

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**MATRİS AÇILI DERİN ÇEKME KALIPLARINDA
ALÜMİNYUMUN DERİN ÇEKİLMESİNDE AÇI
DEĞİŞİMİNİN ÇEKME ORANI ÜZERİNE ETKİSİNİN
DENEYSEL ARAŞTIRILMASI**

Faruk AYTAÇ

Tez Yöneticisi
Yrd.Doç.Dr. Vedat SAVAŞ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE EĞİTİMİ ANABİLİM DALI

ELAZIĞ, 2007

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**MATRİS AÇILI DERİN ÇEKME KALIPLARINDA
ALÜMİNYUMUN DERİN ÇEKİLMESİNDE AÇI
DEĞİŞİMİNİN ÇEKME ORANI ÜZERİNE ETKİSİNİN
DENEYSEL ARAŞTIRILMASI**

Faruk AYTAÇ

Tez Yöneticisi
Yrd.Doç.Dr. Vedat SAVAŞ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE EĞİTİMİ ANABİLİM DALI

ELAZIĞ, 2007

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**MATRİS AÇILI DERİN ÇEKME KALIPLARINDA
ALÜMİNYUMUN DERİN ÇEKİLMESİNDE AÇI
DEĞİŞİMİNİN ÇEKME ORANI ÜZERİNE ETKİSİNİN
DENEYSEL ARAŞTIRILMASI**

Faruk AYTAÇ

Yüksek Lisans Tezi
Makine Eğitimi Anabilim Dalı

Bu tez, tarihinde aşağıda belirtilen jüri tarafından oybirliği /oyçokluğu ile başarılı / başarısız olarak değerlendirilmiştir.

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Vedat SAVAŞ

Üye:

Üye:

Üye:

Üye:

Bu tezin kabulü, Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun/...../..... tarih ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

TEŞEKKÜR

Bu tezin hazırlanmasında beni yönlendiren ve yardımcı olan değerli hocam Yrd. Doç. Dr. Vedat SAVAŞ'a ve maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen Çetin ÖZAY'a, Muhammet BAL'a, Makine Eğitimi Bölüm Başkanlığına ve atölye çalışanlarına teşekkür ederim.

Faruk AYTAÇ

İÇİNDEKİLER

Sayfa No:

TEŞEKKÜR	
İÇİNDEKİLER	I
ŞEKİLLER LİSTESİ	III
TABLolar LİSTESİ	V
KISALTMALAR	VI
ÖZET	VII
ABSTRACT	VIII
1. GİRİŞ	1
1.1. Literatür Araştırması	2
2. METALLERDE PLASTİK ŞEKİL DEĞİŞİMİ	5
2.1. Giriş	5
2.2. Metallerin Fiziksel Yapıları Ve Plastik Deformasyon	5
2.2.1. Metallerin Kristal Kafes Yapıları	5
2.2.2. Kristallerin Şekil Değişimi	7
2.3. Kristallerde Meydana Gelen Yapı Hataları	9
2.3.1. Kristallerde Yapı Hatalarının Sınıflandırılması	9
2.3.2. Pekleşme	11
3. PLASTİSİTEDE KULLANILAN MALZEME ÇEŞİTLERİ VE MODELLERİ	13
4. KALIPÇILIK TEKNOLOJİSİ	17
4.1. Hacim Kalıpçılığı	17
4.1.1. Sıkıştırma Kalıpları	17
4.1.2. Enjeksiyon Kalıpları	18
4.1.3. Dövme Kalıpları	19
4.2. Sac Metal Kalıpçılığı	19
4.2.1. Kesme Kalıpları	19
4.2.2. Bükme Kalıpları	20
5. DERİN ÇEKME	21
5.1. Derin Çekme	21
5.2. Karakteristik Üçgen ve Fazlalık Malzemenin Etkileri	22
5.2.1. Karakteristik Üçgenin Tanımı ve Fazlalık Malzemenin Belirlenmesi	22
5.2.2. Kulak Oluşumu	24
5.3. Limit Çekme Oranı ve Anizotropi	26
5.3.1. Limit Çekme Oranı	26
5.3.2. Derin Çekmede Anizotropi	27
5.4. Derin Çekme İşleminde İş Parçası Kalınlığının Değişimi	29
5.5. Kademeli Çekme	32
5.6. Derin Çekmede Kullanılan Saclar	37
6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	38
6.1. Çalışmanın Amacı	38
6.2. Deney Malzemesi	38
6.3. Deney Numunelerinin Hazırlanması	38
6.4. Kalıp Tasarımı ve İmalatı	39
6.5. Deney Çalışmaları İçin Kullanılan İşlem Parametreleri	42

6.6. Kalınlık Değişiminin Belirlenmesi	45
7. DENEY SONUÇLARI	46
7.1. Matris Yüzey Açısı Değişiminin Limit Çekme Oranı Üzerine Etkisi.....	46
7.2. Matris Açısı İle Baskı Plakası Kuvvetinin Zımba Kuvvetine Etkisi	52
7.3. Baskı Plakası Kuvveti Değişiminin Derin Çekilebilirliğe Etkileri.....	53
7.4. Et Kalınlığı Değişiminin Belirlenmesi	54
8. GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	56
KAYNAKLAR.....	57

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa No:

Şekil 2.1	Kristal kafes, birim kristal kafes ve kafes sabiti.....	6
Şekil.2.2	Metallerde genelde rastlanan birim kafes tipleri; a. Hacim merkezli kübik. b. Yüzey merkezli kübik. c. Sıkı düzenli hekzagonal.	6
Şekil 2.3	Kristalde şekil değişimi; a. Şekil değiştirmemiş kristal. b. Kayma. c. İkizlenme.	8
Şekil 2.4	Kenar dislokasyonunun yapısı. a. Kenar dislokasyonunun atom düzlemleri ile gösterimi. b. Kenar dislokasyonu modeli; kuvvet etkisi altında kristalin kayan üst bölgesinde ortaya çıkan fazladan atom tabakası.....	9
Şekil 2.5	Vida dislokasyonunun yapısı. a. Kristal içerisindeki vida dislokasyonu (EF boyunca), b. Kristal yüzeyindeki B noktasında son bulan AB vida dislokasyonu.	10
Şekil 2.6	Elektron mikroskobu yardımıyla görüntülenen dislokasyon hatları. (Resimdeki malzeme paslanmaz çeliktir.)	10
Şekil 2.7	Dislokasyon hareketleri nedeniyle kayma gerilmesine maruz bir kristalin yüzeyinde basamak oluşumu; a. Kenar dislokasyonu, b. Vida dislokasyonu.	11
Şekil 2.8	$n < 1$ İçin çizilen $\sigma = K \cdot \epsilon^n$ eğrisi. Bu eğri, elastik davranış göstermeyen ve belirgin bir akma sınırına sahip olmayan malzemeleri sembolize eder [37].	12
Şekil 2.9	Logaritmik koordinatlarda muhtelif metalik malzemeler için çizilen gerçek çekme diyagramları yardımıyla pekleşme üssü, n 'nin sayısal olarak ifade edilmesi [50].	12
Şekil 3.1	Rijit Cisim.	14
Şekil 3.2	Lineer Tam Plastik Cisim.	14
Şekil 3.3	Plastik Cisim.	14
Şekil 3.4	Elastik Cisim.	14
Şekil 3.5	Elastik, Tam Plastik Cisim.	15
Şekil 3.6	Rijit, Lineer Sertleşen Cisim.	15
Şekil 3.7	Elastik, Lineer Sertleşen Cisim.	15
Şekil 4.1	Kalıpcılık Çeşitleri.	17
Şekil 4.2	Sıkıştırma Kalıbı.	18
Şekil 4.3	Enjeksiyon Kalıbı.	18
Şekil 4.4	Dövme Kalıbı.	19
Şekil 4.5	Kesme Kalıbı.	20
Şekil 4.6	Bükme Kalıbı.	20
Şekil 5.1	Derin çekme işlemi, a. Şematik, b. Perspektif.	21
Şekil 5.2	Karmaşık şekilli bir levhadan yuvarlak köşeli bir kutunun çekilmesi.	22
Şekil 5.3	Dairesel iş parçasında karakteristik üçgenin elde edilmesi.	23
Şekil 5.4	Silindirik çekme ile elde edilen farklı özellikteki malzemelerden imal edilen kaplarda, yetersiz baskı plakası kuvveti sonucu kulak oluşumu.	24
Şekil 5.5	Baskı plakası kullanılmadan gerçekleştirilen derin çekme işleminde flanş bölgesinde ortaya çıkacak gerilmeler, [45].	24
Şekil 5.6	Baskı plakasız çekme [59].	25
Şekil 5.7	Baskı plakası kullanılarak yapılan çekme işleminin temel elemanları.	25
Şekil 5.8	Silindirik iş parçasında limit çekme oranının aşılması sonucu ortaya çıkan hasar [45].	26
Şekil 5.9	Sac malzemede anizotropinin tespit edilmesi; a. Metalik sac levhada anizotropinin oluşumu. b. Belirli bir referans eksenine göre ölçülen mekanik özelliklerin haddelme yönüne göre değişimi. c. Anizotropinin malzeme özelliklerine olan etkisinin çekme deneyi numunesinde ortaya çıkacak boyutsal	

değişimler yardımıyla belirlenmesi. d. Ortalama anizotropi değerinin hesaplanmasında kullanılan muhtelif doğrultular [49].	27
Şekil 5.10 Üç Farklı sac malzemeden derin çekilerek elde edilen iş parçalarında meydana gelen kulaklanma.	28
Şekil 5.11 Derin çekme işleminde iş parçasına etki eden kuvvetler.	29
Şekil 5.12 Çekme başlangıcında iş parçasının durumu; Sıkıştırma kalıbı (baskı plakası), Matris.	29
Şekil 5.13 Derin çekme işlemi boyunca kalınlık değişiminin seyri [55].	30
Şekil 5.14 Farklı geometrilere sahip zımbalarla yapılan derin çekme işleminde malzeme cidarında oluşacak kalınlık değişimlerinin karşılaştırılması [55].	31
Şekil 5.15 Çekilerek imal edilmiş silindirik bir kapta cidar kalınlıklarının değişimi (Başlangıç malzeme kalınlığı $S=1(\text{mm})$, $d=12(\text{mm})$, $d_1=22(\text{mm})$, $h=21(\text{mm})$) [43].	31
Şekil 5.16 Derin çekme esnasında meydana gelen gerilmeler [58].	32
Şekil 5.17 Meşrubat kutusunun imalatı.	33
Şekil 5.18 Çekme oranı büyük olan bir parçanın kademeli kalıplama ile imalatı [58].	34
Şekil 5.19 Çekme kademelerinin hesaplanması.	35
Şekil 5.20 Derin çekilecek parça.	36
Şekil 6.1 Deneylerde Kullanılankalıp Matrisleri (Dişi Kalıplar)	39
Şekil 6.2 Matris ve zımba yarıçapı $R=6\text{ mm}$ için, a) Matris ve baskı plakası açısı $\alpha=0^\circ$ b) Matris ve baskı plakası açısı $\alpha=2,5^\circ$, c) Matris ve baskı plakası açısı $\alpha=5^\circ$ d) Matris ve baskı plakası açısı $\alpha=7,5^\circ$, e) Matris ve baskı plakası açısı $\alpha=10^\circ$ f) Matris ve baskı plakası açısı $\alpha=12,5^\circ$, g) Matris ve baskı plakası açısı $\alpha=15^\circ$	40-41
Şekil 6.3 Kalıp ölçüleri.	42
Şekil 6.4 Deneylerin yapıldığı hidrolik pres ve deney seti.	44
Şekil 6.5 Hidrolik pres ve kalıp setinin şematik gösterimi.	44
Şekil 6.6 Sac kalınlığının ölçüldüğü bölgeler.	45
Şekil 6.7 Sac kalınlığının ölçülmesi.	45
Şekil 7.1 Limit Çekme Oranının (L.Ç.O.) İfadesi.	46
Şekil 7.2 Çekme oranının büyük olmasından dolayı parçada meydana gelen yırtılma.	46
Şekil 7.3 Baskı plakası kuvvetinin fazla olduğu durumlarda meydana gelen kopma ve kırılmalar.	47
Şekil 7.4 0° 'lik kalıpta elde edilebilen optimum iş parçası.	47
Şekil 7.5 $2,5^\circ$ 'lik kalıpta elde edilebilen optimum iş parçası.	48
Şekil 7.6 5° 'lik kalıpta elde edilebilen optimum iş parçası.	48
Şekil 7.7 $7,5^\circ$ 'lik kalıpta elde edilebilen optimum iş parçası.	49
Şekil 7.8 10° 'lik kalıpta elde edilebilen optimum iş parçası.	49
Şekil 7.9 $12,5^\circ$ 'lik kalıpta elde edilebilen optimum iş parçası.	50
Şekil 7.10 15° 'lik kalıpta elde edilebilen optimum iş parçası.	50
Şekil 7.11 Kalıp açısı değişimiyle elde edilen optimum deney numuneleri.	51
Şekil 7.12 Kalıp açısı değişiminin çekme oranına etkisi.	51
Şekil 7.13 Matris Açısını zımba kuvveti üzerine etkisi.	52
Şekil 7.14 Kalıp açısı (α) değişiminin, baskı plakası kuvvetine etkisi.	53
Şekil 7.15 Deney sonuçlarındaki matris açısına göre optimum deney numunelerinin et kalınlığı değişimi.	55

TABLULAR LİSTESİ

Sayfa No:

Tablo 6.1 Deney numunelerinin kimyasal spektral analizi.....	38
Tablo 6.2 Çekme oranı (β)'ya bağlı olarak sac çapları.....	39
Tablo 6.3 Kalıp açısı (α) değerleri.....	39
Tablo 6.4 Deneyler esnasında kullanılan baskı plakası kuvvetleri.....	42
Tablo 6.5 Derin çekme deneylerinde kullanılan deney numuneleri ve işlem parametreleri.....	43
Tablo 7.1 Matris açısına göre optimum deney numunesinin kalınlık değişimi.....	54

KISALTMALAR

BPK	: Baskı plakası kuvveti (N)
L.Ç.O.	: Limit çekme oranı
R	: Anizotropi katsayısı
ε_w	: Genişlik değişimi
ε_t	: Kalınlık değişimi
α	: Kalıp açısı (°)
β	: Çekme oranı
m	: Çekme modülü

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

MATRİS AÇILI DERİN ÇEKME KALIPLARINDA ALÜMİNYUMUN DERİN ÇEKİLMESİNDE AÇI DEĞİŞİMİNİN ÇEKME ORANI ÜZERİNE ETKİSİNİN DENEYSEL ARAŞTIRILMASI

Faruk AYTAÇ

Fırat Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Eğitimi Anabilim Dalı

2007, Sayfa : 59

Sac metal şekillendirme yöntemlerinden biri olan derin çekme metodu endüstride sıkça kullanılmaktadır. Meşrubat ve parfüm kutuları, tencereler, tüpler v.b. ürünler derin çekme metoduyla üretilmektedir. Bu nedenle derin çekme metodunu geliştirmek için çeşitli araştırmalar yapılmaktadır.

Bu çalışmada geleneksel derin çekme metoduna farklı bir yaklaşım getirilerek matris ve baskı plakası yüzeylerine açı verilmiştir. Bu çalışmanın asıl amacı kalıp açısı değişiminin, ülkemiz sanayisinde yoğun bir şekilde kullanılan Alüminyum sacının derin çekilebilirliğine etkilerini araştırmaktır. Saca dört farklı baskı plakası kuvveti uygulanarak baskı plakası kuvveti değişiminin derin çekilebilirliğe etkileri de incelenmiştir.

Derin çekme plastik şekil verme yöntemlerinden biri olduğundan dolayı, bu tezin ilk bölümlerinde, plastik şekil değişimi üzerinde durulmuştur. Ayrıca kalıpcılık hakkında kısa bir bilgi verilip derin çekme işlemi açıklanmıştır.

Sonuç olarak, matris ve baskı plakası yüzeylerine açı verilerek limit çekme oranının artırılabilirdiği görülmüştür. Ayrıca derin çekme esnasında ondülasyon meydana gelmeden sacın akışını kontrol edebilecek baskı plakası kuvvetinin de büyük oranda azaldığı tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler : Derin çekme, Limit çekme oranı, Baskı plakası kuvveti , Matris

ABSTRACT

Master Thesis

INVESTIGATION OF EFFECTS OF ANGLE VARIATION ON THE DRAWING RATIO IN DEEP DRAWING MOLD WITH MATRIS ANGLE ON THE DEEP DRAWING OF THE ALUMINUM

Faruk AYTAÇ

Firat University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Education

2007, Page : 59

Deep drawing is one of the most important methods forming of the sheet metal has been used frequently in industry. Saucepans, beverage and perfume cans, tubes etc. products have been manufactured via deep drawing method. For this reason, a lot of research are being carried out for improve the deep drawing.

In this study, we gave various angles on the die and blank holder surfaces. The main objective of this study, determine of affects of die-blank holder angle variations on the Aluminum sheet which using intensively at our country's industry. Four different blank holder forces applied on the sheet and affects of blank holder force variation on the deep drawability of Aluminum sheet investigated.

Because of deep drawing is one of the plastic deformation methods, at the first stage of thesis, plastic deformation was explained. In addition, some information was given about molding. Later deep drawing method was explained.

Consequently, with giving some angle on the die-blank holder surfaces, limit drawing ratio can be increased and blank holder force which get under control of sheet flow, have been decreased on a large scale.

Keywords: Deep drawing, Limit drawing ratio, Die, Blank holder force

1.GİRİŞ

Sac metal kalıpcılığı tekniğinde parçalar ya kesilmekte ya da biçimlendirilmekte veya aynı işlemde biçimlendirilip, kesilmektedir. Şekillendirilmelerin endüstride en yaygın kullanımı çekme ile şekillendirmedir. Genellikle çekme ile şekillendirmelerde, düz levha durumundaki malzemelerden, içi boş dikişsiz kap veya farklı geometrik şekillere sahip boş kutular elde edilmektedir. Çekilen kabın yüksekliği dikkate alınarak çekme işlemleri, sıg ve derin çekme olarak iki grupta yapılmaktadır. Sıg çekmede tek bir çekme işlemiyle iş parçası elde edilebilmekte iken, derin çekme işleminde birden fazla çekme işlemiyle kaplar elde edilebilmektedir. Bu nedenle çekme işlemi kalıplama tekniğinde en yaygın metotların başında gelmektedir.

İki boyutlu, düzlemsel geometriye sahip iş parçalarının çekme kalıbı denilen elamanlar yardımıyla ve bir zımba vasıtasıyla preste çöktürülmesi yada bir başka ifade ile, iş parçasının çekme kalıbı içine sıvanması sonucunda belirli derinlik ve profillere sahip üç boyutlu parçalar elde edilmesi işlemine pres tekniğinde çekme adı verilir. Bir sacın bir kalıpta bir defada çekilebileceği en büyük çapın zımba çapına oranına limit çekme oranı denir. Çekme yardımıyla elde edilmesi öngörülen derin kaplar birden fazla operasyon ile de oluşturulabilirler. Birbirini takip eden çok sayıda çekme işleminden oluşan imal yöntemi derin çekme adını almaktadır.

Günümüzde teknolojinin hızla gelişmesi, araştırmacıları dar sınırlı olan malzeme kaynaklarını daha verimli ve optimum bir biçimde kullanılması ve değerlendirilmesi konusunda yoğun araştırmalara sevk etmektedir. Mevcut malzemelerden daha verimli bir şekilde yararlanmamız günümüz teknolojiyle yeni birçok malzemeler geliştirilmektedir.

Sac metal şekillendirme, günümüzde pek çok uygulama alanı bulduğundan büyük önem arz etmektedir. Saclar çok hassas malzemeler olduğu için şekillendireceğimiz sacların şekil alabilirliğini iyi tanımak, buna göre malzeme seçimi yapmamız gerekir.

Derin çekmede şekillendirilen parçaların kalitesi, kalıp boşluğu içine çekilen metalin miktarı ile etkilenmektedir. Aşırı metal çekildiğinde iş parçası üzerinde kırışıklıklar, az metal çekildiğinde ise iş parçası üzerinde çatlaklıklar meydana gelmektedir. Burada önemli olan malzemenin kalıp içerisine akma miktarını kalıplama baskı kuvvetiyle kontrol edebilmektedir. Ayrıca çekilen parçaların çatlamalarını, bozulmalarını veya oluşacak ondülasyonlarını önlemek için çekme kalıplarının büyük bir kısmı hidromekanik olarak yapılmaktadır. Bunun amacı ise baskı kuvvetini dengeleyerek çekilen parça üzerindeki ters bir hidrolik kuvvet ile azaltmaktır. Bu yöntemle maliyeti arttırmaktadır. Derin çekme işlemlerinde baskı kuvvetinin yanında, zımba radyüsleri, matris radyüsleri, zımba kuvveti, çekilecek malzemenin ilkel şekli ve hadde yönü gibi birçok faktör vardır. Literatürler incelendiğinde bu faktörlerin birçoğu sonlu elamanlar yöntemiyle analiz edilerek bir optimumu geliştirilmiştir.

Bir malzemenin derin çekebilir olup olmadığının tespit edilebilmesi, yada bu özelliğe sahip olduğu bilinen malzemelerle yapılacak imalatın mümkün mertebe firesiz biçimde gerçekleştirilebilmesi için, kullanılacak malzemenin kimyasal bileşiminin iyi bilinmesi, temel mekanik özelliklerin imalat öncesinde ve sonrasında tespit edilmesi, gerekiyorsa ısıtılma işlemi gibi bazı ilave uygulamalarla imalata uygun şekilde optimize edilmesi gerekir. Ayrıca bu optimizasyon, uygun şekilde seçilecek çekme takımı geometrisi, basınç kuvveti, kademe sayısı gibi muhtelif faktörlerle desteklenmelidir.

Ancak çekme işlemini etkileyen en önemli faktörlerin başında gelen, malzemenin matris içine akışının kontrol edilebilirliği halen geliştirilmektedir. Bu nedenle malzeme akış kontrolünün ve akış şeklinin araştırılması önemli yer tutmaktadır.

1.1.LİTARATÜR ARAŞTIRILMASI

Literatürdeki makalelerde; Mona Öqvist çalışmasının da çelik bir yüzeyin dairesel çelik silindiri ile aşınmasının sayısal simülasyonlarını sonlu elemanlar programı NİKE2D özel versiyonu ile gerçekleştirmiştir. Simülasyonları adım adım ve yüzey parametresini değiştirerek ve sürtünme mesafesinin yeniden hesaplanması ile elde etmiştir. [1]

M.Eriksen çalışmasında standart derin çekme yöntemlerinde kalıp kenar geometrisinin max. aşınmasını ve kalıp kenarına doğru aşınma dağılımına nasıl etki ettiğini sayısal simülasyonla göstermiştir. Bu çalışma göstermiş ki max. aşınma kalıp geometrisine bağlı olduğunu göstermiştir.[2]

C. Boher, D. Attaf, L. Penazzi, C. Levaillant ortak çalışmalarında derin çekme yönteminde kalıp radyüsü kısmındaki aşınmaları incelemişlerdir. Derin çekme yöntemi simülasyonuna bağlı olarak mekanik özelliklerle ilgili kalıp radyüsünün sürtünme katsayısı modellemişler ve bu modelle kalıp radyüsündeki bozulma ile sürtünme katsayısı arasındaki ilişkiyi açıklamışlardır.[3]

Tung-Sheng Yang ortak çalışmalarında derin çekme yönteminde tüm yağ tabakası için bir analitik model geliştirmişlerdir. Deneylerinde iki tip kalın ve ince yağlama yaparak FEM de gerilme analizlerini araştırmışlardır.[4]

S. Thiruvardhulan, F.W. Travis, T. K. Poh ortak çalışmalarında 180 mm çapındaki sacdan 100 mm çapında çekme kabı oluşturmak için zımba ve sıyrıcı plakanın orantılı basınç kuvvetleri geliştirmişlerdir. Çalışmalarında bakır ve alüminyum numuneler kullanmışlardır. Bu deneylerinde zımba ve sıyrıcı plaka kuvvetleri zımbanın inme hızına göre ölçüp hesaplamışlardır. [5]

S.H. Zhang, L.H. Lang, D.C. Kang, J. Danckert, K.B. Nielsen ortak çalışmalarında derin çekmede meydana gelen ondülasyonların nedenlerini araştırmışlardır ve daire basıncı ve baskı plaka kuvvetinin iş parçası üzerine etkisini sonlu elemanlar metoduyla açıklamışlardır. [6]

H. Takuda, K. Mori, I. Masuda, Y. Abe, M. Matsuo ortak çalışmalarında alüminyum alaşımlı levhanın sıcaklığını yükselterek rijit-plastik gibi derin çekmede sonlu elemanlar metodu ile ısı

iletimini, sıcaklık değişimini ve deformasyonunu incelemişlerdir. Çekme oranı limitini kalıp profil radyüsü ile sıcaklığı arttırarak çok iyi sayısal deneysel sonuçlar almışlardır. [7]

H. Takuda, K. Mori, T. Masachika, E. Yamazaki, Y. Watanabe ortak çalışmalarında 304 çeliklere farklı sıcaklıkta derin çekme işlemi yaparak hangi sıcaklıkta daha iyi sonuç alındığını sonlu elemanlar yöntemiyle araştırılmıştır. [8]

S. Thiruvardhulan, F.W. Travis ortak çalışmalarında zımba radyüslerinin çekme oranına etkisini çeşitli tipte derin çekme işlemi yaparak araştırmışlar ve zımba radyüsünün çekme oranına etkisinin olduğunu göstermişlerdir. [9]

M.T. Browne, M.T. Hillery ortak çalışmalarında derin çekme yapılacak malzemeye zımba hareketinin (hızının) etkisi araştırılmışlar, zımba hareketinin malzeme yüzeyindeki basınç değerini değiştirdiğini ve optimum ilerlemeyi sonlu elemanlar metoduyla bulmuşlardır. [10].

Manabu Gotoh, Young-soo Kim, Minoru Yamashita ortak çalışmalarında zımba çaplarının derin çekmede derinliğine etkisini araştırmışlardır. [11]

Gotoh, M. ve arkadaşları 0.2mm~1mm kalınlığındaki alüminyum, bakır, pirinç, yumuşak çelik, paslanmaz çelik gibi çeşitli sacların derin çekilmesinde kalıp radyüsünün etkisini araştırmışlardır. Sonuçta matris radyüsünün küçüldükçe çekme derinliğinin arttığı tespit edilmiştir. [12]

Colgan, M. ve Monaghan, J. zımba ve matris radyüsleri, zımba hızı, baskı plakası kuvveti ve sürtünme katsayısı gibi çeşitli parametrelerin derin çekmeye etkilerini araştırmak için çeşitli deneyler ve sonlu eleman analizleri yapmışlardır. Yapılan deney ve analiz sonuçlarına göre derin çekmede zımba ve matris radyüslerinin baskı plakası kuvveti ve sürtünmeden daha etkili olduğu görülmüştür. Kalıp radyüsü küçüldükçe sacı deformasyona uğratmak için gerekli olan zımba kuvvetinin de küçüldüğü tespit edilmiştir. [13]

Kampu, Z. ve Balic, J. lazer ve MIG kaynaklı sacların baskı plakası kullanılmadan derin çekilebilirliğini araştırmışlardır. Deneyler sonucunda MIG kaynaklı sacların lazer kaynaklı saclardan daha iyi çekilebildiği belirlenip çekme oranı 2,5'e kadar olan saclar başarı ile çekilmiştir. [14]

Mamalis, A. G. ve arkadaşları yapmış oldukları çalışmada ise silindirik parçaların sonlu eleman simülasyonunu yapmışlardır. [15]

Zang, S.H. ve arkadaşları yumuşak çeliklerin hidromekanik derin çekilmesini deneysel ve sayısal olarak araştırmışlardır. Ayrıca parçaların şekil ve kalınlık değişimleri belirlenip anizotropinin etkisi incelenmiştir. Hidrolik basınç kullanılarak yumuşak çeliklerin çekme oranı 2,5'a kadar çıkarılmıştır. [16]

Zang, X. M. ve Li, S.Y. derin çekme işleminde yapı değişimini göz önünde tutarak kulaklanma oluşumunu incelemişlerdir. [17]

Crane'nin analizinde üç farklı çaptaki sac çekilmiştir. Çekme işleminde önce 15° açılı iki düz doğru çizildi. Daha sonra dağılmayan iki doru kabuğunun alt kısmı elde edildi. Duvarın içinde sıkıştırma gerilmesinden dolayı paralel flanşa sac çekildikçe çizgiler birbirlerine yaklaşmıştır. [18]

Sac kalınlığının zımba veya matris radyüsünden çok küçük olduğundan dolayı gerilme dağılımı analizinde eğme gerilmelerinin etkileri ihmal edilmektedir. Bununla birlikte Wilson ve Hsu tarafından yapılan analizde eğilmenin yağlama üzerinde önemli bir etkisi olduğu ifade etmişlerdir. [19]

Bilgisayar tekniklerindeki gelişmelerden dolayı derin çekme analizinde bilgisayarlar da kullanılmaktadır. Sonlu farklar metodu kullanılarak dairesel sacın derin çekilmesinin analitik ve sayısal çözümü Kaftanoğlu tarafından yapılmıştır.[20]

Kare derin çekmede, istenilen çekme derinliğine ulaşılmasını engelleyen en önemli faktörlerden birisi, taslak malzemenin büyüklüğü ile ilgili olan ve taslak malzeme kenarının (çapının) zımba kenarına oranı olarak tanımlanan çekme oranı limitidir [21].

Çekme oranı limiti, sac malzemelerin çekilebilirliklerinin değerlendirilmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır [22].

Bu oran, taslak malzeme büyüklüğünün artması ile artar. Bu sebeple, tek operasyonlu çekme işlemlerinde istenilen çekme derinliğine ulaşılmasında çekme oranı limiti göz önünde bulundurulması gereken en önemli faktördür. Kare derin çekmede, çeşitli malzemelerin verilen takım geometrisine göre çekme oranı limitlerinin belirlenmesi ve artırılması için bir çok çalışmalar yapılmıştır [22-26].

Bunlardan en dikkat çeken Chung ve Swift tarafından yapılan çalışmadır. Onların çalışmasında, değişik çekme şartlarında yapılan deneylerde derin çekme işlemleri için teorik ve pratik güvenilir referans veriler oluşturulmuş ve birbiri ile karşılaştırılmıştır. Test edilen parametreler malzemeyi tutma, çekme oranı, zımba ve kalıp profil radyüsü, zımba-kalıp boşluğu ve malzeme kalınlığıdır. [27]

2. METALLERDE PLASTİK ŞEKİL DEĞİŞİMİ

2.1. Giriş

Katı fazdaki bir cismin biçiminin dış kuvvetler etkisi ile cismi oluşturan malzemede herhangi bir kütsel ya da bileşimsel farklılaşmaya yol açmaksızın ve kalıcı olarak değışmesi olayına plastik şekil değışimi adı verilmektedir [28].

Demir esaslı malzemelerin yanı sıra bakır, çinko, alüminyum gibi demir dışı metaller ile bunların alaşımlarını plastik deformasyon yöntemlerini kullanarak şekillendirmek de mümkündür.

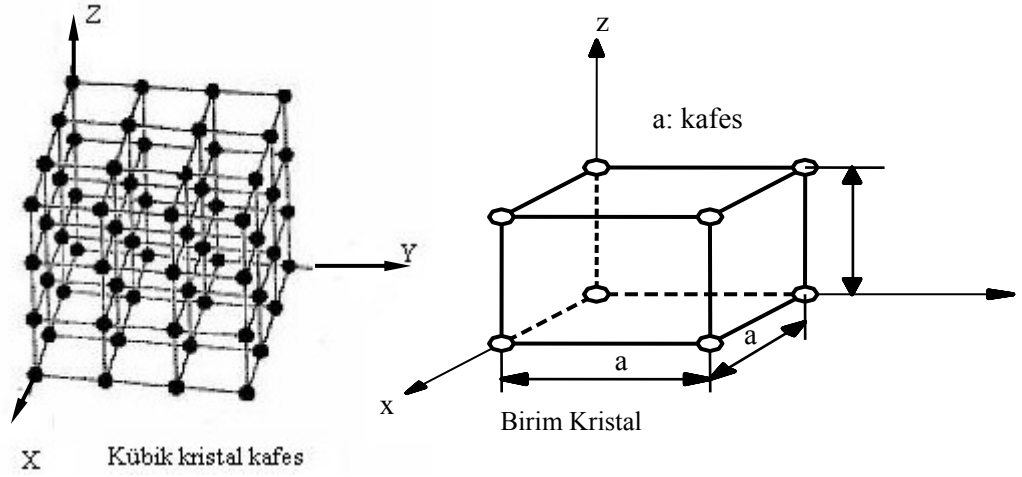
Derin çekme işlemi de, temel prensibi malzemenin plastik şekillendirilmesine dayanan bir yöntemdir. Dolayısıyla, bu işlemin tam olarak anlaşılabilmesi için öncelikle metallerdeki kalıcı şekil değışimini meydana getiren mekanizmalar yeterince tanınmalıdır. Bu nedenle bu bölümde, metallere plastik şekillendirilebilirlik özelliğı kazandıran temel fiziksel içyapı özellikleri üzerinde durulacaktır.

2.2. Metallerin Fiziksel Yapıları Ve Plastik Deformasyon

2.2.1. Metallerin Kristal Kafes Yapıları

Metalik özellikteki malzemeler atomik düzeyde incelenecek olduğunda, bunları oluşturan atomların üç boyutlu uzayda belirli bir düzene göre yerleştikleri görülür. Metalin katılaşması esnasında ortaya çıkan ve malzeme açısından karakteristik özelliğı sahip böylesi yapılara kristal kafes, kafes geometrisini teşkil eden atomlar arası uzaklığı ise kafes sabiti adı verilmektedir. Kristal kafesi meydana getiren bütün atomlar arasında, kafesin biçimini korumaya olanak sağlayacak şekilde dengede bulunan itme ve çekme kuvvetleri mevcuttur. Atomlar arasında söz konusu olabilecek maksimum uzaklık ise, boyut açısından kafes sabiti düzeyindedir [28].

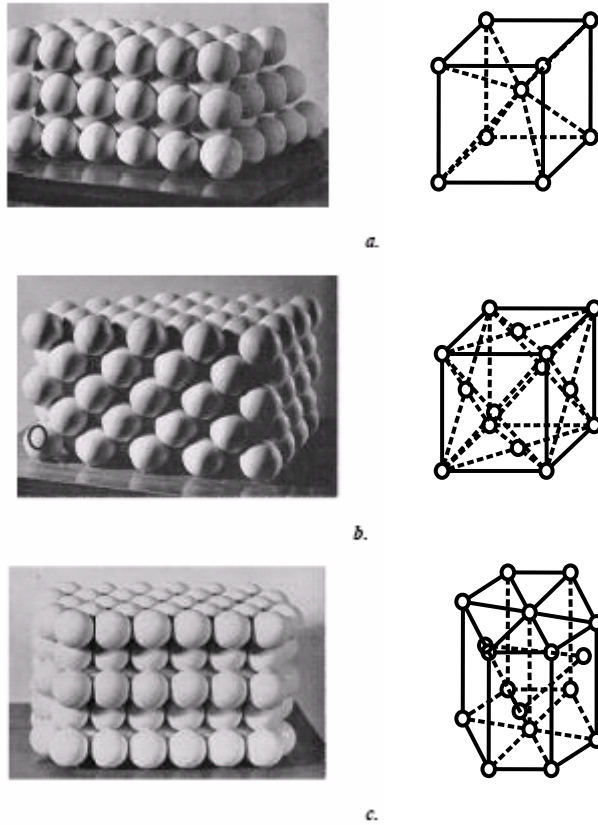
Kristal kafesler, tamamen aynı biçimsel özelliklere sahip basit geometrili pek çok alt atom grubunun üç boyutlu olarak dizilmesinden oluşur [30]. Bundan dolayı kafeslerin sınıflandırılması, daha temel bir kavram olan ve birim kafes olarak adlandırılan bu alt gruplara göre yapılmaktadır. (Şekil 2.1, [31]).



Şekil 2.1 Kristal kafes, birim kristal kafes ve kafes sabiti.

Metallerin yapısında genel olarak üç farklı birim kafes tipine rastlanır. Bunlar;

- Hacim Merkezli Kübik (HMK),
- Yüzey Merkezli Kübik (YMK) ve
- Sıkı Düzenli (Paketli) Hekzagonal (SDH), olarak adlandırılmaktadırlar [30].



Şekil.2.2 Metallerde genelde rastlanan birim kafes tipleri; a.Hacim merkezli kübik. b.Yüzey merkezli kübik. c. Sıkı düzenli hekzagonal.

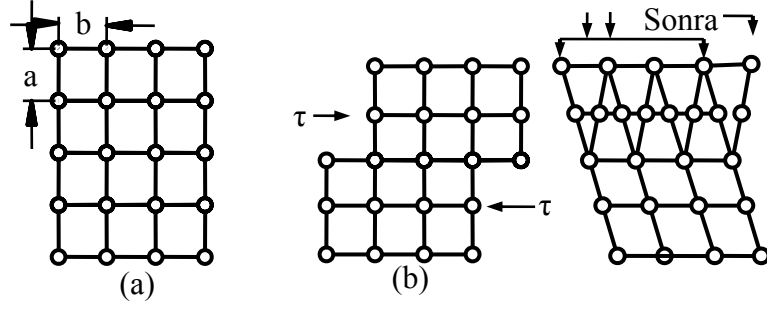
Hacim merkezli kafes, birim kübik hücrenin köşelerinde ve merkezinde yer alan birer atomdan meydana gelmektedir. Küp köşelerinde ve yüzeylerinde birer atom bulunması halinde, yüzey merkezli kübik kafes sistemi ortaya çıkar. Sıkı düzenli hekzagonal kafeste ise, hücrenin altıgen geometriye sahip alt ve üst yüzlerinde yedişer, iç bölgesinde ise üç adet atom bulunur (Şekil 2.2) [32].

2.2.2. Kristallerin Şekil Değişimi

Günümüzde yaygın olarak kullanılan ve esası, malzemenin kalıcı olarak şekillendirilmesine dayanan imal usullerinin uygulamalarında olduğu gibi, metalik yapıdaki bir iş parçasının biçimini, malzemenin maddesel sürekliliğini bozmaksızın değiştirmek mümkündür. Ancak şekil verme işlemi sırasında bu sürekliliği koruyabilmek için, malzemeyi meydana getiren atomlar arasındaki atomik bağ süreklilik göstermelidir. Bu bağ ise atomlar arası uzaklığın bir fonksiyonudur. Zira şekil değişimini gerçekleştirmek üzere cisme uygulanan kuvvet, bu uzaklığı maksimum kafes sabitinin yarısından daha fazla arttıracak olursa, atomik bağ oluşturulan çekme kuvvetinde ani ve şiddetli bir düşüş ortaya çıkarak malzeme sürekliliği ortadan kalkar; iş parçasında çatlak oluşur. Bu nedenle şekil değiştirme sırasında atomların birbirlerinden ayrılmaması, kristal kafesin de bozulmaması gerekir [29].

Metal malzemelerde şekil değişimi, kayma düzlemi adı verilen bir kristal düzleminin diğeri üzerinde belirli bir kayma doğrultusunda ötelenmesi sonucu ortaya çıkar. Bir başka deyişle, şekil değişimini meydana getiren unsur, kristal kafeslerin birbirine göre hareket etmesidir [33]. Kayma adı verilen bu olaya bağlı olarak meydana gelen deformasyon kararlı karakteristiğe sahiptir. Zira, kaymayı oluşturan gerilme ortadan kaldırıldığında kristal artık eski şeklini alamaz. Kayma olayında, kayma doğrultusundaki ötelemenin miktarı atomlar arası uzaklığın tam katı olarak verilir [34].

Kayma haricinde, kristal yapılarda şekil değişimi oluşturan ve temeli yine kristal hareketlerine dayanan ikinci bir mekanizma daha mevcuttur. İkizlenme adı verilen bu olay, darbeli yükleme veya buna benzer nedenlerle, kaymanın zorlaştığı durumlarda ortaya çıkar. İkizlenme, şekil değişiminden sonra kristalin iki bölgesinin, ikizlenme düzlemi denilen bir kristal düzlemine göre simetri göstermesi şeklinde tanımlanır [35].



Şekil 2.3 Kristalde şekil değişimi; a. Şekil değiştirmemiş kristal. b. Kayma. c. İkizlenme.

Kristal yapısında kaymayı meydana getiren temel unsur kayma gerilmesidir. Kayma gerilmesinin kayma olayını başlatabilmesi için, kristale etkiyen dış kuvvetin kayma düzleminde ve kayma doğrultusunda oluşturacağı gerilme belirli bir sınır değerden büyük olmalıdır. Bu değer ise, Şekil 2,3'de a ve b ile sembolize edilen kafes parametreleri arasındaki orana bağlıdır [28].

Burada verilen modelde kayma düzlemlerinin yatayda olduğu kabul edilecek olursa iki komşu atom düzlemi arasındaki uzaklığı temsil ederken b değeri de bu düzlemlerdeki atom yoğunluğu ile ters orantılı sabit bir sayıya tekabül eder. Kural olarak b/a değeri ne kadar küçük olursa, kafesi yatay yönde (şekle göre) deforme etmek için, ya da bir başka deyişle kaymayı meydana getirebilmek için gereken gerilme değeri de o derece az olacaktır. Sonuç olarak kayma, b uzaklığının küçük yani atom yoğunluğunun, dolayısıyla kayma olasılığının yüksek olduğu, kayma düzlemi adı verilen düzlemlerde ortaya çıkar. Düzlem üzerinde kaymanın gerçekleşebileceği doğrultuların ise, yukarıdakine benzer bir mantıkla atomca en zengin doğrultular olduğunu söylemek mümkündür. Bu doğrultular kayma doğrultusu olarak adlandırılır [36]. Bir kayma düzlemi ve bu düzlem üzerinde yer alan bir kayma doğrultusundan oluşan takım, kayma sistemi adını almaktadır.

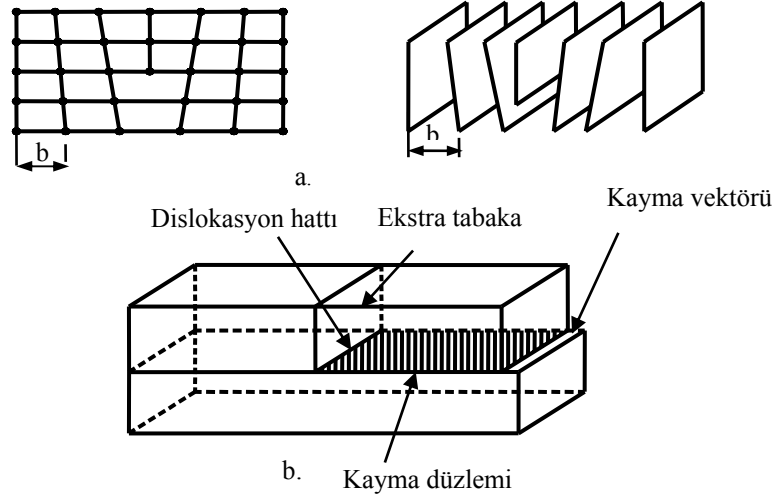
Metalik malzemeler genellikle çok taneli, yani çok kristalli bir yapıda olup, bu yapıyı oluşturan her bir tane eksen farklı doğrultudadır. Kayma esnasında ise bu özellik sebebiyle her tane farklı yöne doğru harekete geçerek birbirlerinin hareketini engellemeye çalışacaktır. Sonuçta, en yüksek şekil alabilirlik özelliği, kristal yapısında en çok kayma olasılığını ihtiva eden kafes tarafından gösterilecektir.

2.3. Kristallerde Meydana Gelen Yapı Hataları

2.3.1. Kristallerde Yapı Hatalarının Sınıflandırılması

Şimdiye kadar, malzemelerin hatasız bir kristal yapıya sahip olduğu varsayıldı. Oysa bir malzemeyi meydana getiren kristaller gerçekte, Şekil 2.2’de verilen modellerde olduğu gibi kusursuz ve eksiksiz değildir. Bunun temel nedeni, metalin katılaşma hızı olarak gösterilmektedir [29]. Zira metal oldukça kısa bir zaman dilimi içerisinde katılaştığından, eriyiği meydana getiren sınırsız sayıdaki atomun ideal kafes içerisinde kendilerine bir yer bulmaları güçleşir. Bunun sonucunda da atomlar kristal kafeslerini kusursuz olarak dolduramazlar; sistem içerisinde ideal kafes yapısından sapmalar meydana gelir. Bu sapmalar, kristal hatası adını almaktadır. Gerçek malzemelerin hemen hemen hepsinde iç yapı hataları bulunur. Bu hatalar;

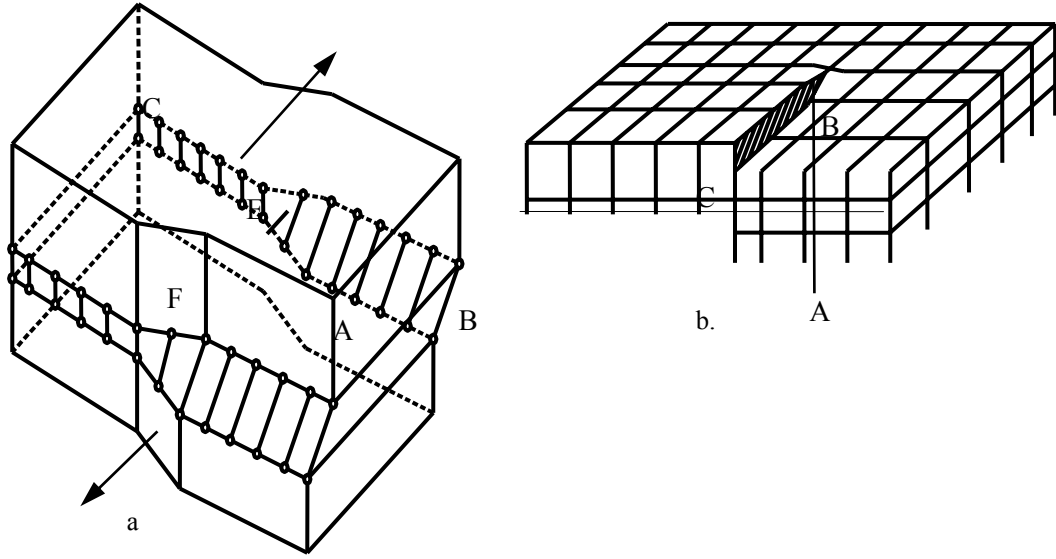
- Noktasal (Sıfır boyutlu; kafes boşlukları),
 - Çizgisel (Tek boyutlu; dislokasyonlar),
 - Yüzeysel (İki boyutlu; tane sınırları),
 - Hacimsel (Üç boyutlu; boşluklar ve kalıntılar)
- olmak üzere dört ayrı grup halinde sınıflandırılırlar.



Şekil 2.4 Kenar dislokasyonunun yapısı. a. Kenar dislokasyonunun atom düzlemleri ile gösterimi. b. Kenar dislokasyonu modeli; kuvvet etkisi altında kristalin kayan üst bölgesinde ortaya çıkan fazladan atom tabakası

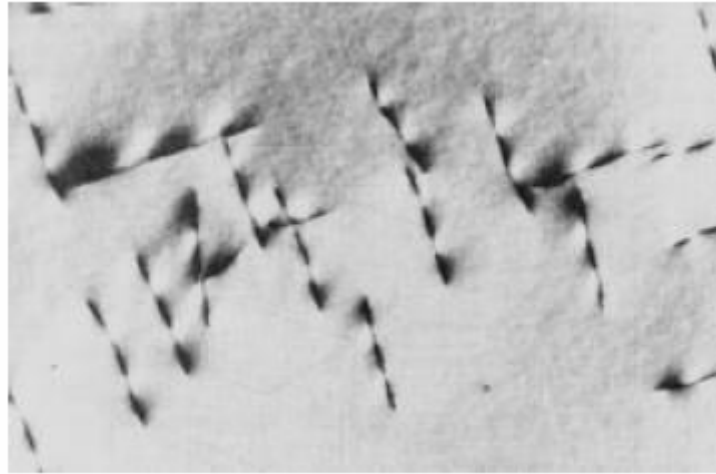
Dislokasyonlar temelde iki farklı şekilde ortaya çıkarlar. Bunlardan kenar dislokasyonu olarak adlandırılan birinci tip, görüntü olarak kristal içinde sona eren bir kafes düzleminin kenarı gibi düşünülebilir [37].

Vida dislokasyonu adı verilen ikinci tipe ise kafes düzlemi, bu düzleme dik olan dislokasyon hattı çevresinde spirale benzer bir şekil alır (Şekil 2.5.b), [38].



Şekil 2.5 Vida dislokasyonunun yapısı. a. Kristal içerisindeki vida dislokasyonu (EF boyunca), b. Kristal yüzeyindeki B noktasında son bulan AB vida dislokasyonu.

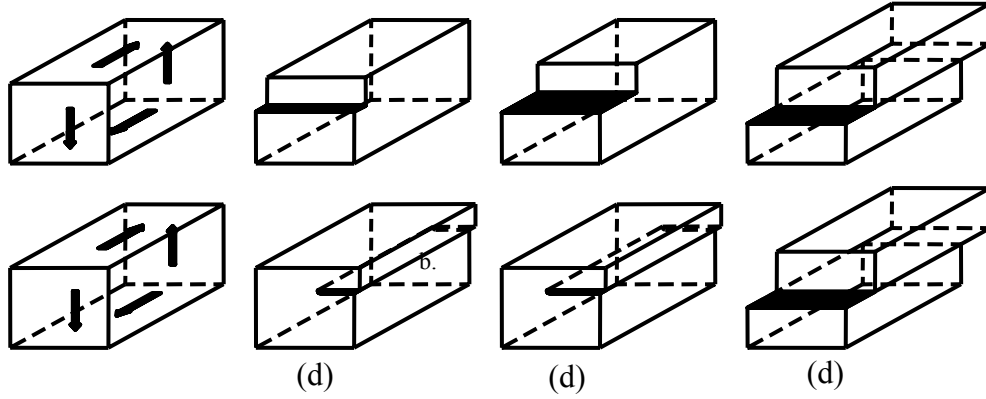
Malzeme içerisindeki çizgisel hata sıklığı, dislokasyon yoğunluğu olarak adlandırılmaktadır. Bu değer birim hacme düşen dislokasyon çizgisi uzunluğu şeklinde de tanımlanmaktadır.



Şekil 2.6 Elektron mikroskobu yardımıyla görüntülenen dislokasyon hatları. (Resimdeki malzeme paslanmaz çeliktir.)

Kayma düzlemi ile birbirinden ayrılmış iki kristal parçasından birinin diğeri üzerinde ve bu kayma düzlemi boyunca atomlar arası uzaklık mertebesinde hareket edebilmesi için, düzlemde bulunan tüm atomlar arası bağların kopması gerekir. Bununla beraber, böyle bir kayma hareketini sağlayabilmek için hesaplanan gerekli iş ve kuvvet ihtiyacının deneysel olarak elde edilen değerlerden çok daha yüksek olduğu görülür. Günümüzde genel olarak kabul gören düşünce, bu farkın temel sebebinin dislokasyonlar olduğu yönündedir. Zira dislokasyon içeren bir kafes sisteminin bir düzleminde kaymayı gerçekleştirebilmek için, yalnızca düzlemdeki birkaç atomun bağını koparabilecek değerdeki bir kuvveti uygulamak yeterli olabilmektedir [33]. Buraya kadar

açıklananların ışığında, dislokasyonların plastik şekil değişiminin esas nedeni olduğunu söylemek mümkündür [28]. Zira metallerdeki plastik şekil değişimi büyük ölçüde dislokasyon hareketleri yardımıyla gerçekleşmektedir (Şekil 2.7).



Şekil 2.7 Dislokasyon hareketleri nedeniyle kayma gerilmesine maruz bir kristalin yüzeyinde basamak oluşumu; a. Kenar dislokasyonu, b. Vida dislokasyonu.

2.3.2. Pekleşme

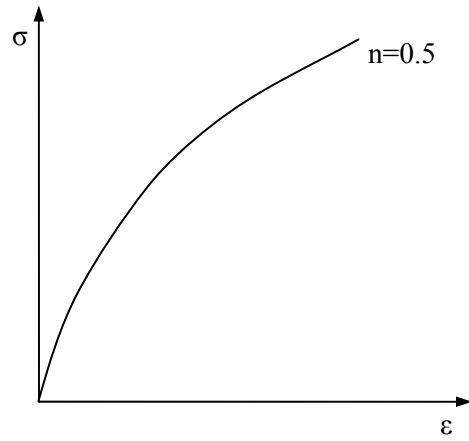
Metallerin rekristalizasyon sıcaklığının altındaki sıcaklık değerlerinde kalıcı olarak şekillendirilmeleri olayına soğuk şekillendirme adı verilir [39]. Malzemelere uygulanan soğuk şekil değiştirme işlemi sırasında, etkiyen dış kuvvetler nedeniyle kristal kafes yapısında kayma, ikizlenme veya bu her iki olay da aynı anda meydana gelebilir. Şekil değiştirme miktarı artırdıkça malzeme mukavemetinin ve sertliğinin de önemli ölçüde arttığı görülür [40]. Buna karşın süneklik azalır ve plastik şekil alabilirlik yeteneği giderek ortadan kalkmaya başlar. Eğer şekil değişimine daha da fazla devam edilecek olursa malzemede hasar meydana gelir. Bir malzemenin soğuk şekil değiştirme sonunda sertleşmesi, şekil değiştirme sertleşmesi ya da pekleşme olarak adlandırılmaktadır. Şekillenme sonucu ortaya çıkan sertleşmenin derecesi, şekil değişimi miktarının yanı sıra malzeme bileşimine de bağlıdır. Zira alaşımlı malzemeler, sahip oldukları yüksek akma sınırı nedeniyle alaşımsız malzemelere nazaran daha fazla sertleşirler [32].

Muhtelif malzemelere ait pekleşme davranışının sayısal olarak tespit edilmesinde en çok kullanılan yöntem çekme deneyidir. Bunun dışında, basma, burma, çökertme gibi deneysel uygulamaların da benzer amaçla kullanılabilir olması karşın, basitliği nedeniyle çekme deneyi, bunlar arasında en fazla tercih edilen konumundadır [39]. Pekleşme davranışının tanımlanması amacıyla, deneysel olarak elde edilen gerilme-uzama eğrilerine karakteristik açısından oldukça yakın bir takım denklemlerden yararlanılmaktadır.

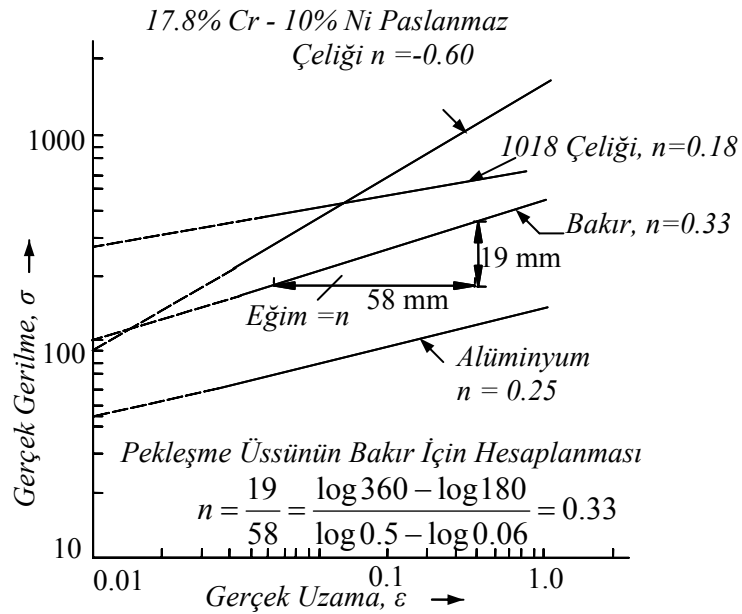
Ludwik tarafından sabit sıcaklık ve sabit şekil değıştirme hızı koşulları için teklif edilen;

$$\sigma = \sigma_0 + K\varepsilon^n \quad (1)$$

bağıntısı bu denklemlerin en sık kullanılanlarındandır. Denklemden verilen σ_0 malzemenin akma sınırını sembolize etmektedir. K ve n ise malzemeyi karakterize eden sabitler olup, K mukavemet katsayısı, n ise pekleşme üssü olarak adlandırılmaktadır [28].



Şekil 2.8 $n < 1$ için çizilen $\sigma = K \cdot \varepsilon^n$ eğrisi. Bu eğri, elastik davranış göstermeyen ve belirgin bir akma sınırına sahip olmayan malzemeleri sembolize eder [28].



Şekil 2.9 Logaritmik koordinatlarda muhtelif metalik malzemeler için çizilen gerçek çekme diyagramları yardımıyla pekleşme üssü, n'nin sayısal olarak ifade edilmesi [41].

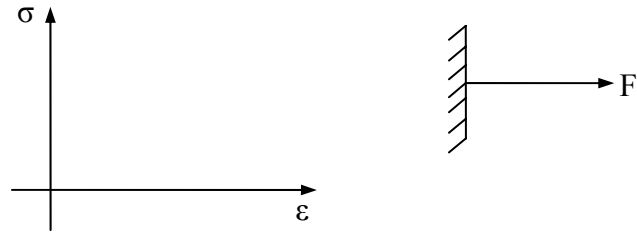
3. PLASTİSİTEDE KULLANILAN MALZEME ÇEŞİTLERİ VE MODELLERİ

Mukavemette malzemenin, bilmemiz gereken, mekanik özelliklerine ait en önemli bilgileri çekme deneyinin sonucu olan gerilme-şekil değiştirme diyagramından elde ederiz. Farklı malzemeler için gerilme-şekil değiştirme diyagramları birbirlerinden çok farklıdırlar. Ayrıca, herhangi bir malzemeye ait diyagramın tümünü kapsayacak basit bir matematik denklem vermek olanağı da mevcut değildir. Diğer taraftan mukavemette yapılan analizin matematik bölümü için fiziksel gerçeklere uyan ve bu arada imkan oranında basit olan bir bağıntıya ihtiyacımız vardır.

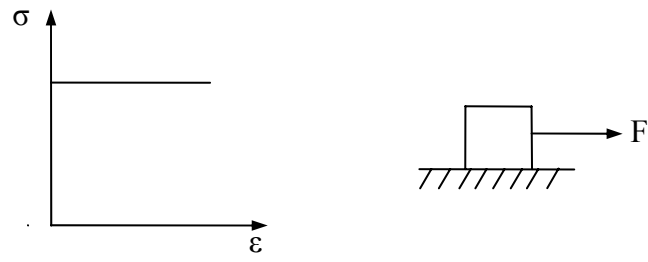
İşte bu gereksinme, deney sonuçlarını amaca göre idealleştirerek basit denklemlerle ifade edilebilir hale getirmek gereğini ortaya çıkarmıştır. Böyle bir idealleştirmenin uygunluğu, incelenecek olan pratik problemin türüne göre söz konusu olacak şekil değiştirmenin büyüklüğüne bağlı olacaktır. Ne çeşit bir idealleştirmenin kullanılacağı hakkında karar vermek için bu idealleştirmenin kullanılacağı mekanik problemlerine bakmak gerekir.

Plastik şekil değiştirme yeteneğine sahip bir malzemenin, uygulanan soğuk şekillendirme miktarına ya da ısıtılma işlem programına göre sahip olduğu içyapıya bağlı olarak, uygulanan yüke verdiği reaksiyonu yorumlayabilmek amacıyla, malzeme özelliklerini idealize edilmiş biçimde tanımlayan bazı modellere ihtiyaç duyulur. Aşağıdaki şekillerde farklı özellikteki malzemelerin yükleme karşısında gösterdikleri davranışları incelemek amacıyla oluşturulan böyle dinamik modeller ve bunlara tekabül eden idealize edilmiş gerilme-uzama diyagramları verilmektedir [29].

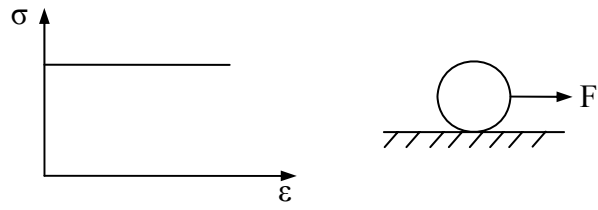
Bazen, arzuladığımız şekilde, şekil değiştiren elemanlar imal etmemiz gerekebilir. Mesela yay ve yay türü elemanlar imal ediyorsak bu elemanlar tekrarlanan yükler altında daima lineer karakterde olan şekil değiştirmeleri yapabilmelidirler. Şu halde bu elemanların yapıldığı malzeme, orantı sınırının altında çalışan elastik karakterli malzeme olmalıdır. Otomobil tamponları gibi elemanlar ise normal şartlar altında kalıcı şekil değiştirmelere uğramamalı fakat kaza v.s. gibi olağan dışı hallerde plastik şekil değiştirme diye adlandırılan kalıcı şekil değiştirmeler yaparak hız azalma ivmesini sınırlandırmalıdır. Bu çeşit hallerde de hem elastik hem de plastik bölgede geçerli yaklaşımlara ihtiyacımız vardır. Güvenlik pimi ve bunun gibi görev yapan elemanların dizaynında da tam kırılma önemli rol oynayacak ve elastik şekil değiştirmenin ise hiçbir önemi olmayacaktır. Şekil değiştiren cisimler mekaniği, belki de en fazla, kırılmanın hatta büyük şekil değiştirmelerin meydana gelmesine izin verilmeyecek elemanların dizaynında kullanılacaktır. Bu şartlar altında uzun ve ince elemanların dizaynında, plastik şekil değiştirmeler bir tarafa, hatta küçük elastik birim uzmanlar dahi tüm elemanda izin verilmeyecek büyük şekil değiştirmeler doğurabilir. Böyle durumlardaki elemanların dizaynında lineer elastik bağıntının yeterli olacağı açıktır.



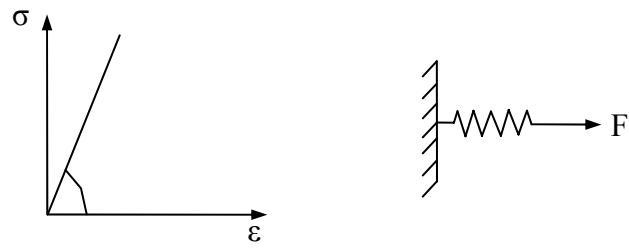
Şekil 3.1 Rijit Cisim.



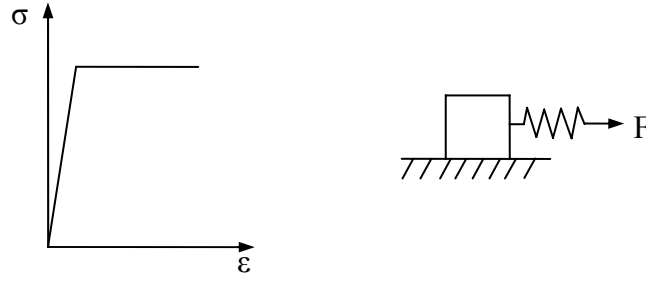
Şekil 3.2 Lineer Tam Plastik Cisim.



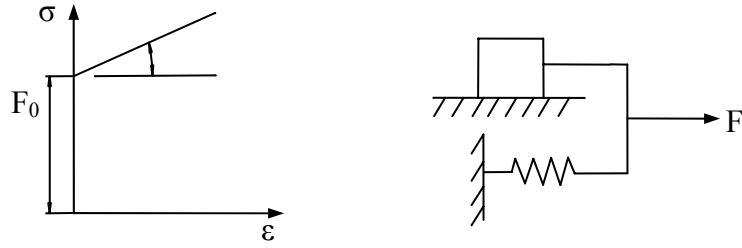
Şekil 3.3 Plastik Cisim.



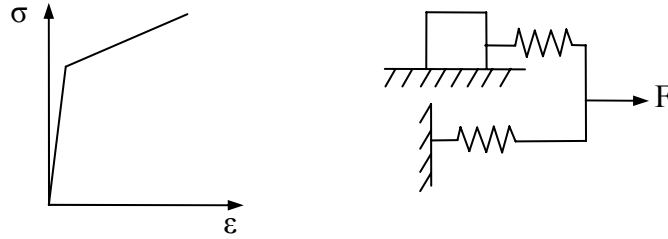
Şekil 3.4 Elastik Cisim.



Şekil 3.5 Elastik, Tam Plastik Cisim.



Şekil 3.6 Rijit, Lineer Sertleşen Cisim.



Şekil 3.7 Elastik, Lineer Sertleşen Cisim.

Rijit cisim kuvvet uygulamasında hiç deplasman vermeyen bir cisim olduğundan bu model şematik olarak $x=0$ şeklindedir (Şekil 3.1).

Şekil 3.2’de ise lineer, tam plastik özellikte ve sonsuz büyüklükte bir elastisite modülüne sahip ideal cisim tanımlanmaktadır. Bu tip malzemeler, gerilme akma sınırına ulaşıncaya dek hemen hiçbir elastik şekil değişimi göstermez. Akma sınırına ulaşıldığı anda ise plastik şekil değişimi başlar ve bu değişim sabit gerilme altında devam eder. Bu da malzemenin pekleşmediği anlamına gelmektedir. Bu modelde, deformasyonun elastik bileşeni, plastik bileşen yanında ihmal edilmektedir.

Şekil 3.3’de plastik cisim temsil edilmektedir. Malzeme tam plastik bir cisim ise; malzeme üzerine bir kuvvet uygulandığında akma sürekli olacaktır.

Elastik cisimler, üzerlerine tatbik edilen kuvvetler ile kendilerinde doğan şekil değiştirmelerin, kuvvetlerin kaldırılmasıyla ortadan kaybolan cisimlerdir. Şekil 3.4, tam elastik özelliğe sahip ideal bir malzemeyi karakterize etmektedir. Gevrek özellik gösteren böylesi malzemelerde kopma uzaması %1.2 gibi oldukça düşük mertebede olup, elastisite sınırı çekme dayanımına oldukça yakındır. Bu tür malzemelerden oluşturulan parçalar basit çekmeye maruz kaldıklarında, elastisite sınırının aşılmasına müteakip büzülme göstermeksizin kopma eğilimi gösterir. Bunun yanında, gevrek malzemelerin çekme diyagramlarında kopma noktasındaki gerilme değeri ile çekme dayanımı çakışır [28]. Gevrek malzemeler olan seramik, cam ve dökme demirlerin bazıları bu sınıfa girmektedir.

Elastik, tam plastik cisim (Elastoplastik) cisim bir blok ve buna bağlanmış bir yay ile temsil edilebilir. Şekil 3.5’de bloğun kaymaya başlayacağı F_0 kuvvetine kadar yayda deplasman vardır; fakat blok hareket edememektedir. $F=k*x$; $F<F_0$ ifadeleri matematik olarak cismi tarif eder. Bu bölge için malzeme elastiktir. $F<F_0$ da ise blok kaymaya başlamıştır. Yaydaki deplasman ile bloktaki deplasman aynıdır. Bu bölgede cisim plastik olarak akmaktadır.

Rijit elastik cisim bir blok ve yayın paralel bağlanması ile temsil edilebilir. F kuvveti F_0 gibi bir değere çıkmadan deplasman görünmez. Şekil 3.6’daki cisim rijittir. Birinci bölgede $F<F_0$, $x=0$ matematik ifadeleridir. 2. bölge $F>F_0$ ile tanımlanır. F kuvveti F_0 dan büyük olduğundan blok ile yay aynı deplasmana sahip olurlar ve yay elastik karakter taşıdığından cisim bu bölgede elastik özellik gösterir [29].

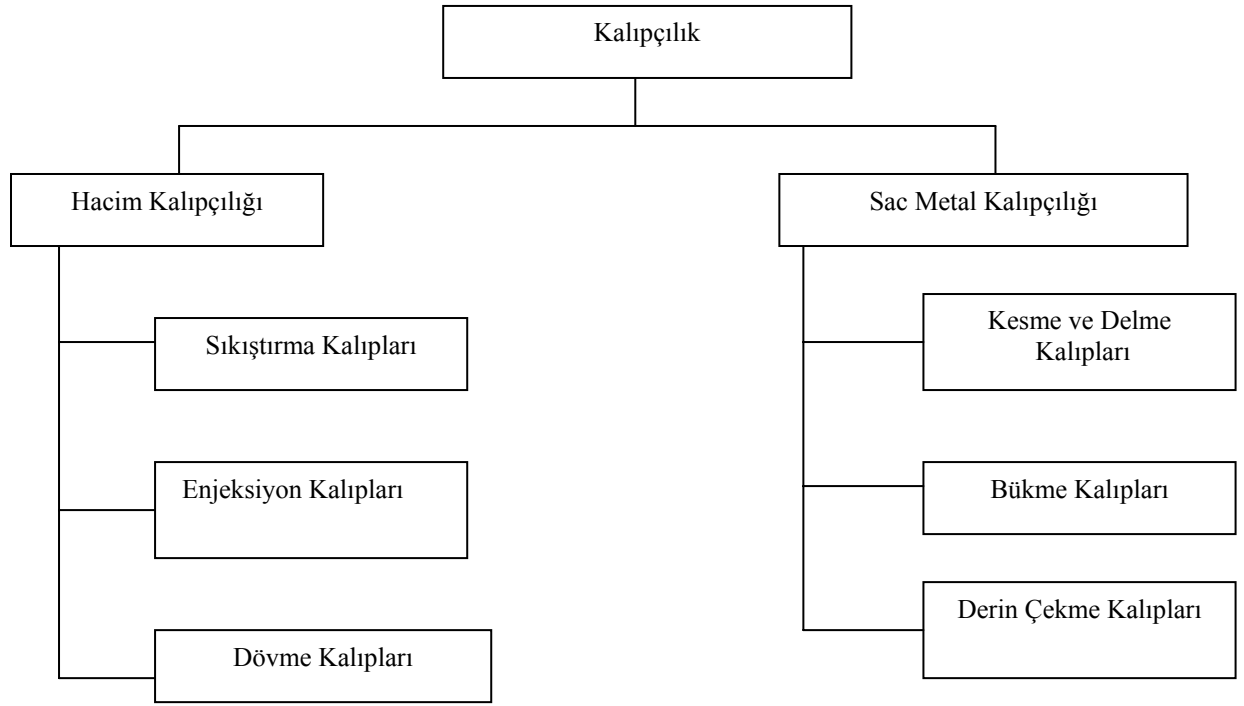
Şekil 3.7’de gösterilen ve pekleşen elastoplastik adını da alan malzemede ise akma noktasından sonra şekil değiştirmenin devam edebilmesi için, çok küçük de olsa, yine gerilme artışı gerekli olur. Bu pekleşen malzemelerde diyagramın pekleşme kısmının sapması da mümkündür.

Bu modellerin dışında başka tür modeller üretmek de mümkündür; özellikleri zamana da bağımlı olabilen çeşitli modellerin elementer olmayan çeşitli problemlerde kullanış alanları da mevcuttur.

4. KALIPÇILIK TEKNOLOJİSİ

Aynı ölçü tamlığında özdeş parçaların seri üretiminde kullanılan aperlara kalıp denilmektedir. Kalıplama yöntemi ile üretilen parçalar otomotiv, elektronik endüstrisi, ev eşyaları gibi çeşitli alanlarda kullanılmaktadır.

Kalıpçılık, kullanılan malzeme ve yöntemle göre hacim kalıpcılığı ve sac metal kalıpcılığı olmak üzere iki ana gruba ayrılmaktadır.



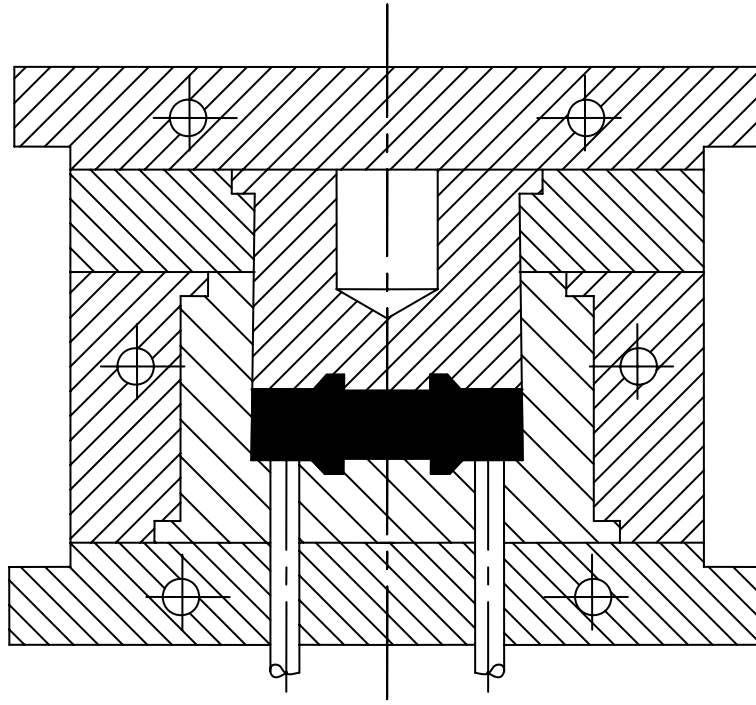
Şekil 4.1 Kalıpcılık Çeşitleri.

4.1. Hacim Kalıpcılığı

Hacim kalıpcılığı; sıkıştırma kalıpları, metal enjeksiyon kalıpları ve dövme kalıpları olmak üzere üç gruba ayrılmaktadır.

4.1.1. Sıkıştırma Kalıpları

Termosert malzemelerin kalıplanmasında sıkıştırmalı kalıplama yöntemi kullanılmaktadır. Toz halindeki plastik hammadde kalıp boşluğuna doldurulduktan sonra 120°C~360°C arasında, yaklaşık 2(Bar) basınç altında sıkıştırılarak istenilen şekle getirilmektedir.

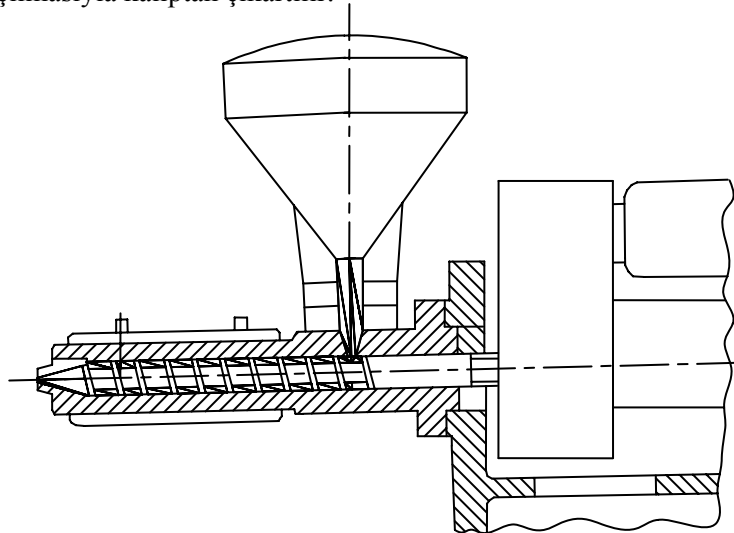


Şekil 4.2 Sıkıştırma Kalıbı.

4.1.2. Enjeksiyon Kalıpları

Termoplastiklerin şekillendirilmesinde enjeksiyonla şekillendirme yöntemi kullanılmaktadır.

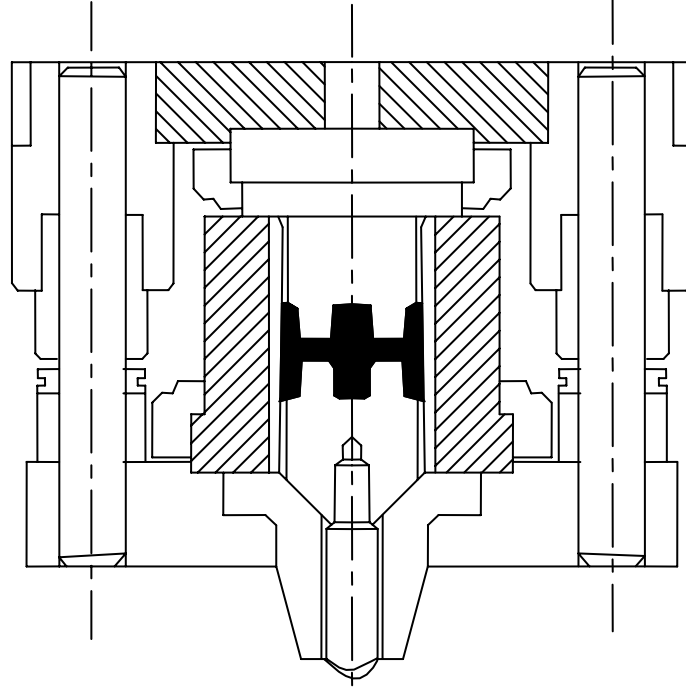
Toz veya küçük taneler halindeki termoplastikler bir huni yardımıyla pres içerisine gönderilir. Isıtıcılar tarafından ısıtılan, silindirin sıcaklığı malzeme cinsine göre ayarlanır. Silindir içerisinde eriten plastik madde hidrolik piston vasıtasıyla kalıp içine itilir. Kalıbın şeklini alan plastik malzeme kalıbın soğutulup açılmasıyla kalıptan çıkartılır.



Şekil 4.3 Enjeksiyon Kalıbı.

4.1.3. Dövmek Kalıpları

Dövmek şekillendirme esnasında malzemenin kristal yapısında değişimler meydana gelmektedir. Kristal kafesleri meydana getiren atomlar birbirlerine yaklaşıp aralarındaki elektromanyetik bağ daha da kuvvetlenir. Dolayısıyla dövmek kalıplarında imal edilen malzemeler daha mukavemetli olmaktadır.



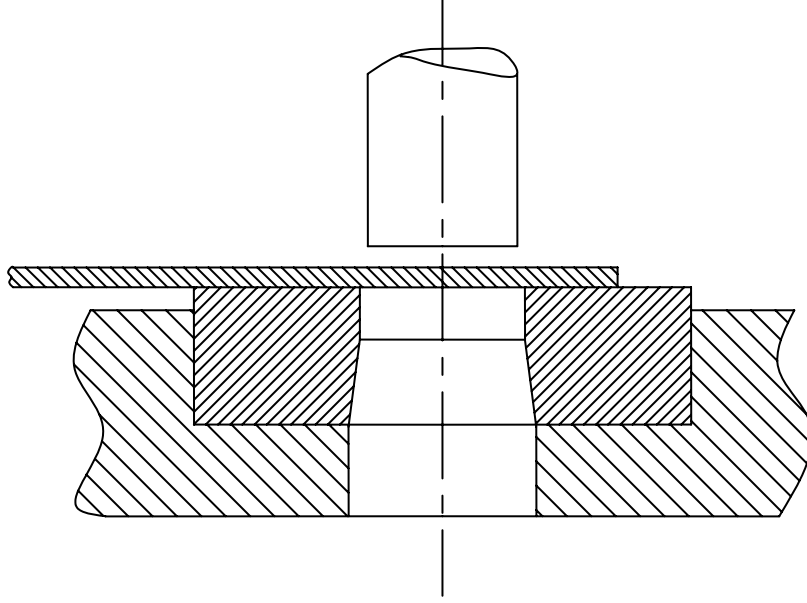
Şekil 4.4 Dövmek Kalıbı.

4.2. Sac Metal Kalıpcılığı

Sac metal kalıpcılığında bir pres yardımıyla saclar plastik deformasyona uğratılmaktadır. Sac metal kalıpları; kesme ve delme kalıpları, bükme kalıpları ve derin çekme kalıpları olmak üzere üç ana gruba ayrılmaktadır.

4.2.1. Kesme Kalıpları

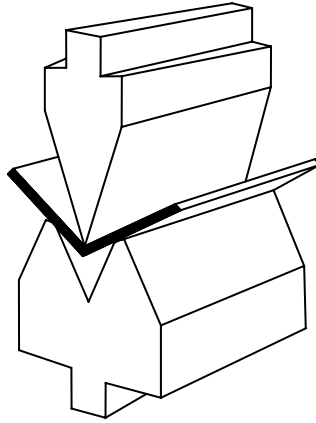
Üretilcek parçayı bir defada metal şeritten kesen kalıplara kesme kalıpları denilmektedir. Bu metotta istenilen şekil ve ölçüde özdeş parçalar elde edilmektedir.



Şekil 4.5 Kesme Kalıbı.

4.2.2. Bükme Kalıpları

Bükme, malzemenin sıcak veya soğuk olarak, talaş kaldırmadan, tarafsız eksen etrafında kuvvet etkisiyle yüzey doğrultularının yön değiştirmesidir.



Şekil 4.6 Bükme Kalıbı.

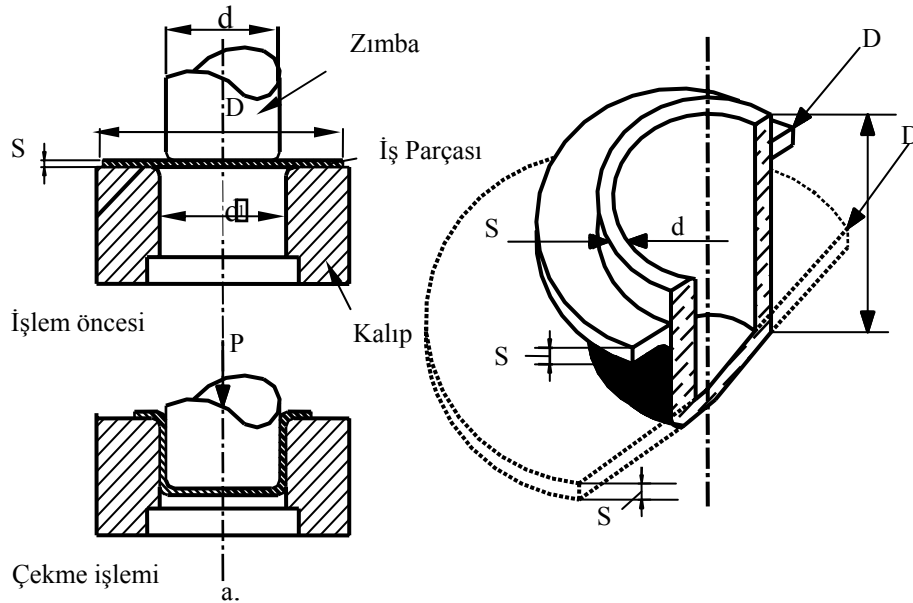
5. DERİN ÇEKME

Sac metal kalıpcılığı tekniğinde parçalar ya kesilmekte ya da biçimlendirilmekte veya aynı işlemde biçimlendirilip, kesilmektedir. Şekillendirmelerin endüstride en yaygın kullanımı çekme ile şekillendirmedir. Genellikle çekme işlemi ile şekillendirmelerde, düz levha durumundaki malzemelerden, içi boş dikişsiz kap veya farklı geometrik şekle sahip boş kutular elde edilmektedir. Bu nedenle çekme işlemi kalıplama tekniğinde en yaygın metotların başında gelmektedir.

5.1. Derin Çekme

İki boyutlu, düzlemsel geometriye sahip iş parçasının çekme kalıbı denilen elemanlar yardımıyla ve bir zımba vasıtasıyla preste çöktürülmesi ya da bir başka deyişle, iş parçasının çekme kalıbı içine sıvanması sonucunda belirli derinlik ve profillere sahip üç boyutlu parçalar elde edilmesi işlemine pres tekniğinde çekme adı verilir. Çekme yardımıyla elde edilmesi öngörülen derin kaplar birden fazla operasyon ile de oluşturulabilirler. Bu, birbirini takip eden çok sayıda çekme işleminden oluşan imal usulü ise derin çekme adını almaktadır [42].

Şekil 5.1’de, çekme sacı olarak adlandırılan dairesel iş parçasından d çapına sahip silindirik bir kabın çekme işlemiyle elde edilmesi şematik olarak verilmektedir.

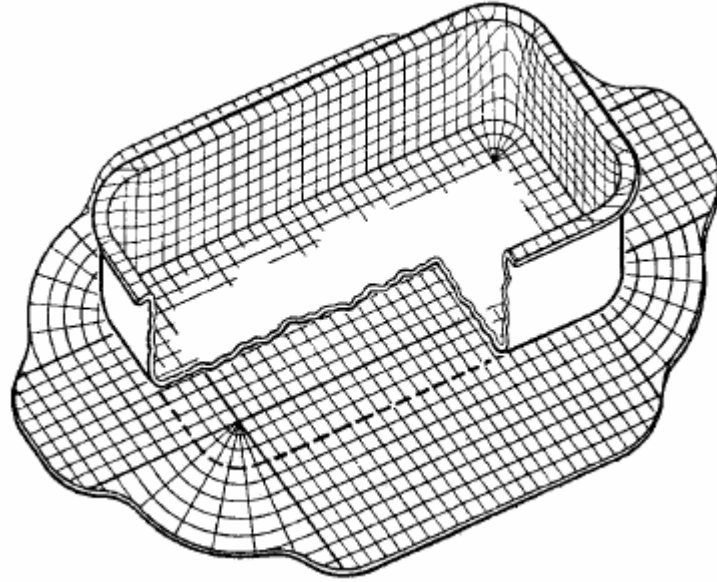


Şekil 5.1 Derin çekme işlemi, a. Şematik, b. Perspektif.

Şekilden de görülebileceği gibi, başlangıçta S_0 Kalınlığı ve D başlangıç çapına sahip düzlemsel, metalik ve şekillenebilir bir levha, d çapındaki bir zımba yardımıyla kalıp (matris) içine çekilmek suretiyle, altı düz, silindirik bir parça haline getirilmektedir [32].

5.2. Karakteristik Üçgen ve Fazlalık Malzemenin Etkileri

Bir iş parçasının derin çekilmesi, düzlemsel geometriye sahip bir cismin kendi düzlemine dik doğrultuda akmaya zorlanmasıdır. Parça geometrisi göz önüne alındığında, bu işlem sırasında kullanılan malzemenin normalde olması gerekenden daha fazla olduğu görülür [43] (Şekil 5.2 [44]). Gerekli önlemler alınmadığında bu gereksiz malzeme işlemin hatasız olarak gerçekleştirilebilirliğini tehlikeye sokar.

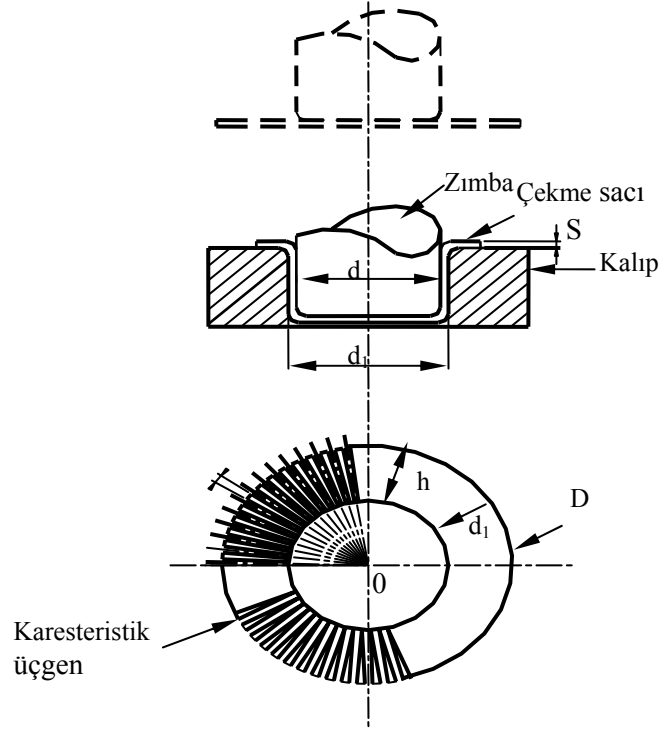


Şekil 5.2 Karmaşık şekilli bir levhadan yuvarlak köşeli bir kutunun çekilmesi.

İş parçasındaki malzeme fazlalığı karakteristik üçgen adı verilen geometrik bir özellik sayesinde gözle görünür hale gelir.

5.2.1. Karakteristik Üçgenin Tanımı ve Fazlalık Malzemenin Belirlenmesi

Karakteristik üçgen kavramını daha iyi anlatabilmek için D çapında ve S kalınlığında dairesel sac bir levhanın çekilmesi işlemini ele alalım (Şekil 5.3). d Çaplı daire üzerinde, aralarındaki daire yayı uzunluğu iş parçası kalınlığına eşit yaylar alınarak, bunların her iki tarafındaki yarıçap çizgileri daire merkezine birleştirildiği takdirde, d çapına sahip daire üzerinde S aralıklı yarıçap çizgileri elde edilir.



Şekil 5.3 Dairesel iş parçasında karakteristik üçgenin elde edilmesi.

Elde edilen bu çizgiler D çapındaki ana dairenin çevresine kadar uzatılarak, D ve d çaplı dairelerin kesişim noktaları üzerinde; $h = \frac{D-d}{2}$ olmak üzere, S genişliğinde ve h yüksekliğindeki dikdörtgenler belirlendiğinde levha üzerinde bu dörtgenler dışında kalan bölgenin eşit alanlı üçgenlerden oluştuğu rahatlıkla görülebilir. Karakteristik üçgen olarak adlandırılan bu parçalar, iş parçası geometrik boyutlarının bir fonksiyonu olup, çekme işleminde herhangi bir işlevi olmayan gereksiz malzemeyi karakterize eder [36]. Zira çekme işlemi kabaca, az önce elde ettiğimiz dikdörtgenlerin d_1 çapındaki daire çevresinde ve aynı yöne doğru $\pi/2$ kadar kıvrılmasından ibarettir. Yani üçgen biçimli parçaların burada rolü bulunmamaktadır.

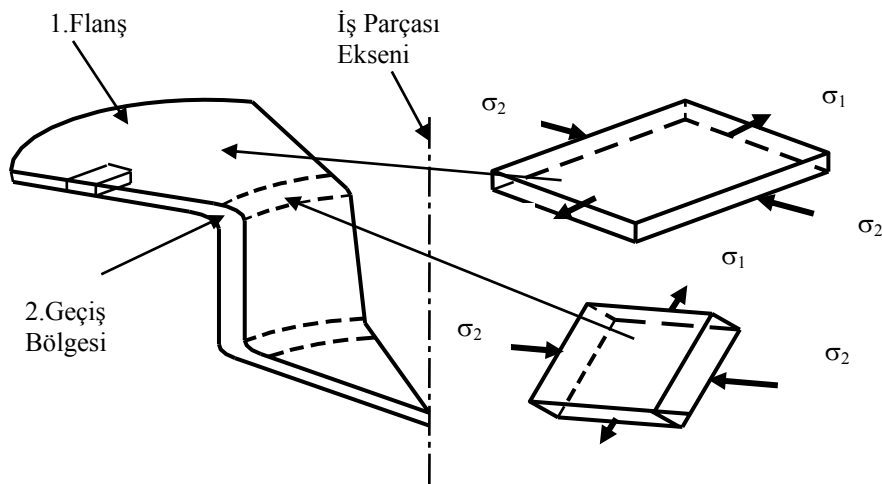
Karakteristik üçgene tekabül eden malzeme çekme işleminde bir fonksiyona sahip olmadığı gibi, özellikle belirli çap-kalınlık oranlarında, iş parçasında kulak adı verilen kırışmalara yol açabilmektedir [32]. Silindirik bir deney parçasının flanş bölgesinde meydana gelen bu türde kırışıklıklar Şekil 5.4'te görülmektedir.



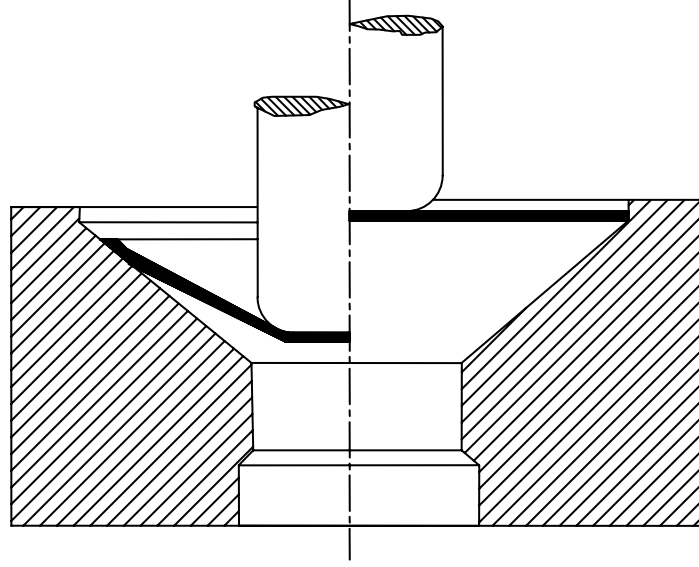
Şekil 5.4 Silindirik çekme ile elde edilen farklı özellikteki malzemelerden imal edilen kaplarda, yetersiz baskı plakası kuvveti sonucu kulak oluşumu.

5.2.2. Kulak Oluşumu

Derin çekilen dairesel iş parçasında kulak oluşumunun iyi bir şekilde anlaşılabilmesi için parçanın henüz matris içerisine çekilmemiş kısmında (flanş bölgesi) ortaya çıkacak gerilmelerin incelenmesi gerekir. Sürtünmenin ihmal edilmesi durumunda, bu bölgedeki bir hacim elemanı, Şekil 5.5’de de görülebileceği gibi, radyal çekme ve teğetsel basınç gerilmelerinin etkisi altında kalır [36]. Bu gerilmelerin ortaya çıkardığı yüksek yığılma basıncının malzeme için öngörülen belirli bir limit değeri aşması durumunda iş parçasında kırışmalar ortaya çıkar. Böyle bir olumsuzluğun ortaya çıkma ihtimali düşük olduğundan, kalınlığı nispeten fazla olan düşük derinlikli parçalar herhangi bir önleme gerek duyulmaksızın basit yapılı tek etkili pres tezgahlarında üretilebilirler [43]. Bu işlem uygulamada baskı plakasız çekme ya da serbest çekme adlarıyla da bilinmektedir (Şekil 5.6).

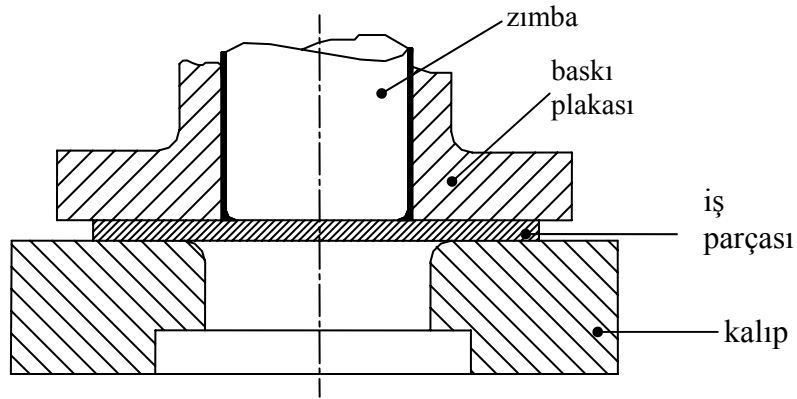


Şekil 5.5 Baskı plakası kullanılmadan gerçekleştirilen derin çekme işleminde flanş bölgesinde ortaya çıkacak gerilmeler, [45].



Şekil 5.6 Baskı plakasız çekme [59].

İnce sacların derin çekilmesi esnasında ilave bazı elemanların kullanımı zorunlu hale gelir. Baskı plakası ya da sıkıştırma kalıbı (pot çemberi; baskı plakası) adı verilen bu parçalar yardımıyla yapılan bir derin çekme işleminin temel elemanları şematik olarak Şekil 5.7’de görülmektedir.



Şekil 5.7 Baskı plakası kullanılarak yapılan çekme işleminin temel elemanları.

Baskı plakasının (pot çemberi) esas fonksiyonu, operasyon esnasında dairesel iş parçasının zımba ve matris etkisi dışında kalan serbest bölgesine, öngörülen bir baskı kuvveti yardımıyla basınç uygulamaktır. Böylelikle iş parçası malzemesi radyal yönde akmaya zorlanarak, yığılma basıncı tesiriyle ortaya çıkabilecek buruşma engellenmiş olur. Pratikte baskı plakası kullanımı için,

$$\frac{D}{d} > \frac{21}{20} \text{ ya da,} \quad (2)$$

$$S_0 > 0.2 (D-d), \quad (3)$$

sınır koşulları verilmektedir. Bu koşulların dışına çıkılması halinde karakteristik üçgenlerin sınırladığı malzeme fazlalığı sac yüzeyine dik hareket eder ve sonuçta iş parçası hasara uğrar.

5.3. Limit Çekme Oranı ve Anizotropi

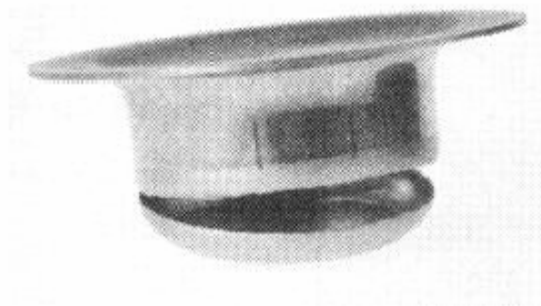
5.3.1. Limit Çekme Oranı

Derin çekme oranının özel bir halidir. Tanım olarak, yırtılmadan ideal şekilde çekilebilecek en büyük dairesel iş parçası çapının, bu işlemi gerçekleştirebilmesi öngörülen zımba çapına oranı, şeklinde tarif edilir [40]. Limit çekme oranının sembolik gösterimi ise;

$$\beta = \frac{D_{\max}}{d} \quad (4)$$

şeklindedir [41].

Silindirik derin çekme işleminde kullanılan dairesel iş parçası çapının, bu işlemde kullanılacak zımbanın çapına tekabül eden limit çekme oranını aşacak değerler alması durumunda parça yırtılarak hasara uğrar. Zira iş parçasının başlangıç çapı büyüdükçe çekme işlemini gerçekleştirmek için ihtiyaç duyulan zımba kuvveti de artmaktadır. Şekil 5.8.'da da bir örneği görülmekte olan bu türdeki bir hasar genellikle kabın yan duvar (veya cidar) kısmında ve zımba yuvarlatma yarıçapının başlangıç bölgesinde ortaya çıkmaktadır [32].



Şekil 5.8 Silindirik iş parçasında limit çekme oranının aşılması sonucu ortaya çıkan hasar [36].

5.3.2. Derin Çekmede Anizotropi

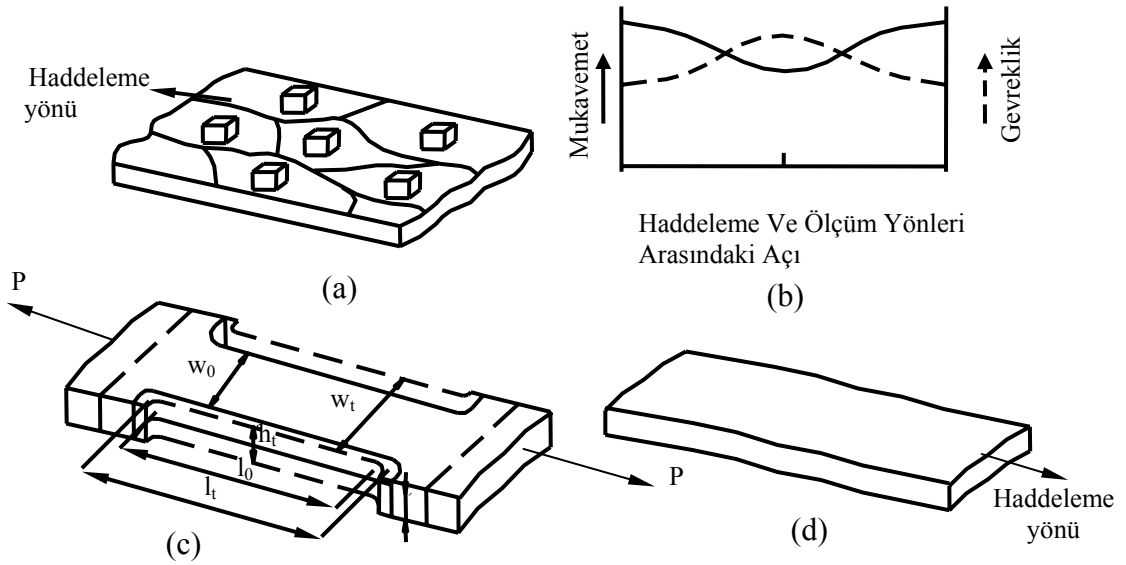
Bir sac levhanın derin çekilebilirliği büyük oranda malzemenin sahip olduğu plastik anizotropi (R) ile orantılıdır. Bu kavram ise, sac levhadan belirli bir doğrultuda alınacak bir çekme numunesine (Şekil 5.9) uygulanacak çekme deneyi sonucunda ortaya çıkacak kalınlık ve genişlik değişimleri yardımıyla aşağıdaki şekilde ifade edilebilir;

$$R = \frac{\varepsilon_w}{\varepsilon_t} \quad (5)$$

$$\varepsilon_w = \ln \left(\frac{w_{son}}{w_{ilk}} \right) \quad (6)$$

$$\varepsilon_t = \ln \left(\frac{t_{son}}{t_{ilk}} \right) \quad (7)$$

Bu bağıntıda ε_w , deney parçasındaki genişlik değişimini, ε_t ise kalınlıktaki değişimi sembolize etmektedir.



Şekil 5.9 Sac malzemede anizotropinin tespiti; a. Metalik sac levhada anizotropinin oluşumu. b. Belirli bir referans eksenine göre ölçülen mekanik özelliklerin haddelenme yönüne göre değişimi. c. Anizotropinin malzeme özelliklerine olan etkisinin çekme deneyi numunesinde ortaya çıkacak boyutsal değişimler yardımıyla belirlenmesi. d. Ortalama anizotropi değerinin hesaplanmasında kullanılan muhtelif doğrultular [40].

Soğuk haddelenmiş çeliklerde genellikle düzlemsel bir anizotropiden söz edilir. Söz konusu bu özellik ise malzemenin hadde yönünün bir fonksiyonudur, yani iş parçasının ana malzemeden kesilme pozisyonunun haddeleme doğrultuna göre yaptığı açı ile değişir. Bu nedenle uygulamalarda

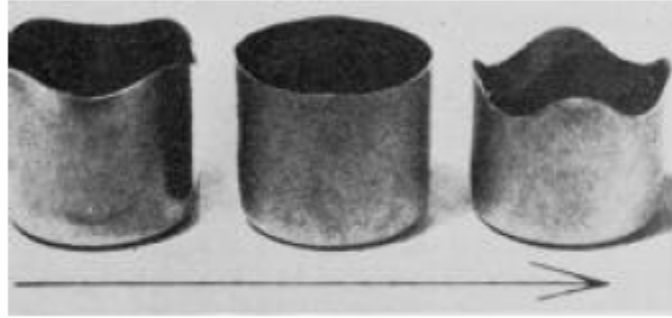
bir ortalama plastik anizotropi değerinin tanımlanması gerekir. R_{ort} ile sembolize edilen bu kavram aşağıdaki bağıntı yardımıyla hesaplanır [54];

$$R_{ort} = \frac{R_0 + 2R_{45} + R_{90}}{4} \quad (8)$$

Bağıntıdaki, 0, 45 ve 90 indisleri, plastik anizotropi değeri hesaplanmak üzere sac levhadan alınan numunelerin haddeleme yönüyle yapmış olduğu açıları göstermektedir.

Çekilerek elde edilmiş kap biçimli parçaların tepe kenarları genellikle düz olmaz. kulaklanma olarak da bilinen bu durum esasen iş parçasının sahip olduğu düzlemsel anizotropinin en belirgin göstergesi olarak kabul edilir (Şekil 5.10). Literatürde genellikle ΔR ile sembolize edilen düzlemsel anizotropi, malzeme için farklı yönlerde hesaplanan plastik anizotropi değerleri yardımıyla aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir [54];

$$\Delta R = \frac{R_0 + 2R_{45} + R_{90}}{2} \quad (9)$$

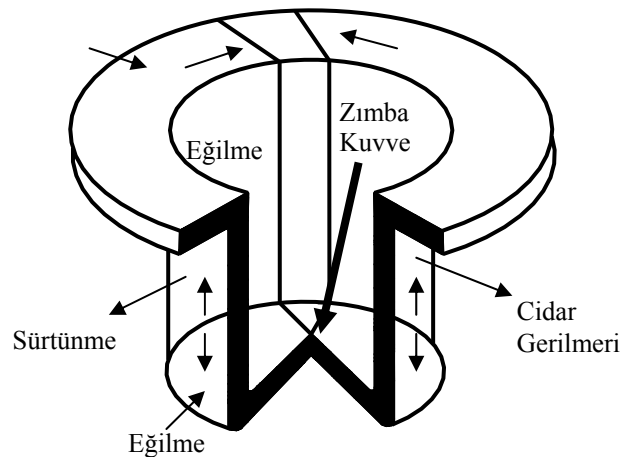


Şekil 5.10 Üç Farklı sac malzemeden derin çekilerek elde edilen iş parçalarında meydana gelen kulaklanma.

ΔR 'nin sıfır olması durumunda iş parçasında kulaklanma oluşmaz. Çekme sonucu iş parçasında ortaya çıkacak kulakların yüksekliği ΔR ile doğru orantılıdır. Çekme işlemi sonunda iş parçasında ortaya çıkan kulakların adedi genellikle dört olmakta ancak, farklı anizotropik durumlarda bu sayı iki, altı ve sekiz değerlerini de alabilmektedir [41].

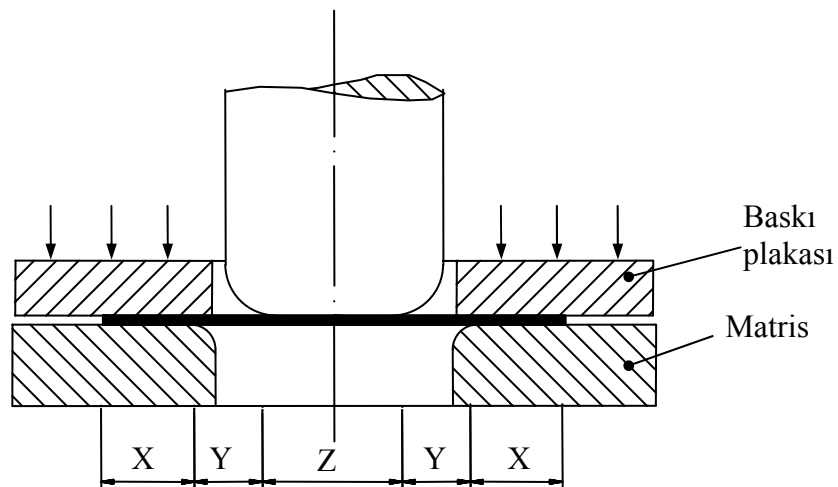
Çekme işlemi tamamlandıktan sonra, ortaya çıkan kulaklar iş parçasının çevresi boyunca kesilerek ayrılırlar. Malzeme kaybının yüksek olmaması için kulaklanma miktarı en aza indirgenmelidir.

Çekme etkisinden dolayı sac bünyesinde ortaya çıkacak kuvvetler, malzemenin kalınlığında değişimlere neden olmaktadır. Önceki bölümlerde, meydana gelen bu iç kuvvetlerin bazılarının iş parçası üzerindeki olumsuz etkilerine değinilmişti. Şekil 5.11’de ise silindirik bir parçanın sac çekme yöntemiyle üretimi esnasında, parça içyapısında ortaya çıkan kuvvet ve gerilmeler genel olarak görülmektedir [34].



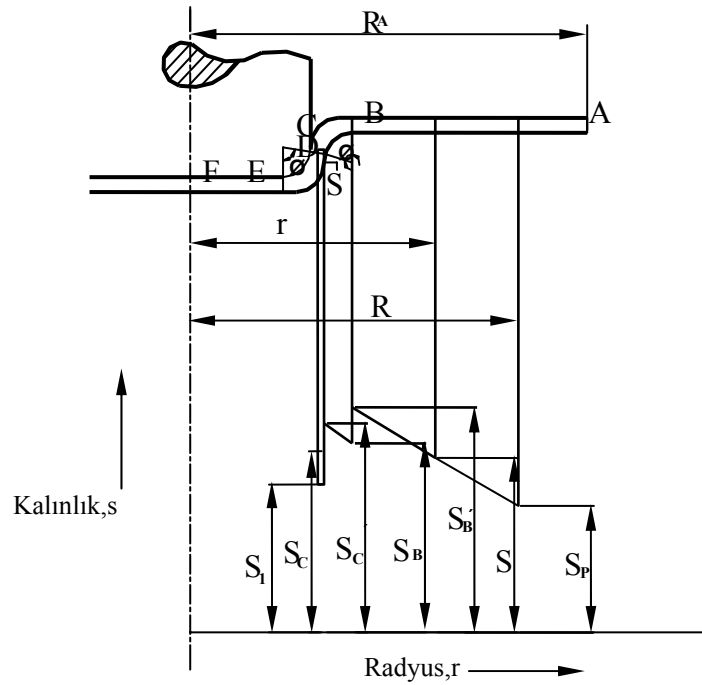
Şekil 5.11 Derin çekme işleminde iş parçasına etki eden kuvvetler.

Çekme işleminde kullanılan elemanlarla temas halinde olduğu bölgelerine göre, dairesel bir sac levha, üç ana kısımda incelenebilir. Bu bölgeleri X, Y ve Z diye adlandırarak gösterelim (Şekil 5.12 [46], [47]).



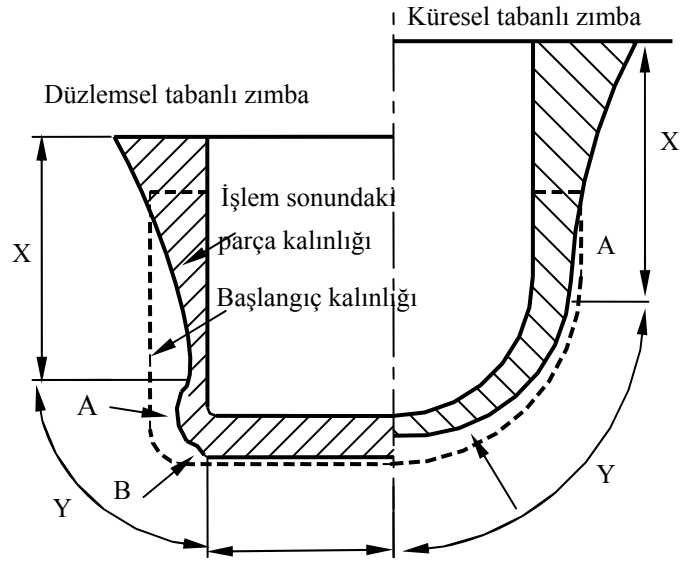
Şekil 5.12 Çekme başlangıcında iş parçasının durumu; Sıkıştırma kalıbı (baskı plakası), Matris.

Yukarıdaki şekilde X olarak adlandırılan halka biçimli bölge matrisle, Z bölgesi zımba alt yüzeyi ile temas halindedir. Y bölgesi işlem başlangıcında zımbaya da, kalıba da temas etmemektedir. Çekme esnasında X bölgesini meydana getiren malzeme, zımba kuvvetinin neden olduğu radyal çekme gerilmesi vasıtasıyla kalıp boşluğuna doğru çekilir (Şekil 5.12, [34]). Malzemenin, içinden geçmeye zorlandığı kalıp boşluğu çapı, halkanın başlangıç çapından küçük olduğu için bu bölgede teğetsel basınç gerilmeleri ve buna bağlı malzeme yığılması ortaya çıkar. Bir başka anlatımla, ilkel dairesel iş parçası üzerinde ve daire merkezinden R kadar uzakta bulunan bir referans parçası, radyal çekme sonucunda merkeze yaklaştıkça kalınlaşır (Şekil 5.13, [46]). X bölgesindeki bu kalınlaşma, derin çekilmiş parçaların daha ziyade dış kısımlarında kendini göstermekte, bu bölgenin son bulunduğu noktada et kalınlığı yeniden artmaktadır (Şekil 5.14, [46]). Bir başka deyişle, X bölgesinin bitiminde iş parçasında boyun oluşumu (Şekil 5.14'te, (A)) meydana gelmektedir.



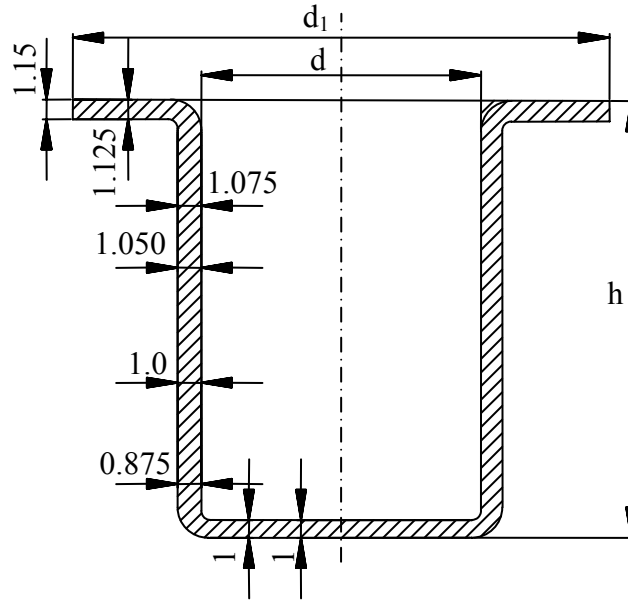
Şekil 5.13 Derin çekme işlemi boyunca kalınlık değişiminin seyri [46].

Y bölgesinde iş parçası malzemesi zımba radyüsü ve kalıp çekme kenarı boyunca kayma ve eğilmeye, kalıp ile zımba arasında ise uzamaya çalışmaktadır. Bu da, eğilmenin meydana geldiği noktada, Şekil 5.13'te görülen ani incelmeye Şekil 5.14'te, B ile gösterilen ikincil bir boyunlaşmaya yol açmaktadır.



Şekil 5.14 Farklı geometrilere sahip zımbalarla yapılan derin çekme işleminde malzeme cidarında oluşacak kalınlık değişimlerinin karşılaştırılması [46].

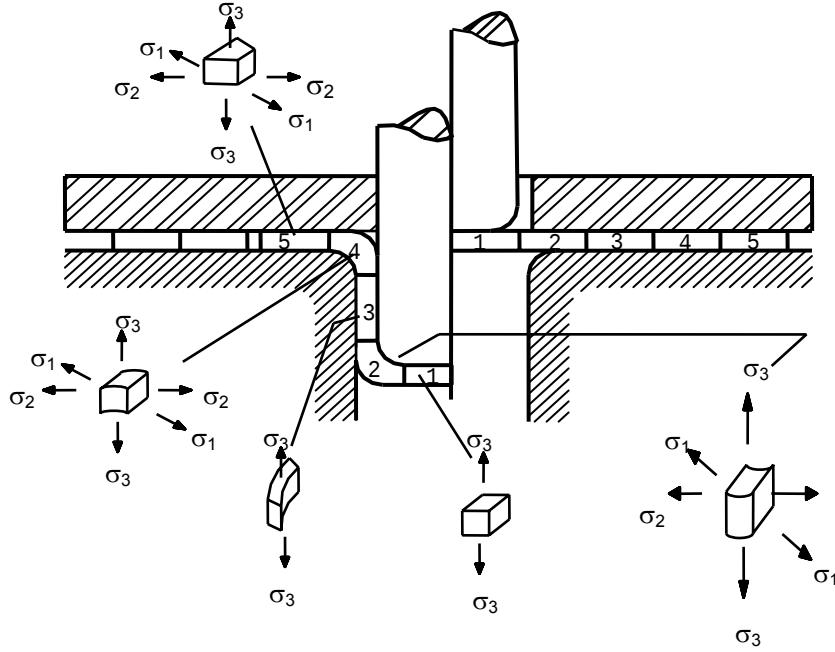
Z bölgesinde ise iş parçasının zımba alın yüzeyine temas eden kısımları uzama ve kaymaya yani radyal yönde gerilmeye çalışır. Gerilme durumu diğer bölgelere göre nispeten daha homojen olduğundan (Şekil 5.15) çekilmiş iş parçasının taban kısmında et kalınlığı yaklaşık olarak sabit kalır. Burada ortaya çıkacak gerilmeler ise, mevcut sürtünme katsayısı ve zımba biçiminin fonksiyonudur [46], [41].



Şekil 5.15 Çekilerek imal edilmiş silindirik bir kaptaki cidar kalınlıklarının değişimi (Başlangıç malzeme kalınlığı $S=1(\text{mm})$, $d=12(\text{mm})$, $d_1=22(\text{mm})$, $h=21(\text{mm})$) [34].

5.5. Kademeli Çekme

Derin çekme esnasında malzemenin plastik deformasyona zorlanması malzeme üzerinde birçok gerilmenin ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Bu gerilmeler Şekil 5.16'da verilmektedir. Derin çekme işleminin başarılı olabilmesi için malzeme bu gerilmelere dayanım gösterebilmelidir.

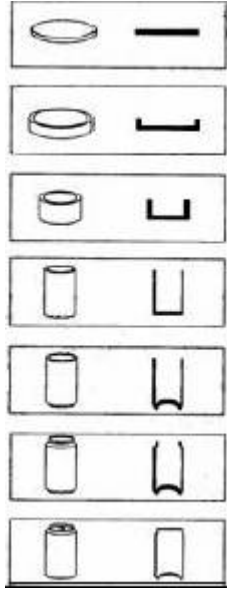


Şekil 5.16 Derin çekme esnasında meydana gelen gerilmeler [49].

Sacın ilk çapı ile zımba çapı arasındaki oran büyüdükçe sacı plastik deformasyona uğratabilecek zımba kuvveti büyümektedir. Zımba kuvvetinin artması derin çekme esnasında oluşan gerilmelerin büyümesine yol açmaktadır. Bu nedenle derin çekme esnasında oluşan bu büyük gerilmelere mukavemet gösteremeyen iş parçasında yırtılmalar meydana gelmekte ve derin çekme işlemi başarısızlıkla sonuçlanmaktadır.

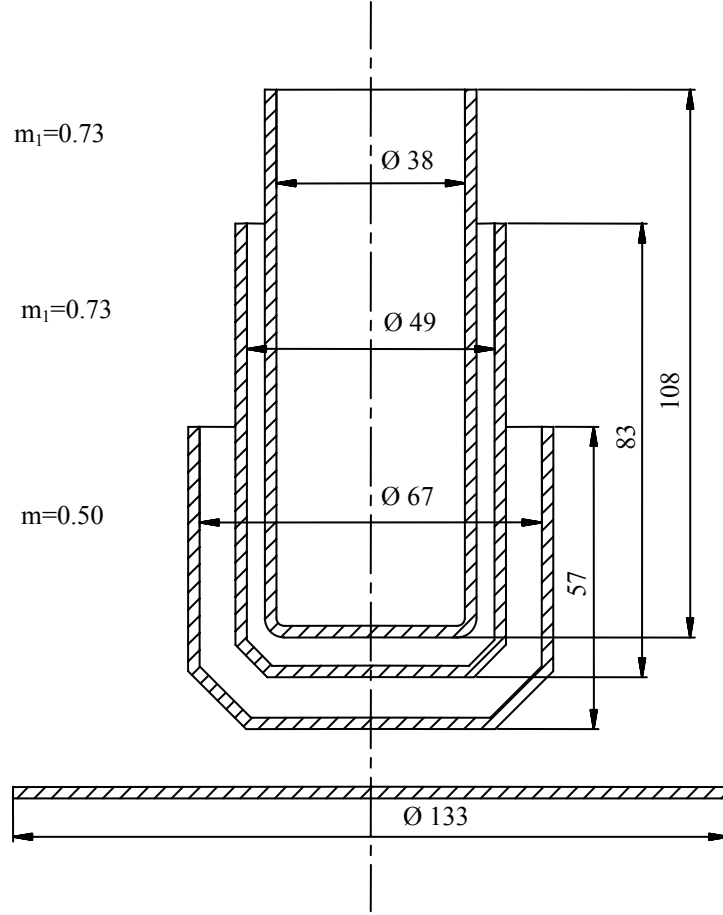
Gerilmeler şekil değişimleri ile orantılı olduklarından her çekme operasyonunda malzemenin dayanabileceği şekil değişimi uygulanmalıdır [49].

Büyük çekme oranına sahip parçaların imalatında oluşabilecek büyük gerilmeleri engellemek için kademeli kalıplama yöntemi kullanılmaktadır. Bu yöntemde imal edilecek iş parçası, kademe kademe plastik deformasyona uğratılıp, yırtılma oluşmadan parça istenilen şekle getirilmektedir. Şekil 5.17'de kademeli çekme işlemine örnek olarak, meşrubat kutusunun imalatı gösterilmektedir.



Şekil 5.17 Meşrubat kutusunun imalatı.

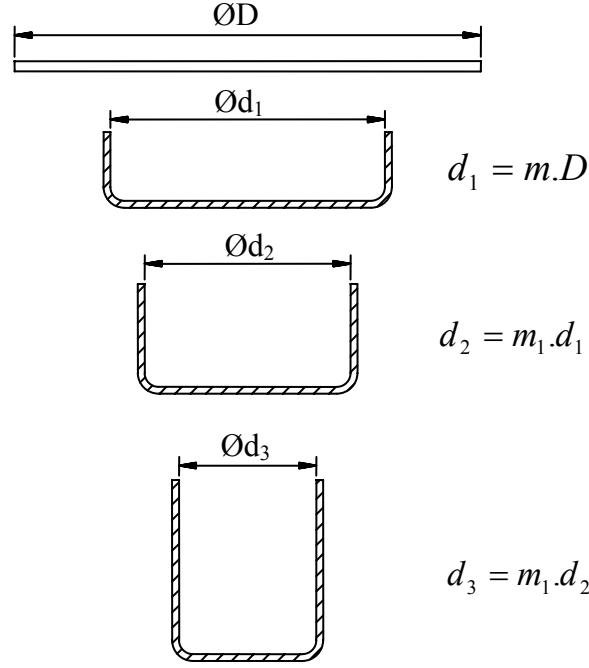
Şekil 5.18’de gösterilen 0,8(mm) kalınlığındaki sacdan 30(mm) yüksekliğinde 24,8(mm) iç çapında bir parça üretebilmek için kaç kalıp gerektiği gösterilmektedir. Yapılan hesaplara göre sacın ilkel çapının 60(mm) olması gerektiği belirlenmiştir. Buna göre çekme oranı $\beta = \frac{D}{d} = \frac{60}{24} = 2,419$ olur. Çekme oranının büyük olmasından bu parçanın tek kalıpta imal edilemeyeceği anlaşılmaktadır. Yapılan hesaplar neticesinde bu parçanın ancak 4 farklı operasyonla imal edilebileceği tespit edilmiştir.



Şekil 5.18 Çekme oranı büyük olan bir parçanın kademeli kalıplama ile imalatı [58].

Derin çekme operasyonlarındaki bütün şekil değişimlerini belirleyip buna göre çekme kademesi boyutlarını veren teorik bir çözüm yolu bulunmamaktadır.

Pratikte kademe sayısının hesaplanmasında çekme oranı (β) ya da çekme modülü ($m = \frac{1}{\beta}$) kullanılmaktadır. Bu hesaplama yöntemi aşağıda anlatılmaktadır.



Şekil 5.19 Çekme kademelerinin hesaplanması.

$$1. \quad m = \frac{d_1}{D} = \frac{1}{\beta}$$

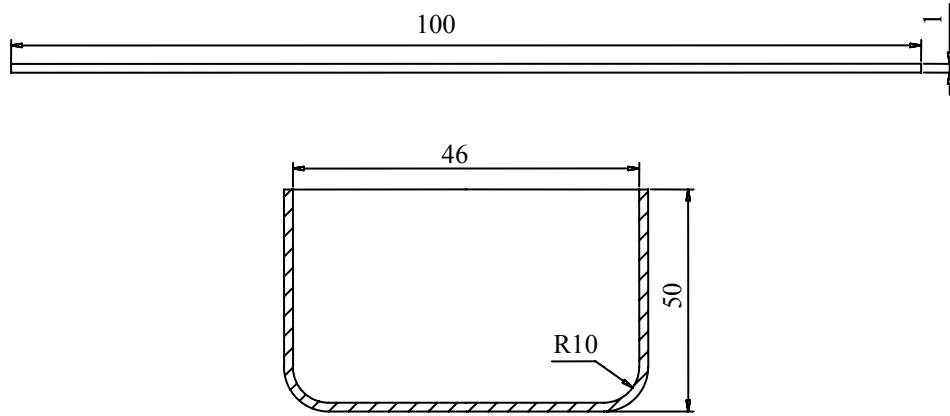
(10)

$$m_1 = \frac{d_2}{d_1} = \frac{d_3}{d_2} = \frac{d_4}{d_3} = \dots = \frac{d_n}{d_{n-1}} \quad (11)$$

Yukarıdaki oranlardan da anlaşılacağı gibi ilk çekme için kademesi oranı (m), diğer kademelerde kullanılan oranlardan (m_1) farklıdır. Bunun nedeni ilk çekme esnasında parçada pekleşme olmasıdır. İlk çekmeden sonra parça sertleştiği için diğer kademelerde çekme biraz daha zorlaşmaktadır. İşte bu yüzden ikinci ve daha sonraki çekmelerde çekme kademesi oranı yükseltilmektedir.

Şimdi pratikte kullanılan kademe sayısının hesaplanmasına örnek verelim.

1(mm) kalınlığındaki DKP 37 sacından iç çapı 46(mm), yüksekliği 50(mm) olan bir parça geleneksel derin çekme metoduyla imal edilmek isteniyor.yapılan hesaplama göre sacın ilkel çapının 100(mm) olması gerektiği tespit edilmiştir. $\beta=1,75$ ve $m_1=0,8$ kabul ederek kademe sayısını hesaplayalım.



Şekil 5.20 Derin çekilecek parça.

Verilenler:

$$d=46(\text{mm})$$

$$D=100(\text{mm})$$

$$h=50(\text{mm})$$

$$t=1(\text{mm})$$

$$\beta=1,75$$

$$m_1=0,8$$

$$m = \frac{1}{\beta} = \frac{1}{1,75} = 0,57 \text{ bulunur.}$$

$$d_1 = m.D = 0,57.100 = 57(\text{mm})$$

$$d_2 = m_1.d_1 = 0,8.57 = 45,6(\text{mm})$$

Ø46(mm)'ye ancak ikinci safhada ulaşılabilir. Dolayısıyla bu parça 2 kalıpta imal edilebilmektedir. Bu parça bir kalıp kullanılarak imal edilmeye kalkılırsa parça derin çekme esnasında meydana gelen gerilmelere dayanım gösteremeyip yırtılacaktır.

5.6. Derin Çekmede Kullanılan Saclar

Kesme, bükme, çekme v.b. talaşsız şekillendirme işlemleri için seçilecek saclarda aranacak ilk şart ön görülen presleme işlemine uygunluk olmalıdır. Seçilen malzemede presleme esnasında çatlama, yırtılma, kopma gibi istenmeyen durumlar meydana gelmemelidir. Ayrıca pres işlemleri için düşünülen parçaların şekilleri de seçilen presleme yöntemine uygun biçimde belirlenmelidir.

Preslemede “kesme” yöntemi ile imal edilecek parçalar için seçilecek çelik sacın türünün fazla önemi yoktur. Bu malzemelerin imalat sonrası yapılacak yüzey işlemlerine uygun üst yapıda olması gerekir.

Bükme-Çekme-Sıvama gibi yöntemlerle üretilcek parçalar için seçilecek sacın önemi büyüktür. Çünkü bu imal yöntemine şekil değişikliği söz konusu olduğundan malzeme ön görülen biçime uygun operasyon şekli seçilmiş ise çatlama, yırtılma, kopma olmadan girebilmelidir.

Preslik saclar yumuşak alaşımsız çeliklerden kullanım amaçlarına göre sıcak veya soğuk haddeleme yöntemi ile imal edilmektedir. Pres işlerinde kullanılan 2(mm)’nin altındaki saclar soğuk haddeleme yöntemi ile imal edilmişlerdir. Sıcak haddelenmiş saclarda işlem sonrası yüzeyde oluşan tufallar asitle giderildikten sonra piyasaya verilir. Sıcak veya soğuk haddelenmiş saclar arasında yapılacak seçim bir kalite tercihindense çok, arzulanan kalınlıktaki malzemeyi temin edebilme sorunudur. Kalın sacları soğuk, ince sacları da sıcak haddelenmiş olarak temin güçtür. Orta kalınlıktaki saclarda ise üretilcek parçadaki üst yüzey durumu tercihi belirleyen bir faktör olacaktır, yüzey durumu önemli değilse sıcak hadde saclar daha ucuz olacağından tercih edilebilir. Boyut toleranslarındaki hassasiyet açısından soğuk haddelenmiş saclar sıcak haddelenmiş saclardan üstündür [49].

6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

6.1. Çalışmanın Amacı

Derin çekme işlemi, sac-metal şekillendirmede uygulama alanı yaygın olan önemli yöntemlerden biridir. Bu nedenle derin çekme işleminin optimize edilmesi sanayi açısından oldukça önemlidir.

Geleneksel derin çekme metodunda, kalıp yüzeylerine hiçbir açı verilmemektedir. Bu çalışmada derin çekme kalıplarının yüzeylerine açı verilerek bu açının derin çekmeye etkileri araştırılmıştır. Ayrıca kalıp açısı değişiminin yanı sıra, baskı plakası kuvveti değişiminin etkileri de araştırılmıştır. Sonuç olarak matris ve baskı plakasına açı vermek suretiyle derin çekme işleminde limit çekme oranının artırılabilirdiği ve gerekli baskı plaka kuvvetinin azaltılabildiği tespit edilmiştir.

6.2. Deney Malzemesi

Bu çalışmada derin çekme uygulamalarında alüminyum (Al 1050) sacı kullanılmıştır. Bu malzemeye ait kimyasal spektral analiz sonuçları Tablo 6.1’de verilmiştir.

Tablo 6.1 Deney numunelerinin kimyasal spektral analizi.

Si	Fe	Cr	Mn	Al	Diğer
0.10200	0.27800	0.00340	0.00420	99.5	0.1124

Deneylerde 0.7 (mm) kalınlığındaki Alüminyum sacı kullanılmıştır. Deney malzemenin kimyasal özelliklerini belirlemek amacıyla SPECTROLAB MARKA M5 MODELİNDE spektral analizi yapılmıştır. MOHR-FEDERHAFF-LOSENHAUSEN çekme test cihazında, 20 tonluk çekme yükü kullanarak 2mm/s hızla çekme testi uygulandı. Çekme testi sonuçlarından sacın akma gerilmesinin 50 (N); çekme gerilmesinin de 120(N) olduğu belirlenmiştir.

6.3. Deney Numunelerinin Hazırlanması

Derin çekme işleminde, sacın ilk çapının zımba çapına oranına çekme oranı (β) denilmektedir. Çekme oranı derin çekmeye etki eden en önemli faktörlerden biridir.

Bir sacın bir kalıpta bir defada çekilebileceği en büyük çapın zımba çapına oranına limit çekme oranı denir. Limit çekme oranı sacın yapısal özellikleri ile ilgilidir. Bu nedenle her sacın limit çekme oranı farklıdır. Deney malzemesi olan alüminyum sacının limit çekme oranını açısız ve açılı olarak belirlemek için, $\beta=1,8$; $\beta=1,9$; $\beta=2$; $\beta=2,1$; $\beta=2,2$; alınarak bir dizi çekme derin çekme deneyi yapıldı.

Deney numuneleri önce kare şeklinde kesildi. Daha sonra tornalanarak hassas ölçüsüne getirildi. Bu derin çekme oranlarına karşılık gelen sac çapları Tablo 6.2’de verilmektedir.

Tablo 6.2 Çekme oranı (β)'ya bağlı olarak sac çapları

Çekme oranı (β)	Sac çapı(mm)
1,8	54
1,9	57
2,0	60
2,1	63
2,2	66

6.4. Kalıp Tasarımı ve İmalatı

Daha önce de belirtildiği gibi bu çalışmada matris yüzey açısı değişiminin derin çekmeye etkileri araştırılmıştır. Matris yüzeyine verilen açı aynı zamanda baskı plakası yüzeyine de verilmiştir.

Kalıbın temel ölçüleri belirlenirken Saniee, F. F. ve Montazeran, M. H.'nin [50] çalışması referans alındı. Kalıp parçalarının tümü Fırat Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Makine Eğitimi Bölümü atelyesinde, Ç1040 kalıp malzemesi kullanılarak CNC tezgâhlarda işlenerek imal edildi.

Deneylerde 0°; 2,5°; 5°; 7,5°; 10°; 12,5°; 15°'lik kalıp açıları kullanılmıştır. Kalıp açısı değerleri Tablo 6.3'de verilmektedir.

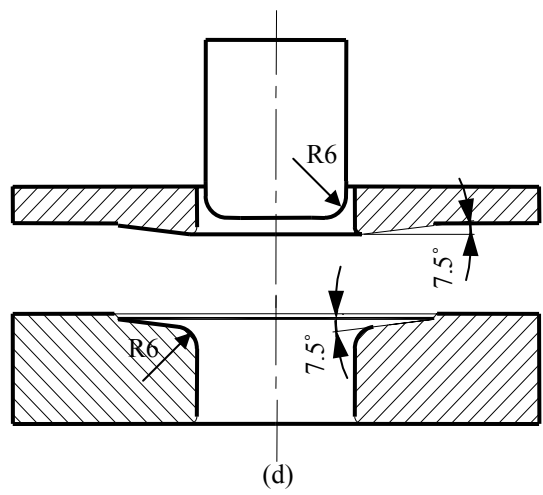
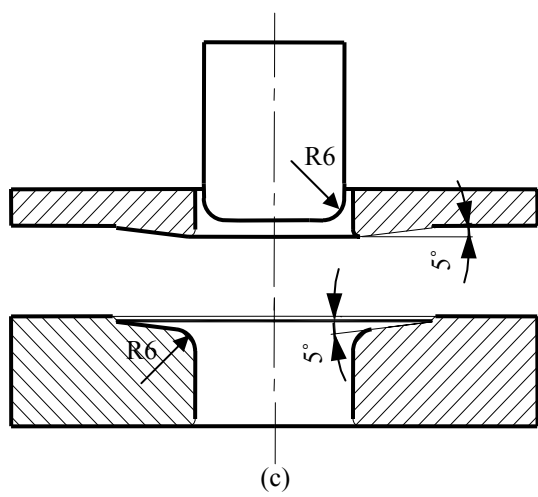
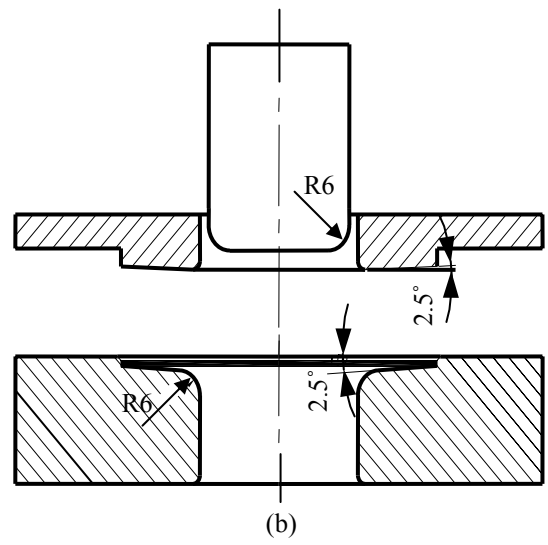
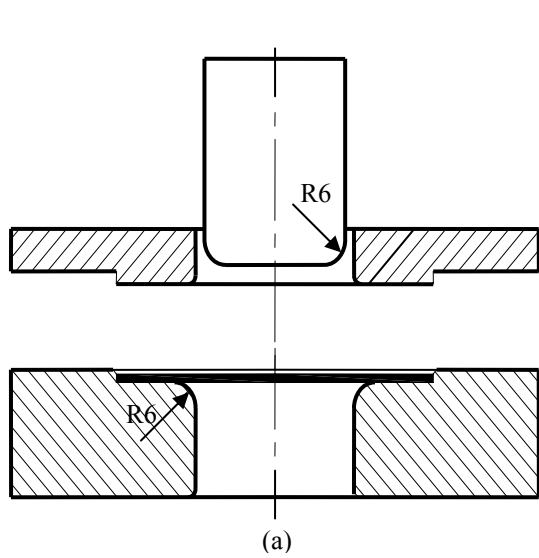
Tablo 6.3 Kalıp açısı (α) değerleri.

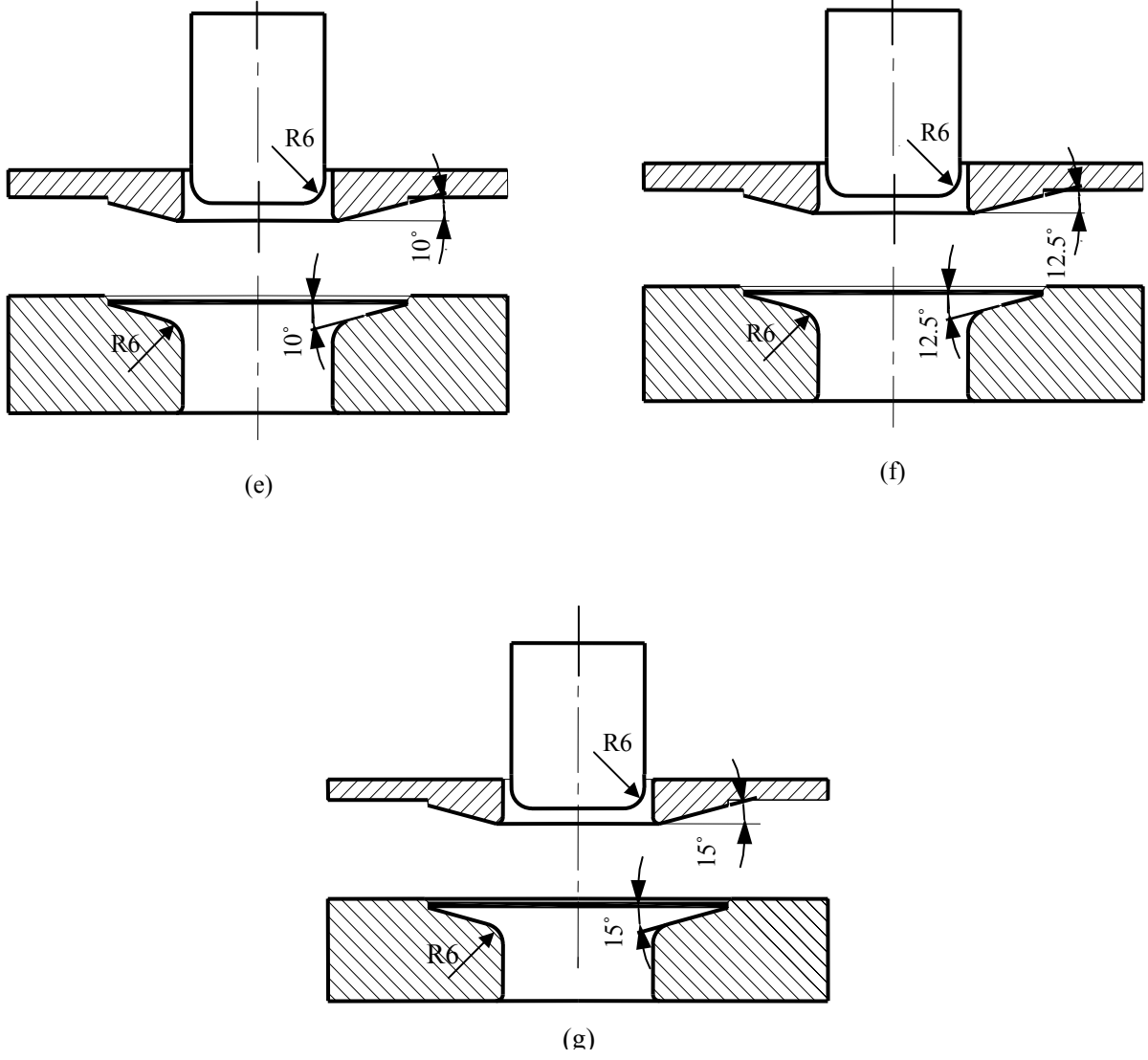
α°	0	2.5	5	7.5	10	12.5	15
----------------	---	-----	---	-----	----	------	----

Bu kalıplar aşağıdaki şekillerde gösterilmektedir.



Şekil 6.1 Deneylerde Kullanılan Kalıp Matrisleri (Dişi Kalıplar).

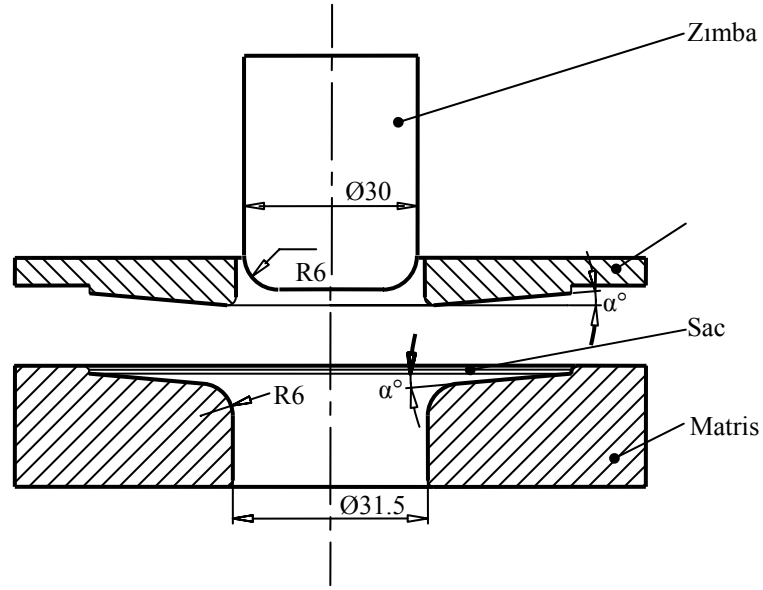




Şekil 6.2 Matris ve zımba yarıçapı $R=6$ mm için, a) Matris ve baskı plakası açısı $\alpha=0^\circ$
b) Matris ve baskı plakası açısı $\alpha=2.5^\circ$, c) Matris ve baskı plakası açısı $\alpha=5^\circ$
d) Matris ve baskı plakası açısı $\alpha=7.5^\circ$, e) Matris ve baskı plakası açısı $\alpha=10^\circ$.
f) Matris ve baskı plakası açısı $\alpha=12.5^\circ$, g) Matris ve baskı plakası açısı $\alpha=15^\circ$.

Bütün kalıpların yüzey açıları haricindeki bütün ölçüleri (zımba çapı, matris çapı v.b.) aynı tutulmuştur.

Kalıpların başlıca ölçüleri Şekil 6.3’da verilmektedir.



Şekil 6.3 Kalıp ölçüleri.

6.5. Deney Çalışmaları İçin Kullanılan İşlem Parametreleri

Deneylerde kullanılan deney numuneleri Tablo 6,2’de belirtilen ölçülere getirilerek gruplara ayrıldı. Daha sonra Tablo 6,3’de verilen her bir kalıp açısında deney numuneleri derin çekme işlemine tabii tutuldu. Tespit edilen limit çekme oranlarının güvenilir olduğunu kanıtlamak için her bir deney üç defa tekrarlandı.

Baskı plakası kuvveti (B.P.K.) değişiminin derin çekmeye etkisini araştırmak için deney setine baskı plakasını tahrik eden üç adet hidrolik silindir eklendi. Baskı plakası kuvveti olarak dört farklı değer alındı (Tablo 6.4).

Tablo 6.4 Deneyler esnasında kullanılan baskı plakası kuvvetleri

B.P.K.	1036,2 (N)	2072,4 (N)	3108,6 (N)	4144.8 (N)
--------	------------	------------	------------	------------

Tablo 6,5’de derin çekme deneylerinde kullanılan numunelerin işlem parametreleri verilmiştir. Tablodan da açıkça görüldüğü gibi deneylerde dört ana parametre kullanılmıştır. Bunlar matris radyüsü, kalıp açısı, baskı plakası kuvveti ve çekme oranıdır.

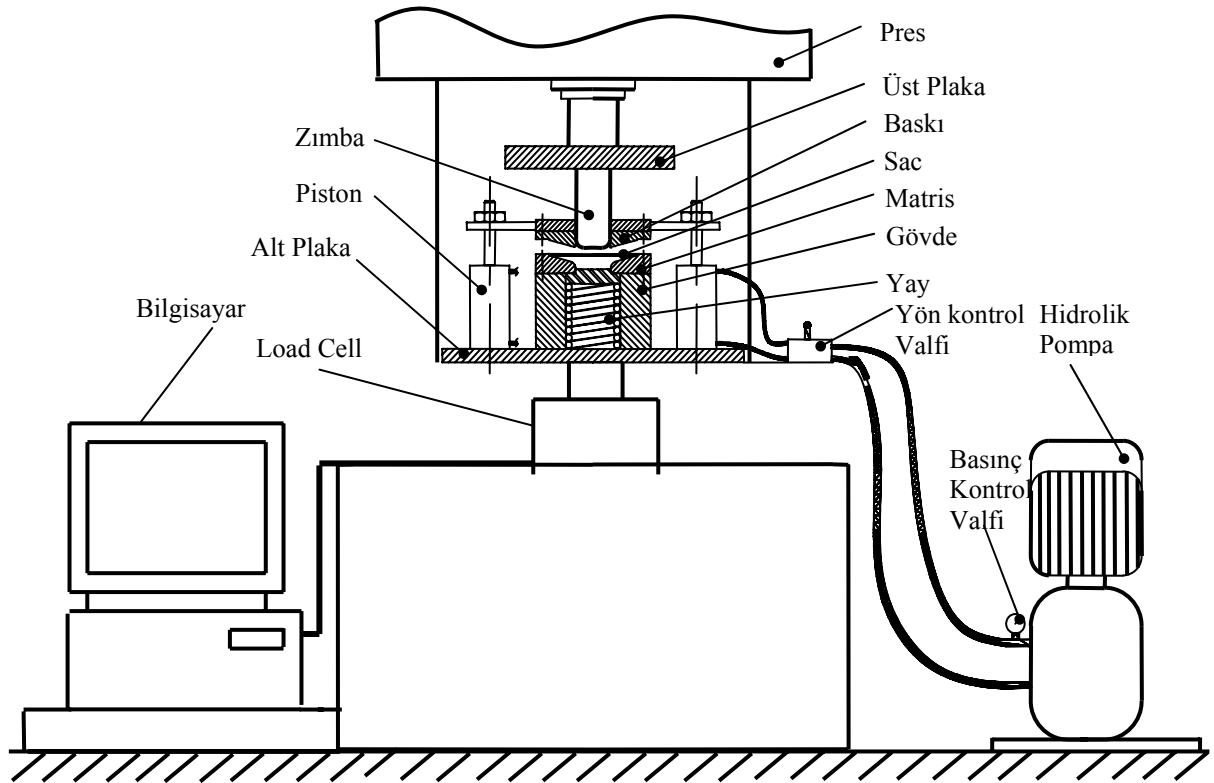
Tablo 6.5 Derin çekme deneylerinde kullanılan deney numuneleri ve işlem parametreleri.

Numune No	Çekme Oranı (β)	Kalıp Açısı (α)	Baskı Plakası Kuvveti (N)	Zımba Kuvveti (N)
D 1	1,8	0°	1036,2	7090
D 2	1,8	0°	2072,4	6480
D 3	1,8	0°	3108,6	4660
D 4	1,8	0°	4144,8	4460
D 5	1,9	0°	1036,2	11600
D 6	1,9	0°	2072,4	5920
D 7	1,9	0°	3108,6	4960
D 8	1,9	0°	4144,8	4140
D 9	1,9	2,5°	1036,2	11760
D 10	1,9	2,5°	2072,4	7910
D 11	1,9	2,5°	3108,6	7740
D 12	1,9	2,5°	4144,8	4660
D 13	2	2,5°	1036,2	5940
D 14	2	2,5°	2072,4	4840
D 15	2	2,5°	3108,6	3540
D 16	2	2,5°	4144,8	3160
D 17	1,9	5°	1036,2	7040
D 18	1,9	5°	1554,3	8240
D 19	1,9	5°	3108,6	3800
D 20	1,9	5°	4144,8	2470
D 21	2	5°	1036,2	5620
D 22	2	5°	2072,4	3580
D 23	2	5°	3108,6	2930
D 24	2	5°	4144,8	2570
D 25	1,9	7,5°	1036,2	9650
D 26	1,9	7,5°	1554,3	8620
D 27	1,9	7,5°	3108,6	5590
D 28	1,9	7,5°	4144,8	3260
D 29	2	7,5°	1036,2	11000
D 30	2	7,5°	2072,4	8960
D 31	2	7,5°	3108,6	5480
D 32	2	7,5°	4144,8	3860
D 33	1,9	10°	1036,2	9090
D 34	1,9	10°	2072,4	7540
D 35	1,9	10°	3108,6	5670
D 36	1,9	10°	4144,8	3550
D 37	2	12,5°	1036,2	10260
D 38	2	12,5°	1554,3	9200
D 39	2	12,5°	3108,6	6080
D 40	2	12,5°	4144,8	5560
D 41	2	15°	1036,2	10400
D 42	2	15°	2072,4	8000
D 43	2	15°	3108,6	6740
D 44	2	15°	4144,8	4760

Derin çekme deneyleri, ŞAHİNLER HCP50 model hidrolik pres kullanılarak yapıldı. Presin standart hızı oldukça yüksek olduğu için pres üzerine hız düşürücü bir düzenek eklendi. Deneyler 4 (mm/sn)'lik çekme hızıyla yapıldı.



Şekil 6.4 Deneylerin yapıldığı hidrolik pres ve deney seti.

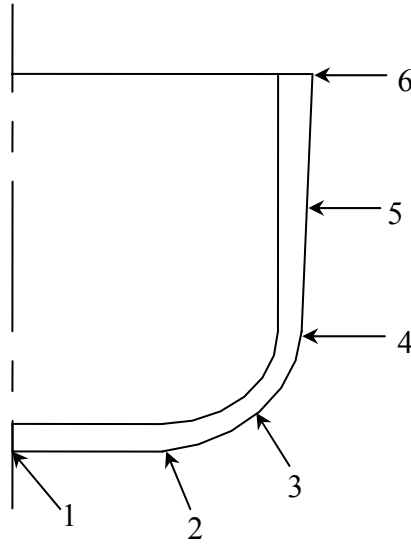


Şekil 6.5 Hidrolik pres ve kalıp setinin şematik gösterimi.

6.6. Kalınlık Değişiminin Belirlenmesi

Derin çekme esnasında çeşitli gerilmeler oluşmaktadır. Bu gerilmeler malzeme akışını etkilemekte dolayısıyla derin çekme esnasında iş parçası kalınlığının değişmesine neden olmaktadır.

Matris açısı değişiminin ve baskı plakası kuvveti değişiminin iş parçası kalınlığına etkilerini araştırmak amacıyla bütün deney numuneleri el testeresi ile ortadan ikiye kesildi. Kesme esnasında oluşan çapaklar temizlendikten sonra her numunenin altı farklı bölgesindeki (Şekil 6.6) et kalınlıkları ölçüldü. Burada 1. bölge sac tabanının merkezidir; 2. bölge sac tabanı ile parça radyüsünün kesişim noktasıdır; 3. bölge parça radyüsünün orta noktasıdır; 4. bölge parça duvarı ile parça radyüsünün kesişim noktasıdır; 5. bölge parça duvarının ortasıdır; 6. bölge ise parçanın tepe noktasıdır. Kalınlık ölçümleri QLR DİGİT marka 0,0001mm hassasiyetli dijital mikrometre ile yapılmıştır (Şekil 6.7).



Şekil 6.6 Sac kalınlığının ölçüldüğü bölgeler.

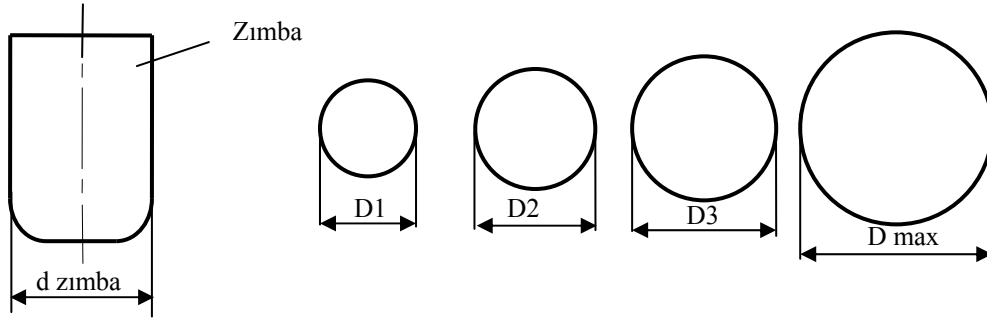


Şekil 6.7 Sac kalınlığının ölçülmesi.

7. DENEY SONUÇLARI

7.1. Matris Yüzey Açı Değişiminin Limit Çekme Oranı Üzerine Etkisi

Derin çekme kalıplarının tasarımında göz önünde bulundurulması gereken en önemli faktörlerden biri limit çekme oranıdır. Üretilcek olan parçanın kaç kalıpta imal edilebileceği sacın çekme oranıyla yakından ilişkilidir. Limit çekme oranı (L. Ç. O.) tanım olarak, yırtılma meydana gelmeden en ideal şekilde çekilebilen en büyük sac çapının zımba çapına oranıdır.



Şekil 7.1 Limit çekme oranının (L.Ç.O.) ifadesi

$$L.Ç.O. = \frac{D_{\max}}{d_{\text{zimba}}} \quad (12)$$

olarak ifade edilebilir.

İlkel parça çapı limit çekme oranını aşarsa bu parça ancak iki veya daha fazla kalıpta üretilir. Çünkü sacın ilkel çapı büyüdükçe sacı deformasyona uğratmak için gerekli zımba kuvveti de büyüyecektir. Zımba kuvvetinin büyük olması derin çekme esnasında oluşan gerilmeleri büyüteceğinden parçada yırtılmalar olacaktır. (Şekil 7.2).



Şekil 7.2 Çekme oranının büyük olmasından dolayı parçada meydana gelen yırtılma.

Baskı plakası kuvvetinin fazla olduğu durumlarda parçada daha değişik kopma ve yırtılmalar meydana gelir. (Şekil 7.3).

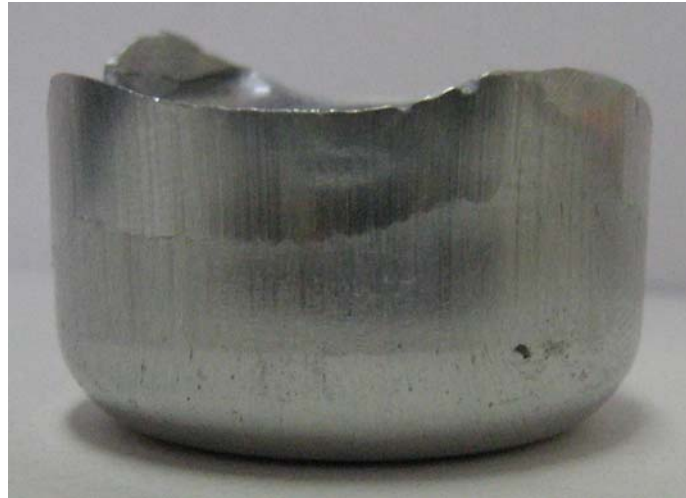


Şekil 7.3 Baskı plakası kuvvetinin fazla olduğu durumlarda meydana gelen kopma ve kırılmalar

Derin çekme işlemi ile ilgili yapılan araştırmaların temel amacı sacın çekilebilirliğini, yani çekme derinliğini arttırabilmektir. Çekme derinliği, sacın ilkel çapı ve zımba çapı ile ilgilidir. Bu nedenle limit çekme oranının arttırılması bir defada üretilebilecek maksimum çekme derinliğini de arttırmaktadır.

Açısız kalıpta ($\alpha=0^\circ$) Alüminyum sacının limit çekme oranının 1,8 olduğu tespit edildi. Yapılan deneylere göre açısız kalıpta ondülasyon meydana gelmeden derin çekme yapabilmek için en az 1036,2(N)'luk baskı plakası kuvveti uygulanması gerektiği tespit edildi.

Şekil 7.4'de 0° 'lik kalıpta elde edilebilen iş parçası verilmiştir.



Şekil 7.4 0° 'lik kalıpta elde edilebilen optimum iş parçası

Kalıba 2,5°'lik açı verildiğinde limit çekme oranının 1,9 olduğu tespit edildi. Yapılan deneylere göre 2,5 °'lik kalıpta ondülasyon meydana gelmeden derin çekme yapabilmek için optimum 2072,4(N)'luk baskı plakası kuvveti uygulanması gerektiği tespit edildi. Şekil 7.5'de 2,5°'lik kalıpta elde edilebilen iş parçası verilmiştir.



Şekil 7.5 2,5°'lik kalıpta elde edilebilen optimum iş parçası.

Kalıp açısı 5°'ye çıkartıldığında limit çekme oranı da 1,9 olarak kalmıştır. Yapılan deneylere göre 5°'lik kalıpta ondülasyon meydana gelmeden derin çekme yapabilmek için gerekli olan baskı plakası kuvveti 1554,3(N) olarak tespit edildi.

Şekil 7.6'de 5°'lik kalıpta elde edilebilen iş parçası verilmiştir.



Şekil 7.6 5°'lik kalıpta elde edilebilen optimum iş parçası.

Kalıp açısını $7,5^\circ$ 'ye çıkardığımızda ise limit çekme oranı 1,9 olarak kalmaktadır. Baskı plakası kuvveti de aynen kalmıştır.

Şekil 7.7'de $7,5^\circ$ 'lik kalıpta elde edilebilen optimum iş parçası gösterilmektedir.



Şekil 7.7 $7,5^\circ$ 'lik kalıpta elde edilebilen optimum iş parçası.

Kalıp açısını 10° 'ye yükseltildiğinde çekme oranı değişmeyip yine 1,9 olarak kalmaktadır. Fakat $7,5^\circ$ 'lik kalıpta optimum baskı plakası kuvveti 1554,3(N) iken 10° 'lik kalıpta optimum baskı plakası kuvveti 1036,2(N)'a düşmektedir. Bu da 5° ve $7,5^\circ$ 'lik kalıpta yapılan aynı işlemi 10° 'lik kalıpta daha az enerji harcayarak yapılabileceğini göstermektedir.

Şekil 7.8'de 10° 'lik kalıpta elde edilebilen optimum iş parçası gösterilmektedir.



Şekil 7.8 10° 'lik kalıpta elde edilebilen optimum iş parçası.

Kalıba 12,5°'lik açı verildiğinde limit çekme oranının 2'e çıktığı tespit edildi. Yapılan deneylere göre 12,5 °'lik kalıpta ondülasyon meydana gelmeden derin çekme yapabilmek için optimum 1554,3(N)'luk baskı plakası kuvveti uygulanması gerektiği tespit edildi.

Şekil 7.9'de 12,5 °'lik kalıpta elde edilebilen optimum iş parçası gösterilmektedir



Şekil 7.9 12,5°'lik kalıpta elde edilebilen optimum iş parçası.

Kalıp açısını 15°'ye yükseltildiğinde çekme oranı değişmeyip yine 2 olarak kalmaktadır. Fakat 12,5°'lik kalıpta optimum baskı plakası kuvveti 1554,3(N) iken 15°'lik kalıpta optimum baskı plakası kuvveti 1036,2(N)'a düşmektedir. Bu da 12,5°'lik kalıpta yapılan aynı işlemi 15°'lik kalıpta daha az enerji harcayarak yapılabileceğini göstermektedir.

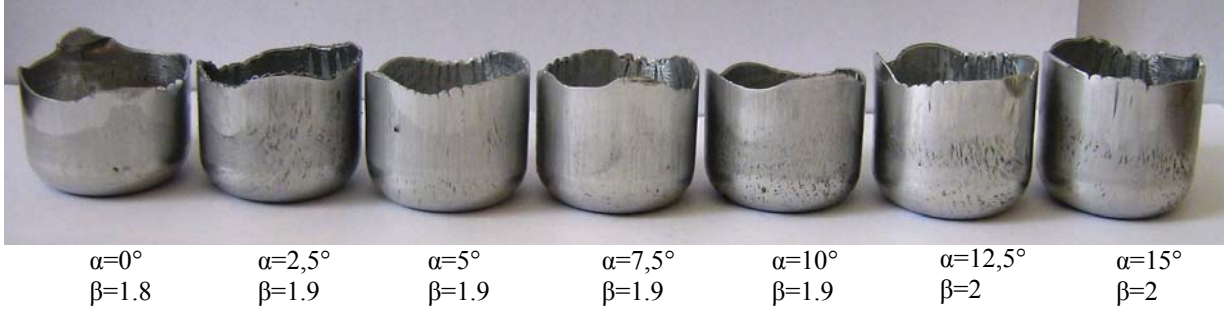
Şekil 7.10'de 15 °'lik kalıpta elde edilebilen optimum iş parçası gösterilmektedir



Şekil 7.10 15°'lik kalıpta elde edilebilen optimum iş parçası

15° lik kalıpta çekme oranını 2,1'e çıkardığında ise iş parçasında ondülasyonlar meydana gelmekte ve daha sonra iş parçası yırtılmaktadır. Buradan da anlaşılmaktadır ki kalıba açı vermek suretiyle limit çekme oranı 2'ye kadar çıkartılabilmekte ve bu değer sınır niteliğinde olmaktadır. Bu değerın üstüne çıkılamamaktadır

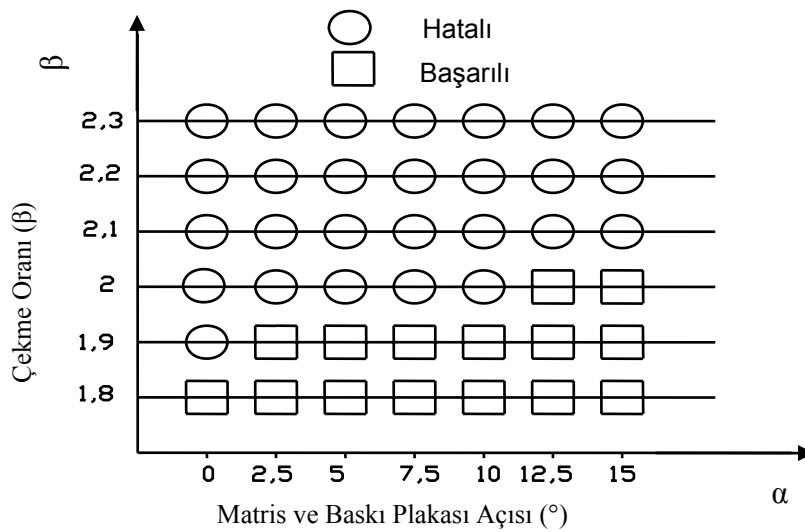
Şekil 7.11'de kalıp açısı değişimiyle elde edilen optimum deney numuneleri gösterilmektedir.



Şekil 7.11 Kalıp açısı değişimiyle elde edilen optimum deney numuneleri.

Şekil 7.11'de açıkça görüldüğü gibi kalıp açısının değiştirilmesi ile limit çekme oranında büyük bir artış meydana gelmiştir. β=2'ye ulaşıldığında optimum sonuç alınmış fakat β=2'nin üzerine çıkıldığında ise yırtılmalar meydana gelmektedir.

Şekil 7.12'da kalıp açısı değişiminin limit çekme oranına etkisi grafiksel olarak ifade edilmektedir. Şekilde dikdörtgen ile gösterilen bölgelerde başarılı sonuçlar elde edilmesine rağmen daire ile gösterilen bölgelerde ise ondülasyonlar ve yırtılmaların meydana geldiği görülmektedir.



Şekil 7.12 Kalıp açısı değişiminin çekme oranına etkisi.

7.2 Matris Açısı ile Baskı Plakası Kuvvetinin Zimba Kuvvetine Etkisi

Zimba kuvveti derin çekmeye etki eden önemli faktörlerden biridir. Zimba kuvveti matris açısına ve baskı plakası kuvvetine bağlı olarak azalmakta ya da yükselmektedir. Baskı plakası kuvveti az olursa iş parçasında ondülasyonlar meydana gelmektedir. Bu sonuçtan dolayı bu ondülasyonları düzelmek için zimba kuvveti yükseltilmelidir. Baskı plakası kuvveti gereğinden fazla olduğunda ise iş parçasında yırtılmalar oluşmaktadır. Bu sonuç da zimba kuvveti baskı plakası kuvveti altındaki iş parçasını yırtmasına sebep olmaktadır. Bu nedenle baskı plakası kuvveti ve zimba kuvveti belirli bir oran dahilinde olmalıdır.

Yapılan deney sonuçlarına göre açılı kalıp kullanılarak gerekli baskı plakası kuvvetinin azaldığı tespit edilmiştir. Açısız kalıpta ($\alpha=0^\circ$) çekme oranı 1,8 alınarak yapılan deneyde 1036,2(N)'luk baskı plakası kuvveti ve 7090(N)'luk zimba kuvveti uygulanarak elde edilmiştir.

Matris açısı $2,5^\circ$, çekme oranı 1,9 alınarak yapılan deneyde 2072,4(N)'luk baskı plakası kuvveti ve 7910(N)'luk zimba kuvveti uygulanarak elde edilmiştir.

Matris açısı 5° , çekme oranı 1,9 alınarak yapılan deneyde 1554,3(N)'luk baskı plakası kuvveti ve 8240(N)'luk zimba kuvveti uygulanarak elde edilmiştir.

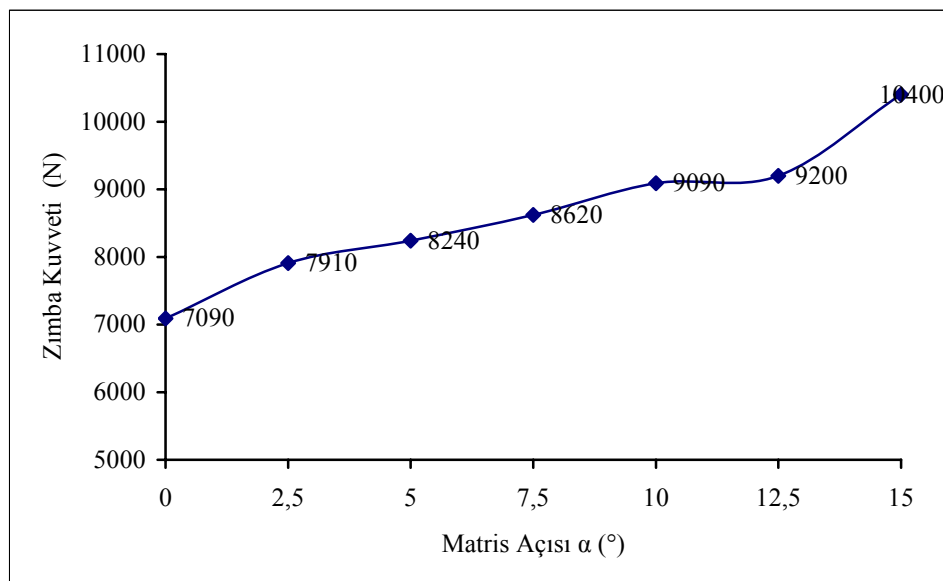
Matris açısı $7,5^\circ$, çekme oranı 1,9 alınarak yapılan deneyde 1554,3(N)'luk baskı plakası kuvveti ve 8620(N)'luk zimba kuvveti uygulanarak elde edilmiştir.

Matris açısı 10° , çekme oranı 1,9 alınarak yapılan deneyde 1036,2(N)'luk baskı plakası kuvveti ve 9090(N)'luk zimba kuvveti uygulanarak elde edilmiştir.

Matris açısı $12,5^\circ$, çekme oranı 2 alınarak yapılan deneyde 1554,3(N)'luk baskı plakası kuvveti ve 9200(N)'luk zimba kuvveti uygulanarak elde edilmiştir.

Matris açısı 15° , çekme oranı 2 alınarak yapılan deneyde 1036,2(N)'luk baskı plakası kuvveti ve 10400(N)'luk zimba kuvveti uygulanarak elde edilmiştir.

Şekil 7.13 matris açısının zimba kuvvetine etkisini göstermektedir.



Şekil 7.13 Matris Açısını zımba kuvveti üzerine etkisi

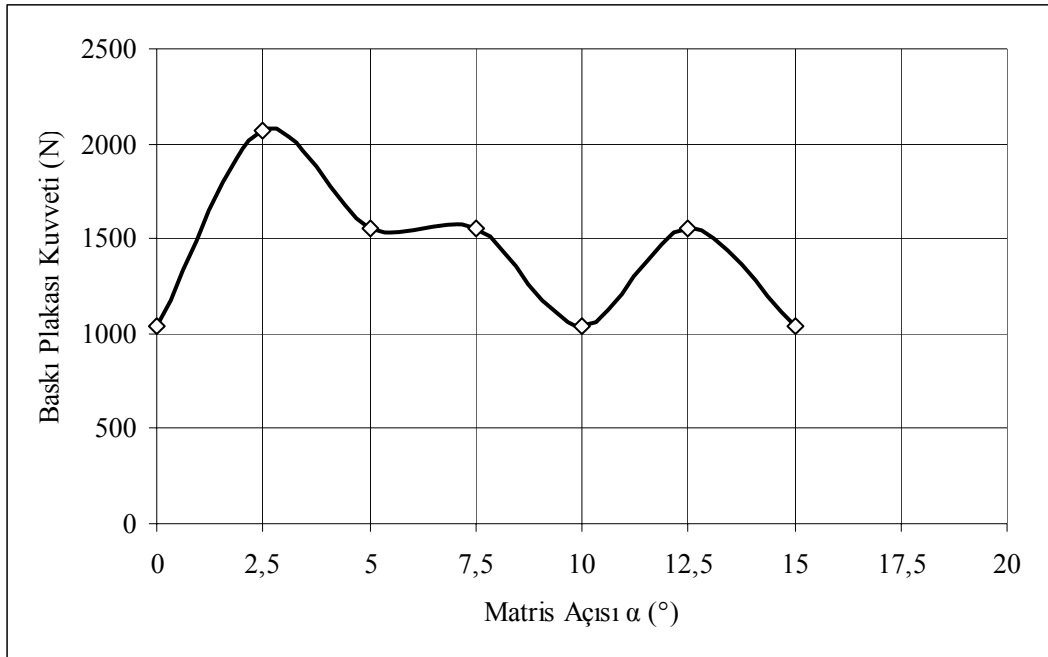
Bu sonuç matris açısı açısının ve çekme oranının artışına bağlı olarak zımba kuvvetinin de orantılı olarak arttığını gösterir.

7.3. Baskı Plakası Kuvveti Değişiminin Derin Çekilebilirliğe Etkileri

Baskı plakası kuvveti derin çekmeye etki eden en önemli faktörlerden biridir. Baskı plakası kuvveti az olursa iş parçasında ondülasyonlar meydana gelir. Baskı plakası kuvveti gereğinden fazla olduğunda ise iş parçasında yırtılmalar oluşur. Bu nedenle baskı plakası kuvveti belirli bir oran dahilinde olmalıdır.

Yapılan deney sonuçlarına göre açılı kalıp kullanılarak gerekli baskı plakası kuvvetinin matris açısına bağlı olarak değiştiği görülmüştür.

Şekil 7.14’da da matris açısına bağlı olarak optimum çekme oranlarının elde edildiği optimum baskı plakası kuvveti değerleri gösterilmektedir.



Şekil 7.14 Kalıp açısı (α) değişiminin, baskı plakası kuvvetine etkisi

Bu sonuçta 10° ve 15°’de çekme oranlarının artmasına rağmen gerekli baskı plakası kuvveti 10362 (N) çıkmamıştır. Bu da açılı kalıplamada önemli bir enerji tasarrufu olduğu anlamına gelmektedir.

7.4. Et Kalınlığı Değişiminin Belirlenmesi

Derin çekme esnasında iş parçası üzerinde birçok gerilmeler meydana gelmektedir. (Şekil 5.16) Bu gerilmelerden etkilenen iş parçasının et kalınlığı değişmektedir.

Derin çekme sonunda iş parçasının taban kısmındaki et kalınlığı değişmemekte; fakat zımba radyüsü ve bu bölgeye yakın kısımlarda incelme olmaktadır. İş parçası duvarının üst kısmında ise kalınlaşma meydana gelmektedir.

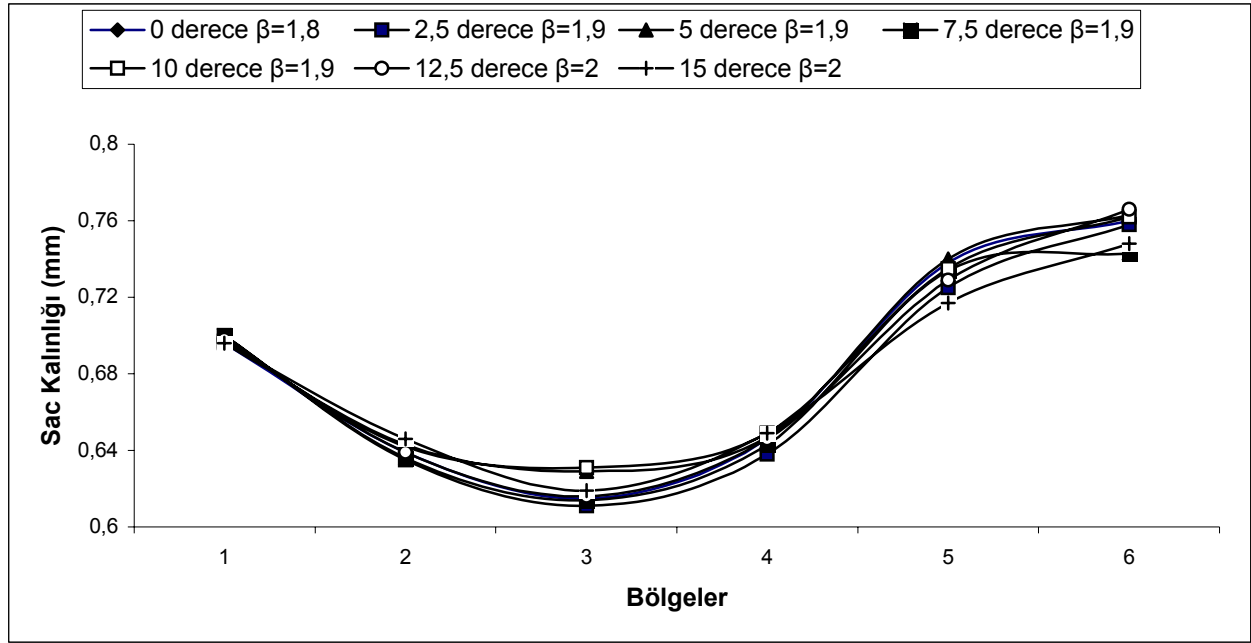
Derin çekme ile imal edilmiş parçaların et kalınlıklarının eşit olması bazı durumlarda önem taşımaktadır. Et kalınlıklarının eşit olmasını sağlamak için derin çekme ile üretilen parçalara ütüleme işlemi yapılmaktadır ki bu da ayrı bir imalat maliyetine neden olmaktadır. Sonuç olarak, et kalınlığı değişiminin belli bir oran dahilinde tutulması önem taşıdığını söylenebilir.

Yapılan deney numunelerinin et kalınlığı değişimleri verilmektedir. Kalınlık ölçümleri Bölüm 6.5’de açıklandığı gibi her parçanın altı farklı bölgesinden yapılmıştır (Şekil 6.6). Deneylerde 0,7 (mm) kalınlığındaki alüminyum sacı kullanılmıştır. Şekil 7.1’de matris açısına göre optimum deney numunesinin kalınlıkları verilmiştir.

Tablo 7.1 Matris açısına göre optimum deney numunesinin kalınlık değişimi

Bölge No	$\alpha=0^\circ$	$\alpha=2.5^\circ$	$\alpha=5^\circ$	$\alpha=10^\circ$	$\alpha=10^\circ$	$\alpha=12,5^\circ$	$\alpha=15^\circ$
	Kalınlık (mm)	Kalınlık (mm)	Kalınlık (mm)	Kalınlık (mm)	Kalınlık (mm)	Kalınlık (mm)	Kalınlık (mm)
1	0,696	0,7	0,696	0,7	0,697	0,698	0,696
2	0,639	0,635	0,643	0,636	0,642	0,639	0,646
3	0,615	0,611	0,629	0,614	0,631	0,616	0,619
4	0,646	0,638	0,647	0,643	0,649	0,646	0,649
5	0,738	0,725	0,74	0,734	0,735	0,729	0,717
6	0,76	0,758	0,763	0,743	0,762	0,766	0,748

Şekil 7.15’de deney sonuçlarındaki matris açısına göre optimum deney numunelerinin et kalınlığı değişimi verilmiştir.



Şekil 7.15 Deney sonuçlarındaki matris açısına göre optimum deney numunelerinin et kalınlığı değişimi

Yukarıdaki şekil ve tabloda da görüldüğü gibi parçaların taban orta noktası olan 1. bölgede et kalınlığı pek fazla değişmemektedir. Parça tabanı ile parça radyüsünün 2. bölgesinde ise et kalınlığı incelmektedir. 3. bölgede 2. bölgeye nazaran et kalınlıklarında azalma meydana gelmiştir. 4. bölgede 3. bölgeye nazaran et kalınlığında artma meydana gelmiştir. 5. ve 6. bölgelerde ise incelme olmamış; aksine et kalınlığı artmıştır.

8. GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu araştırmada metal şekillendirmede kullanılan en önemli yöntemlerden biri olan derin çekme işlemine yeni bir yaklaşım getirilip matris ve baskı plakası yüzeyine aç verilmiştir. Bu kalıp açısının alüminyum (Al 1050) sacının derin çekilebilirliğine etkileri araştırılmıştır. Ayrıca baskı plakası kuvveti değiştirilerek açılı kalıplamada baskı plakası kuvvet değişiminin etkileri de incelenmiştir. Bu araştırma sonucunda elde edilen başlıca sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

- Alüminyum sacının derin çekilmesinde klasik yöntemle imal edilmiş kalıplar kullanıldığında limit çekme oranı 1,8 iken, yapılan çalışmada derin çekme kalıbına aç verilerek limit çekme oranı 2'e kadar çıkartılmıştır.
- Sacın ilk çapı ile zımba çapı arasındaki oran limit çekme oranından büyük olduğu durumlarda iş parçası bir tek kalıpta üretilmemektedir. İş parçası ancak iki veya daha fazla kalıp kullanılarak üretilabilmektedir. Bu da iş parçasının imalat maliyetini arttırmaktadır. Bölüm 8.2.'de de açıklandığı gibi derin matris ve baskı plakası yüzeylerine aç vermek suretiyle gerekli olan kalıp sayısı azaltılmaktadır. Böylece imalat maliyetleri azaltılmaktadır.
- Çekme oranı sabit tutulduğunda açılı kalıplarda üretilen parçaların et kalınlıklarının çok fazla değişmeyip, birbirlerine yakın olduğu görülmektedir.

Yapılan bu tez çalışmasının ardından yapılması mümkün olan çalışmalar şu şekilde sıralanabilir;

- Sanayide sıklıkla kullanılan paslanmaz çelik, bakır v.b. sacların derin çekilmesinde açılı kalıp kullanılmasının derin çekilebilirliğe etkilerinin araştırılması.
- Eksenel simetriye sahip olmayan parçaların derin çekilmesinde açılı kalıp kullanılmasının derin çekilebilirliğe etkilerinin araştırılması.
- Çekme hızının açılı kalıplamada derin çekilebilirliğe etkilerinin araştırılması.
- Bu çalışmanın çift etkili kalıplama sistemi ile yapılması durumunda daha iyi sonuçlar alınacağı düşünülmektedir.
- Farklı geometrik şekillerin derin çekilmesinde çekme oranının araştırılması.

KAYNAKLAR

1. Mona Ögvist, Numerical simulation of mild wear using updated geometry with different step size approaches.(2001)
2. M. Eriksen, The influence of die geometry on tool wear in deep drawing. (1997)
3. C. Boher, D. Attaf, L. Penazzi, C. Levaillant, Wear behaviour on the radius portion of a die in deep-drawing: Identification, localisation and evolution of the surface damage. (2005)
4. Tung-Sheng Yang, Full film lubrication of deep drawing. (1999)
5. S. Thiruvardchelvan, F.W. Travis, T. K. Poh, On the deep drawing of cups with punc and blank-holding forces proportional to a hydraulic pressure. (1999)
6. S.H. Zhang, L.H. Lang, D.C. Kang, J. Danckert, K.B. Nielsen, Hydromechanical deep-drawing of aluminum parabolic workpieces-experiments and numerical simulation.(2000)
7. H. Takuda, K. Mori, I. Masuda, Y. Abe, M. Matsuo, Finite element simulation of warm deep drawing of aluminium alloy sheet when accounting for heat conduction. (2002)
8. H. Takuda, K. Mori, T. Masachika, E. Yamazaki, Y. Watanabe, Finite element analysis of the formability of an austenitic stainless steel sheet in warm deep drawing (2003)
9. S. Thiruvardchelvan, F.W. Travis, Hydraulic-pressure-enhanced cup-drawing processes—an appraisal. (2003)
10. M.T. Browne, M.T. Hillery, Optimising the variables when deep-drawing. (2003)
11. Manabu Gotoh, Young-soo Kim, Minoru Yamashita, A fundamental study of can forming by the stretch-drawing process. (2003)
12. Gotoh, M., Studies of stretch-drawing process of metals, Journal of material processing technology, 123-128 (1997)
13. Colgan, M. Monaghan, J. , Deep drawing process: analysis and experiment Journal of material processing technology, 35-41 (2003)
14. Kampus, Z., Balic, J., Deep drawing of tailored blanks without a blank holder, Journal of material processing technology, 128-133 (2003)
15. Mamalis, .G., et al, Simulation of sheet metal forming using explicit finite element techniques: effect of material and forming characteristics Part 1. Deep-drawing of square sups, Journal of material processing technology, 48-60 (1997)
16. Zhang, G.S. et al., Effect of anisotropy and prebulging on hydromechanical deep drawing of mild steel cups, Journal of material processing technology, 544-550 (2003)
17. Zhang, X.M. et al, Texture evolution during deep drawing of copper sheet, Scripta Material, 1023-1029 (1997)

18. Carlson, R.F., 1961, Metal stamping design, Practice and economical design of stamped metal parts, Prentice Hall, Inc, 178
19. Wilson, R.D. and Hsu, T.C., Refined models for hydrodynamic lubrication in axisymmetric stretch forming, Journal of tribology, 101-109 (1994)
20. Kaftanoğlu, B., 1966, An investigation of stretch forming in relation to deep drawing and testing sheet metal, Ph.D Thesis Imperial Collage University of London, (1966)
21. Weili, X., Huibao, W., Yuying, Y. and Wang, Z.R., 'A simplified method of wrinkling simulation', Journal of Materials Processing Technology 121 (2002) 19-22.
22. Gunnarsson, L., Asnafı, N. and Schedin E., 'In-process control of blank holder force in axisymmetric deep drawing with degressive gas springs', Journal of Materials Processing Technology 73 (1998) 89-96.
23. Moon, Y.H., Kang, Y.K., Park, J.V. and Gong, S.R., 'Tool temperature control to increase the deep drawability of aluminum 1050 sheet', International Journal of Machine Tools & Manufacture 41 (2001) 1283-1294.
24. Sato, E., Shimizu, T., Sano, T. and Fuchizawa, S., 'Effect of multi-axial loading path on limiting drawing ratio', Journal of Materials Processing Technology 63 (1997) 60-65.
26. Jimma, T., Kasuga, Y., Iwaki, N., Miyazawa, O., Mori, E., Ito, K. and Hatano, H., 'An application of ultrasonic vibration to the deep drawing process', Journal of Materials Processing Technology 80-81 (1998) 406-412.
27. Manabe, K., Koyama, H., Yoshihara, S. and Yagami, T., 'Development of a combination punch speed and blank-holder fuzzy control system for the deep-drawing process', Journal of Materials
28. Çapan, L., 1999, Metallerde Plastik Şekil Verme, İstanbul: Çağlayan Kitabevi
29. Weissbach, W., 1977, Malzeme Bilgisi ve Muayenesi (ANIK, S., ANIK, E. S., Çev.). İstanbul: Birsen Yayınevi (Özgün çalışma: 1967. Werkstoffkunde und Werkstoffprüfung).
30. Bargel, H., J., ve Schulze, G., 1993, Malzeme Bilgisi, Cilt: 1,2 (ARAN, A, GÜLEÇ, Ş., Çev.). İstanbul: İTÜ Makine Fakültesi Ofset Atölyesi. (Özgün çalışma) Werkstoffkunde, Dusseldorf: VDI Verlag GMBH
31. Van vlack, L., H., 1964, Elements of Materials Science, Reading, Massachusetts Addison . Wesley Publishing Co
32. Topaç, M. M., 2003, Karbonlu çeliklerde derin çekmeye etki eden faktörlerin incelenmesi, Yüksek lisans tezi, Dokuz eylül üniversitesi fen bilimleri enstitüsü
33. Anık, S., ve arkadaşları, 2000, İmal Usulleri, İstanbul: Birsen Yayınevi
34. Çapan, L., 1977, Plastik Şekil Verme Teori ve Uygulama, İstanbul: Birsen Kitabevi Yayınları,

35. Bickel, E., 1964, die Metallischen Werkstoffe des Maschinenbaues, Berlin, Göttingen, Heidelberg: Springer . Verlag
36. Çapan, L., 1979, Derin Çekmede Allotropi, Doçentlik Tezi, İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi, Makina Fakültesi
37. Avner, S., H., 1974, Introduction to Physical Metallurgy, New York: McGraw . Hill Book Company
38. Cottrell, A., 1975, An Introduction to Metallurgy, Bath: Edward Arnold (Publishers) Ltd.
39. Hosford, W. F. ve Caddell, R. M., 1983, Metal Forming Mechanics and Metallurgy, Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice . Hall International, Inc
40. Schey, J.,A., 2000, Introduction to Manufacturing Processes, New York: McGraw . Hill Companies, Inc.
41. Mielnik, E., M., 1991, Metalworking Science and Engineering, New York: McGraw. Hill, Inc.
42. Güneş, T., 1990, Pres İleri Tekniği Bölüm II, Ankara: TMMOB-MMO Yayınları, Yayın No: 130.
43. Gavas, M., 2002, Çok İnce Çelik Sacların Elastik Şekillendirilmesi. Mühendis ve Makina, 18-25
44. Panserı, C., 1957, Manuale Di Tecnologia delle Leghe Leggere da Lavorazione Plastica, Milano: Ulrico Hoepli Editore
45. Kalpakjian, S., and Schmid, S. R., 2001, Manufacturing Engineering and Technology, New Jersey: Prentice Hall, Inc.
46. Johnson, W., and Mellor, P. B., 1978, Engineering Plasticity, Workingam, Beckshire: Van Nostrand . Reinhold Company LTD, Molly Millars. Lane.
47. Tlusty, J., 2000, Manufacturing Processes and Equipment, New Jersey: Prentice . Hall, Inc.
48. Alexander, J. M., and Brewer, R. C., 1963, Manufacturing Properties of Materials, London: D. Van Nostrand Company LTD.
49. Güneş, T., 2002, Pres işleri tekniği cilt II, Makine mühendisleri odası yayın no:307
50. Saniee, F. F. and Montazeran, M. H., 2003, A comparative estimation of the forming load in the deep drawing process, Journal of Materials Processing Technology, vol 140, page 555-561

ÖZGEÇMİŞ

1979 yılında Elazığ'da doğan Faruk AYTAÇ ilk, orta ve lise eğitimini Elazığ'da tamamladı. 1996 yılında Merkez Endüstri Meslek Lisesinden mezun olduktan sonra 1997 yılında Fırat Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Talaşlı Üretim Öğretmenliği Bölümünde lisans eğitimine başladı. 2002 yılında mezun olduktan sonra 2004 yılında Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Eğitimi Ana Bilim Dalında yüksek lisans eğitimine başladı.