aşağıdaki ifade geçerlidir.

$$R_{es} / R_{eac} < tolerance \quad (2.29)$$

Genellikle tolerans değeri çözücünün seçildiği bölümden ayarlanır.

2.18.4 Depo Metodları

Genel olarak, N bilinmeyenli lineer denkleme sahip sistemler $N \times N'$ lik bir matris ile ifade edilirler. Ancak, sonlu eleman analizlerinde sistem sınırlandırılmıştır ve girilen bütün değerler depolanmak zorunda değildir. Bu durum hafıza gereksinimini ve hesaplama zamanını düşürür.

Sonlu elemanlar metodunda matrisin bant genişliğini doldurmak için ekstradan konan sıfırlar sistemde görünür. Bu yüzden, bu metod avantajlıdır. Yöntem sistemin rijitlik matrisini oluşturmak için kullanılır. Matriste çok sayıda sıfır bulunduğu zaman Sparse Storage Method'u kullanmak oldukça avantajlıdır. Ekstra sıfır kullanmayan tekniklerde vardır. Fakat, sıfır olmayan değerleri depolamak için fazladan disk alanına ihtiyaç

duyarlar. Yöntemde aşağıdaki durumları incelenerek sistemin ihtiyacı olan boşluk bulunmalıdır.

X'e eklenmeyecek olan nodal değerler.

Y'ye eklenmeyecek olan nodal değerler.

Eğer X/Y oranı yüksekse yöntem avantajlıdır.

2.18.5 İteratif Çözümler

İteratif çözümler en az hafızayı kullanan yöntemdir. Fakat, Herrmann elemanları kullanıldığı zaman zayıf bir yakınsama gösterebilir.

2.18.6 Temel Teori

Lineer sonlu elemanlar sistemi aşağıdaki gibi ifade edilmiştir.

$$Ku=F \quad (2.30)$$

Lineer olmayan sistem şu şekilde ifade edilir.

$$K^N \Delta u = R \quad (2.31)$$

Burada K, elastik rijitlik matrisini ifade eder, K^N ise lineer olmayan rijitlik matrisidir. Δu , deplasman vektörü, F uygulanan yük vektörünü ve R ise hatayı ifade etmektedir.

Lineerleştirilmiş sistem, minimize edilerek şu şekilde ifade edilir.

$$\phi(u) = \frac{1}{2} u^T K u - u^T F \quad (2.32)$$

Lineer yapısal problemler için bu proses potansiyel enerjinin minimize edilmiş hali olarak düşünülebilir. Bu minimuma şu şekilde ulaşılır.

$$u = K^{-1} F \quad (2.33)$$

ϕ fonksiyonu en hızlı negatif eğim açısı yönünde indirgenir.

$$\nabla \phi(u) = F - K u = R \quad (2.34)$$

İteratif tekniklerin amacı ϕ' 'yi rijitlik matrisini değiştirmeden minimize etmektir. En basit metotta aşağıdaki şekilde ifade edilir.

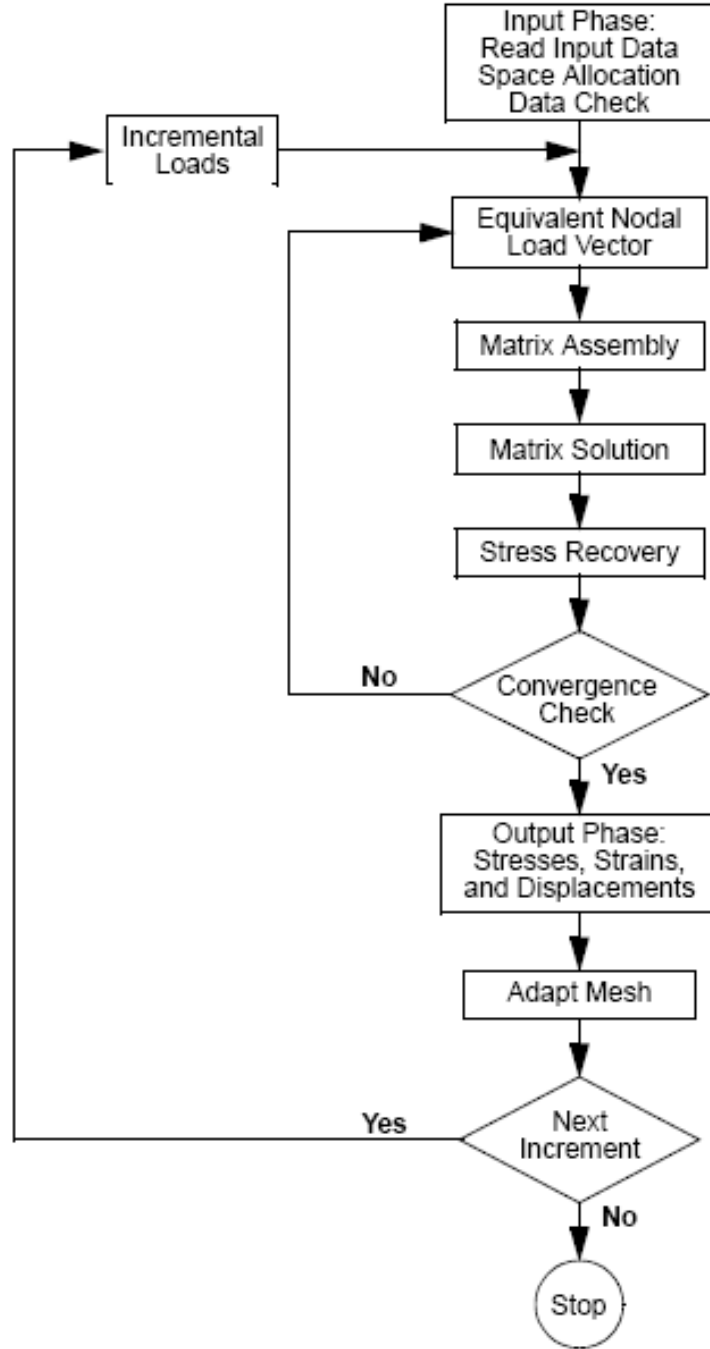
$$u_{k+1} = u_k \oplus \alpha_k R_k \quad (2.35)$$

$$\alpha_k = \frac{R_k^T \cdot R_k}{R_k^T K R_k} \quad (2.36)$$

Buradaki en önemli husus P_k 'yi K 'nın değişen değerleri için seçmektir. Bu metodun avantajı, çözümün birçok matris çarpımıyla elde ediliyor olup rijitlik matrisinin değişmek zorunda kalmıyor oluşudur.

Kötü şartlandırılmış bazı problemler zayıf yakınsamaya neden olabilir. Bu durumda ön şartlandırıcı yakınsamada iyileştirmeye sebep olabilir. Buradan sonra diğer adım etkili ve verimli hesaplamaya elverişli bir ön şartlandırıcının seçimidir. Bunun en kolay yolu rijitlik matrisinin diyagonalini seçmektir. Cholesky metodu gerekli iterasyon sayısını düşüren çok etkili bir metoddur.

Şekil 2.4'de sonlu elemanlar programında kullanılan akış şemasına yer verilmiştir.



Şekil 2.4 Sonlu elemanlar programı akış şeması (MSC. Superform Command Reference)

3. SONLU ELEMANLAR PAKET PROGRAMI İLE MODELLEME SÜRECİ

Yapılan bu çalışmada örnek parçaların sonlu elemanlar analizi MSC. SuperForm sonlu elemanlar paket programı kullanılarak yapılmıştır.

MSC. SuperForm programı, bilgisayar ortamında metal şekillendirme simülasyonları yapan bir programdır. Bu program ile kullanıcı, yapılacak olan şekil verme işlemine göre proses parametrelerini belirleyip takım dizaynını yapar. Bu işlemlerin hepsinin bilgisayar ortamında yapılmasıyla, kalıp deneme süreci ortadan kaldırılır. Bu sayede zamandan çok büyük miktarda tasarruf elde edilip maliyet ekonomisi sağlanmış olur.

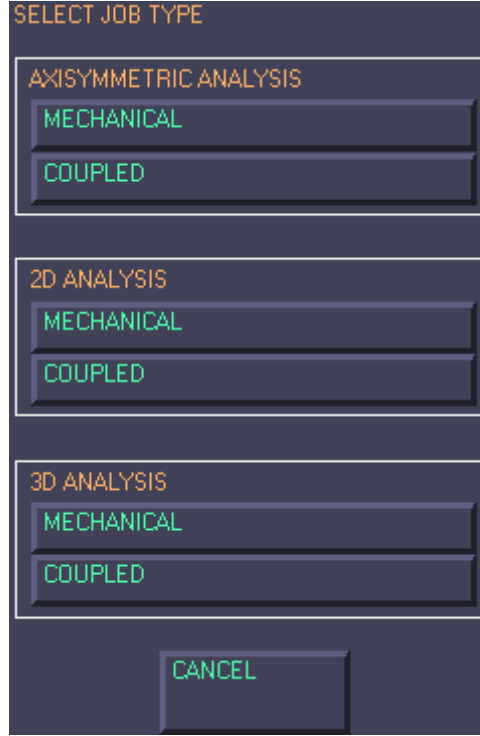
MSC. SuperForm, sonlu elemanlar olarak bilinen nümerik bir tekniğe göre işlem yapar. Sonlu elemanlar yöntemi, mühendislik simülasyonları için çok yaygın ve güçlü bir yöntemdir. MSC. SuperForm genel amaçlı sonlu elemanlar yazılımı olan MSC. Marc'a dayandırılarak oluşturulmuş bir metal şekillendirme simülasyonu yazılımıdır. 2001 yılında MSC. Marc Auto Forge olan eski adını bırakmıştır. MSC. Software firması 1971'den beri genel amaçlı sonlu elemanlar yazılımı geliştirmektedir.

Kullanıcı MSC. SuperForm'u kullanarak; malzeme akışı, kalıbın doldurulması, kalıp gerilimi, yük-strok bilgisi, sıcaklık dağılımı, uygunsuz akıştan dolayı meydana gelen hatalar gibi birçok bilgiyi elde edebilmektedir. Daha sonra kullanıcı bu bilgiler ışığında iyileştirdiği dizaynı, istediği uygun parçayı elde etmek için kullanılır.

Yapılacak olan simülasyonun doğru bir şekilde çalışabilmesi için simülasyon aşamalarının eksiksiz bir biçimde yerine getirilmesi gerekmektedir. Bölümde, bu simülasyon aşamaları anlatılmıştır.

3.1 Yapılacak İş Çeşidinin Seçilmesi

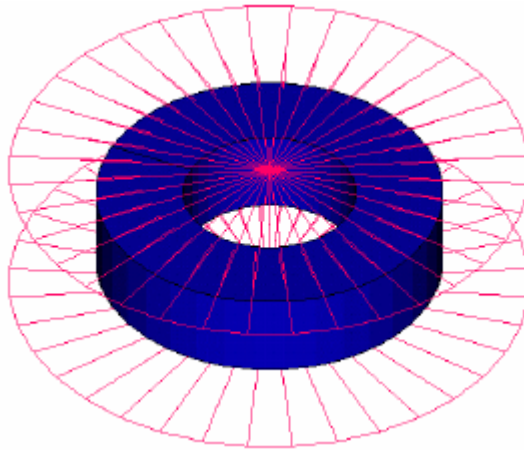
Simülasyonu oluşturmaya başlarken yapılması gereken ilk iş, yapılacak olan iş çeşidinin seçilmesidir. Modelin geometrisine ve yükleme şartlarına bağlı olarak 3 başlık altında olmak üzere toplam 6 adet seçenek vardır (Şekil 3.1). Şekilde görüldüğü gibi her üç analiz tipi için de, elastisite ve plastisiteyi hesaplara dahil ederek ısıl etkileri ihmal eden "Mechanical" ve ısı transferinin o andaki şekil ile temas durumuna göre hesaplandığı, plastik deformasyon enerjisinin bir kısmının ısıya dönüştürüldüğü ve bu ısıl değişimin malzeme özellikleri üzerindeki etkisinin göz önüne alınarak işlem yapıldığı "Coupled", analizlerinden birini seçmek mümkündür.



Şekil 3.1 Yapılacak iş çeşidinin seçildiği menü (MSC. SuperForm User's Guide)

3.1.1 Eksenel Simetrik Analiz

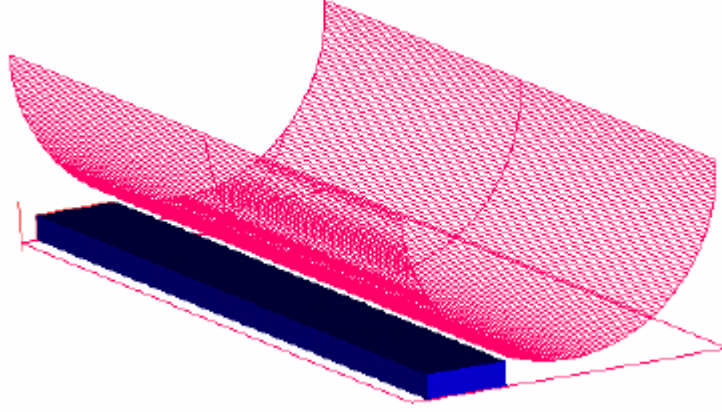
Model geometrisi ve yükleme koşulları tek bir eksen etrafında dönel ise bu analiz tipi seçilmektedir. Bu analiz tipini seçmekle, eksen etrafındaki herhangi bir noktanın deformasyonunun aynı olduğu farzedilir. Halka şeklinde bir parçanın basılmasında bu analiz yöntemi kullanılmaktadır. Şekil 3.2'de bu şekilde bir model geometrisi gösterilmiştir.



Şekil 3.2 Eksenel simetrik analizi yapılabilecek olan model geometrisi (MSC SuperForm User's Guide)

3.1.2 İki Boyutlu Analiz

Model geometrisi ve yükleme koşulları üç boyuttan herhangi birinde homojen ise ve bu boyutun uzunluğu diğer iki boyuttan çok daha uzun ise bu analiz tipi kullanılmaktadır. Bu tip analize ayrıca düzlem gerinim analizi de denilmektedir. Buna göre uzun olmayan boyutlardaki deformasyonla karşılaştırıldığında, uzun olan boyutun deformasyonu sıfır kabul edilmektedir. Şekil 3.3’de iki boyutlu analiz yapılabilecek olan model geometrisi verilmektedir.



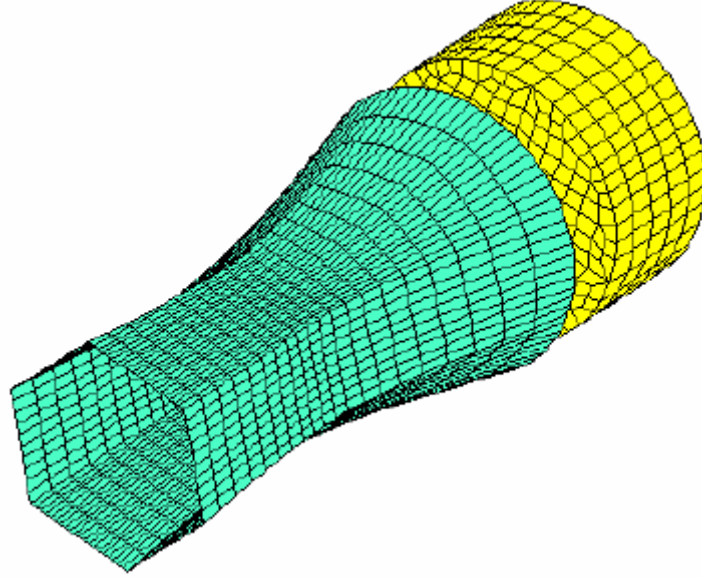
Şekil 3.3 İki boyutlu analizi yapılabilecek olan model geometrisi (MSC. SuperForm User’s Guide)

3.1.3 Üç Boyutlu Analiz

Model geometrisi yukarıda bahsedilen iki analiz tipi içerisine sokulamıyorsa, üç boyutlu bir modele ihtiyaç duyulmaktadır. Ancak bu analiz tipinde de analiz süresinden tasarruf etmek amacıyla simetriden yararlanılmaktadır. Burada önemli olan yükleme durumunun da simetrik olmasına dikkat edilmesidir. Simetrik kısımlar için simetrik düzlemler eklenmeye ihtiyaç duyulur. Şekil 3.4’de üç boyutlu analizi yapılabilecek olan model geometrisi verilmiştir.

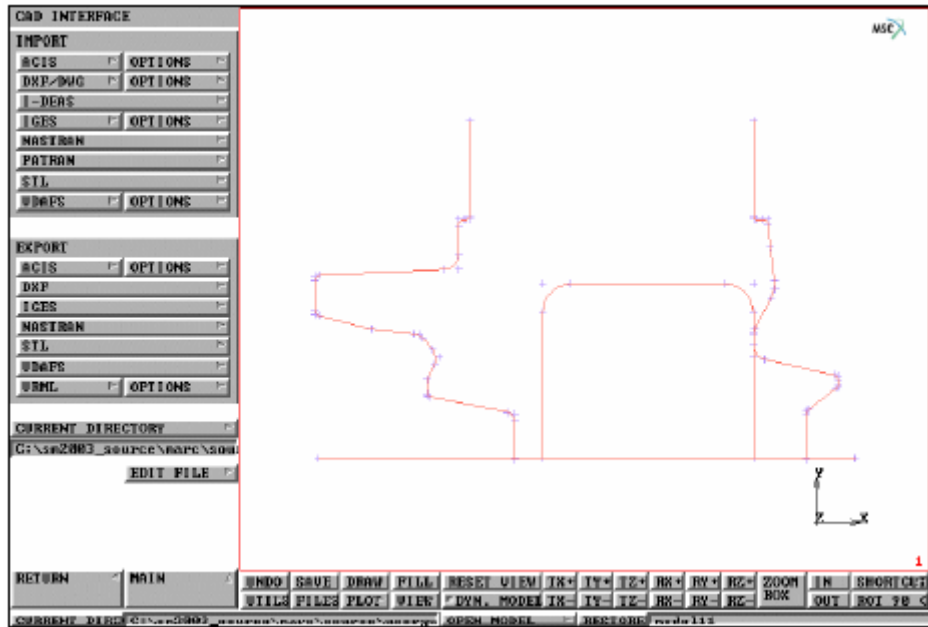
3.2 CAD Arayüzü

MSC SuperForm’un geometrik model ve kalıpları oluşturmak için birçok aracı vardır. Fakat, çoğu zaman geometrik model ve kalıplar bir CAD programında oluşturulur. Daha sonra MSC. SuperForm’da bulunan CAD arayüzü sayesinde bu çizimler programa aktarılır. Bununla birlikte MSC. Superform programı kullanılarak yapılan çizimler de başka programlara aktarılabilir.



Şekil 3.4 Üç Boyutlu Analizi Yapılabilecek Olan Model Geometrisi (MSC SuperForm User's Guide)

MSC. SuperForm'da kullanılmak üzere aktarılan bu çizimlerin nümerik simülasyon işlemi için kullanılabilmesi için program içerisinde düzenlenmesi gerekmektedir. Ağ üretimi menüsünde bu işlemi yapmak için birçok araç bulunmaktadır. Şekil 3.5'de IGES formatından MSC. SuperForm'a atılmış bir kalıp-iş parçası çizimine yer verilmektedir.



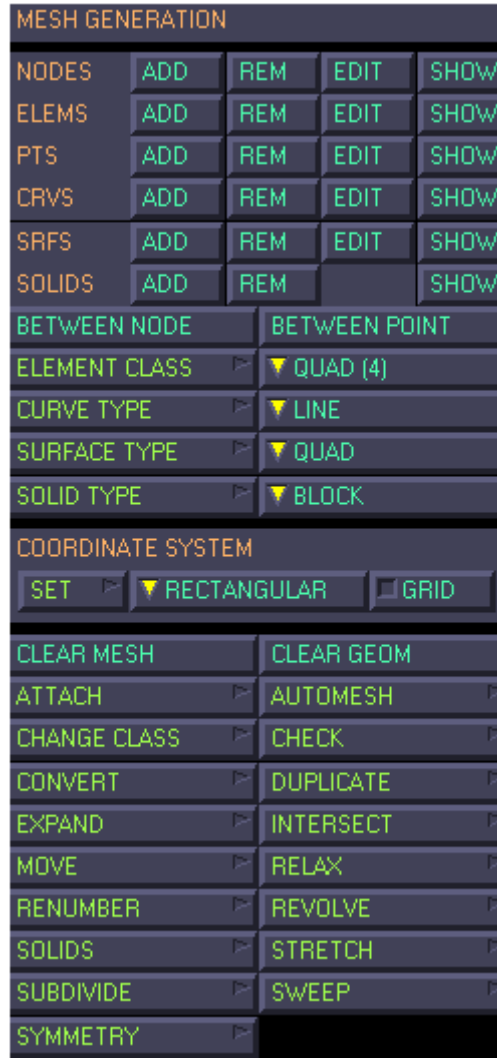
Şekil 3.5 Kalıp iş parçası çizimi (MSC. SuperForm User's Guide)

3.3 Ağ Üretimi

Bu kısım, iş parçasının üzerinde ağ oluşturulduğu kısımdır. İş parçasına her zaman için ağ atılması zorunludur. Kalıplara, rijit ve izotermal olarak modellendiyse, ağ atmak gerekmemektedir. Fakat, bunun dışındaki durumlarda kalıplara da ağ atılması gerekmektedir.

Bu kısımda sadece başlangıç geometrisine ağ atılır. Deformasyona başladıktan sonra atılan ağ yapısı ilerleyen safhalarda bozulur. Bozulan ağ yapısının nasıl düzeltileceğine dair bilgi ilerleyen bölümlerde verilecektir.

Şekil 3.6'da ağ üretimi menüsü verilmiştir.



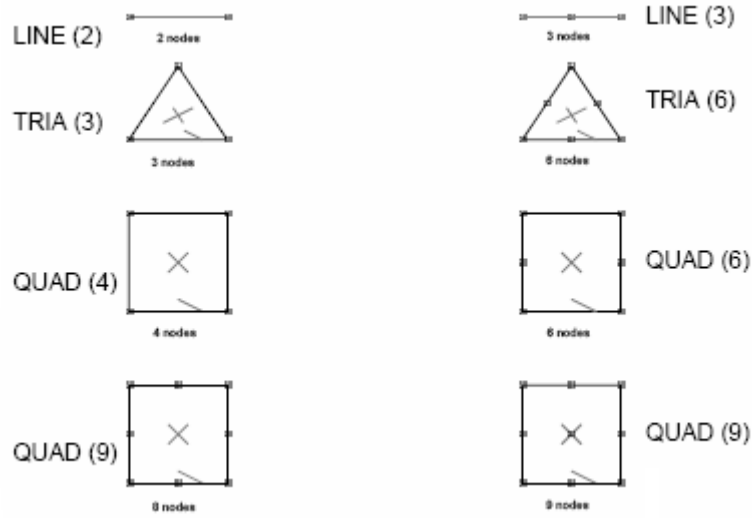
Şekil 3.6 Ağ üretimi menüsü (MSC. SuperForm User's Guide)

Bu menü kullanılarak geometrik elemanlar ve ağ elemanları oluşturulabilir. Geometrik elemanlar nokta, çizgi, yüzey, katı gibi geometriyi oluşturan elemanlardır. Ağ

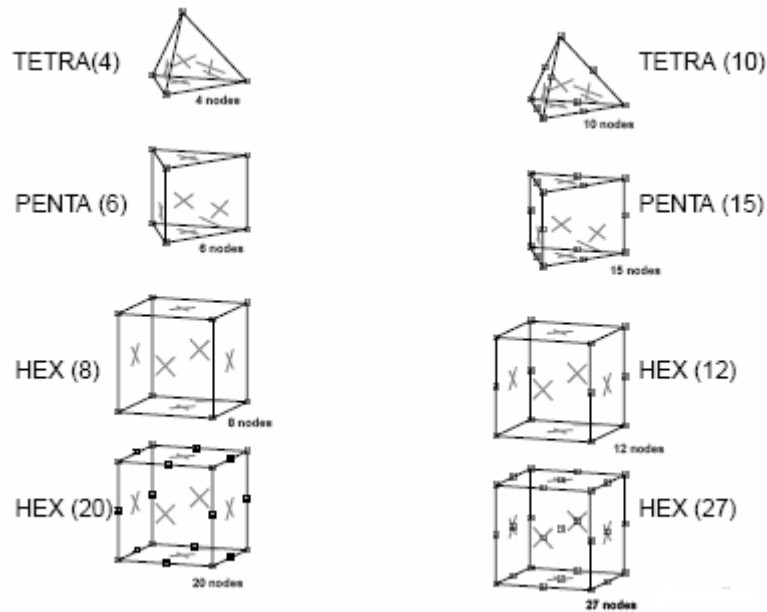
elemanları ise oluşturulacak olan ağ ile ilgisi olan elemanlardır. Bunlar nod, çizgi eleman, düzlem eleman ve katı eleman olarak sıralanabilir.

Nodlar 3 koordinat ile karakterize edilir. Ekranda kare şekliyle gösterilir. Eğer nodlar bir geometrik şekle atanırsa ekranda daire ile gösterilir.

Elemanlar eleman kenarları, eleman yüzleri ve üzerlerindeki sıralı nodlar ile tanımlanır. Eleman kenarlarının, eleman yüzlerinin ve üzerlerindeki nodların sayısı elemanın bağlı olduğu sınıfa göre belirlidir. Şekil 3.7 ve Şekil 3.8’de MSC. SuperForm’da tanımlı elemanlar verilmiştir.



Şekil 3.7 SuperForm’da tanımlı elemanlar (MSC. SuperForm User’s Guide)



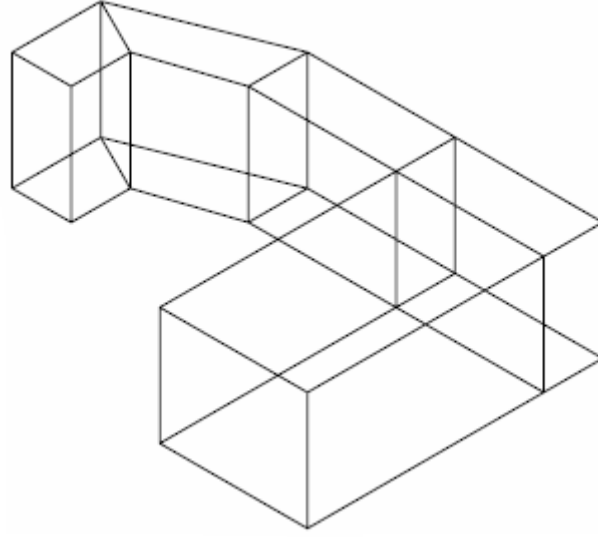
Şekil 3.8 SuperForm’da tanımlı elemanlar (MSC. SuperForm User’s Guide)

MSC. SuperForm’da ağ yapım tekniği iki gruba ayrılmaktadır.

3.3.1 Direkt Ağ Yapım Tekniği

Bu teknik yardımıyla nod ve elemanlar kullanılarak kaba ağlar oluşturulur. Basit geometriler için uygun bir tekniktir.

Şekil 3.9’da görülen kaba ağ oluşturulduktan sonra ağ yapısında bölgesel olarak eleman sayısı arttırılabilir veya model genişletilerek istenilen boyutlara getirilebilir.



Şekil 3.9 Kaba ağ örneği (MSC. SuperForm User’s Guide)

3.3.2 Geometrik Ağ Yapım Tekniği

Geometrik ağ yapımı tekniğinde, geometrik elemanlar istenilen geometrik yapının oluşturulması için kullanılırlar. Bunu takip eden işlem ise MSC. Superform’daki araçların kullanılarak bu geometrik yapının ağ şekline dönüştürülmesidir.

MSC. Superform’da iki tane ana geometrik ağ yapımı tekniği vardır.

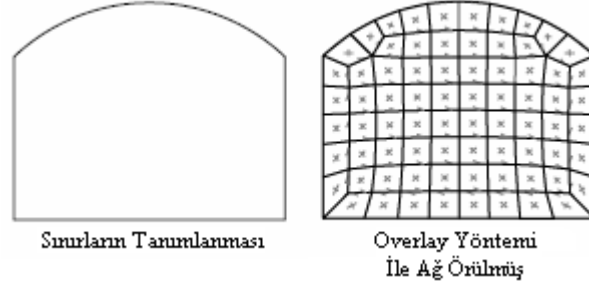
3.3.2.1 Convert

Geometrik yapının sonlu elemanlar ağına dönüştürülmesidir. Örnek olarak, eğriler çizgi elemanlarına, yüzeyler ise Quadrilateral elemanlara dönüştürülebilir.

3.3.2.2 Automesh

Bu yöntem ile Triangular veya Quadrilateral elemanlar yüzeye örülürken iç hacime Tetrahedral veya Hexahedral elemanlar örülebilir. Automesh tekniğinin en önemli özelliği geometrinin sınırlarda geometrik elemanlar ile tanımlanabilmesidir. Şekil 3.10’da

sınırlarda geometrisi tanımlanmış ve daha sonra Quadrilateral ağ atılmış bir parça gösterilmektedir.



Şekil 3.10 Automesh ile atılan ağ (MSC SuperForm User's Guide)

3.4 Malzeme Özellikleri

MSC. SuperForm'da ki malzeme özellikleri işlemcisi, malzeme sabitlerini ve fonksiyonlarını tanımlamaya yarar. Program iki tip malzeme bilgisini tanımlar;

- Mekanik İzotropik
- Termal İzotropik

Coupled analiz tipi için mekanik malzeme tipi termal malzeme tipi ile birleştirilmelidir. Malzeme özellikleri modeldeki tüm elemanlara atanmalıdır.

MSC. SuperForm'da elastik-plastik ve rijit plastik olarak iki malzeme sınıfı vardır. Rijit-plastik model elastisiteyi ihmal eder. Bu yüzden elastiklik özellikleri olan young modülü ve poisson oranı tanımlanmak zorunda değildir. Bununla birlikte malzemenin akma gerilim bilgileri girilmelidir.

Şekil 3.11'de görüleceği üzere read tuşu ile malzeme bilgi tabanından çeşitli malzemeler okunabilir. Bu malzemeler, ısıya bağımlı young modülünü, termal genişleme katsayısını, spesifik ısı ve termal iletkenliği tanımlayan tabloları içerirler. Eğer bu tablodan bir malzeme kullanılacaksa nodlara karşılık olan başlangıç sıcaklığı girilmelidir.

MSC. SuperForm ile mekanik ve termal menülerini kullanarak malzeme yaratılabilir. Eğer gerekliyse sıcaklık, plastik gerinim veya gerinim oranının fonksiyonu olan özelliklerin tabloları yapılabilir.



Şekil 3.11 Malzeme özellikleri menüsü (MSC. SuperForm User's Guide)

3.5 Başlangıç Ve Sınır Koşulları

Başlangıç koşulları işlemcisi, başlangıç koşullarını belirleyip modele uygulamak ve bu şekilde analizi çalıştırmak için gereklidir. Başlangıç koşulları nodlara uygulanır. Eğer bu nodlar bir eğri veya yüzeye atanmışsa başlangıç koşulları da bu eğri ve yüzeylere atanabilir. Şekil 3.12'de başlangıç koşulları menüsü görülmektedir. Buradaki temperature seçeneğinden parçaya ait başlangıç sıcaklığı verilebilir. Aynı menüdeki displacement seçeneği ile parçaya ait başlangıç deplasmanı verilebilir. Bu seçenek genellikle parça ile kalıplar arasındaki kapanmayı belirlemek için kullanılır.



Şekil 3.12 Başlangıç koşulları menüsü (MSC. SuperForm User's Guide)

Şekil 3.13'de sınır koşulları menüsü verilmiştir. Menüden görüleceği üzere, nodlara işlem esnasında belirli bir doğrultuda sınırlandırılmış bir deplasman verilebilir (fixed displacement) ya da nodların belirli bir doğrultuda sabitlenmesi sağlanabilir (hold nodes). Point load seçeneği ise noda belirli bir doğrultuda ve belirli bir zamanda kuvvet tatbiki için kullanılabilir. Edge load seçeneği ise parçanın kenarlarına kuvvet tatbiki için kullanılır. Springs seçeneği ile de esnek sınırlandırılmaların yapılması mümkündür.



Şekil 3.13 Sınır koşulları Menüsü (MSC. SuperForm User's Guide)

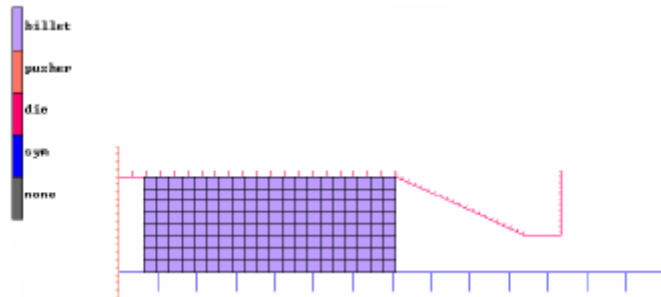
3.6 Kontak

MSC. Superform programının en güçlü özelliklerinden biri otomatik kontak yapabilmesidir. Tanımlanan bu kontakların, eleman ve eğrilere atanmasıyla kalıp elemanları ve iş parçasının birbirleri ile penetrasyonu engellenir. Şekil 3.14'de kontak menüsü verilmiştir.

Simülasyonun kontak işleminin yapılmasında dokunmalı ve yapışmalı olarak iki tane kontak tipi mevcuttur. Şekil 3.15'de kontak işlemi tamamlanmış bir model görülmektedir. Bu örnekte tanımlanan her parça ayrı renklerde gösterilerek olası bir karışıklık engellenmiştir. Ayrıca kalıp elemanlarının iç tarafını gösteren çizgilerin iş parçasıyla temas etmemesine dikkat edilmelidir.



Şekil 3.14 Kontak menüsü (MSC. SuperForm User's Guide)



Şekil 3.15 Kontak işlemi tamamlanmış model (MSC. SuperForm User's Guide)

3.7 Yeniden Ağ Oluşturma

Sonlu elemanlar ağı sık sık aşırı deformasyonlar altında bozulur ve simülasyondan çıkarılacak olan sonuçların doğruluğunu etkiler ya da deformasyon o derece yoğunlaşmıştır ki yeni bir ağ yapısı oluşturmadan işleme devam etmek olanaksızlaşır. Buna çare olarak MSC. SuperForm gerekli olduğunda otomatik olarak yeni bir ağ yapısı

oluşturur. Ayrıca yeniden ağ oluşturma seçeneği manuel olarak parametrelerin ayarlanmasıyla da mümkündür. Bunun için çeşitli yöntemler mevcuttur.

3.7.1 İki Boyutlu Yeniden Ağ Oluşturma

Üç farklı yöntem ile iki boyutlu yeniden ağ oluşturma metodu vardır. Her üç yöntemle oluşturulan ağ yapısında da kaç artımda bir yeniden ağ atılacağı, atılacak olan yeni ağda kaç tane eleman olacağı kontrol edilebilir ve istenirse iş parçasının iç kısımlarına daha kaba bir ağ örgüsü atılabilir.

3.7.1.1 Overlay Quad

Bu yöntem ile deformasyona uğramış iş parçası üzerine Quadrilateral elementler ile ağ örülür.

3.7.1.2 Advancing Front

Bu yöntem ile ağ yapısı dıştan içe doğru sarmal bir biçimde oluşturulur. Bu sayede deforme olmuş şeklin yapısına göre atılan yeni ağ parçaya daha iyi uyum sağlar. Bu yöntem ile hem Quadrilateral hem de Triangular elementler kullanılabilir.

3.7.1.3 Delaunay

Bu yöntem ile atılan ağ sadece Triangular elementlerden oluşur. Bu yöntem ile elementler mümkün olduğunca birbirine eşit bir biçimde oluşturulur.

3.7.2 Üç Boyutlu Yeniden Ağ Oluşturma

3.7.2.1 Overlay Hex

Bu yöntemle deformasyona uğramış parça üzerine Hexahedral tuğla elemanlar yaratılır. Parça üzerinde ağ oluşturmak için kartezyen koordinat sistemini kullanan kartezyen ızgara tipi, silindirik koordinatları kullanan silindirik ızgara tipi ve template ağ'a ihtiyaç duyan template ızgara tipi olan üç tane izdüşüm yöntemi vardır.

3.7.2.2 Delaunay Tetra

Bu yöntemde oluşturulan yeni ağda Tetrahedral elementler kullanılır. Bu işlem esnasında elemanlar mümkün olduğunca birbirine eşit yapılmaya çalışılır.

3.8 Yükleme Durumu Ve İş

MSC. Superform ile yapılan her simülasyonda tek bir iş emri verilir. Ancak bu tek bir iş emri birden fazla yükleme durumunu içerebilir.

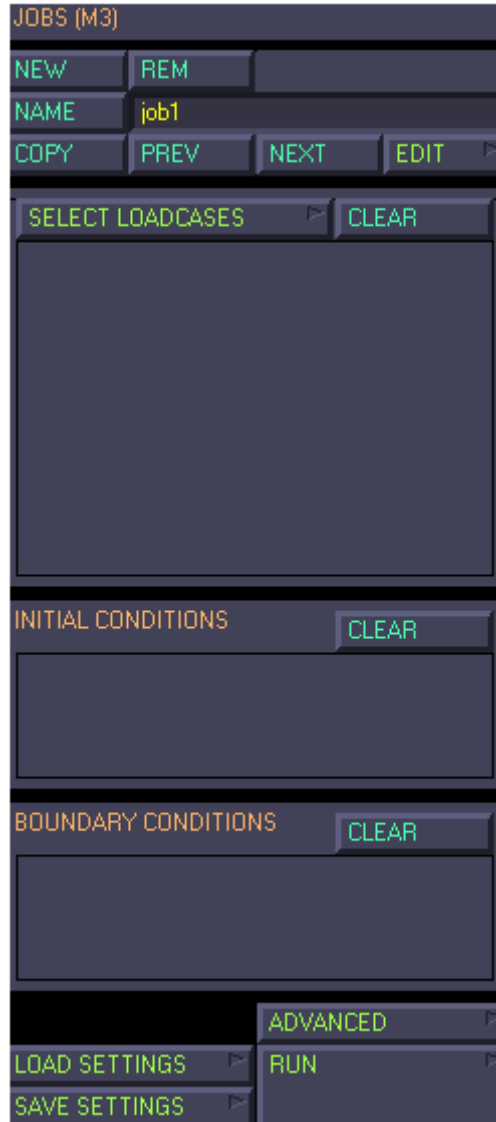
Yükleme durumuyla ilgili olan menü Şekil 3.16’da verilmiştir. Şekilden de görüleceği üzere, bu kısımda şekil verme işlemi yapacak olan iş makinası tanımlanır. Burada makina çeşitlerine göre krank uzunluğu, rod uzunluğu, ıstampanın gideceği doğrultu gibi bilgiler tanımlanır. ıstampanın yapacağı strok değeri de bu kısımda girilir. Ayrıca sabitlenmiş bir şekilde durması gereken kalıp ve hareket eden ıstampanın bu görevlerinin tanımları simülasyona bu kısımdan atanır.



Şekil 3.16 Yükleme durumu menüsü (MSC. SuperForm User’s Guide)

İş kısmında ise uygulanacak olan yükleme durumları, başlangıç ve sınır koşulları seçilir. Ayrıca bu kısımda kontak kontrolü ve yeniden ağ örme kontrolü yapılabilir. İstenilen çeşitli analiz sonuçları (tane büyüklüğü analizi, hasar analizi, sertlik analizi, vb) bu kısımdan eklenir. Bütün bu işlemler bitince run<submit<monitör seçenekleriyle analiz

başlatılır ve analiz işleminin ilerleyişi gözlemlenebilir. Şekil 3.17’de iş menüsü verilmiştir.



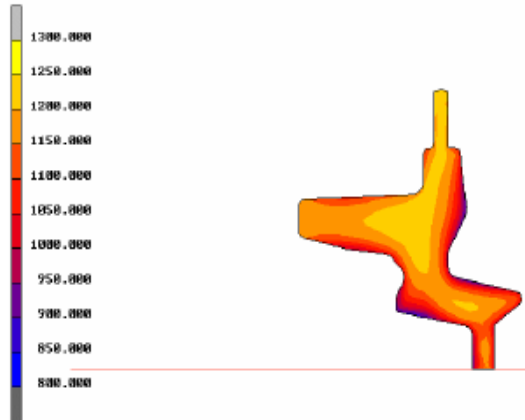
Şekil 3.17 İş menüsü (MSC. SuperForm User’s Guide)

3.9 Sonuçlar

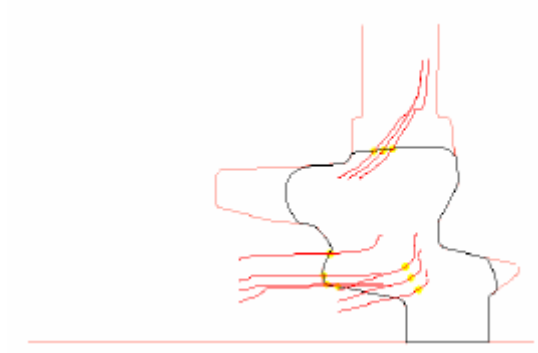
Şekil 3.18’de sonuçlar menüsü verilmiştir. Open Default seçeneği ile sonuçlar açılır. Monitor seçeneği ile analiz kaç artımda çözülmüş ise hepsi peş peşe video şeklinde verilir. Scan seçeneği ile de istenilen artımın dondurulmuş görüntüsüne ulaşılabilir. Şekil 3.19’da analizi yapılan bir parçanın sıcaklık dağılımı, Şekil 3.20’de şekil verme işlemine başlanmadan önce seçilen noktaların, işlemin herhangi bir anındaki pozisyonunu gösteren (particle tracking) analiz sonucuna yer verilmiştir.



Şekil 3.18 Sonuçlar menüsü (MSC. SuperForm User's Guide)



Şekil 3.19 Analizi yapılan parçanın sıcaklık dağılımı (MSC. SuperForm User's Guide)



Şekil 3.20 Particle tracking analizi sonucu (MSC. SuperForm User's Guide)

4. KALIP BOŞLUĞUNUN DOLDURULMASINI ETKİLEYEN FAKTÖRLER

Dövme kalıplarında, metalin kalıp boşluğu içinde akışını etkileyen birçok faktör vardır. Bunlar;

- Ön şekillendirme dizaynı
- Sürtünme ve yağlama
- Dövme sıcaklığı
- Kalıp sıcaklığı ve yüzeyi
- Dövülebilirlik ve akma dayanımı
- Şekil ve boyut faktörleri olarak sıralanabilir.

4.1 Ön Şekillendirme Dizaynı

İstenilen son şeklin elde edilmesi için birden fazla dövme işleminin yapıldığı işlemlerde ön şekillendirme dizaynı önemlidir. Sonlu elemanlar paket programları sayesinde, ön şekillendirilmesi yapılmış parçanın ne şekilde aktığı gözlemlenerek hatalar kolaylıkla fark edilebilmekte ve bu hataları gidermeye yönelik yeni ön şekillendirme dizaynları süratle oluşturulabilmektedir. Ön şekillendirme dizaynı; kayıpları azaltmak, kusurları elimine etmek, enerjiyi minimize etmek ve istenilen son şeklin ölçüsel tamlığını ve kalitesini sağlamak amaçlarını güder [6].

Ön şekli sorunlu olan parçalarda; iş parçasının şekillendirme esnasında birbirine sürtünmesi ve katlanma gibi kusurlar meydana gelir. Bu kusurlar parçanın dayanımının azalmasına ve eksik dolmasına neden olur.

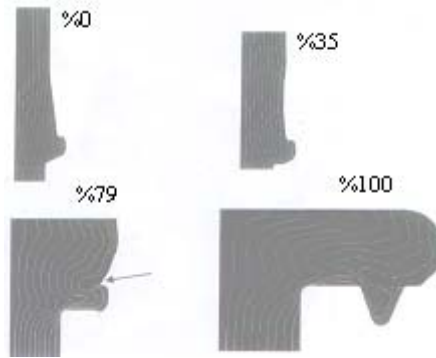
Bu konuda yapılan çalışmalardan biri kaynaklı civatadır. Genellikle otomotiv endüstrisinde kullanılan bu bağlantı elemanında kafanın altındaki çıkıntı eritilerek saca kaynaklanır (Şekil 4.1). Bu civatadaki en önemli problem kafanın altındaki dövülmesi düşünülen çıkıntının eksik dolma ihtimalinin bulunmasıdır [8]. Bu parça için dizayn edilen ön şekil Şekil 4.2’de gösterilmiştir. Sonlu elemanlar analizi sonucu çıkıntının çok iyi olduğu gözlemlenmiştir. Ancak işlemin %79’luk kısmında parçanın birbirine sürtündüğü gözlemlenmiştir (Şekil 4.3). Bu durum eriyen kısmın tam üstünde gözlemlendiği için parçanın dayanımını etkileyebilecek niteliktedir. Ayrıca bu kusur gerçek üretimle de doğrulanmıştır (Şekil 4.4). Daha sonra hataya yol açmayan yeni bir ön şekil dizayn edilmiş ve hatasız bir ürün ve çıkıntıyı oluşturan kısımda tam bir kalıp dolumu elde edilmiştir (Şekil 4.5).



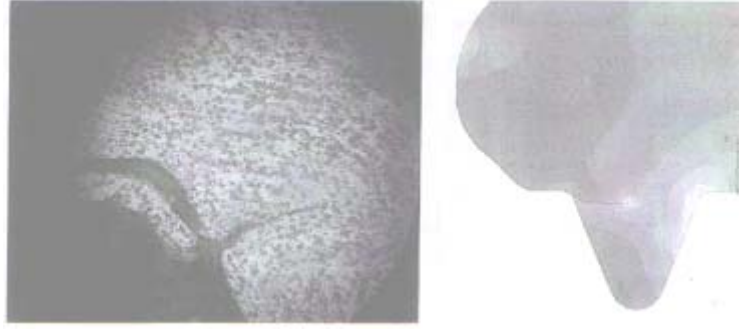
Şekil 4.1 Kaynaklı civata (Innovation By Application Of Process Simulation)



Şekil 4.2 Ön şekillendirilmiş parça (Innovation By Application Of Process Simulation)



Şekil 4.3 İş parçasının birbirine sürtünmesi (Innovation By Application Of Process Simulation)



Şekil 4.4 Parçanın mikroskop altında hata oluşumunun gözlenmesi (sol) ve parçanın sayısal şeklindeki hata oluşumu (Innovation By Application Of Process Simulation)

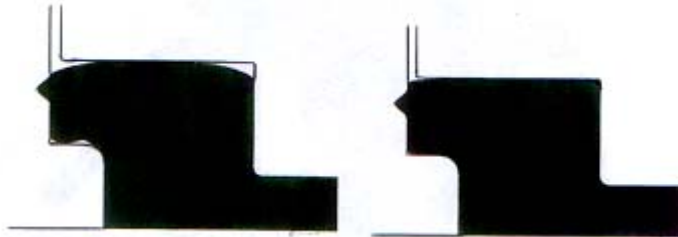


Şekil 4.5 Hatasız parça (Innovation By Application Of Process Simulation)

Başka bir çalışmada ise katlanma hatası meydana gelmiştir. Bu hata yeni bir ön şekil dizaynı ile giderilmiş ve daha iyi bir kalıp dolumu sağlanmıştır. Şekil 4.6'da ilk ve son ön şekillendirme parçaları, Şekil 4.7'de ise simülasyon sonuçları verilmektedir.

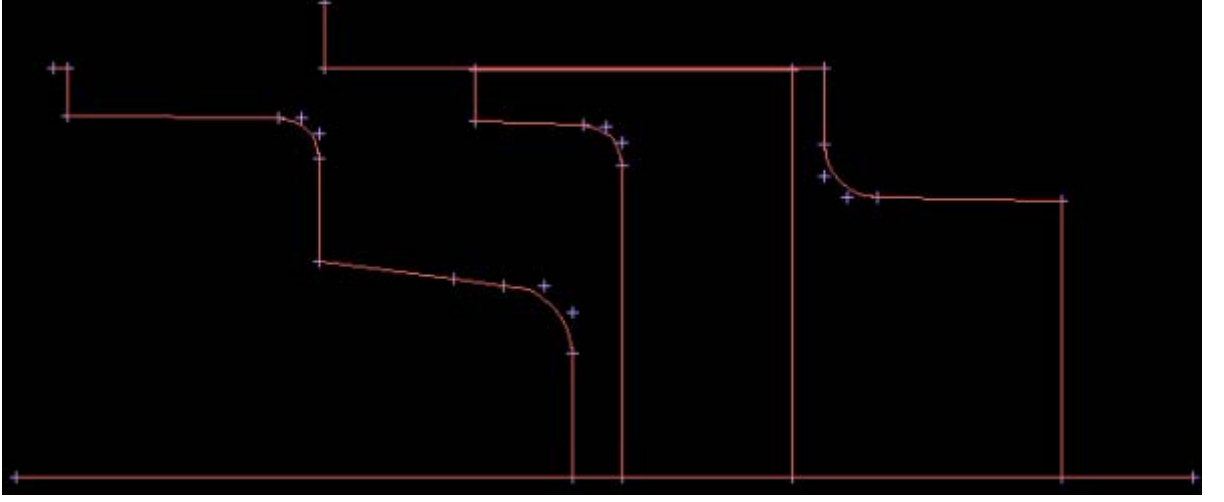


Şekil 4.6 İlk ön şekillendirme parçası (sol) ve son ön şekillendirme parçası (sağ) (Innovation By Application Of Process Simulation)

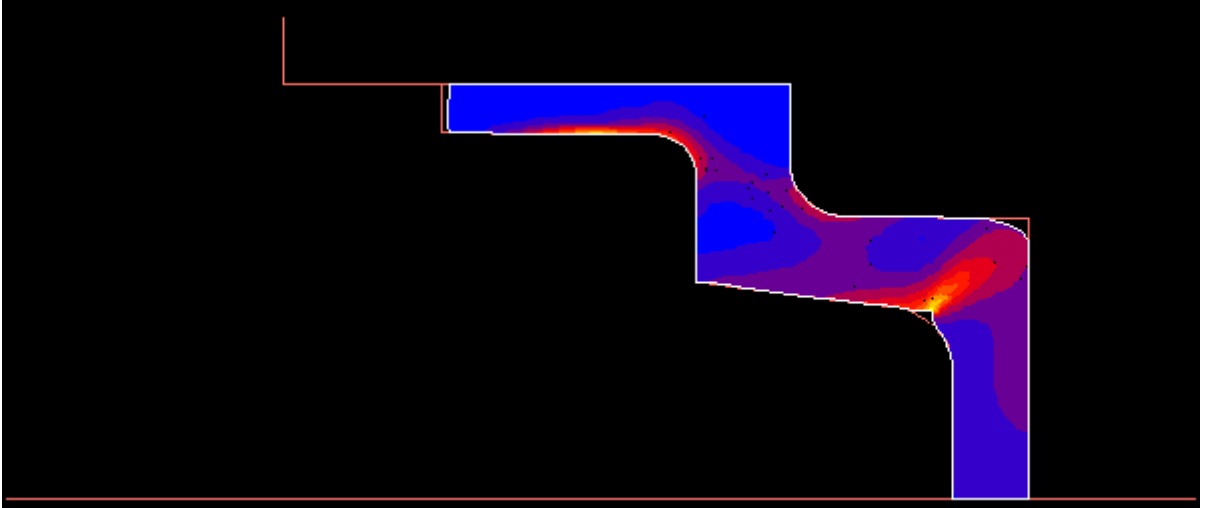


Şekil 4.7 Hatalı parça (sol) ve hatasız parça (sağ) (Innovation By Application Of Process Simulation)

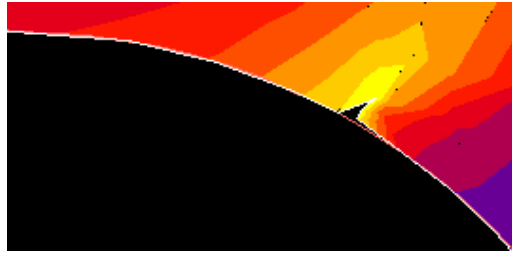
Son çalışmada ise ön şekillendirilmiş parça Şekil 4.8’de görülmektedir. Şekil 4.9’da parça kendisi ile sürtünmeye başlamıştır. Şekil 4.10’da proses sonucunda parçanın kendisiyle teması sonucu oluşan eksik dolma gözlemlenmektedir. Bu sonuç kalıbın alt köşelerindeki malzeme azlığından kaynaklanmaktadır [9]. Şekil 4.11 yeni bir ön şekillendirme dizaynını göstermekte ve Şekil 4.12’de ise işlem sonucunda hatasız ve tam dolumu sağlanmış parça gösterilmektedir.



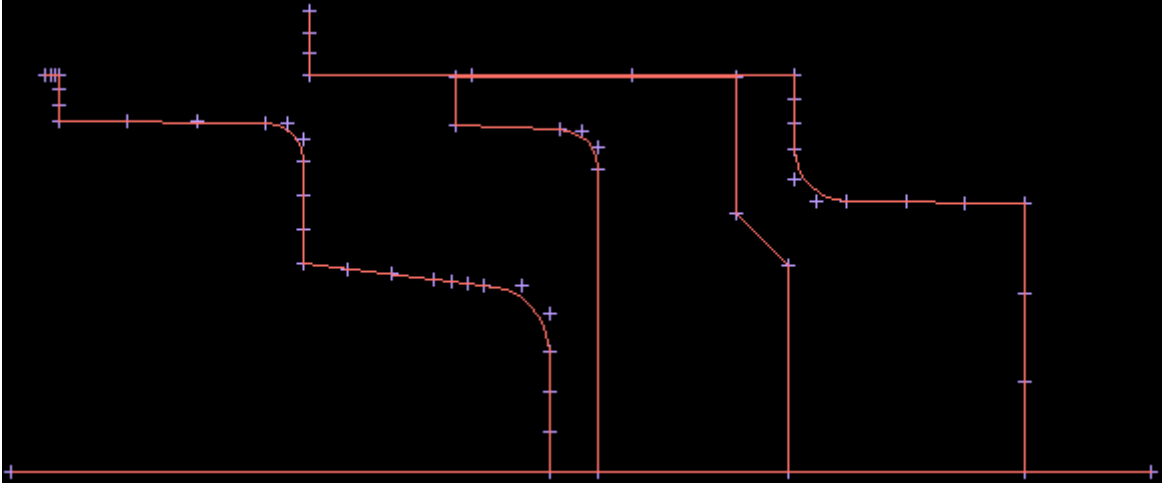
Şekil 4.8 İlk ön şekil (MSC. SuperForm User’s Guide)



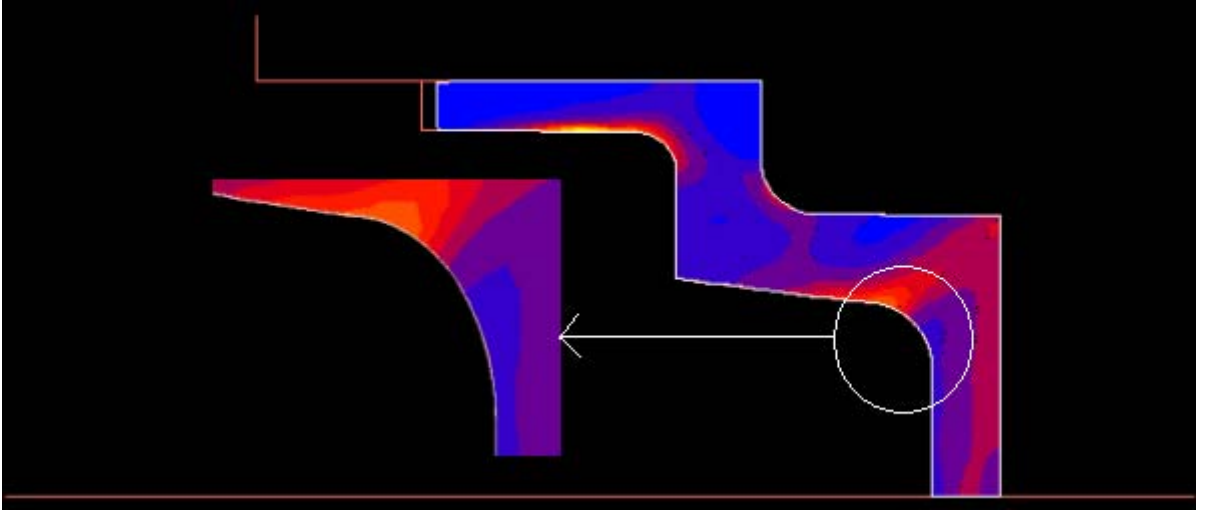
Şekil 4.9 Parçanın kendisiyle sürtünmesi (MSC. SuperForm User’s Guide)



Şekil 4.10 Proses sonundaki eksik dolma (MSC. SuperForm User’s Guide)



Şekil 4.11 Yeni ön şekil (MSC. SuperForm User's Guide)



Şekil 4.12 Proses sonundaki hatasız parça (MSC. SuperForm User's Guide)

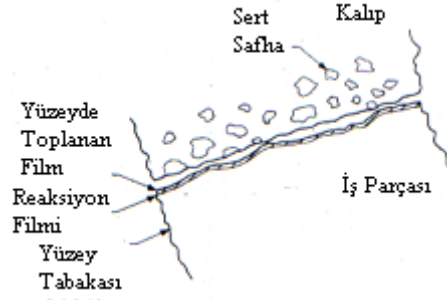
4.2 Sürtünme Ve Yağlama

Kalıp yağlayıcıları genelde dövme yükünü ve kalıp aşınmasını azaltmak, metal akışının düzgünlüğünü sağlamak, iş parçasının veya tufalın kalıba yapıştığı hallerde ve dövme malzemesinin oksitlere sıkıca yapıştığı durumlarda bunları ayırmak için kullanılır.

Yağlayıcı kullanımı sayesinde, metal akışının düzgünlüğü garanti altına alınarak ve tufal oluşumunun önüne geçilerek tufal ceplerinin oluşmasını engellemek ve bu anlamda hatasız bir kalıp dolumunu temin etmek mümkün olur. Bu arada çok hafif bir tufalın, yağlayıcı özelliği olması bakımından, faydalı olabileceğini de belirtmek gerekir [4]. Tamamen tufalsız bir yüzey iş parçasının kalıba yapışmasına dahi yol açabilir [4].

Dövme kalıpları yağlandığında kalıpla iş parçası arasında bir yağ filmi oluşur (Şekil 4.13). Bu mikroskobik görünümde kalıp ve iş parçasının ufak tepelikleri, vadileri

görülmektedir. Bu mikrojeometrinin büyüklüğü ve yönelimi, sürtünmenin yaratılmasında ve sürtünmeyi azaltan yağ filminin temellendirilmesinde önemli bir rol oynar[7]. Saf metal yüzeyleri seyrek olarak bulunur. Yüzeyler; havaya, neme veya yağlayıcılara maruz kalmaktan ötürü oluşan reaksiyon ürünleriyle kaplıdır. Filmler genelde farklı reaksiyonlardan dolayı birbiri üzerine binerek sonuçlanırlar. Örneğin, doğal olarak oluşmuş bir oksit filmi tabakası, yağ filmi tabakasının istilasına uğrayabilir ve oksid ile kimyasal reaksiyona girebilir.



Şekil 4.13 Yağ filminin mikroskopik görünümü (Handbook Of Metal Forming)

Düz kalıplarda iyi sonuçlar veren yağlayıcılar, kapalı kalıplarla her zaman iyi sonuçlar vermezler. Çünkü, bu iki tipin gereksinimleri benzer değildir. Düz kalıplardaki ana gereksinim, yanal malzeme akışının lehine olan düşük sürtünme katsayısıdır. Fakat çoğu kapalı kalıpta; yanal akış, kalıbın dikey olarak dolmasını sağlamak için özellikle engellenir. Bu, dar ve halka şeklinde olan çapak boşluklarının en önemli fonksiyonudur. Sonuç olarak, kapalı kalıplar için ideal yağlayıcı kalıp boşluğunun dikey yüzeylerinde minimum sürtünme ve çapak boşluğuna yakın yerlerde maksimum sürtünmeyi sağlamalıdır. Bu birbirine karşıt gereksinimler, bazen kritik bölgelerde farklı yağlayıcılar kullanılarak karşılanabilir.

Hangi koşullar altında hangi yağlayıcının seçileceği konusu çok geniş bir aralığa yayıldığı için bu seçim işlemi için sistematik bir yaklaşım yapılabilir. Son yapılan tercih, istenilen özelliklerin çoğunu bulundurmakla birlikte yapılacak işlem için kullanılacak olan yağlayıcıların eksik yönleride bulunmaktadır. Yağlayıcılardan beklenen özellikler aşağıda sıralanmıştır;

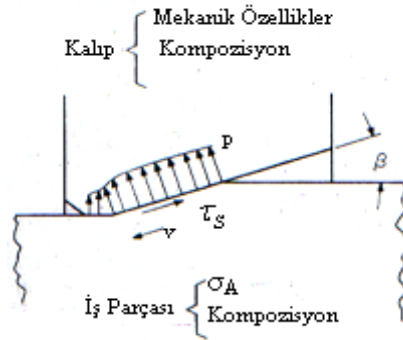
- Metal akışının kontrolü, kalıp boşluğunun doldurulması ve gerekli basıncın düşürülebilmesi için kalıpla iş parçası arasındaki kayma sürtünmesini azaltmak,
- Kalıp ve iş parçasını ayırarak lokal kaymaları, kalıp ve iş parçası yüzeylerinin hasara uğramasını önlemek. Yani, düşük kesme gerilimli yağ filmi sürekliliği

kaybolduğunda bile kalıpla iş parçası arasındaki limit adhezyona yeterli, yağlanmış yüzey kalmalıdır,

- İyi bir yalıtım özelliğine sahip olarak, iş parçasının ısı kayıplarını azaltarak kalıp yüzeyinde sıcaklık değişimlerini en aza indirmek,
- Yüzeye üniform biçimde yayılarak muntazam bir metal akışı sağlamak,
- Aşındırıcı ve korozif etki yapmamak,
- Gravürde birikebilecek artıklar içermemek,
- İş parçasının kalıptan çıkartılmasını kolaylaştıracak bir gaz basıncı yaratmak,
- Zehirli veya kirlenmeye yol açan bileşenler içermeme, kalıba uygulanmaları esnasında duman çıkartmamak.

Sürtünme, bir cisim başka bir cismin üzerinden kayarken ortaya çıkan, harekete karşı olan bir dirençtir. Metal şekillendirmede bu direnç iş parçasının kalıba karşı koyması sonucu ortaya çıkar.

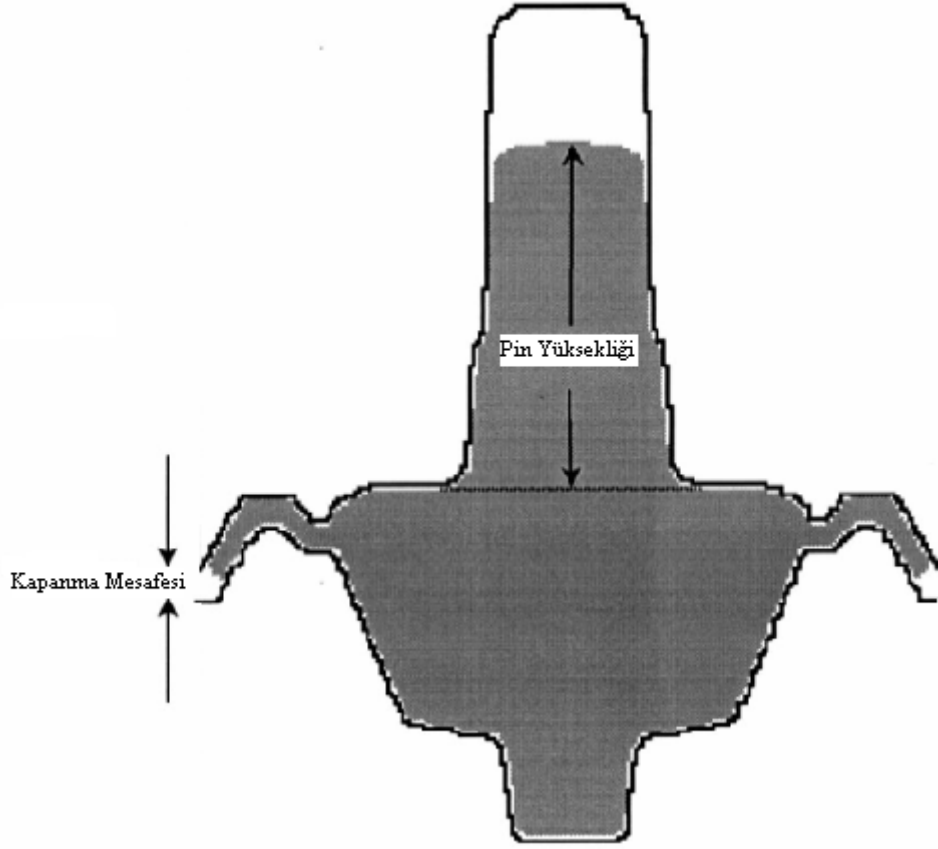
Sürtünme kalıp ile iş parçası arasındaki arayüzde açıklanabilir (Şekil 4.14). Kalıptaki normal basınç (p), dövme prosesinde genellikle akma geriliminin (σ_A) bir çeşitlemesine ulaşır. Deformasyon genellikle iş parçası ve kalıp arasındaki göreceli hareket ile devam eder. Bu hareket zorlanmış bir hız farklılığı ile meydana gelebilir (tel çekme), ya da deformasyon işleminin kendisinin bir sonucu olarak gelişebilir (bir silindirin basılması) veya bu ikisinin bir kombinasyonu olabilir (bir şeridin haddelenmesi). Bu göreceli hareket sürtünmeye ters yöndedir ve ortalama bir sürtünme gerilimi (τ_s) atanarak tanımlanabilir. Bu değer, malzemenin akma kopması gerilimine eriştiği zaman, deformasyonun iş parçasında meydana gelmesi için daha münasip bir ortam oluşur. Arayüzdeki hareket son bulur ve yapışma sürtünmesi olarak adlandırılan durum başlar.



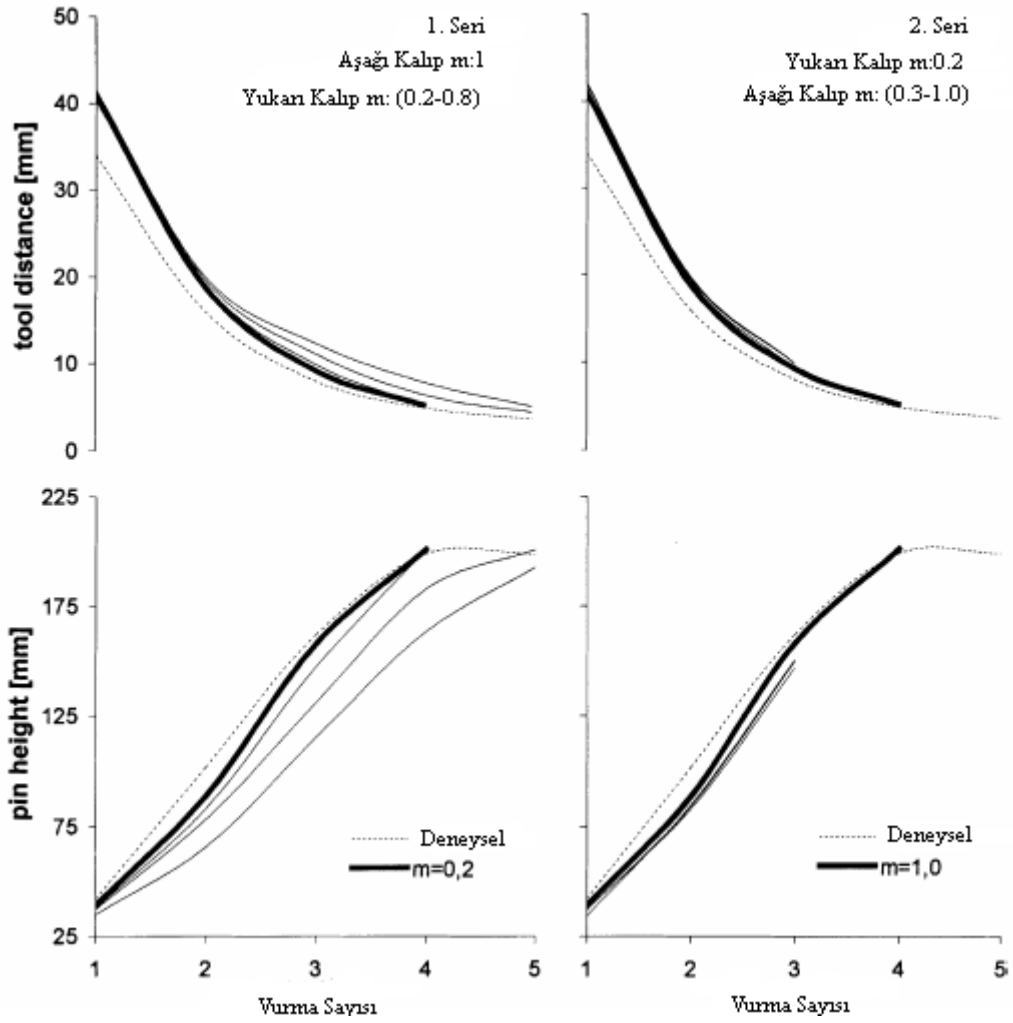
Şekil 4.14 Kalıp ile iş parçası arasındaki sürtünme arayüzü (Handbook Of Metal Forming)

Jonas Hallström 1999 yılında yayımlanan çalışmasında [13] karşı vuruşlu şahmerdanla yapılan dövme işleminde sürtünmenin kalıp dolumuna olan etkilerini araştırmıştır.

En iyi sürtünme faktörünü bulmaya yönelik simülasyon iki seri halinde uygulanmıştır. Simülasyondan gelen sonuçların deneysel değerlerle karşılaştırılması için iki spesifik büyüklük dikkate alınmıştır. Bunlar pin yüksekliği ve kapanma mesafesidir (Şekil 4.15). Şekil 4.16'dan gözlemlenebileceği üzere simülasyon ve deneysel sonuçlar arasındaki iyi uyum üst kalıbın sürtünme faktörünün (m) 0,2 ve alt kalıbın sürtünme faktörünün (m) 1 olduğu durum için alınmıştır.



Şekil 4.15 Simülasyon ile deneysel sonuçların karşılaştırılmasında kullanılan büyüklükler (Influence Of Friction On Die Filling In Counterblow Hammer Forging)



Şekil 4.16 Sonuçların karşılaştırılması (Influence Of Friction On Die Filling In Counterblow Hammer Forging)

Yapılan analizlerde Tresca sürtünme modeli kullanılmıştır. Bu modelde sürtünme gerilimi ile iş parçası malzemesinin akma gerilimi arasındaki oran sürtünme sabitine işaret eder. Sürtünme sabitinin sıfır olduğu durum kalıpla iş parçası arasında sürtünmenin olmadığı durumu ifade eder. Sürtünme sabitinin bir olduğu duruma ise yapışmalı sürtünme adı verilir ve sürtünme gerilimi iş parçası malzemesinin akma gerilimine eşittir. Dövereşik şekil verme işleminde görece olarak kontak basıncının yüksek olduğu durumlarda kullanılması uygundur.

4.3 Dövme Sıcaklığı

Genel olarak, yükselen dövme sıcaklığı, kullanılan metal veya alaşımın esnekliğini artırır ve akma gerilimini düşürür. Bu sayede kalıp dolumu garanti altına alınmış olur.

Sıcaklık artışının meydana getirdiği bu iyileşme; ikinci bir fazın meydana gelmesine, erimenin başlamasına veya bazı alaşımlarda tane büyümesinin aşırı bir hale gelmesine kadar geçerlidir. Çoğu malzemede, dövülen malzemenin arzu edilen yapı, dayanım ve sertlik özelliklerini taşıması için, metalurjik özellikler göz önünde bulundurularak dövme sıcaklığı kalıbı doldurmak için uygun olan optimum seviyenin epeyce altında tutulur [14].

Hammaddenin dövme için ısıtılması sırasında önlem alınmaması halinde tufal oluşur. Bu tufal, dövme işleminden önce yeterli biçimde giderilmelidir. Aksi takdirde parçanın yüzey görünümünü bozar. Daha sonra yapılacak olan talaşlı işlemde ise takım ömrünü azaltır ve/veya talaş kaldırma işleminden sonra bile yüzey görünümünün kötü ve pürüzlülüğün yüksek olmasına yol açar. Malzemedeki dövülen tufal, gravürün girintilerinde toplanarak tufal cepleri oluşturur ve bu durum dövülen malzemenin gravürü tam olarak dolduramamasına neden olur [14]. Bu sakıncalı durumları ortadan kaldırmak için, ısıtma atmosfer kontrollü fırında yapılmalı ve dövmeden önce tufal giderilmelidir.

4.4 Kalıp Sıcaklığı Ve Yüzeyi

Isıtılmış kalıpların kullanımı kalıp dolumunu iyileştirir ve dövme basınçlarını azaltır. Bu gerçekten yola çıkarak elde edilen fayda, sıcak kalıpların iş parçası yüzeyinin katmanlarını çok şiddetli bir şekilde soğutmayacağıdır. Sonuç olarak, kalıplar iş parçasına yakın bir sıcaklığa kadar ısıtıldıkları zaman, etkileri daha çok farkedilebilir. Bu, alüminyum ve magnezyum gibi metaller için uygulanabilir. Fakat; çelikler, titanyum ve ateşe dayanıklı metaller için uygulanması oldukça zordur. İş parçasındaki sıcaklık değişimi, kalıp ile iş parçası arasındaki sıcaklık değişimi arttıkça, zamanla artar. Bu yüzden, ısıtılmış kalıplarla dövme işlemi, çekiçler ve yüksek hızlı makinalarla yapıldığında hidrolik preslerden daha fazla avantaj sağlarlar.

Kalıpların sıcak kullanımı, yağlayıcı ve kalıp malzemesi seçeneğini kısıtlar. Kalıp sıcaklığının 260-425 °C'den fazla olduğu durumlarda su esaslı ve yağ esaslı yağlayıcılar yetersizdir. Yüksek kalıp sıcaklıklarını sürdürmek ve kontrol etmek zordur ve alışılmadık kalıp malzemeleri pahalıdır. Ekonomik sebeplerden dolayı kalıplar nadir olarak üretim operasyonlarında 425-535 °C'nin üzerinde ısıtılırlar.

İş parçasının özgül ısı ve termal iletkenliği, kalıp sıcaklığının metal akışı ve kalıp dolumu üzerindeki etkilerine tesir eder [14]. Molibden gibi göreceli olarak düşük özgül ısıya ve iyi bir termal iletkenliğe sahip malzemeler çabucak soğuyacaktır. Ancak, yüzeyden merkeze olan sıcaklık değişimi küçük olacaktır. Aksine, titanyum gibi düşük termal iletkenliğe sahip metaller oldukça çok sıcaklık farklılıkları geliştirebilir.

Nikel esaslı süper alaşımlar gibi bazı malzemeler sadece dar bir sıcaklık aralığında tatmin edici bir dövülebilirlik sergilerler. Bu yüzden, iş parçasının soğuk kalıplar yüzünden sıcaklığının düşmesi, çatlama ve üniform olamayan bir metal akışına sebep olması muhtemeldir.

4.5 Dövülebilirlik Ve Akma Dayanımı

Dövme işleminde kalıp boşluğunu doldurmadaki güçlükler arasında düşük dövülebilirlik ve yüksek akma dayanımı ile karakterize edilen metaller sayılır. Düşük dövülebilirlik, kalıp dolmadan önce çatlama neden olur. Yüksek akma dayanımı, metalin oyukları doldurmadan akmasına veya mevcut teçhizatın azami yükleriyle eksik dolmaya sebep olur. Tablo 4.1 dövülebilirlik ve akma dayanımı terimleri ile metal veya alaşımların grift kalıp boşluklarını doldurmada gösterdikleri beceri verilmiştir. Zorluklardan bazıları bu karakteristiklere atfedilir ve iki ayrı tip dövme parçası ile gösterilebilir (biyeler ve göbekler).

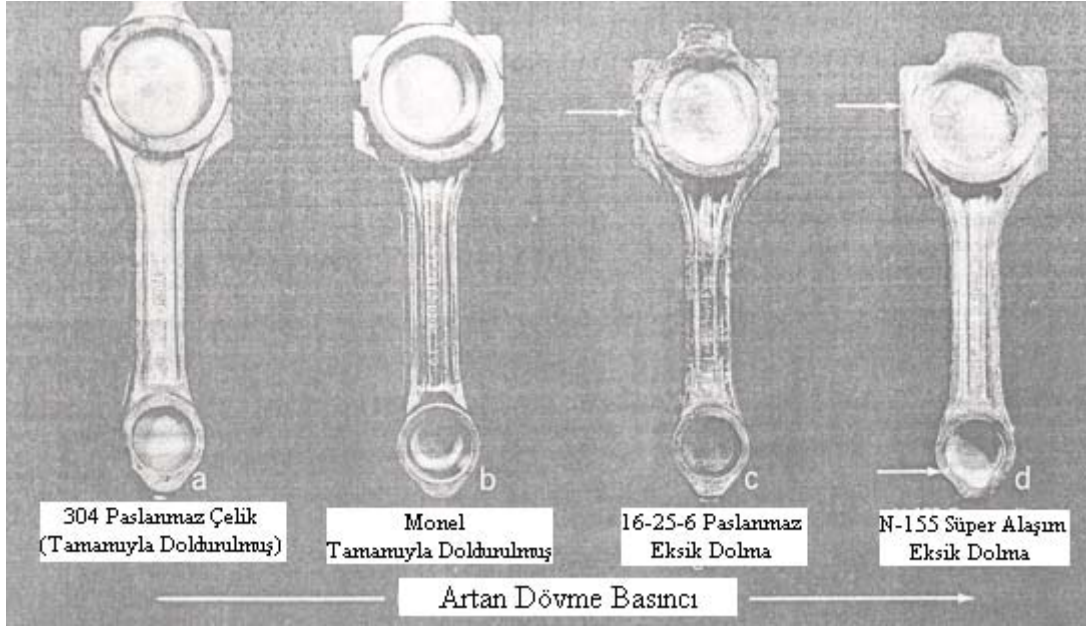
Çizelge 4.1 Dövülebilirlik ve akış mukavemetinin kalıp doldurma üzerindeki etkisini gösteren diyagram (Forging Industry Handbook)

		Artan Akma Mukavemeti veya Dövme Basıncı		
		Düşük	Orta	Yüksek
Azalan Dövülebilirlik	İyi	1030 (C Çeliği) 4340 (Alaşımli Çelik) H-11 (Takım Çeliği) 6061 (Al Alaşımı)	304 (Paslanmaz) Ti-6Al-4V	Molibden 16-25-6 (Paslanmaz)
	Orta	AZ80 (Mg Alaşımı) 7075 (Al Alaşımı)	A-286 (Paslanmaz) INCO 901 (Ni Alaşımı) T-5Al-2.5Sn	WASP Alaşımı (Ni Alaşımı) Ti-13V-11Cr-3Al N155 (Ni-Cr-Co Alaşımı)
	Zayıf	Sülfürize Çelikler (e.g. 1130)	321 (Paslanmaz) 15-7Mo (Paslanmaz)	Rene 41 (Ni Alaşımı) Hastelloy C (Ni Alaşımı) Hastelloy B (Ni Alaşımı)

Tablo 4.2, genellikle 1030 çeliği ile biyel yapımında kullanılan bir kalıp seti ile deneysel olarak ve farklı malzemeler kullanılarak yapılan bir çekiç ile dövme işleminin sonuçlarını göstermektedir. Tahmin edildiği üzere, güçlü malzemeler daha çok yeniden ısıtma işlemine ve daha fazla sayıda vuruşa gereksinim duymuştur. Uygun bir gövde dağılımına ulaşmak için çekme ve uzatma bile yapıldığı halde, nikel esaslı iki alaşım başarısız olmuştur. Şekil 4.17 dövme işleminden sonraki dört tane örneği göstermektedir. Paslanmaz süper alaşımın ve demir esaslı süper alaşımın dövülebilirlikleri çatlamayı atlatabilecek kadar yeterlidir. Ancak; çekiç, kalıpları tam olarak doldurmak için çok küçüktür.

Çizelge 4.2 Farklı malzemeler ile biyel yapımının sonuçları (Forging Industry Handbook)

Malzeme	Dövme Sıcaklığı (°F)	Isıl İşlem Sayısı	Toplam Vuruş Sayısı	Sonuçlar
1030	2300	1	<20	Tamamıyla doldurulmuş
304	2200	1	40	Tamamıyla doldurulmuş
347	2200	1	50	Tamamıyla doldurulmuş
Monel	2050	2	51	Tamamıyla doldurulmuş
16-25-6	2000	5	76	Şaft sonunda eksik dolma
N-155	2000	5	89	Her iki uçta eksik dolma
Hastelloy B	2200	3	-	Toplama ve yayma işleminde zorluk
Hastelloy C	2150	4	-	Toplama ve yayma işleminde zorluk



Şekil 4.17 Deneysel olarak dört farklı alaşım ile basılan ve artan dövme zorluğunu gösteren biyeler (Forging Industry Handbook)

Tablo 4.3, genellikle 4340 çeliği ile göbek yapımında kullanılan bir kalıp seti ile yapılan ve yedi farklı malzeme kullanılan bir çalışmanın sonuçlarını vermektedir. Çatlama ve eksik dolma düşük dövülebilirliğe sahip güçlü nikel esaslı süper alaşımlarda meydana gelmiştir. Sağlam olan dört tane göbekte ise eksik dolma meydana gelmiştir. İşlemin yapıldığı dövme sıcaklığında kullanılan malzemelerin akma dayanımları eksik dolmanın derecesini belirler. Yukarıdaki iki örnekte sağlamlık ve tam dolma, her metalle ve bu metallere uygun kalıp ve operasyon dizaynlarıyla elde edilebilmiştir.

Çizelge 4.3 Farklı malzemeler ile göbek yapımının sonuçları (Forging Industry Handbook)

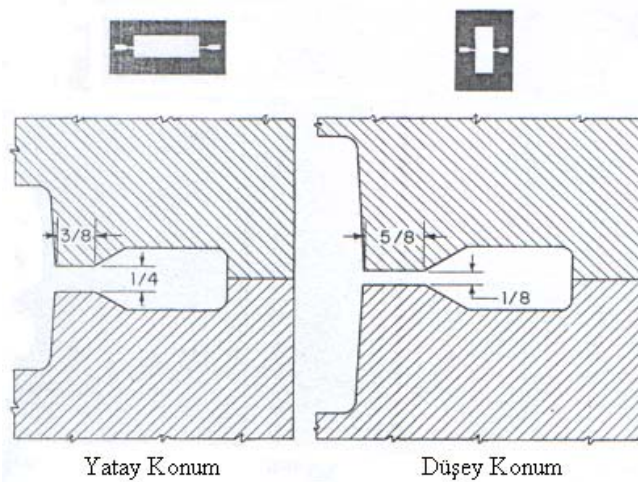
Malzeme	Dövme Sıcaklığı (°F)	Isıl İşlem Sayısı	Toplam Vuruş Sayısı	Sonuçlar
4340	2300	1	11	Tamamıyla doldurulmuş
Monel	2100	1	14	Eksik dolma
304	2100	1	21	Eksik dolma
A-286	2100	2	22	Eksik dolma
16-25-6	2000	2	24	Eksik dolma

Hastelloy C	2200	3	33	Eksik dolma ve kopma
Hastelloy B	2200	2	31	Eksik dolma ve kopma

4.6 Şekil ve Boyut Faktörleri

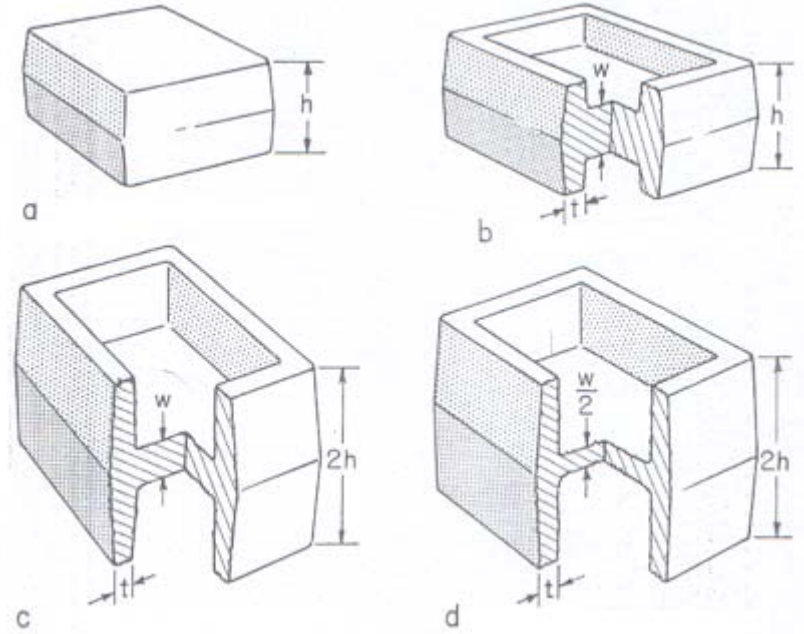
Küresel ve bloklü şekiller kapalı kalıpta dövülmesi en kolay olanlardır. İnce ve uzun kısımları veya uzantıları olan parçalar ise dövülmeleri en zor olanlarıdır. Çünkü birim hacim başına dövülmesi gereken yüzey alanı fazladır. Şekildeki bu tarz değişimler, sürtünme ve sıcaklık değişiminin etkisini maksimize ederler ve bu yüzden kalıp boşluğunu doldurmak için gereken final basıncına etki ederler. Dövme kusurları problemlerini ihmal edersek, bir dövme parçasındaki yüzey-hacim oranı ile bu parçayı üretmedeki zorluk arasında çok yakın bir ilişki vardır. Bazen, kalıp içindeki metal akış yönünün kontrolünün zorluklarının dövme yükü üzerinde etkileri vardır.

Dikey uzantıları dövmek, yanal uzantıları dövmekten çok daha zordur. Dövme yükleri, ek yanal sınırlamanın tam dolmayı garanti etmesi ihtiyacından dolayı, daha yüksektir. Dikey uzantıları oluşturmak için gereken zaman süresince kısıtlamalar yapılmalıdır; yayılmayla kalıp dolusunda bu sadece malzeme dış çevreye ulaştığı zaman gereklidir. Şekil 4.18’de dövülen disklerin çapak dizaynları parçanın yatay ve dikey konumuna göre karşılaştırılmıştır. Disk şeklinde parçaların dikey şekilde dövülmesinde önerilen daha ince ve geniş çapak boşluğu dizaynı, deformasyonun kritik noktası boyunca daha çok yanal sınırlama üretir. Kabaca, dikey düzenlemeler yatay düzenlemelere göre kalıp ömründen 1/3 çalarlar ve 3 kat daha fazla çapak malzemesi kaybı olur.

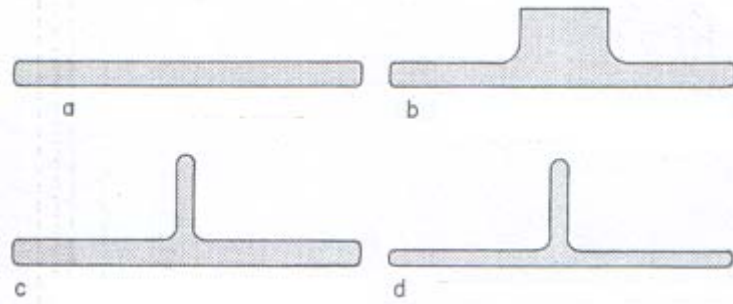


Şekil 4.18 Çapak dizaynlarının kalıp konumuna göre dizaynları (Forging Industry Handbook)

Daha karışık parçalarda dövme işleminin kolaylığı, parçalardaki yatay ve dikey uzantıların birbirlerine göre oranına bağlıdır. Şekil 4.19'da parçanın dikey ve yatay kalınlıklarının dövme operasyonu üzerindeki etkileri gösterilmektedir. Bu şekilde a'dan d'ye doğru dövme zorlaşmaktadır. Daha ince tabakalardaki dövme uzantılarında çok az bir etki görülmektedir veya hiçbir etki görülmemektedir. Uzun ve narin şekilli uzantılara sahip parçaların dövülmesi, tabaka veya disk biçimli parçaların dövülmesinden çok daha zordur. Şekil 4.20'de şekil faktörünün dövme zorlukları üzerindeki etkisini gösteren başka bir şematik sunumdur. Bu şekilde, c ve d'deki parçalar sadece yüksek dövme yükleri gerektirmezler aynı zamanda kalıbı doldurmak için en azından bir tane daha fazla vuruşa ihtiyaç duyarlar.



Şekil 4.19 Parçanın yatay ve dikey kalınlıklarının dövme zorlukları üzerindeki etkisi (Forging Industry Handbook)



Şekil 4.20 Şekil faktörünün dövme zorlukları üzerindeki etkisi (Forging Industry Handbook)

Kalıpta dövme yaparken kalıbın dolmasına etki eden şekilsel faktörlerden biri çapak boşluğunun dizaynıdır. Kalıpta dövme tekniğinin gereği olarak parça hacmine ilave edilen çapak payının, kalıp kapanırken taşabilmesi gerekmektedir [15]. Sonuç olarak bu taşma boşluğuna, çapak boşluğu denmekte ve parça büyüklüğü ve tipi, dövülen malzeme cinsi, dövme makinası tipi ve gücüne göre değişik boyut ve şekillerde düzenlenmektedir [15]. Kalıpta şekillendirilmek üzere gravür içine konan ilkel parça hacminin, dövme parça hacminden biraz büyük tutulması, kalıp içinde basınç etkisi yaratmakta ve kalıp daha iyi dolmaktadır [15]. Şekil 4.21’de çapak boyutlarının düzenlenmesi ile ilgili tabloya yer verilmiştir. Bu tabloyu kullanabilmek için dövme parçasının çapaksız izdüşüm alanının hesaplanmış olması gerekmektedir. Şekilden görüldüğü üzere, b_1 boyutunun kalıp kapanma yüzeyini fazla küçültmeyecek şekilde seçilmesi gerekmektedir. Diğer bir boyut olan s_1 ise denklem 2.1’deki gibi alınabilir.

$$s_1 = (2 \div 3)s \quad (2.1)$$

Dövme parçasının kalıp bõlmẽ yüzeyindeki çapaksız izdüşüm alanı (F, mm ² . 10 ²)	Çapak Kalınlığı (mm)	b/s oranı		
		Yığıma	Genişletme	Yükseltme
18'e kadar	0,6	8	10	13
18-45	1	7	8	10
45-112	1,6	5	5,5	7
112-280	2,5	4	4,5	5,5
280-710	4	3	3,5	4
710-1800	6,3	2	2,5	3
1800-4500	10	1	2	2,5

Şekil 4.21 Çapak boyutlarının düzenlenmesi (Kalıp İmal Tekniği)

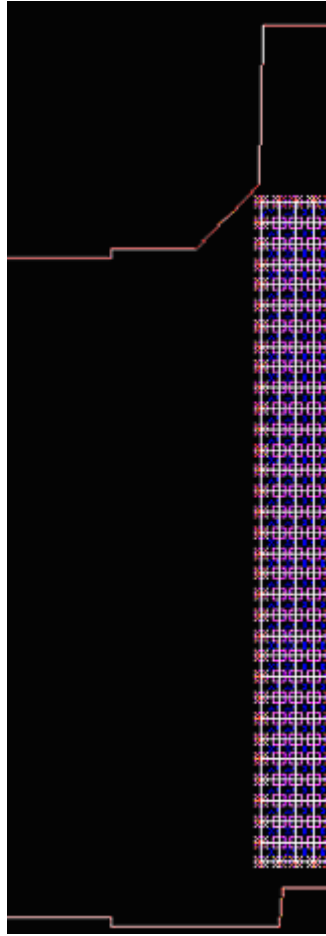
5. ANALİZLER

Bu bölümde, seçilen örneklerle, MSC. SuperForm sonlu elemanlar paket programı kullanılarak parçaya ait kalıp dolumu analizleri yapılmıştır. Analiz sonuçları, şekiller ve grafikler yardımıyla açıklanmıştır.

5.1 Birinci Analiz

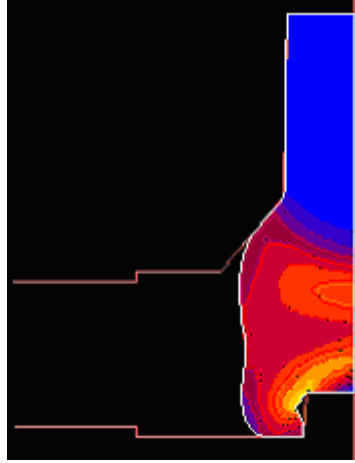
Birinci analizde kullanılan parçanın adı flanşlı mildir. Parça, burulma ve yorulma dayanımı kuvvetli, 42CrMo4 alaşımından imal edilmiştir. Bu parçanın analizi, aksenal simetrik analiz tipi kullanılarak yapılmıştır ve kalıplar ile iş parçası arasında ki ısı transferi göz önüne alınmıştır.

Parçanın yapılan ilk etap analizinde, kalıp dolumu, kalıp köşelerinin yuvarlatmaları yapılmaksızın incelenmiştir ve analiz 144 artımda çözülmüştür. Bu analizde iş parçası, 128 sonlu elemandan ve 165 nod kullanılarak modellenmiştir (Şekil 5.1).

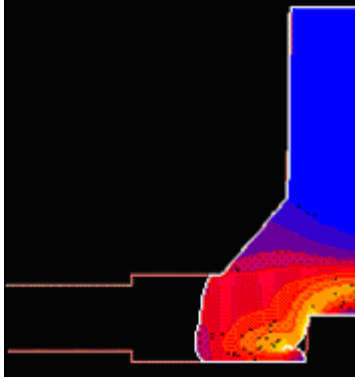


Şekil 5.1 Kalıp köşelerinin yuvarlatılmadığı kalıp ve iş parçası modeli

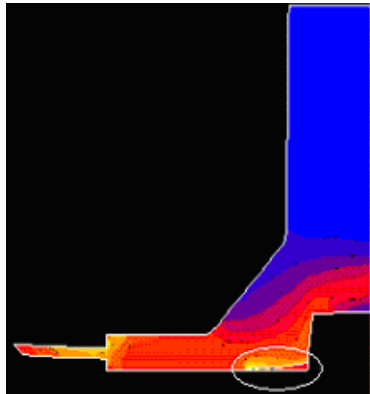
Bu analizin sonucunda, iş parçasının kalıbı tamamıyla doldurduğu gözlemlenmiştir. Ancak, analizin 82. artımından itibaren (Şekil 5.2) iş parçasının kendi kendisiyle sürtünmeye başladığı anlaşılmıştır. Prosesin ileri safhalarında (Şekil 5.3) ve sonucunda (Şekil 5.4) bu sürtünmenin devam ettiği belirlenmiştir. Bu durum parçanın dayanımını azaltmaktadır. İkinci etap analizde bu olumsuz durumdan kalıp köşelerini yuvarlatarak kaçınılmaya çalışılmıştır. Aynı durumla uygulama esnasında da karşılaşılmıştır (Şekil 5.5).



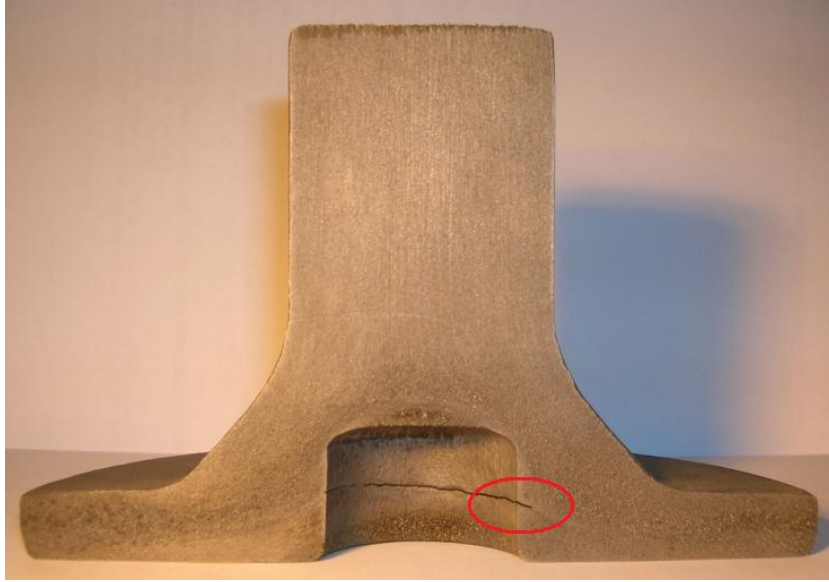
Şekil 5.2 Parçanın kendi kendine sürtünmeye başlaması



Şekil 5.3 İlerlemiş kendi kendine sürtünme durumu

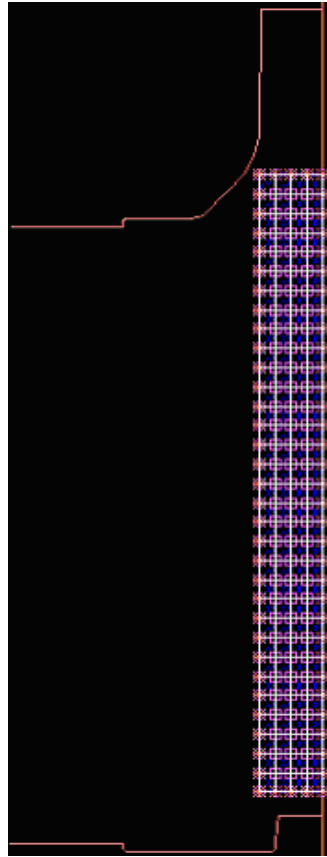


Şekil 5.4 Prosesin sonu ve parçada oluşan çatlak görünümü

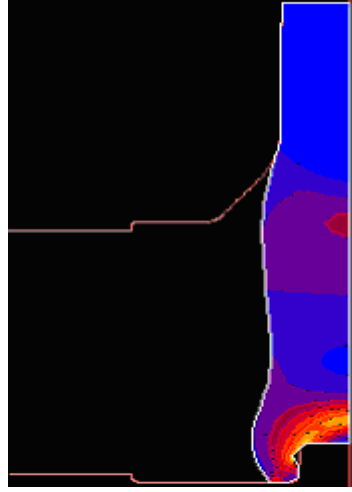


Şekil 5.5 Uygulamada meydana gelen katlanma hatası

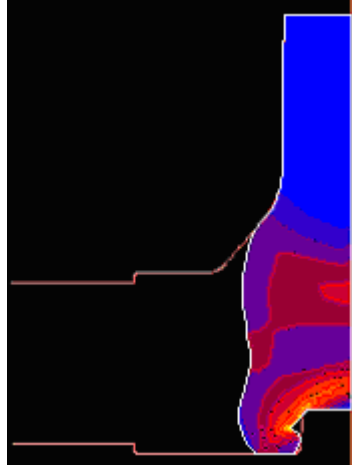
Aynı ön şekil kullanılarak kalıp köşelerinin yuvarlatıldığı durumda (Şekil 5.6) analiz 239 artımda tam bir kalıp dolumu sağlanarak çözülmüştür. Ancak, iş parçası 116 (Şekil 5.7) ile 170. (Şekil 5.8) artımlar arasında kendisiyle sürtünme eğiliminde olup 171. (Şekil 5.9) artımda bu eğilimden sıyrılıp işlem sonucunda tam bir kalıp dolumu sağlanmıştır (Şekil 5.10).



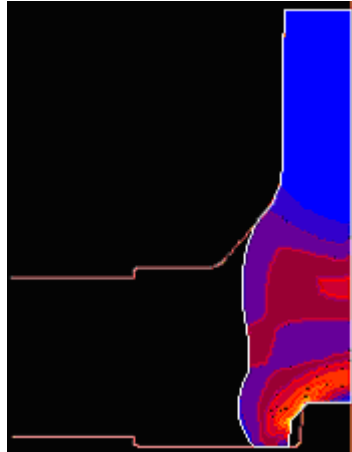
Şekil 5.6 Kalıp köşelerinin yuvarlatıldığı kalıp ve iş parçası modeli



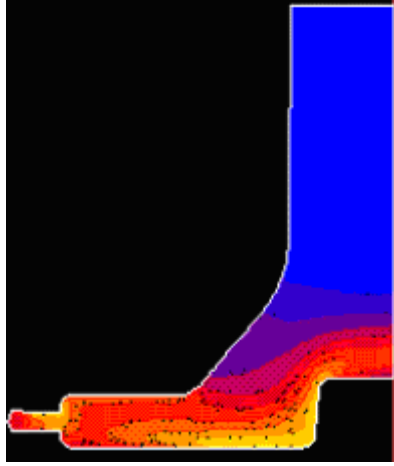
Şekil 5.7 Artım 116



Şekil 5.8 Artım 170

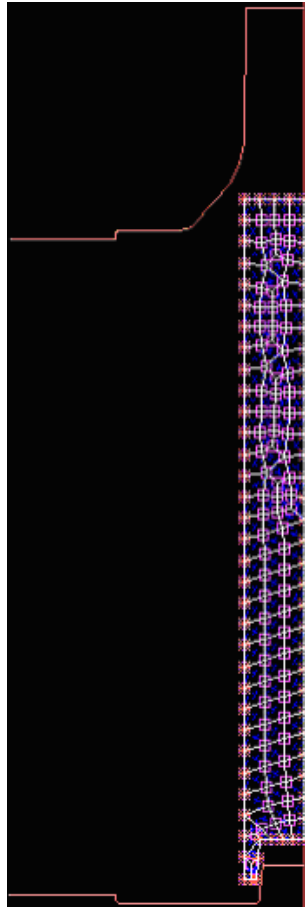


Şekil 5.9 Artım 171



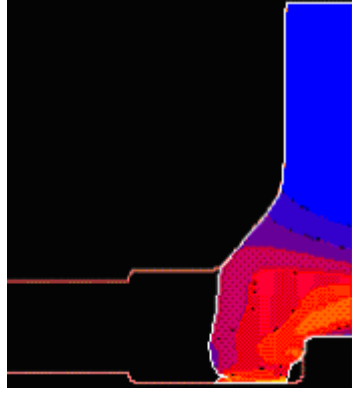
Şekil 5.10 Prosesin sonu ve tam bir kalıp dolumu

İş parçasının kendi kendine sürtünmesinin meydana gelmediği bir proses elde etmek için ön şeklin değiştirildiği bir model daha oluşturulmuştur (Şekil 5.11). Yeni ön şekilli modelde iş parçası 114 sonlu eleman ve 152 nod kullanarak modellenmiştir. Analiz, 105 artımda iş parçasının kendi kendine değmesi engellenerek ve tam bir kalıp dolumu sağlanarak çözülmüştür.

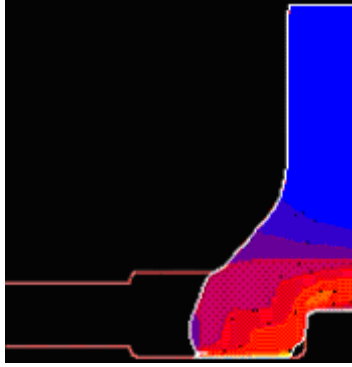


Şekil 5.11 Yeni ön şekilli iş parçası ve kalıp modeli

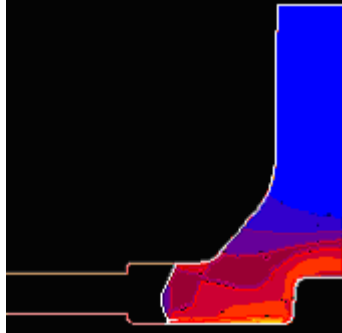
Sırasıyla; Şekil 5.12, Şekil 5.13 ve Şekil 5.14 iş parçasının kendi kendine sürtünmeden kalıb içerisindeki akışını göstermektedir. Şekil 5.15’de proses sonunda tam olarak dolmuş iş parçası gösterilmektedir. Şekil 5.15 ile Şekil 5.16’da parçanın analizi ile dövme uygulaması yapıldıktan sonra akış çizgileri arasındaki uyum gözükmemektedir. Ayrıca, Şekil 5.17’de parçanın üç boyutlu çizimine yer verilmiştir.



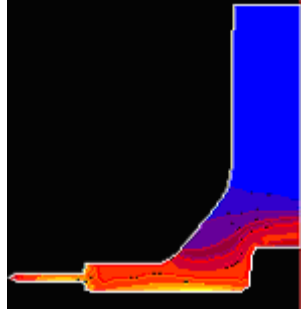
Şekil 5.12 Artım 71



Şekil 5.13 Artım 74



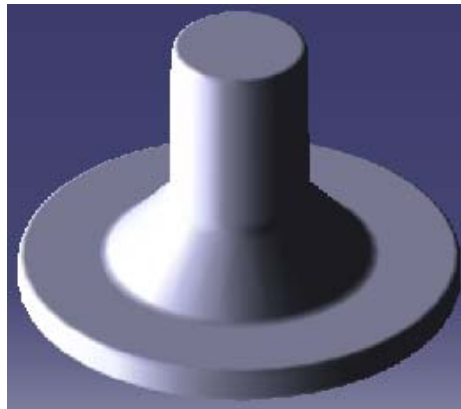
Şekil 5.14 Artım 80



Şekil 5.15 Prosesin sonunda tam bir kalıp dolumu

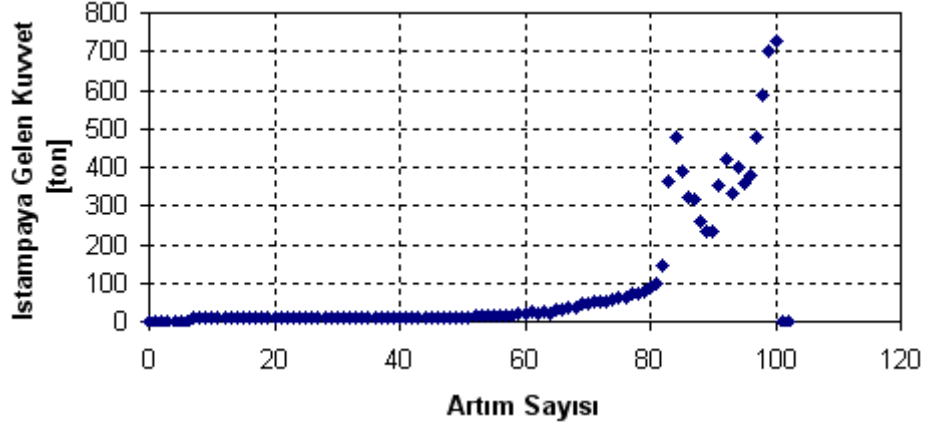


Şekil 5.16 Proses sonunda tam dolmuş uygulama parçası

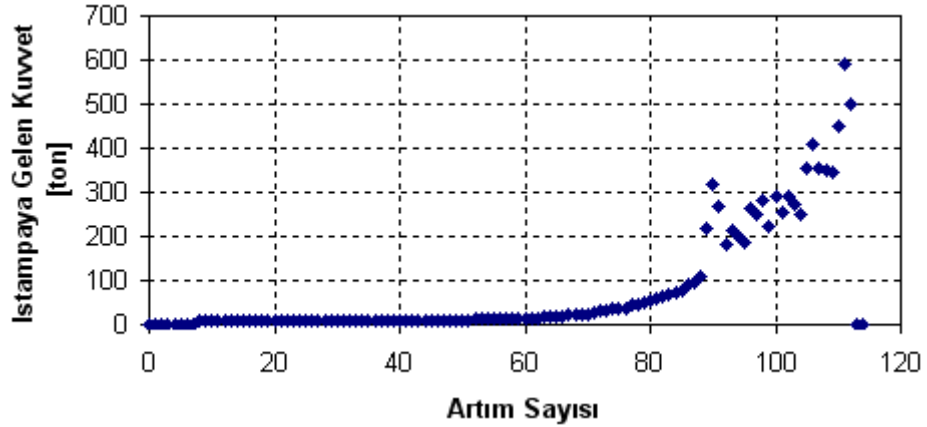


Şekil 5.17 Parçanın üç boyutlu çizimi

Bu parça için yapılan son bir analiz de, parçanın hangi sıcaklıkta dövülmesinin daha verimli olacağıdır. 42CrMo4 alaşımı sıcak şekil verme işlemlerinde 850-1050 °C aralıklarında kullanılmaktadır. 850 °C’de ve 1050 °C’de yapılan analizler sonucunda ıstampaya gelen kuvvet-artım sayısı grafikleri elde edilmiştir. Şekil 5.18’de 850 °C’de ıstampaya gelen kuvvet-artım sayısı grafiğine yer verilmiştir. Bu sıcaklıkta ıstampaya gelen maksimum kuvvet 727 tondur. Şekil 5.19’da 1050 °C’de ıstampaya gelen kuvvet-artım sayısı grafiğine yer verilmiştir. Şekillendirme bu sıcaklıkta yapıldığında ıstampaya gelen maksimum kuvvetin 588 ton olduğu görülmüştür. Buradan hareketle, ıstampaya ve dolayısıyla kalıplara en az kuvvetin bindiği 1050 °C’de şekillendirme işleminin yapılması uygun bulunmuştur.



Şekil 5.18 ıstampaya gelen kuvvet-artım sayısı grafiği (850 °C)



Şekil 5.19 ıstampaya gelen kuvvet-artım sayısı grafiği (1050 °C)

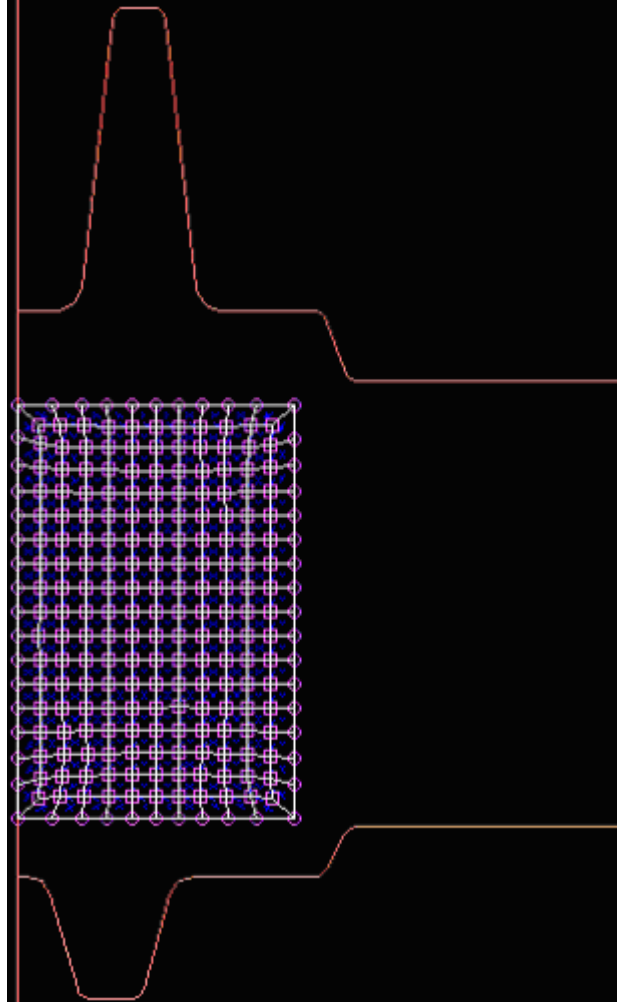
Yukarıdaki iki grafikte yaklaşık olarak 80. artımdan sonra eğriyi oluşturan noktalarda bir osilasyon görülmektedir. Bunun sebebi 80. artımdan sonra analizdeki sonlu elemanlar ağının sıkışması ve hesaplarda bir sapmaya sebep olmasıdır. Bu problemin üstesinden gelmek için yeniden ağ oluşturma sıklığı azaltılarak daha düzgün bir ağ

yapısı elde edilebilir. Ancak, bu çözüm beraberinde residual denen nümerik hataları arttıracaktır. Grafiklerde, eğrinin genel karakteristiği belli olduğu için olduğu gibi bırakılmıştır.

5.2 İkinci Analiz

İkinci örnekte, bir göbek için tam dolumu sağlayacak olan iş parçasının optimum boyutları ve ön şekli araştırılmıştır. Parça, sertleştirildiği durumlarda yüksek bir aşınma direnci gösteren 16MnCr5 alaşımından imal edilmiştir. Bu parçanın analizi, eksenel simetrik analiz tipi kullanılarak yapılmıştır ve kalıplar ile iş parçası arasında ki ısı transferi göz önüne alınmıştır.

Parçanın ilk etapta yapılan dolum analizinde 413.3 cm^3 haciminde bir iş parçası kullanılmıştır. Bu iş parçası, 212 sonlu eleman ve 239 nod kullanılarak modellenmiştir (Şekil 5.20). Analiz 94 artımda çözülmüştür.

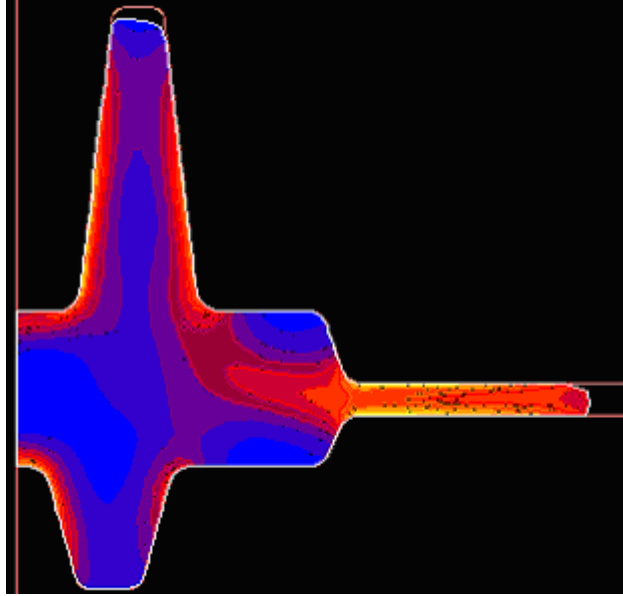


Şekil 5.20 Kalıp ve iş parçası modeli

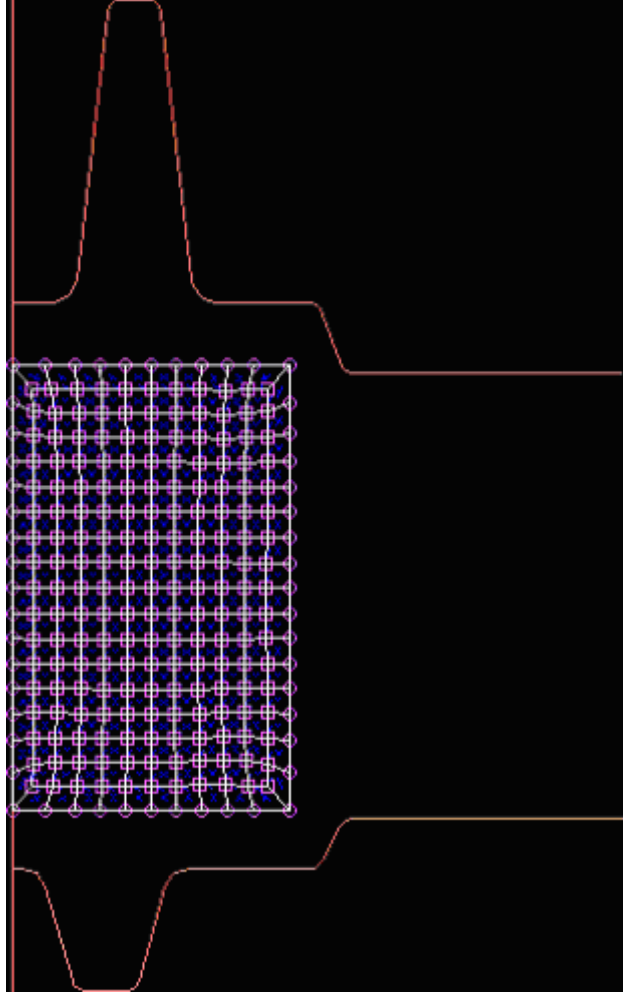
Yapılan analiz sonucunda iş parçasının, kalıbın uzun hörgücünü dolduramadığı belirlenmiştir (Şekil 5.21).

İkinci etapta yapılan analizde, parçanın eksik hacimde iş parçası ile basıldığı düşünüldüğünden, iş parçasının hacmi artırılmıştır. Bu analizde kullanılan iş parçasının hacmi 445.09 cm^3 olarak belirlenmiştir. Kullanılan bu iş parçası, 212 sonlu eleman ve 239 nod kullanılarak modellenmiştir (Şekil 5.22). Analiz 95 artımda çözülmüştür.

Yeni iş parçasının kullanıldığı analiz sonucunda kalıbın uzun hörgücünün tam olarak doldurulduğu gözlemlenmiştir (Şekil 5.23).

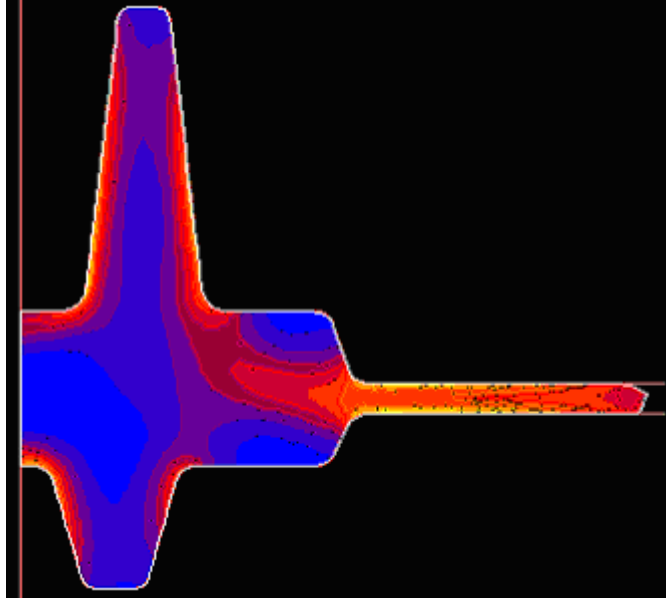


Şekil 5.21 Proses sonucunda tam dolmamış kalıp

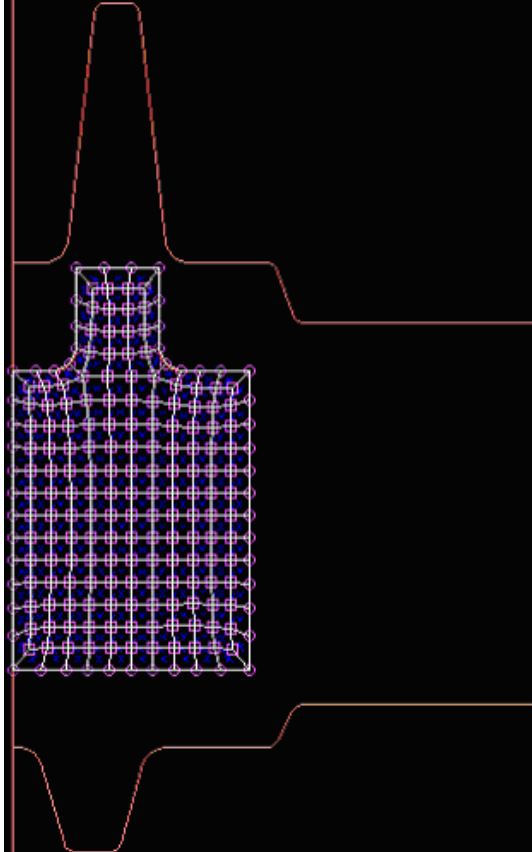


Şekil 5.22 Kalıp ve yeni iş parçası modeli

Son olarak, kalıbın değişik bir ön şekil kullanılarak daha düşük hacimde bir iş parçası ile tam olarak doldurulup doldurulamayacağı düşünülmüştür. Bu işlem için düşünülen ön şekil 388.66 cm^3 hacime sahiptir. Kullanılan bu iş parçası, 184 sonlu eleman ve 211 nod kullanılarak modellenmiştir (Şekil 5.24). Analiz 84 artımda çözülmüştür.

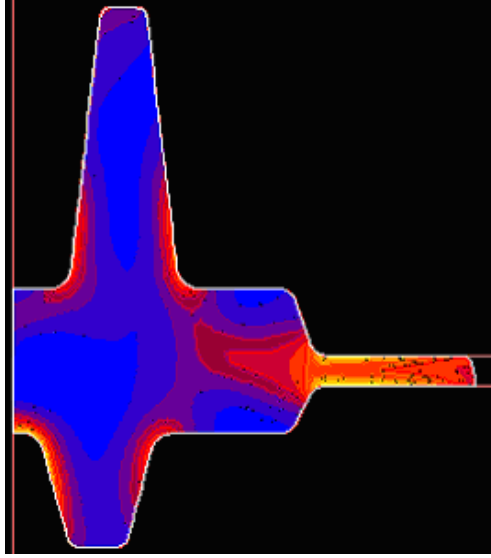


Şekil 5.23 Proses sonucunda tam olarak dolmuş kalıp

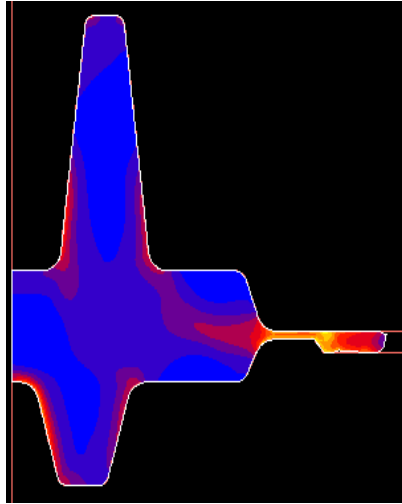


Şekil 5.24 Kalıp ve yeni ön şekilli iş parçası modeli

Analiz sonucunda yeni bir ön şekil dizaynıyla kullanılan iş parçasının kalıbı tamamıyla doldurduğu görülmüştür (Şekil 5.25). Bu sayede, değişik bir ön şekil dizaynıyla, ilk analizde kalıbı tam olarak dolduramayan iş parçasından daha düşük hacimli bir iş parçasıyla kalıbı doldurmak mümkün olmuştur.



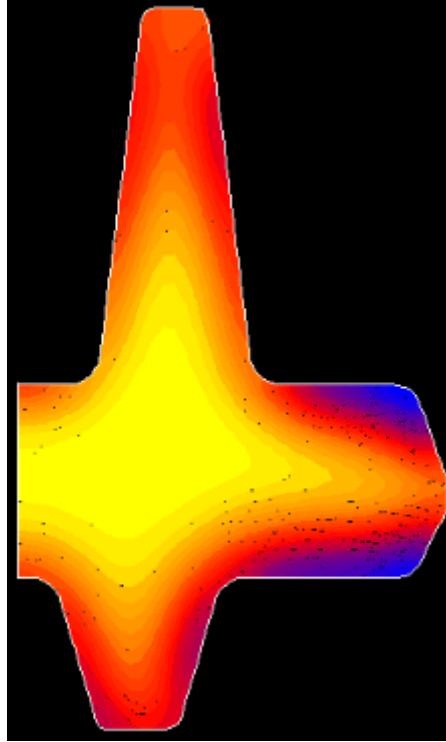
Şekil 5.25 Kullanılan yeni ön şekilli iş parçasıyla tam olarak dolmuş kalıp
Başlangıçta kullanılan iş parçasının hacmini küçültmek için yeni bir çapak dizaynı kullanılarak son bir iyileştirme yapılması düşünülmüştür. Yeni çapak dizaynı ile yapılan analizde kullanılan iş parçasının 327.72 cm^3 hacmindedir. Kullanılan bu iş parçası 159 sonlu elemandan ve 184 noddan oluşturulmuştur. Analiz 98 artımda çözülmüştür. Şekil 5.26'da proses sonucu kalıbı tamamen dolduran parçaya yer verilmiştir. Ayrıca Şekil 5.27'de parçanın üç boyutlu çizimine yer verilmiştir.



Şekil 5.26 Kullanılan yeni çapak dizaynıyla tam olarak dolmuş kalıp

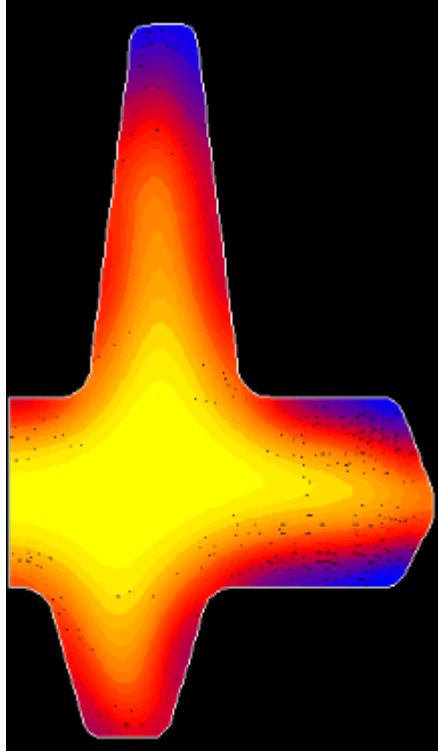


Şekil 5.27 Parçanın üç boyutlu çizimi



Şekil 5.28 İkinci etap analizdeki sıcaklık dağılımı

Şekil 5.28 ve 5.29'da yapılan analizlerin sıcaklık dağılımları verilmiştir. Yeni ön şekilli parçanın formu gereği kalıba daha uzun süre teması olduğundan hörgüç kısmı daha fazla soğumuştur. Ancak, bu yeni ön şekille deformasyon daha uniform bir şekilde sağlandığı için yeni ön şekilli parçanın sıcaklık dağılımı daha iyidir.

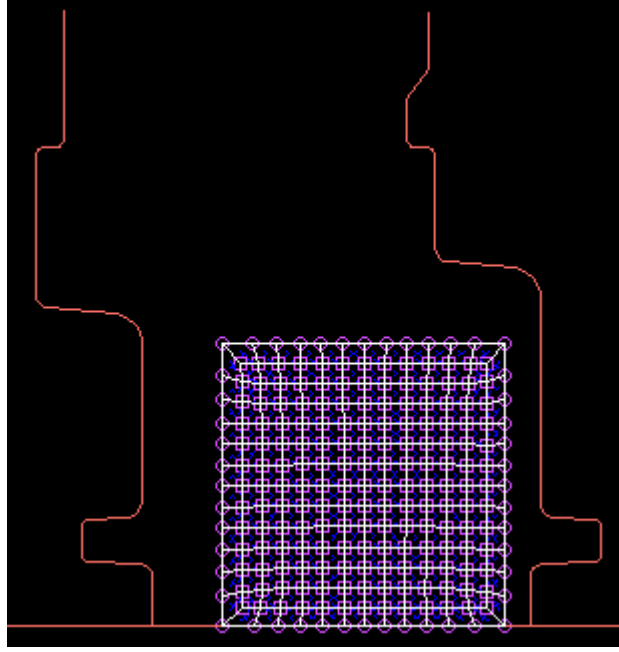


Şekil 5.29 Yeni ön şekilli ve çapak dizaynı parçanın sıcaklık dağılımı

5.3 Üçüncü Analiz

Üçüncü örnek, iş parçasının ilk şeklinin kalıbı doldurmaya yeterli olmadığı ve iş parçasının birbiriyle sürtünmesi hatasının meydana geldiği bir uygulamadır. Kavrama göbeği olarak kullanılan bu parça 20MnCr5 alaşımından imal edilmiştir. Bu parçanın analizi, aksenal simetrik analiz tipi kullanılarak yapılmıştır ve kalıplar ile iş parçası arasında ki ısı transferi göz önüne alınmıştır.

Parçanın ilk etap analizinde silindir şeklinde bir iş parçası kullanılmıştır. Bu iş parçası, 192 sonlu eleman ve 217 nod kullanılarak modellenmiştir (Şekil 5.30). Analiz 139 artımda çözülmüştür. Bu iş parçası 1608.49 cm^3 hacimindedir.

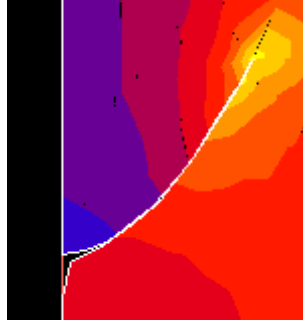


Şekil 5.30 Kalıp ve iş parçası modeli

Yapılan analiz sonucunda, Şekil 5.31’de, iş parçasında kendi kendine sürtünme sonucu oluşan çatlak görünümü gösterilmiştir. Şekil 5.32’de bu hatadan dolayı oluşan eksik dolmaya yer verilmiştir.



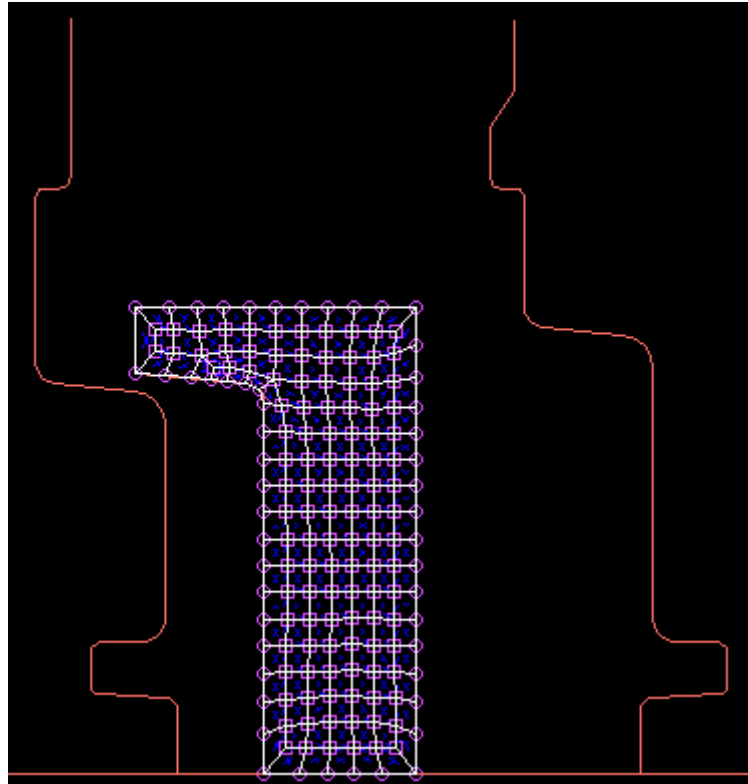
Şekil 5.31 Prosesin sonunda parçada oluşan çatlak görünümü



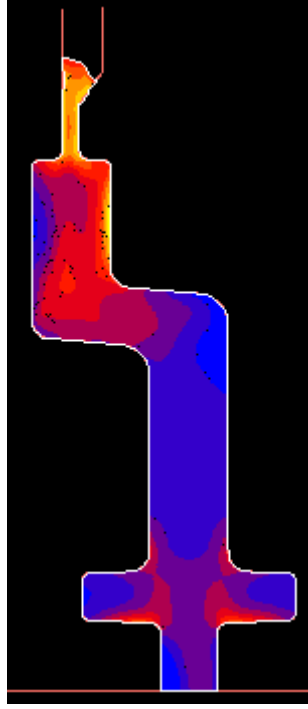
Şekil 5.32 Hatadan dolayı oluşan eksik dolma

İkinci etap analizde iş parçası için yeni bir ön şekil formu dizayn edilmiştir. Bu yeni ön şekilli iş parçası, 140 sonlu eleman ve 167 nod kullanılarak modellenmiştir (Şekil 5.33). Analiz, 166 artımda çözülmüştür. Kullanılan yeni ön şekilli iş parçası 1578.08 cm^3 hacminindedir.

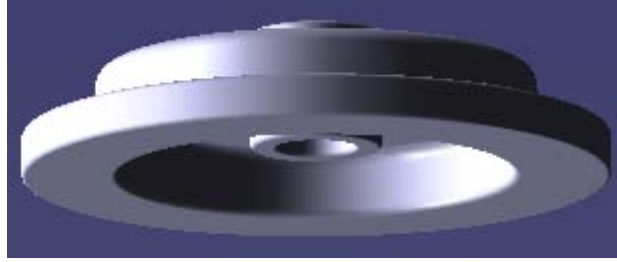
Yapılan analiz sonucunda, yeni ön şekilli iş parçasının kalıbı tamamen doldurduğu gözlemlenmiştir (Şekil 5.34) ve iş parçasının kendi kendisiyle sürtünmesi hatasına rastlanmamıştır. Şekil 5.35’de parçanın üç boyutlu şekline yer verilmiştir.



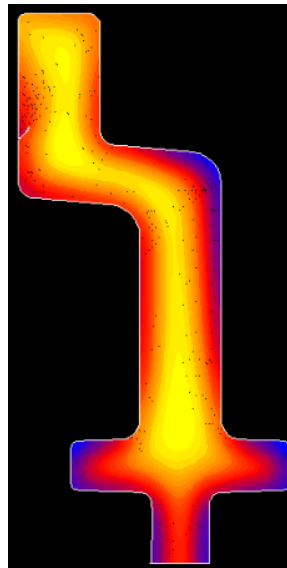
Şekil 5.33 Kalıp ve yeni ön şekilli iş parçası modeli



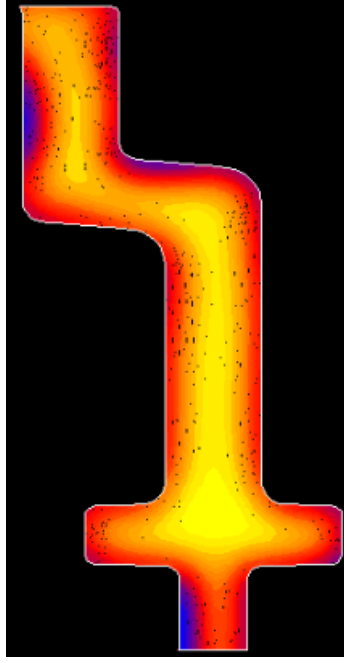
Şekil 5.34 Proses sonucunda hatasız olarak oluşan parça



Şekil 5.35 Parçanın üç boyutlu çizimi



Şekil 5.36 İlk analizin sıcaklık dağılımı



Şekil 5.37 Yeni ön şekilli parçanın sıcaklık dağılımı

Şekil 5.36 ve 5.37’de analizi yapılan parçaların sıcaklık dağılımına yer verilmiştir. Yapılan ilk analizde parça kalıp ile daha fazla süre temesta kaldığı için yeni ön şekilli parçaya göre uniform olmayan bir sıcaklık dağılımı bulunmaktadır.

6. SONUÇLAR

Sonlu elemanlar metodu, nümerik temellere dayanan, bilim adamı ve mühendislere ısı transferi, talaşlı ve talaşsız şekil verme gibi birçok problemin çözümünde kolaylık sağlayan bir yöntemdir. Son yıllarda bilgisayar alanındaki hızlı gelişmeler sayesinde çizim programlarının analiz programlarına entegre edilmesiyle çıkan paket programlar bu yöntemi daha verimli bir hale getirmiş ve birçok mühendislik problemi bu sayede hızlı, doğru, güvenilir bir şekilde çözülmeye başlanmıştır.

Özellikle son 10-15 yılda talaşsız şekil verme alanında çıkan sonlu elemanlar paket programları sayesinde seri üretime yönelik büyük avantajlar sağlanmıştır. Analizler sayesinde hatasız bir şekilde dizayn edilen kalıp ve iş parçasıyla imalat süreleri kısalmış, aynı kalıpla daha fazla parçanın hatasız ve yüksek bir kalitede şekillendirilebilmesine olanak sağlanmıştır.

Talaşsız şekil verme usullerinden olan dövme yöntemi kullanılarak, hiçbir şekil verme yöntemi aracılığıyla erişilemeyecek mukavemet değerlerine sahip parçalar üretilmektedir. Bu durumu sağlayan ana etmenlerden biri olan akış çizgilerinin düzenli ve kesiksiz olması ve dövme yönteminin bunu sağlamak için çok elverişli olması büyük bir avantajdır.

Yüksek lisans tezinin konusu olan dövme parçalardaki kalıp dolumu fenomeninin incelenmesinde sonlu elemanlar yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem kullanılarak kalıp malzemesi ve yardımcı ekipmanına ek olarak kalıp işleme maliyeti ve işleme zamanı kayıpları elimine edilerek istenen formu oluşturmak için optimum kalıp ve iş parçası dizaynı yapılmıştır. Bu sayede kalıbı sağlıklı bir şekilde dolduracak kalıp ve iş parçası dizaynı bilgisayar analizi yardımıyla yapıldığı için maliyet ve zamandan büyük tasarruf sağlanmıştır.

Bitirme parçasını elde etmek için belirli bir ön şekile ihtiyaç duyan kalıpların dizaynında, yanlış ön şekilli parçalardan kaynaklanan parçanın birbiri üzerine katlanma hatası analizler aracılığıyla farkedilmiştir. Değiştirilen ön şekil aracılığıyla kalıp içinde düzgün bir akış sağlanarak katlanma hatası olmaksızın kalıp dolumu sağlanmıştır. Bu esnada, yeni dizayn edilen ön şekil parçasının hacminin hatalı ön şekil parçasına göre daha küçük olduğu fark edilmiştir. Bu durum, yapılan değişiklik ile düzgün bir kalıp dolumunun malzeme kazancı ile beraber garanti altına alınmasını sağlar.

Yapılan tez çalışmasında dövme yönteminin avantajlarına sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak ulaşılmaya çalışılmıştır. İş parçasının kalıp içerisinde akışı düzenlenerek düzgün ve hatasız bir kalıp dolumu elde edilmiş ve bu sayede optimum şartlar altında dövme yönteminin doğal karakteristiklerinden ileri gelen avantajlarının uygulanabilmesi sağlanmıştır.

KAYNAKLAR

- Çapan L., (2004) “Dövme Teknolojisi Birleştirilmiş ve Geliştirilmiş Yeni Baskı”, TMMOB Makina Mühendisleri Odası, Yayın No. 128, İstanbul.
- Çapan L., (1999) “Metallere Plastik Şekil Verme”, Çağlayan Basımevi, İstanbul.
- DeGarmo E. Paul, Black J. Temple ve Ronald A. Kohser, (1997) “Materials And Processes In Manufacturing”, John Wiley, New York.
- Hallström J., (2000) “Influence Of Friction In Counterblow Hammer Forging”, Journal Of Materials Processing Technology, 108: 21-25.
- Jon E. Jenson, (1966) “Forging Industry Handbook”, Cleveland.
- Kalpakjian S. ve Steven R. Schmid, (2001) “Manufacturing Engineering And Technology”, Addison Wesley, New Jersey.
- Lange K., (1985) “Handbook Of Metal Forming”, McGraw-Hill, New York.
- Lindberg Roy A., (1990) “Processes And Materials Of Manufacture”, Allyn And Bacon, Boston.
- Niebel Benjamin W., Draper Alan B. ve Wysk Richard A., (1989) “Modern Manufacturing Process Engineering”, McGraw-Hill, New York.
- Ostwald Philip F. ve Munoz J., (2001) “Manufacturing Processes And Systems”, John Wiley, New York.
- Uysal M. Fatih, Tekkaya A. Erman, Canderim Ö. ve Pınar M. Oytun, (2004) “Fastener Production: Innovation By Application Of Process Simulation”, ICFG 37th Plenary Meeting, İstanbul.
- Yurci M. Emin, (1999) “Talaşsız Şekil Verme”, Yıldız Teknik Üniversitesi Yayınları, 99, İstanbul.
- Yurci M. Emin, (1997) “Kalıp İmal Tekniği”, Yıldız Teknik Üniversitesi Yayınları, 97, İstanbul.
- MSC. SuperForm User’s Guide, Version 2004.
- MSC. SuperForm Command Reference, Version 2004.

İNTERNET KAYNAKLARI

- [1] <http://www.saarstahl.com>
- [2] <http://www.metalravne.com>
- [3] <http://www.scotforge.com>

ÖZGEÇMİŞ

Doğum Tarihi 03.07.1980

Doğum Yeri İstanbul

Lise 1994-1998 Kenan Evren Lisesi

Lisans 1999-2004 Yıldız Teknik Üniversitesi

Makina Mühendisliği Fakültesi

Makine Mühendisliği Bölümü

Yüksek Lisans 2004-2008 Yıldız Teknik Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı

İmal Usulleri Programı

Çalıştığı kurumlar

2007-2008 Kroman Çelik SAN. A.Ş.