

İTÜ Makina Fakóltesi  
İmal Usulleri Ders Notları

# PLASTİK ŞEKİL VERME ve TEKNOLOJİSİ

Prof.Dr.Ahmet Aran – Doç.Dr.Mehmet Demirkol

---

## İÇİNDEKİLER

---

1. Giriş
2. Mekanik Esaslar
3. Metallurjik Esaslar
4. Dövme
5. Haddeme
6. Ekstrüzyon
7. Çekme
8. Saç İşleme Yöntemleri

---

1995

## 1. GİRİŞ

Plastik şekil verme (PŞV), metallere katı durumda ve hacimleri sabit kalacak şekilde yapılan bir şekillendirme işlemidir. Katı durumdaki metalin sürekliliği bozulmadan, yani kırılma ve ayrılma olmadan şekillendirilebilmesi için malzeme plastik şekil değiştirme kabiliyetinin iyi bilinmesi, bunun yanında ayrıca işlem için gerekli basınç, kuvvet ve güç seviyelerinin de bilinmesi önemlidir. Yöntemin başarısı için malzeme özellikleri ile işlem parametrelerinin birbirine uygun olarak seçimi çok önemlidir.

Diğer üretim yöntemleriyle karşılaştırıldığında Plastik Şekil Vermenin şu belirgin özellikleri taşıdığı görülür:

a. Plastik şekil vermede malzemenin kütle ve hacmi sabit kalır, sadece biçimi değişir.

b. Plastik şekil verme yüksek sıcaklıkta yapılırsa, malzemenin birincil katılaşması sırasında oluşmuş boşluk ve gözenekler (oksitlenmemiş olmaları koşuluyla) kapanır. Bunun yanında iri ve çubuksu taneler de kırılarak, yeniden kristalleşme neticesinde kaba döküm yapısı yerini ince taneli, homojen bir iç yapıya bırakır. Bu sayede mekanik özelliklerde (akma dayanımı, çekme dayanımı, yorulma dayanımı, darbe dayanımı, kırılma tokluğu, süneklik, darbe dayanımı vs.) önemli iyileşmeler görülür. Bunların yanı sıra yorulma dayanımı ve kırılma tokluğu gibi özelliklerinde de gelişme görülür.

c. Plastik şekillendirme soğuk olarak yapılırsa oluşan pekleşmeden yararlanarak malzemenin dayanımı arttırılabilir.

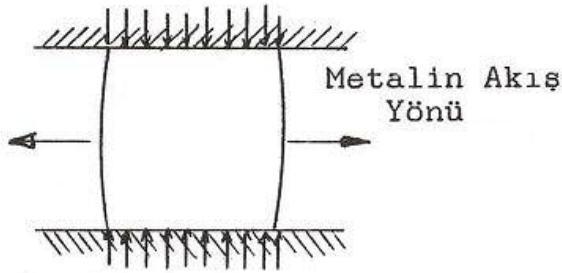
d. Plastik şekil verme yöntemleriyle dar toleranslara sahip hassas parçalar üretilebilir. Özellikle soğuk şekil vermeyle çok kaliteli yüzeyler elde edilebilmektedir.

e. Plastik şekillendirmede kullanılan tezgah ve takımlar (pres, hadde, şahmerdan, kalıplar, vs.) pahalı olduğundan, yöntem genellikle seri üretimler için ekonomiktir.

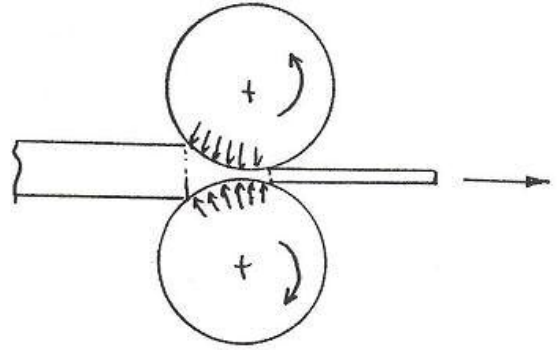
Değişik amaçlarla kullanılabilen çok sayıda plastik şekil verme yöntemi geliştirilmiş olup, bunlar deformasyon için uygulanan kuvvet veya gerilmenin türü ile metalin şekillendirme sırasındaki akış yönüne bağlı olarak şu şekilde sınıflandırılmaktadırlar:

### 1.1. Doğrudan Basma Yöntemleri

Bu yöntemlerde şekillendirme için gerekli basma yükü veya gerilmesi parçanın yüzeyine doğrudan uygulanmaktadır. Metalin akma yönü ise basma gerilmesinin yönüne diktir. Bu tür işlemlere örnek olarak dövme ve haddeleme işlemleri gösterilebilir.



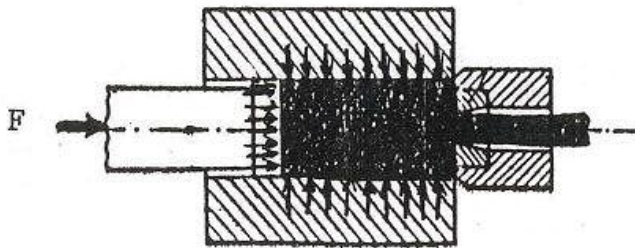
DÖVME



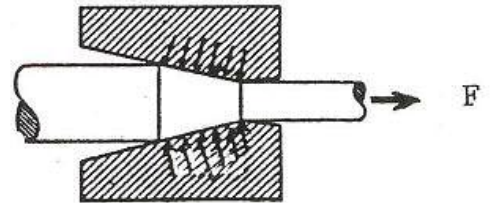
HADDELEME

### 1.2. Dolaylı Basma Yöntemleri

Burada deformasyonu sağlayan basma gerilmeleri, kalıp geometrisine ve yöntemin özelliklerine bağlı olarak uygulanan dış kuvvetler yardımıyla dolaylı olarak oluşturulur. Bu tür şekillendirmelere örnek olarak tel çekme, ekstrüzyon gibi işlemler örnek gösterilebilir. Örnek olarak verilen tel çekmede matris içinde deformasyonu sağlayan basma gerilmeleri, ürünün çıkış tarafından uygulanan çekme kuvvetleri ile sağlanmaktadır.



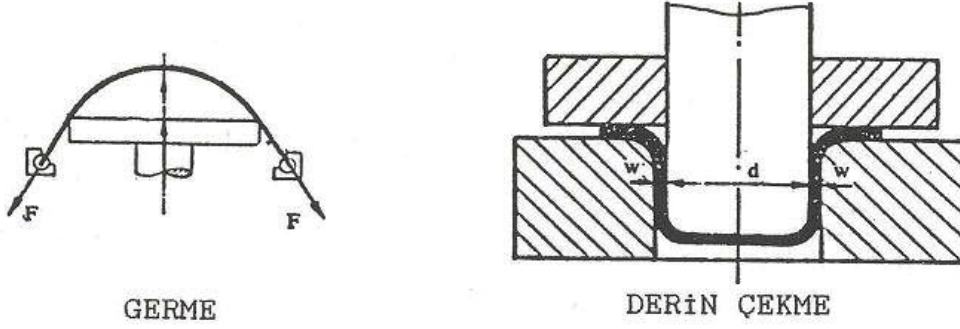
EKSTRÜZYON



TEL ÇEKME

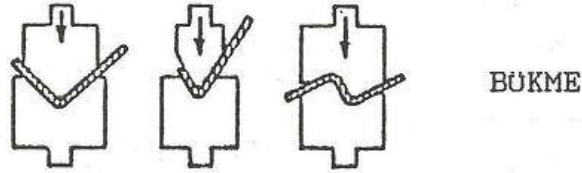
### 1.3. Çekme Yöntemleri

Genellikle sac ve levha şeklindeki metallere uygulanan bu tür yöntemlerde malzeme çekme veya basma gerilmeleri altında şekillendirilmektedir. Derin çekme ve germe bu tür işlemlere örnektir.



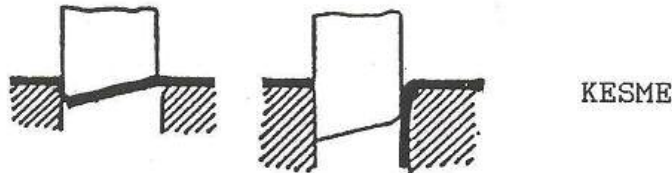
### 1.4. Eğme Yöntemleri

Uygulanan eğme momenti parçanın şekillenmesini sağlar. Bükme işlemi bu yöntemlere bir örnektir.



### 1.5. Kesme Yöntemleri

Metalin ayrılmasını sağlayacak seviyelerde kesme kuvvetleri uygulanarak yapılan şekillendirme işlemleridir. Kesme, dilme bu tür işlemlere örnek olarak verilebilir.



Bu ders notunda önce plastik şekil verme ile ilgili mekanik ve metalurjik temel bilgiler verilecek, daha sonra plastik şekil verme yöntemleri teker teker ele alınarak teknolojik bilgiler sunulacaktır.

## 2. MEKANİK ESASLAR

Bu bölüm kapsamında plastik şekil verme ile ilgili mekanik esaslı temel bilgiler özetlenmektedir.

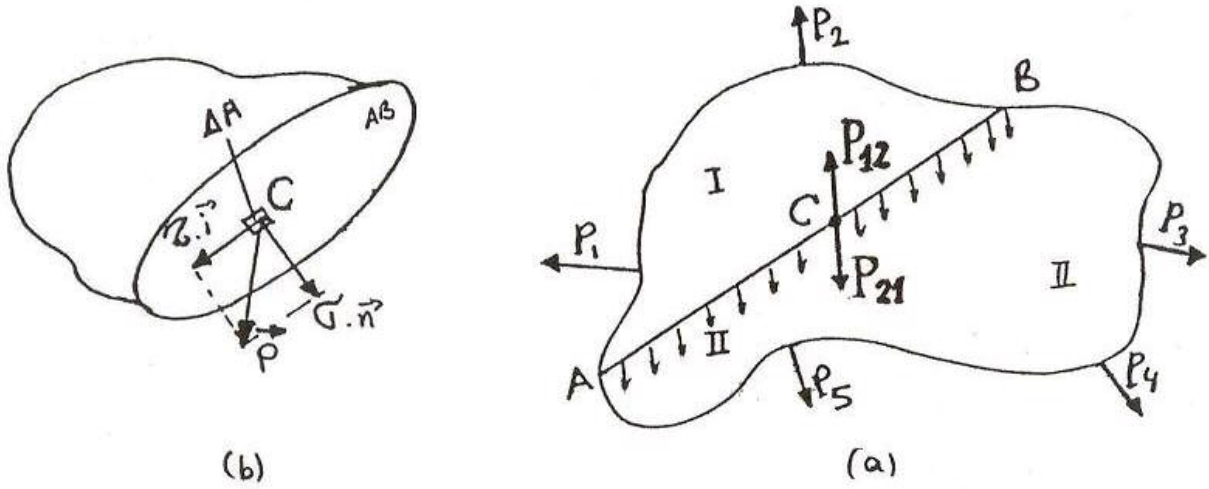
### 2.1. Gerilme ve Gerilme Hali

Bir cisimde dış kuvvetler veya diğer etkenler (ısı, manyetik vb.) nedeniyle oluşan iç kuvvetlerin ana karakteristiklerinden biri de parça içinde yayılı bir yük oluşturmalarıdır. İç kuvvetlerin herhangi bir noktadaki etkisini belirtmek için, o nokta civarında birim alana düşen kuvvet esas olarak alınır ve buna gerilme adı verilir.

Şekil 2-1'de görüldüğü gibi,  $P_1, \dots, P_n$  dış kuvvetlerinin etkisi altındaki bir cisim AB düzlemi boyunca ikiye ayrılalım. İkinci kısma etkiyen bileşke kuvvet  $P_{21}$  olsun. AB düzlemi üzerindeki herhangi bir C noktası civarındaki  $\Delta A$  alanına düşen iç kuvvet  $\Delta \vec{P}$  ise, C noktasındaki  $\vec{P}$  gerilmesi;

$$\vec{P} = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{P}}{\Delta A}$$

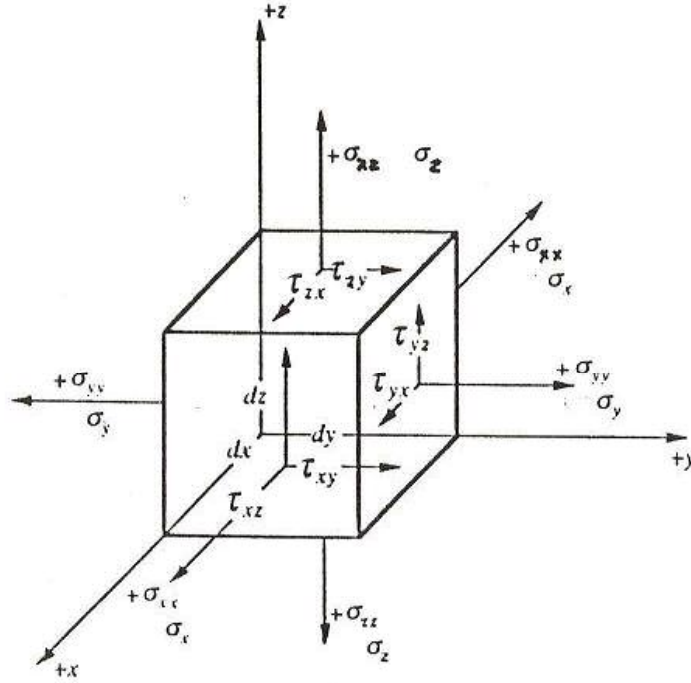
olarak tanımlanır.  $\vec{P}$ 'nin bu düzlem içindeki bileşeni  $\tau \cdot \vec{i}$  Kayma Gerilmesi, düzleme dik bileşeni ise  $\sigma \cdot \vec{n}$  Normal Gerilme olarak adlandırılır.



Şekil 2-1: a. Dış kuvvetler etkisindeki bir cismin denge durumu, b. C noktasındaki gerilme bileşenleri

### 2.1.1. Gerilme Hali

AB düzlemi C noktası etrafında döndüğünde  $p$  gerilmesi de konuma bağlı olarak değişmektedir. C noktasının gerilme halini tam olarak tanımlayabilmek için o noktadan geçen bütün düzlemler üzerindeki gerilmelerin bilinmesi gerekir. Bu nedenle bir noktada etkin olan gerilme halini kesinlikle belirtebilmek için bu noktadan geçen herhangi bir Kartezyen koordinat takımının birbirine dik olan üç ayrı düzlemdeki gerilmelerin verilmesi gerekmektedir. Bu durumda o noktadan geçen herhangi bir düzlemde etkiyen gerilme, bu bileşenler cinsinden ifade edilebilir. Şekil 2-2'de bir kübik elementer kübe etkiyen gerilme bileşenleri verilmektedir.



Şekil 2-2: Bir elementer kübe etkiyen gerilme bileşenleri

### 2.1.2. indisler

$\sigma$  normal gerilmelerinin altında yer alan indis, bu gerilmelerin hangi eksene paralel olduğunu gösterir.  $\tau$  kayma gerilmelerinin altındaki birinci indis, bu kayma gerilmesinin etkiği düzleme ait normal doğrultusunu, ikinci indis ise kayma gerilmesinin paralel olduğu doğrultuyu göstermektedir. Örneğin  $\tau_{xy}$ , X eksenine dik düzlemde etkin olan ve Y eksenine paralel konumda bulunan kayma gerilmesini ifade etmektedir.

### 2.1.3. isaretler

Normal gerilmelerden çekme gerilmeleri pozitif, basma gerilmeleri negatif olarak gösterilirler. Kayma gerilmesinin etkidiği düzlemdeki normal gerilme, paralel olduğu koordinat ekseninin pozitif yönünde ise, kayma gerilmelerinin diğer eksenlere paralel ve onlarla aynı yönde etki eden bileşenleri pozitif olarak dik-kate alınır. Aynı şekilde, kayma gerilmesinin etkidiği düzlemdeki normal gerilme paralel olduğu eksenin negatif yönünde ise, kayma gerilmeleri de paralel oldukları koordinat eksenlerinin negatif yönünde olmaları durumunda pozitif olarak alınır.

Bir noktadaki gerilme hali ancak dokuz bileşenin tam olarak bilinmesi halinde tanımlanabilir:

$$\begin{array}{ccc} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{array}$$

Eksenler etrafındaki moment dengesi yazılarak;

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} \quad \tau_{yz} = \tau_{zy} \quad \tau_{zx} = \tau_{xz}$$

olduğu gösterilebilir ve gerilme halini belirleyen bileşen sayısı altı'ya düşer. Gerilme ve ileride görüleceği gibi şekil değişimi 2. dereceden bir tansör olup kısaca  $\sigma_{ij}$  olarak gösterilebilir.

$$\begin{array}{ccc} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{array} \quad \begin{array}{l} \sigma_{11} = \sigma_x \\ \sigma_{22} = \sigma_y \\ \sigma_{33} = \sigma_z \end{array} \quad \begin{array}{l} \sigma_{12} = \sigma_{21} = \tau_{xy} \\ \sigma_{13} = \sigma_{31} = \tau_{xz} \\ \sigma_{23} = \sigma_{32} = \tau_{yz} \end{array}$$

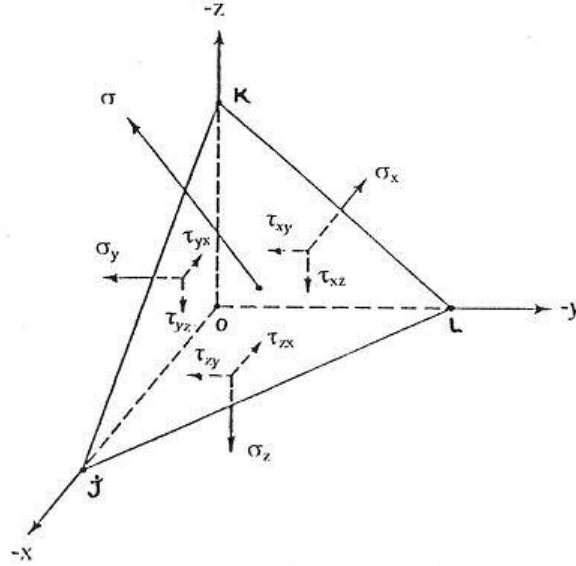
Gerilme tansörünün bileşenlerinin bilinmesi halinde, o noktadan geçen herhangi bir düzleme etkiyen gerilmeler bulunabilir.

### 2.1.4. Üç Eksenli Gerilme Hali ve Asal Gerilmeler

Bir noktadan geçen sonsuz sayıdaki düzlem arasında, üzerinde kayma gerilmelerinin sıfır olduğu düzlemler Asal Düzlemler, bu düzleme etkiyen normal gerilmeler ise Asal Gerilmeler olarak tanımlanır. Asal gerilmeler  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  ve  $\sigma_3$  şeklinde gösterilerek aritmetik olarak büyükten küçüğe doğru sıralanırlar.

Birbirine eşit olmayan üç asal gerilmenin bulunması durumunda Üç Eksenli Gerilme Hali meydana gelir. Asal gerilmelerden ikisinin aynı değerde olması durumunda gerilme hali silin-dirik, üçünün de aynı olması durumunda küresel veya daha iyi bilinen adıyla Hidrostatik gerilme hali oluşur. Asal gerilmelerden birinin sıfır olması halinde düzlemsel, ikisinin sıfır olması halinde ise tek eksenli gerilme hali söz konusudur.

Bir noktada etkiyen asal gerilmelerin bilinmesi durumunda bu noktadan geçen ve kosinüs doğrultmanları verilen herhangi bir düzlemdeki gerilmeler Şekil 2-3'te görülen üçgen piramit şeklindeki elementer hacmin dengesinden yararlanılarak hesaplanabilir.



Şekil 2-3: Üçgen piramit hacime etkiyen gerilmeler

Burada;

$$JKL = A \quad (\text{Normal gerilme } \sigma \text{ 'nın etkidiği alan})$$

$l$ : düzlem normalinin  $x$  koordinatı ile yaptığı açının kosinüsü  
 $m$ : düzlem normalinin  $y$  koordinatı ile yaptığı açının kosinüsü  
 $n$ : düzlem normalinin  $z$  koordinatı ile yaptığı açının kosinüsü

dür. Elementer hacime etkiyen kuvvetlerin dengede bulunması koşulu yazılırsa,  $\sigma$  gerilmesinin bileşenleri;

$$\sigma_x = \sigma \cdot l, \quad \sigma_y = \sigma \cdot m, \quad \sigma_z = \sigma \cdot n$$

olarak bulunur. Öte yandan

$x$	yönüne dik konumda bulunan alan	$KOL = A \cdot l$
$y$	" " " " " "	$JOK = A \cdot m$
$z$	" " " " " "	$JOL = A \cdot n$

şeklinde hesaplanabilir.

$x$  doğrultusunda etkiyen kuvvetlerin denge durumu için;

$$\sigma \cdot A \cdot l - \sigma_x \cdot A \cdot l - \tau_{yx} \cdot A \cdot m - \tau_{zx} \cdot A \cdot n = 0$$



şartı sağlanmalıdır. Bu eşitlik sadeleştirmeler sonrasında

$$(\sigma - \sigma_x).l - \tau_{yx}.m - \tau_{zx}.n = 0$$

durumuna gelir. Diğer doğrultular için de benzer şekilde;

$$\begin{aligned} -\tau_{xy}.l + (\sigma - \sigma_y).m - \tau_{zy}.n &= 0 \\ -\tau_{xz}.l - \tau_{yz}.m + (\sigma - \sigma_z).n &= 0 \end{aligned}$$

elde edilir. Bu bağıntılar aynı zamanda lineer bir denklem takımı oluştururlar. Kosinüs doğrultmanlarının (düzlem normalleri ile sözkonusu gerilmenin doğrultusu arasındaki açılarının kosinüsleri) tümü birden sıfır olamayacağı için bu denklem takımının çözümü, ancak bunların katsayılar determinantının sıfır olduğu durumda mümkündür.

$$\begin{vmatrix} \sigma - \sigma_x & -\tau_{xy} & -\tau_{zx} \\ -\tau_{xy} & \sigma - \sigma_y & -\tau_{zy} \\ -\tau_{xz} & -\tau_{yz} & \sigma - \sigma_z \end{vmatrix} = 0$$

Bu determinantın çözümü, kökleri asal gerilmeleri verecek olan  $\sigma$ 'nın üçüncü dereceden polinomudur.

$$\begin{aligned} \sigma^3 - (\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z).\sigma^2 + (\sigma_x.\sigma_y + \sigma_y.\sigma_z + \sigma_z.\sigma_x - \tau_{xy}^2 - \tau_{xz}^2 - \tau_{yz}^2).\sigma \\ - (\sigma_x.\sigma_y.\sigma_z - 2.\tau_{xy}.\tau_{yz}.\tau_{zx} - \sigma_x.\tau_{yz}^2 - \sigma_y.\tau_{xz}^2 - \sigma_z.\tau_{xy}^2) = 0 \end{aligned}$$

Bu denklemin kökleri  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ , ve  $\sigma_3$  asal gerilmelerini verecektir. Bunlar aritmetik olarak en büyükten en küçüğe doğru sıralanmaktadır. Aynı fonksiyon bir başka gösterişle;

$$\sigma^3 - I_1.\sigma^2 - I_2.\sigma - I_3 = 0$$

şeklinde de yazılabilir. Buradaki katsayılar;

$$I_1 = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z$$

$$I_2 = \sigma_x.\sigma_y + \sigma_y.\sigma_z + \sigma_z.\sigma_x - \tau_{xz}^2 - \tau_{xy}^2 - \tau_{yz}^2$$

$$I_3 = \sigma_x.\sigma_y.\sigma_z + 2.\tau_{xy}.\tau_{yz}.\tau_{zx} - \sigma_x.\tau_{yz}^2 - \sigma_y.\tau_{xz}^2 - \sigma_z.\tau_{xy}^2$$

şeklinde tanımlanmakta olup Gerilme invariantları olarak adlandırılmaktadır. Bu değerler herhangi bir gerilme hali için sabittir. Özellikle  $I_1$  invariantı, herhangi bir konumdaki normal gerilmelerin toplamının, değişik bir diğer konumdaki normal gerilmelerin toplamına eşit olduğunu göstermesi açısından büyük önem taşımaktadır. Buna göre

$$\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$$

ifadesi yazılabilmektedir.

### 2.1.5. Bazı Özel Gerilme Halleri

Aşağıdaki şekillerde bazı basit özel gerilme halleri verilmektedir:

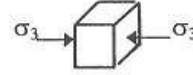
i. Basit Çekme Hali

$$\sigma_1 > 0 \quad \sigma_2 = \sigma_3 = 0$$



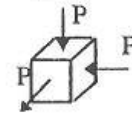
ii. Basit Basma Hali

$$\sigma_3 < 0 \quad \sigma_1 = \sigma_2 = 0$$



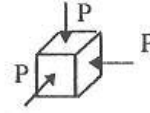
iii. Silindirik Gerilme Hali

$$\sigma_1 \neq \sigma_2 = \sigma_3$$



iv. Hidrostatik Basınç Hali

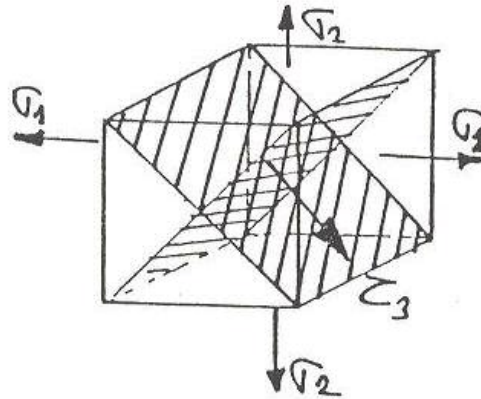
$$\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = P$$



Kayma gerilmelerinin maksimum olduğu düzlemlere ise asal kayma düzlemleri adı verilir. Şekil 2-4'te bir örneği gösterilen bu düzlemler, asal doğrultular ile 45°'lik açılar yapmaktadır. Bu düzlemlerdeki en büyük kayma gerilmeleri asal gerilmeler cinsinden,

$$\tau_1 = \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{2}, \quad \tau_2 = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}, \quad \tau_3 = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2}$$

şeklinde elde edilmektedir.

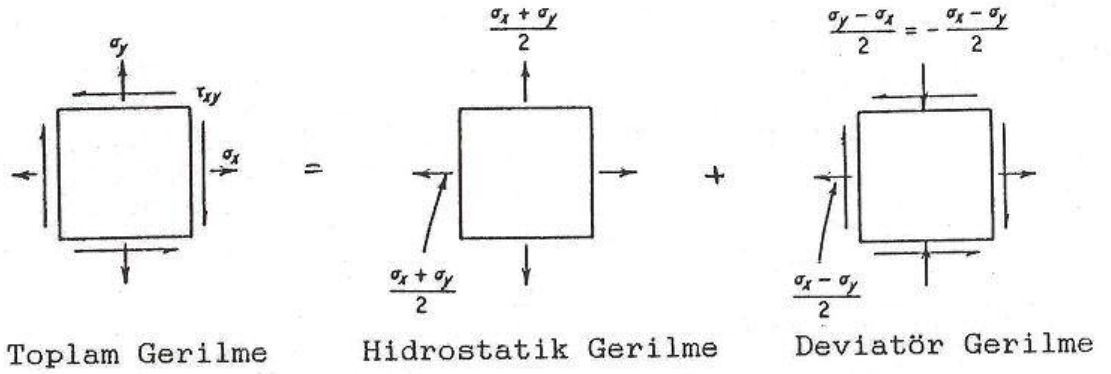


Şekil 2-4: Asal kayma düzlemleri

### 2.1.6. Deviator Tansör

ileride de sözü edileceği gibi her doğrultudan eşit olarak etkiyen hidrostatik basınç herhangi bir kayma gerilmesi yaratmayacağından, plastik şekil verme olayına etkisi yoktur. Bu nedenle gerilme tansörü, bir *hidrostatik* (küresel) ve bir *deviator* tansörün toplamı şeklinde ifade edilmeye çalışılır.

Bunun daha iyi anlaşılabilmesi için Şekil 2-5'de iki eksenli gerilme hali için verilen durumun incelenmesi gerekmektedir.



Şekil 2-5: iki eksenli gerilme durumunda hidrostatik ve deviatorik bileşenler.

Görüldüğü gibi hidrostatik gerilme tansörünün elemanları

$$\sigma_m = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2}$$

değerini almakta olup, toplam gerilme tansörü

$$\sigma_{ij} = P_{ij} + \sigma'_{ij}$$

Toplam Gerilme
Hidrostatik Bileşen
Deviator Bileşen

şeklinde yazılabilmektedir. Burada hidrostatik bileşene ortalama gerilme adı da verilmektedir. Genel hal olan üç eksenli gerilme durumunda ise hidrostatik ile deviator gerilme bileşenlerinin ayrılması şu şekilde gerçekleşmektedir:

$$\sigma_m = \frac{\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z}{3} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3}$$

olmak üzere hidrostatik gerilme matrisi

$$P_{1j} = \begin{vmatrix} \sigma_m & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_m & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_m \end{vmatrix}$$

şeklinde, deviator gerilme tansörü ise,

$$\sigma'_{1j} = \begin{vmatrix} (\sigma_x - \sigma_m) & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & (\sigma_y - \sigma_m) & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & (\sigma_z - \sigma_m) \end{vmatrix}$$

şeklinde yazılabilir. Veya

$$(\sigma_x - \sigma_m) = \sigma_x - \frac{\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z}{3} = \frac{2 \cdot \sigma_x - \sigma_y - \sigma_z}{3}$$

ilişkisini kullanarak, deviator gerilme tansörünü daha önce yazılmış bulunan hali ile

$$\sigma'_{1j} = \begin{vmatrix} \frac{2 \cdot \sigma_x - \sigma_y - \sigma_z}{3} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \frac{2 \cdot \sigma_y - \sigma_z - \sigma_x}{3} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \frac{2 \cdot \sigma_z - \sigma_y - \sigma_x}{3} \end{vmatrix}$$

şeklinde de yazmak mümkündür.

Plastik şekil değişimi için kristal kafes içinde dislokasyon hareketlerine ve dolayısıyla kayma gerilmelerine gerek vardır. Kayma gerilme bileşenleri hidrostatik gerilme tansöründe bulunmadığından plastik şekil değişimi analizlerinde sadece deviator tansörün bileşenlerinden yararlanılmaktadır.

Deviator gerilmenin asal bileşenlerini bulmak için aşağıdaki üçüncü dereceden denklemin köklerini bulmak gerekir:

$$(\sigma')^3 - J_1 \cdot (\sigma')^2 - J_2 \cdot \sigma' - J_3 = 0$$

Burada  $J_1$ ,  $J_2$  ve  $J_3$  katsayıları deviator gerilme tansörünün invariantları olup şu değerleri almaktadır:

$$J_1 = (\sigma_x - \sigma_m) + (\sigma_y - \sigma_m) + (\sigma_z - \sigma_m)$$

$$J_2 = \frac{1}{6} [(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6 \cdot (\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)]$$

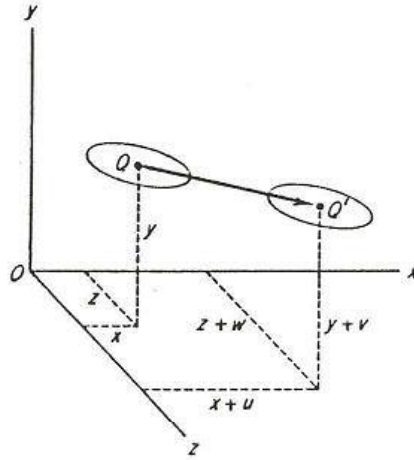
$$J_3 = \text{Deviator tansörün determinantıdır.}$$

## 2.2. Şekil Değiştirme

Şekil 2-6'da verilen cismin içindeki bir Q noktası herhangi bir şekil değişimi sırasında Q' noktasına gitmiş olsun. Bu durumda yer değiştirme bileşenleri (u,v,w) olup, Q nun yer değişimi vektörü

$$\vec{u}_Q = f(u,v,w)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Kütle içindeki tüm noktalar için bu vektör sabitse parça sadece ötelenmiş olup herhangi bir şekil değişimine uğramamıştır.

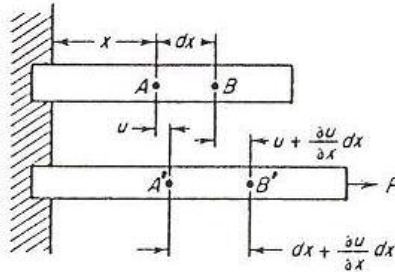


Şekil 2-6: Yer değiştirme vektörleri

Ancak genel olarak,

$$\vec{u}_i = f(x_i, y_i, z_i)$$

olup şekil değişimleri de söz konusudur. Diğer bir deyişle şekil değişimi miktarı cismin içinde bulunduğu noktadan noktaya farklılık göstermektedir. Bu en basit şekilde Şekil 2-7'de verilen tek eksenli şekil değişimi örneğinde şu şekilde açıklanabilir:



Şekil 2-7: Bir boyutta şekil değişimi

Bir ucu sabit AB çubuğu B ucundan çekilsin. Deforme olmamış durumda A ve B noktaları birbirlerinden  $dx$  mesafesi kadar uzak olsun. X yönünde bir kuvvet etkidiğinde A, A' noktasına; B ise B' noktasına gider ve AB arasındaki noktaların u deplasmanı aynı zamanda bu noktaların konumuna, yani x'e bağlı olduğu için B', A' noktasından daha fazla sağa kayar. Bu durumda birim şekil değişimi

$$e_x = \frac{\Delta L}{L} = \frac{A'B' - AB}{AB} = \frac{dx + \frac{\partial u}{\partial x} dx - dx}{dx} = \frac{\partial u}{\partial x}$$

olup, her bir noktanın yer değişimi  $u=e_x \cdot x$  şeklinde yazılabilir. Bu sonuç üç boyutlu durum için genelleştirilirse,

$$\begin{aligned} u &= e_{xx} \cdot x + e_{xy} \cdot y + e_{xz} \cdot z \\ v &= e_{yx} \cdot x + e_{yy} \cdot y + e_{yz} \cdot z \\ w &= e_{zx} \cdot x + e_{zy} \cdot y + e_{zz} \cdot z \end{aligned}$$

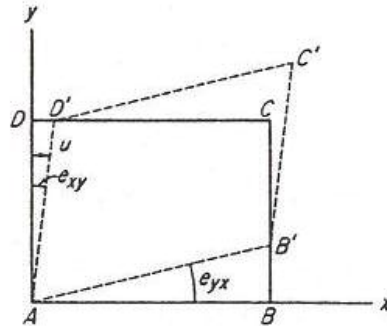
elde edilir veya tıpkı gerilmeye olduğu gibi

$$u_i = e_{ij} \cdot x_j$$

şeklinde tansörel bir ifade ile temsil edilebilir. Yer değiştirme tansörünün üç bileşeninin fiziksel anlamı basittir:

$$e_{xx} = \frac{\partial u}{\partial x}, \quad e_{yy} = \frac{\partial v}{\partial y}, \quad e_{zz} = \frac{\partial w}{\partial z}$$

Bunlar bir doğrultuda ilerledikçe aynı doğrultudaki yer değişimi vektörü bileşeninin artışını karakterize etmektedir. Diğer kayma bileşenleri için Şekil 2-8 incelenecek olursa,



Şekil 2-8: Kayma Şekil değişimi

AD çizgisi boyunca noktalar x eksenine paralel olarak yer değiştirmekte ancak yer değişiminin miktarı y boyunca

artmaktadır. Yani  $e_{xy}$ , artan  $y$  ile,  $x$  doğrultusundaki yer değişimi vektörü bileşeninin ( $u$ ) artışını vermektedir:

$$e_{xy} = \frac{DD'}{DA} = \frac{\partial u}{\partial y}$$

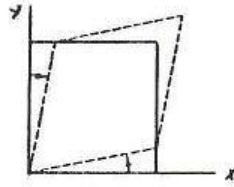
Benzer şekilde diğer eksen için

$$e_{yx} = \frac{BB'}{AB} = \frac{\partial v}{\partial x}$$

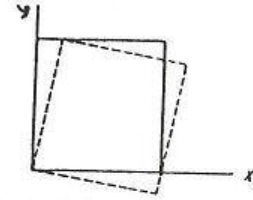
yazılabilir. Bu durumda herhangi bir noktadaki üç boyutlu yer değiştirme tansörü aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$e_{ij} = \begin{vmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} & \frac{\partial u}{\partial y} & \frac{\partial u}{\partial z} \\ \frac{\partial v}{\partial x} & \frac{\partial v}{\partial y} & \frac{\partial v}{\partial z} \\ \frac{\partial w}{\partial x} & \frac{\partial w}{\partial y} & \frac{\partial w}{\partial z} \end{vmatrix}$$

Burada  $e_{xy}$ ,  $e_{yx}$ , ..... gibi bileşenler, hem kayma şekil değişimini, hemde rijit cisim dönmesini içermektedir. Örneğin Şekil 2-9'da görüldüğü gibi ters indisli birim şekil değişimleri birbirine eşitse kayma, birbirinin ters işaretlisi olarak eşitse dönme meydana gelmektedir.



$e_{xy} = e_{yx}$  ise KAYMA



$e_{xy} = -e_{yx}$  ise DÖNME

Şekil 2-9: Kayma ve dönme

Plastik şekil vermede sadece şekil değişimleri ile ilgilendiği için, bunların dönmeden ayrılması gerekmektedir. Bu amaçla  $e_{ij}$ 'yi ikiye ayırıp her parçaya  $(1/2)e_{ji}$ 'nin eklenip çıkarılması durumunda,

$$e_{ij} = \frac{1}{2} (e_{ij} + e_{ji}) + \frac{1}{2} (e_{ij} - e_{ji})$$

$$(e_{ij}) = (e_{ij}) + (w_{ij})$$

Toplam Şekil  
değişimi Tansörü

Şekil değişimi  
Tansörü

Dönme Tansörü

elde edilir.  $\epsilon_{1j}$  ile gösterilen şekil değişimi tansörünü açık haliyle şu şekilde yazmak mümkündür:

$$\epsilon_{1j} = \begin{vmatrix} \epsilon_{xx} & \epsilon_{xy} & \epsilon_{xz} \\ \epsilon_{yx} & \epsilon_{yy} & \epsilon_{yz} \\ \epsilon_{zx} & \epsilon_{zy} & \epsilon_{zz} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} & \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) & \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \\ \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) & \frac{\partial v}{\partial y} & \frac{1}{2} \left( \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \\ \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) & \frac{1}{2} \left( \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) & \frac{w}{z} \end{vmatrix}$$

Şekil Değişimi tansör notasyonu ile

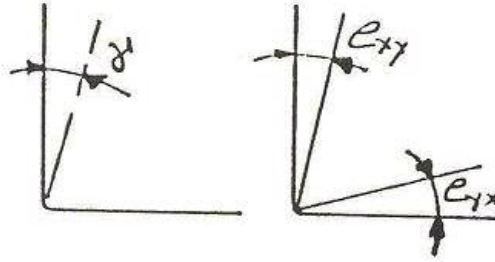
$$\epsilon_{1j} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{1}{2} \cdot \frac{\partial u_j}{\partial x_i}$$

dönme ise gene tansör notasyonu ile

$$w_{1j} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{1}{2} \cdot \frac{\partial u_j}{\partial x_i}$$

şeklinde yazılabilir.

Daha önce bazı derslerde kayma şekil değişimi  $\gamma$  tam açıdan sapma olarak tanımlanmıştır.  $\gamma$  ile  $\epsilon$  değerleri arasındaki ilişkiler Şekil 2-10'da gösterildiği gibi



Şekil 2-10: Kayma birim şekil değişimi

$$\gamma_{xy} = \epsilon_{xy} + \epsilon_{yx} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} = 2 \cdot \epsilon_{xy}$$

$$\gamma_{xz} = \epsilon_{xz} + \epsilon_{zx} = \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} = 2 \cdot \epsilon_{xz}$$



$$\gamma_{yz} = \epsilon_{yz} + \epsilon_{zy} = \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} = 2 \cdot \epsilon_{yz}$$

şeklinde yazılabilir. Burada  $\gamma$  dan sadece mühendislik uygulamalarında yararlanılmakta olup tansörel özellik taşımaz.

Kayma şekil değişimlerinin sıfır olduğu düzlemler asal şekil değişimi düzlemleri olarak tanımlanır. Bu düzlemlerin normalleri şekil değişimi sırasında yönlerini değiştirmezler.

### 2.3. Elastik Alanda Gerilme-Sekil Değişimi Bağlantıları

Cismin herhangi bir noktası civarındaki gerilmeler ile aynı noktadaki şekil değişimleri arasındaki bağlantılar, elastik alan için "Hooke Kanunu" ile verilmektedir. izotrop bir cisimde tek eksenli zorlama halinde:

$$\sigma_x \neq 0 \quad \sigma_y = \sigma_z = 0$$

$$\sigma_x = E \cdot \epsilon_x \quad \epsilon_x = \frac{\sigma_x}{E}$$

$$\epsilon_y = \epsilon_z = -\nu \cdot \epsilon_x = -\frac{\nu \cdot \sigma_x}{E}$$

Burada E malzemenin elastiklik modülünü,  $\nu$  ise Poisson oranını temsil etmektedir. Daha genel durum için üç eksenli gerilme halinde:

$$\epsilon_{xx} = \frac{1}{E} [\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)]$$

$$\epsilon_{yy} = \frac{1}{E} [\sigma_y - \nu(\sigma_z + \sigma_x)]$$

$$\epsilon_{zz} = \frac{1}{E} [\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y)]$$

$$2 \cdot \epsilon_{xy} = \gamma_{xy} = \frac{\tau_{xy}}{G}$$

$$2 \cdot \epsilon_{xz} = \gamma_{xz} = \frac{\tau_{xz}}{G}$$

$$2 \cdot \epsilon_{yz} = \gamma_{yz} = \frac{\tau_{yz}}{G}$$

Burada da G malzemenin kayma modülü olarak adlandırılmaktadır. izotrop malzemelerde elastik davranış sadece iki fiziksel sabit (Elastiklik modülü E ve Poisson Oranı  $\nu$ ) ile belirlenmektedir.

Diğer malzeme sabitleri kayma modülü G, hacim değişimi  $\Delta$ , hacımsal elastiklik modülü K ve hidrostatik gerilme  $\sigma_h$ 'nin bu sabitler ile ilişkilerini veren bağıntılar şunlardır:

$$\sigma_h = K \cdot \Delta \quad G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad K = \frac{E}{3(1-2\nu)}$$

#### 2.4. Elastik Şekil Değişimi İşi

Elastik şekil değişimi işi  $W$ , dış kuvvetlerle cisme elastik şekil verme sırasında sarfedilen enerjidir. Ayrıtları  $dx$ ,  $dy$  ve  $dz$  olan bir küpün sadece x doğrultusunda  $P_x$  çekme kuvveti ile zorlandığını varsayalım. Elastik alanda kuvvet sıfırdan itibaren doğrusal olarak arttığından

$$dW = \frac{1}{2} \cdot P_x \cdot du = \frac{1}{2} \cdot (\sigma_x \cdot dy \cdot dz) \cdot (\epsilon_x \cdot dx)$$

$$dW = \frac{1}{2} \cdot \sigma_x \cdot \epsilon_x \cdot (dx \cdot dy \cdot dz)$$

bulunur.  $dV = dx \cdot dy \cdot dz$  ilişkisini kullanarak birim hacim başına düşen elastik şekil değişimi enerjisi

$$\frac{dW}{dV} = U = \frac{1}{2} \cdot \sigma_x \cdot \epsilon_x = \frac{1}{2} \cdot \frac{\sigma_x^2}{E} = \frac{1}{2} E \cdot \epsilon_x^2$$

olarak elde edilir. Kayma gerilmeleri için de benzer şekilde,

$$U = \frac{1}{2} \cdot \tau_{xy} \cdot \gamma_{xy} = \frac{1}{2} \cdot \tau_{xy}^2 = \frac{1}{2} G \cdot \gamma_{xy}^2$$

elde edilir. Üç eksenli gerilmeler altında süperpozisyonla,

$$U = \frac{1}{2} (\sigma_x \cdot \epsilon_x + \sigma_y \cdot \epsilon_y + \sigma_z \cdot \epsilon_z + \tau_{xy} \cdot \gamma_{xy} + \tau_{xz} \cdot \gamma_{xz} + \tau_{yz} \cdot \gamma_{yz})$$

yazılabilir. Bu denklem Hooke kanunu yardımıyla sadece gerilmeler cinsinden yazılırsa

$$U = \frac{1}{2.E}(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2) - \frac{\nu}{E}(\sigma_x \cdot \sigma_y + \sigma_y \cdot \sigma_z + \sigma_z \cdot \sigma_x) + \frac{1}{2.G}(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)$$

elde edilir.

## 2.5. Plastik Şekil Değişiminin Mekanikliği

Malzeme için kritik olan bir gerilme değeri aşıldığında malzeme plastik olarak şekil değiştirmeye başlar. Plastik şekil değişiminin uygulanan gerilmeyle ilişkisinin belirlenmesi amacıyla PLASTİSİTE TEORİSİ geliştirilmiştir.

Plastik alanda, malzemelerin elastik davranışını açıklayan Hooke bağıntısı geçerliğini yitirmekte, dolayısıyla bu alandaki şekil değişiminin matematiksel olarak formüle edilmesi zorlaşmaktadır. Plastik şekil değişiminin belli başlı özelliklerini şu şekilde sıralamak mümkündür:

- Plastik şekil değişimi geri-dönüslü bir olay değildir.
- Elastik şekil değişiminde sadece başlangıç ve bitiş durumu önemli olup, plastik şekil değişiminde izlenen yolun özellikleri de önem kazanmaktadır.
- Plastisite özelliklerini birkaç malzeme sabiti ile tanımlamak olanaksızdır.
- Plastik şekil değişimi sırasında oluşabilecek pekleşmenin malzeme özelliklerini sürekli olarak değiştirebilir.

Plastik şekil değişimi için önce malzemede akma olayının başlaması lazımdır. Dolayısıyla bu olayın gerçekleşebileceği gerilme durumunu veren ifadelere ihtiyaç vardır. Bu ifadeler kısaca AKMA KRİTERLERİ olarak isimlendirilmektedir.

## 2.6. Akma Kriterleri

Plastik şekil değişiminin analizinde kullanılan Plastisite teorisinin en önemli konularından birini, çok eksenli gerilmelerin hangi kombinasyonunda malzemelerin plastik şekil değişimine (akmaya) başlayacağını veren matematiksel ifadelerin bulunması teşkil etmektedir.

Tek eksenli zorlanmalarda, örneğin bir çekme deneyinde makroskopik ölçekte akma, o malzemenin akma sınırı veya dayanımı aşıldığında başlamaktadır. Çok eksenli durumlarda ise akma koşulları, asal gerilmelerin bir kombinasyonu olarak belirlenmeye çalışılmaktadır.

Halen üç boyutlu gerilme halindeki akmanın tek boyutlu gerilme halindeki akma ile ilişkisini teorik olarak veren herhangi bir yöntem yoktur. Bu amaçla ampirik ifadeler kullanılır.

makta olup, bunların deney sonuçlarıyla uyum sağlaması çok önemlidir. Örneğin hidrostatik basınç altında akmanın gerçekleşmemesi gerektiğinden bulunacak ifadeler bu özelliği sağlamalıdır.

Çok sayıdaki akma kriteri arasından Tresca tarafından önerilen Maksimum Kayma Gerilmesi Kriteri ile von Mises tarafından önerilen Distorsiyon Enerjisi Kriteri en önemli yeri tutmaktadır.

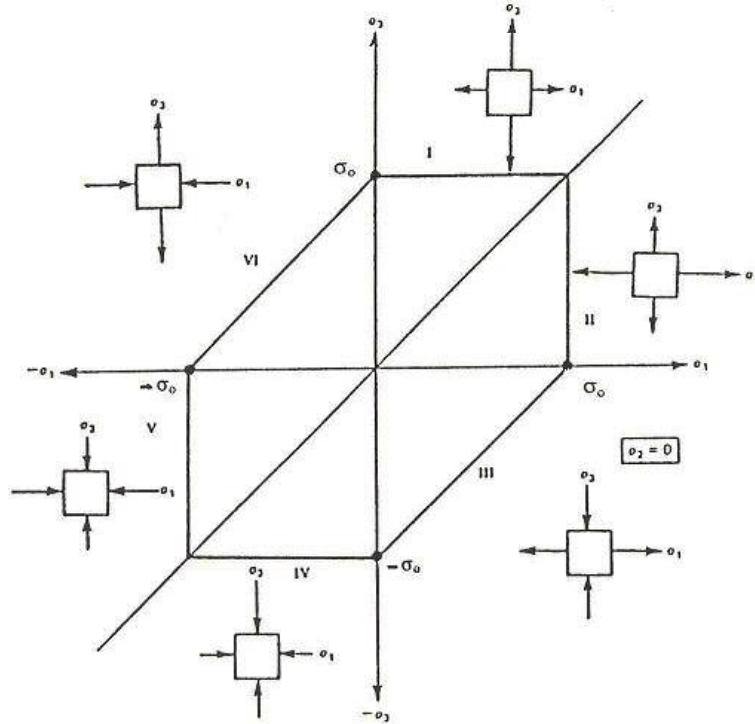
### 2.6.1. Maksimum Kayma Gerilmesi (Tresca) Kriteri

Sünek karakterdeki malzemelerde gevrek olanlara oranla daha doğru sonuçlar alınan bu kriterde üç eksenli gerilme halindeki akma, en büyük kayma gerilmesinin belirli bir kritik değeri aşmasıyla başladığı kabul edilmektedir.

Asal gerilmeler  $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$  olarak tanımlandığında maksimum kayma gerilmesi

$$\tau_{\max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \quad \text{olduğundan, kriter}$$

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \geq k \quad \text{şeklinde ifade edilebilir.}$$



Şekil 2-11: iki eksenli gerilme durumunda Tresca kriteri

Basit çekme halindeki zorlanma durumundan yararlanılarak, akmanın başladığı kritik şartı belirleyen  $k$  değerini bulmak mümkündür. Tek eksenli çekme deneyinde en büyük asal gerilme çekme yönünde uygulanan gerilme olduğu için akma anında bu değer, malzemenin akma dayanımı olan  $\sigma_0$  değerini aşması gerekmektedir. Ayrıca diğer yönlerde herhangi bir gerilme uygulanmadığından

$$\sigma_1 = \sigma_0 \quad \text{ve} \quad \sigma_2, \sigma_3 = 0 \quad \text{olmaktadır.}$$

Bu değerler akma kriteri bağıntısında yerlerine konacak olursa Tresca akma kriterini

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_0$$

şeklinde yazmak mümkündür. Buradan görüleceği gibi akma sadece en büyük ve en küçük asal gerilmelere bağlı olup orta asal gerilme  $\sigma_2$ 'nin burada bir etkisi bulunmamaktadır.

Bu kriter izotrop malzemeler için Şekil 2-11'de olduğu gibi basit bir grafik halinde de gösterilebilir. İki eksenli bir zorlanmanın olduğu (Düzlem Gerilme Hali) varsayılması durumunda asal gerilmeler için  $\sigma_1, \sigma_3 \neq 0$  ve  $\sigma_2 = 0$  şartları geçerlidir.

Buradaki farklı gerilme kombinasyonlarının geçerli olduğu bölgeler ve bu bölgelere ait asal gerilmelerin taşıdıkları özellikler aşağıda tablo halinde verilmiştir.

Bölge	Asal Gerilmeler	Akma Şartı
I	$\sigma_3 > \sigma_1 > 0$	$\sigma_3 = \sigma_0$
II	$\sigma_1 > \sigma_3 > 0$	$\sigma_1 = \sigma_0$
III	$\sigma_1 > 0 > \sigma_3$	$\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_0$
IV	$0 > \sigma_1 > \sigma_3$	$\sigma_3 = -\sigma_0$
V	$0 > \sigma_3 > \sigma_1$	$\sigma_1 = -\sigma_0$
VI	$\sigma_3 > 0 > \sigma_1$	$\sigma_3 - \sigma_1 = \sigma_0$

### 2.5.2. Distorsiyon Enerjisi (von Mises) Kriteri

Von Mises tarafından öne sürülen bu kriterde deviator gerilme tansörünün ikinci invariyanı  $J_2$ 'nin belirli bir kritik değere ulaşması halinde akma olayının başlayacağı iddia edilmektedir. Buna göre kriter asal gerilmeler cinsinden

$$J_2 = \frac{1}{6} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] \geq k^2$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada  $k$  değerini bulmak için çekme deneyi verileri kullanıldığında;

$\sigma_2=\sigma_3=0$  ve tek eksenli çekme gerilmesi altında akmanın başladığı  $\sigma_1=\sigma_0$  şartları kriterdeki yerlerine konacak olursa

$$k = \frac{\sigma_0}{\sqrt{3}} \quad \text{değeri elde edilir. Böylece bu kriter}$$

$$\frac{1}{\sqrt{2}} [(\sigma_1-\sigma_2)^2+(\sigma_2-\sigma_3)^2+(\sigma_3-\sigma_1)^2]^{1/2} = \sigma_0$$

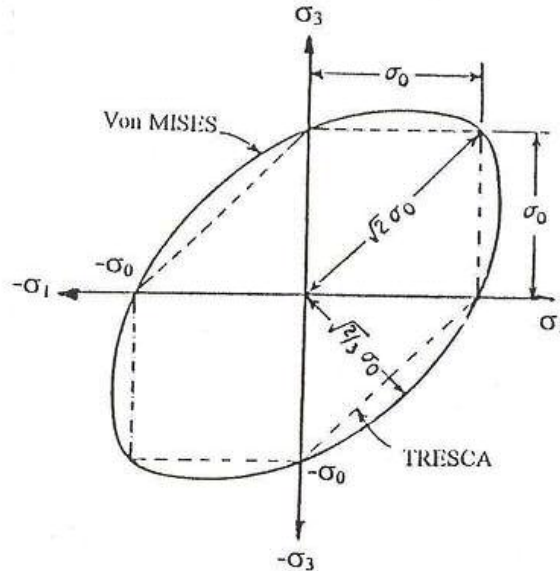
şeklinde de yazılabilir.

Bu kriterin bir başka özelliği de sadece asal gerilmeler cinsinden değil, cisime o noktada etkiyen tüm normal ve kayma gerilmeleri cinsinden de ifade edilebilmesidir. Diğer bir deyişle bu kriteri en genel hali ile;

$$\frac{1}{\sqrt{2}} [(\sigma_x-\sigma_y)^2+(\sigma_y-\sigma_z)^2+(\sigma_z-\sigma_x)^2+6(\tau_{xy}^2+\tau_{yz}^2+\tau_{zx}^2)]^{1/2} = \sigma_0$$

şeklinde de yazmak mümkündür.

Asal gerilmelerin ortanca değeri  $\sigma_2$ 'nin etkisinin de dikkate alındığı bu ampirik ifadeye daha sonra Henky tarafından bir fiziksel anlam da verilmiştir. Buna göre akma olayının, malzemede yaratılan distorsiyon işinin belirli bir kritik değere ulaşması ile meydana geldiği gösterilmiştir.



Şekil 2-12: Tresca ve von Mises akma kriterlerinin düzlem gerilme şartlarında şematik olarak gösterilmesi

izotrop malzemeler için von Mises kriterinin grafik olarak gösterilişi Şekil 2-12'de verilmiştir. Buna göre düzlem gerilme durumundaki asal gerilmeler dikkate alındığında ve

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 = 2 \cdot \sigma_0$$

ifadesinde  $\sigma_1, \sigma_3 \neq 0$  ve  $\sigma_2 = 0$  şartları kullanıldığında,

$$\sigma_1^2 + \sigma_3^2 - \sigma_1 \cdot \sigma_3 = \sigma_0$$

bulunur. Bu ise, eksenleri  $\sigma_1$  ve  $\sigma_3$  olan bir elipsin denklemini ifade etmektedir.

Şekil 2-12'de sürekli çizgi ile gösterilmiş bulunan von Mises kriteri ve kesikli çizgi ile gösterilmiş bulunan Tresca kriterinin sınırladığı alanlar içinde kalan ve  $\sigma_1$  ile  $\sigma_3$  asal gerilmelerinin değişik kombinasyonlarının belirlediği iki eksenli gerilme şartlarında malzeme elastik olarak şekil değişimine uğramaktadır. Bu çizgilerin dışında kalan noktaları oluşturan zorlanma şartlarında akma oluşarak plastik şekil değişimi başlamaktadır.

Her iki kriter birbirleri ile karşılaştırılacak olursa; tek eksenli çekme ve basma ile iki eksenli aynı miktardaki çekme ve basma gerilmeleri uygulanması durumunda kriterler aynı sonucu vermektedir. Bunların dışındaki zorlanmalarda her iki kriter arasında bazı farklar oluşmakta, bu fark tam kayma ( $\sigma_1 = -\sigma_3$ ) hali ve aynı yöndeki gerilmelerin diğerinin iki katı olması ( $\sigma_1 = 2 \cdot \sigma_3$ ) halinde en büyük değerini almakta ve Tresca kriteri daha konservatif olmak şartı ile %15 mertebelerine kadar ulaşmaktadır.

## 2.7. Efektif Gerilme-Efektif Birim Şekil Değişimi

Birbirinden farklı, üç boyutlu gerilme ve şekil değişimi hallerini tek bir ifade ile tanımlayabilmek, hem zorlanma durumlarını birbirleri ile karşılaştırmak, hem de plastik şekil değişimi analizlerinin gerçekleştirilmesi açısından çok önemlidir. Bu şekilde tek eksenli zorlanmalar sonucunda elde edilmiş bulunan malzeme verilerinden çok eksenli zorlanmalar için de yararlanmak mümkün olmaktadır.

Efektif gerilme ve birim şekil değişimi değerleri genellikle distorsiyon enerjisi (von Mises) kriteri esas alınarak, asal gerilmeler cinsinden şu şekilde tanımlanmaktadır:

$$\bar{\sigma} = \frac{\sqrt{2}}{2} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]^{1/2}$$

$$\bar{\epsilon} = \frac{\sqrt{2}}{3} [(\epsilon_1 - \epsilon_2)^2 + (\epsilon_2 - \epsilon_3)^2 + (\epsilon_3 - \epsilon_1)^2]^{1/2}$$

Çok eksenli gerilmenin özel bir hali olan tek eksenli bir gerilme hali, örneğin bir çekme deneyi için efektif gerilme ve birim şekil değişimi değerleri hesaplanacak olursa,

$$\sigma_1 > 0, \quad \sigma_2 = \sigma_3 = 0, \quad \epsilon_1 \neq 0, \quad \epsilon_2 = \epsilon_3 = -\frac{1}{2} \epsilon_1 \quad \text{ve} \quad \nu = \frac{1}{2}$$

şartlarının sağlandığı bu durumda

$$\bar{\sigma} = \frac{\sqrt{2}}{2} [\sigma_1^2 + 0 + \sigma_1^2]^{1/2} = \sigma_1$$

elde edilir. Aynı şekilde birim şekil değişimi için,

$$\bar{\epsilon} = \frac{\sqrt{2}}{3} \left[ \left( \epsilon_1 + \frac{\epsilon_1}{2} \right)^2 + \left( -\frac{\epsilon_1}{2} + \frac{\epsilon_1}{2} \right)^2 + \left( -\frac{\epsilon_1}{2} - \epsilon_1 \right)^2 \right]^{1/2} = \epsilon_1$$

bulunur. Buradan görüldüğü gibi çekme deneyi için elde edilen efektif gerilme ve efektif birim şekil değişimi değerleri tek eksenli zorlanmadaki normal gerilme ve şekil değişimine eşit olmaktadır. Dolayısıyla basit bir çekme deneyi ile saptanan gerilme-şekil değişimi bağıntısı aynı zamanda efektif büyüklükler arasındaki bağıntıyı vermektedir. Aynı şekilde birim şekil değişimi artış miktarı için efektif değer

$$d\bar{\epsilon} = \frac{\sqrt{2}}{3} [(d\epsilon_1 - d\epsilon_2)^2 + (d\epsilon_2 - d\epsilon_3)^2 + (d\epsilon_3 - d\epsilon_1)^2]^{1/2}$$

ile elde edilmektedir.

Bilindiği gibi yukarıda verilen efektif değerler Distorsiyon Enerjisi Kriteri esas alınarak bulunmuştur. Aynı değerlerin bulunmasında Maksimum Kayma Gerilmesi (Tresca) kriterinin kullanılması durumunda efektif gerilme,

$$\bar{\sigma} = \sigma_1 - \sigma_3$$

şeklinde, efektif birim şekil değişimi ise

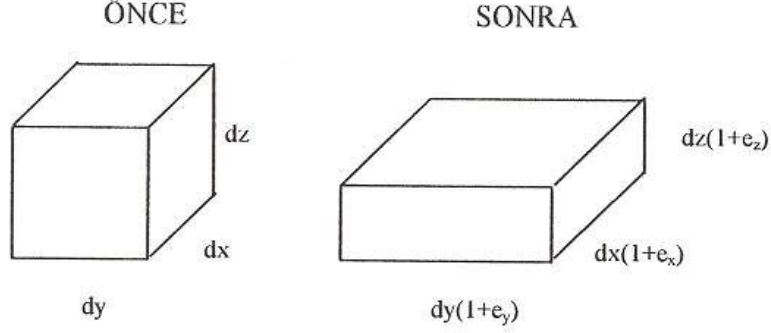
$$\bar{\epsilon} = \frac{2}{3} (\epsilon_1 - \epsilon_3)$$

şeklinde tanımlanabilmektedir. Tek eksenli zorlanma özelliklerinin aynı zamanda çok eksenli zorlanma özelliklerini temsil etmesi bu kriter için de geçerlidir.



## 2.8. Plastik Şekil Değişiminde Hacim Sabitliği

Plastik şekil verme analizlerinde kullanılan önemli kabul-lerden biri de şekil değişimi sırasında hacmin sabit kaldığını varsayan bağıntıdır.



Şekil 2-13: Bir kübe ait plastik şekil değişimi öncesi ve sonrası boyutlar.

Şekil 2-13'deki gibi, başlangıçta  $dx \cdot dy \cdot dz$  hacmine sahip bir küpün plastik şekillendirme sonrasında boyutlarının değişerek  $[dx(1+e_x) \cdot dy(1+e_y) \cdot dz(1+e_z)]$  hacmine geldiğini kabul edelim. Hacimsel birim şekil değişimi  $\Delta$ , hacimdeki değişme  $\Delta V$ 'nin başlangıçtaki hacime oranı olarak şu şekilde bulunmaktadır:

$$\Delta = \frac{\Delta V}{V} = \frac{V_2 - V_1}{V_1}$$

Hacmin değişmemesi için  $\Delta$  değerinin sıfıra eşit olması gerektiğinden

$$\Delta = \frac{dx(1+e_x) \cdot dy(1+e_y) \cdot dz(1+e_z) - dx \cdot dy \cdot dz}{dx \cdot dy \cdot dz} = 0$$

$$\Delta = (1+e_x) \cdot (1+e_y) \cdot (1+e_z) - 1 = 0$$

olur. Eğer 1 sağa alınıp her iki tarafın logaritması alınacak olursa

$$\ln(1+e_x) + \ln(1+e_y) + \ln(1+e_z) = \ln 1 = 0$$

yazılabilir. Bu ifadedeki logaritmik değerlerin herbirisi indisi ile ifade edilen ve ait olduğu yöndeki gerçek birim şekil değişimini verdiği için

$$\begin{aligned} \epsilon_x + \epsilon_y + \epsilon_z &= 0 && \text{veya asal birim şekil değişimleri için,} \\ \epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3 &= 0 && \text{bulunur.} \end{aligned}$$

Birim şekil değişimlerinin zamana göre türevleri alınarak hacim sabitliğinin birim şekil değişimi hızı ile ilgili ifadeleri de

$$\frac{d\epsilon_x}{dt} + \frac{d\epsilon_y}{dt} + \frac{d\epsilon_z}{dt} = 0 \quad \dot{\epsilon}_x + \dot{\epsilon}_y + \dot{\epsilon}_z = 0$$

veya

$$\frac{d\epsilon_1}{dt} + \frac{d\epsilon_2}{dt} + \frac{d\epsilon_3}{dt} = 0 \quad \dot{\epsilon}_1 + \dot{\epsilon}_2 + \dot{\epsilon}_3 = 0$$

şeklinde yazılabilir. Hacim sabitliği özelliği aynı zamanda birim şekil değişimi artış miktarları için de geçerli olduğu için

$$d\epsilon_1 + d\epsilon_2 + d\epsilon_3 = 0$$

bağıntısında kullanılabilir.

Plastik şekil değişimi sırasında hacimin sabit kaldığı varsayımının en önemli sonuçlarından biri de plastik bölgedeki Poisson oranı  $\nu$  değerinin saptanmasına olanak sağlamasıdır. Bilindiği gibi Hooke kanuna göre birim şekil değişimleri, uygulanan gerilmeler cinsinden;

$$\epsilon_1 = \frac{1}{E} [\sigma_1 - \nu(\sigma_2 + \sigma_3)]$$

$$\epsilon_2 = \frac{1}{E} [\sigma_2 - \nu(\sigma_1 + \sigma_3)]$$

$$\epsilon_3 = \frac{1}{E} [\sigma_3 - \nu(\sigma_1 + \sigma_2)]$$

şeklinde ifade edilmekteydi. Bunlar taraf tarafa toplanarak

$$\epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3 = \frac{1-2\nu}{E} (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)$$

elde edilir. Hacim sabitliğinde asal birim şekil değişimleri toplamının sıfır olması gerektiğinden, tüm gerilme halleri için çözüm ancak  $(1-2\nu)=0$  şartının sağlanması ile elde edilir. Bu durumda Poisson Oranı  $\nu$ 'nün  $\frac{1}{2}$  değerini alması gerekmektedir. Bu nedenle plastik şekil değişimlerinin analizinde Poisson Oranı için 0,5 değeri kullanılır.

## 2.9. Plastik Alanda Gerilme-Şekil Değişimi Bağlıntıları

Elastik bölgedeki gerilme-şekil değişimi ilişkileri Hooke kanunu ile belirlenmektedir. Akma sınırı aşıldıktan sonra malzeme gerilmelerin etkisiyle akarak kalıcı şekil değişimine uğramaya başlar. Plastik alanda, elastik alanda olduğu gibi gerilme ile birim şekil değişimi arasında bire bir tekabülîyet yoktur. Buradaki şekil değişimleri sadece gerilme durumuna değil, şekil değişiminin daha önceden izlediği yola da bağlıdır. Buna örnek olarak malzemenin pekleşerek şekil değişimi ile akma gerilmesi değerini arttırması ve bir önceki şekil değişimi yönünden etkilenerek Bauschinger etkisi altında akma gerilmesini değiştirmesi verilebilir.

Bu nedenle plastik şekil değişimi analizlerinde, gerilmeler altında şekil değişimi miktarlarındaki artışlar (diferansiyel değerler) dikkate alınarak bunların integrasyonla toplanması neticesinde toplam birim şekil değişiminin saptanması yoluna gidilmektedir. Tek eksenli çekme durumu için

$\sigma_1 > 0$  ve  $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$  olduğundan ortalama gerilme,

$\sigma_m = \frac{\sigma_1}{3}$  değerini alır. Deviatorik gerilme bileşenleri ise

$$\sigma_1' = \sigma_1 - \sigma_m = \frac{2}{3}\sigma_1, \quad \sigma_2' = \sigma_2 - \sigma_m = -\frac{\sigma_1}{3}, \quad \sigma_3' = \sigma_3 - \sigma_m = -\frac{\sigma_1}{3}$$

olarak bulunur. Diğer bir şekilde deviatorik bileşenler arasındaki ilişkiyi

$$\sigma_1' = -2.\sigma_2' = -2.\sigma_3'$$

şeklinde yazmak da mümkündür.

Birim şekil değişimleri için malzemenin izotrop olduğu ve hacim sabitliğinin korunduğu varsayıldığında

$$d\epsilon_1 = B[\sigma_1' - \frac{1}{2}(\sigma_2' + \sigma_3')]$$

$$d\epsilon_2 = B[\sigma_2' - \frac{1}{2}(\sigma_1' + \sigma_3')]$$

$$d\epsilon_3 = B[\sigma_3' - \frac{1}{2}(\sigma_1' + \sigma_2')]$$

yazılabileceğinden

$$d\epsilon_1 = -2.d\epsilon_2 = -2.d\epsilon_3$$

sonucu elde edilir. Yukarıdaki bağıntılarda kullanılan B bir orantı katsayısıdır. Diğer bir şekilde bu ifadeyi

$$\frac{d\epsilon_1}{d\epsilon_2} = -2 = \frac{\sigma_1'}{\sigma_2'}$$

şeklinde, veya daha uygun haliyle

$$\frac{d\epsilon_1}{\sigma_1'} = \frac{d\epsilon_2}{\sigma_2'} = \frac{d\epsilon_3}{\sigma_3'}$$

şeklinde yazmak da mümkündür. Bu bağıntı ideal-plastik davranış gösteren malzemeler için, plastik şekil değişimi ile uygulanan gerilmeler arasındaki ilişkiyi veren Bünye Denklemleri olarak, Levy-Mises Bağıntıları adıyla anılırlar. En genel haliyle

$$\frac{d\epsilon_x}{\sigma_x'} = \frac{d\epsilon_y}{\sigma_y'} = \frac{d\epsilon_z}{\sigma_z'} = \frac{d\epsilon_{xy}}{\tau_{xy}} = \frac{d\epsilon_{yz}}{\tau_{yz}} = \frac{d\epsilon_{zx}}{\tau_{zx}} = d\lambda$$

şeklinde verilen Levy-Mises Bağıntıları, elastik şekil değişimlerinin ihmal edilecek kadar küçük olduğu, büyük plastik şekil değişimleri için geçerlidir. Bu bağıntılarda plastik şekil değişimindeki artışların o doğrultulardaki gerilmelerin deviyatör tansörü elemanlarına oranlarının  $d\lambda$  ile gösterilen ve Plastisite Sabiti olarak anılan bir katsayıya eşit olduğu ifade edilmektedir. Buradaki  $d\lambda$  değeri belirli bir durum için sabit olup, şekil verme olayı sürdükçe değişebilmektedir.

Deviyatör tansör bileşenleri için daha önce verilmiş bulunan

$$\sigma_x' = \sigma_x - \sigma_m = \frac{2 \cdot \sigma_x - \sigma_y - \sigma_z}{3}, \quad \sigma_y' = \sigma_y - \sigma_m = \frac{2 \cdot \sigma_y - \sigma_x - \sigma_z}{3}, \quad \sigma_z' = \sigma_z - \sigma_m = \frac{2 \cdot \sigma_z - \sigma_x - \sigma_y}{3}$$

ifadeleri yukarıdaki bünye denklemleri içinde yerlerine konacak olursa Levy-Mises Bağıntılarını

$$d\epsilon_x = \frac{2}{3} d\lambda \cdot \left[ \sigma_x - \frac{1}{2} (\sigma_y + \sigma_z) \right]$$

$$d\epsilon_y = \frac{2}{3} d\lambda \cdot \left[ \sigma_y - \frac{1}{2} (\sigma_x + \sigma_z) \right]$$

$$d\epsilon_z = \frac{2}{3} d\lambda \cdot \left[ \sigma_z - \frac{1}{2} (\sigma_x + \sigma_y) \right]$$

$$d\epsilon_{xy} = \tau_{xy} \cdot d\lambda$$

$$d\epsilon_{yz} = \tau_{yz} \cdot d\lambda$$

$$d\epsilon_{zx} = \tau_{zx} \cdot d\lambda$$

şeklinde yazmak mümkündür. Aynı bağıntılar asal gerilmeler cinsinden

$$d\epsilon_1 = -\frac{2}{3}d\lambda \cdot \left[ \sigma_1 - \frac{1}{2}(\sigma_2 + \sigma_3) \right]$$

$$d\epsilon_2 = -\frac{2}{3}d\lambda \cdot \left[ \sigma_2 - \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) \right]$$

$$d\epsilon_3 = -\frac{2}{3}d\lambda \cdot \left[ \sigma_3 - \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_2) \right]$$

şeklinde de yazılabilir. Efektif birim şekil değişimindeki artışı veren ifade

$$d\bar{\epsilon} = \frac{\sqrt{2}}{3} \left[ (d\epsilon_1 - d\epsilon_2)^2 + (d\epsilon_2 - d\epsilon_3)^2 + (d\epsilon_3 - d\epsilon_1)^2 \right]^{1/2}$$

göz önüne alınacak olursa ve Levy-Mises bağıntılarının bunun içinde kullanılması durumunda

$$d\bar{\epsilon} = -\frac{2}{3}d\lambda \cdot \left\{ \frac{1}{\sqrt{2}} \left[ (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 \right]^{1/2} \right\}$$

elde edilir. Büyük parantez içindeki terimin efektif gerilmeyi veren ifade olduğuna dikkat edilecek olursa

$$d\bar{\epsilon} = \frac{2}{3}d\lambda \cdot \bar{\sigma}$$

elde edilmiş olur. Plastiklik Modülü olarak da nitelendirilen  $d\lambda$  katsayısının değerini saptamak için

$$d\lambda = \frac{3}{2} \cdot \frac{d\bar{\epsilon}}{\bar{\sigma}}$$

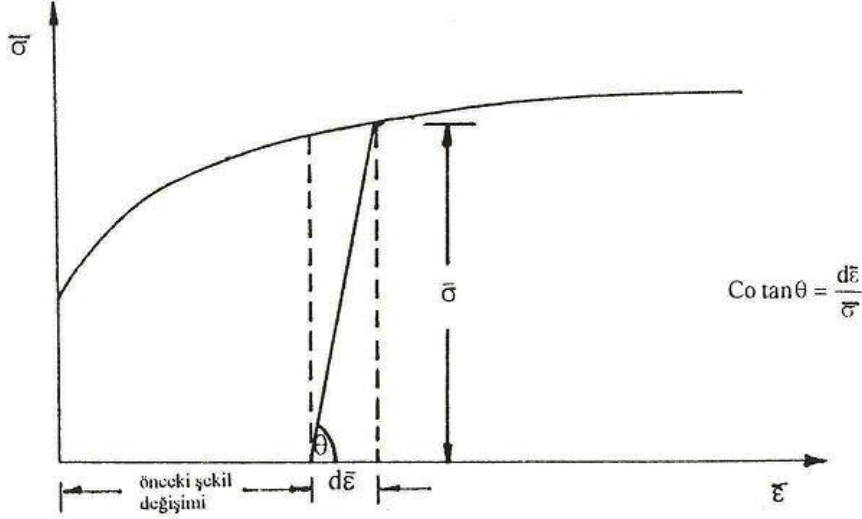
ilişkisi kullanılır. Böylece gerçekte bir malzeme özelliği olan  $d\lambda$  değeri, basit bir çekme deneyi sonrasında elde edilen efektif gerilme-efektif birim şekil değişimi eğrisi (akma eğrisi deyimi de kullanılmaktadır) yardımıyla Şekil 2-14'de görüldüğü gibi grafiksel olarak saptanabilmektedir.

Bu durumda Levy-Mises Denklemleri

$$d\epsilon_1 = \frac{d\bar{\epsilon}}{\bar{\sigma}} \left[ \sigma_1 - \frac{1}{2}(\sigma_2 + \sigma_3) \right]$$

$$d\epsilon_2 = \frac{d\bar{\epsilon}}{\bar{\sigma}} \left[ \sigma_2 - \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) \right]$$

$$d\epsilon_3 = \frac{d\bar{\epsilon}}{\bar{\sigma}} \left[ \sigma_3 - \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_2) \right]$$



Şekil 2-14: Plastisite modülünün malzemenin akma eğrisi üzerinde saptanması.

şekline dönüşür. Dikkat edileceği gibi bu denklemler Hooke bağıntılarına çok benzemektedir. Ancak burada E yerine  $\bar{\sigma}/d\bar{\epsilon}$  şeklinde gösterilen plastisite modülü gelmiş olup Poisson oranı  $\frac{1}{2}$  değerini almıştır. Ayrıca Levy-Mises bağıntılarında yer alan tüm birim şekil değişimlerinin sadece plastik şekil değişimlerini içerdiği unutulmamalıdır.

### 2.11. Malzemelerin Akma Eğrisi

Malzemelerin, özellikle metallerin plastik şekillendirilmesinde oldukça büyük şekil değişimleri sözkonusudur. Plastik şekil vermede kullanılan mekanik analiz yöntemlerinin amacı, gerçekleştirilen şekil değişiminin miktarı ile bunu yaratabilmek için kullanılacak kuvvet, iş ve gücün hesaplanması veya en azından tahmin edilebilmesidir. Bunun da yapılabilmesi için şekil değişimine uğrayan metalin deformasyon sırasında gösterdiği mekanik davranışın bilinmesi gerekmektedir. Akma eğrisi olarak adlandırılan ve malzemenin gerçek gerilme-gerçek birim şekil değişimi arasındaki bağıntıyı veren  $\bar{\sigma}=f(\bar{\epsilon})$  eğrisinden bu amaçla

yararlanılmaktadır. Malzemelerin akma eğrilerinin saptanması için değişik mekanik deneyler uygulanmaktadır.

### 2.10.1. Çekme Deneyi

Gerilme ile şekil değişimi arasındaki ilişkinin incelenmesinde ve akma eğrisinin belirlenmesinde çoğunlukla çekme deneylerinden yararlanılmaktadır. Bir çekme deneyi sırasında o malzemeden hazırlanan deney parçasına uygulanan  $P$  kuvveti ile deney parçasının uzama ( $\Delta L=L-L_0$ ) değeri yardımıyla,

$$\begin{aligned} \text{mühendislik gerilmesi,} & \quad s = P/A_0 \\ \text{mühendislik birim şekil değişimi,} & \quad e = (L-L_0)/L_0 \end{aligned}$$

değerleri,  $A_0$  ve  $L_0$  deney parçasının başlangıçtaki kesiti ve ölçü boyu olmak üzere hesaplanabilmektedir. Şekil 2-15'de bir çekme deneyi sırasında deney parçasının uzaması ve bu uzamalara çekme eğrisi üzerinde tekabül eden noktalar verilmiştir. Bir çekme deneyi ile, plastik şekil verme açısından, saptanabilecek en önemli malzeme özellikleri şunlardır:

- Akma Dayanımı  $\sigma_0$  : Malzemenin plastik şekil değiştirmeye başladığı gerilme değeri,
- Kopma Uzaması  $\delta$  : Deney parçasının koptuğu yüzde uzama değeri,

$$\delta = \frac{L_k - L_0}{L_0} \times 100$$

- Kesit Daralması  $\phi$  : Deney parçasının koptuğu yerdeki kesit daralması değeri,

$$\phi = \frac{A_k - A_0}{A_0} \times 100$$

- Uniform Uzama  $e_{un}$  : Deney parçasının büzülme öncesi yani plastik dengesizlik oluşmadan ulaşılabildiği en büyük yüzde uzama değeri

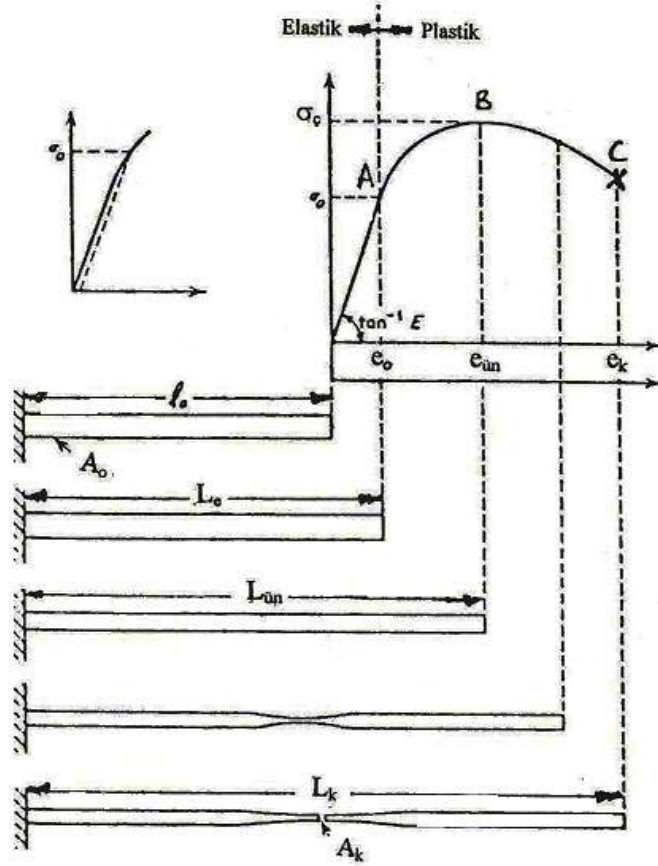
$$e_{un} = \frac{L_{un} - L_0}{L_0} \times 100$$

Bu özelliklerden son üç değer malzemenin ne kadar sünek davranma eğiliminde olduğunu, diğer bir deyişle plastik şekillendirmeye ne kadar yatkın olduğunu göstermesi açısından çok önemlidir. Akma dayanımı veya gerilmesi ise malzemenin plastik şekil değiştirmesi için gerekli gerilmelerin seviyesi konusunda fikir vermektedir.

Mühendislik gerilmesi ve şekil değişimi parçanın başlangıç kesiti ve ölçü boyuna dayanarak hesaplanmaktadır. Öte yandan parçanın herhangi bir andaki kesiti ve ölçü boyunu esas alarak

$$\begin{aligned} \text{gerçek gerilme,} & \quad \sigma = P/A \\ \text{gerçek birim şekil değişimindeki artış,} & \quad de = dl/l \end{aligned}$$

ifadeleri ile bulunabilir.



Şekil 2-15: Çekme deneyi sırasında deney parçasının şekil değişimi ve gerilme-birim uzama diyagramı.

Uygulanacak bir integrasyon ile

gerçek birim şekil değişimi,

$$\epsilon = \int_{L_0}^L \frac{dL}{L} = \ln \frac{L}{L_0}$$

olarak elde edilir. Bu ifadeleri kullanarak malzemelerin gerçek ve mühendislik gerilme-şekil değişimi değerleri arasındaki bağıntılar aşağıdaki gibi bulunabilir:

Mühendislik birim şekil değişiminin tanımından

$$e = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{L - L_0}{L_0} = \frac{L}{L_0} - 1, \quad \frac{L}{L_0} = e + 1$$

olur. Her iki tarafın logaritması alınacak olursa

$$\ln\left(\frac{L}{L_0}\right) = \epsilon = \ln(e + 1)$$



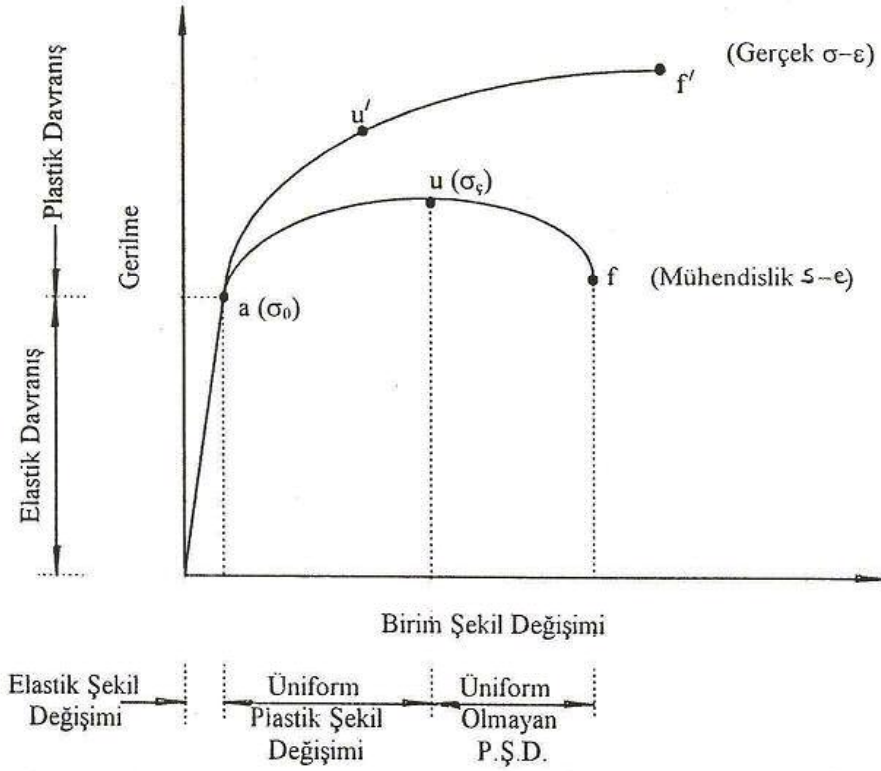
elde edilir. Aynı şekilde mühendislik gerilmesi ile gerçek gerilme arasındaki bağıntı, plastik şekillendirmede hacimin sabit kaldığı prensibinden yararlanılarak

$$A_0 \cdot L_0 = A \cdot L, \quad A = A_0 \cdot \frac{L_0}{L}$$

$$\sigma = \frac{P}{A} = \frac{P}{A_0} \cdot \frac{L}{L_0}, \quad \frac{L}{L_0} = e+1 \quad \text{ve} \quad s = \frac{P}{A_0} \quad \text{olduğundan}$$

$$\sigma = s(e+1)$$

şeklinde elde edilir. Metallerin gerçek ve mühendislik eğrileri Şekil 2-16'da şematik olarak verilmektedir.



Şekil 2-16: Malzemelerin gerçek ve mühendislik eğrileri.

Malzemelerin gerçek ve mühendislik birim şekil değişimi değerleri karşılaştırılacak olursa, plastik dengesizliğin olduğu boyun verme noktasına kadar, artan şekil değişimi ile bunların arasındaki farkın açıldığı ve mühendislik değerlerinin çok büyüdüğü görülmektedir.

$\epsilon$	0,01	0,50	4,0
$e$	0,01	0,65	53.6

Ayrıca her iki değer arasındaki farkı vurgulayan aşağıdaki çarpıcı örneğe de dikkat etmek yerinde olacaktır. Başlangıç boyu 100 mm olan bir parçanın önce çekilerek 200 mm'ye uzatıldığı, daha sonra bunun basılarak 100 mm'ye indirildiği varsayılacak olursa, bu işlemlerin sonunda parçanın boyu değişmediği için toplam birim şekil değişiminin sifıra eşit olması gerekecektir. Ancak toplam şekil değişimi için yapılan hesaplarda farklı kriterlerin esas alınması durumunda şu sonuçlar elde edilir:

a. Mühendislik değerleri kullanıldığında:

Birim şekil değişimleri;

$$\text{çekme sırasında, } e_1 = \frac{200-100}{100} = 1,0$$

$$\text{basma sırasında, } e_2 = \frac{100-200}{200} = -0,5$$

olacağından toplam mühendislik birim şekil değişimi

$$e_{top} = e_1 + e_2 = 1,0 - 0,5 = 0,5$$

olarak bulunur.

b. Gerçek değerler kullanıldığında:

Birim şekil değişimleri;

$$\text{çekme sırasında, } \epsilon_1 = \ln \frac{200}{100} = \ln 2$$

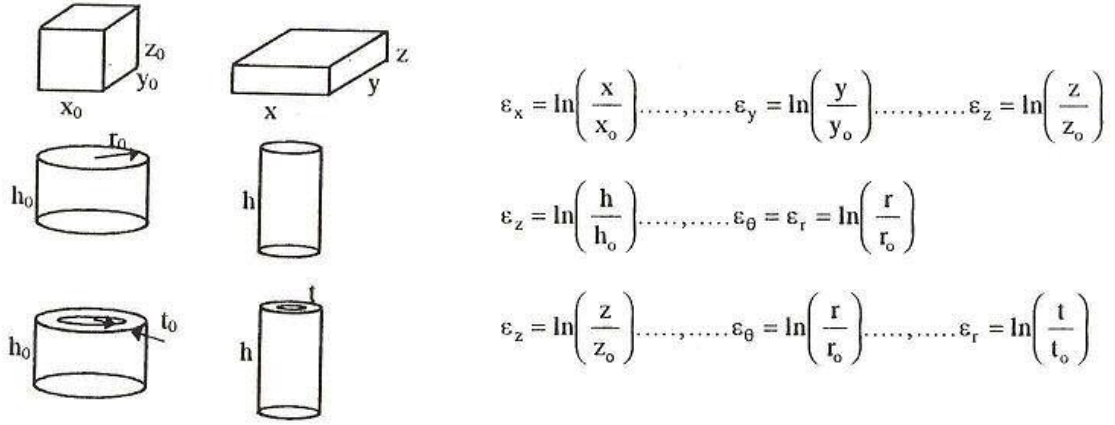
$$\text{basma sırasında, } \epsilon_2 = \ln \frac{100}{200} = \ln 0,5 = -\ln 2$$

olacağından toplam gerçek şekil değişimi

$$\epsilon_{top} = \epsilon_1 + \epsilon_2 = \ln 2 - \ln 2 = 0$$

olarak elde edilir. Buradan da görüldüğü gibi  $\epsilon_{top}=0$  olurken,  $e_{top}>0$  çıkmaktadır. Bu ise, mühendislik değerlerinin sadece çekme deneylerinin değerlendirilmesinde kolaylık sağladığını, plastik şekil verme işlemlerinin analizinde ise kullanılmasının imkansız olduğunu göstermektedir.

Değişik geometrilere sahip parçalar için geçerli olan gerçek birim şekil değişimi değerleri Şekil-17'de verilmiştir.



Şekil 2-17: Değişik geometriler için gerçek birim şekil değişimi değerleri.

Pratikteki plastik şekil verme uygulamalarında şekil değişimi miktarları birim uzama değerleri ile değil çoğunlukla tanımlanan aşağıdaki yapılan kesit daralması (redüksiyon) değerleri ile verilmektedir.

$$r = \frac{A_0 - A}{A_0}$$

Kesit daralması veya redüksiyon değerlerinin gerçek birim şekil değişimi olarak karşılığı, şekil değişimi sırasında hacim sabitliğinin korunduğu varsayımı ile

$$r = 1 - \frac{A}{A_0} \quad , \quad \frac{A}{A_0} = 1 - r \quad , \quad \frac{A_0}{A} = \frac{1}{1 - r}$$

$$A_0 \cdot L_0 = A \cdot L$$

$$\frac{L}{L_0} = \frac{A_0}{A} \quad , \quad \epsilon = \ln \frac{L}{L_0} = \ln \frac{A_0}{A} = \ln \frac{1}{1 - r}$$

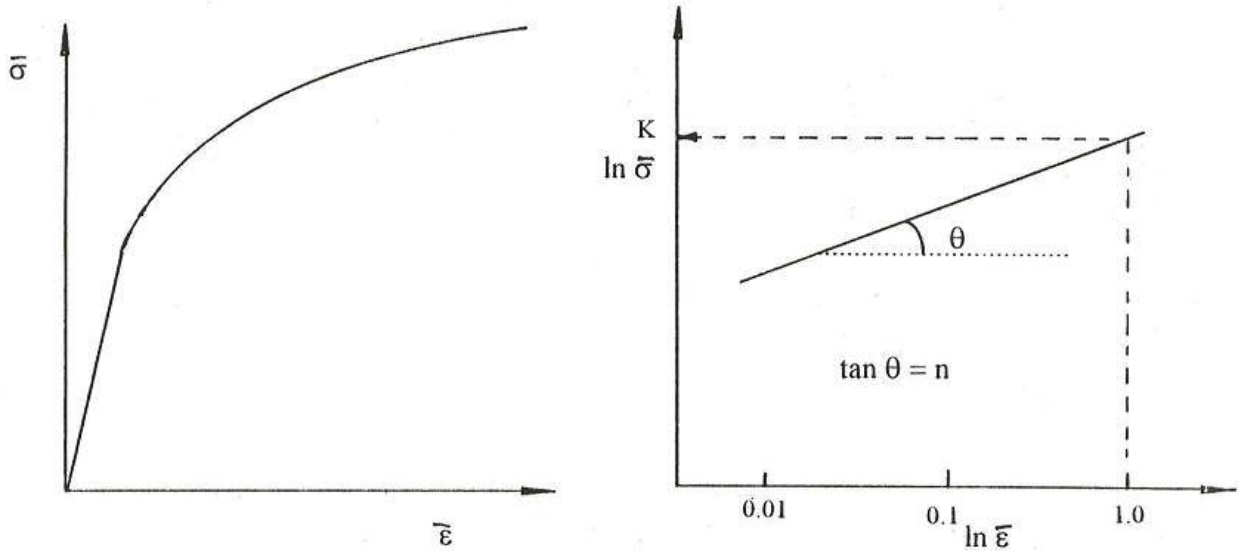
şeklinde elde edilir.

Plastik şekillendirme işlemlerinin analizlerinde malzemenin akma eğrisinin, yani gerçek gerilme-birim şekil değişimi eğrisinin matematiksel olarak ifadesi gereklidir. Bu amaçla bazı basitleştirilmiş ifadelerden yararlanılmaktadır:

a.  $\bar{\sigma} = K \cdot \bar{\epsilon}^n$

Özellikle kübik kafes sistemine sahip tavlanmış (yumuşak durumda) metal ve alaşımların akma eğrisi bu türden bir üstel ifade ile yeterli hassasiyetle tanımlanabilmektedir. Şekil 2-18 de normal ve logaritmik ölçeklerde çizilmiş bulunan bu tür eğrilerde gerilme sürekli artmaktadır.

Eğri çift logaritmik ölçekte bir doğru olarak elde edilir. Bu doğrunun eğimi olan  $n$  değeri peklesme üsteli olarak adlandırılır. Bu değer plastik şekil değişimi ile malzemenin dayanımının ne kadar arttığının bir ölçüsüdür. Pekleşme üsteli yüksek olan, yani şekil değiştirdikçe pekleşerek dayanımını hızla arttıran bir malzemede ayrılma veya kopma olayı da gecikir.  $K$  katsayısı ise dayanım sabiti olarak adlandırılmaktadır.



Şekil 2-18:  $\bar{\sigma} = K \cdot \bar{\epsilon}^n$  üstel bağıntısına uyan akma eğrisi

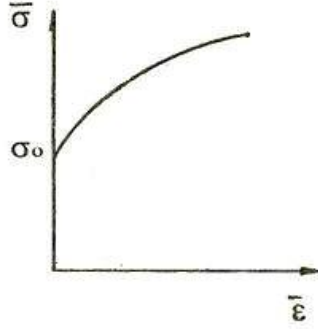
b.  $\bar{\sigma} = \sigma_0 + K \cdot \bar{\epsilon}^n$

Daha önceden soğuk şekil değişimine uğramış metal ve alaşımlar için daha doğru sonuçlar veren bu ifadeye ait akma eğrisi Şekil 2-19'da verilmiştir. İlk akmanın başladığı gerilmenin  $\sigma_0$  ile gösterildiği bu fonksiyonda elastik şekil değişimleri tamamen ihmal edilmektedir.

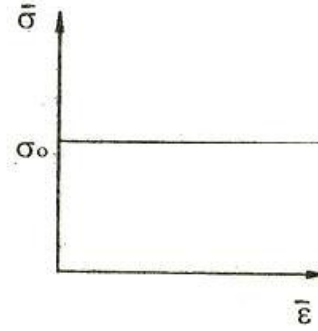
c.  $\bar{\sigma} = \sigma_0$

Pekleşmenin olmadığı veya ihmal edilebilecek mertebede düşük olduğu malzeme ve/veya zorlanma şartlarında bu tür bir modelden

yararlanılmaktadır. Özellikle sıcak şekillendirme işlemleri için çok uygun sonuçlar vermektedir. Şekil 2-20'de şematik olarak verilen ve ideal plastik şekil değişimi özellikleri taşıyan bu tür akma eğrilerinde malzemenin akma gerilmesinin plastik şekil değişimi miktarına bağlı olmadığı kabul edilmektedir.



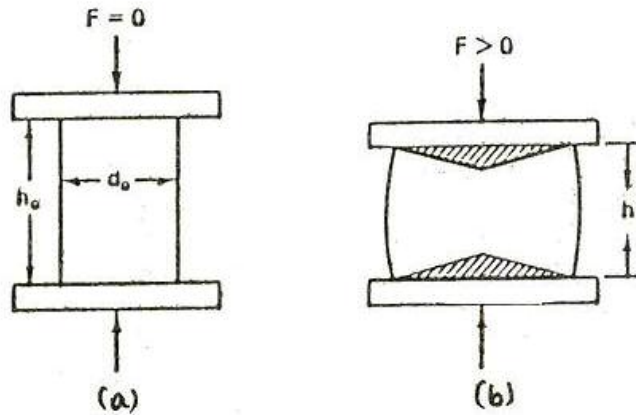
Şekil 2-19:  $\bar{\sigma} = \sigma_0 + K \cdot \bar{\epsilon}^n$  üstel ifadesine uyan akma eğrisi



Şekil 2-20: ideal plastik bir malzemenin akma eğrisi

### 2.10.2. Basma Denevi

Plastik şekillendirme işlemlerinde genellikle büyük şekil değişimleri hızlı bir şekilde gerçekleştirildiğinden çekme deneylerinin bu koşulları sağlaması zordur. Çünkü çekme deneylerinde hızlar sınırlı olup belirli bir şekil değişiminden sonra deney parçasında büzülme oluşmaktadır. Özellikle silindirik parçalar üzerinde yapılacak basma deneyleri daha uygundur. Şekil 2-21'de görülen bu deneyde parça ile basma kalıplarının yüzeyleri arasındaki sürtünmeler homojen bir şekil değişiminin gerçekleşmesini engellediğinden fiçilaşma meydana gelir. Ayrıca basılan yüzeylerin altında Şekil 2-21b'de görüldüğü gibi uçgen şeklinde şekil değişimine uğramayan ölü bölgeler oluşur. Bu durumun önlenmesi için sürtünme yüzeylerinin kalitesinin iyileştirilmesi ve arayüzeyde iyi yağlama yapılması gibi önlemler alınmaya çalışılır.



Şekil 2-21: Basma deneyi

Deney parçasının kısa seçilmesi durumunda Şekil 2-21b'de basılan yüzeylerin altındaki ölü bölgeler birbirine temas edebilir. Deney parçasının bu bölgelerin birbirine temas etmeyecek şekilde uzun tutulması sağlıklı sonuçların elde edilmesinden gereklidir. Ayrıca deney parçasının gereğinden fazla uzun seçilmesi durumunda burkulma sorunu ortaya çıkabilir. Bu nedenle silindirik basma deneyi parçalarında boy/çap oranı 1 ile 2 arasında seçilmektedir.

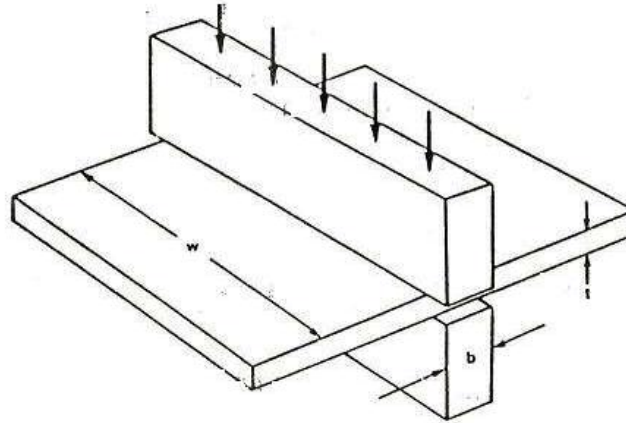
### 2.10.3. Düzlem Birim Şekil Değişimi Basma Deneyi

Bu deney düzlem birim şekil değişimi şartlarında, yani bir doğrultuda plastik şekil değişiminin olmadığı veya ihmal edilebilecek kadar az olduğu hallerde gerçekleştirilmektedir. Şematik olarak Şekil 2-22'de verilen bu deneyde  $t$  kalınlığında ve  $w$  genişliğindeki bir levha iki taraftan  $b$  genişliğindeki dar kalıplar tarafından basmaya zorlanmaktadır.

Bu deneyin istenen koşulları sağlaması için, deney parçası ve şekillendirme kalıpları geometrisinin  $(w/b) > 5$  ve  $(b/t) > 2$  şartlarına sahip olması gerekmektedir. Bu durumda genişlik ( $y$ ) yönündeki şekil değişimi zorlaşmakta, pratik olarak gerçekleştirmediği varsayılmaktadır. Düşey ( $z$ ) eksenindeki gerilme ve birim şekil değişimi değerleri

$$\sigma_z = \frac{P}{w \cdot b} \quad \epsilon_z = \ln \frac{t}{t_0}$$

bağıntıları yardımıyla bulunmaktadır. Bu değerler ve bu tür şekil değişimine ait diğer özellikler kullanılarak malzemenin akma eğrisi saptanabilmektedir.



Şekil 2-22: Düzlem birim şekil değişimi basma deneyi

#### 2.10.4. Burma Denevi

Çok büyük şekil değişimlerinin ve hızların söz konusu olduğu durumlarda basma deneyleri de yetersiz kalmaktadır. Bu amaçla burma deneylerinden yararlanılmaktadır. Burma deneyinde deney parçasına uygulanan moment ve elde edilen açısai dönme verileri kayma gerilmesi-kayma birim şekil değişimi eğrilerini oluşturmada kullanılmaktadır. Von Mises kriteri esas alınacak olursa

$$\sigma = \sqrt{3} \cdot \tau \quad \text{ve} \quad \epsilon = \frac{\gamma}{\sqrt{3}}$$

bağıntıları yardımıyla malzemenin normal akma eğrisini veya tek eksenli çekme gerilmesi-birim şekil değişimi eğrilerini elde etmek mümkündür. Kayma gerilmesinin tüm kesitte sabit olmaması bu yöntemin en önemli kusurlarından biridir. Ancak bu zorluk boru biçiminde deney parçaları kullanılarak bir ölçüye kadar giderilebilir.

#### 2.10.5. Denevlerde Sabit Deformasyon Hızının Sağlanması

Özellikle çekme ve basma deneylerinin uygulanmasında karşılaşılan önemli bir diğer güçlük, büyük şekil değişimleri ile yüksek hızların gerektiği gibi sağlanamamasının yanısıra, sıradan deneyler sırasında birim şekil değişim hızının sabit tutulmamasıdır. Şekil değişimi hızına duyarlık gösteren malzemelerin deneylerinde ve sıcak şekil verme işlemlerinde bu konu ayrı bir önem taşır. Bu amaçla çene hızının deney sırasında sürekli olarak deney parçasının boyuna göre değişebildiği makinalarda (servo-hidrolik test sistemleri) bu tür deneyler yapılarak söz konusu güçlük aşılmaya çalışılır. Deformasyon veya birim şekil değişimi hızı tanım olarak;

$$\dot{\epsilon} = \frac{d}{dt} (\epsilon) = \frac{d}{dt} \left( \frac{dL}{L} \right) = \frac{1}{L} \left( \frac{dL}{dt} \right)$$

olduğundan ve deney parçası ölçü boyunun (L) zamanla değişimi deney makinasının çene hızını ( $v_c$ ) verdiğinden

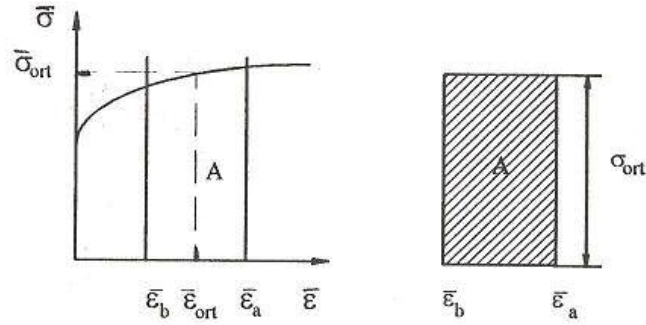
$$v_c = \frac{dL}{dt}$$

sabit deformasyon hızında deney yapabilmek için

$$\dot{\epsilon} = \frac{v_c}{L} \quad \text{oranının sabit tutulması gerekmektedir.}$$

### 2.10.6. Ortalama Akma Gerilmesi

Malzemenin, sıcak şekil değişiminde olduğu gibi, akma gerilmesinin şekil değişimi miktarına bağlı olmadığı durumlarda başlangıç akma gerilmesi tüm şekil değişimi süresince sabit kabul edilerek yük hesapları buna göre yapılmaktadır. Akma gerilmesinin sabit olarak alınması analizlerde büyük kolaylık sağlar. Ancak pekleşmenin söz konusu olduğu malzemelerde bu sabit değeri bulmak için bir ortalama akma gerilmesi hesabı yapılması gerekir. Bu amaçla Şekil 2-23'de görüldüğü gibi;



Şekil 2-23: Ortalama akma gerilmesinin tayini

- a. Grafikselsel olarak ortalama şekil değişimi miktarı  $\bar{\epsilon}_{ort}$

$$\bar{\epsilon}_{ort} = \frac{\bar{\epsilon}_a - \bar{\epsilon}_b}{2}$$

değerine tekabül eden bir ortalama gerilme değeri bulunur,

- b. veya malzemenin akma eğrisinin matematiksel ifadesinin bilinmesi durumunda aşağıdaki bağıntıdan yararlanılarak bulunur.

$$\bar{\sigma}_{ort} = \frac{1}{\bar{\epsilon}_a - \bar{\epsilon}_b} \int_{\bar{\epsilon}_b}^{\bar{\epsilon}_a} \bar{\sigma} \cdot d\bar{\epsilon}$$

### 2.11. Plastik Şekil Değişimi İşi

Birim hacim başına gerçekleştirilen plastik şekil değişimi işi için, akma eğrisinin altında kalan alan hesaplanır. Küçük bir



miktar plastik şekil değişimi için plastik şekil verme işindeki artış en genel hali ile;

$$dU_P = \sigma_{1j} \cdot d\epsilon_{1j}$$

şeklinde yazılabilir. Plastik şekil değiştirme işindeki artış miktarı asal bileşenler cinsinden,

$$dU_P = \sigma_1 \cdot d\epsilon_1 + \sigma_2 \cdot d\epsilon_2 + \sigma_3 \cdot d\epsilon_3$$

şeklinde, efektif gerilme cinsinden ise

$$dU_P = \bar{\sigma} \cdot d\bar{\epsilon}$$

şeklinde yazılabilir. Belirli bir şekil değişimi miktarı için birim hacim başına plastik şekil verme işi

$$U_P = \int_{\bar{\epsilon}_1}^{\bar{\epsilon}_2} \bar{\sigma} \cdot d\bar{\epsilon}$$

olarak hesaplanır.

Toplam plastik şekil verme işi  $W_P$  ise, parçanın hacmi  $V$  ile birim hacim başına düşen plastik şekil verme işi  $U_P$  değerinin çarpımıyla bulunur.

$$W_P = U_P \cdot V$$

Elde edilen bu değer şekil değişiminin gerçekleşmesi için sarfedilmesi gereken en düşük değer olup ancak ideal şekillenme şartları için geçerlidir. Gerçekte ise toplam şekil verme işi  $W_T$ , plastik şekil değişimi işi  $W_P$ 'ye ek olarak iç şekil değişimi işi  $W_{iç}$  ve malzemenin şekillenme sırasında takımlara olan bağıl hareketinden kaynaklanan sürtünme işi  $W_s$ 'nin toplamından ibarettir.

$$W_T = W_P + W_{iç} + W_s$$

iç şekil değişimi ve sürtünme işini belirlemek kolay olmadığından, hesaplarda kayıpların etkisini ifade etmek için işlem Verimi olarak tanımlanan ve ile gösterilen bir kavramdan yararlanılmaktadır.

$$\eta = \frac{W_P}{W_T}$$

Plastik şekil değişimi işinin toplam iş içindeki oranını veren değeri değişik plastik şekil verme işlemleri için farklı

olmaktadır. Örneğin, işlem verimi aralığı ekstrüzyon işlemi için 0,3-0,6 , tel çekme işlemi için 0,5-0,6 , sac haddedeleme 0,75-0,95 değerleri arasında değişmektedir. Verimin bire yakın değerleri kayıpların az olduğunu, diğer bir deyişle harcanan enerjinin büyük çoğunluğunun sadece plastik şekil değişimi için kullanıldığını göstermektedir.

### 2.12. Adyabatik Isınma

Plastik şekil değişimi nedeniyle parçada ısınma söz konusudur. Bu sıcaklık artışı adyabatik ısınma olarak adlandırılır ve

$$\Delta\theta = \frac{U_p}{\rho \cdot C}$$

şeklinde ifade edilir. Burada  $\rho$  malzemenin özgül ağırlığı, C ise malzemenin özgül ısısını temsil etmektedir. ideal şekillendirme koşulları için geçerli olan bu bağıntıda ortam, yağlayıcı sıvılar ve takımlara olan ısı kayıpları dikkate alınmadığından gerçek ısı artışı bu bağıntıyla bulunan değerden daha düşüktür.

### 2.13. Plastik Şekil Verme Yöntemlerinin Analizi

Plastisite teorisinin uygulamada en yaygın olarak kullanıldığı alanlardan biri de plastik şekil verme işlemlerinin analizidir. Ancak gerçekte parçaya şekillendirme sırasında uygulanan kuvvet ve şekil değişimleri oldukça karmaşık olduğundan bazı basitleştirici kabuller yapmak zorunda kalınmaktadır. Örneğin elastik şekil değişimleri ihmal edilerek, malzemenin ideal plastik davranış gösterdiği kabul edilebilir. Ayrıca, genellikle malzemenin homojen ve izotrop olduğu varsayılır.

Plastik şekil vermede deformasyon bölgesindeki noktalara ait gerilme, birim şekil değişimi ve deformasyon hızlarının saptanması için değişik öneriler yapılmıştır. Bu tür hesaplamalar şu aşamaları içerir:

1. Kuvvetlerin dengesi,
2. Levy-Mises plastisite denklemleri,
3. Tresca veya von Mises akma kriterleri,
4. Sınır koşulları,
5. Malzemenin akma eğrisi,
6. Hacim sabitliği bağıntısı.

Plastik şekillendirme problemlerinin analizinde değişik yöntemlerden yararlanılmaktadır. Bunlara örnek olarak aşağıdaki iki yöntem gösterilebilir:

### a. Dilim (Slab) Analizi

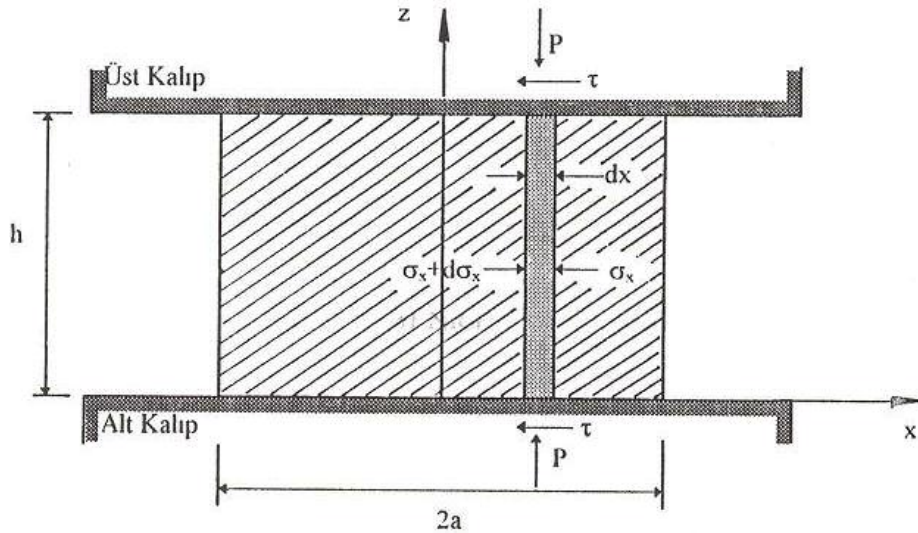
Bu yöntemde metalin deformasyon bölgesinde uniform olarak şekil değiştirdiği varsayılır. Dikdörtgen prizmalar biçimindeki dilimlerin gerilmeler altında biçim değiştirerek yine dikdörtgen prizmalara dönüşeceği kabul edilerek analiz gerçekleştirilir. Bu yöntem basit mukavemet prensiplerinden yararlanmasının yanı sıra deformasyon sırasında metal ile takımlar arasındaki sürtünmenin etkisini de içerebilmektedir. İlerideki bölümde bu yöntem kullanılarak düzlem birim şekil değişimi koşullarında aksenal yığıma sırasında oluşan gerilme dağılımı ile şekillendirmeyi sağlamak için gerekli kuvvetin hesaplanmasına bir örnek verilmektedir.

### b. Uniform Şekil Değişimi İsi Yöntemi

Bu yöntemde ortalama şekil değiştirme gerilmesinin saptanması için plastik deformasyon işinden yararlanılmaktadır. En önemli dezavantajı işlem sırasındaki sürtünme kuvvetlerine ait etkilerin analizde içerilmemesidir. Bu yönteme ait bir örnek ekstrüzyon konusu kapsamında ele alınacaktır.

### 2.14. Dilim Analizinin Düzlem Şekil Değişimi Şartlarında Uygulanması

Şekil 2-24'de görüldüğü gibi, düzlem şekil değişimi şartlarında yapılan bu işlemde derinlik (y) yönündeki boyut sabit kalmakta, dolayısıyla (z) yönünde yığılan metal sadece (x) yönünde hareket ederek yayılmaktadır.



Şekil 2-24: Dilim analizinin yığıma işlemine uygulanması

Kalınlığı  $dx$ , yüksekliği  $h$  ve birim derinliğine sahip bir elemana (slab), yığıma sırasında,  $x$  yönünde etkiyen kuvvetlerin dengesi;

$$\Sigma F_x = 0 = (\sigma_x + d\sigma_x) \cdot h \cdot 1 - \sigma_x \cdot h \cdot 1 - 2 \cdot \tau \cdot dx \cdot 1$$

şeklindedir. Gerekli sadeleştirmeler sonrasında eşitlik

$$h \cdot d\sigma_x - 2 \cdot \tau \cdot dx = 0$$

haline dönüşür. İşlem sırasında elemente etkiyen gerilmeler;  $z$  yönünde basma gerilmesi  $\sigma_z = -p$ , metalin yayılma yönündeki  $\sigma_x$  basma gerilmesi ve  $y$  yönünde şekil değişiminin olmamasını sağlayacak  $\sigma_y$  basma gerilmesidir.  $Y$  yönünde şekil değişimi gerçekleşmediğinden bu eksenindeki Levy-Mises bağıntısı

$$d\epsilon_y = 0 = (2/3)d\lambda \cdot [\sigma_y - \frac{1}{2}(\sigma_x + \sigma_z)]$$

ile verilmektedir. Dolayısıyla  $y$  yönündeki gerilme diğer gerilmeler cinsinden

$$\sigma_y = \frac{1}{2}(\sigma_x + \sigma_z)$$

değerini alır. Buna göre asal gerilmeler

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= \sigma_x & (\text{en büyük gerilme}) \\ \sigma_2 &= \sigma_y & (\text{ortalama gerilme}) \\ \sigma_3 &= \sigma_z & (\text{en küçük gerilme}) \end{aligned}$$

şeklinde sıralanırlar.

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_0 \quad \text{veya} \quad \sigma_x - \sigma_z = \sigma_0$$

ifadesi ile verilen basit Tresca Akma Kriteri kullanılacak olursa

$$\begin{aligned} \sigma_x - (-p) &= \sigma_0 \\ \sigma_x - p &= \sigma_0 \end{aligned}$$

şartı elde edilir. Metale, kalıba temas ederek hareket ettiği yönün tersi yönde etkiyen ve sürtünmeden kaynaklanan kayma gerilmesi, Coulomb Sürtünme Kanununa göre

$$\tau = \mu \cdot \sigma_z \quad \text{veya} \quad \tau = \mu \cdot p$$

şeklinde belirlenecek olursa, diferansiyel denklem

$$\begin{aligned} -h \cdot dp - 2 \cdot \mu \cdot p \cdot dx &= 0 \\ dp/p + (2 \cdot \mu/h) \cdot dx &= 0 \end{aligned}$$

şekline dönüşür. İkinci terimi eşitliğin diğer yanına atar ve her iki tarafı da integre edersek

$$\int \frac{dp}{p} = -\frac{2.\mu}{h} \int dx$$

$$\ln p = -\frac{2.\mu}{h} x + \ln C$$

ifadesi elde edilir. Her iki tarafın eksponansiyeli alındığında baskı gerilmesi p'nin yüzey üzerindeki dağılımı x'e bağlı olarak

$$p = C.\exp\left[-\frac{2.\mu}{h}.x\right]$$

şeklinde elde edilmiş olur. Bu işlem için sınır şartı olarak, x=a için  $\sigma_x=0$  kabul edilmektedir. Böylece x=a için  $p=\sigma_0$  olmakta ve integrasyon sabiti C

$$C = \sigma_0.\exp\left[-\frac{2.\mu}{h}.a\right]$$

değerini almaktadır. Bu durumda yığımayı gerçekleştiren basma gerilmesi p'nin x yönündeki değişimini veren ifade

$$p = \sigma_0.\exp\left[-\frac{2.\mu}{h}.(a-x)\right]$$

haline gelmektedir. Bu ifadenin yaklaşık olarak ve daha basit bir şekilde verilmesi istendiğinde;

$$\exp \beta = 1 + \beta + \beta^2/2! + \beta^3/3! + \dots$$

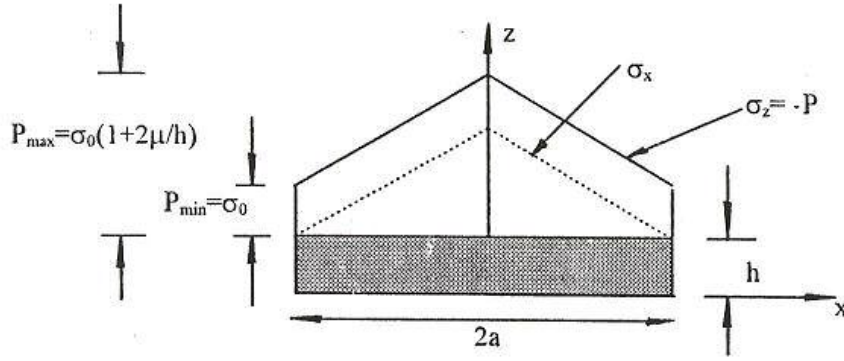
açılımının ilk iki terimi kullanılarak

$$p = \sigma_0.\left[1 + \frac{2.\mu}{h}.(a-x)\right]$$

elde edilebilir. Buna göre yayılma yönündeki gerilme  $\sigma_x$ 'in x yönündeki değişimi de

$$\sigma_x = \sigma_0.\left[-\frac{2.\mu}{h}.(a-x)\right]$$

ifadesiyle verilebilmektedir. Gerek yığma yönündeki, gerekse yayılma yönündeki gerilmelere ait dağılımların şematik görünüşü Şekil 2-25'de verilmiştir.



Şekil 2-25: Yığma sırasında basma gerilmesinin dağılımı

Görüldüğü gibi en büyük yığma gerilmesi yığılan parçanın merkezinde etkimekte olup,

$$P_{\max} = \sigma_0 \cdot \left(1 + \frac{2 \cdot \mu}{h}\right)$$

değerini almaktadır. En küçük yığma gerilmesi ise kenarlarında olup  $p_{\min} = \sigma_0$  değerindedir. Tüm kesite homojen olarak etkidiği varsayılabilir bir ortalama basma gerilmesi ise

$$P_{\text{ort}} = \frac{1}{a} \int_0^a p \cdot dx$$

$$P_{\text{ort}} = \sigma_0 \cdot \left[1 + \frac{\mu \cdot a}{h}\right]$$

şeklinde bulunur. Bu değer kullanılarak, birim derinlik için yığma kuvveti

$$F_{yığ} = P_{\text{ort}} \cdot (\text{yığma alanı})$$

$$F_{yığ} = \sigma_0 \cdot \left[1 + \frac{\mu \cdot a}{h}\right] \cdot (2a) \cdot (1)$$

olur. Yığılan metal bloğun derinliğinin de L olduğu düşünülürse bu durumda gerekli olan yığma kuvveti

$$F_{yığ} = 2 \cdot a \cdot L \cdot \sigma_0 \cdot \left[1 + \frac{\mu \cdot a}{h}\right]$$

şeklinde hesaplanır. Burada  $\sigma_0$  malzemenin sabit akma gerilmesi olup, metalin pekleşmesi durumunda, ulaşılan plastik şekil değişimi miktarına bağlı olarak hesaplanacak efektif gerilme değerinden yararlanmak gerekecektir.

## ÖRNEK PROBLEMLER:

**Problem 1:** Bir kenarı 20mm olan metal bir kübün üst yüzüne basma gerilmeleri uygulanmaktadır.

a) Bu şekil değişimi sonunda kübün yüksekliği 12mm'ye indirildiğine göre her üç eksendeki gerçek şekil değişimlerini bulunuz. (Basma Eksen: z)

b) Efektif gerilme ile efektif şekil değiştirme arasında,

$$\bar{\sigma} = 60 + 30\bar{\epsilon} \quad \sigma \text{ (N/mm}^2\text{)}$$

şeklinde bir bağıntı olduğuna göre işlemi gerçekleştirecek kuvveti hesaplayınız.

c) Toplam şekil değiştirme işini bulunuz (sürtünmeler ve diğer kayıplar ihmal edilecek).

Not:  $\bar{\epsilon} = |\epsilon_z|$  bağıntısını yeniden çıkarmayınız. Elastik şekil değişimlerini ihmal ediniz. (ln 0,6 = -0,51 , ln 1,67 = 0,51)

**Çözüm:**

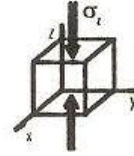
$$a) \epsilon_z = \ln \frac{h_1}{h_0} = \ln \frac{12}{20} = \ln 0,6 = -0,51$$

$$\epsilon_x + \epsilon_y + \epsilon_z = 0 \quad (\text{hacim sabitliği koşulu})$$

$$\epsilon_x = \epsilon_y \quad (\text{simetriden dolayı})$$

$$\epsilon_x + \epsilon_x - 0,51 = 0$$

$$\epsilon_x = \epsilon_y = 0,26$$



b) Tek eksenli gerilme hali için

$$\bar{\epsilon} = |\epsilon_z|$$

$$\bar{\sigma} = |\sigma_z|$$

olduğundan,  $\bar{\sigma} = 60 + 30\bar{\epsilon} = 60 + 30 \cdot 0,51$  Efektif gerilme  
 $\bar{\sigma} = 75,3 \text{ N/mm}^2$  bulunur.

Bu gerilmenin etkideği alan hacim sabitliğinden,

$$A_1 = A_0 \cdot \frac{l_0}{l_1} = 400 \cdot \frac{20}{12} = 666,7 \text{ mm}^2 \text{ dir.}$$

Etkiyen kuvvet ise ,

$$P_z = |\sigma_z| \cdot A_1 = 75,3 \cdot 666,7 = 50200 \text{ N}$$

$$c) U_p = \int_0^{\bar{\epsilon}} \bar{\sigma} \cdot d\bar{\epsilon} = \int_0^{0,51} (60 + 30\bar{\epsilon}) d\bar{\epsilon} = 60\bar{\epsilon} + \frac{30\bar{\epsilon}^2}{2} \Big|_0^{0,51}$$

$$U_p = 60 \cdot 0,51 + \frac{30}{2} \cdot 0,51^2 = 34,5 \text{ N/mm}^2 \text{ (birim hacim başına iş)}$$

$$W_T = V \cdot U_p = 20 \cdot 20 \cdot 20 \cdot 34,5 = 276 \cdot 10^3 \text{ Nmm}$$

$$W_t = 276 \text{ Nm} = \underline{\underline{276 \text{ J}}} \text{ (Toplam şekil değişimi işi)}$$

**Problem 2:** Kenar uzunluğu 80 mm olan metalik bir kübe sadece düşey ( $P_z$ ) basma kuvveti uygulandığında  $P_z = 4 \times 10^6$  N için plastik şekil değişimi başlamaktadır. Bu kübe yan yüzeylerden birbirine dik  $P_x = 2 \times 10^6$  N ve  $P_y = 1 \times 10^6$  N'luk basma kuvvetleri uygulandığı takdirde, plastik şekil değişiminin başlayacağı  $P_1$  kuvvetini bulunuz.

- 1) Sürtünme ihmal edilecektir.
- 2) Von Mises kriteri kullanılacaktır.

Von Mises kriteri:

$$\frac{1}{\sqrt{2}} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]^{1/2} = \sigma_0$$

**Çözüm:**

Birinci durumda:

$$\sigma_1 = 0$$

$$\sigma_2 = 0$$

$$\sigma_3 = \sigma_z \text{ (Negatif)}$$

$$\frac{1}{\sqrt{2}} [2\sigma_z^2]^{1/2} = \sigma_0 \Rightarrow \sigma_0 = |\sigma_z| \text{ (}\sigma_0 \text{ değeri her zaman 0'dan büyüktür.)}$$

$$\sigma_z = \frac{-4 \cdot 10^6}{80 \cdot 80} = -625 \text{ N/mm}^2 \text{ (basma olduğu için negatif)}$$

$$\sigma_0 = |\sigma_z| = 625 \text{ N/mm}^2$$

İkinci durumda:

$$\sigma_x = \sigma_2 = \frac{-2 \cdot 10^6}{80 \cdot 80} = -312,5 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_y = \sigma_1 = \frac{-1 \cdot 10^6}{80 \cdot 80} = -156,25 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_z = \sigma_3 = ? \text{ (en büyük basma gerilmesi, negatif olduğundan en küçük gerilme !)}$$

Asal gerilmeler

işaretler dikkate alınarak

büyükten küçüğe

doğru sıralanır.

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 = 2\sigma_0^2$$

$$(-156,25 + 312,5)^2 + (-312,5 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 + 156,25)^2 = 2(625)^2$$

$$\sigma_3 = \sigma_z \text{ olduğundan,}$$

$$\sigma_z^2 + 468,75 \sigma_z - 317382,8 = 0$$

Bu denklemin çözümü:

$$\sigma_{z1} = 751,6 \text{ N/mm}^2 \text{ (bu değer pozitif, yani çekme gerilmesi dolayısıyla çözüm olamaz!)}$$

$$\sigma_{z2} = -844,5 \text{ N/mm}^2 \text{ (Basma)}$$

Kuvvet:

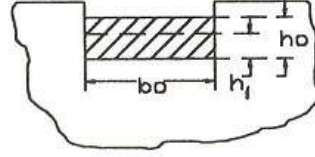
$$P_z = A \cdot |\sigma_z| = 80 \cdot 80 \cdot |-844,5|$$

$$P_z \cong \underline{\underline{5,4 \cdot 10^6 \text{ N}}}$$



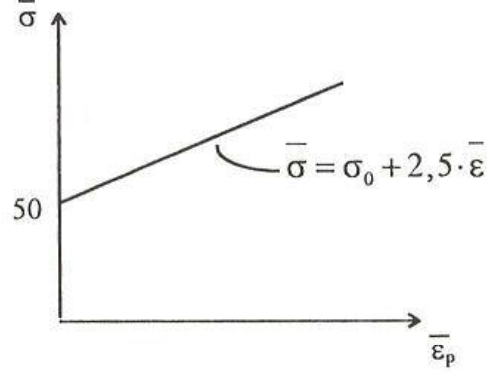
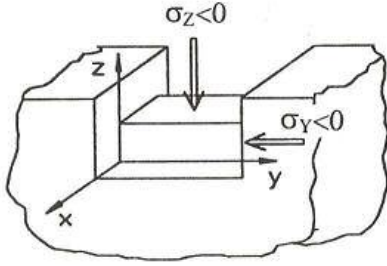
**Problem 3:** Dikdörtgenler prizması şeklindeki metalik bir parça, aynı genişlikte ve kanal biçiminde bir kalıp içinde yığılacaktır. Uzunluğuna şekil değişimi serbesttir. Şekil değişimi verimi  $\eta = 0,80$  dir.

$$\begin{aligned} l_0 &= 80 \text{ mm} \\ b_0 &= 50 \text{ mm} \\ h_0 &= 60 \text{ mm} \\ h_1 &= 40 \text{ mm} \end{aligned}$$



Malzemenin akma gerilmesi  $(\bar{\sigma} = \sigma_0 + 2,5 \cdot \bar{\epsilon})$  denklemine göre değiştiğine ve  $\sigma_0 = 50 \text{ N/mm}^2$  olduğuna göre

- Malzemenin  $\bar{\sigma} - \bar{\epsilon}_p$  diyagramını çizerek toplam şekil değişimi enerjisini hesaplayınız.
- Plastik şekil değişiminin başladığı  $P_0$  ve parça yüksekliğinin  $h_1 = 40 \text{ mm}$  değerini aldığı andaki  $P_s$  yığıma kuvvetlerini bulunuz. (Tresca)



$$\begin{aligned} \sigma_1 &= \sigma_x = 0 \\ \sigma_2 &= \sigma_y < 0 \\ \sigma_3 &= \sigma_z < 0 \text{ (en büyük basma gerilmesi)} \end{aligned}$$

$$U_p = \int_0^{\bar{\epsilon}} (50 + 25\bar{\epsilon}_p) d\bar{\epsilon}_p$$

$$\epsilon_z = \ln \frac{h_1}{h_0} = -0,41$$

$$\epsilon_y = 0$$

$$\epsilon_x = -\epsilon_z = 0,41 \text{ (hacim sabitliği koşulundan)}$$

$$\bar{\epsilon}_p = \frac{\sqrt{2}}{3} \left[ (0,41 - 0)^2 + (0 + 0,41)^2 + (-0,41 - 0,41)^2 \right]^{1/2}$$

$$\bar{\epsilon}_p = 0,47$$

$$U_p = \int_0^{0,47} (50 + 25\bar{\epsilon}_p) d\bar{\epsilon}_p = 50 \cdot 0,47 + \frac{25}{2} \cdot 0,47^2$$

$$U_p = 26,26 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{Toplam iş: } W_T = \frac{1}{\eta} V U_p = \frac{1}{0,8} \cdot 80 \cdot 50 \cdot 60 \cdot 26,26 = 7,878 \cdot 10^6 \text{ Nmm} = \underline{\underline{7878 \text{ J}}}$$

b) Kalıp içinde y doğrultusunda şekil değişimi sınırlı olduğundan:

$$d\epsilon_y = 0 = \left[ \sigma_y - \frac{1}{2}(\sigma_x + \sigma_z) \right] \quad \sigma_x = 0$$

buradan  $\sigma_y = \frac{\sigma_z}{2}$

Asal gerilmeler:

$$\sigma_1 = 0$$

$$\sigma_2 = \sigma_z / 2 = \sigma_y$$

$$\sigma_3 = \sigma_z$$

Tresca:

$$0 - \sigma_z = \sigma_0$$

$$\sigma_z = -50 \text{ N/mm}^2$$

$$0 - \sigma_z = 50$$

$$\sigma_y = -25 \text{ N/mm}^2$$

Akmanın başladığı kuvvet:

$$P_0 = A_0 \cdot |\sigma_z| = 80 \cdot 50 \cdot 50 = \underline{\underline{200000 \text{ N}}}$$

Son yığılma kuvveti:

$$P_s = A_s \cdot |\sigma_z|$$

$$\bar{\sigma}_s = 50 + 25 \cdot 0,47 = 61,75 \text{ N/mm}^2$$

$$\bar{\sigma}_s = \frac{\sqrt{2}}{2} \left[ (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 \right]^{1/2}$$

$$61,75 = \frac{\sqrt{2}}{2} \left[ (0 - \sigma_z/2)^2 + (\sigma_z/2 - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - 0)^2 \right]^{1/2}$$

$$61,75 = \frac{\sqrt{2}}{2} \left[ \sigma_z^2/4 + \sigma_z^2/4 + \sigma_z^2 \right]^{1/2}$$

$$61,75 = \pm \frac{\sqrt{3}}{2} \sigma_z$$

$$\sigma_z = -\frac{2 \cdot 61,75}{\sqrt{3}} = -72,22 \text{ N/mm}^2 \text{ (basma gerilmesi olduğu için negatif değer alındı .)}$$

Son yığılma kuvveti:

$$P_s = l_1 \cdot b_0 \cdot |\sigma_z| = \frac{l_0 \cdot h_0}{h_1} \cdot b_0 \cdot |\sigma_z|$$

$$P_s = \frac{80 \cdot 60}{40} \cdot 50 \cdot 72,22$$

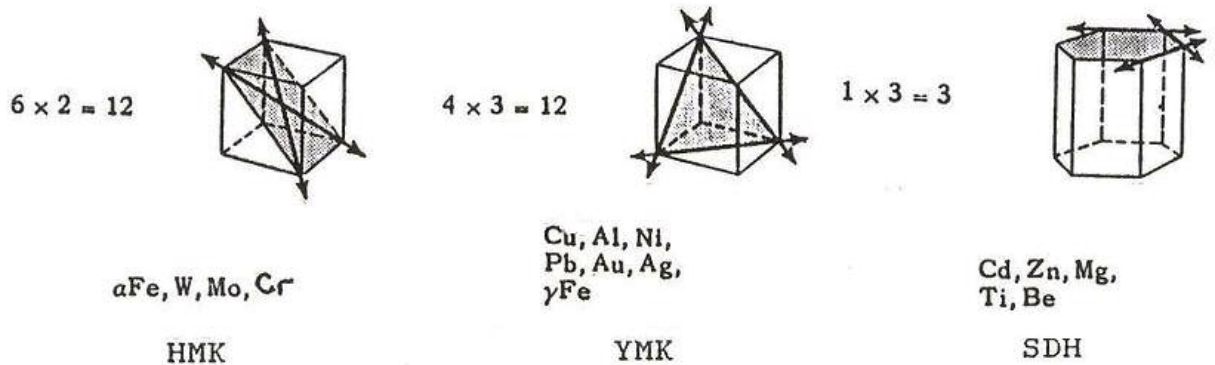
$$P_s = \underline{\underline{433320 \text{ N}}}$$

### 3. METALURJİK ESASLAR

Plastik şekil verme yöntemleriyle biçimlendirilen metal malzemeleri sadece dış kuvvetlerin etkisiyle şekil değiştiren geometrik cisimler olarak görmek doğru değildir. Üretilecek parçaların belirli bir biçime sahip olmalarının yanı sıra, dayanım ve süreklilik gibi içyapıya bağlı kullanım özelliklerini de sağlaması istenmektedir. Plastik şekil verme sırasında metalin iç yapısı ile şekillendirme işlemi birbirlerini karşılıklı olarak etkilediklerinden, metalurjik etkenlerin de iyi bilinmesi ve içyapısal oluşumların dikkate alınması gerekmektedir. Bu bölümde plastik şekil değişimine ait metalurjik esaslı bilgilerin kısa bir özeti yapılacaktır.

#### 3.1 Metallerin Kristal Yapısı

Metaller, atomların üç boyutlu uzayda belirli düzenlerde (kafes) dizilmeleriyle meydana gelen kristal yapıya sahiptirler. Teknikte kullanılan metaller, herbiri ayrı bir kristal olan tanelerden meydana gelir. Bir metalin karakteristik kafes yapısının özelliklerini içeren en küçük atom topluluğuna birim hücre denilmektedir. Kristal yapılar birim hücrelerin üç boyutta tekrarlanması neticesinde oluşurlar. Metallerde en çok rastlanan birim hücre yapıları; Hacim Merkezli Kübik (HMK), Yüzey Merkezli Kübik (YMK) ve Sıkı Düzen Hegzagonal (SDH) yapılarıdır.

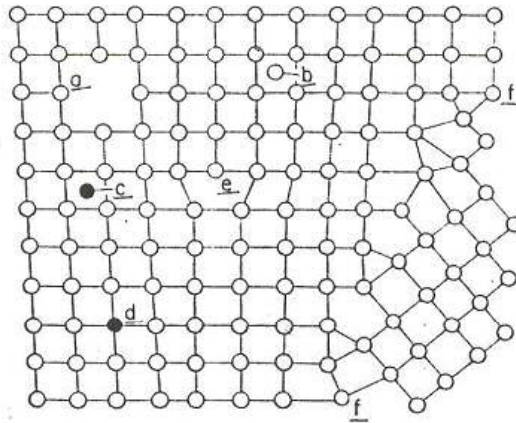


Şekil 3-1. HMK, YMK ve SDH birim hücreler ile bu kafeslere ait kayma sistemleri.

Kristal yapılar hiçbir zaman olmaları gereken ideal durumda bulunmazlar ve bünyelerinde şu önemli kristal hatalarını içerirler:

- Noktasal Hatalar (atomsal boşluk, arayer atomu vs.),
- Çizgisel Hatalar (dislokasyonlar),
- Yüzeysel Hatalar (tane sınırları).

Bu hatalar metalsel malzemelerin şekil değiştirme özellikleri ile dayanım ve süneklik gibi mekanik özelliklerini belirleyen en önemli etkenlerdir. Şekil 3-2'te bu yapı kusurlarından bazıları şematik olarak verilmiştir.



- a. Boşluk
- b. Arayerde atom
- c. Arayerde yabancı atom
- d. İkame atom
- e. Kenar dislokasyonu
- f. Tane sınırı

Şekil 3-2: Kristal yapı kusurları

### 3.2. Tek Kristallerde Plastik Şekil Değişimi

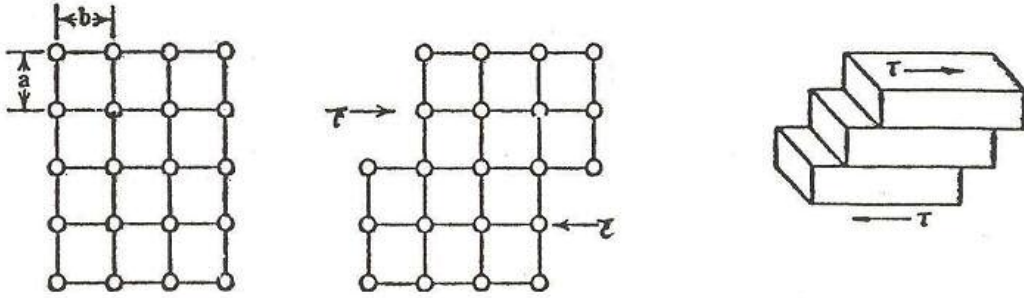
Mühendislikte kullanılan metal ve alaşımların hemen hepsi Çok Taneli (polikristal) içyapılara sahiptir. Ancak metallerde plastik şekil değişimini sağlayan mekanizmaları incelemek için, öncelikle bir tek kristaldeki plastik şekil değişimi mekanizmalarını ele almak gerekir.

Kristallerin plastik şekil değişimini sağlayan üç farklı mekanizmadan söz konusudur:

- Kayma
- İkizlenme
- Dislokasyon sürünmesi.

### (a) Kayma

Metallerde plastik şekil değişimini sağlayan mekanizmaların en önemlisi kaymadır. Şekil 3-3'de görüldüğü gibi, kayma sırasında kristalin bir kısmı, diğer yarısına göre ötelenerek hareket etmektedir. Kaymanın gerçekleştiği bu iki kısmı ayıran düzleme Kayma Düzlemi, kaymanın gerçekleştiği yöne ise Kayma Doğrultusu adı verilmektedir. Kayma düzlemi ve kayma doğrultusu beraberce Kayma Sistemi'ni oluşturur. Bir kristal kafesteki kayma sistemi sayısı o kristal yapının plastik şekil değiştirmeye uygunluğunu belirleyen önemli kriterlerden biridir.

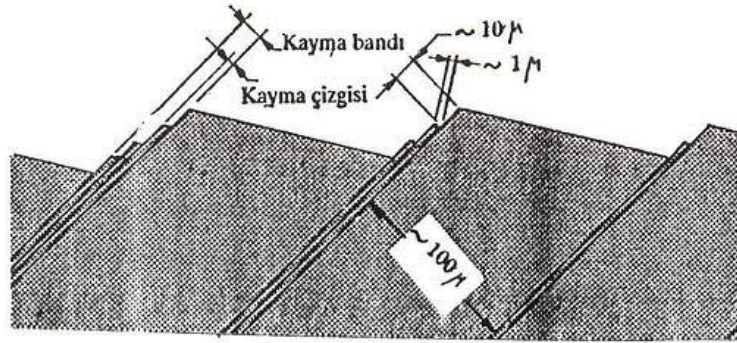


Şekil 3-3: Kristal yapıda kayma olayı.

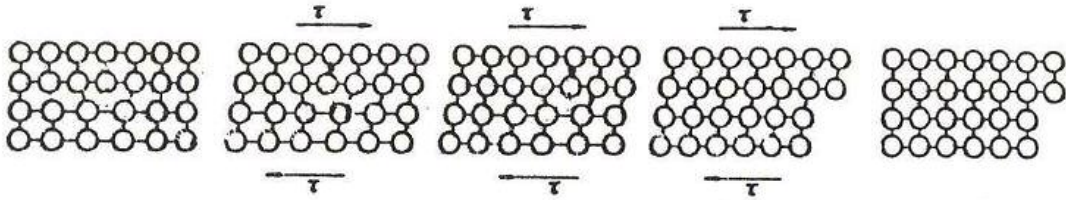
Kayma olayı öncelikle, atom yoğunluğu en yüksek olan düzlem ve doğrultularda meydana geldiğinden, bu düzlem ve doğrultular kaymanın gerçekleşeceği kayma sistemini oluştururlar. Şekil 3-1'de de görüldüğü gibi, HMK ve YMK yapılar 12'şer kayma sistemi içerirler. Örneğin YMK kristal kafeste  $\{111\}$  düzlemleri üzerindeki  $[110]$  doğrultuları beraberce bu kafesteki 12 adet kayma sistemini oluşturur. Buna karşılık SDH yapılar ancak 3 kayma sistemi içerdiğinden plastik şekil değiştirme yeteneği diğerlerine göre daha azdır.

Kayma düzleminin malzeme yüzeyine ulaşmasıyla oluşan kayma çizgilerinin gözle ve optik mikroskoplarla algılanması çok zordur. Optik mikroskoplarda, plastik şekil değişimine uğrayan metallerin yüzeyinde görülen deformasyon izleri, gerçekte birkaç kayma çizgisinden oluşan kayma bantlarıdır (Şekil 3-4).

Kaymanın, yani iki kafes bölümünün birbirine göre ötelenmesinin, ideal bir kafeste gerçekleşmesi, yani bu düzlemdeki tüm atomların komşularıyla olan bağlarının tamamiyle ayrılması için uygulanması gereken teorik kayma gerilmesi değeri çok yüksektir. Ancak kristal bünyesinde bulunan çizgisel kusurlardan olan dislokasyonların kayarak hareket etmesi çok daha kolay gerçekleşebildiğinden, kayma gerçekte dislokasyonların kristal içindeki hareketleri ile meydana gelmektedir. Şekil 3-5'de kristal kafeste bulunan bir kenar dislokasyonun kayması şematik olarak verilmektedir.



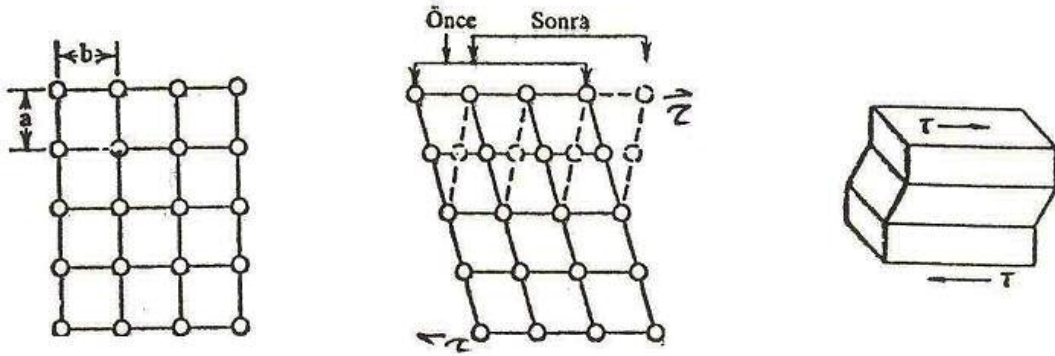
Şekil 3-4: Kayma çizgileri ve kayma bantları.



Şekil 3-5: Kenar dislokasyonun kayması.

#### (b) İkizlenme

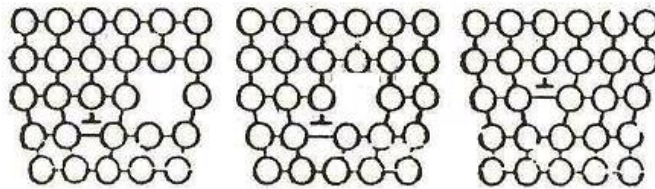
Kaymanın güç olduğu, düşük sıcaklıklardaki ve/veya ani olarak gerçekleşen zorlanmalarda bu mekanizmanın çalışmasıyla plastik şekil değişimi gerçekleşebilmektedir. Şekil 3-6'da şematik olarak verilen ve kaymaya oranla çok daha küçük şekil değişimlerinin söz konusu olduğu bu mekanizma ile, kristalin bir kısmı diğer kısmına göre bir kristal düzleme (ikiz düzlemi) simetrik olacak biçimde şekil değiştirmektedir.



Şekil 3-6: İkizlenme mekanizması ile şekil değişimi.

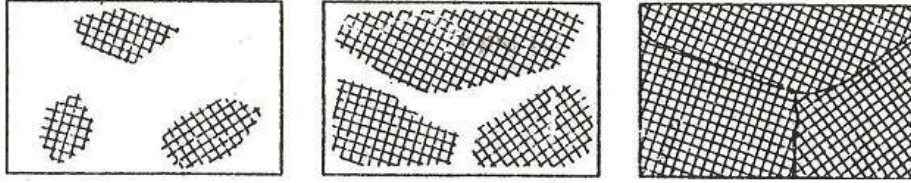
### (c) Dislokasyon Sürünmesi

Yüksek sıcaklık bölgesinde (metalın mutlak ergime sıcaklığı- nın yarısından büyük sıcaklıklar), kenar dislokasyonun ek yarı düzleminin altında kalan atomlar ısıl aktivasyon sayesinde kendileri için daha dengeli konumlar içeren kafes noktalarına yayınırlar. Böylece dislokasyon bir üst kayma düzlemine çıkmış olur. Bu olaya kenar dislokasyonların Tırmanma'sı adı verilir. Bu hareketlerin toplanması neticesinde yapı plastik şekil değişimine uğrar. Şekil 3-7'de işleyişi şematik olarak verilen bu mekanizma sayesinde dislokasyonların engellerden kurtulması mümkün olur.



Şekil 3-7: Kenar dislokasyonun tırmanması.

### 3.3. Çok Taneli (Polikristal) İçyapılarda Plastik Şekil Değişimi Mekanizmaları ve Tane Sınırlarının Rolü



Şekil 3-8: Tane sınırı oluşumu

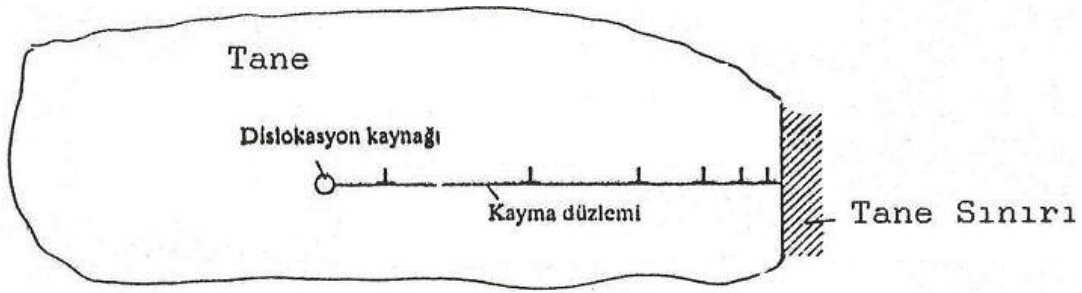
Mühendislik uygulamalarında yaygın olarak kullanılan metallerin hemen hepsi çok taneli içyapılara sahiptirler. Metallerde sıvı halden katı hale dönüşüm, yani katılaşma, sıvı içinde küçük çekirdeklerin meydana gelmesi ile başlar ve bunların herbiri ayrı bir tanenin nüvesini oluşturur. Sıvı içinde değişik noktalarda başlayan bu çekirdeklerin büyümesi ve birbirlerine temas etmeleri ile tane sınırları oluşur. Her bir tanenin oryantasyonunun farklı olması nedeniyle kristal kafesleri komşu tanelerle tam uyum sağlayamadıklarından tane sınırları düzensiz bölgelerdir.

Tane büyüklüğü ve tane sınırlarının özellikleri malzemenin mekanik özelliklerinin belirlenmesinde önemli rol oynarlar. Tane sınırları dislokasyonlar için önemli engellerden biridir. Dislokasyonlar tane içinde sürdürdükleri hareketlerini tane sınırında durdurmak zorunda kalırlar. Bu engelleyici etkisinden dolayı tane boyutu küçüldükçe malzemenin akma dayanımında ve sertlikte artış görülür. Akma gerilmesi  $\sigma$  ile tane boyutu  $d$  (ortalama tane çapı) arasında

$$\sigma \sim d^{-1/2}$$

şeklinde bir ilişki vardır (Hall-Petch bağıntısı). Diğer bir deyişle tane boyutu küçüldüğünde akma dayanımı artmaktadır.

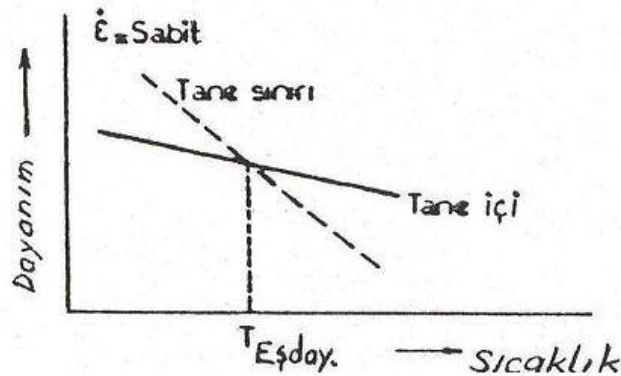




Şekil 3-9: Dislokasyonların tane sınırları tarafından engellenmesi ve buralarda yığılması.

Tek kristallerde mekanik özellikler anizotropdur. Yani yöne bağımlılık söz konusudur. Çok taneli içyapılarda ise tanelerin kristal doğrultuları gelişmiş olduğundan ve çok sayıda tane bulunduğundan her bir tanenin anizotrop özelliği hissedilemez. Dolayısıyla çok taneli malzemeler izotrop davranış gösterirler.

Çok taneli malzemelerin plastik şekil değiştirmesinde, tane içlerinde oluşan kayma, ikizlenme ve yüksek sıcaklıklardaki dislokasyon sürünmesi mekanizmalarına ek olarak, yine yüksek sıcaklıkta kendini gösteren Tane Sınırı Kayması mekanizması da sözkonusudur. Oda sıcaklığında tane içinden daha yüksek dayanıma sahip olan tane sınırlarının yüksek sıcaklıklarda birbirlerine tutunma dayanımı düşer. Şekil 3-10 görülen eşdayanım sıcaklığının üzerinde taneler birbirleri üzerinden kayarak metalin şekil değiştirmesine katkıda bulunurlar.



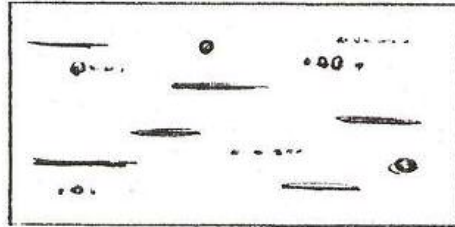
Şekil 3-10: Tane sınırı ve tane içi dayanımlarının sıcaklıkla değişimi ve eşdayanım sıcaklığı

Tane sınırlarının kimyasal bileşimi de malzeme özellikleri üzerinde etkilidir. Tane sınırlarındaki yabancı maddelerin (katışkı, empürite vs.) cins ve miktarı malzeme özelliklerinde önemli rol oynar. Özellikle tane sınırlarında kırılma bileşiklerinin bulunması malzemeyi gevrekletirmektedir. Buna örnek olarak Sb ve Bi elementlerinin, alaşımlı çeliklerin tane sınırlarında toplanmasıyla oluşan Temper Gevrekliği verilebilir.

Malzemenin yüksek sıcaklıklarda uzun süreli tutulması neticesinde taneler arasında oluşan oksidasyon (Yanma), çelik bileşiminde aşırı oranda kükürt bulunması nedeniyle tane sınırlarında demir sülfür fazının oluşarak 900 °C civarında meydana getirdiği Sıcak Kırılma ile çelik bileşimindeki aşırı miktardaki fosforun oluşturduğu Soğuk Kırılma, metalin şekillendirilebilme özelliğini kaybedecek derecede gevrekleşmesine neden olabilir.

#### 3.4. İç Yapının Etkisi

İç yapıdaki kalıntıların türleri ve dağılımları malzemenin şekil değiştirme kabiliyetine ve üretilen parçanın özelliklerine etki eder. Kolay şekillendirilebilen kalıntılar (özellikle: MnS) şekil verme sırasında ezilerek geniş bir yüzeye yayılır ve şekil vermeye dik doğrultuda metalin sürekliliğini bozarak özellikle sünekliğini olumsuz yönde etkiler, Şekil 3-11. Zor şekillendirilebilen kalıntılar (oksitler ve silikatlar) şekil verme sırasında kırılarak ayrılmalara neden olurlar. Tane sınırlarında gevrek bir fazın sürekli ağ şeklinde bulunması da ayrılmalara neden olur. Gevrek malzemelere plastik şekil verirken ekstrüzyon gibi her taraftan basma zorlanmalarının etkidiği yöntemlerin kullanılması daha uygundur.



Şekil 3-11: Plastik şekil değiştirmiş bir metalde kalıntıların dağılımı

### 3.5. Benzeş Sıcaklık (Homolog Sıcaklık) Kavramı

Malzemelerin gerek çalıştıkları, gerekse şekillendirildikleri sıcaklıklar, bunlar üzerinde etkin olabilecek plastik şekil değişimi mekanizmalarını belirler. Metalin cinsinden bağımsız olarak sıcak ve soğuk çalışma alanlarını tanımlayabilmek için Benzeş Sıcaklık ( $T_b$ ) kavramı geliştirilmiştir. Bu sıcaklık metalin çalışma veya şekillendirilme sıcaklığının mutlak sıcaklık cinsinden metalin ergime sıcaklığına oranı olarak tanımlanmaktadır.

$$T_b = \frac{T_{\text{çalışma}} [K]}{T_{\text{ergime}} [K]}$$

Birimsiz bir büyüklük olan bu sıcaklık 0'dan 1'e kadar değerler almaktadır. Çalışma sıcaklığı metalin ergime sıcaklığı seviyesinde ise benzeş sıcaklık 1 değerini almakta, mutlak sıfır (-273 C) sıcaklığında ise 0 değerini almaktadır. Benzeş sıcaklık kavramı kullanılarak çalışma ortamı genel olarak şu şekilde sınıflandırılabilir:

$T_b < 0,2$	Soğuk şekillendirme bölgesi,
$0,2 < T_b < 0,5$	Ilık şekillendirme bölgesi,
$0,5 < T_b$	Sıcak şekillendirme bölgesi.

Özellikle sıcak ve soğuk şekillendirme bölgesindeki şekil değişimi mekanizmaları belirgin farklar göstermesine rağmen ılık şekil değişimi bölgesinde etkin olan mekanizmalar için böyle bir ayırım yapmak mümkün değildir ve burada soğuk ile sıcak deformasyon özellikleri beraberce kendini hissettirmektedir.

### 3.6. Soğuk Şekil Verme

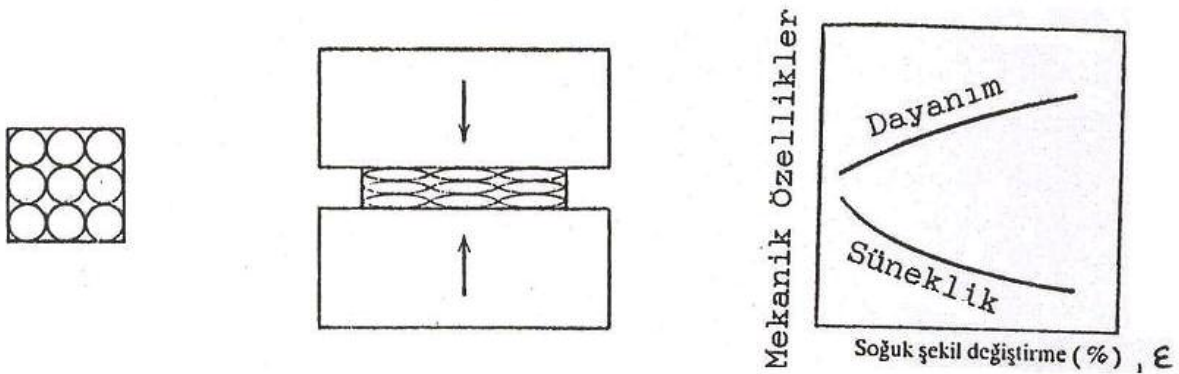
Plastik şekil verme olaylarında şekil değiştirme miktarları büyüktür ve bu işlemler sırasında malzemelerin tane yapıları bozulur. Bu süreçte birincil katılaştırma

sonrası oluşan dislokasyonlar yapıdaki bazı kusurlarla beraber uygulanan gerilmenin de etkisiyle yeni dislokasyonlar meydana getirerek yapıdaki dislokasyon yoğunluğunu arttıırırlar. Böylece yoğunluğu artan dislokasyonlar;

- Birbirleriyle,
- Kafesteki noktasal kusurlarla,
- Tane sınırlarıyla

etkileşerek hareketleri zorlaşır. Böylece plastik şekil değişimine karşı malzemenin direnci sürekli artar. Bu olay pekleşme olarak anılır. Diğer bir deyişle malzemenin sertlik ve dayanımı artar, süneklik ve elektronların kafes içinde rahat hareket edebilmelerinin bir ölçütü olan elektrik iletkenliği düşer. Deformasyonun ileri safhalarında malzeme artık daha büyük şekil değişimlerini kaldıramaz ve iç çatlaklar oluşur. Yani her malzemeye uygulanabilecek soğuk deformasyon miktarı için bir sınır değer söz konusudur.

Ayrılmalar oluşturmadan şekil vermeye devam edebilmek için ve malzemeyi başlangıçtaki duruma getirebilmek için yumuşatma tavlı'na başvurulur. Şekil 3-12 ve 3-13'te metallerin soğuk şekil değişimi sırasında uğradıkları yapısal değişiklik ve özelliklerdeki değişiklikler şematik olarak verilmektedir.



Şekil 3-12: Soğuk şekil değişimi ve mekanik özelliklere etkisi.

Soğuk şekil değişiminin en belirgin özellikleri şunlardır:

a. Soğuk şekil değişimi sırasında oluşan pekleşme nedeniyle şekillendirme için gerekli olan kuvvet ve enerji yüksektir.

b. Ara tav uygulaması yapılmadan verilebilecek şekil değişimi miktarı sınırlıdır.

c. Şekillendirme sonrası boyut ve yüzey hassasiyeti iyidir.

d. Şekillendirme sonrasında ısıl iç gerilmelerin oluşması söz konusudur.

e. Malzemenin mekanik özellikleri, soğuk şekil değişimi miktarı ve daha sonra uygulanabilecek ısıl işlemler ile ayarlanabilir.

Yumuşatma tava, bu işlem sırasında oluşacak içyapısal değişikliklere bağlı olarak üç farklı sıcaklık bölgesinde yapılır:

- Toparlanma	$0,3 < T_b < 0,4$
- Yeniden Kristalleşme	$0,4 < T_b < 0,6$
- Tane irileşmesi	$0,6 < T_b$

Toparlanma'da malzemenin mekanik özelliklerinde belirgin bir değişim görülmez. Ancak elektrik iletkenliği artar. Bu durum dislokasyonların yoğunluklarını azaltmadan oluşturdıkları yeni bir düzen (alt taneler) ile açıklanmaktadır.

Yeniden Kristalleşme bölgesinde ise yeni ve dislokasyon yoğunluğu düşük taneler oluşmaktadır. Bu durumda sertlik ve dayanım düşerken süneklik artmakta, elektrik iletkenliğinde de bir iyileşme görülmektedir. Malzemenin soğuk şekil değişimine uğramış yapısının en az yarısının, bir saat içinde yeniden kristalleşebildiği sıcaklık o malzemenin yeniden kristalleşme sıcaklığı olarak tanımlanmaktadır. Yeniden kristalleşme tavinin bazı önemli özellikleri vardır:

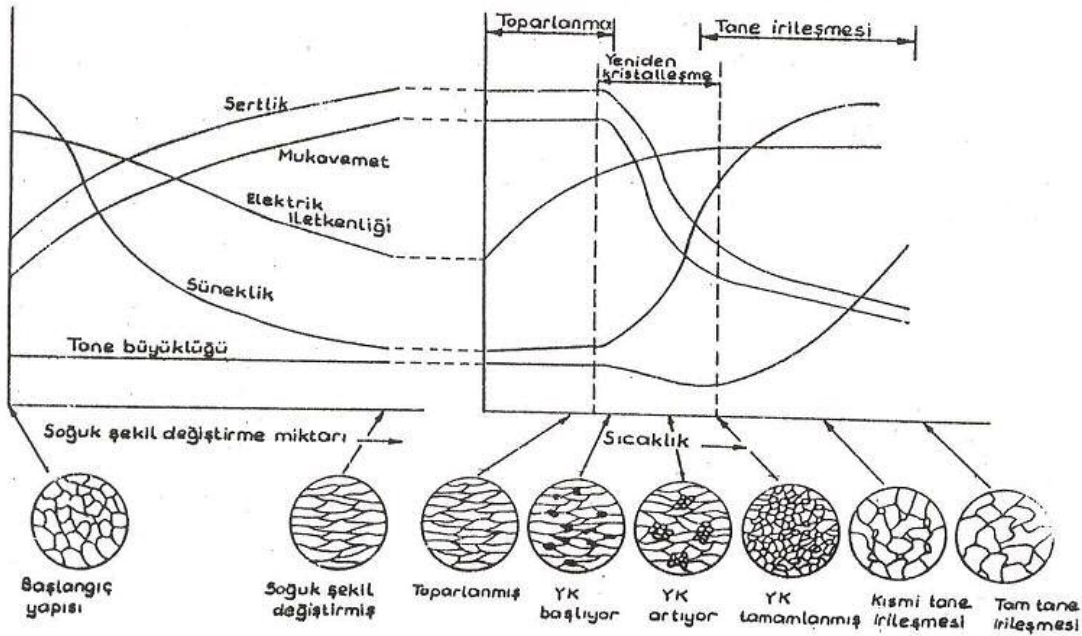
a. Yapının yeniden kristalleşebilmesi için belirli bir seviyede dislokasyon yoğunluğuna ulaşılmış olması gereklidir. Diğer bir deyişle asgari miktarda bir soğuk şekil değişimi (yaklaşık olarak % 10 mertebelerinde) malzemeye uygulanmış olmalıdır.

b. Yeniden kristalleşme için gerekli olan sıcaklık, malzemenin gördüğü soğuk şekil değişimi miktarının artmasıyla düşer.

c. Yeniden kristalleşme için gerekli süre tav sıcaklığının artmasıyla kısalır.

d. Malzemenin gördüğü soğuk şekil değişimi miktarı arttıkça yeniden kristalleşme sonrası oluşan iç yapıdaki tane boyutu küçülür.

Tav sıcaklığı, benzeş sıcaklığın 0,6'sından büyük olacak şekilde seçilirse içyapıdaki tanelerden bazıları diğerlerinin aleyhine büyüyerek irileşir. Tane irileşmesi olarak adlandırılan bu olay, malzemenin mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkileyerek dayanımını azalmakta ve daha sonra uygulanacak soğuk şekil değişimi sonrasındaki yüzey kalitesini çok düşürmektedir. Bu durumda portakal kabuğu görünümünde pürüzlü bir yüzey elde edildiğinden yeniden kristalleşme tava için sıcaklık ve sürenin çok dikkatli seçilerek tane irileşmesinden kaçınılması gerekmektedir.



Şekil 3-13: Soğuk şekil değişimi ve yumuşatma tavının mekanik özelliklere etkisi.

### 3.7. Sıcak Şekil Verme

Şekil verme işlemi sırasında malzemenin tane yapısının bozulur, ancak işlem yüksek sıcaklıklarda yapıldığında malzemenin iç yapısını bir anlamda yenilemesinin sağlandığı toparlanma, yeniden kristalleşme v.b. olaylar da gerçekleşir. Bu bölgede dislokasyon yoğunluğunda artış meydana gelmediği için pekleşme söz konusu olmadığı gibi, var olan dislokasyonların da hareket kabiliyeti ısı aktivasyonu nedeniyle artar. Toparlanma ve yeniden kristalleşme gibi mekanizmalarda yüksek sıcaklığın yanısıra belirli bir zaman gerektiği için, sıcak şekil vermede şekil verme hızının da önemli bir değişken olarak dikkate alınması gerekmektedir. Diğer bir deyişle şekil değişimi hızı yeniden kristalleşme süresini belirlediğinden pekleşme etkisinin hissedilmemesi için yüksek hızlarda daha yüksek şekillendirme sıcaklıkları gerekmektedir. Dolayısıyla sıcaklık şekil vermede sıcaklık - şekil değişim hızı çiftinin beraberce düşünülmesi gerekecektir.

Sıcak şekillendirmenin en belirgin özellikleri şunlardır:

a. Bozulan tane yapısı dinamik yeniden kristalleşme ile deformasyon anında yeniden oluşmaktadır. Pekleşmenin görülmediği bu durumda malzemeye daha büyük şekil değişimleri verilebilmektedir.

b. Şekil değişimi için gerekli kuvvet ve enerji daha düşüktür.

c. Metal yapısında bulunan gözenek, gaz boşlukları gibi süreksizlikler (oksitlenmemiş olmaları koşuluyla) ve kimyasal bileşimdeki farklılıklar giderilebilir.

d. Döküm yapısındaki büyük sütunsal taneler, ince ve eşeksenel tanelere dönüşür.

e. Metalsel olmayan oksit, sülfür ve nitrür gibi katışkılar (enklüzyonlar) kırılarak içyapıya homojen bir şekilde dağılırlar.

f. Parça yüzeyindeki oksitlenme ve tufal oluşumu nedeniyle yüzey kalitesi ve boyut hassasiyeti düşüktür.

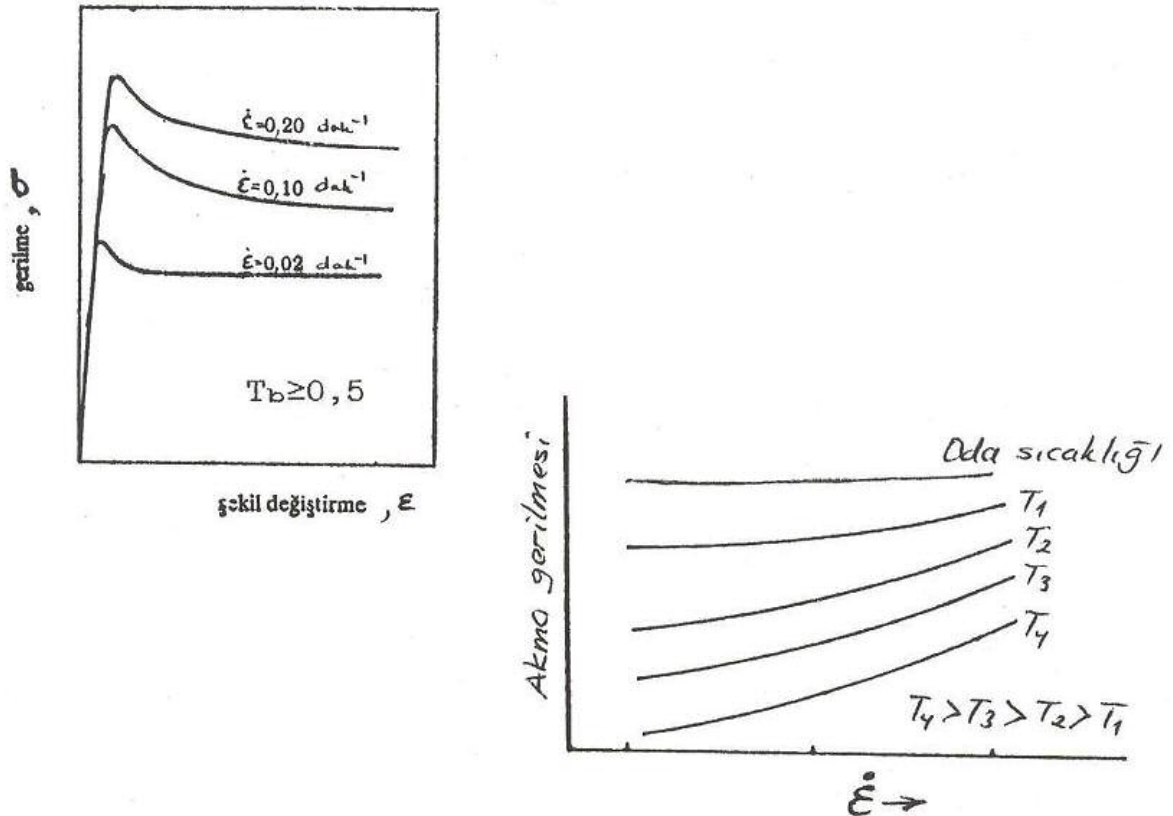
g. Tav işlemi maliyeti arttırır.

h. Parçanın biçim ve boyutuna bağlı olarak, değişik bölgelerin farklı soğumasından kaynaklanabilecek ısı artıkları gerilmelerle karşılaşmak mümkündür.

Sıcak şekillendirme genellikle birkaç adımda (pasoda) yapılır. İşlem sırasında başlangıç ve bitiş sıcaklığı belirli bir aralıkta kalmak zorundadır. Son paso yeniden kristalleşme sıcaklığının biraz üzerinde tutularak ve son pasodaki şekil verme miktarı yüksek tutularak ince taneli bir iç yapı elde edilebilir (termo-mekanik işlemler).

### 3.8. Ilık Şekillendirme

Bu sıcaklık aralığında yeniden kristalleşme görülmez. Ancak toparlanma mekanizmasının çalışmasıyla dislokasyonlar yeniden düzenlenirler. Gerçekleştirilebilen deformasyon miktarları sıcaktan daha düşük, soğuktan ise daha yüksektir. Pekleşme daha azdır ve ısıtma maliyeti daha düşüktür.



Şekil 3-14: Deformasyon hızının, sıcak çalışma bölgesinde malzemenin akma gerilmesine etkisi.



### 3.9. Plastik Şekil Vermede Hızın Etkisi

Sıcaklık artışı malzemenin akma dayanımını düşürür. Bunun başlıca nedeni pekleşmenin giderilmesi ve dislokasyonların hareketlerini daha rahatlıkla yapabilmeleridir. Ancak Şekil 3-14'te görüldüğü gibi yüksek sıcaklıklardaki şekillendirme işlemlerinde akma dayanımı deformasyon hızından etkilenmekte ve yüksek hızlarda akma dayanımı artmaktadır. Diğer bir deyişle yüksek sıcaklıklarda hızlı olarak gerçekleştirilen bir şekillendirme işleminde gerekli kuvvet daha fazla olmaktadır. Bunun da nedeni yüksek sıcaklıklarda dislokasyonların yapıda daha rahat hareket etmesini sağlayacak gevşeme mekanizmalarının yayınmaya, dolayısıyla süreye de bağlı olmasıdır.

Şekil değişimi hızının, akma gerilmesi  $\sigma$  üzerindeki etkisi yüksek sıcaklık aralığında;

$$\sigma = C. \dot{\epsilon}^m$$

ilişkisiyle verilmektedir. Buradaki C ve m değerleri o sıcaklıktaki malzeme sabitleridir. Deformasyon hızının soğuk şekillendirme aralığında akma dayanımı üzerinde etkisi yok sayılacak kadar azdır. Bu aralıktaki akma gerilmesi  $\sigma$ , deformasyon miktarı n tarafından aşağıdaki ilişki ile belirlenmektedir;

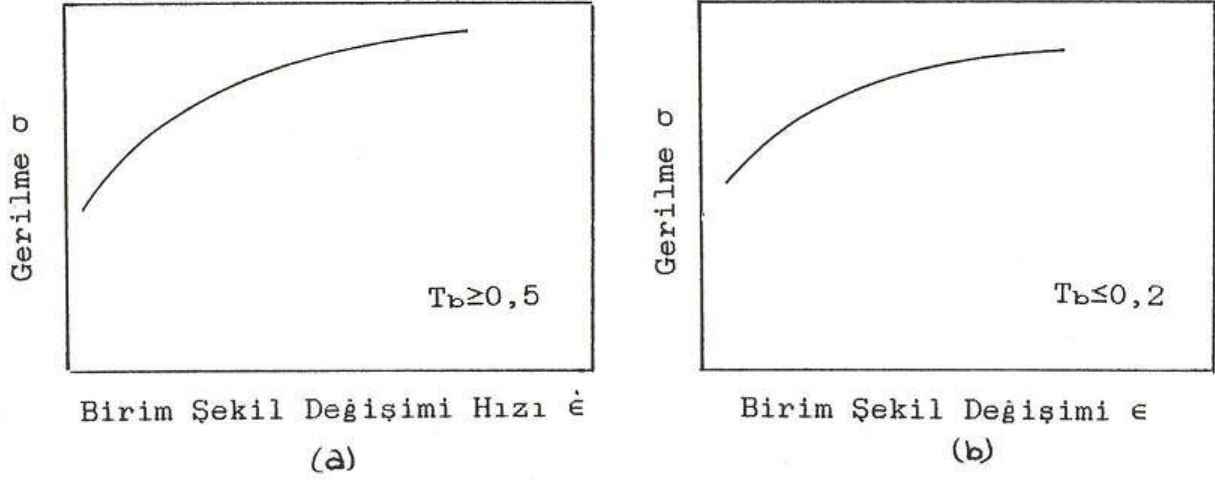
$$\sigma = K. \epsilon^n$$

burada da K dayanım sabiti, n pekleşme üsteli olarak adlandırılan malzeme sabitleridir. Şekil 3-15'te soğuk ve sıcak şekillendirme bölgesinde malzemenin akma gerilmesinin değişimi şematik olarak verilmektedir.

Şekil verme hızının plastik şekil verme üzerine etkileri ise şu şekilde özetlenebilir:

a. Hızın artmasıyla yüksek sıcaklıklarda akma gerilmesi, dolayısıyla şekillendirme kuvvetleri yükselir.

b. Hızlı şekillendirmeden dolayı birim zamandaki ısı kaybı azaldığından adyabatik ısınma (deformasyondan kaynaklanan ısı artışı) nedeniyle iş parçasının sıcaklığı artar.



Şekil 3-15: Malzemenin akma gerilmesinin:

(a) Sıcakta deformasyon hızı ile,

(b) soğukta deformasyon miktarı ile belirlenmesi.

c. Artan hız varsa yağlayıcı filmin dağılmadan ve ısıdan etkilenmeden şekillendirilmenin tamamlanmasını ve yağlayıcının etkisinin tam olarak gerçekleşmesini sağlar.

Teknik uygulamalarda birim deformasyon hızının ? sabit kaldığı örnekler çok azdır, ayrıca iş parçasının değişik bölgelerinde gerçekleştirilen deformasyon miktarları genellikle farklıdır. Çeşitli şekil verme yöntemlerinde elde edilen karakteristik takım (kalıp veya koç) hızı aralıkları şu şekildedir.

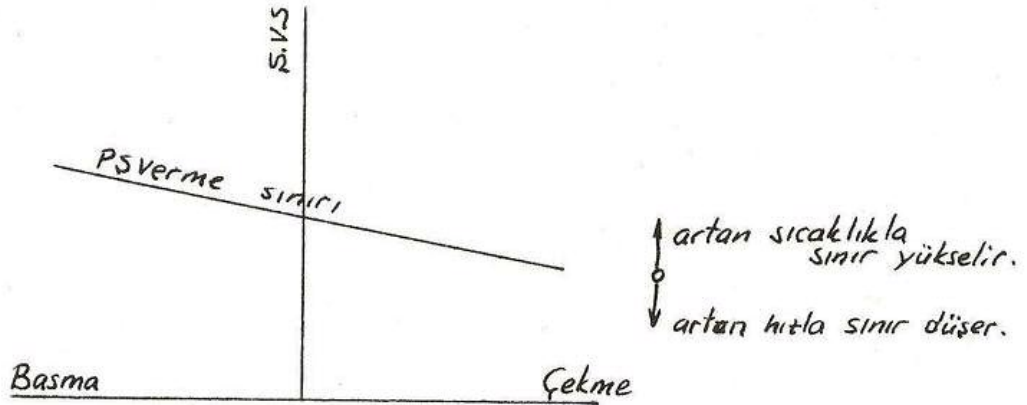
İşlem	Hız (cm/sn)
Çekme deneyi	$10^{-4} - 1$
Charpy darbe deneyi	300 - 900
Hidrolik preste ekstrüzyon	0,3 - 300
Mekanik preste dövme	15 - 150
Çekiçte dövme	300 - 900
Patlayıcılarla şekillendirme	3000 - 12000

### 3.10. Malzemelerin Plastik Şekillendirme Sınırı

Malzemelerin plastik şekillendirilmesi ancak belirli bir sınıra kadar gerçekleştirilebilir. Bu sınırın aşılması durumunda, örneğin çekme deneyinde olduğu gibi, malzemenin şekillendirilebilme kapasitesi tükenir ve örneğin kopma şeklinde bir mekanik hasar oluşur. Şekillendirme sırasında oluşan diğer mekanik hasar türleri olarak serbest yüzey çatlakları, sürtünmenin yüksek olduğu yüzeylerde oluşan çatlaklar ve iç çatlaklar sayılabilir.

Bu tür hasarların hangi koşullarda oluşacağını belirleyen şekillendirme sınırının sayısal değerlerini saptamada kuramsal yaklaşımlar yeterli olmadığından, genellikle deneysel bulgulara dayalı kalitatif kriterlerden yararlanılır. Bir malzemenin şekillendirme sınırı, Şekil 3-16'da gösterildiği gibi, genellikle üç faktörden etkilenmektedir:

- Şekillendirme sırasındaki gerilme durumu,
- Şekillendirme sıcaklığı,
- Şekil verme hızı.

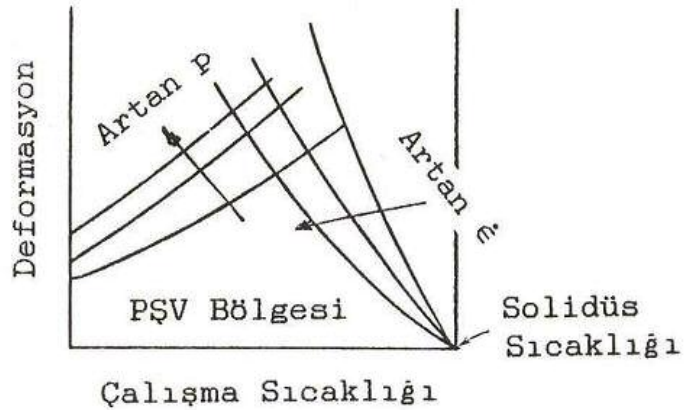


Şekil 3-16: Malzemelerin şekillendirme sınırını etkileyen faktörler

Plastik şekil değişimi çekme gerilmeleri altında gerçekleştiriliyorsa, kopma şeklinde olan hasar, basma gerilmeleri altında oluşacak hasardan daha kolay meydana gelir. Dolayısıyla etkiyen gerilmelerin ortalamasını basma

bölgesine kaydıran düzenlemelerle şekil verme sınırı artırılabilir. Sıcaklık artışı şekillendirme sınırını yükseltmektedir. Yüksek sıcaklıklardaki şekillendirme sırasında meydana gelen dinamik toparlanma ve yeniden kristalleşme neticesinde malzeme pekleşmemekte, dolayısıyla dislokasyonların engeller üzerinde yığılarak mikroçatlakları oluşturması gecikmektedir.

Şekil verme hızının yüksek olması durumunda, özellikle sıcak şekillendirme sırasında toparlanma ve yeniden kristalleşme mekanizmalarının çalışması için gerekli süreler kalmayacağından, şekil değiştirme kabiliyeti azalacaktır. Ayrıca artan şekillendirme hızı düşük sıcaklıklarda gevrek kırılma eğilimini de artırmaktadır. Çok yüksek sıcaklıklarda artan şekil verme hızının deformasyon miktarını sınırlaması, yüksek hızlarda şekil verme sırasında oluşan adyabatik ısınmanın yerel erimelere yol açmasıdır, Şekil 3-17.



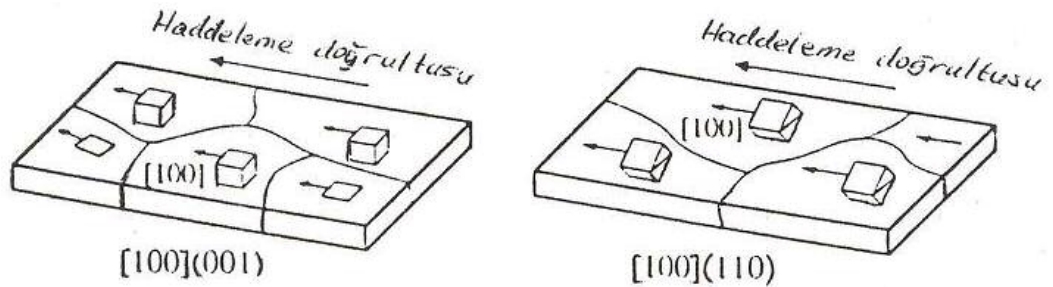
Şekil 3-17: Çalışma sıcaklığının, deformasyon hızının ve işlem basıncının elde edilecek şekil değişimi miktarına etkisi.

### 3.11. Plastik Şekil Verme Sonrası Yöne Bağımlılık

Plastik şekil değişimine uğrayan çok taneli malzemelerin mekanik özellikleri yöne bağımlı hale gelir. Anizotropi olarak isimlendirilen bu durumda mekanik özellikler değişik doğrultularda farklılıklar gösterir. Plastik şekil verme işleminden kaynaklanan anizotropiyi üç ana başlık altında incelemek mümkündür:

- Kristalografik Anizotropi,
- Mekanik anizotropi,
- Önceki deformasyonlardan kaynaklanan anizotropi (Bauschinger etkisi).

Kristalografik Anizotropi'de, polikristal malzemenin herbir tanesine ait, konumu farklı kayma düzlemleri şekil değişimi sırasında uygulanan dış gerilmelerin etkisiyle oluşan kayma bantlarına uygun yönlere dönmektedir. Buna Ter-  
cihli Yönlenme veya Doku (tekstür) adı da verilmektedir. Böylece başlangıçta rasgele konumlanmış olan taneler, şekil değişimi sonrasında belirli doğrultulara yönelmiş olarak düzenlenirler, Şekil 3-18.

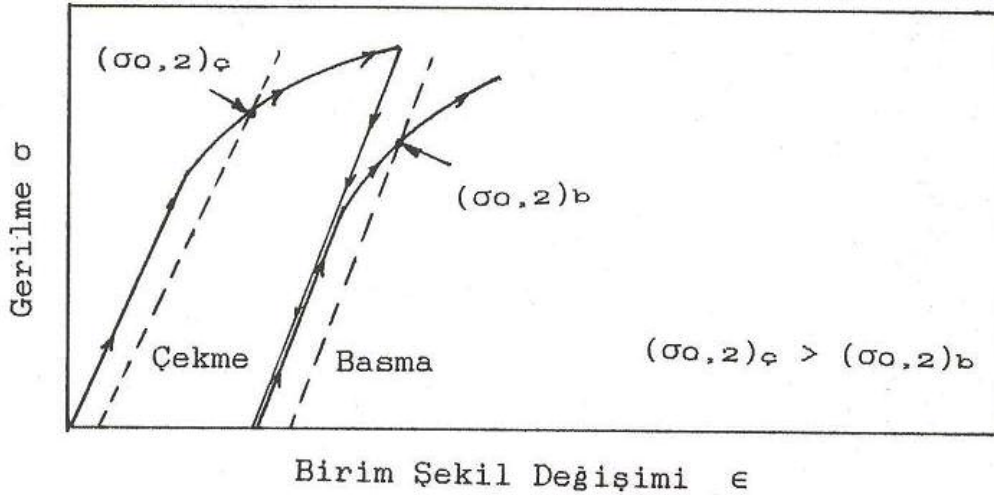


Şekil 3-18: Haddelenme sonrası tanelerin kristalografik yönelmesi ile oluşan doku (tekstür)

Mekanik Anizotropi'de ise, metaller şekillendirilirken içindeki kalıntılar (enklüzyonlar) ve boşluklar malzemenin akma doğrultusunda sıralanarak, bazıları deforme olup uzayarak bantlı bir yapı oluşmasına neden olurlar, Şekil 3-

11. Böylece plastik şekil verme yönü ile buna dik yönlerdeki malzeme özelliklerinde, özellikle süneklik ve kırılma tokluğu karakterinde önemli farklar oluşur. Şekil değişimi yönüne dik doğrultularda mekanik özelliklerin çok daha düşük olduğu görülür.

Önceki Deformasyonun Yönünden Kaynaklanan Anizotropi ise kısaca Bauschinger Etkisi olarak adlandırılmaktadır. Soğuk şekillendirme bölgesinde yapılan bir plastik şekil verme işleminde deformasyonun yönü değiştirildiğinde (örneğin bir metal parçasına önce çekme yönünde ve hemen arkasından basma yönünde plastik deformasyon uygulanırsa) ikinci işlemden malzemenin akması için gerilme seviyesi daha düşük olmaktadır. Şekil 3-19'da Bauschinger etkisi şematik olarak verilmektedir. Bu olayın nedeni, ilk hareket ettiği yönde engellere takılan dislokasyonların ters yönde zorlandıklarında çok daha düşük gerilme seviyelerinde geri dönebilmeleridir.



Şekil 3-15: Bauschinger etkisi: Önce çekme gerilmeleri altında şekil değişimine uğrayan malzemeye basma gerilmeleri uygulandığında akma gerilmesi düşmektedir.

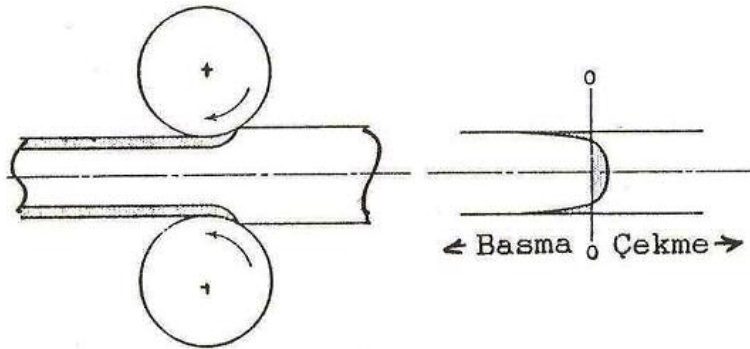
### 3.12. Artık (Kalıntı) Gerilmeler

Dış kuvvetlerin etkilediği durumda, malzeme içinde bulunan gerilmeler iç gerilme olarak adlandırılırlar. Bunlar arasında plastik şekil verme gibi malzemelere uygulanan termomekanik işlemlerden geriye kalan ve artık gerilme olarak adlandırılanlar önemli bir yer tutar. Plastik şekil vermede artık gerilmeler:

a) İşlem sırasında malzemenin farklı bölgelerinin farklı miktarda şekil değiştirmesiyle,

b) Sıcak işlem sonrası soğuma farklılıklarından kaynaklanabilir.

Örneğin haddeleme sırasında plastik şekil değişiminin sadece yüzeyde veya yüzeye yakın bölgelerde gerçekleştiği düşünüldüğünde sadece yüzeydeki tanelerin uzayacağı, diğerlerinin ise bundan etkilenmeyeceği düşünülenebilir. Ancak bu durumda uzayan dış bölge iç kısmı da uzatmaya, iç kısım ise dış yüzey bölgesinin eski boyutlarının değişmemesine çalışacaktır. Bu iki zorlama arasında oluşan denge sonucunda dışta basma, içte çekme artık gerilmeleri ortaya çıkacaktır, Şekil 3-20.



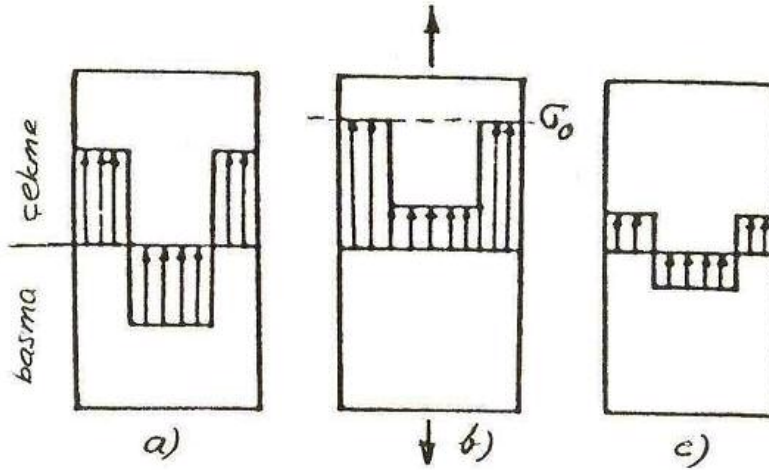
Şekil 3-20: Haddelemede deformasyonun kesitte homojen olarak gerçekleştirilememesinden kaynaklanan artık gerilmeler.

Artık gerilmeler uniform olmayan soğumalar (genellikle kalın kesitli ve karmaşık biçimli parçaların soğuması sırasında) nedeniyle de oluşabilir. Soğuyan parçalarda önce soğuyarak büzülen kısımlar (yüzey ve ince kısımlar), o sırada hala sıcak olan (iç ve kalın) bölgelerin plastik şekil değiştirmesine neden olurlar. Daha sonra soğuyan ve büzülen iç kısımlar veya kalın kesitler ise önceden büzülmelerini tamamlamış ve soğumuş bölgelerde herhangi bir plastik şekil değiştirme yaratamazlar. Büzülmelerin farklı zamanlarda oluşmasıyla ortaya çıkan bu boyut farklılıkları elastik gerilmelere neden olur.

Artık gerilmeler elastik gerilmelerdir. Bu gerilmeler ancak malzeme plastik şekil değişimine uğratılarak giderilebilirler. Bu ise iki ayrı yöntemle sağlanabilir:

a. Malzemeye bir ilave gerilme uygulanarak, akma gerilmesinin üzerine çıkılır ve oluşan plastik şekil değişimi sonucu malzeme içinde daha düşük seviyede yeni bir iç gerilme dengesi oluşur, Şekil 3-21.

b. Bir diğer yöntem de Gerilme Giderme Tavlama uygulamaktır. Bu ısıl işlemin yapıldığı yüksek sıcaklıklarda malzemenin akma dayanımı düşeceğinden, artık gerilmeler malzemenin plastik şekil değişimi ile büyük oranda boşalır.



Şekil 3-21: Artık gerilmelerin giderilmesi:

- Parça içinde birbirini dengeleyen çekme ve basma artık gerilmeleri bulunmaktadır.
- Uygulanan dış kuvvet ile gerilmeler yükseltilerek akma sınırına varan yerlerde boşalması sağlanmaktadır.
- Dış yük kaldırıldığında artık gerilmelerin seviyesinin düşmesi sağlanmış olur.



#### 4. DÖVME

Çok eski bir üretim yöntemi olan DÖVME, iş parçasının basma kuvvetlerinin etkisiyle plastik şekil değiştirdiği bir işlemdir. Sanayi devrimi ile birlikte kol gücünün yerini makineler almış ve bunların getirdiği yeni olanaklar ile özellikle seri üretime yönelik metal şekillendirme işlemlerinde dövme teknolojisi büyük önem kazanmıştır. Krank milleri, el aletleri, cıvata kafaları, dişliler, tekerlekler, biyel kolları ve kancalar gibi sayısız makina parçası bu yöntemle üretilmektedir. Ülkemizde bu teknolojinin gelişmesi, 1960 sonrasında hızla büyüyen otomotiv sanayinin gereksinimleri doğrultusunda olmuştur.

Dövme işlemleri, benzeş sıcaklığın  $T_b < 0,3$  olduğu sıcaklıklarda yapılması durumunda SOĞUK DÖVME olarak,  $T_b > 0,5$  olması durumunda ise SICAK DÖVME olarak adlandırılmaktadır. Soğuk dövme, büyük dövme kuvvetleri gerektirdiğinden genellikle küçük parçalar ile küçük şekil değişimleri içeren işlemler için uygundur. Örneğin günümüzde ancak 3 kg'a kadar parçaların soğuk dövülmesi ekonomik uygunluk çerçevesinde değerlendirilmektedir. Soğuk dövme yönteminden daha çok cıvata ve somun imalatında yararlanılmaktadır. İşlem sırasında soğuk şekil değişimi nedeniyle pekleşen malzemenin, giderek artan dövme kuvvetleri gerektireceği de unutulmamalıdır. Dövme teknolojisi uygulamalarının büyük çoğunluğunu sıcak dövme işlemleri oluşturur ve günümüzde gram mertebelerinden ton mertebelerine kadar malzemelerin sıcak dövme işlemleri kolaylıkla gerçekleştirilmektedir. Sıcak dövme işlemleri hem malzemenin kolay şekillendirilebilmesi, hem de dövme kuvvetlerinin düşük olması nedeniyle daha çok tercih edilen yöntem olmaktadır.

Dövme yöntemine en uygun malzemeler olarak; basit karbonlu çelikler, düşük alaşımlı çelikler, alüminyum alaşımları, bakır alaşımları ve titanyum alaşımları gösterilebilir.

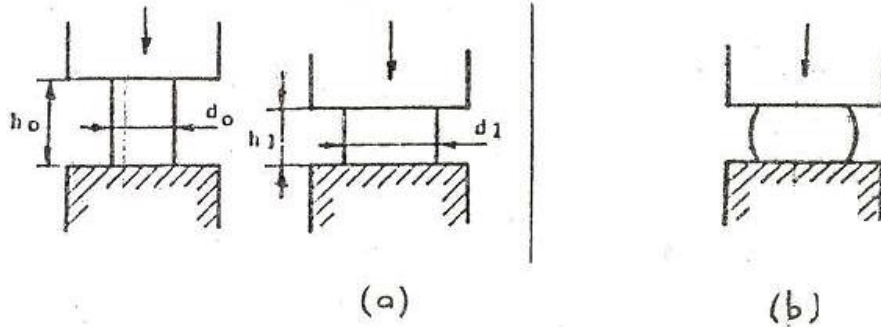
## 4.1. Dövme Yöntemleri

### 4.1.1. Açık Kalıpta Dövme

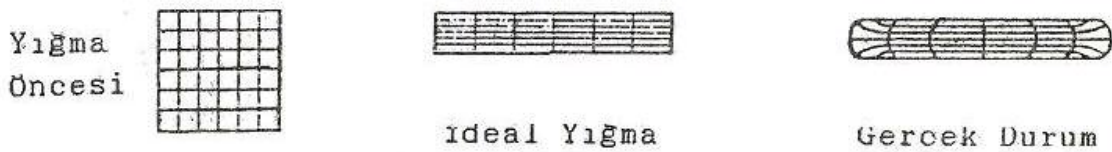
Açık kalıpta dövme en basit dövme işlemidir. Parçalar basit biçimli ve çoğunlukla düzlemsel iki kalıp arasında, uygulanan basma kuvveti ile şekillendirilmektedir. Bu yöntem genellikle kaba şekillendirme ve kapalı kalıpta dövme öncesi önşekillendirme işlemlerinde kullanılır. Ayrıca kapalı kalıp yatırımının ekonomik olmayacağı kadar az sayıda parça üretiminde ve kapalı kalıba sığmayacak kadar büyük parçaların plastik şekillendirilmesinde de açık kalıpta dövme tercih edilir.

**a. Yığma:** Bu basit açık kalıpta dövme işleminde parçalar iki düz basma yüzeyi arasında şekillendirilmektedir. Şekil 4-1'de görüldüğü gibi yığma öncesinde  $h_0$  yüksekliğinde ve  $d_0$  çapında olan silindirik bir parça, ideal durumda yığma sonrasında  $h_1$  yüksekliğine düşmekte ve  $d_1$  çapına genişlemektedir. Gerçek durumda ise, kalıp yüzeylerine dik doğrultuda akmaya çalışan malzeme, sürtünme ve kısmen soğuma nedeniyle temas yüzeylerinde engellendiğinden fıçılama meydana gelir.

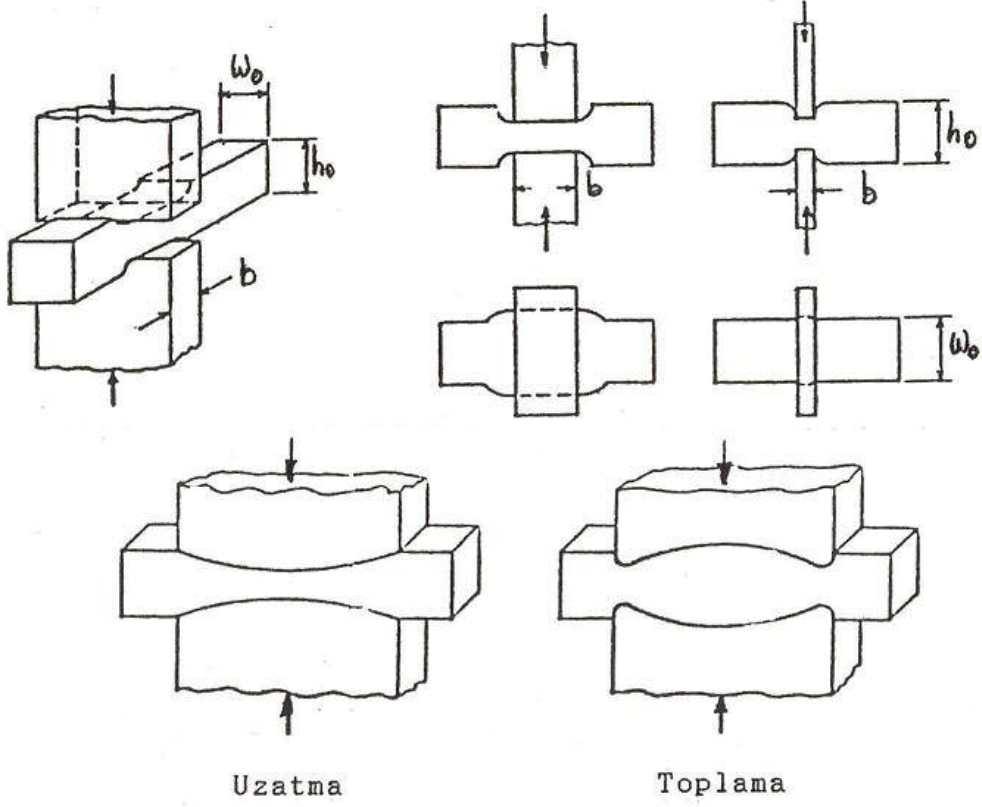
**b. Dar Kalıplarla Dışma:** Dar kalıpta dövmede parçadaki şekil değişimi, sürtünmenin malzeme akışını daha az engellediği, kalıbın dar boyutu doğrultusunda meydana gelmektedir. Bu özellikten yararlanarak düz kalıplarla parçada UZATMA ve GENİŞLETME işlemleri gerçekleştirilmektedir. Kalıp genişliğinin çok daraltılması durumunda KESME işlemi dahi yapılabilir. Ayrıca dış bükey (uzatma), iç bükey (toplama) kalıplarla TOPLAMA ve UZATMA işlemleri de uygulanabilir.



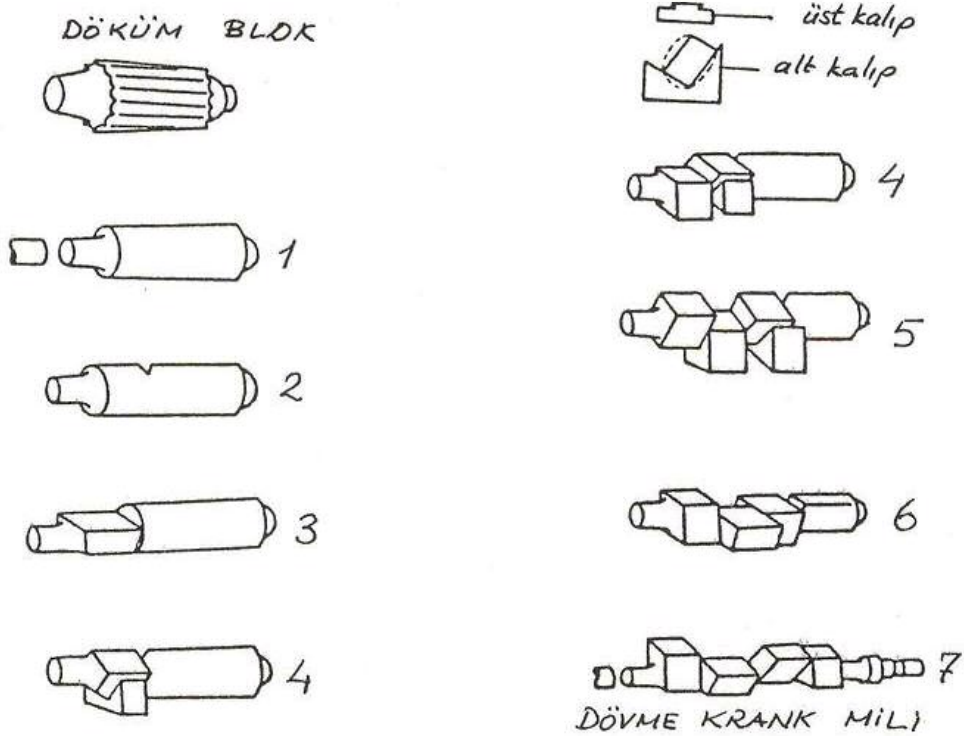
Şekil 4-1: Düz kalıplarda yığmada (a) ideal, (b) gerçek durum



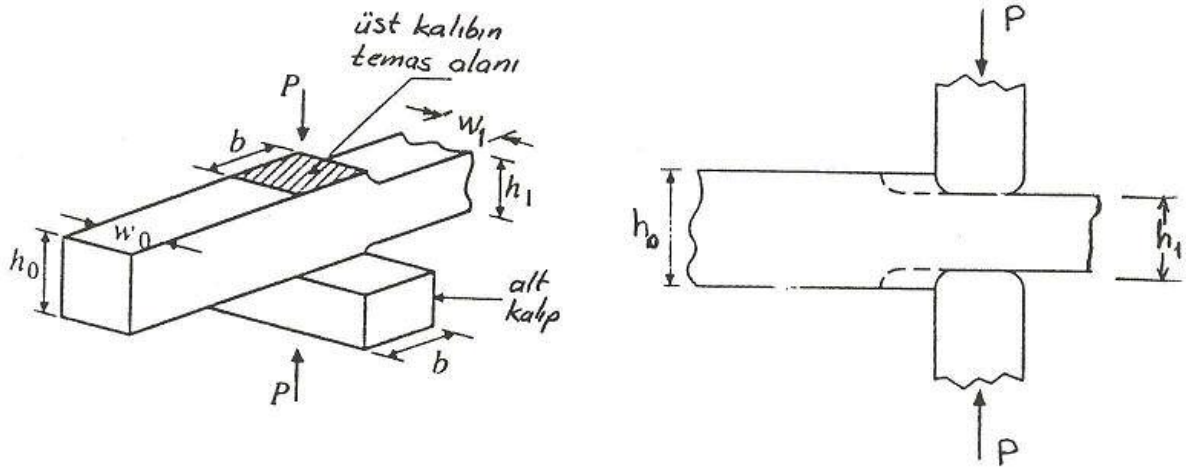
Şekil 4-2: Yığma sırasında malzeme akışı



Şekil 4-3 : Açık kalıpta dövme işlemlerine örnekler



Şekil 4-4: Açık kalıpta dövme ile üretilen bir parçada dövme kademeleri



Şekil 4-5: Dar kalıpta dövmede geometrik ilişkiler

Şekil 4-5'te geometrisi verilen dar kalıplarla yığma işleminde uzama ve genişleme oranlarının belirlenmesinde bazı ampirik bağıntılardan yararlanılmaktadır:

$$\begin{aligned} \text{Enine birim şekil değişimi} & \quad \epsilon_w = \ln(w_1/w_0) \\ \text{Kalınlığına birim şekil değişimi ise} & \quad \epsilon_h = \ln(h_0/h_1) \end{aligned}$$

olarak yazılabilir.

$$\text{Genişleme: } s = \epsilon_w/\epsilon_h = \ln(w_1/w_0)/\ln(h_0/h_1)$$

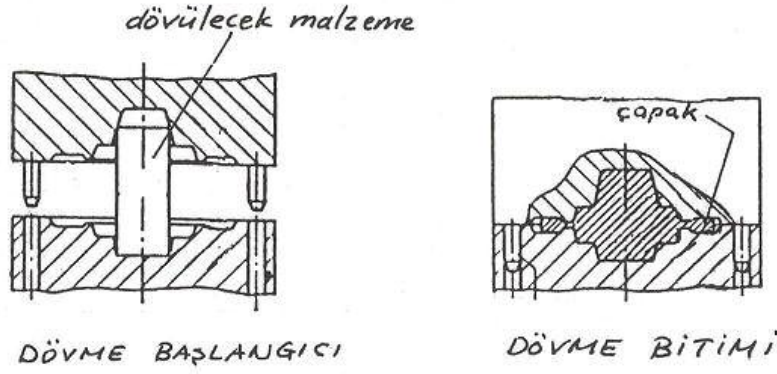
şeklinde bir tanım yapılırsa,  $s$  değeri bize deformasyonun karakterini belirler.  $s=0$  ise sadece boyuna uzama,  $s=1$  ise sadece enine genişleme sözkonusudur.  $s$ 'nin ara değerleri bu iki farklı deformasyonun muhtelif oranlarına tekabül eder.

Herhangi bir kalıp genişliği için  $s$  değeri kalıp genişliğine bağlı olarak

$$s = (b/w_0)/(1+b/w_0)$$

şeklindeki bir ampirik ifadeyle verilmektedir. Bu bağıntı yardımıyla uygun kalıp ve malzeme boyutları seçilerek  $s$  değeri ayarlanabilir.

Açık kalıpta dövme sırasında her bir kademe verilen şekil değişimi miktarı (burada parçanın dövme öncesi yüksekliğinin dövme sonrası yüksekliğine oranı olarak kabul edilmektedir) istenildiği kadar büyük seçilemez. Nitekim Şekil 4-5'da görüldüğü gibi,  $h_0/h_1 > 1,3$  olduğunda katlanma tehlikesi vardır. Aynı şekilde kalıp genişliğinin parça yüksekliğine oranı  $b/h_0 < 1/3$  ise, bu durumda kesme veya parçaya batma tehlikesi ortaya çıkar.

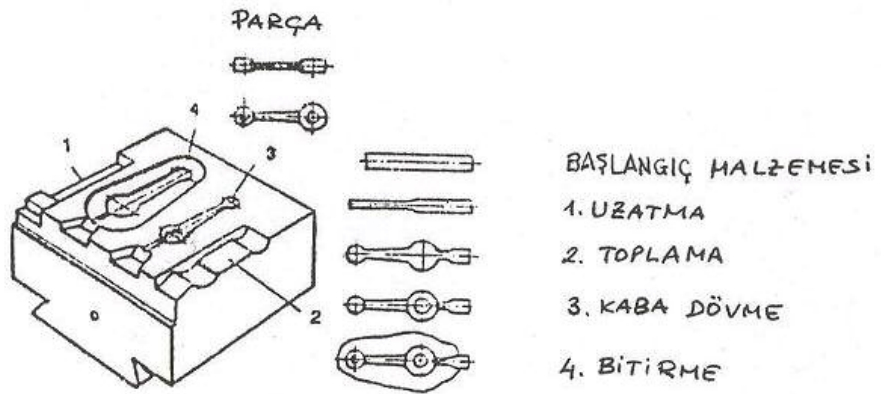


Şekil 4-6: Kapalı kalıpta çapaklı dövme

#### 4.1.2. Kapalı Kalıpta Çapaklı Dövme

Karmaşık şekilli parçaların dar toleranslar içinde elde edilebilmesi için birbirini üzerine kapanan ve kapandığında elde edilecek parçanın biçimine sahip bir kalıp boşluğu oluşturan kalıplardan yararlanır, Şekil 4-6. Kapalı kalıpta dövmede kalıp maliyeti yüksek olduğu için yöntem ancak seri üretimler için ekonomiktir.

Kapalı kalıpta dövmede, şekillendirilmek üzere kalıba yerleştirilen metalin miktarı kalıp boşluğunu doldurmaya yeterli olmalıdır. Bunun tam olarak ayarlanması çok güç olduğundan, malzemenin hacmi kalıbın hacminden fazla tutulur ve kalıpta gerekli düzenlemeler yapılarak, bu fazla malzemenin kalıp boşluğu dışına dar bir şerit şeklinde çıkmasını sağlanır (çapak). İş parçasını çevreleyen çapak, dövme işleminden sonra mekanik preslerde kesme kalıpları yardımıyla kesilerek uzaklaştırılır. Kesme işleminin güç olduğu yüksek karbonlu ve alaşımlı çeliklerde çapak kesme işlemi ya sıcak olarak, ya da yumuşatma tavını takiben yapılır.

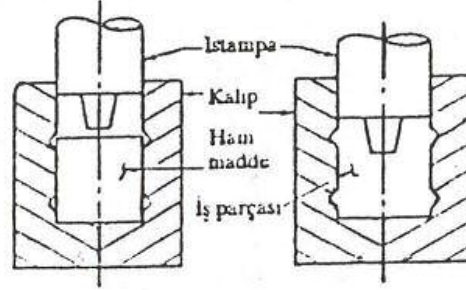


Şekil 4-7: Dövme işleminin dört ayrı kademe yapıldığı bir dövme kalıbı

Kapalı kalıpta dövmede malzemeyi bir defada son biçimine getirmek genellikle mümkün değildir. Bu amaçla parça önşekillendirme ve ara dövme gibi işlemlere tabi tutulur. Bu işlemler genellikle aynı kalıp bloğu üzerinde gerçekleştirilecek şekilde tasarlanır. Şekil 4-7'de birbirini izleyen dört dövme kademesinin gerçekleştirildiği bir kalıp bloğu görülmektedir. Bölüm 4.2'de kapalı kalıp tasarımı daha ayrıntılı olarak ele alınmaktadır.

#### 4.1.3. Kapalı Kalıpta Çapaksız Dövme (Hassas Dövme)

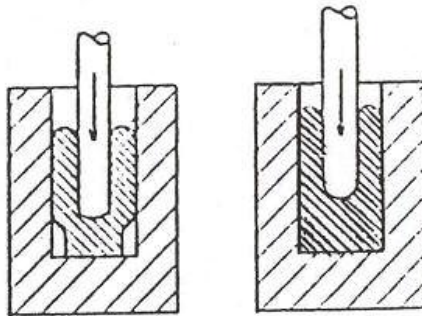
Hassas dövmede parça bir kapalı kalıpta çapaksız olarak biçimlendirilir. Bu yöntemle üretilen parçalar genellikle ek bir talaş kaldırma işlemine gerek kalmadan veya çok az bir talaş kaldırma işleminden sonra kullanılabilir. Ancak burada kalıba yerleştirilen malzeme miktarının çok hassas olarak ayarlanması gereği vardır.



Şekil 4-8: Hassas dövme

#### 4.1.4. Delme

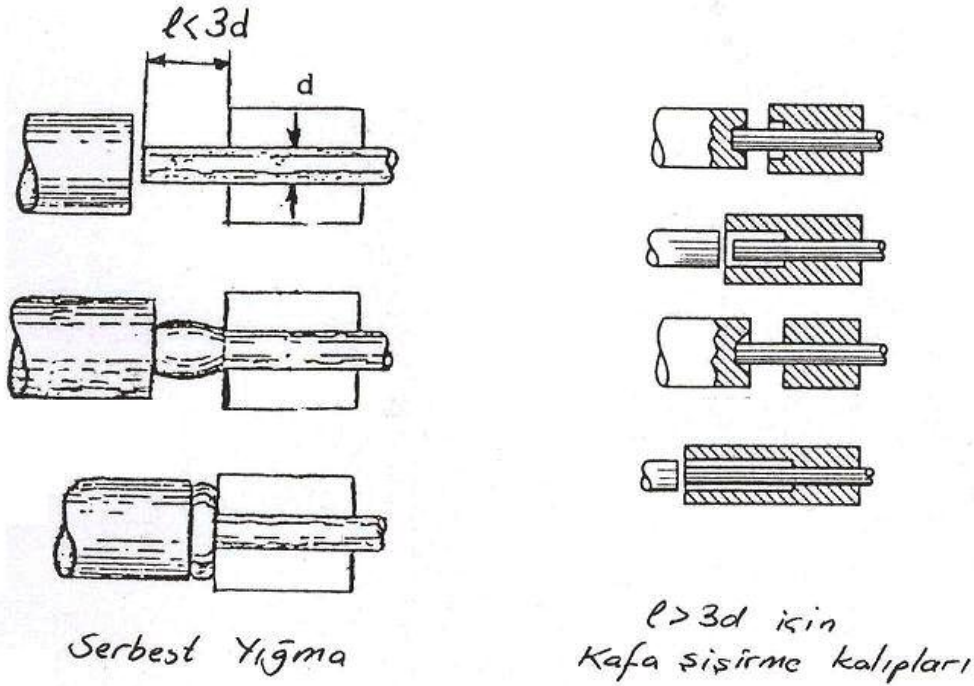
Delme kalın cidarlı içi boş parçalar elde etmek için uygulanan bir dövme yöntemidir.



Şekil 4-9: Delme

#### 4.1.5. Kafa Şişirme

Bu yöntemde metalin bir ucu eksenî doğrultusunda uygulanan basma kuvvetiyle yığılarak şekillendirilir. Yatay dövme makinelerinde sıcak veya soğuk olarak yapılan bu işlemde biri sabit, diğeri hareketli olan tutucu kalıp

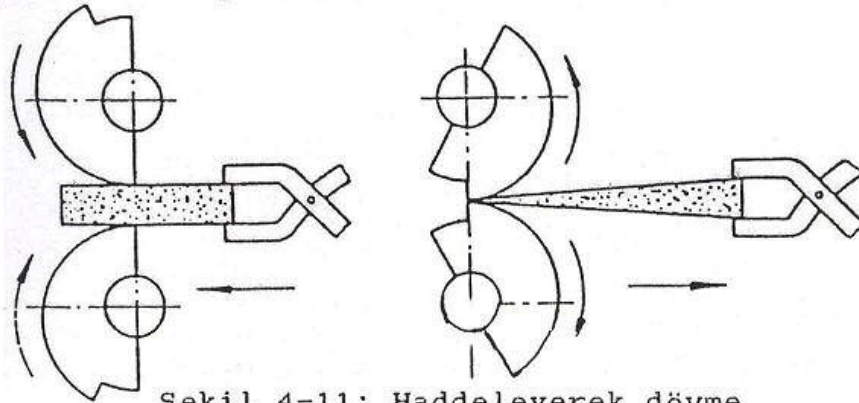


Şekil 4-10: Kafa şişirme

yarıları tarafından sıkı bir şekilde kavranan malzemenin serbest ucu yığılır. Cıvata kafalarının şekillendirilmesinde de kullanılan bu yöntemde burkulma olasılığını önleyecek tedbirlerin alınması gerekir. Bunun için çubuğun kalıp dışında kalan serbest ucunun uzunluğu çapın 3 katından büyük olmaması veya özel yiğma kafalarının kullanılması gerekmektedir, Şekil 4-10.

#### 4.1.6. Haddelleyerek Dövme

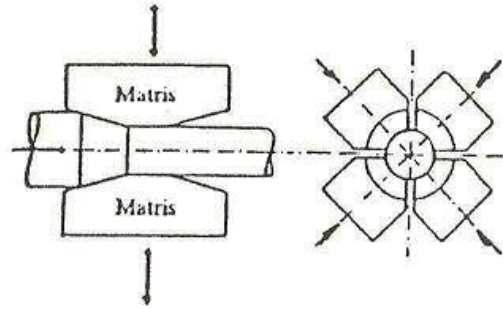
Uzun ve ince parçaların üretiminde önşekillendirme işlemi olarak uygulanan bu yöntemde sıcak iş parçası uygun şekilde profillendirilmiş haddeler arasından geçirilir. Malzeme hadde merdanelerinin sadece profilli yüzeyleri arasında şekil değiştirir. Şekillendirme sonrası iş parçası makinaya verildiği taraftan geri alınır.



Şekil 4-11: Haddelleyerek dövme

#### 4.1.7. Radyal (Çevresel) Dövme

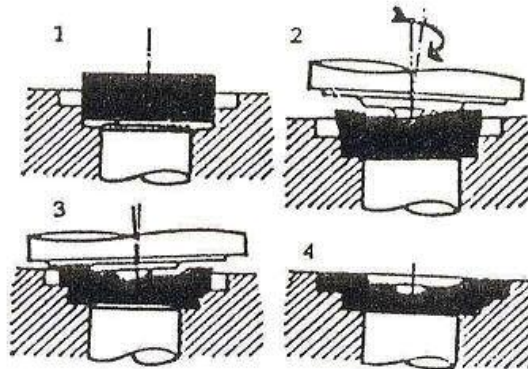
Soğuk veya sıcak olarak uygulanabilen bu yöntemde iki veya daha çok sayıdaki (ikişer ikişer karşılıklı olarak çalışmak koşuluyla) kalıbın radyal hareketiyle dövme işlemi gerçekleştirilir. Aynı zamanda kalıpların da döndüğü bu yöntemle, yuvarlak kesitli uzun parçalar (büyük miller, kolonlar vb.) biçimlendirilmektedir. Top namlusu gibi içi boş parçaların üretiminde de, bu yöntemden parça içine maça yerleştirilerek dövme suretiyle yararlanılmaktadır.



Şekil 4-12: Radyal dövme

#### 4.1.8. İzotermal Dövme

Klasik kapalı kalıpta dövme yönteminde, malzemenin ve kalıbın sıcaklıkları her parça için az da olsa farklı olmaktadır. Ayrıca kalıp/parça arasındaki sıcaklık farkının büyük olmasından dolayı oluşan soğuma da, boyutların hassas olarak elde edilmesinde sorunlar yaratmaktadır. Sıcaklık farklılıklarını gidererek boyut hassasiyetini yükseltmek ve aynı zamanda parçada daha homojen bir içyapı sağlamak için uygulanan izotermal dövmede, kalıplar ve dövülecek parça aynı sıcaklığa getirilerek şekillendirme yapılır.



Şekil 4-13: Orbital dövme



#### 4.1.9. Orbital Dövme

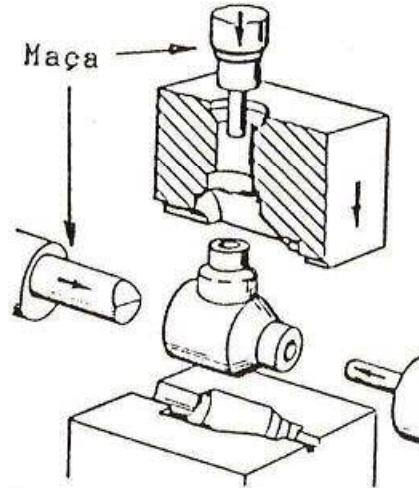
Malzemenin yörüngesel hareket yapan bir üst kalıp ile sadece düşey doğrultuda hareket eden bir alt kalıp arasında dövüldüğü bir yöntemdir.

#### 4.1.10. Maçalı Dövme

İçi boşluklu, tesisat armatürleri gibi parçaların dövme yöntemiyle edilebilmesi için maçalı dövmeden yararlanır. Genellikle sıcak olarak ve demir-dışı metallere uygulanır.

#### 4.1.11. Sinter Dövme

Toz metalurjisi yöntemiyle üretilecek parçalara uygulanır. Toz halindeki metal kalıba doldurulur ve sinterlemenin gerçekleşeceği sıcaklıklarda dövülür. Bazı durumlarda önceden sinterlenmiş parçalara ikinci biçimlendirme yöntemi olarak dövme uygulanır. Bu sayede sinter parça içindeki gözenek miktarı azalır ve özellikleri olumlu etkilenir.



Şekil 4-14: Maçalı dövme

#### 4.2. Kapalı Kalıp Tasarımı

Kapalı kalıpta dövme ile üretilen parçalar genellikle karmaşık biçimli olup, kalıp tasarımının dövme sırasındaki malzeme hareketlerinin kolayca gerçekleşeceği şekilde yapılması, kalıp ömrü ve parçanın kusursuz üretimi açısından çok önemlidir. Kalıp tasarımı büyük deneyim ve bilgi gerektiren bir işlemdir ve ara dövme kademelerinin sayısı, her kademedeki gereken kuvvet ve enerji ihtiyacı, bölüm yüzeyleri ile çapak boyutlarının saptanması, meme ve köşe yarıçaplarının belirlenmesi gibi birçok adımdan oluşmaktadır. Günümüzde kalıp tasarımı için giderek artan bir oranda bilgisayar desteğinden yararlanılmaktadır.

Başarılı bir kalıp tasarımı gerçekleştirebilmek için aşağıdaki hususların göz önüne alınması şarttır:

#### 4.2.1. Bölüm Yüzeyi (Çapak hattı)

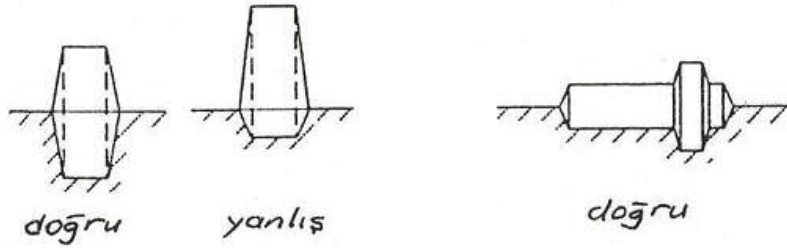
Bölüm yüzeyi, iş parçasının alt ve üst kalıpta kalan kısımlarını, yani parça üzerinde çapak hattının konumunu belirleyen yüzeydir. Dövme parça tasarımında bu yüzeyin doğru olarak belirlenmesi çok önemlidir ve şu hususlara dikkat etmek gerekir:

a. İş parçasını mümkün olduğu kadar eşit yükseklikte ikiye bölmelidir, Şekil 4-15.

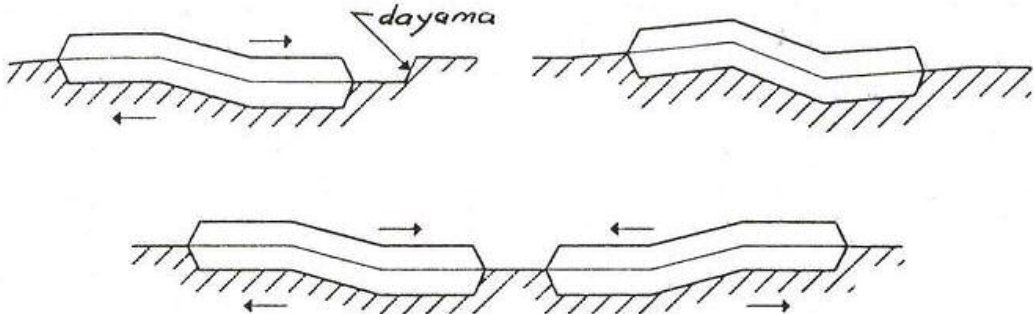
b. Düzlemsel olmalı ve bu düzlem, parçanın en büyük kesiti olarak seçilmelidir. Bölüm yüzeyinin kırık olması istenmeyen bir durumdur, çünkü bu durumda kalıplarda dövme kuvvetinin yatay bileşenleri ortaya çıkacaktır. Bölüm yüzeyinin kırık olması kaçınılmaz ise yatay kuvvetler kalıp içinde dengelenerek, dövme makinasının yatakları üzerine de etkimesini önlemek üzere kalıp tasarımında gerekli önlemler alınmalıdır, Şekil 4-16.

c. Kalıp içinde malzemenin akışını kolaylaştıracak şekilde olmalıdır. Ayrıca malzemedeki akış çizgilerinin parçanın kritik kesitlerinde yüzeye dik gelmeyecek şekilde oluşmasına özen gösterilmelidir, Şekil 4-17.

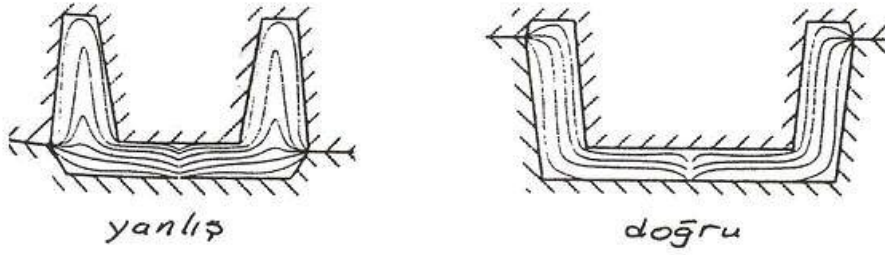
d. Konumu çapağın kesilmesine ve daha sonraki talaşlı imalat yöntemlerine uygun olmalıdır.



Şekil 4-15: Bölüm düzleminin doğru seçimi



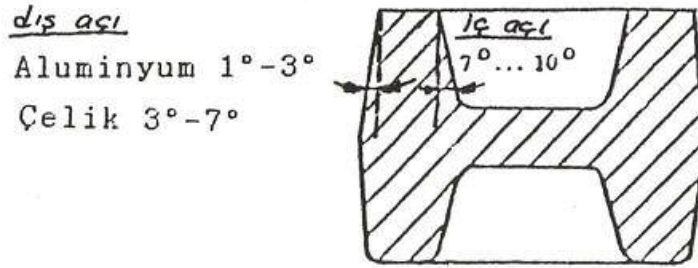
4-16: Kırık bölüm düzlemine sahip kalıplarda yatay kuvvetlerin dengelenmesi



Şekil 4.17 : Akış çizgilerinin parçanın yüzeye dik gelmeyecek şekilde oluşturulması

#### 4.2.2. Kenar Eğimleri

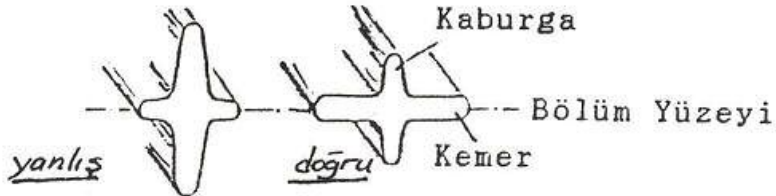
İş parçasının kalıptan kolay çıkmasını sağlamak için kalıpların dövme doğrultusundaki kenarlarına eğim verilir. Bu açı malzemeye bağlı olarak genellikle alüminyum için  $1..3^\circ$  arasında, çelik parçalar için  $3..7^\circ$  arasında seçilmektedir. Delik veya iç koniklik söz konusu ise, eğim malzemeye bağlı olmaksızın  $7..10^\circ$  arasında seçilir, Şekil 4-18.



Şekil 4-18: Kalıplarda kenar eğimleri

#### 4.2.3. Kemer ve Kaburgalar

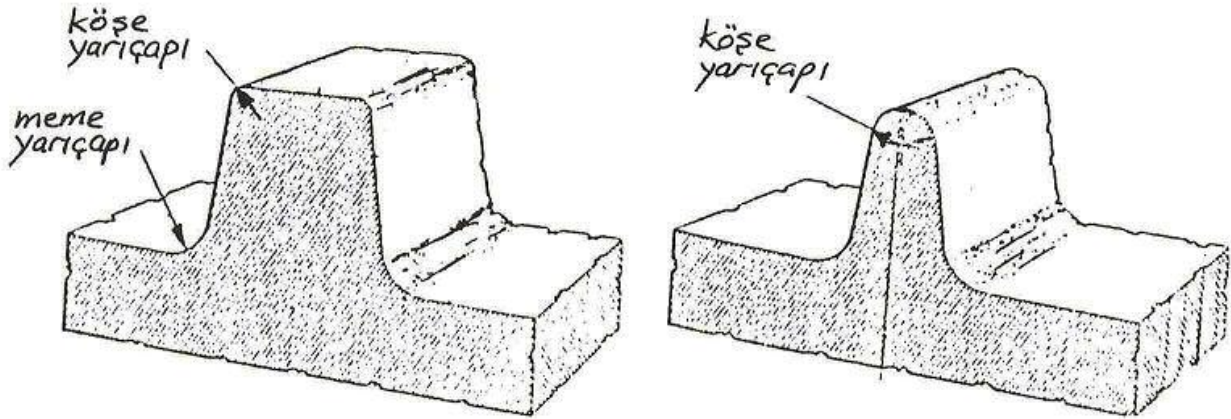
Kapalı kalıpta dövme yöntemiyle üretilecek parçadaki düz ve ince kısımlar "kemer", bunlara dik olarak uzanan kısımlar ise "kaburga" olarak adlandırılırlar, Şekil 4-19. Dövülecek parçada kaburgalar ne kadar ince ve yüksek ise dövme işlemi o kadar güçleşir.



Şekil 4-19: Kemer ve kaburgalar

#### 4.2.4. Köşe ve Meme Yarıçapları (yuvarlatmalar)

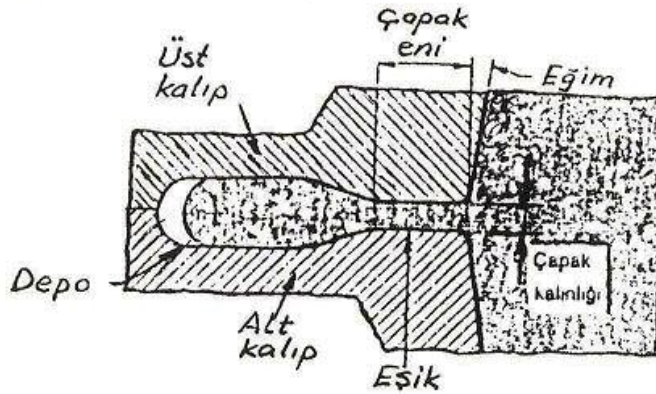
Bir dövme parçada "meme yarıçapı" kaburganın kemerle yaptığı birleşmenin biçimini ve dolayısıyla kaburgalara dolan malzemenin akışını belirler. "Köşe yarıçapı" ise parçanın çıkıntılarının (genellikle kaburgaların) biçimlerini belirler ve bu bölgeler kalıpta malzemenin en son ve en zor doldurduğu bölgelerdir. Malzemeye ve iş parçasının boyutlarına bağlı olmak üzere köşe ve meme yarıçapları değişik elkitaplarında önerilmektedir. Kalıp tasarımında bu önerilere uyulmaması durumunda hem dövme kusuru oluşumuna, hem de kalıplarda erken aşınmaya neden olunur.



Şekil 4-20: Köşe ve meme yarıçapları

#### 4.2.5. Çapak Boyutları

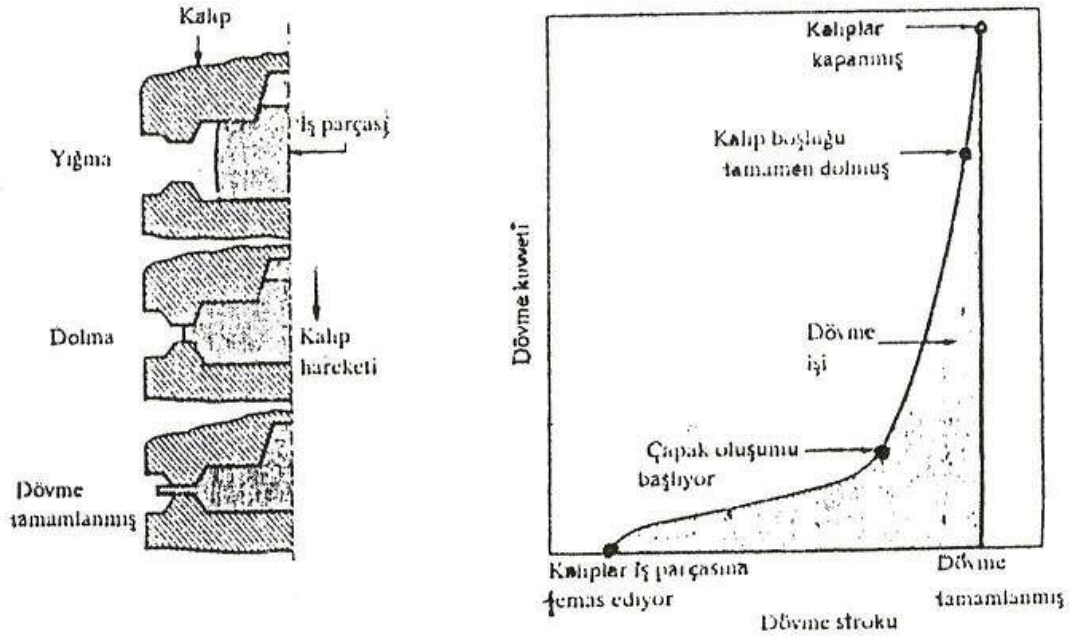
Bilindiği gibi kapalı kalıba dövülecek malzeme gereğinden biraz fazla konulmakta ve bu malzeme çapak olarak kalıp boşluğu dışına dar bir şerit şeklinde çıkmaktadır. Çapağın iki önemli işlevi vardır. Çapak öncelikle fazla malzemenin çıktığı bir "emniyet valfi" işlevini yerine getirir.



Şekil 4-21: Kapalı kalıpta çapak bölgesi

Bundan daha önemlisi çapak oluşumu yardımıyla malzemenin kalıptan kaçışı ayarlanır ve kısıtlanır. Bu şekilde kalıp içindeki malzemeye uygulanan basınç ayarlanarak hem en ince kalıp boşluklarının doldurulması sağlanmış olur, hem de dövme basınçlarının aşırı yükselmesi engellenir.

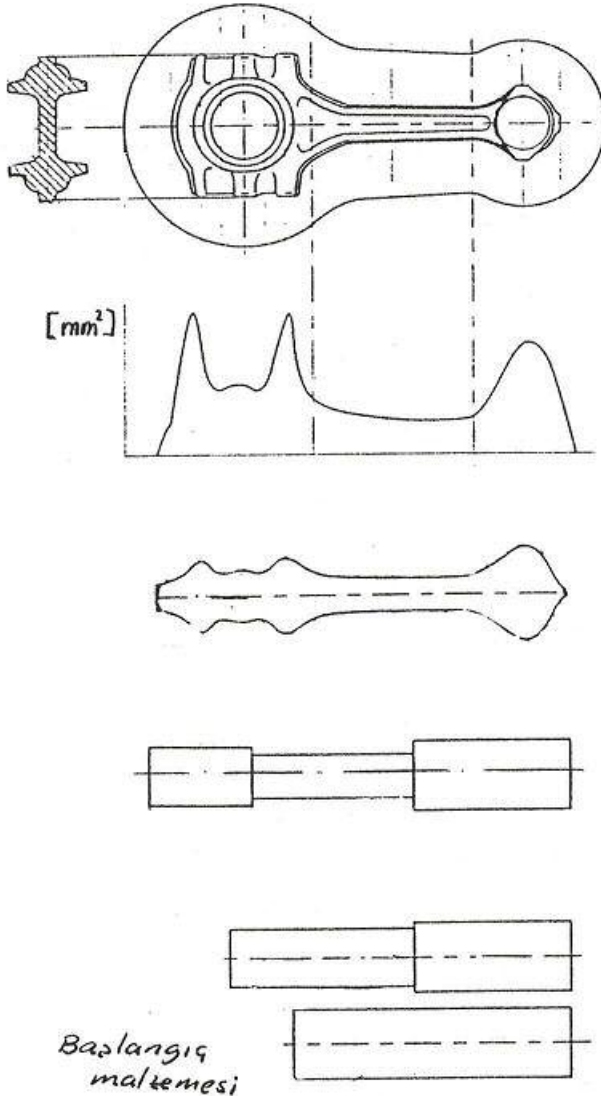
Çapak tasarımında önemli olan nokta, çapak eşiğinden metal akışının, kalıp boşluğundaki en dar (ince) ayrıntıyı doldurmasından biraz daha güç seçilmesi gereğidir. Ancak çapak gereğinden daha dar tutulursa çok yüksek ezme kuvvetleri ortaya çıkar, bu ise kalıpların erken aşınması hatta kırılması gibi sorunları beraberinde getirir. Şekil 4-22'de dövme kuvvetinin, kalıpların kapanması sırasında değişimi incelendiğinde, ilk temas halinde kuvvetin hafifce yükseldiği, çapak oluşumu ile birlikte kuvvet artışının hızlandığı görülmektedir. Fazla malzeme çapağın kısıtlayıcı etkisi altında kalıbı terkedeceğinden, eşik boyutları, kalıp içi basıncın seviyesini belirlemede en etkin rolü oynamaktadır. Genellikle çapak eşiğinin yüksekliğinin (çapak kalınlığı) belirlenmesinde ampirik bağıntı ve grafiklerden yararlanılır.



Şekil 4-22: Kapalı kalıpta çapak oluşumu ve dövme kuvvetinin kalıp kapanırken dövme stroku ile değişimi

#### 4.2.6. Kademelendirme

Yukarıda açıklanan şekilde ve son biçimi, bölüm yüzeyi ve çapak boyutları belirlenen parçaya, gerekli yerlerde işleme payları da eklenerek, kapalı kalıbın biçimi ve boyutları belirlenmiş olur. Ancak dövme işlemi genellikle tek bir kademede yapılmaz ve malzemeyi son bitirme kalıbına gelmeden önce ara kademelerde önşekillendirme yoluna gidilir. Bu suretle hem bir kademede verilebilecek şekil değiştirme sınırlarına uyulmuş olur, hem de bitirme işleminin yapıldığı kalıbın aşınması düşük olacağından aynı kalıpla dövülebilen parça sayısı artar. Şekil 4-23'de ara kademelerin sayısı ve biçimleri saptanması için izlenen yöntem verilmektedir.



Önce parçanın teknik resmi çizilerek çapak ve işleme payları eklenir.

Her bir kesit için alanlar hesaplanır.

Bu alanlara sahip dairesel kesitli ara parça belirlenir

Bu ara parçayı elde etmek gerekli ön şekillendirmeler saptanır.

Şekil 4-23: Ara kademelerin sayısının ve biçimlerinin belirlenmesi

#### 4.2.7. Kalıp Malzemeleri ve Kalıp İmali

Kalıp malzemesi olarak dövme işlemlerinde takım çelikleri kullanılmaktadır. Sıcak iş takım çelikleri orta karbonlu olup, yüksek krom, az miktarda da vanadyum ve molibden içerirler. Kalıp malzemesinden beklenen başlıca özellikler şunlardır:

- Sıcaklığa ve termal şoka dayanıklılık,
- Yüksek basınca ve dinamik etkilere dayanıklılık,
- Kolay işlenebilme,
- Uniform sertleşebilme,
- Yüksek sıcaklıklarda menevişlenebilme,
- Ekonomiklik.

Dövme kalıplarının işlenmesinde önceleri standart talaşlı imalat yöntemleri ile el takım ve aletlerinden yararlanılırdı. Ancak günümüzde kopya freze ve elektroerozyon tezgahları yaygın olarak kullanılmaktadır.

#### 4.3. Dövme Kuvvetinin Hesabı

Dövme kuvvetinin hesapsal olarak bulunması, özellikle kapalı kalıptaki karmaşık malzeme akışlarından dolayı kolaylıkla hesaplanamaz. Bunu gerçekleştirebilmek için üç değişik yaklaşım mevcuttur:

- a. Deneyler ve önceki deneyimler ışığında kuvvet belirlenir.
- b. Basit ampirik formüllerden yararlanılır. Örneğin:

$$P = \sigma_0 \cdot A \cdot C$$

Burada

- A : Parçanın dövme doğrultusuna dik izdüşüm alanı (kapalı kalıpta bölüm yüzeyi alanı),  
C: Deformasyonun heterojenliğine bağlı bir katsayı,  
 $\sigma_0$ : Malzemenin dövme sıcaklığındaki akma gerilmesidir. (Soğuk dövmede akma gerilmesi olarak pekleşme değerini de dikkate alan bir değer alınmalıdır)

C değeri aşağıdaki gibi seçilebilir:

- C = 0,8 + 0,2.h<sub>0</sub>/b    açık dar kalıpta dövmeler için,  
C = 1,2 - 2,5            düz kalıplar arasında yığıma için,  
C = 3,0 - 8,0            basit biçimlerin çapaklı kapalı kalıpta dövülmesi için,  
C = 8,0 - 12,0          karmaşık biçimlerin çapaklı kapalı kalıpta dövülmesi için.

### c. Dilim Analizi

Parça dikdörtgen prizmalara bölünerek bu parçaların birbirine deformasyon sırasında etki eden gerilmelerin dengesi esası ile işlemi gerçekleştirecek basma gerilmesi veya bu gerilmenin dağılımı bulunmaya çalışılır. Bu gerilmenin etki ettiği alan da dikkate alınarak kuvvet hesabı gerçekleştirilir. Örnek olarak silindirik bir parçanın açık kalıpla yığıma kuvveti;

$$P = \pi \cdot R^2 \cdot \sigma_0 \cdot [1 + (2 \cdot \mu \cdot R / 3 \cdot h)]$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada R parçanın yarıçapı,  $\mu$  sürtünme katsayısı, h parçanın yüksekliğidir. Sürtünme katsayısı sıcak dövmede 0,1..0,2 arasında, soğuk dövmede ise 0,05..0,1 arasında seçilebilir (yağlayıcı kullanılarak).

### d. Diğer Yöntemler

Yukarıda dövme yükünün teorik olarak belirlenmesi için kullanılan yöntemlerin en basitlerine değinilmiştir. Bunların dışında genellikle çok karmaşık hesaplamalar içeren plastisite analizlerinden yararlanılabileceği gibi, bilgisayar destekli kalıp tasarımı yazılımları da kullanılabilir.

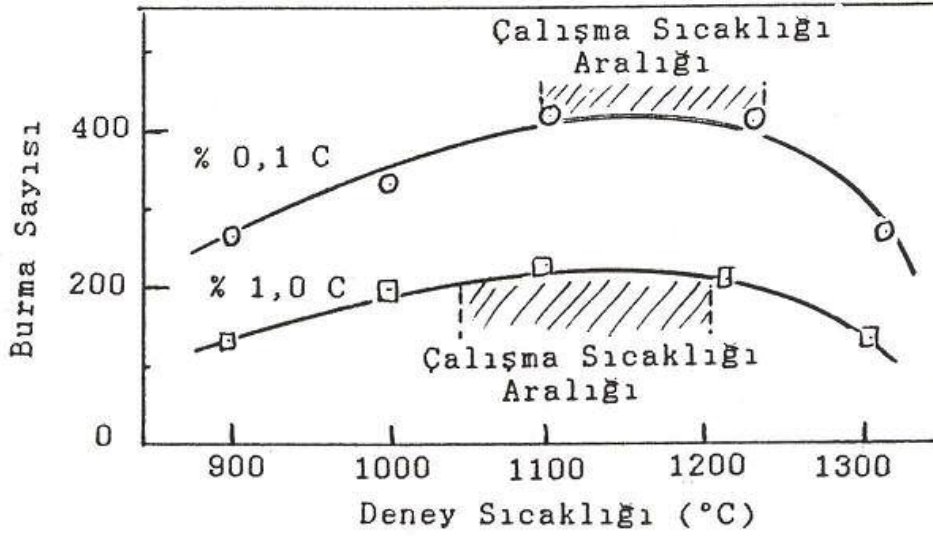
## 4.4. Dövülebilirlik

Dövülebilirlik, malzemelerin dövme işlemi sırasında herhangi bir çatlak veya ayrılma olmaksızın şekil değiştirebilme yeteneğidir. Düşük kuvvetlerle büyük şekil değişimleri yaratılabilen malzemelere "dövülebilirliği iyi" denir. Malzemelerin bu özelliğini saptayabilmek için bazı teknolojik deneylerden yararlanılmaktadır. Bunların en basitleri ve en çok kullanılanları şunlardır:

a. Yığıma Deneyi: Bu deneyde silindirik deney parçaları çalışma şartlarında aksenal yığımaya tabi tutulmakta, fıçılanan yan yüzeyde çatlak oluşuncaya kadar deneye devam edilmektedir. Elde edilebilen en büyük şekil değişimi miktarı dövülebilirliğin bir ölçütü olarak kabul edilmektedir.

b. Sıcak Burma Deneyi: Bu deneyde silindirik parçalar bir uçları sabit tutularak çeşitli sıcaklıklarda kırılana kadar burulmaya tabi tutulur. Kırılmanın olduğu dönme sayısının deney sıcaklığı ile değişimi incelenir ve o malzemeye en uygun dövme sıcaklık aralığı tesbit edilmiş olur, Şekil 4-24 ve Çizelge 4-1.





Şekil 4-24: Dövülebilirliğin tayininde burma deneylerinden yararlanma.

Çizelge 4-1 : Bazı malzemelerin dövülebilme kolaylığına göre sıralanması ve en uygun dövme sıcaklıkları

Malzeme	Dövme Sıcaklığı (°C)
Aluminyum alaşımları (en kolay)	400 - 550
Magnezyum alaşımları	250 - 350
Bakır alaşımları	600 - 900
Karbonlu ve az alaşımlı çelikler	850 - 1150
Ostenitik paslanmaz çelikler	1100 - 1250
Süper alaşımlar	1050 - 1250
Titanyum alaşımları	700 - 950
Tungsten alaşımları (en zor)	1200 - 1300

#### 4.5. Dövme Kusurları

Dövme kusurları ortaya çıkış nedenlerine göre üç guruba ayrılır.

##### 4.5.1. Malzemedен Kaynaklanan Kusurlar

###### a. Fiziksel Kusurlar

- \* Malzeme iç ve yüzey çatlakları içerebilir.
- \* Malzeme yüzeyinde ve içinde kapanmamış boşluklar ve gözenekler olabilir.
- \* Metalik olmayan kalıntılar altında olması gereken sınır değerlerden daha fazla olabilir.

#### b. Kimyasal Bileşimden Kaynaklanan Kusurlar

- \* Kimyasal bileşimde heterojenlikler söz konusu olabilir.
- \* P ve S değerlerinin standart değerlerinden yüksek olması durumunda kırılma eğilimi oluşabilir.
- \* Cu ve Sn bileşimde öngörülen sınır değerlerden fazla ise yüzey yırtılmaları oluşabilir.

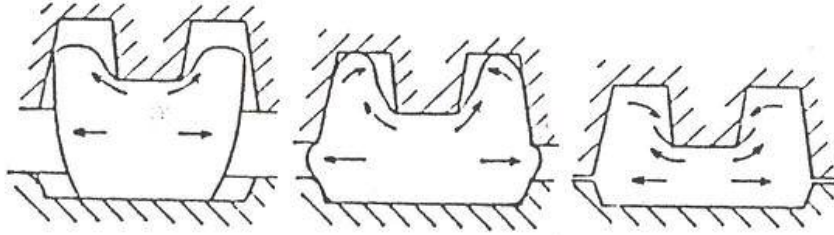
#### 4.5.2. Isıtmadan Kaynaklanan Kusurlar

- \* Uzun süre yüksek sıcaklıkta bekletme durumunda parçada tane irileşmesi görülür ve tane sınırlarının oksidasyonu (yanması) söz konusu olabilir.
- \* Isıtma süresince yüzeyde oluşan oksit tabakası (tufal) dövme öncesi tam olarak temizlenemez ise, malzemenin yüzeyine gömülen tufal, özellikleri ve talaşlı imalat şartlarını çok olumsuz etkiler.
- \* Isıtma süresince çeliklerde yüzeyden karbon kaybı (dekarburizasyon) olur. Bu da malzemenin sonraki sertleşebilme, dolayısıyla mekanik özelliklerini etkiler.

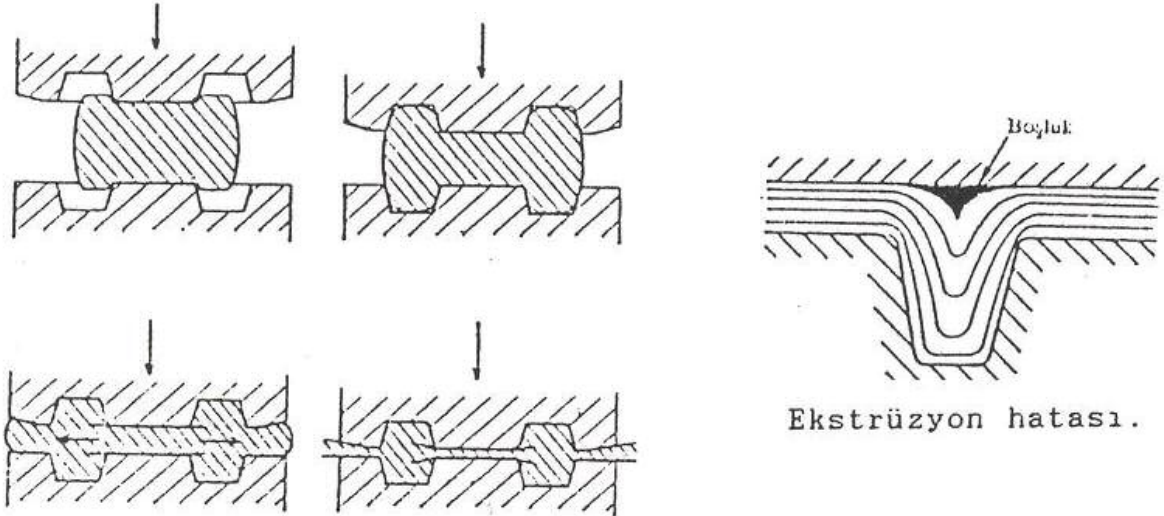
#### 4.5.3. Dövme Uygulamasından Kaynaklanan Hatalar

- \* Parça yüzeyinde kılcal çatlaklar oluşabilir. Nedenleri:
  - . İşlem bitirme sıcaklığı düşüktür,
  - . Soğuma hızı yüksektir,
  - . Malzemenin sünekliği yetersizdir.
- \* Parça içinde çatlaklar oluşabilir. Nedenleri:
  - . Önceki dövme yetersizliğinden dolayı dendritik döküm yapısı tam kırılmamıştır,
  - . İç boşluklar kaynamamıştır.
- \* Katlanmalar oluşabilir. Nedenleri:
  - . Kalıp içinde metal akışı yanlıştır,
  - . Dövme sırasında yükseklik için verilen deformasyon miktarları sınır değerlerden fazladır.
- \* Kemer-kaburga birleşme yerlerinde çatlaklar oluşmaktadır:
  - . Meme ve köşe yarıçapları küçüktür. Malzeme akışı düzgün değildir,
  - . Kalıba konan malzeme miktarı çok fazladır ve bu nedenle yatay yöndeki malzeme akışı çok fazla olur.
- \* Ekstrüzyon hataları vardır. Nedeni:
  - . Parçanın kalın bir kesitinin komşu kesitlerdeki malzeme tarafından doldurulmasıyla oluşur.
- \* Aşırı sertlik. Nedenleri:
  - . Parçanın soğuma hızı yüksektir (martenzitik dönüşüm),
  - . Bitirme sıcaklığı düşüktür (pekleşme).
- \* Şekil ve boyut kusurları vardır:
  - . Kalıplarda boyut hataları ve yanlış ayarlanmalar söz konusudur,
  - . Kalıp aşınmıştır.

- \* Artık gerilmeler mevcuttur:
  - . Soğuma hızının yüksekliği nedeniyle yerel sıcaklık farklılıkları büyüklüğü iç gerilmelere neden olur,
  - . Plastik şekil verme miktarı çok azdır ve bu nedenle deformasyon miktarı yerel farklılıklar gösterdiğinden yerel farklılıklar ortaya çıkar.
- \* Yetersiz dövme.
  - . Düşük nüfuziyet, yani dövme işleminin tüm kesite yayılmayıp yüzeyde kalması sonucu döküm içyapısı tam olarak giderilememiştir.
- \* Aşırı yöne bağımlılık (Anizotropi)
  - . Bunun oluşması için bir kademede uygulanan plastik şekil verme miktarı % 50..70 değerini aşmamalıdır.



Keskin meme ve köşe radyüslerinin neden olduğu katmer ve çatlak oluşumu.



Fazla ham malzemedен kaynaklanan çatlaklar.

Şekil 4-25: Bazı dövme kusurları

#### 4.6. Dövme Makinaları

Bir dövme işleminin başarı ile yapılabilmesi için gerekli kuvvet ve enerji değerleri hesaplanmalı ve işlemin yapılacağı dövme makinası bu değerleri karşılayacak şekilde seçilmelidir.

Dövme makinaları çalışma prensipleri kriter olarak alındığında; enerji sınırlı makinalar, strok sınırlı makinalar ve kuvvet sınırlı makinalar olmak üzere üç sınıfa ayrılır.

##### 4.6.1. Enerji Sınırlı Dövme Makinaları

###### a. Çekiçler (Şahmerdanlar)

Bu tip makinalarda üst kalıbı içeren bir ağırlık (koç) belirli bir yüksekliğe çıkarılıp, hareketsiz ağırlığa (örs) bağlanan alt kalıp üstüne yerleştirilmiş iş parçası üzerine serbest veya basınçlı olarak düşürülmektedir. Şekil değişimini sağlayan koçun kinetik enerjisi olduğundan enerji sınırlı bir makina olarak sınıflandırılmaktadır. Çekiçler kendi aralarında üç guruba ayrılır:

###### \* Serbest Düşmeli Çekiçler

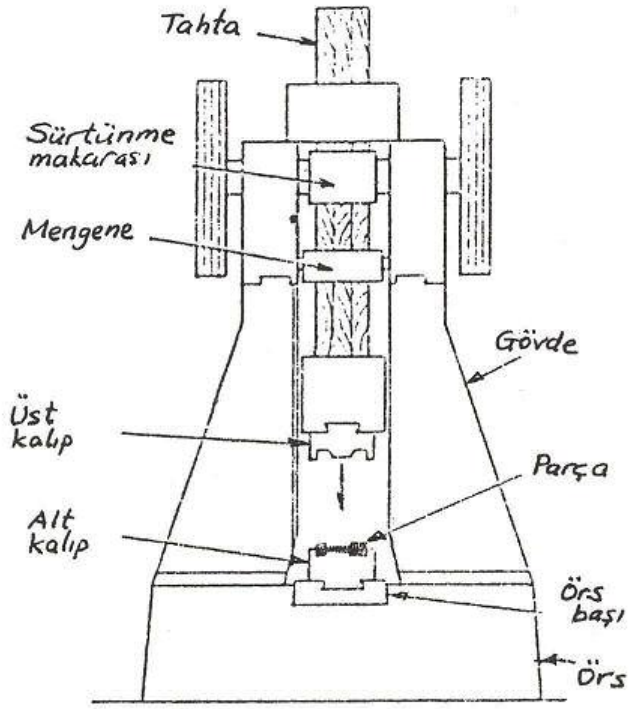
Bu makinalarda koç değişik yöntemlerle kaldırılarak (tahta, kayış, zincir, basınçlı hava vb.) yerçekimi ile serbestçe düşürülmektedir. Enerjilerine göre sınıflanması gereken bu makinaların kapasiteleri piyasada genellikle yanlış olarak koç ağırlığına göre verilmektedir.

Çekiçlerin koç kütleleri 50..4500 kg arasında, strokları (koçun iniş-kalkış hareketi aralığı) ise 0,8..2 metre arasında değişmektedir. Enerji kapasiteleri ise 600..400.000 Nm aralığında olan bu çekiçler dakikada 60..150 vuruşa kadar çıkabilmektedir.

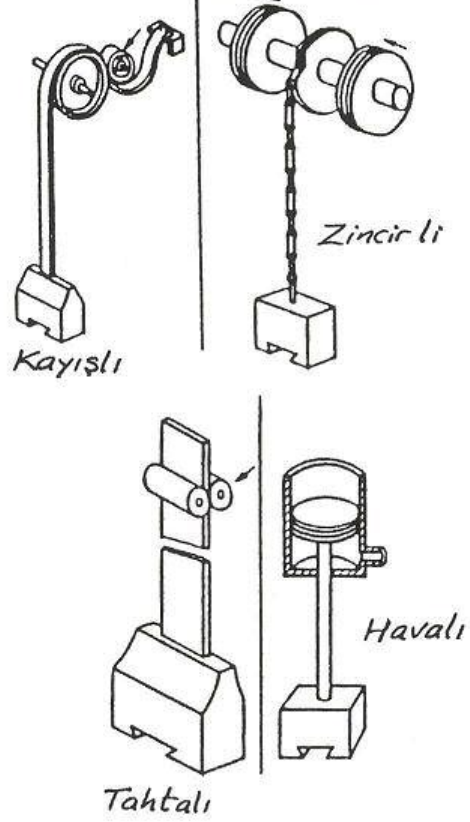
###### \* Güç Düşmeli Çekiçler

Daha yüksek enerji kapasiteli çekiçler elde etmek için, serbest düşme ile kinetik enerji kazanan koç, ayrıca buhar veya hava basıncı ile hızlandırılmaktadır. Böylece 3000..800.000 Nm aralığında değişen enerji kapasitesine ulaşılmaktadır. Dakikada 70..190 darbe gerçekleştirebilen bu çekiçlerde vurma hızları 8 m/sn mertebesine kadar çıkmaktadır. Koç kütleleri ise genellikle 250-25.000 kg arasındadır.

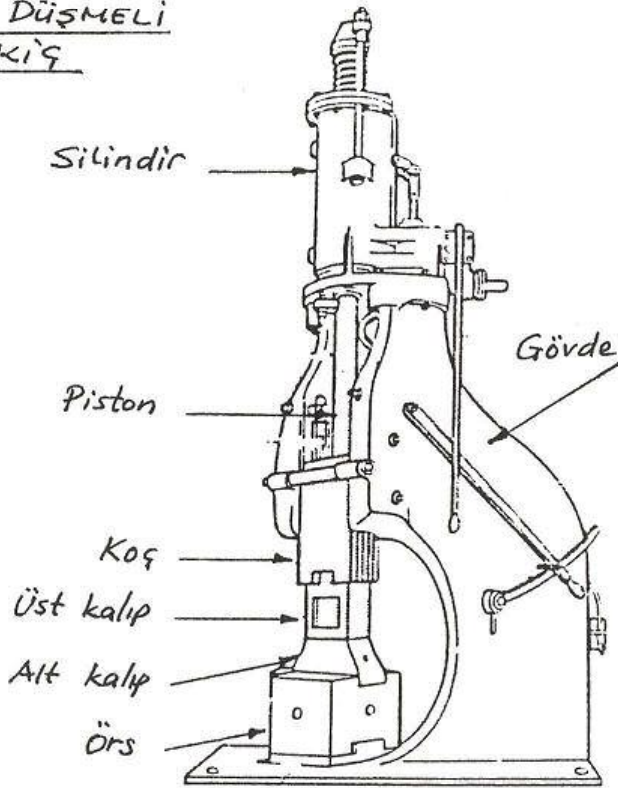
### SERBEST DÜŞMELİ ÇEKİŞ



### KOŞ KALDIRMA ÇEŞİTLERİ



### GÜÇ DÜŞMELİ ÇEKİŞ

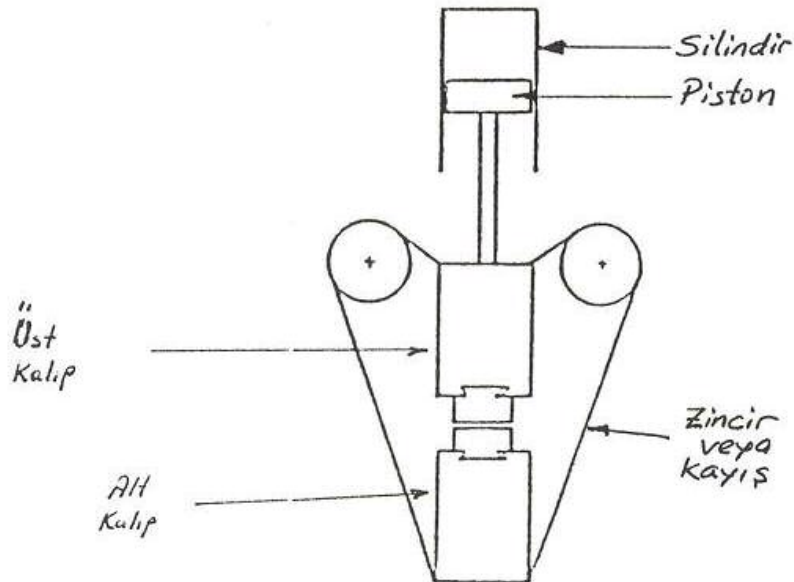


Şekil 4-26: Çekiçler

### \* Karşı Vuruşlu Çekiçler

Bu makinalarda alt ve üst kalıplar karşılıklı olarak hareket ederek hemen hemen tüm enerjilerini iş parçası üzerinde harcarlar. Böylece titreşim sorunu da halledilmiş olan bu makinaların yatay tipleri de vardır. Alt kalıbın hareketi kayış, zincir veya hidrolik bir donanım ile gerçekleştirilebilir. Düşey karşı vuruşlu çekiçlerde 1.250.000 Nm enerji seviyelerine ulaşılmıştır.

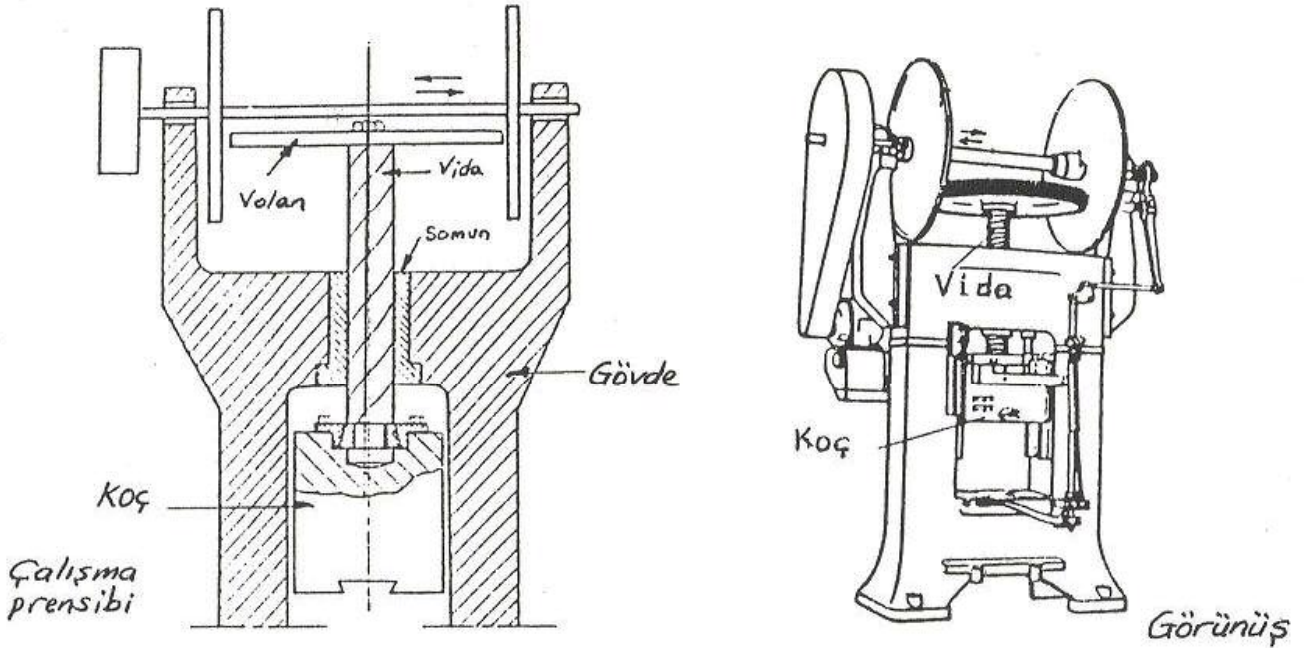
Çekiçlerde yarım kg'dan birkaç tona kadar değişik ağırlıkta parçalar dövülebilmektedir. Dövme sırasında koçun parçaya temas süresi 1..10 milisaniye gibi çok kısa olduğundan soğuma miktarı azdır. Diğer makinalarla karşılaştırıldıklarında en ucuz dövme makinalarının çekiçler olduğu görülür. Ancak çekiçlerde hassas parça üretimi güçtür. Diğer bir sorunları da titreşim ve gürültüleridir. Ayrıca koçun enerjisinin iş parçası üzerinden örs (örs koç ağırlığının 10..25 katıdır), oradan da temele iletimi hem titreşime hem de enerji kaybına neden olur. Bundan dolayı çekiçlere uygun bir temel hazırlanması (darbeleri sönmülemesi için sağlam ve bir kum havuzu içinde bulunan) şarttır. Bazı durumlarda temel masrafları çekiç maliyetine kadar ulaşabilir. Karşı vuruşlu çekiçlerde enerji iki kalıbın karşılıklı hareketi neticesinde tamamen iş parçasına aktarıldığı için enerji kaybı söz konusu değildir. Temel hacmi ve maliyeti de yaklaşık % 75 oranında azalır. Ancak alt kalıbın sürekli hareket etmesi nedeniyle ön ve ara şekillendirme işlemlerinin arka arkaya tek bir kalıp üzerinde gerçekleştirilmesi güçtür.



Şekil 4-27: Karşı vuruşlu çekiçlerin çalışma prensibi

## b. Vidalı (friksiyon) Presler

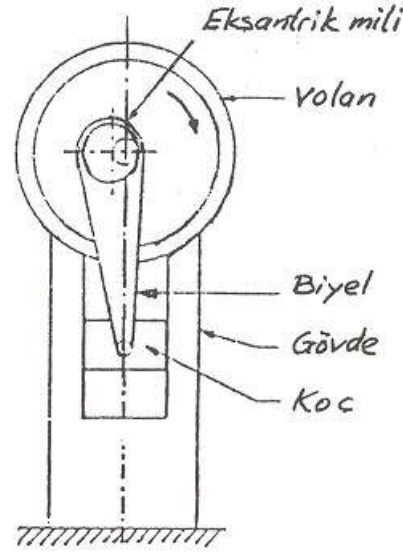
Vidalı preslerde koç her iki yöne dönebilen bir vidaya bağlanmıştır. Presin üst kısmında dönen ve bu şekilde kinetik enerji depolamış olan bir çift volan bulunmaktadır. Dövme işlemi sırasında sürtünmeden yararlanılarak (friksiyon pres) volanın kinetik enerjisi vidaya ve oradan da koça aktarılır. Volan enerjisi tükendikten sonra volan, vida ve koç durmakta ve vida ters yönde döndürülür koç yukarı alınmaktadır. Koç kütleleri 50..8000 ton arasında değişen friksiyon preslerde, koç hızları 0,6..1,2 m/sn değerlerine ulaşmaktadır.



Şekil 4-28: Vidalı pres

### 4.6.2. Strok Sınırlı Dövme Makinaları

Strok sınırlı mekanik preslerin eksantrik veya kranklı tipleri mevcut olup, bunlar çekiçlerden sonra en yaygın olarak kullanılan dövme makinalarıdır. Bu preslerde gerek koç hızı, gerek kuvvet strok boyunca değişmektedir. Mekanik presler strok sonunda ortaya çıkan kuvvete göre sınıflandırılırlar. Kuvvet ve enerji hesabı dövme öncesi çok iyi yapılmalıdır, aksi takdirde koçun alt ölü noktayı geçememesi, yani presin "bloke" olması tehlikesi vardır. Mekanik preslerin strokları kısadır ve bu nedenle küçük stroklu dövme işlemlerinde veya çapak kesme işlemlerinde kullanılır. Alt ölü noktada koçun hızı sıfır olduğundan,



Şekil 4-29: Eksantrik pres

dövme sırasında darbeden ziyade ezme etkisi sözkonusudur ve bu nedenle küçük temel ve kalıplar yeterli olur. Koc hızları 0,06 ... 1,5 m/sn arasında değişmektedir.

#### 4.6.3. Kuvvet Sınırlı Dövme Makinaları

Hidrolik presler kuvvet sınırlı makinalar gurubuna girer. Hidrolik preslerde silindir içindeki basınç sabit olduğundan tüm strok boyunca kuvvet değişmez. Ayrıca koç hızını kontrol etmek ve hatta programlamak mümkündür. Diğerlerine göre yavaş sayılabilecek bir makina olup, hız aralığı 0,06 ... 0,30 m/sn dir. Dövme sırasında kalıpların malzemeye temas süresi uzun olduğu için ısı kaybı ve kalıbın ısınması sorun yaratabilir. Bu nedenle kalıplar erken aşınabilir. Hassas parçalar ve büyük parçaların üretiminde kullanılmaktadır. Kapasiteleri 2500-500.000 kN arasındadır.

Hidrolik presleri hızlandırmak amacıyla bir akümülatör sistemi (yağ/gaz arayüzeyi içeren bir donanım) eklenebilir. Hidrolik grubun pompaladığı sıvı ile bir gaz sıkıştırılır ve gerektiğinde kullanılarak basınçlı hidrolik sıvının büyük bir hızla sevk edilmesi mümkün olur.

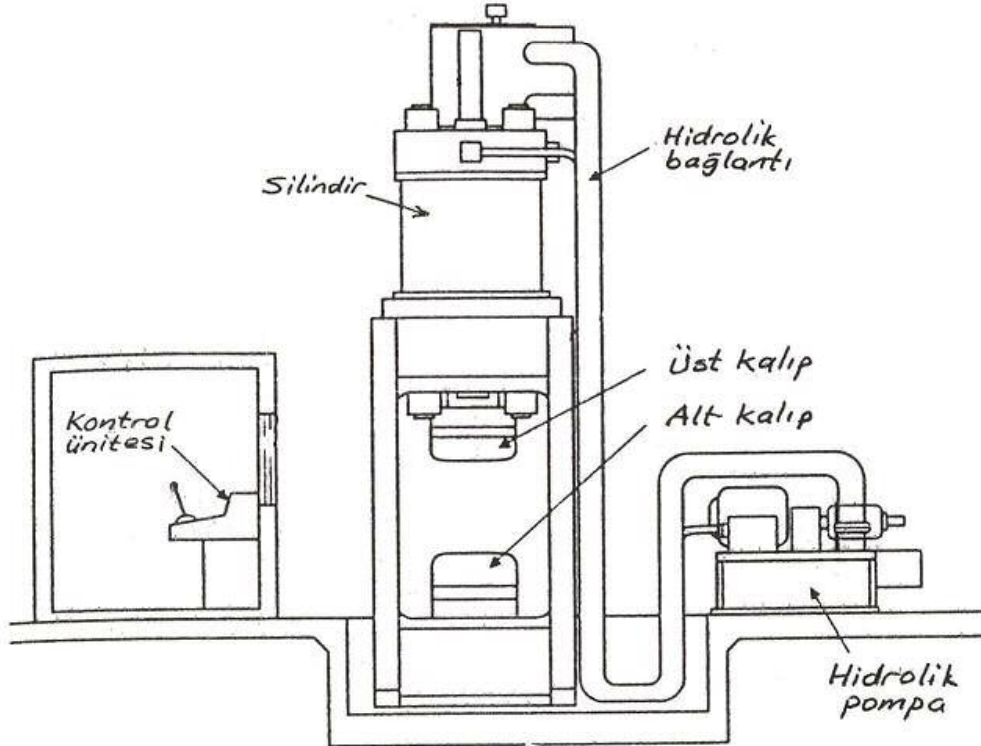
Her dövme makinası için karakteristik bir hız değeri sözkonusu olup, bu hızın yük altında belirlenmesi gereklidir. Yük altındaki hız malzemenin şekil değiştirme hızını, temas



süresini ve üretim hızını belirler. Dövme makinalarının serbest çalıştıkları sırada sahip oldukları hızın pek önemi yoktur. Esas önemli olan makinanın tam gücü kullanıldığında uygulayabildiği hızdır. Bu hız malzemenin akma dayanımı hesaplarında kullanılan deformasyon hızını belirlemede yararlanan makina verisidir. Değişik dövme makinalarının yük altındaki hızlarını karşılaştırabilmek amacıyla aşağıdaki tablo verilmiştir:

Dövme Makinası	Hız Aralığı (m/sn)
Serbest Düşmeli Çekiç	3,5 - 4,5
Güç Düşmeli Çekiç	3,0 - 9,0
Mekanik Pres	0,06 - 1,5
Hidrolik Pres	0,06 - 0,3

Üretilen parçaların boyut hassasiyetinin önemli olduğu durumlarda makinanın rijitliği de önem kazanır. Rijitlik makinaların şekillendirme sırasında uğradıkları elastik şekil değişimi miktarı daha azdır. Aynı kuvveti uygulayabilen iki makinadan "iri" olanı daha rijittir, ancak buna karşılık fiyatı da daha yüksektir.



Şekil 4-28: Hidrolik pres

#### 4.7. Yağlama

Plastik şekil verme işlemlerinde metalin akışı ve kalıplar tarafından iş parçasına uygulanan kuvvetler, metal/kalıp ara yüzeyindeki sürtünme koşullarından etkilenir. Bazı işlemlerde (sıcak haddeleme, bazı ekstrüzyon uygulamaları gibi) yağlama gerekmez. Ancak dövme, soğuk haddeleme, tel çekme gibi bazı şekillendirme yöntemlerinde yağlayıcıların çok büyük önemi ve yararı bulunmaktadır. Bir dövme parçanın maliyetinin % 10..20'sini kalıp masraflarının oluşturduğu düşünülürse, iyi bir yağlama ile kalıp ömrünün uzatılmasının ekonomik önemi ortaya çıkar.

Mühendislik uygulamalarında sürtünme ve yarattığı sorunlar triboloji adı verilen bir bilim dalı tarafından incelenmektedir. Sürtünmenin etkisi genellikle parça/kalıp arayüzeyindeki sürtünme katsayısı  $\mu$  ile belirlenmektedir.

Yağlayıcı özellikleri yüksek sıcaklıktan olumsuz yönde etkilenmektedir. Yağlayıcının özellikleri kimyasal bileşimine ve bu özelliklerin kullanım sıcaklığındaki kararlılığına bağlı olduğundan özellikle yüksek sıcaklıklarda en uygun yağlayıcının seçimi çok önemlidir.

Plastik şekil vermeye kullanılacak yağlayıcıların sahip olması gereken özellikleri şu şekilde sıralanabilir:

- a. Kalıpla malzeme arasındaki sürtünmeyi çalışma şartlarında en aza indirmesi,
- b. Parçanın kalıba yapışmasını önlemesi,
- c. Kalıpta aşınmayı önlemesi,
- d. Parçadan kalıba geçen ısı miktarını düşürmesi,
- e. Kolay uygulanabilir olması,
- f. Kullanım sıcaklıklarında kararlı olması,
- g. Sağlığa zararlı olmaması ve çevreyi olumsuz etkileyen artıklar bırakmaması
- h. Ekonomik olması.

Yağlayıcılar genel olarak dört grup altında toplanabilir:

##### a. Sıvı yağlayıcılar

Bitkisel, hayvansal ve mineral esaslı sıvı yağları içerir. Daha çok soğuk şekillendirme işlemlerinde kullanılır. Sıcak dövme işlemlerinde kullanılabilen bazı sentetik sıvı yağlayıcılar da geliştirilmiştir.

##### b. Katı yağlayıcılar

Tahta talaşı, grafit, molibden disülfid ( $MoS_2$ ), cam ve polimer filmler bu sınıfa girerler. Talaş ve özellikle grafit, yüksek sıcaklıktaki şekillendirme işlemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

### c. Emülsiyonlar

Grafit veya molibden disülfid gibi katı yağlayıcı parçacıkları içeren sıvı yağlar, emülsiyon halinde yağlayıcı olarak kullanılmaktadır. Özellikle grafitin, yüksek sıcaklıkta kullanılabilen sıvı yağlarla oluşturulan karışımları dövme teknolojisinde çok yaygın kullanılan bir yağlayıcıdır.

### d. Sabun ve Muımlar

Daha çok soğuk şekillendirme işlemlerinde kullanılan fosfatlı sabun, mum ve parafin gibi yağlayıcılar bu gruba girer. Özellikle tel çekme işleminde sabunlardan yararlanılmaktadır.

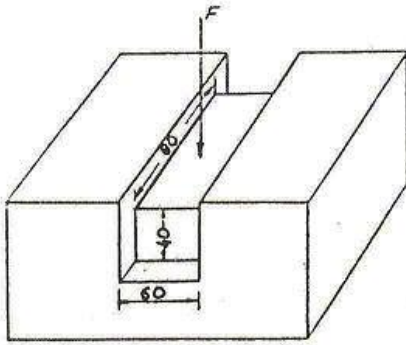
## İMAL USULLERİ (ÖDEV PROBLEMLER)

1. Boyu 80 mm, yüksekliği 40 mm ve genişliği 60 mm olan bir metal blok, genişliği metal blok kadar olan kanal şeklinde bir kalıp içinde basılarak uzatılmak istenmektedir. Malzemenin akma eğrisi ;

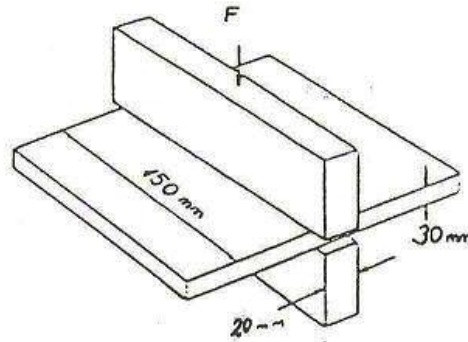
$$\bar{\sigma} = 100 + 50 \cdot \bar{\epsilon}^{0,5} \quad [\text{N/mm}^2]$$

olarak verildiğine göre,

- Metil bloğun boyunu iki katına çıkarmak için uygulanması gereken kuvveti bulunuz.
- Verimi 0,85 olarak tahmin edilen bu işlemin  $V_f=2$  mm/sn (yığıma kalıbının düşey eksenindeki hızı) hızında gerçekleşmesi için seçmeniz gereken makinanın kuvvet ve güç kapasitesi ne olmalıdır ?



Problem 1



Problem 2

2. Akma eğrisi  $\bar{\sigma} = 10 + 5 \cdot \bar{\epsilon}^{0,5}$  [N/mm<sup>2</sup>] olarak tanımlanan, 150 mm genişliğinde 30 mm kalınlığındaki bir metal levhaya 20 mm genişliğindeki düz kalıplarla uygulanan Düzlem Birim Şekil Değişimi Basma Deneyinde, levha yüksekliğini 20 mm' ye indirmek için gerekli olacak kuvveti hesaplayınız.
3. Et kalınlığı 1 mm, dış yarıçapı 25 mm olan ince cidarlı bir metal boruya her iki ucu kapatılmak suretiyle 8 MPa' lık bir iç basınç uygulanmıştır. Malzemenin akma eğrisi

$$\bar{\sigma} = 250 \cdot \bar{\epsilon}^{0,30} \quad [\text{MPa}]$$

şeklinde verildiğine göre, borunun basınç uygulandıktan sonraki et kalınlığını hesaplayınız.  
(Not: Elastik gerilmeler ve boru uçlarındaki kısıtlayıcı faktörler ihmal edilecektir.)

4. 40 mm genişliğinde, 200 mm boyunda ve 30 mm yüksekliğindeki bir metal blok Düzlem Birim Şekil Değişimi şartlarında (boy yönünde şekil değişimi yok) geniş düz kalıplar arasında yığılmaktadır. Metal blok ile kalıplar arasındaki sürtünme katsayısının 0,25 , metalin akma eğrisinin ;

$$\bar{\sigma} = 100 \cdot \bar{\epsilon}^{0,5} \quad [\text{N/mm}^2]$$

olması durumunda, metal blok yüksekliğini 20 mm' ye indirmek için gerekli kuvveti “ Dilim Analizi “ kullanarak hesaplayınız. Kalıp/metal ara yüzeyinde sürtünmenin olmadığı ideal yığıma şartlarında aynı uygulama yapılacak olursa ne kadarlık bir kuvvet gerekir ?

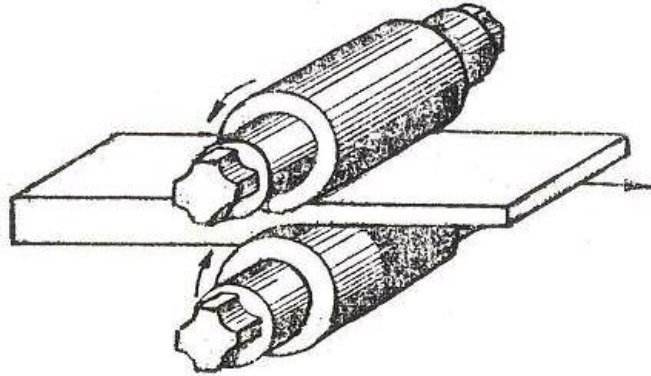
## 5. HADDELEME

Metallerin merdaneler arasından geçirilerek biçimlendirilmesi işlemi haddeleme olarak adlandırılır. Seri üretime ve ürünün özelliklerini tam olarak kontrol edilmesine imkan verdiği için haddeleme, plastik şekil verme yöntemleri arasında en yaygın olarak kullanılanıdır. Metallerin merdaneler arasından geçirilerek biçimlendirildiği bu işlem sırasında sarfedilen iş, malzemeye plastik şekil vermek ve merdane ile metal arasındaki sürtünmeleri yenmek için harcanır.

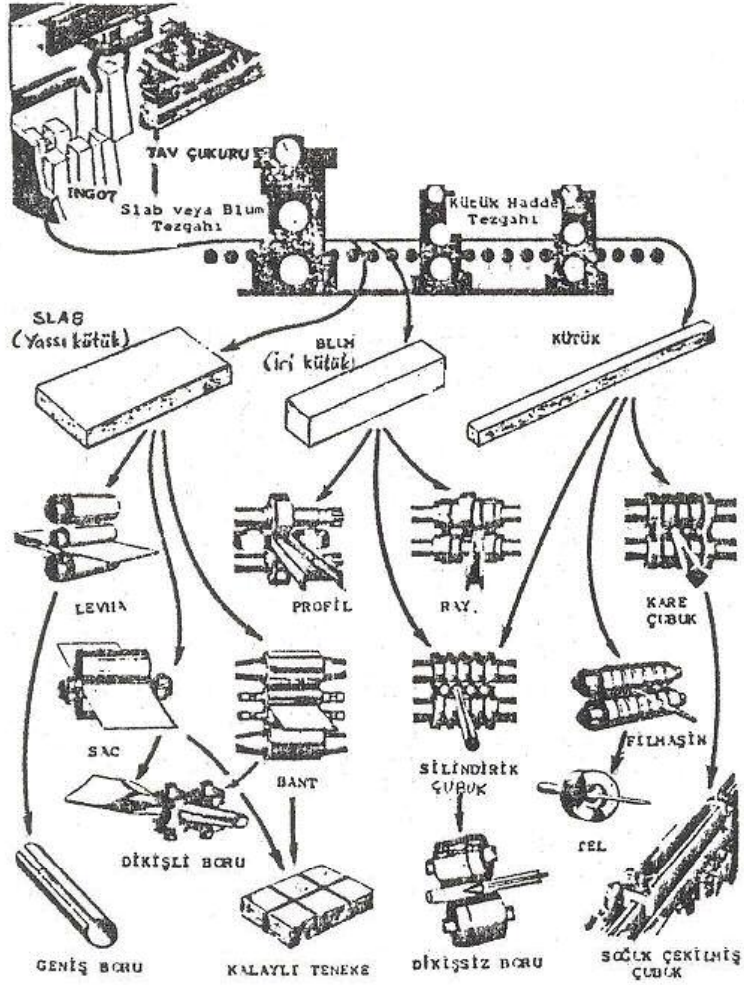
### Haddeleme Türleri

Haddeleme, sıcak ve soğuk olmak üzere ikiye ayrılabilir. Büyük oranlarda şekil değişimlerinin gerçekleştirileceği haddeleme işlemleri, genellikle malzemenin akma gerilmesinin düşük ve biçimlendirilebilme kabiliyetinin iyi olduğu yüksek sıcaklıklarda yapılır. Kokil (ingot) kalıplara dökülen veya sürekli döküm tekniği ile katılaştırılan metallerin, birincil kristalleşmeler sonucu oluşan kaba taneli ve dendritik içyapılarının kırılması, ancak SICAK HADDELEME sırasında büyük deformasyonlar uygulanması ile mümkün olur. Sıcak haddeleme yoluyla kütük, yassı kütük gibi ara ürünler ile saç, levha, çubuk, boru, ray ve diğer profiller gibi son ürünler üretilebilir.

Metallerin SOĞUK HADDELENMESİ de önemi giderek artan bir üretim tekniğidir. Soğuk haddeleme ile elde edilen çubuk, tel, saç, bant ve folyoların yüzey kalitesi çok yüksek olup, ürün boyutları çok dar toleranslar içinde kontrol edilebilmektedir. Ayrıca soğuk haddeleme sırasında oluşan pekleşme yardımıyla malzemenin dayanımının da istenilen düzeye çıkarılması mümkündür. Özellikle demir dışı metal ve alaşımları için soğuk haddeleme, yaygın olarak kullanılan bir dayanım artırma yöntemidir. Belirli bir kalınlığa kadar sıcak haddelenerek inceltilmiş ara ürünlerin yüzeyleri asit banyolarında temizlenip tufaldan arındırılarak



Şekil 5.1: Haddeleme

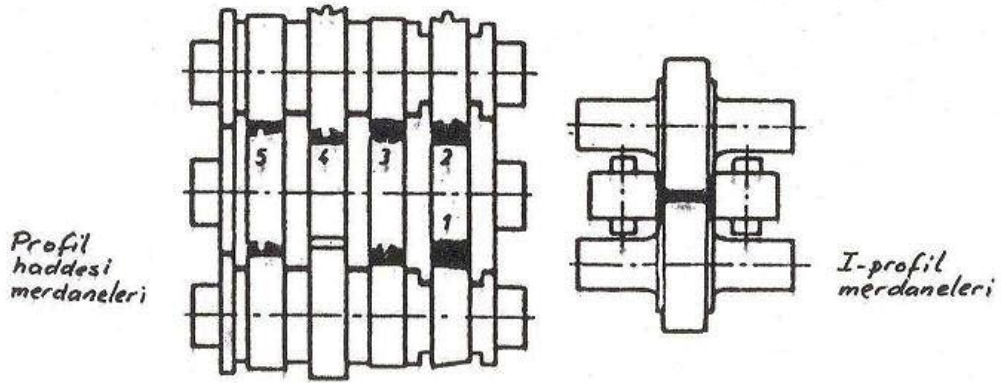


Şekil 5.2: Hadda ürünleri

şekil verme işlemine soğuk haddelene ile devam edilebilir. Soğuk haddelene ile elde edilebilecek toplam kesit daralması malzemeye bağlı olarak % 50..90 arasında değişmektedir.

Biçimlendirme işlemlerinde kullanılacak saçların belirgin akma sınırı göstermesi ve bu nedenle elde edilen üründe yerel kayma bantlarının oluşması istenmeyen bir husustur. Bu sakıncayı gidermek için bu tür saçlara, sadece belirgin akma bölgesinin aşılması için küçük bir miktar soğuk haddelene uygulanır. TEMPER HADDESİ olarak adlandırılan bu işlem ile akma sınırını merdaneler arasında aşan malzemede belirgin akmanın yaratacağı sakıncalar giderilmiş olur.

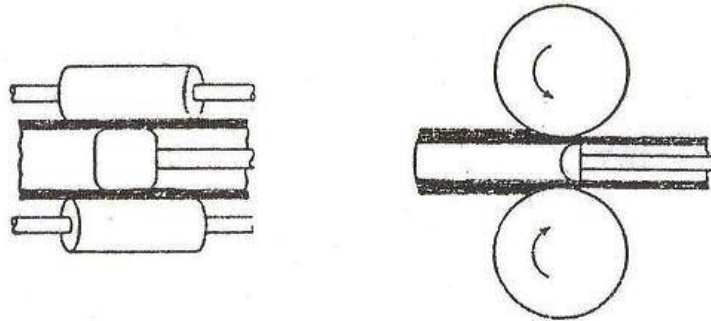
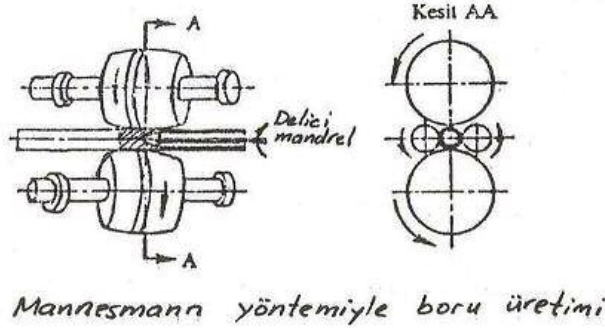
Tel, çubuk, U-profil, I-profil ve ray gibi değişik kesitlere sahip haddelene ürünleri PROFİL HADDELEME ile elde edilir. Profil haddelene, genellikle sıcak olarak ve her biri paso olarak adlandırılan birden fazla kademe yapılar. Kullanılan profil merdanelerinde, haddelenecek malzemeye birbiri ardına uygulanacak biçimlendirmelerin kesitlerine göre girinti ve çıkıntılar



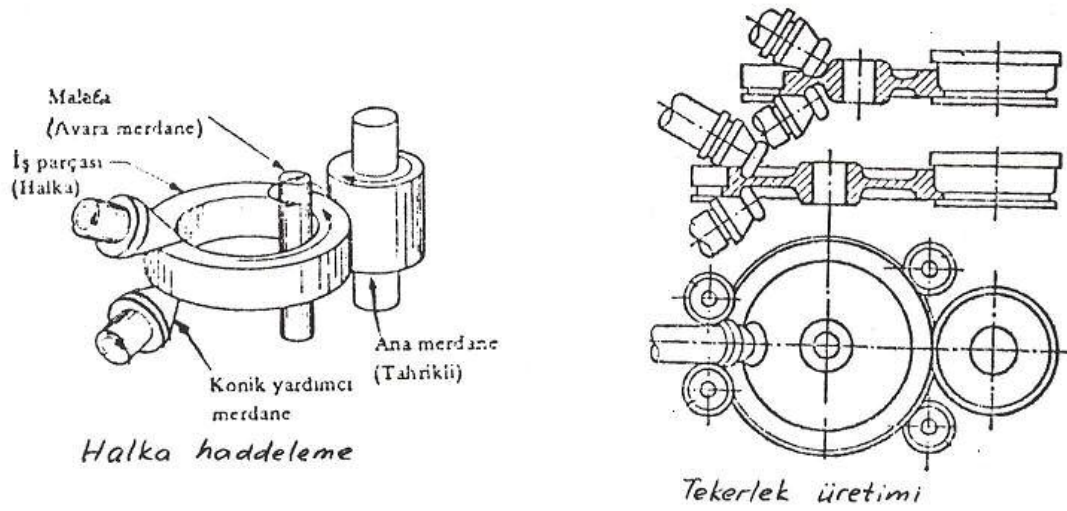
Şekil 5.3: Profil haddeme

bulunur. Bu pasoların sayı ve biçimlerinin tasarımı büyük deneyim gerektir, Şekil 5.3. Profillerin elde edilmesinde kullanılan bu merdaneler kalibreli merdane olarak da adlandırılır.

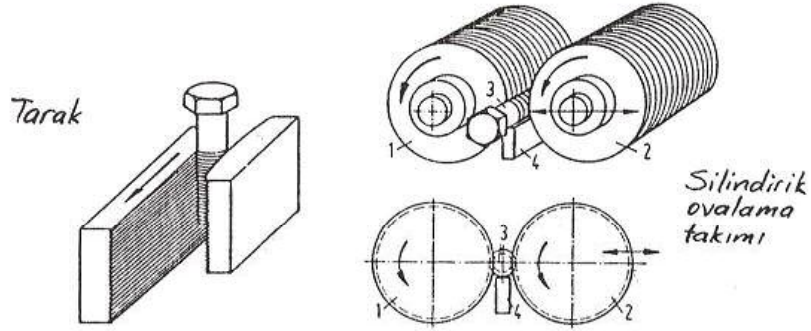
İçi boş profillerin haddelenmesine en iyi örnekler, haddeme ile boru ve halka üretimidir. Boyuna ve çapraz haddeme ile boru üretimine örnekler Şekil 5.4'te verilmiştir. Dönel simetriye sahip cisimlerin biçimlendirilmesine örnek olarak da tekerlek ve kasnakların haddelenmesi gösterilebilir, Şekil 5.5.



Şekil 5.4: Boru üretim yöntemleri



Şekil 5.5: Haddeleme ile tekerlek ve halka üretimi



Şekil 5.6: Ovalama yöntemiyle diş açılması

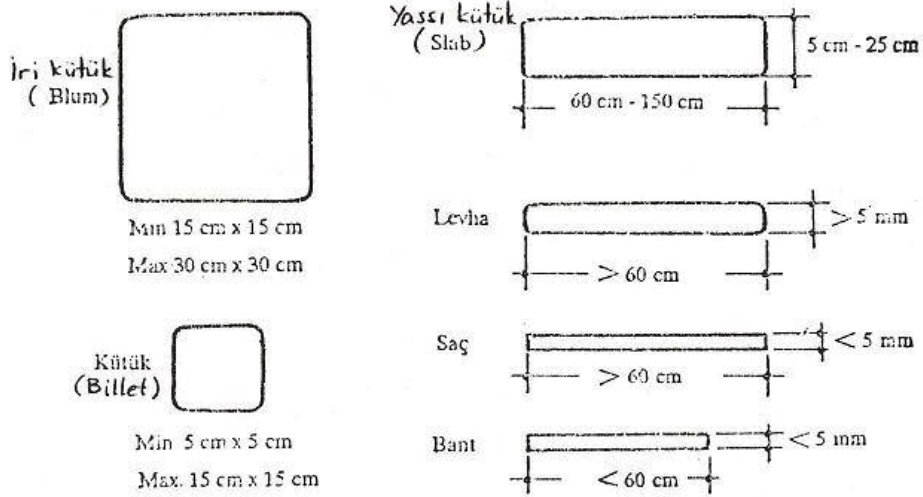
Bir diğer özel üretim yöntemi de DIŞ HADDELEME (ovalama) yöntemidir. Bu yöntemde yuvarlak veya düz takımlar (tarak) kullanılarak küçük ve orta boy civataların dişleri plastik şekil verme yöntemiyle soğuk olarak biçimlendirilir.

Haddellemenin kesit azaltılması için değil, biçimlendirme için kullanıldığı diğer uygulamalar ise, biçimi bozulmuş saçların doğrultulduğu DÜZELTME HADDELERİ ve saç bükmede kullanılan BÜKME MERDANELERİdir.

#### Hadde Ürünlerinin Adlandırılması

Mühendislikte yarı mamul olarak yaygın biçimde kullanılan haddelenmiş ürünlerin adlandırılışlarının bilinmesi ve doğru olarak kullanılması çok önemlidir. Ancak, bu alanda genel bir sınıflama mevcut olmayıp, örneğin demir esaslı ve demir dışı metallerin hadde ürünlerinin adlandırılışlarında farklıklar olabilmektedir. Dolayısıyla burada verilen ve çelik üretim



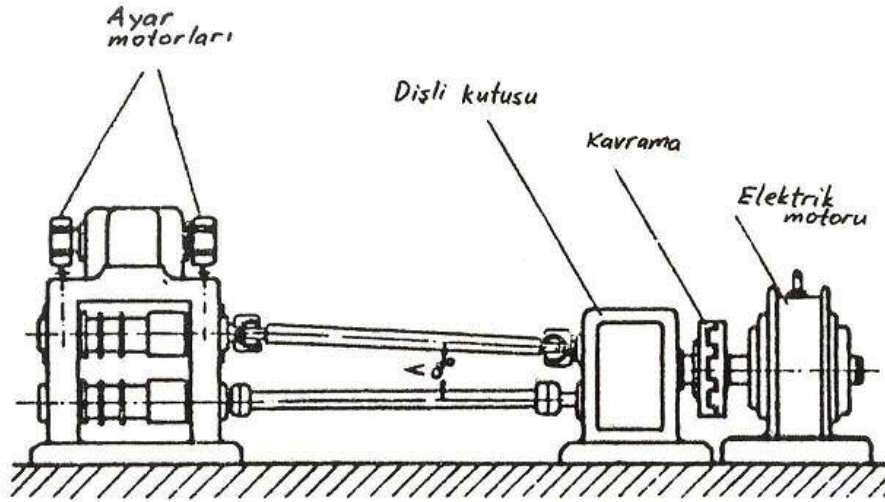


Şekil 5.7: Yassı hadde ürünlerinin adlandırılması

teknolojisinde kullanılan terminolojinin kesin sınırlar çizmediği bilinmelidir.

Haddelemeye genellikle dökülerek veya Cu, Al gibi malzemelerde elektroliz yoluyla elde edilmiş bir ingot veya yassı kütük (slab) başlanır. Demir esaslı malzemelerde ingotun ilk haddelenmesi ile elde edilen ürün, iri kütük (blum) olarak adlandırılır. Genellikle blumlar kare kesitlidir ve kesit alanı 200 cm<sup>2</sup> 'den büyüktür. Haddelene ile kesitin daha küçültülmesi halinde kütük (billet) elde edilir, kütük kesitinin alt sınırı (50x50 mm<sup>2</sup>) dir. Demir dışı metaller için bu terimler farklı olabilir, nitekim döküm yoluyla elde edilmiş ara ürünler için de kütük (billet) adı kullanılabilir. Kesit alanı 300 cm<sup>2</sup> 'den büyük ve eni kalınlığının en az iki misli olan ürünler yassı kütük (slab) olarak adlandırılır. Blum, kütük ve yassı kütük (slab) ara ürünler olup haddelemeye devam edilerek son ürünlere dönüştürülür.

Ara ürünlerin haddelenmesiyle elde edilen yassı ürünler kalınlıklarına göre saç veya levha olarak adlandırılırlar. Genellikle 5 mm 'den kalın ürünler levha, inceler ise saç olarak adlandırılırlar. Kalınlığı 5 mm 'den az, eni de 50..60 cm 'den az olan haddelenmiş yassı ürünler ise bant olarak adlandırılır. Profil haddelene ile elde edilen son ürünler, biçim ve kesit büyüklüklerine göre tel, filmaşın, çubuk, I-profil gibi değişik isimlerle anılırlar.



Şekil 5.8: Hadde tezgahı

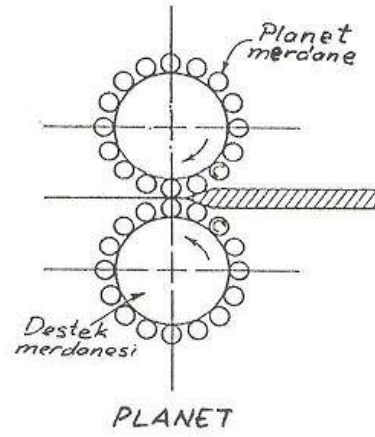
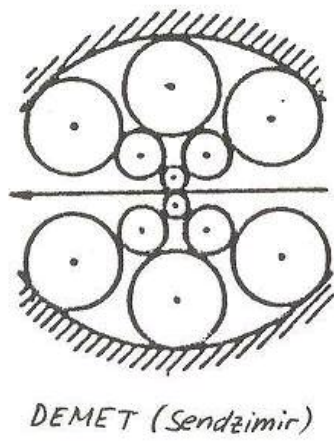
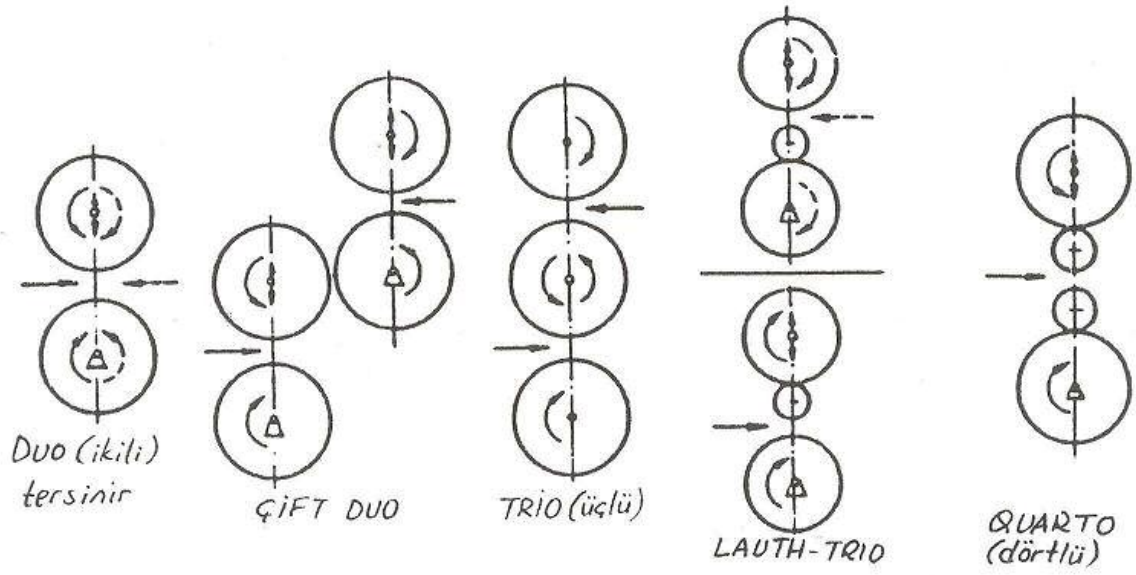
#### Hadde teçhizatı

Bir hadde tezgahı genel olarak merdaneler, yataklar ve bunları içeren gövdeden oluşur, bunların dışında merdanelere moment aktaran ve bunların hızını kontrol eden bir tahrik sistemi gereklidir, Şekil 5.8. Haddedelemde çok yüksek kuvvetler söz konusu olduğundan rijit bir konstrüksiyon ve çok güçlü motorlar söz konusudur. Bir haddehanede birbirini izleyen işlemlerin yapılması için çok sayıda tezgah gerekli olup, modern bir haddehane çok büyük yatırımlar isteyen bir üretim tesisidir.

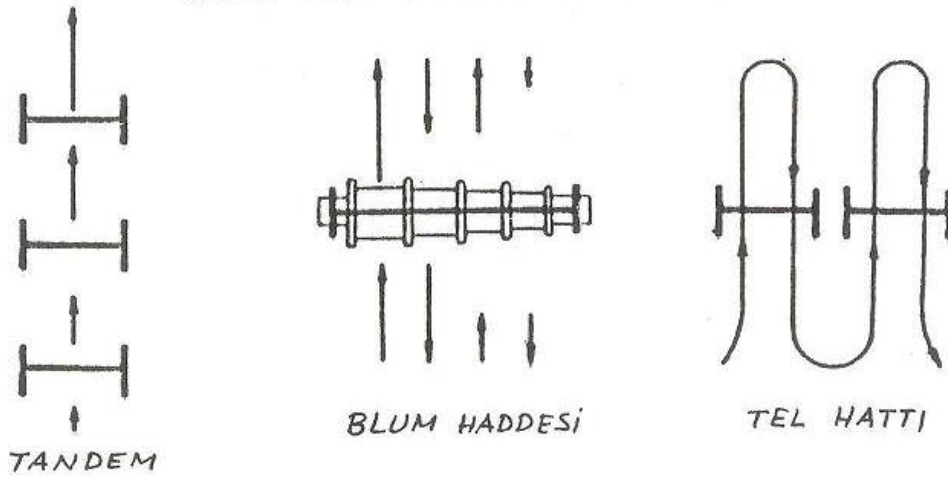
#### Merdane düzenleri (Şekil 5.9)

Hadde tezgahları genellikle merdanelerin sayısı ve düzenlenişine göre sınıflanır. En basit ve en sık rastlanan tip ikili (duo) hadde tezgahıdır. Aynı çapta iki merdanelen oluşmuş bu düzende, metal bir yönde geçtikten sonra haddelemeye devam edebilmek için, malzemenin malzeme giriş tarafına elle veya bir platform yardımıyla aktarılması gereklidir. Bu zorluğu gidermek için her iki yönde de dönebilen tersinir ikili hadde kullanılabilir, ancak dönen merdanelerin durdurulup ters yönde tekrar hızlandırılması, zaman ve enerji kayıplarına yol açar. Bu soruna çözüm olarak çift ikili veya üçlü (trio) merdane düzeni kullanılması düşünülebilir. Üçlü düzende alt ve üst merdaneler tahrik edilir, orta merdane ise sürtünme ile döner.

Haddemeleme kuvvetinin hesaplanmasında da görüleceği gibi küçük merdanelerin kullanılması ile haddemeleme için gerekli kuvvet azalır. Ancak küçük çaplı merdanelerin dayanımları ve rijitlikleri düşük olduğundan bunların eğilmelerini önlemek için destek merdanelerinin kullanılması zorunlu olur (dörtlü tertip). Dörtlü merdane düzeninde haddemeleme gerçekleştiren küçük merdaneler iş merdaneleri, büyükler ise destek merdaneleri olarak anılır. Yüksek dayanımlı malzemelerden bant ve saçların soğuk haddelenmesinde birden fazla destek merdanesinin kullanılması gerekebilir (demet-senzimir merdane düzeni).



Şekil 5.9: Merdane düzenleri

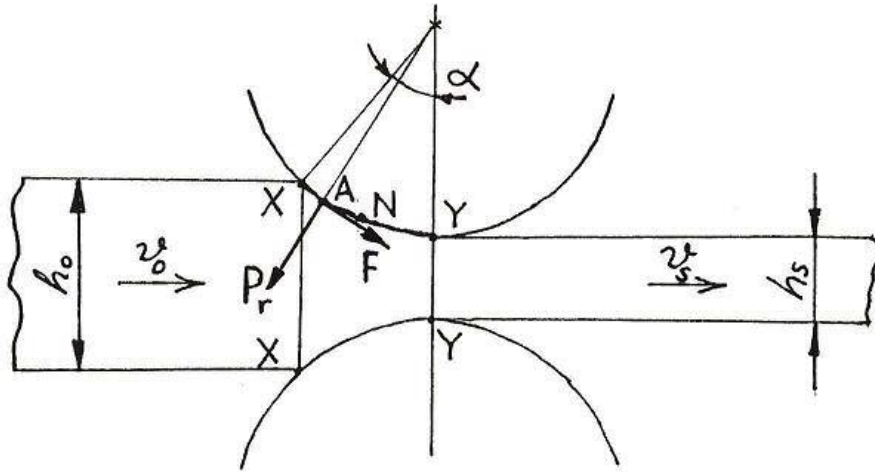


Şekil 5.10: Hadde tezgahlarının düzenlenişi

Değişik bir hadde tezgahı da planet haddesidir. Burada iki büyük destek merdanesi ve bunların çevresinde uydu gibi dönen çok sayıda küçük iş merdaneleri vardır. Bu düzenin üstünlüğü bir geçişte büyük merdane tarafından desteklenen birden fazla küçük iş merdanesinin kullanılması sonucu bir seferde daha büyük kesit daralmalarını sağlayabilmesidir. Normal olarak % 30...40 düzeyinde olan kesit daralması, planet haddede % 90'a ulaşabilir. Buna karşın haddelenmiş yüzeyin kalitesi çok iyi olmayıp, ayrıca bu tür karmaşık bir mekanizmanın pek temiz olmayan haddehanelerde bakımı ve onarımı sorunlar yaratabilir.

#### Hadde tezgahlarının düzenlenmesi (Şekil 5.10)

Tersinir ikili düzendeki merdanelere sahip bir blum haddesinde merdane aralığı her seferinde farklı ayarlanarak ve dönüş yönü değiştirilerek çalışılır. Buna karşın yüksek üretim hızları için hadde tezgahları birbirini izleyen işlemleri gerçekleştirmek üzere arka arkaya dizilebilir (tandem). Her bir kademedeki merdane grubunun hızı farklı olduğundan, hızların senkronize edilmeleri gerekir. Profil veya tel hatlarında ise birbirini izleyen pasoların bulunduğu triolarda, alt ve üst gruba birbirini izleyen geçişlerin yerleştirilmesiyle malzeme akışında süreklilik sağlanır.



Şekil 5.10: Haddedeleme geometrik bağıntılar

#### Haddedeleme Kuvvetleri ve Geometrik Bağıntılar

Şekil 5.11'de merdanelerin geometrisi ile şekil değiştirme kuvvetleri arasındaki bağıntılar görülmektedir.  $h_0$  kalınlığında bir yassı ürün XX-giriş düzleminde  $v_0$  hızıyla merdaneler arasına girmekte ve YY düzleminde  $h_s$  kalınlığında çıkmaktadır. Birim zamanda geçen malzeme miktarı sabit olacağından

$$b \cdot h_0 \cdot v_0 = b \cdot h_s \cdot v_s = b \cdot h \cdot v$$

bağıntısı yazılabilir. Dolayısıyla  $v_s$ ,  $v_0$  'dan büyük olmalıdır, yani saçın girişten itibaren hızı sürekli olarak artmalıdır. Öte yandan merdanelerin teğetsel hızı  $v_m$  tüm temas yayı boyunca sabit kaldığından, merdane hızı  $v_m$ 'in temas yayının sadece bir noktasında malzemesi hızı ile aynı olacağı söylenebilir. Bu nokta tarafsız (nötr) nokta veya kayma olmayan nokta olarak adlandırılır (N).

Temas yayı üzerindeki herhangi bir A noktasında malzemeye iki ayrı kuvvet etkir. Bunlar  $P_r$  radyal kuvveti ve  $F$  teğetsel sürtünme kuvvetidir. Giriş düzlemi ile tarafsız nokta arasında malzeme hızı merdanelerden yavaştır, yani sürtünme kuvveti malzemeyi merdaneler arasına çeker. Çıkış tarafında ise saç hızlı olduğundan sürtünme kuvvetinin yönü terstir.

Buradaki  $P_r$  bileşeni haddelene kuvveti olarak adlandırılır (merdanelerin metale basma kuvveti veya malzemenin merdaneleri ayırma kuvveti). Özgül haddelene basıncı  $p$ , haddelene kuvvetinin temas alanına bölünmesi ile elde edilir.

$$\text{Temas alanı} = L_p \cdot b$$

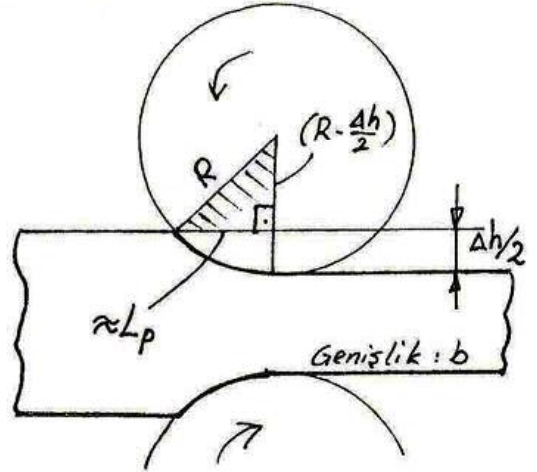
$$L_p = [R^2 - (R - \frac{\Delta h}{2})^2]^{1/2}$$

$$L_p = [R^2 - R^2 + 2 \frac{\Delta h}{2} R + \frac{\Delta h^2}{4}]^{1/2}$$

$$L_p = \sqrt{R \cdot \Delta h}$$

$$p = \frac{P_r}{b \cdot L_p}$$

$$p = \frac{P_r}{b \sqrt{R \cdot \Delta h}}$$



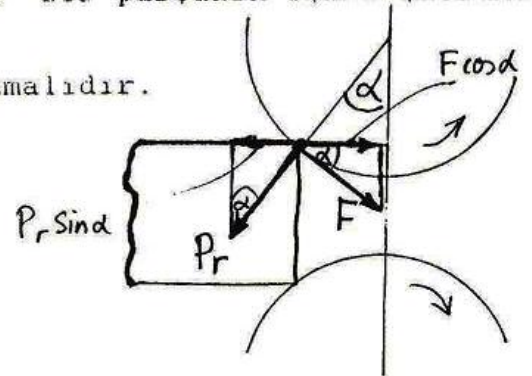
$\alpha$  açısı (giriş ve çıkış düzlemleri arasındaki açı) temas açısı veya ısırma açısı olarak da adlandırılır.  $P_r$  'nin yatay bileşeni  $P_r \cdot \sin \alpha$ , sürtünme kuvvetinin yatay bileşeni ise  $F \cdot \cos \alpha$  'dır. Merdaneler arasına verilen bir parçanın içeri çekilmesi için

$F \cdot \cos \alpha \geq P_r \cdot \sin \alpha$  koşulu sağlanmalıdır.

Sınır durumunda

$$F \cdot \cos \alpha = P_r \cdot \sin \alpha$$

$$\frac{F}{P_r} = \frac{\sin \alpha}{\cos \alpha} = \tan \alpha$$



olması gerekecektir. Dolayısıyla parçanın sürtünme kuvvetleri ile içeri çekilebilmesi için

$$\mu \geq \tan \alpha$$
 koşulu sağlanmalıdır.

Bu bağıntı KAPMA KOŞULU olarak da adlandırılır. Özetle, sürtünme katsayısının ( $\mu$ ),  $\alpha$  açısının tanjantından büyük olması halinde, parçanın merdaneler tarafından sürtünme kuvvetleri ile içeri çekilerek haddelenmesi mümkün olur. Aksi halde, (malzeme kalınlığının sabit kalması durumunda) kapma koşulunun sağlanması için ya  $\Delta h$  azaltılmalı, ya da R artırılmalıdır.

#### Haddeleme Kuvvetinin Basit Hesabı

Haddeleme kuvvetini yaklaşık olarak hesaplayabilmek için, plastik şekil değişiminin tüm temas alanı boyunca sabit  $\sigma$  gerilmesinin etkimesiyle gerçekleştiğini kabul edelim. Bu durumda haddeleme kuvveti

$$P = \sigma_0 \cdot b \cdot L_p$$

$$P = \sigma_0 \cdot b \cdot \sqrt{R \cdot \Delta h}$$

olarak yazılabilir. Görüldüğü gibi bu kuvvet malzemenin akma gerilmesinin, şekil verme miktarının ve merdane çapının artmasıyla artmaktadır. Daha önce de belirtildiği gibi, merdane çapı küçültülerek temas yayı  $L_p$  ve dolayısıyla haddeleme kuvveti  $P_r$  küçültülebilir. Merdane çapının küçültülmesi ile doğacak eğilme sorunu da karşı destek merdaneleri kullanılarak çözülebilir.

#### Haddeleme Sorunları ve Kusurları

Haddelemedeki birçok sorun plastik şekil değiştiren iş parçası ile elastik şekil değiştiren merdaneler ve hadde tezgahı gövdesini arasındaki uyumsuzluklar nedeniyle oluşur. Yüksek haddeleme kuvvetleri etkisi altında hadde gövdesi elastik şekil değiştirir, merdaneler yassılır ve eğilir. Ayrıca yatak boşlukları sonucu oluşan hadde sıçraması nedeniyle, yük altındaki merdane aralığı, başlangıçta ayarlanan değerden daha büyük olur. İşte bu nedenlerle kalınlığın hassas olarak ayarlanabilmesi için hadde tezgahının yük altındaki elastik davranışının bilinmesi gerekir, bir hadde tezgahı için bu davranış kalibrasyon eğrisi ile verilir.

Hadde ürünlerinde bu ürünlerin kullanıcıları açısından bilinmesi gereken en önemli kusurlar biçim bozuklukları ve iç gerilmelerdir. Haddelenmiş yassı ürünlerde görülen bu kusurlar ve nedenleri aşağıdaki gibi sıralanabilir.



Şekil 5.12: Bir hadde tezgahının kalibrasyon eğrisi

#### I-Boyuna Kalınlık Farklılıkları

##### A. Haddelene koşullarına bağlı nedenler

- a) Hız değişimi
- b) Parça sıcaklığı
- c) Merdane sıcaklığı

##### B. Giren malzemeye bağlı nedenler

- a) Giriş kalınlığı
- b) Malzeme özelliklerindeki değişimler

##### C. Merdanelere bağlı nedenler

- a) Ovallık
- b) Eksantrik mıyılı
- c) Yataklama kusurları

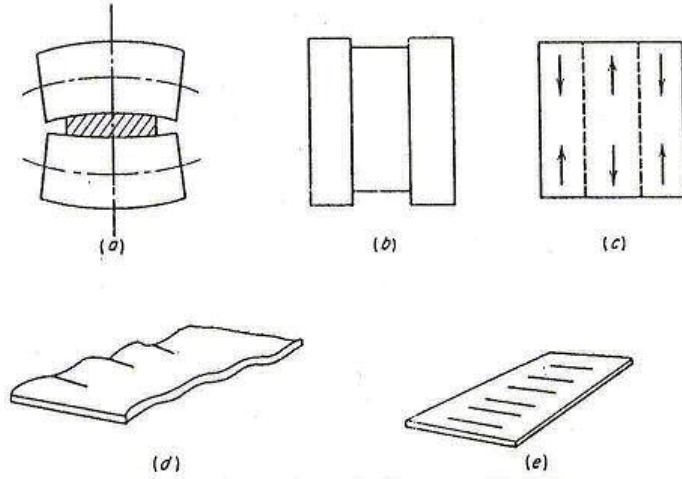
#### II-Enine Kalınlık Değişimleri

##### A. Merdanelerin Paralelliğine Bağlı Nedenler

Merdaneler birbirine tam paralel olmalıdır, aksi halde kalınlığın az olduğu köşede kesit daralması daha fazla ve dolayısıyla boy uzaması daha fazla olur; dolayısıyla saç yay biçiminde eğilir.

##### B. Merdanelerin Eğilmesine Bağlı Nedenler

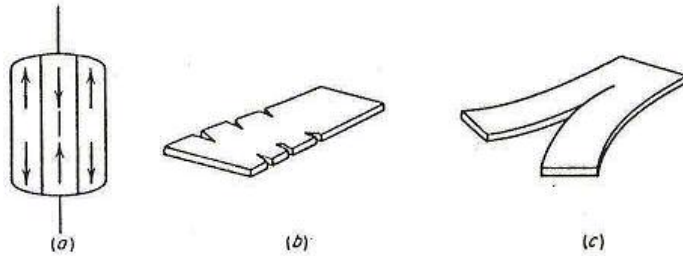
Merdanelerin haddelene sırasında Şekil 5.13'te görüldüğü gibi eğilmeleri halinde, kenarlar ortadan daha fazla incelemek ve uzayacaktır. Parça kenarlarının orta kısımdan bağımsız olarak hareket edebildiklerini düşünelim. Bu durumda elde edilen üç



Şekil 5.13: Merdanelerin eğilmesinin yarattığı sorunlar

parçalı sac Şekil 5.13b'de verilen biçime sahip olur. Ancak gerçekte malzeme bir bütün olarak biçim değiştirmek zorunda olduğundan iç gerilmeler oluşacak ve kenarlarda basma, ortada ise çekme gerilmeleri ortaya çıkacaktır. Bu iç gerilmelerin çok yüksek olması halinde sac kenarları burkularak dalgalı hale gelebilir veya ortada çukurluklar ve çatlaklar oluşabilir, Şekil 13 d ve e. Bu sorunun çözümü için merdanelerin eğilmesinin önlenmesi gerekir. Bazı modern hadde tezgahlarında, merdanelere eğilmenin ters doğrultusunda kuvvet uygulayan hidrolik tertibatlar mevcuttur. Bir diğer çözüm de orta kısmında çapı daha büyük olan bombeli merdaneler kullanılmasıdır. Bu durumda, merdanelerin haddeleme kuvvetleri altında eğilmesi ile hadde aralığı paralel hale gelir. Ancak bu tür bir çözüm kuvvetin sabit kaldığı haddeleme koşulları için uygundur.

Bir diğer sorun da haddelenen yassı mamullerde kenardaki malzemenin enlemesine yayılması ve bu kısımlarda boyuna uzamanın ortaya göre daha az olmasıdır. Bu durumda bir önceki örnekte anlatılanın tam tersi ortaya çıkar ve Şekil 5.14'ye görüldüğü gibi kenarlarda çekme, ortada ise basma iç gerilmeleri oluşur. Bu iç gerilmeler kenar çatlaklarına ve hatta ortadan yarılmalara dahi neden olabilir.



Şekil 5.14: Kenarlarda malzemenin yayılmasının yarattığı sorunlar



### Problem

- a) 250 mm. kalınlığındaki bir çelik levhaya soğuk ( $\mu=0,1$ ) ve sıcak haddeleme ( $\mu=0,6$ ) ile verilebilecek en büyük kesit daralmasını yüzde olarak hesaplayınız. (Merdane çapı 500 mm)
- b) Merdane çapının 500 mm. 'den 1500 mm. 'ye çıkarılması ile bu değerler nasıl değişir ?
- c)  $\Delta h=5,46$  mm. ,  $b=100$  mm. ,  $\sigma_0=200$  N/mm<sup>2</sup> için ve her iki merdane çapında sıcak haddelemede ortaya çıkacak merdane ayırma (haddeleme) kuvvetlerini hesaplayınız.

a)  $\mu = \tan \alpha$

$\mu = 0,1 \rightarrow \alpha_{\max} = 6^\circ$

$\mu = 0,6 \rightarrow \alpha_{\max} = 31^\circ$

Yandaki şekilden

$$\sin \alpha = L_p / R = \sqrt{R \cdot \Delta h} / R$$

$$R^2 \sin^2 \alpha = R \cdot \Delta h$$

$$\Delta h = R \cdot \sin^2 \alpha$$

$$\Delta h_{\text{soğ}} = 250 \cdot \sin^2 6^\circ = 2,73 \text{ mm}$$

$$\Delta h_{\text{sıc}} = 250 \cdot \sin^2 31^\circ = 66,32 \text{ mm}$$

$$\% r = \frac{\Delta A}{A_0} = \frac{\Delta h \cdot b}{h_0 \cdot b} = \frac{\Delta h}{h_0} \times 100 \text{ (yüzde kesit daralması)}$$

$$\% r_{\text{soğ}} = \frac{2,73}{250} \times 100 = \% 1,09$$

$$\% r_{\text{sıc}} = \frac{66,32}{250} \times 100 = \% 26,53$$

b)  $D=1500$  mm ,  $R=750$  mm olursa

$\Delta h = R \cdot \sin^2 \alpha$  olduğundan bu değerler 3 katına çıkar.

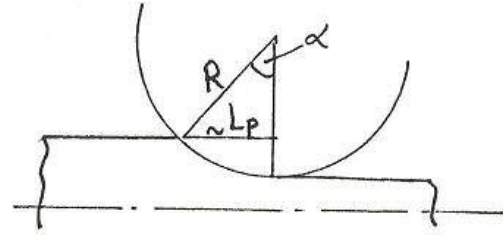
$$\% r_{\text{soğ}} = \% 3,27$$

$$\% r_{\text{sıc}} = \% 79,59$$

c)  $P_r = \sigma_0 \cdot b \cdot \sqrt{R \cdot \Delta h}$

500 mm çap için  $P_r = 200 \cdot 100 \cdot \sqrt{250 \cdot 5,46} \approx 7,39 \cdot 10^5 \text{ N} \approx 73,9 \text{ ton}$

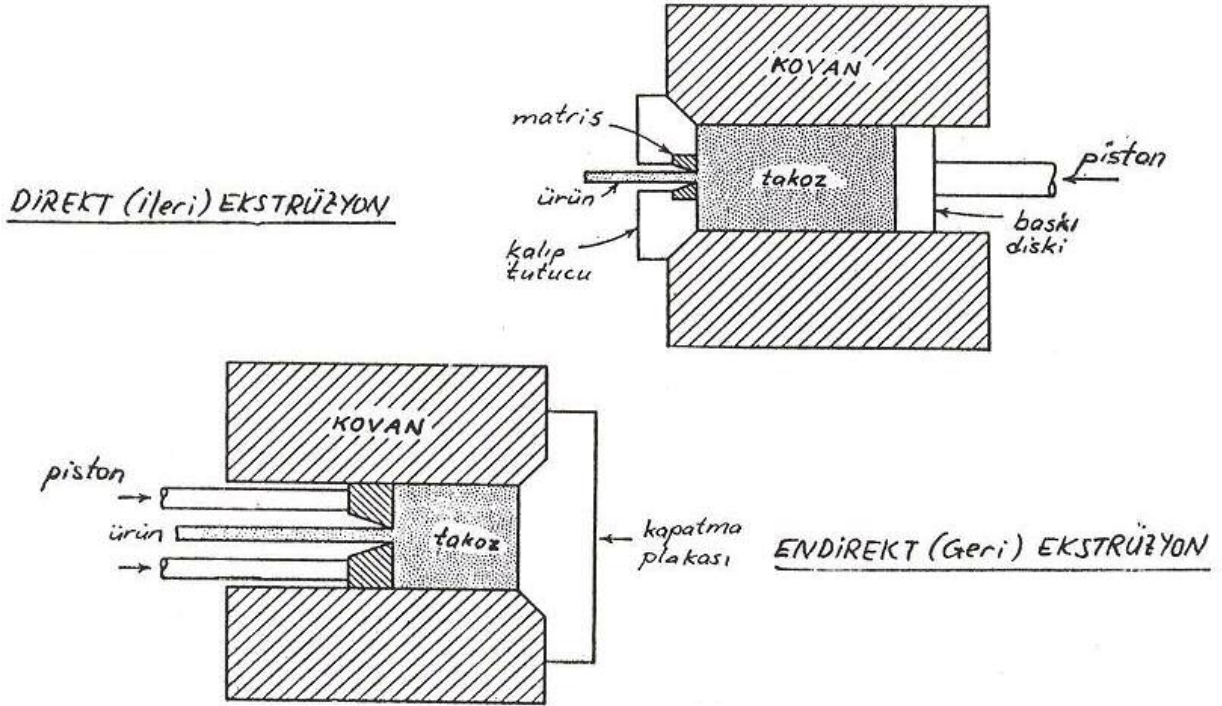
1500 mm çap için  $P_r = 200 \cdot 100 \cdot \sqrt{750 \cdot 5,46} = 1,28 \cdot 10^6 \text{ N} \approx 128 \text{ ton}$



## 6. EKSTRÜZYON

Ekstrüzyonda bir kovan (konteyner) içine yerleştirilen metal bloğuna (takoz), basma kuvvetleri uygulanır ve malzeme kovanın karşı ucundaki bir matristen geçirilerek biçimlendirilir. Bu yöntemde malzemenin başlangıç kesiti olan  $A_0$ , ürünün  $A_1$  kesitine düşürülerek tek bir işlemle çok büyük deformasyonlar gerçekleştirilebilir. Ekstrüzyon yöntemiyle özellikle demir dışı metal ve alaşımlarından çubuk, boru, profil gibi yarı mamuller üretilir. Kullanılan metal blok döküm veya hadde ürünü olabilir. Yöntemin en önemli avantajı, çok karmaşık kesitlerin, hatta içi boş profillerin üretimine imkan tanınmasıdır. Şekil verme işleminin basma gerilmeleri altında gerçekleşmesi nedeniyle malzemelerin şekil verme sınırı diğer yöntemlere göre daha yüksek ve hasar oluşma ihtimali daha azdır. Bu nedenle ekstrüzyon yöntemi plastik deformasyonu zor metallerin biçimlendirilmesi için de uygundur. Soğuk olarak da yapılabilen ekstrüzyonda çok büyük şekil değişimleri ve kuvvetler söz konusu olduğundan genellikle yüksek sıcaklıklarda çalışılır.

Yöntem Direkt (ileri) ve Endirekt (geri) olmak üzere ikiye ayrılır, Şekil 6.1. Ayrıca boru ekstrüzyonu, hidrostatik ekstrüzyon, enine ve darbeli ekstrüzyon gibi uygulamalar da vardır. Direkt (ileri) ekstrüzyonda bir basma diskisi yardımıyla sıkıştırılan takoz, kovan içinde cidarlara sürtünerek ilerlemekte

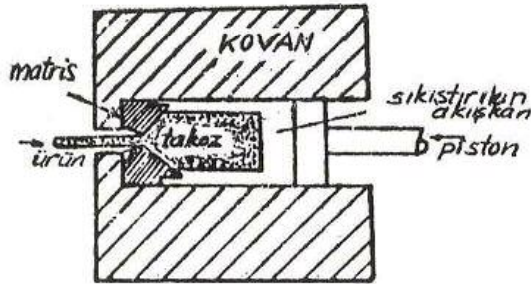


Şekil 6.1. Direkt ve endirekt ekstrüzyon

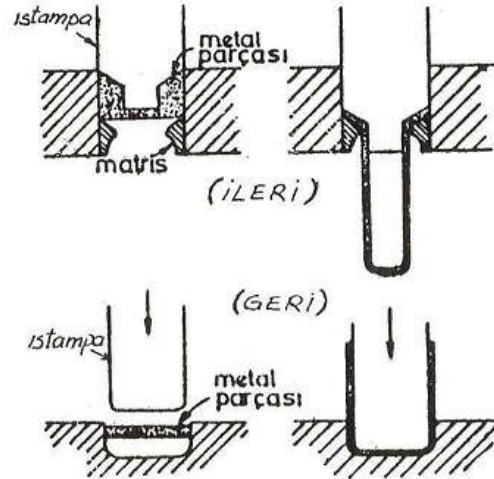
ve matristen çıkarken biçimlenmektedir. Endirekt (geri) ekstrüzyonda ise takoz kovanla birlikte, içinde matrisi bulunduran piston üzerine itilmektedir. Bu yöntemin ileri ekstrüzyondan farkı, takozla kovan arasında bağıl bir hareketin ve dolayısıyla sürtünmenin olmamasıdır. Ancak içinde matrisi de içeren kesiti incelmış piston ile çok yüksek ekstrüzyon kuvvetlerinin uygulanması oldukça zordur.

Hidrostatik ekstrüzyonda ise ileri ekstrüzyonda olduğu gibi çalışılır. Ancak ekstrüzyon basıncı takozu çevreleyen bir akışkan yardımıyla uygulanır ve bu sayede kovan ile takoz arasında sürtünme kuvvetlerini ortadan kaldıran bir sıvı tabakası bulunur, Şekil 6.2.

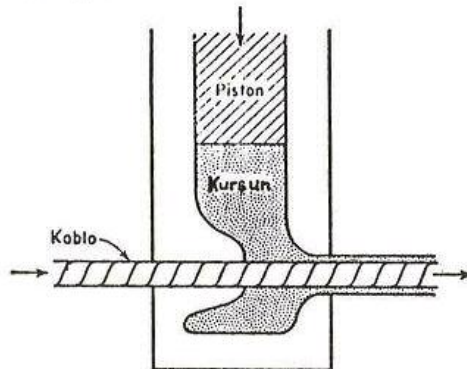
Darbeli ekstrüzyon yöntemi genellikle kurşun, kalay, alüminyum gibi yumuşak sayılabilecek metallere ilaç tüpü, diş macunu tüpleri gibi kısa ve içi boş ürünler üretmek için kullanılır, Şekil 6.3. Bu yöntem yüksek hızlı mekanik preslerde, genellikle oda sıcaklığında ileri veya geri ekstrüzyon olarak uygulanabilir.



Şekil 6.2: Hidrostatik ekstrüzyon



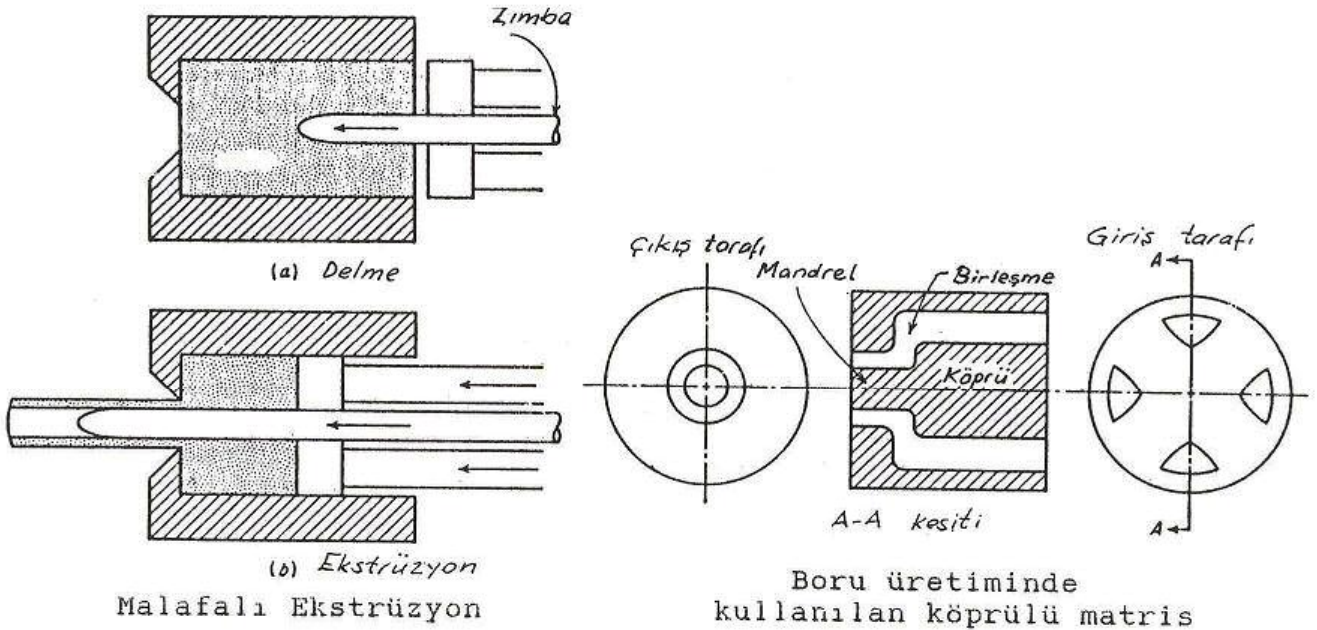
Şekil 6.3: Darbeli ekstrüzyon



Şekil 6.4: Enine ekstrüzyon

Enine ekstrüzyonda ise ürün, piston hareketine dik yönde çıkar. Bu yöntemin ana uygulama alanı kablo gibi ürünlerin ekstrüzyonla kaplanmasıdır, Şekil 6.4.

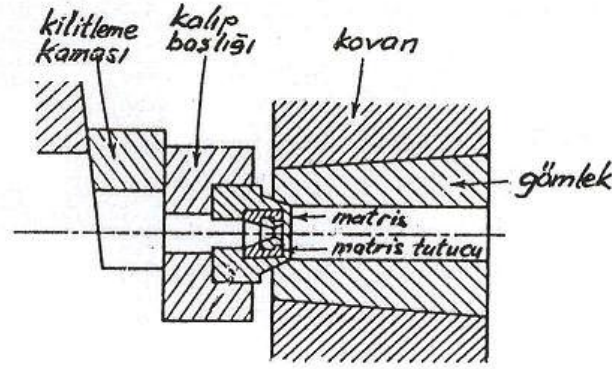
Ekstrüzyon yöntemiyle borular ve içi boş profiller de üretilebilir. Bu amaçla malafalardan veya köprülü matrislerden yararlanılır, Şekil 6.5. Malafalı ekstrüzyonda ortası önceden delinmiş takozlar kullanılabilirdiği gibi, dolu takoz kovan içinde malafa ile delinebilir. Köprülü matrislerde pistonla bağlı bir malafa yoktur ve Şekil 6.5'te görülen matris yardımıyla iç boşluk oluşturulur. Burada farklı kanallardan gelen malzemenin basınç altında tekrar kaynaması gerektiğinden bu yöntem her malzeme için uygun olmayıp yalnız alüminyum gibi malzemelerde kullanılabilir.



Şekil 6.5: Ekstrüzyonla boru üretimi

#### Ekstrüzyon Techizatı

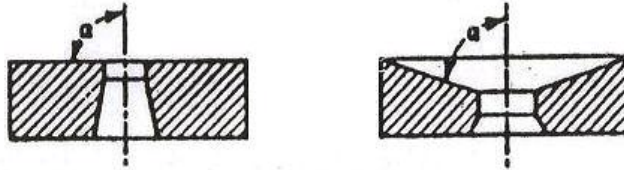
Ekstrüzyonda genellikle yatay ve düşey hidrolik presler kullanılır. Yatay presler genellikle 1000-5000 ton, düşey presler ise 300-2000 ton arasındadır. Düşey presler daha az yer kaplarlar, ancak tavanı yüksek binalarda ve ürünün çıkması için derin çukurlar açılarak kullanılabilirler. Yatay preslerde yüklenen takozun önce alt kısmı kovan ile temasta olduğu için, burası üst kısma oranla daha hızlı soğur ve deformasyon homojenliği bozulur. Düşey preslerde ise kalıp içindeki soğuma homojen olduğundan deformasyon da homojen olur. Yatay preslerde bir diğer sorun takımların ağırlığı nedeniyle eksenden kaçma tehlikesidir. Bu nedenle pratikte ince et kalınlıklı hassas borular gibi parçaların üretiminde düşey preslerden, genel kullanım için çubuk ve boruların üretiminde ise yatay preslerden yararlanılır.



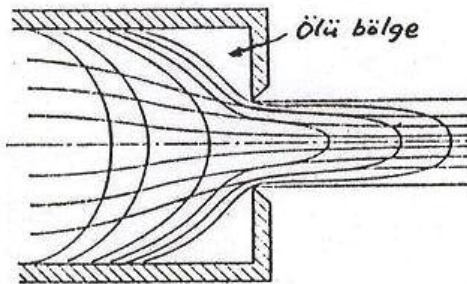
Şekil 6.6: Ekstrüzyon takımları

Ekstrüzyon preslerinde hızın kontrol edilebilmesi çok önemlidir. Yavaş çalışmada soğuma ihtimali, hızlı çalışmada ise iç sürtünme nedeniyle oluşan adyabatik ısınma dikkate alınmalı ve uygun bir ekstrüzyon hızı seçilmelidir. Hatta bazı durumlarda ekstrüzyon hızının strok boyunca programlanarak değiştirilmesi gerekebilir.

Sıcak iş takım çeliklerinden üretilen ekstrüzyon takımları, yüksek sıcaklıklarda büyük gerilmeler altında çalışmak zorunda olduklarından, kısa sürede aşınmaları sözkonusudur. Dolayısıyla ekonomik nedenlerle tümü değiştirilebilir tarzda tasarlanırlar, Şekil 6.6. Matrisler malzeme ve ürün şekline göre, düz veya konik girişli olabilir, Şekil 6.7. Örneğin Al ekstrüzyonunda düz girişli matrisler, Fe ve alaşımlarının ekstrüzyonunda ise konik girişli matrislerden yararlanılır. Metalin matris içine kesilerek girdiği düz yüzeyli matrislerde matrisin her iki yanında kovan içinde ölü bir bölgeler oluşur. Düz girişli matrisler aşındıklarında kolayca taşlanarak düzeltilebilirler. Konik girişli kalıplarda ise, malzemenin matris boşluğuna girişinin kolaylaştırılması için uygun bir yağlama yapılması çok önemlidir.

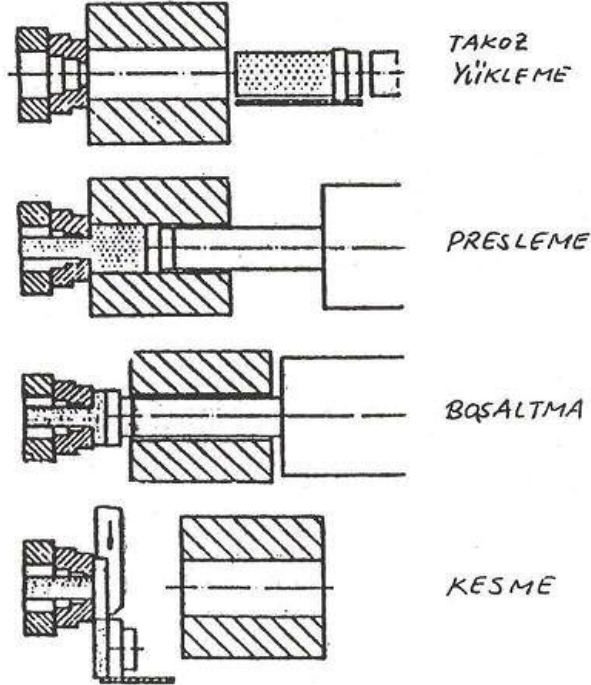


Şekil 6.7: Düz ve konik girişli matrisler

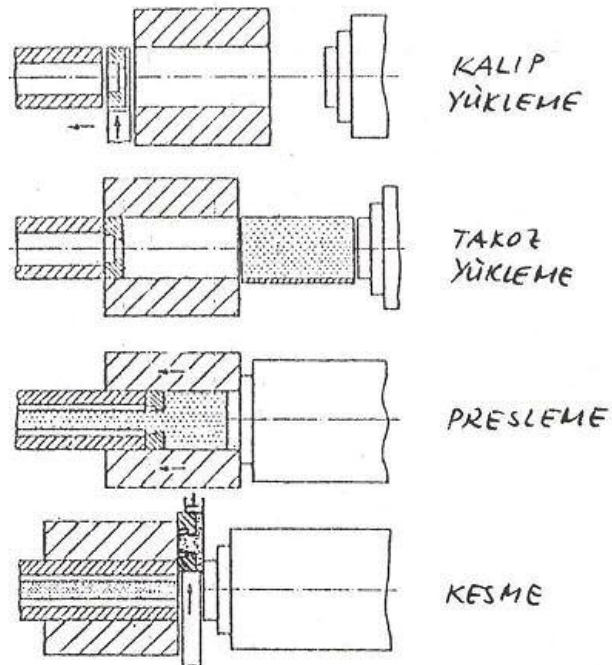


Şekil 6.8:  
Düz girişli matrisli matris-  
lerde ölü bölge oluşumu

ileri ve geri ekstrüzyon işlemlerinin uygulanışındaki kademeler Şekil 6.9 ve Şekil 6.10 'da görülmektedir.



Şekil 6.9: Direkt ekstrüzyonun kademeleri



Şekil 6.10: Endirekt ekstrüzyonun kademeleri

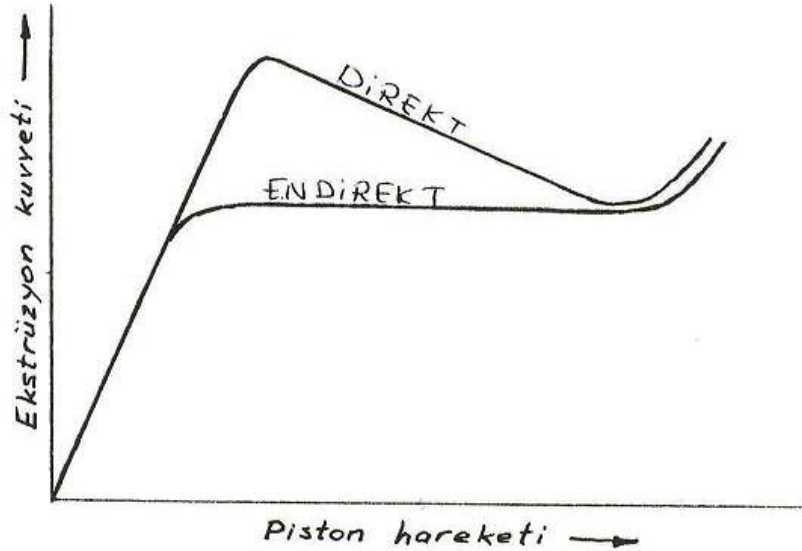
Ekstrüzyonla üretim yapılan tesislerde bulunan önemli bir diğer teçhizat da tav fırınlarıdır. Takozların ekstrüzyon sıcaklığına çıkarıldığı bu fırınların gazla, elektrikle ısıtılan değişik türleri vardır.

#### Ekstrüzyon İşleminin Parametreleri

Ekstrüzyon işlemini ve kuvvetini belirleyen başlıca parametreler şu şekilde sıralanabilir:

##### a) Ekstrüzyonun türü

Direkt ve endirekt ekstrüzyon türleri için piston hareketine bağlı olarak ekstrüzyon kuvvetinin değişimi Şekil 6.10'de görülmektedir. Direkt ekstrüzyonda takozun kovanın ve matrisin içine dolmasını temsil eden ilk kuvvet artışından sonra toplam kuvvet giderek düşer. Bunun nedeni takozun kısılmasına bağlı olarak kovan cidarlarına sürtünme nedeniyle ortaya çıkan kuvvetlerinin azalmasıdır. İleri ve geri ekstrüzyon eğrileri arasındaki farkın nedeni geri ekstrüzyonda takoz ile kovan arasında sürtünme olmamasıdır. Presleme işleminin sonuna doğru takoz kısalır ve ölü bölgelerin deformasyona zorlanması nedeniyle, presleme güçleşerek kuvvet tekrar artmaya başlar. Bu nedenle ekstrüzyonda takoz sonuna kadar preslenmez.



Şekil 6.11: Direkt ve endirekt ekstrüzyonda kuvvetler

##### b) Ekstrüzyon oranı

Ekstrüzyonla gerçekleştirilen plastik şekil verme miktarları, başlangıç kesit alanının çıkış kesit alanına oranı olarak tanımlanan Ekstrüzyon Oranı R ile verilir.

$$R = A_0/A_f$$

Ekstrüzyon yöntemine özgü yeni bir şekil verme ölçütü olan R'nin tanımlanması zorunluğ u, daha önceden tanıdığımız kesit daralması (r) gibi diğer değerlerin bu yöntemde sözkonusu olan büyük şekil verme miktarlarını yeterince belirtememesidir. Ekstrüzyon oranı (R) ile kesit daralması (r) arasındaki ilişki

$$r = \frac{\Delta A}{A_0} = \frac{A_0 - A_f}{A_0} = 1 - \frac{A_f}{A_0} = 1 - \frac{1}{R}$$

veya 
$$R = \frac{1}{1-r}$$

şeklindedir. Örnek olarak ekstrüzyon oranları  $R_1 = 20$  ve  $R_2 = 50$  olan iki farklı ekstrüzyon işlemini ele alalım. Bu değerlere karşılık gelen kesit daralmaları  $r_1 = 0,95$  ve  $r_2 = 0,98$  olup görüldüğü gibi sanki aralarında önemli bir farkın olmadığı izlenimini vermektedir. Bu nedenle ekstrüzyonda R değerinin kullanılması daha uygun olmaktadır.

Ekstrüzyon oranı kurşun ve alüminyum gibi metallerde 400'e kadar çıkabilirken, güç şekil verilen metallerde 20'nin altında kalmaktadır.

#### c) Ekstrüzyon sıcaklığı ve hızı

Diğer yöntemlerde olduğu gibi, sıcaklık artması veya hızın azalması ile metaller daha kolay şekil değiştirdiğinden ekstrüzyon kuvveti azalır. Ancak çok düşük hızlarda takozun soğuyacağı, çok yüksek hızlarda ise iç sürtünmeler nedeniyle oluşan adyabatik ısının uzaklaşamaması sonucu takozun aşırı ısınacağı dikkate alınmalıdır.

Çok büyük kuvvetlerin sözkonusu olduğu ekstrüzyonda mümkün olduğu kadar yüksek sıcaklıklarda çalışılmaya çalışılır. Ancak sürtünmeler nedeniyle oluşacak ısının da etkisiyle sıcak yırtılma ve yerel erime tehlikesi ortaya çıkabileceğ i dikkate alınmalıdır. Ayrıca takımların dayanımlarını korumaları ve takozun oksitlenmemesi istendiğinden sıcaklık seçiminde bir üst sınır mevcuttur.

#### d) Sürtünme koşulları

Endirekt (geri) ekstrüzyonun sürtünme bakımından avantajlı olduğu daha önce belirtilmişti. Bunun yanı sıra uygun yağlama uygulanarak sürtünme kuvvetleri azaltılabilir ve daha düzgün bir malzeme akışı sağlanabilir. Alüminyum genellikle yağlamasız veya sadece matris çok az yağlanarak biçimlendirilir. Alüminyum ve bakır alaşımlarında grafit, çeliklerde ise cam, yağlayıcı olarak kullanılabilir. Soğuk ekstrüzyonda ise yağlayıcı olarak sabun, organik ve madeni yağlar ile grafit tozu içeren karışımlar kullanılabilir.



### e) Ekstrüzyon Kuvveti

Ekstrüzyon işlemi için gereken kuvveti plastik şekil verme enerjisi yaklaşımıyla hesaplayalım.  $L_0$  boyunda  $A_0$  kesitindeki bir takoz  $L_f$  boyu ve  $A_f$  kesitine getirilirse, gerçekleşen birim şekil değişimi ( $\sigma_0$ : malzemenin ekstrüzyon sıcaklığındaki ortalama akma gerilmesidir)

$$\epsilon_f = \ln \frac{L_f}{L_0} = \ln \frac{A_0}{A_f} = \ln R$$

birim hacim başına plastik şekil verme işi ise

$$u_p = \int_0^{\epsilon_p} \sigma_0 d\epsilon = \sigma_0 \cdot \ln R$$

olarak bulunur. Toplam plastik şekil verme işini bulmak için hacim ile çarparsak

$$W_p = V \cdot u_p = V \cdot \sigma_0 \cdot \ln R = A_0 \cdot L_0 \cdot \sigma_0 \cdot \ln R$$

olur. Öte yandan pistonun itilmesi sırasında yapılan mekanik iş

$$W_{mek} = p \cdot A_0 \cdot L_0$$

olup (  $p$ : ekstrüzyon basıncı ) bu iki değer birbirine eşitlenerek

$$p = \frac{A_0 \cdot L_0 \cdot \sigma_0 \cdot \ln R}{A_0 \cdot L_0} = \sigma_0 \ln R$$

bulunur. Sürtünme ve iç deformasyon gibi kayıpları dikkate almak için işlemin verimi  $\eta$  olarak tanımlanırsa gerçek ekstrüzyon basıncı,

$$p_{ger} = \frac{p}{\eta} = \frac{\sigma_0}{\eta} \ln R$$

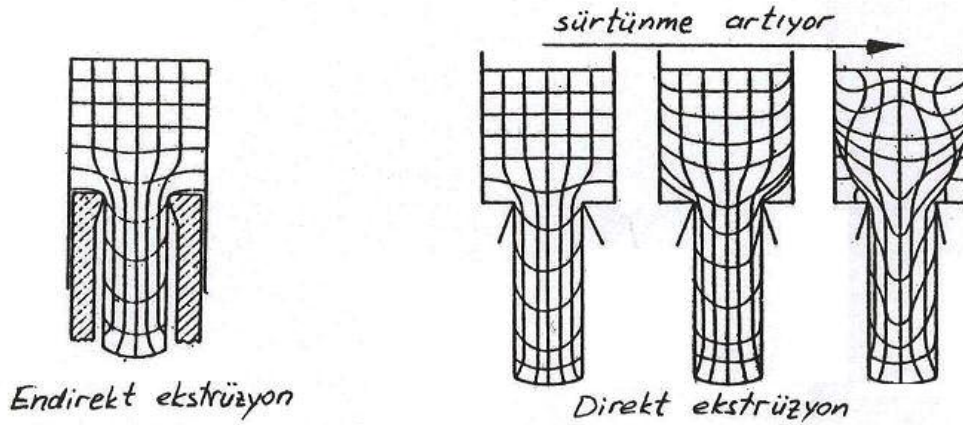
gerçek ekstrüzyon kuvveti ise

$$F_{ger} = A_0 \cdot p_{ger}$$

olarak bulunur. Ekstrüzyon için  $\eta$  - değeri, 0,3 ile 0,6 arasında değişmektedir.

### Ekstrüzyonda Malzeme Akışı ve Hatalar

Ekstrüzyon türüne, matris biçimine, sürtünme koşullarına ve ekstrüzyon oranına bağlı olarak kovan içindeki malzeme akışı değişir. Metal akışını izlemek için kullanılan uygun bir deney tekniği, metal blok kesitine çizilmiş kareler şeklindeki bir ağın plastik şekil verme sırasında aldığı biçimlerin incelenmesidir, (vizyoplastisite, Şekil 6.12). Homojen olmayan şekil değişimleri ürünün özelliklerinde de önemli farklılıklar ve dolayısıyla olumsuzluklar ortaya çıkaracaktır.



Şekil 6.12: Ekstrüzyonda malzeme akışı

Ekstrüzyon hatalarının büyük çoğunluğu malzeme akışının homojen ve uygun olmamasından kaynaklanır. Direkt ekstrüzyonda orta kısımdaki malzeme, kovan cidarlarına sürtünen ve aynı zamanda soğuyan malzemeden daha hızlı ilerler. İşlemin sonuna doğru orta kısımdaki malzemenin daha hızlı boşalması sonucu, kovan cidarlarından gelen oksitli malzeme ürünün eksenı boyunca matrise girmeye başlar. Ürünün ekseninde oksitli lifler olarak görülen bu hatanın ortaya çıkmaması için, takoz sonuna kadar preslenmez. Bir diğer önlem de baskı diski çapının kovan çapından daha küçük seçilmesi ve cidarlardaki oksitlenmiş malzemenin kovan içinde bırakılmasıdır. Daha sonra çapı kovan çapına çok yakın bir kovan sıyırıcı kalıp kullanarak sıvanan malzeme kovan yüzeyinden temizlenir.

Ekstrüzyon ürünlerinde görülen diğer bir hata, presleme hızının yüksek seçilmesi ve sıcaklık artışları nedeniyle sıcak yırtılmaların oluşmasıdır.

$R < 4$  gibi düşük ekstrüzyon oranlarında ise homojen olmayan deformasyon nedeniyle büyük iç gerilmeler ortaya çıkar. Bu tür deformasyonlar sonrasındaki yeniden kristalleşme sırasında içyapıları, ürün kesiti içinde büyük farklılıklar gösteren bölgelere rastlanır.

Ekstrüzyonda ürünün çıktığı matris çevresinde sürtünme koşulları farklı ise çıkan üründe eğrilikler görülecektir. Bu tür eğriliklerin giderilmesi için ekstrüzyon sonrası gerdirerek doğrultma gibi ek bir işlem gerekebilir.

### Problem

250 mm çapında bir alüminyum takozdan direkt ekstrüzyonla 50 mm çapında bir çubuk elde edilmek isteniyor. İşlemin verimi  $\eta = 0,5$ , pistonun ilerleme hızı  $v = 5$  mm/sn olduğuna ve malzemenin işlem sıcaklığındaki akma gerilmesi  $\sigma_0 = 30$  N/mm<sup>2</sup> olduğuna göre bu işlemi gerçekleştirebilecek presin özelliklerini kuvvet ve güç olarak belirleyiniz.

$$R = \frac{A_0}{A_f} = \frac{D_0^2}{D_f^2} = \frac{250^2}{50^2} = 25$$

$$p_{gr} = \frac{\sigma_0}{\eta} \ln R = \frac{30}{0,5} \ln 25 = 193,2 \text{ N/mm}^2$$

$$F_{gr} = A_0 \cdot p_{gr} = \frac{\pi D_0^2}{4} \cdot p_{gr} = 193,2 \cdot \frac{\pi \cdot 250^2}{4} = 9,47 \cdot 10^6 \text{ N} \approx 950 \text{ ton}$$

$$\text{Güç} = F \cdot v = 9,47 \cdot 10^6 \cdot 5 \cdot 10^{-3} \text{ Nm/sn} = 47,35 \text{ kW} \approx 63,5 \text{ B.G.}$$

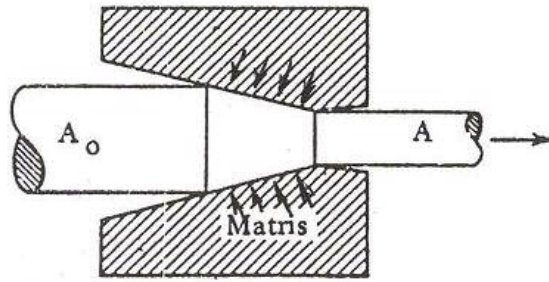
## 7. ÇEKME

Çekme yönteminde malzemeler matris olarak adlandırılan bir kalıp içinden geçirilerek kesitleri daraltılır ve biçimlendirilir. Bu plastik şekil değişimini gerçekleştirmek için parçaya çıkış tarafından bir çekme kuvveti uygulanır, Şekil 7.1. Bu yöntemde şekil değişimini sağlayan, metalin kalıpla temas yüzeyinde ortaya çıkan dolaylı basma gerilmeleridir. Çekme yöntemiyle genellikle dairesel kesitli veya eksenel simetrisi olan ürünler elde edilirler. Yöntem yüksek bir yüzey kalitesi ve boyut hassasiyeti elde etmek için uygundur. Başlangıç malzemesi olarak hadde, ekstrüzyon veya diğer yöntemlerle şekil verilmiş ara ürünler kullanılır. Genellikle sıcak şekil verme ile elde edilmiş olan bu ara ürünlere çekme öncesinde gerekli yüzey temizleme ve hazırlama işlemleri uygulanır.

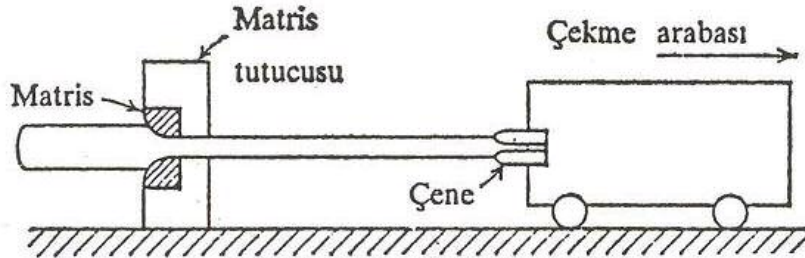
Elde edilen ürünün kesit biçimi ve büyüklüğüne bağlı olarak bu yöntem çubuk, tel ve boru çekme olarak sınıflandırılabilir. Çekme sıcak ve soğuk olarak uygulanabilir, ancak genellikle soğuk çekme tercih edilmektedir. Fakat soğuk çekmede dahi sırasında parça içinde deformasyon ve sürtünmeden kaynaklanan büyük miktarlarda ısı oluşumu söz konusudur.

### Çubuk ve tel çekme

Her ikisinin de prensibi aynıdır. Tel çekmede ürün bobin veya kangal olarak sarılabilir, buna karşın çubuk çekmede ürünün düz çekilmesi gerekir. Bu nedenle her iki işlemde kullanılan teçhizatlar farklıdır.



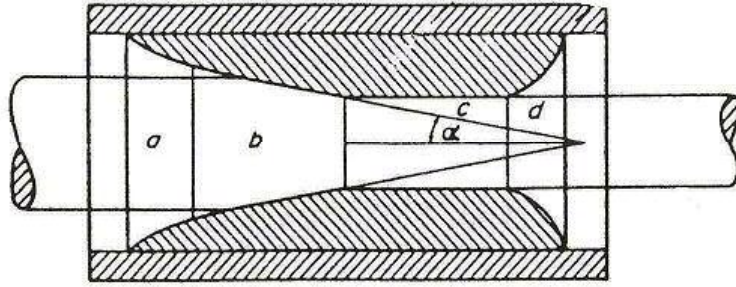
Şekil 7.1: Çekmenin prensip şeması



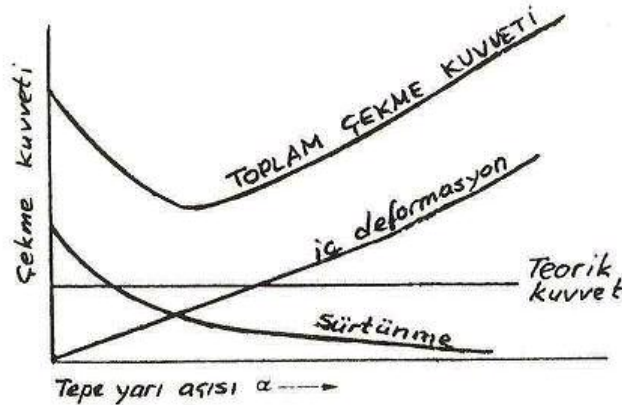
Şekil 7.2: Çubuk çekme

## Çubuk çekme

Çubuğa yüzeyi temizleme işlemi yapıldıktan sonra, ucu inceltılarak (örneğin radyal dövme ile) matristen geçirilir ve çekme arabası üzerindeki bir çeneye tutturulur, Şekil 7.2. Hareket, zincirle tahrik edilerek veya bir hidrolik mekanizma ile verilir. 150 tona kadar kuvvetlerin uygulanabildiği, 30 metre boyunda, 10...100 m/dak. hızlarında çekme tehzizatları vardır. Bir çekme makinasının en önemli elemanı, içinde şekil değişiminin gerçekleştiği matristir. Tipik bir çekme matrisinin kesiti Şekil 7.3'te görülmektedir. Matrislerde giriş, konik deformasyon bölgesi, silindirik kılavuzlama ve çıkış olmak üzere 4 ayrı bölge vardır. Çan biçimindeki giriş kısmı yağlayıcıyı matris içine çekecek şekilde biçimlendirilmiştir. Matrisin en önemli karakteristiği şekil değişiminin gerçekleştiği konik bölgenin tepe yarım açısı ( $\alpha$ )'dır. Her malzeme için farklı seçilen bu değer, çekme kuvvetini belirleyen en önemli parametredir. İç ve dış kayıpların ihmal edildiği teorik çekme kuvveti matris tepe açısından bağımsız olarak çıkmasına rağmen, gerçekte bu açının optimum değerinin bulunması çok önemlidir. Tepe açısı

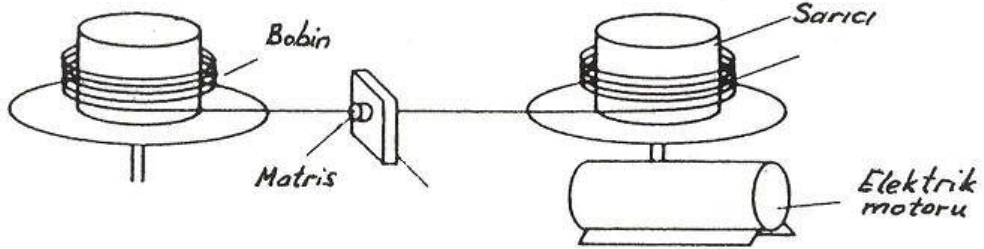


Şekil 7.3: Çekme matrisi (a:giriş, b:deformasyon bölgesi (c:silindirik kılavuzlama, d:çıkış))



Şekil 7.4: Çekme kuvvetinin tepe açısıyla değişimi

küçüldükçe deformasyon daha yumuşak bir geçişle gerçekleşir ve iç deformasyon kayıpları azalır. Ancak açı küçüldüğünde deformasyon bölgesinin uzunluğu artacağından, bir taraftan da sürtünme kuvvetleri artar. Bu nedenle tepe açısı için optimum bir değer seçilmesi çok önemlidir. Şekil 7.4 'de çekme kuvvetinin matris tepe yarım açısıyla değişimi verilmiştir. Görüldüğü gibi çekme kuvvetinin minimum olduğu bir tepe açısı değeri mevcuttur. Pratikte zor şekil değiştiren metallerde küçük açılı, yumuşak metallerde ise büyük açılı matrislerin kullanımı uygun olmaktadır. Örneğin çelik için bu açı  $6^\circ$  olarak seçilirken, bakır için  $12^\circ$ , alüminyum için ise  $24^\circ$  olarak seçilmektedir. Matrisin çıkış öncesindeki kılavuzlama kısmında ürün doğrultulur ve boyutları hassas olarak belirlenir. Ayrıca matrisin zamanla aşınması sözkonusu olduğundan, ürün çıkış çapını belirleyen bu kısmın uzun olması yararlıdır. Çekme matrisleri özel takım çelikleri, wolfram karbür (sinterlenmiş sert metal) veya elmadan yapılıdır.



Şekil 7.5: Tel çekme

#### Tel çekme

Tel çekme işlemine yüzeyi mekanik olarak veya asitle temizlenmiş, bobin veya kangal şeklinde sarılmış malzemelerle başlanır, Şekil 7.5. Çekilecek malzemenin yüzeyine genellikle bir kaplama uygulanır. Matrisler çubuk çekmede kullanılanların benzeridir. Yağlayıcı olarak kuru çekmede gres veya sabun tozu kullanılır; yaş çekmede ise bütün matris sıvı yağlayıcı içindedir.

Tel çekmede birbirini izleyen kademeler genellikle arka arkaya yerleştirilir. Her bir kademede gerçekleştirilecek kesit daralması, ince tellerde kademe başına % 15 -25, kalın tellerde ise % 20-50 arasında seçilir. Modern cihazlarda çekme hızları 1000 m/dak gibi çok yüksek değerlere ulaşır. Soğuk çekmede peklesen malzemeye, içyapının tekrar şekil değiştirme kabiliyeti kazanması için, yeniden kristalleştirme veya normalizasyon gibi ara tavların uygulanması gerekebilir.

#### Çelik tellerin çekme işlemi

Çelik tel üretimine, sıcak hadde ürünü olan filmaşınle

(yaklaşık 10 mm çapında kangal halinde sarılmış sıcak hadde ürünü) başlanır. Malzemenin yüzeyi mekanik veya kimyasal yolla temizlenir, yıkanır. Yüzey kaplaması olarak kuru çekmede kireç, boraks veya fosfat kullanılır. Kireç, hem asitle temizlemeden yüzeyde kalan asitleri nötrale eder, hem de yağlayıcıyı matris içine sürükler. Yaş olarak çekilen çok ince tellerin yüzeyi ise bakır veya kalay kaplanır.

Tel çekme işlemi için gerekli sünekliği sağlamak için, az ve orta karbonlu çeliklere yeniden kristalleştirme veya normalizasyon işlemi uygulanır. Bileşiminde % 0,4 'ten fazla karbon bulunan çeliklere ise PATENTLEME işlemi yapılır. Bu işlemde ostent bölgesine girecek şekilde ( $\approx 920^{\circ}\text{C}$ ) ısıtılan tel, yaklaşık  $500^{\circ}\text{C}$  sıcaklıktaki kurşun banyosuna daldırılarak beynitik bir içyapı elde edilir. Böylece içyapı hem yüksek dayanım, hem de yüksek süneklik özellikleri kazanmış olur.

### Çekmede kuvvetler

Çekme yönteminde bir kademedeki verilebilecek maksimum kesit daralması miktarını, matristen çıkan ve çekme kuvvetinin uygulandığı ürünün çekme dayanımı sınırlar. Malzemenin homojen kabul edildiği ve kayıpların ihmal edildiği ideal deformasyon koşullarında, teorik çekme kuvveti matris tepe açısından bağımsızdır. Kuvveti veren bağıntı, ekstrüzyon bölümünde verilen hesap tarzı (plastik şekil verme işi yaklaşımı) izlenerek

$$F_{\zeta} = \sigma_0 \cdot A_{\zeta} \cdot \ln \frac{A_0}{A_{\zeta}}$$

olarak bulunur. Çıkış tarafında ürüne etkiyen çekme kuvveti nedeniyle oluşan gerilme, telin kopmaması için en fazla çıkan ürünün çekme dayanımına ( $\sigma_{max}$ ) eşit olabileceğinden

$$\sigma_{\zeta} = \frac{F_{\zeta}}{A_{\zeta}} = \sigma_0 \ln \left( \frac{A_0}{A_{\zeta}} \right) = \sigma_{max}$$

yazılabilir. Burada  $A_0$  giriş kesiti,  $A_{\zeta}$  çıkış kesiti,  $\sigma_0$  akma gerilmesi,  $F_{\zeta}$  çekme kuvveti ve  $\sigma_{max}$  çıkış kısmında malzemenin çekme dayanımıdır.

Soğuk çekilmiş telde  $\sigma_{max} \approx \sigma_0$  kabul edilebileceğinden, en büyük kesit daralması için

$$\ln \frac{A_0}{A_{\zeta}} = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_0} \approx 1$$

bulunur.

Buradan her türlü kayıpların ihmal edildiği ideal hal için

$$\frac{A_0}{A_{\zeta}} = e^1 = 2,72 = \left( \frac{D_0}{D_{\zeta}} \right)^2$$

$$\boxed{\frac{D_0}{D_{\zeta}} = 1,65}$$

elde edilir.

Çekmede sürtünmenin etkisi de dikkate alınırsa denklem

$$F_{\zeta} = A_{\zeta} \cdot \sigma_0 \cdot [(1 + \mu \cdot \cot \alpha) \cdot \phi] \cdot \ln \left( \frac{A_0}{A_{\zeta}} \right)$$

şekline dönüşür. Burada

$$\phi = 0,88 + 0,12 \frac{d_{or}}{L}$$

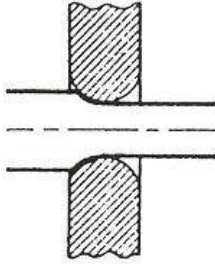
$d_{or}$ : ortalama tel çapı

L : matriste temas boyu

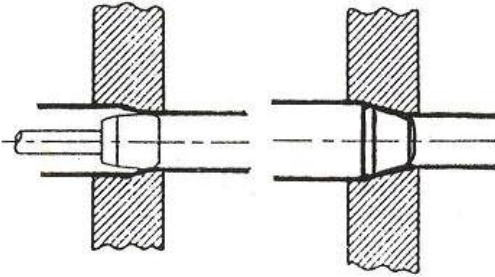
$\sigma_0$ : pekleşme olduğundan akma gerilmesi olarak ortalama bir değer alınır.

### Boru çekme

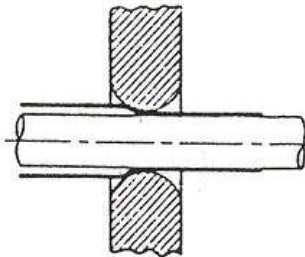
Muhtelif sıcak şekil verme yöntemleri ile üretilen borular, daha sonra soğuk çekilerek boyut hassasiyetinin ve yüzey kalitesinin artırılması mümkün olur. Bunun yanında soğuk çekme sırasında oluşan pekleşme sayesinde dayanım da artırılabilir. Çekme yöntemi küçük çaplı ve ince et kalınlıklı boruların üretimi için uygundur. Şekil 7.6'da görüldüğü gibi boru çekmenin üç farklı türü söz konusudur: çap düşürme (içi boş çekme), malafalı (mandrelli) çekme ve silindirik çubuklar yardımıyla çekme.



içi boş çekme (çap düşürme) ile hassas et kalınlıkları ve kaliteli iç yüzeyler elde etmek mümkün değildir.



iç çapı belirlemek için kullanılan malafalar sabit veya yüzer olabilirler. Sabit malafalar konumlarında bir çubukla tutulurken, yüzer malafalar konumlarında sürtünme kuvvetleri yardımıyla dururlar. Malafalı çekmede sürtünmenin yüksek olması nedeniyle genellikle % 30 'un üzerinde kesit daralması verilemez.



Malafa yerine boru ile birlikte hareket eden uzun silindirik çubuklar kullanılırsa, iç kısımdaki sürtünme ortadan kalkacağından uygulanması gereken çekme kuvveti düşer. Bu sayede daha ince et kalınlıklı boruların çekilmesi mümkün olur.

Şekil 7.6: Boru çekme yöntemleri



## B. SAC SEKİLLENDİRME YÖNTEMLERİ

Haddeleme yöntemiyle kaliteli sacların büyük miktarlarda ve ucuza mal edilerek üretilebilmesi, sac şekillendirmeyi içinde bulunduğumuz yüzyılın en önemli üretim yöntemlerinden birisi haline getirmiştir. Özellikle otomotiv ve beyaz eşya üretiminde çok önemli bir yer tutan bu yöntemler genel olarak şu alt guruplara ayrılmaktadır:

- a. Kesme,
- b. Bükme,
- c. Derin çekme,
- d. Özel Yöntemler.

Sac şekillendirme işlemleri günümüzde mekanik veya hidrolik preslerde gerçekleştirilmektedir. İşlemlerde kullanılan kalıplar genellikle iki parçadan oluşmaktadır. Çıkıntılı görünüme sahip olan erkek kalıp, zımba, veya istampa adını almakta, girintili şekle sahip olanları ise dişi kalıp, matris veya sadece kalıp olarak adlandırılmaktadır.

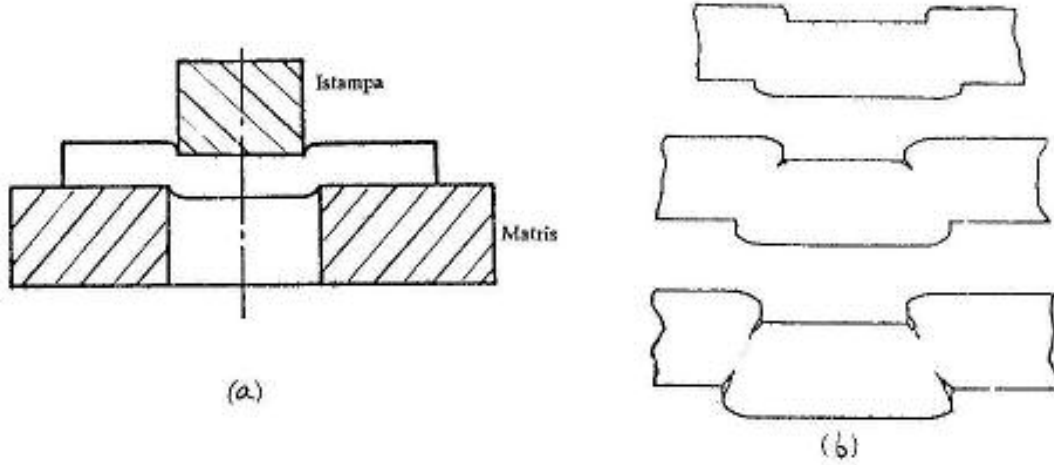
Bazı işlemlerde şekillendirilecek sacı sabitlemek için veya işlem sırasında kırışmasını önlemek için sıkıştırma kalıbı, baskı çemberi veya pot çemberi olarak adlandırılan kalıp elemanlarının kullanımına da gidilmektedir. Pot çemberinin saca basması ya pnömomatik sistemlerin, ya da çift tesirli kalıpların kullanılmasıyla sağlanabilmektedir. Kalıpların birbirlerine göre durumları yapılan işin hassasiyeti açısından çok önemli olduğu için kalıpların uygun şekilde akslenmesi gerekmektedir.

### B.1. Kesme

Kesme kısaca bir metalin iki kalıp yardımıyla ayrılması olarak tanımlanabilir. Kesme sırasında bıçaklarla temas noktasında batma sonucu malzemede bir çatlak oluşur. Şekil 8-1'de kesme işlemi sırasında kalıpların malzemeye batması ve çatlak oluşumuna neden olması gösterilmektedir. Daha sonra bu çatlak her iki yüzeyden de ilerleyerek malzemenin tam ayrılmasına yol açar. Bıçağın batma miktarı doğrudan doğruya malzemenin sünekliliği ve kesme kalıbının keskinliği ile ilgilidir. Batma gevrek malzemelerde çok az, sünek malzemelerde ise daha yüksektir.

#### B.1.1. Kesme Aralığı

Kesmede bıçaklar arası aralık ve bıçak ağızlarının keskinliği, batmanın etkili olması bakımından çok önem taşımaktadır. Kesme kalitesinin iyi olabilmesi için bıçakların keskin, aralığın ise optimum bir değerde tutulması gereği vardır.



Şekil 8-1: (a) Kesmede kalıpların ve malzemenin konumu. (b) Kesme sırasında malzemede çatlak oluşumu.

Kesmede kullanılacak optimum aralık tayininde:

(i) 3 mm den ince saclar için

$$w = 0,005 \cdot h \cdot \sqrt{\tau}$$

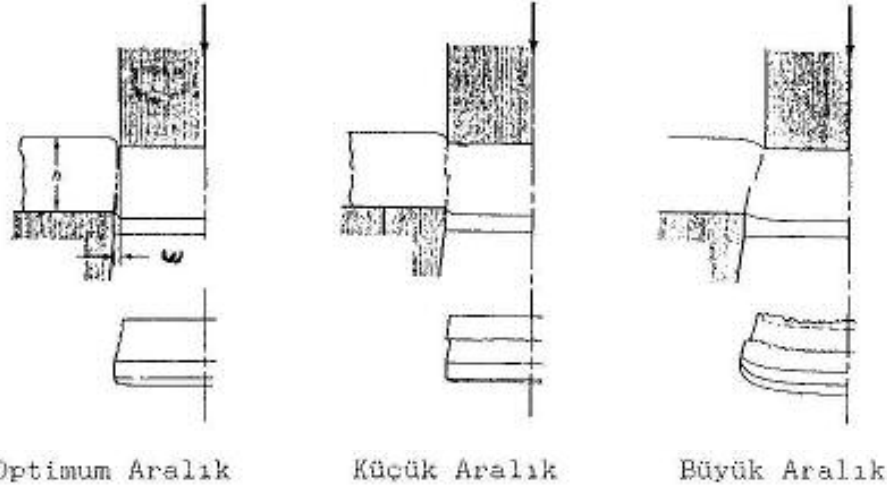
(ii) 3 mm den kalın saclar için

$$w = 0,015 \cdot h \cdot \sqrt{\tau}$$

kriterlerinden yararlanılabilir. Burada  $w$  optimum aralığı,  $h$  sacın kalınlığını,  $\tau$  ise malzemenin kesme dayanımını (çok kaba olarak malzemenin çekme dayanımının yarısı) temsil etmektedir. Bazı tasarımcılar ise malzeme cinsine göre elde edilmiş bulunan ampirik yaklaşımlardan yararlanırlar.

Malzeme	Optimum aralık ( $w$ )
Pirinç, Az karbonlu çelik	$h/40$
Yüksek karbonlu çelik	$h/30$
Alüminyum	$h/20$

Kesme için optimum aralık sağlandığında, işlem sırasında malzemenin her iki yönünden ilerleyen çatlaklar yaklaşık olarak ortada birbirlerine kavuşurlar. Böylece sac yüzeyi ile çok küçük bir açı yapan, pürüzsüz bir kesme yüzeyi elde edilir. Şekil 8-2 de kesme aralığının optimum değerden büyük veya küçük seçilmesi durumunda elde edilecek sac kesitleri sematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 8-2: Kesmede aralığın optimum değerden farklı alınması durumunda sac kesitleri.

Aralığın küçük seçilmesi durumunda her iki kenardaki çatlakların ortada birleşmemesi sonucu sacın kesilen yüzeyinde çukurluklar oluşacak ve bıçaklar birbirinden ayrılmaya zorlanacaklardır. Aralığın büyük seçilmesi durumunda ise hem kesim ortasında çukurluklar oluşacak, hem de sacın üst yüzeyindeki büyük deformasyon sonucunda çapaklar meydana gelecektir. Bu durum hem parçanın kalitesi hem de işçi sağlığı açısından olumsuzluk yaratacaktır.

### 8.1.2. Kesme Kuvveti

İşlem sırasında kullanılması gerekli kesme kuvveti çok kaba olarak;

$$P_{kesme} = C_2 \cdot L \cdot h \cdot \sigma_{çek}$$

ifadesiyle hesaplanabilir. Burada  $L$  kesme boyu (kesilen parçanın çevresi veya kesmeye uğrayan uzunluğu),  $\sigma_{çek}$  ise malzemenin çekme dayanımıdır.  $C_2$  sabiti ise sünek malzemeler için 0,85, gevrek malzemeler içinse 0,65 olarak tanımlanan bir katsayıdır. Eğer malzemenin akma eğrisine ait dayanım sabiti  $K$  ve pekleşme üsteli  $n$  değerleri biliniyorsa, kesme kuvvetini hesaplamada

$$P_{kesme} = C_2 \cdot L \cdot h \cdot K \cdot \left(\frac{n}{e}\right)^n$$

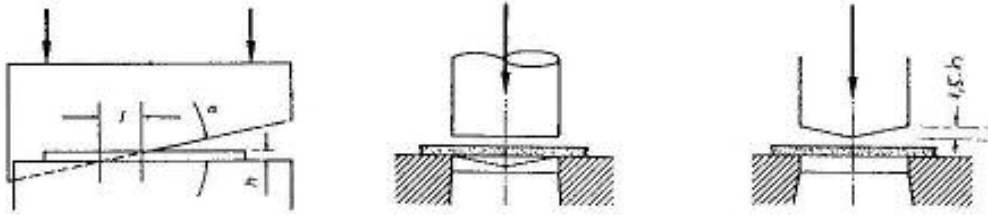
bağıntısından yararlanılabilir. Burada  $e$  tabii logaritma tabanı olan 2,73 sayısıdır.

Kesme işini belirlemek için gene yaklaşık olarak:

$$W_{kesme} = C_3 \cdot F_{kesme} \cdot b$$

bağıntısından yararlanmak mümkündür. Buradaki  $C_3$  katsayısı sünek malzemeler için 0,5, gevrek malzemeler için 0,35 olarak seçilmektedir.

Kesme kuvveti azaltılmak istendiğinde, kesme kalıplarına eğim verilerek kesme işleminin tedricen ilerlemesi ve  $L$  boyunun küçülmesi sağlanabilir. Genellikle çevre kesme işlemlerinde açılı matrise (dişi kalıp), delme işlemlerinde ise istampaya (erkek kalıp) yapılmaktadır. Şekil 8-3'de kalıpların açılılandırılması için değişik örnekler verilmektedir. Açılılandırma esas alınan kriter, eğim verilerek yaratılan yüksekliğin yaklaşık olarak sac kalınlığının 1,5 misli alınmasıdır. Ancak bu değer ucunlamasına yapılan kesme işlemlerinde biraz daha fazla alınmaktadır.



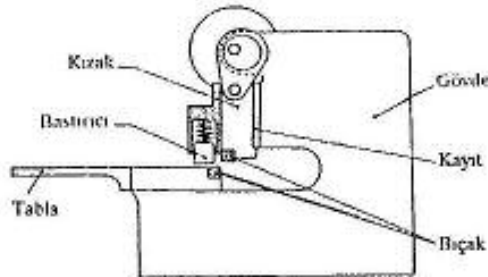
Giyotin Makas

Çevre Kesme

Delme

Şekil 8-3: Kesme kalıplarına eğim verilmesi.

Kesme işlemleri, preslerde kalıp kullanılarak yapılabildiği gibi, büyük sac levha ve rulolar için Şekil 8-4'de yan görünüşü verilen Giyotin Makas'lar da kullanılabilir. Bunlar bıçak boyları 6 metreye varabilen güçlü tezgahlar olup ancak düz kesme işlemleri yapılabilir.



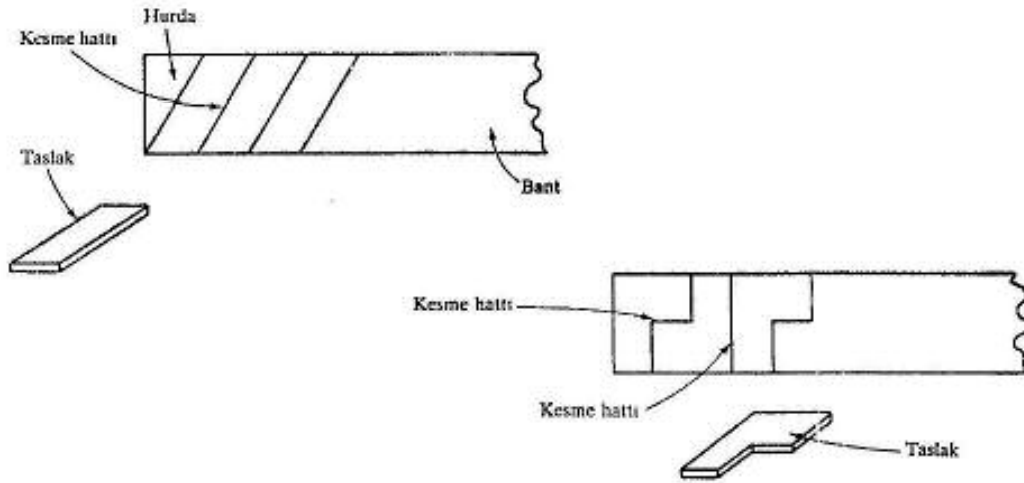
Şekil 8-4: Giyotin makas.

### 8.1.3. Kesme Türleri

Kesme işlemleri elde edilen parçaların biçimine göre değişik isimler alabilmektedir.

#### a. Uç Kesme

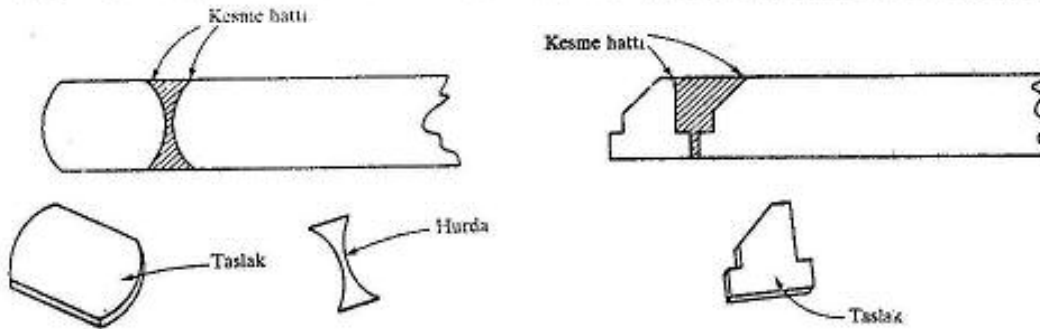
Bu işlemden bantın tüm genişliğince herhangi bir artık bırakılmaksızın kesilmesi amaçlanır. Şekil 8-5 değişik uç kesme işlemlerini göstermektedir. Bu işlemden taslağın durumuna göre, sadece rulonun önünde ve/veya arkasında bir miktar hurda çıkabilir.



Şekil 8-5: Değişik uç kesme uygulamaları.

#### b. Ayırma

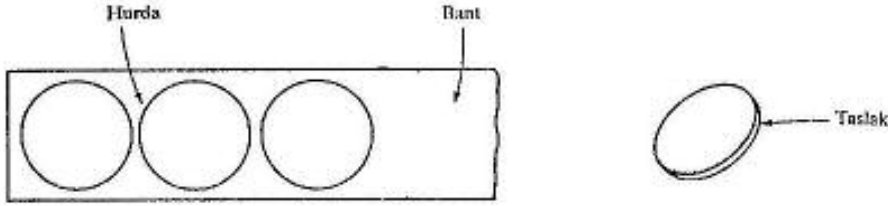
Şekil 8-6'da farklı uygulamaları görülen bu işlemden rulo veya bant tüm genişliğince kesilmektedir. Ancak birbirini izleyen iki taslak arasında daima bir miktar hurda malzeme çıkmaktadır.



Şekil 8-6: Ayırma işlemi.

#### c. Çevre Kesme

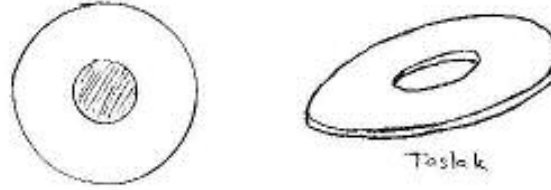
Bu tür kesme işlemlerinde kesme hattı kapalıdır. Bundan dolayı bu işlemlerde hurda kaybı büyük boyutlara ulaşabilir. Kesilen parçanın kullanıldığı bu işlem sırasında elde edilen ürün ile kesilen malzemenin durumu Şekil 8-7 de verilmektedir.



Şekil 8-7: Çevre kesme.

#### d. Delme

Sac üzerine delik açma işlemine delme veya zımbalama işlemi adı verilmektedir. Delme sonucu malzemeden kesilerek ayrılan parça hurdayı oluşturmaktadır. Şekil 8-8'de bu işlem ile elde edilen ürün ve hurda örneği verilmektedir.



Şekil 8-8: Delme işlemi ile elde edilen taslak ve hurda.

#### e. Çentik Açma

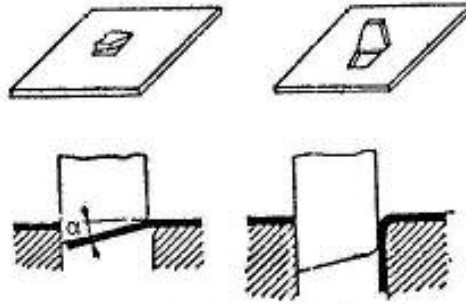
Sac bandın veya rulonun kenarından yapılan kısmi kesme işlemlerine çentik açma veya çentme işlemi adı verilir. Kesme sonucu çıkan sac parçası hurdadır. Şekil 8-9'da iki yanına çentik açılmış bir parça görülmektedir.



Şekil 8-9: Çentik açılmış bir parça.

#### f. Yarma

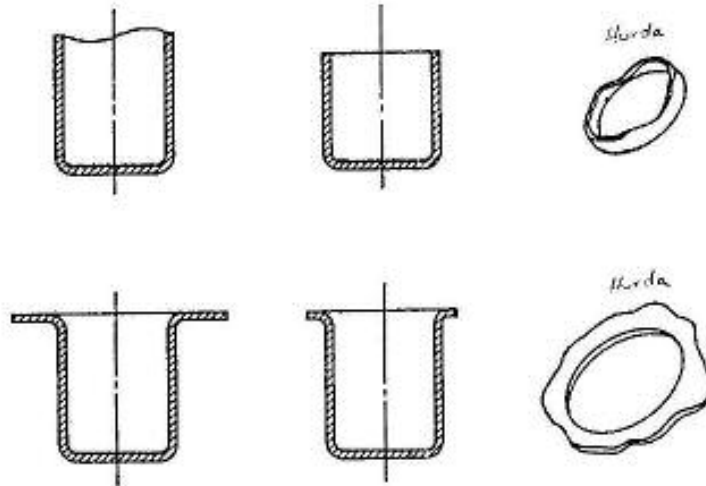
Sacın istampanın iki veya üç kenarı ile kesilmesi ve dördüncü kenarı boyunca bükülmesi işlemine yarma (keserek şekillendirme) işlemi denilmektedir. Kesme ve bükmenin ortak olarak kullanıldığı bu işlemde hurda yoktur. Şekil 8-10'da bu işlem uygulanan bir parça ile işlemi oluşturan kademeler verilmiştir.



Şekil 8-10: Yarma işlemi.

#### g. Etek Kesme

Şekil 8-11'de görüldüğü gibi özellikle derin çekilmiş flanşlı kapların flanş çevresini, flanşsız olanların ise üst kısmını keserek düzeltmek amacıyla yapılır. Uygun bir kesme kalıbı kullanarak gerçekleştirilecek dövme çapaklarının kesilmesi işlemi de etek kesme olarak kabul edilebilir.



Şekil 8-11: Derin çekilmiş kaplarda etek kesme.

#### h. Hassas Kesme

Sac yüzeyine tam dik, çok temiz ve düzgün kesme yüzeyleri hassas kesme ile elde edilebilir. Genellikle endüstriyel uygulamalarda bunu başarabilmek için sacın bir baskı kalıbı ile kesme sırasında hareketinin kısıtlanması gerekmektedir. Bunu gerçekleştirmede diğer bir teknik de önceden kaba olarak kesilen parçaların daha sonra ikinci aşamada hassas traşlama işleminden geçirilmesidir. Şekil 8-12, bu tür hassas kesme işlemlerini sematik olarak vermektedir. Sac kesme işlemi ince ve küçük parçaların kesilmesini içeriyorsa traşlama, bu işlemin yapılması birkaç kademe gerektiriyorsa bröslama dan söz edilebilir.



Şekil 8-12: Batmalı kalıp ve traşlama yöntemleriyle hassas kesme.

#### 8.1.4. Kesme Kalıpları

Kesme kalıpları erkek (ıstampa) ve dişi (matris) kalıptan meydana gelir. Bunlar zamanla aşınır. Körelen kalıpların ağızları taşlanarak yeniden keskinleştirilir. Matrisler genellikle kesme işinin gerçekleştiği bölgeden sonra, 3-5° konik işlenerek malzemenin aşığı düşmesine kolaylık sağlarlar. Kalıplar tek kademelî işlem yapabildikleri gibi kesme işlemini birkaç kademede gerçekleştirecek (adımlı kalıplar) şekilde tasarımlandırılabilirler. Değişik işlemlerin aynı anda gerçekleştirilmesi ise Birleşik Kalıp (progresiv kalıp) adı verilen kalıpların kullanılmasıyla mümkündür. Pahalı olan bu kalıplar ancak seri üretimler için uygundur.

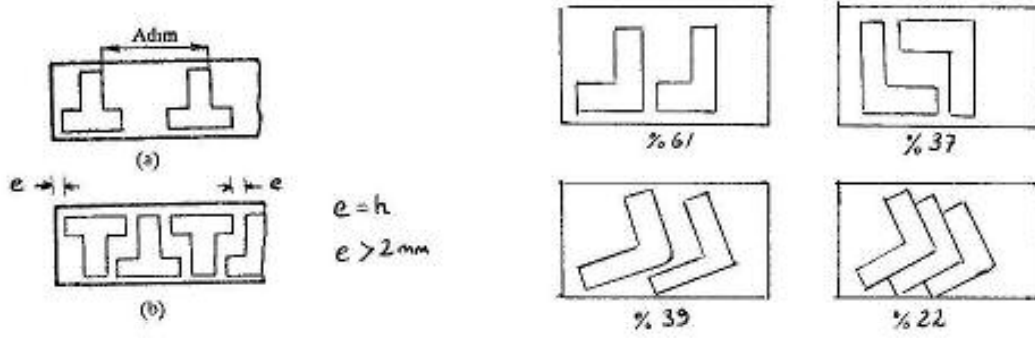
Kalıp malzemesi olarak yüksek karbonlu çelikler ile, orta karbonlu alaşımli çelikler kullanılır. Soğuk iş Takım Çeligi olarak adlandırılan bu çelikler işlemin gerektirdiği malzeme özelliklerini sağlamak amacıyla ıslah edilerek kullanılırlar.

#### 8.1.5. Kesme Planı

Seri üretimlerde kesme işlemi genellikle bandın adım adım ilerletilmesiyle gerçekleştirilmektedir. Çevre kesme işlemi yapılacaksa bunun sac kenarından en az sac kalınlığı kadar içeriden yapılması gerekmektedir. Bu mesafe hiç bir zaman 2 mm den aşağı tutulmamaktadır. Bu aralığın ard arda yapılacak kesimlerde de korunması gerekmektedir. Şekil 8-13'de T ve L şeklinde



kesilecek parçalar için değişik kesme tertipleri ile bunların hurda oranları verilmiştir. Görüldüğü gibi uygun kesme planı yapılması durumunda hurda miktarı önemli ölçüde azaltılabilmektedir.

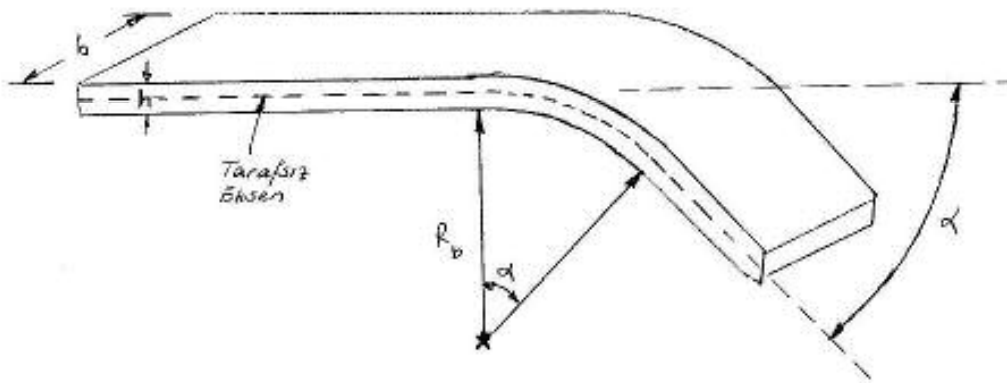


Şekil 8-13: Değişik kesme tertipleri ve bunların hurda oranları.

### 8.2. Bükme

Sacların plastik bölgeye girilecek şekilde uygulanan eğme zorlanmaları ile biçimlendirilmesi bükme olarak adlandırılır. Basit bir yöntem olduğu için çok yaygın olarak uygulanmaktadır. Ayrıca diğer birçok şekil verme yönteminin de bir parçasıdır. Şekil 8-14'de görüldüğü gibi bu işlemin parametreleri;

- $\alpha$  Bükme açısı,
- $R_p$  Bükme yarıçapı,
- $h$  Sac kalınlığı,
- $b$  Sac genişliği şeklinde sıralanabilir.



Şekil 8-14: Bükme işlem parametreleri.

$R_b$  bükme yarıçapı iç yüzeyde tanımlanır. Bükme sırasında dış kısım çekme, iç kısım ise basma gerilmeleri altında zorlanmaktadır. Belirli bir sac kalınlığı için çekme ve basma birim şekil değişimleri azalan bükme yarıçapı ile artmaktadır. Ortada tarafsız eksende ise herhangi bir deformasyon yoktur. Ancak bükme yarıçapı küçüldüğünde tarafsız eksen basma bölgesine doğru kayar, sacın ortası da uzar ve hacim sabitliği sacın inceliğiyle korunmuş olur. Bu durumda tarafsız eksenin sac kalınlığının  $1/3$ 'üne kaydığı varsayılmaktadır. Bu durum bükme yarıçapının sac kalınlığının iki mislinden küçük olduğu haller için geçerlidir. Eğer sac genişliği, sac kalınlığının sekiz katından küçükse sac genişliğinde de bir daralma söz konusu olacaktır.

Sac kalınlığındaki bu değişimler ihmal edildiğinde iç ve dış yüzeylerdeki mühendislik birim şekil değişimleri:

$$\epsilon_{\text{çek}} = -\epsilon_{\text{bas}} = \frac{1}{\frac{2 \cdot R_b}{h} + 1} \leq \epsilon_{\text{un}}$$

bağıntısı ile ifade edilmektedir. Görüldüğü gibi her iki deformasyon miktarı da malzemenin üniform uzama değerinden küçük olmalıdır. Malzemenin mühendislik üniform uzaması değerinin belirlenmesinde ya malzemenin mühendislik çekme eğrisinden yararlanılır, ya da malzemenin gerçek akma eğrisi Holloman Üstel Bağıntısına uyuyorsa, bu eğriye ait peklesme üsteli  $n$  değeri kullanılarak:

$$\epsilon_{\text{un}} = \exp n - 1$$

şeklinde bulunabilir.

Bükme işlemini kısıtlayan faktörler şu şekilde özetlenebilir:

1. Bükme sonrasında sac yüzeyinin portakal kabuğu şeklindeki görünümü estetik açıdan problem yaratabilir. Bu ince taneli malzeme kullanılarak giderilebilir.
2. Bükme sırasında uygulanabilecek en küçük bükme yarıçapından daha küçük bükme yarıçaplarının uygulanması durumunda,
  - a. Yerel büzülme,
  - b. Dış yüzeyde çatlama,
  - c. iç yüzeyde ezilme oluşumu görülür.
3. Bükme sonrasında malzemenin geri yaylanması neticesinde bükme kalıbının belirlediği geometri elde edilmeyebilir.

### 8.2.1. En Küçük Bükme Yarıçapı

Bilindiği gibi  $R_b/h$  oranı küçüldükçe malzeme yüzeyindeki deformasyon artar. Bu değer in malzemenin sünekliğini geçmesi

halinde yüzeyde ayrılmalar oluşur. Bu nedenle bükme yarıçapı belirli bir değerin altında seçilemez. En küçük bükme yarıçapının belirlenmesinde:

(a) Geyrek malzemeler için (kesit daralması  $\psi < 0.2$  olanlar), tarafsız eksenin ötelenmesi ihmal edilerek:

$$(R_b)_{\min} = h \cdot \left( \frac{1}{2 \cdot \psi} - 1 \right)$$

(b) Sünek malzemeler için (kesit daralması  $\psi \geq 0.2$  olanlar), tarafsız eksenin kayması da göz önünde bulundurularak:

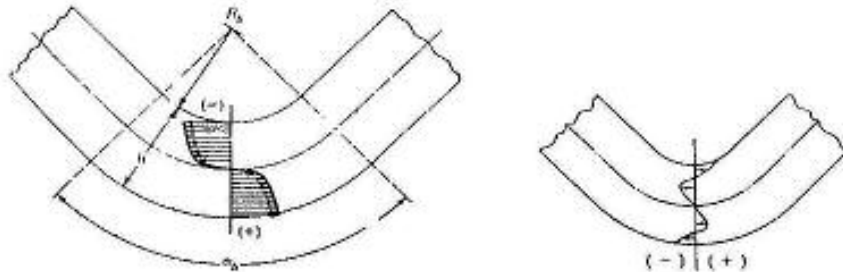
$$(R_b)_{\min} = h \cdot \left[ \frac{(1 - \psi)^2}{2 \cdot \psi - \psi^2} \right]$$

bağıntılarından yararlanılabilir.

Bazı sünek malzemelerde bükme yarıçapı sıfıra kadar düşebilir, yani malzeme katlanabilir. Ancak kalıp çarünü arttırmak ve erken aşınmayı ile olası bir hasarı önleme açısından bükme yarıçapı hiçbir zaman 0,7 mm'den küçük seçilmemelidir. Yüksek dayanımlı çelikler söz konusu olduğunda ise bükme yarıçapı sac kalınlığının beş katından az olmamalıdır.

### 8.2.2.1. Geri Yayılanma

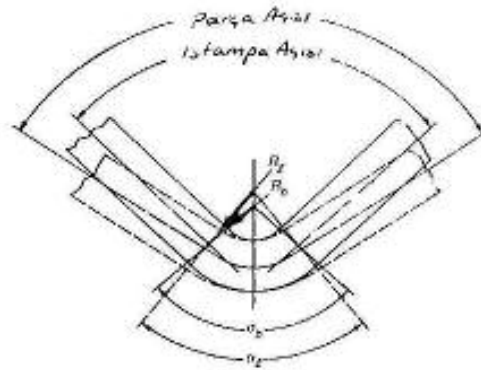
Bükme sırasında malzemenin tarafsız eksene yakın kısımları elastik olarak, yüzeye yakın kısımları ise plastik olarak şekil değiştirmektedir. Bükülen parçaya uygulanan gerilmeler kaldırıldığında elastik şekil değişiminin geri dönmesi sonucunda biçim değişimi olmaktadır. Bu değişim Geri Yayılanma olarak adlandırılır. Geri yayılma, malzemenin akma dayanımı, bükme açısı ve bükme yarıçapının büyümesi ile artmaktadır. Şekil 8-15'de sacın bükülmesi sırasında kesite etkiyen gerilmeler ve işlem sonrasında oluşan artık gerilmeler verilmiştir.



Şekil 8-15: Bükme sırasında kesite etkiyen gerilmeler ve işlem sonrası kesitte oluşan artık gerilmeler.

Gerçekte elastik boşalma, diğer bütün plastik şekil verme yöntemleri için de geçerlidir. Ancak en belirgin olarak saç bükme işlemlerinde ortaya çıkmaktadır.

Geri yaylanmanın sayısal olarak belirlenmesinde bazı ampirik ifadelerden yararlanılmaktadır. Şekil 8-16'da olduğu gibi yük kaldırılmadan önceki bükme yarıçapı (kalıbın yarıçapı)  $R_b$ , kaldırıldıktan sonraki bükme yarıçapı  $R_a$ , şekillendirme sırasındaki bükme açısı  $\alpha_b$ , sonraki bükme açısı  $\alpha_a$  ise; daima  $R_a > R_b$  ve  $\alpha_b > \alpha_a$  olacaktır. Öngörülen ve elde edilen bükme açıları arasında şu şekilde bir geometrik ilişki söz konusudur:



Şekil 8-16: Bükülen parçalarda geometrik özellikler.

$$\alpha_a \cdot \left[ R_a + \left( \frac{h}{2} \right) \right] = \alpha_b \cdot \left[ R_b + \left( \frac{h}{2} \right) \right] \quad (\alpha: \text{radyan})$$

Aynı şekilde bükme sırasındaki ve sonrasındaki yarıçaplar arasında şu ampirik ilişkiden söz etmek mümkündür:

$$\frac{R_a}{R_b} = 1 - 3 \left( \frac{R_b}{h} \cdot \frac{\sigma_{0,2}}{E} \right) + 4 \left( \frac{R_b}{h} \cdot \frac{\sigma_{0,2}}{E} \right)^2$$

Burada  $\sigma_{0,2}$  malzemenin akma dayanımı, E ise malzemenin elastiklik modülüdür.

Geri yaylanmanın önlenmesi veya etkisinin azaltılması için aşağıdaki yöntemlere başvurulmaktadır:

1. Malzemeye aşırı basma gerilmesi uygulayarak plastik şekil değişimini arttırmak (kalıbın bükme yarıçapını küçültmek, kalıbı diplemek vb.),

2. Akma sınırını düşürerek şekillendirmek (yüksek sıcaklıkta şekillendirmek).

### 8.2.3. Bükmede Açılım Hesaplama

Bir parçanın bükme öncesi uzunluğu,

$$L_0 = 0.0175 \cdot \sigma_b \cdot \left[ R_b + \left( h \cdot \frac{T}{2} \right) \right]$$

bağıntısıyla hesaplanabilmektedir. Burada T bükme yarıçapına ve sacın kalınlığına bağlı bir düzeltme faktörü olup aşağıdaki tablodaki değerlerden seçilir:

$R_b/h$	:	5	3	2	1,2	0,8	0,5
T	:	1	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5

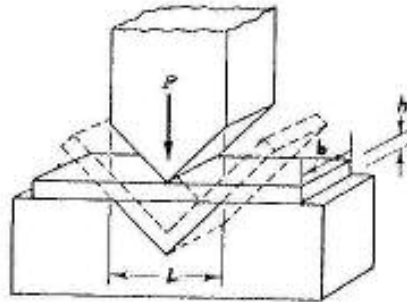
### 8.2.4. Bükme Kuvveti

Bükme işlemini gerçekleştirecek kuvvetin hesaplanmasında,

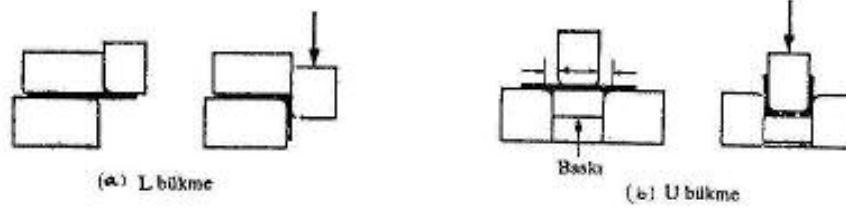
$$F_b = C_4 \cdot \sigma_c \cdot b \cdot h^2 / L$$

empirik bağıntısından yararlanılmaktadır. Burada  $b$  bükülecek sacın genişliğini,  $L$  bükme boyunu,  $\sigma_c$  sac malzemesinin çekme dayanımını,  $h$  sacın kalınlığını ve  $C_4$  bükme geometrisine bağlı bir katsayıyı ifade etmektedir.

$C_4$  değeri. Şekil 8-17'de verilen V Bükme için 1,33; Şekil 8-18'de verilen U Bükme için 0,667'dir. Aynı şekilde verilen L Bükme durumunda ise formüldeki  $L$  değeri, bükme kalıplarının yarıçapları ile matris-istampa arası boşluğun toplamı olarak hesaba katılır ve  $C_4$  değeri 0,333 olarak kabul edilir.



Şekil 8-17: V Bükmede kalıp ve parçanın durumu.



Sekil 8-18: (a) L (Kenar) Bükme ve (b) U Bükmede parça ve kalıpların konumu.

Daha basit bir yaklaşım ise bükme kuvvetinin, bükülecek kesitin kesilmesi için kullanılması gereken kuvvetin yaklaşık onda biri olarak alınmasıdır.

$$P_b \approx h.b.\tau/10$$

Burada  $\tau$  malzemenin kesme dayanımıdır. Bükme işi ise gene yaklaşık olarak:

$$W_b \approx 0,5.P_b.s$$

Burada  $s$ , istampanın saca temas ettiği andan bükme sonuna kadar olan stroktür (kurs).

### 8.2.5. Bükme İşlemleri

Bükme işlemleri bükme kalıplarının şekillerine göre değişik adlarla anılır.

#### 1. V-Bükme

Geriye yaylanma nedeniyle bu işlem için  $n_b$  değeri pratikte, parçanın sahip olması istenen açıdan küçük seçilir. Bu değer yumuşak çelikler için  $0,5^\circ-1^\circ$ , sert çelikler için  $4^\circ-5^\circ$ , fosfor bronzu ve sert pirinçler için  $5^\circ-10^\circ$  mertebelerinde küçük alınmaktadır.  $L$  boyutu ise, kalınlığı 10 mm'ye kadar olan yumuşak çelik levha ve saclar için kalınlığın 8 katı, 10 mm'den daha kalın levhalar için kalınlığın 10-12 katı olarak seçilmektedir. Sekil 8-17'de V-Bükme işlemi verilmiştir.

#### 2. Kenar (L) Bükme

Sekil 8-18(a)'da görüldüğü gibi sabit kalıp üzerine bir yardımcı eleman vasıtasıyla bastırılarak tutulan sacın serbest uç hareketli istampa yardımıyla aşağı doğru bükülmektedir.

#### 3. U-Bükme

Sekil 8-18(b)'de olduğu gibi matris boşluğunun tam ortasına yerleştirilen sac ortasından bir istampa yardımıyla eğilmeye zorlanmaktadır. Bu sırada sacın istampanın alt yüzüne tam temas edebilmesi için bir baskı elemanına gerek duyulmaktadır.

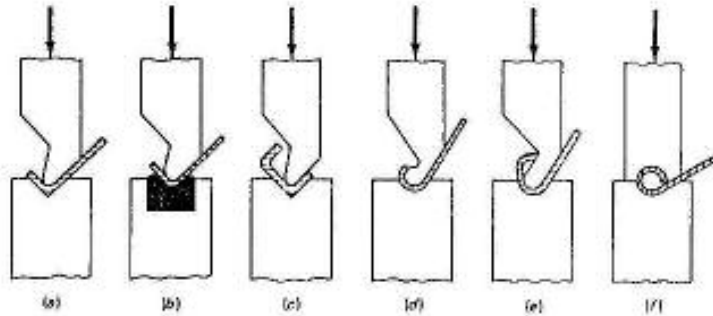
Pratikte bu tür U-Bükme işlemleri için istampa ve matris arasında boşluk olarak (sac kalınlıkları dışında) 2-3 mm. istampanın köşe radyüsleri olarak ise bükülecek sacın kalınlığının iki katı alınmaktadır.

#### 4. Serbest (Kalıpsız) Bükme

Bu tür bükmede matris (dişi kalıp) kullanılmaz. Şekillendirme sadece erkek kalıp (istampa) etrafında gerçekleşir. Sac istampa ile lastik veya üretilen bir bloğa bastırılarak şekillendirme yapılmaktadır. Şekil 8-19(b)'de koyu renkle belirtilmiş bölümde lastik bir blok vardır ve bükme sırasında istampanın şeklini elastik olarak almaktadır.

#### 5. Abkant Preslerde Bükme

Uzun sacların boylamasına olacak şekilde bükülmesinde Abkant Presler kullanılır. Hidrolik veya mekanik olabilen bu preslerin 2500 ton yük kapasitesine kadar olanları ile 7 metre boyundaki sacları bükebilecekleri vardır. Şekil 8-19'da abkant preste gerçekleştirilen bükülmüş sac profillerine ait değişik örnekler verilmektedir.



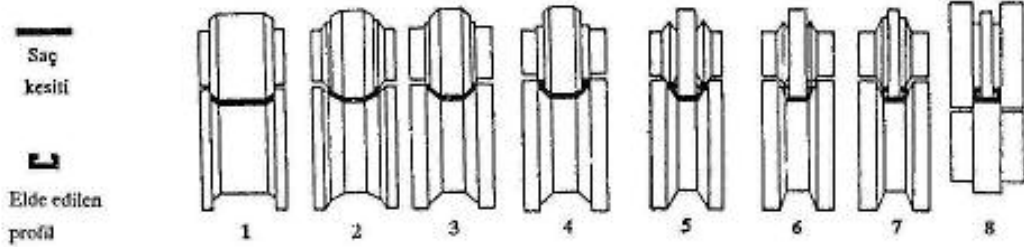
Şekil 8-19: Abkant Preste değişik bükme işlemleri.

#### 6. Merdaneler Yardımıyla Bükerek Profil Verme

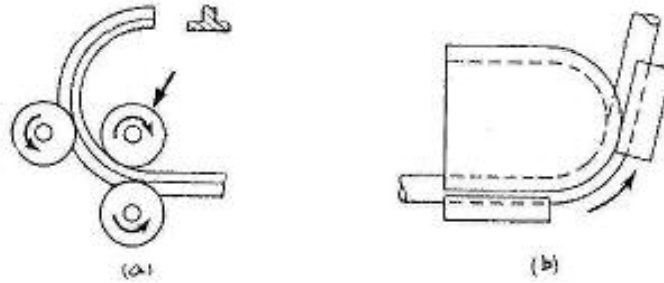
Sacların sürekli şekilde bükülmesi için abkant presler yerine, amaca uygun profiller işlenmiş silindirler arasında biçimlendirilmektedir. Burada şekillendirme tek kademede gerçekleştirilemeyip, çok kademeli olarak yapılmaktadır. Şekil 8-20'de sekiz kademede gerçekleştirilen bir profil verme işlemi görülmektedir.

#### 7. Profil Bükme

Değişik profil ve boruların bükülmesinde profil bükme makinelerinden yararlanılır. Boruların bükülmesi öncesinde ezilmeyi önlemek için boru içine kum doldurulmaktadır. Şekil 8-21(a) da bir T profili bükmede kullanılan, Şekil 8-21(b)'de ise boru bükmede kullanılan teçhizat şematik olarak verilmektedir.



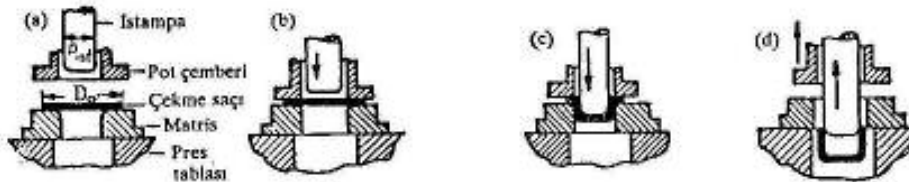
Şekil 8-20: Merdaneler yardımıyla gerçekleştirilen bükme işlemi.



Şekil 8-21: (a) T profil bükme, (b) Boru bükme.

### 8.3. Derin Çekme

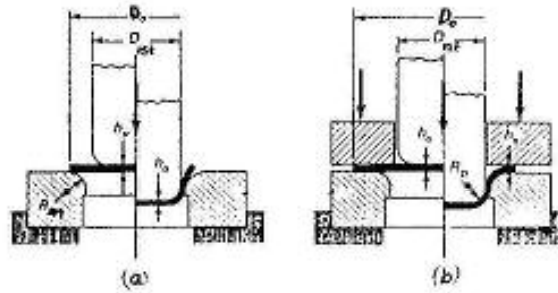
Derin çekme işleminde düz saclar, banyo küvetleri, silindirik kaplar, çamurluklar, kovan gibi derin biçimli parçalara dönüştürülmektedir. Bunun için gereken boyutlarda kesilen sac, kalıp veya matris üzerine yerleştirilmekte ve bir istampa yardımıyla sac kenarlarında katlanma oluşmaması için genellikle bir baskı uygulanmaktadır. Bunu sağlayan kalıp elemanına Pot Çemberi veya Baskı Çemberi adı verilmektedir. Şekil 8-22 de bir derin çekme işleminde kalıpların ve sacın durumu basit olarak verilmiştir.



Şekil 8-22: Derin çekme işleminin safhaları.



Sekil 8-23'de ise pot çemberi kullanılarak veya pot çembersiz gerçekleştirilen ve ham malzeme olarak dairesel sac kullanılan derin çekme işlemlerine ait parametreler özetlenmeye çalışılmıştır. Burada  $D_0$  derin çekilecek sacın çapını,  $D_{ist}$  sacı derin çekmeye zorlayacak istampanın çapını,  $R_{mat}$  matrisin yuvarlatma radyüsünü,  $R_{ist}$  istampanın köşe radyüsünü,  $h_0$  ise sacın kalınlığını tanımlanmaktadır.



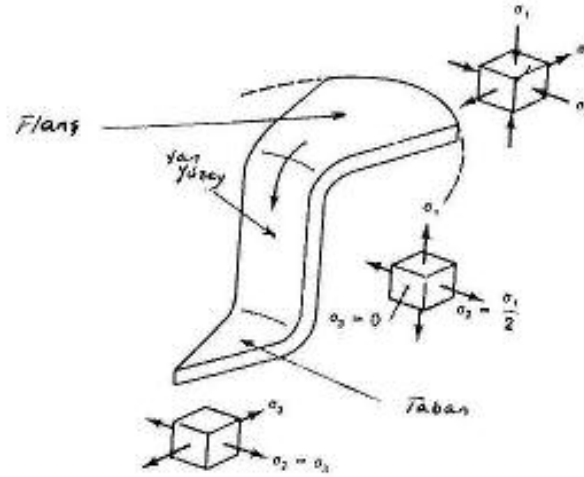
Sekil 8-23: (a) pot çembersiz, (b) Pot çemberiyle yapılan derin çekme işlemlerinin değişkenleri (Şekillerin ilk yarıları işlem öncesi durumu, ikinci yarıları ise işlem sonrası durumu vermektedir).

İşlem parametreleri basit olmasına rağmen, şekil değişimi oldukça karmaşıktır. Derin çekme sırasındaki deformasyonun mekaniğini anlamak yolunda yapılan deneysel ve analitik çalışmaların büyük çoğunluğu dairesel saclardan, düz tabanlı ve silindirik kapların çekilmesi üzerinedir. Bu ders kapsamında da derin çekme konusu, bu basit biçim değişimi açısından değerlendirilecektir.

Derin çekme sırasında sac üç farklı şekilde şekil değişimine uğramaktadır:

1. Tabandaki metal istampanın baskısıyla gerilerek iki eksenli gerilme hali altında incelmektedir.
2. Flans bölgesindeki metal ise radyal yönde kalıp ağzına doğru şekil değiştirmektedir. Bunun sağlanabilmesi için dış çapın matris çapına doğru giderek azalması gerekmektedir. Bu ise çevresel yönde basma gerilmelerinin doğmasına neden olur. Radyal yöndeki çekme gerilmeleri ile malzeme içeri doğru ilerledikçe kalınlığı artar. Matrisin giriş yarıçapı geçilirken sac önce bükülür ve sonra çekme gerilmelerinin etkisiyle düzelir. Bu işlem sırasında kalınlıkta bir miktar azalma olur.
3. Yan duvarlarda ise malzeme iki eksenli çekme halinde olup deformasyon sırasında incelir. Bazı durumlarda kalıpla istampa arasındaki aralık dar tutulur ve bu bölgede metal ezilerek uniform bir kalınlık elde edilir. Basma gerilmelerinin etkisiyle oluşan bu işleme ütüleme adı verilir. Normal derin çekme işlemlerinde bu aralık sac kalınlığından %10-20 fazla

alınmaktadır. Ütöleme isteniyorsa bu aralığın çok daha dar tutulması gerekmektedir. Şekil 8-24'de derin çekmede, değişik deformasyon bölgeleri için saca etkiyen gerilme durumu şematik olarak verilmiştir.



Şekil 8-24: Derin çekmenin değişik safhalarındaki gerilme durumu.

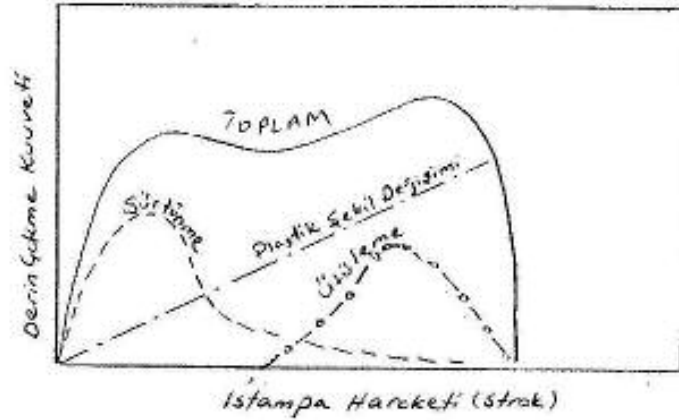
### 8.3.1. Derin Çekme Kuvveti

Derin çekme işlemini gerçekleştirecek ıstampa kuvveti üç farklı nedenden kaynaklanan kuvvetlerin bileşkesi olarak tayin edilmektedir:

- Derin çekme işlemi için şekillendirme kuvveti,
- Sürtünme kuvveti,
- Ütöleme kuvvetleri (varsa).

Plastik şekil değişimi kuvveti şekil değişimi miktarına ve pekleşmeye bağlı olarak sürekli olarak artmaktadır. Sürtünme kuvvetleri, pot çemberinin sacın flanş bölgesine basmasıyla oluşmaktadır ve ilerleyen deformasyonla flanş bölgesinin alanı küçüldüğünden giderek azalır. Ütöleme kuvveti sac kalınlığının ıstampa ile matris arasındaki mesafeden daha fazla olduğunda ortaya çıkmaktadır. Ayrıca bunlara ek olarak metalin bükülüp tekrar düzeltilmesi için gerekli olan kuvvetler de mevcuttur. Şekil 8-25'de derin çekme kuvveti ile bunu oluşturan bileşenler şematik olarak verilmektedir. işlem için gerekli olan derin çekme kuvveti, analitik olarak şu bağıntıyla da tanımlanabilmektedir:

$$P_{DC} = \left[ \pi \cdot D_{1st} \cdot h \cdot (1,1 \cdot \sigma_0) \cdot \ln \frac{D_0}{D_{1st}} + \mu \cdot (2 \cdot H \cdot \frac{D_{1st}}{D_0}) \right] \cdot \exp\left(\frac{\mu \cdot \pi}{2}\right) + B$$



Şekil 8-25: Derin çekme kuvvetinin istampanın ilerleyişi (strok veya kurs) ile değişimi.

Burada:

- H : Pot çemberinin uyguladığı baskı kuvveti,
- B : Bükme kuvvetleri,
- $D_0$  : Taslağın çapı (pul çapı),
- $D_{ist}$ : İstampa çapı,
- h : sac kalınlığı,
- $\sigma_0$  : Sac malzemesinin ortalama akma gerilmesi,
- $\mu$  : sürtünme katsayısıdır.

Bu bağıntıda ilk terim ideal deformasyon kuvvetini, ikinci terim ise baskı çemberi altındaki sürtünme kuvvetini temsil etmektedir. Üstel ifade matris giriş yarıçapındaki sürtünmeyi, B ise bükme ve düzeltme için gerekli kuvveti belirlemektedir.

Derin çekme kuvveti  $P_{DÇ}$ , istampa tarafından kabın tabanına uygulanmaktadır. Kuvvet buradan kabın yan duvarlarına iletilir. Genellikle hasar, istampanın bastığı yüzeyin yan duvarla birleştiği yerin hemen üzerindeki duvar bölgesinde oluşmaktadır. Bu kısım radyal bükme ve düzeltme görmemiş olup işlemin başından beri sadece çekme gerilmelerinin etkisi altında kalmıştır. Hasar, önce boyun verme ve bunu takibeden yırtılma şeklinde oluşur.

Pratik uygulamalarda, derin çekme kuvvetini daha basit hesaplamak için;

$$P_{DÇ} = \pi \cdot D_{ist} \cdot h \cdot \sigma_{çek} \cdot \left( \frac{D_0}{D_{ist}} - 0,7 \right)$$

ampirik bağıntısından da yararlanılmaktadır.

### 8.3.2. Pot Çemberi Baskısı

Derin çekme işlemlerinde pot çemberine uygulanması gereken basıncın seviyesi oldukça önemlidir. Yüksek basınçlar malzemede aşırı incelmelere ve yırtılmalara, düşük basınçlar ise kırılmaya neden olduğundan, pot çemberinin saca uyguladığı basma için optimum bir değer seçilmesi gerekmektedir. Pratikte bu amaç için, sac malzemesinin akma dayanımının %1,5 seviyesinde oluşturulan basınçlar pot çemberine uygulanmaktadır.

### 8.3.3. Kalıp-Matris Arası Boşluk

İstampa ile matris arasındaki boşluk  $w$ , derin çekilecek malzeme ve sacın kalınlığına göre şu empirik kriterler göz önünde tutularak seçilir:

Malzeme	$w$
Çelik	$h + 0,07 \cdot \sqrt{10 \cdot h}$
Alüminyum	$h + 0,02 \cdot \sqrt{10 \cdot h}$
Paslanmaz Çelik	$h + 0,20 \cdot \sqrt{10 \cdot h}$
Pirinç	$h + 0,04 \cdot \sqrt{10 \cdot h}$

### 8.3.4. Kalıp ve Matrislerdeki Yuvarlatma Yarıçapları

Derin çekme işleminde matris kenarlarındaki yarıçapların uygun seçimi de çok önemlidir. Çünkü keskin radyüsler eğme ve düzeltme işlemlerinin aşırı boyutlara ulaşmasını sağlayarak muhtemel hasarların oluşumuna zemin hazırlamaktadır. Bunu önlemek için matris kenarı en az

$$R_{mat} = G \cdot \sqrt{(D_0 - D_{ist}) \cdot h}$$

bağıntısıyla belirlenecek yarıçapa sahip olmalıdır.  $G$  katsayısı çelik için 0,8, alüminyum alaşımları için ise 0,9 olarak seçilmektedir.

Sacın istampa tarafından delinmemesi için, istampanın kenarları da uygun şekilde yuvarlatılmalıdır. Bunun için yuvarlatma yarıçapı sac kalınlığına bağlı olarak;

$$5 \cdot h < R_{ist} < 10 \cdot h$$

arasında kalmak üzere ve istampa çapının 0,1 ile 0,3 katı olacak şekilde seçilmektedir.

### 8.3.5. Sac Şekillendirmede Anizotropi

Bilindiği gibi plastik şekillendirmede hacim sabitliği korunmaktadır. Şekil 8-26'da görüldüğü gibi önceki şekillendirme yönü (haddeleme yönü) tanımlanmış bir sacdan hazırlanan bir çekme

deneyi parçasının tek eksenli çekme sırasında oluşan değişik yönlerdeki birim şekil değişimlerinin toplamı sıfırdır:

$$\epsilon_l + \epsilon_w + \epsilon_t = 0$$

Bu ilişki her zaman geçerli olmakla beraber, genişlik ve kalınlık yönündeki birim şekil değişimlerinin eşit olmasını gerektirmemektedir. Genişlik yönündeki birim şekil değişiminin  $\epsilon_w$ , kalınlık yönündeki birim şekil değişimine  $\epsilon_t$ , oranı  $r$  değeri olarak ifade edilmektedir.

$$r = \epsilon_w / \epsilon_t$$

Eğer malzeme izotrop özellikte ise  $\epsilon_w = \epsilon_t$ , dolayısıyla  $r=1$  olmaktadır. izotrop malzemelerde  $r$  değeri, malzemenin haddelenme doğrultusundan da etkilenmemektedir:

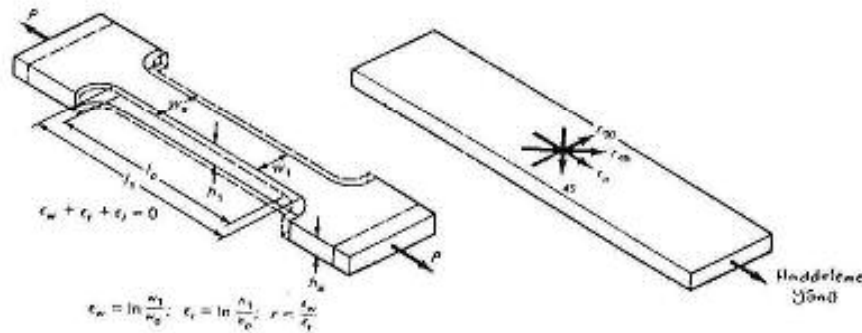
$$r_0 = r_{90} = r_{45} = 1$$

Ancak gerçekte  $r$  değerleri malzemenin haddelenme yönüne göre değişmektedir.

$$r_0 \neq r_{90} \neq r_{45}$$

Bu durum Düzlemsel Anizotropi olarak adlandırılmakta olup, derin çekmede görülen Kulak Oluşumu gibi problemlerin ortaya çıkmasına neden olur. Düzlemsel anizotropi sayısal olarak  $\Delta r$  değeri ile şu şekilde tanımlanmaktadır:

$$\Delta r = \frac{r_0 + r_{90} - 2.r_{45}}{2}$$



Sekil 8-26: Sacdan hazırlanan çekme deneyi parçasında değişik yönlerde oluşan birim şekil değişimleri.

Eğer r değerleri tüm yönlerde aynı fakat birden farklı ise,

$$r_0 = r_{90} = r_{45} \neq 1$$

Düsey Anizotropi (normal anizotropi) söz konusudur. Düsey anizotropinin ölçüsü olarak aşağıdaki gibi tanımlanan  $\bar{r}$  değeri kullanılmaktadır:

$$\bar{r} = \frac{r_0 + r_{90} + 2.r_{45}}{4}$$

Gerçek malzemeler hem düsey hem düzlemsel anizotropiyi beraberce içermektedirler.

#### 8.3.6. Sınır Çekme Oranı (SCO)

Derin çekme işleminde başlangıç çapı  $D_0$  olan bir pulun çekilebileceği en küçük çap sınırlıdır. Derin çekme işleminde Redüksiyon  $(D_0 - D_{iat})/D_0$ , Çekme Oranı ise  $D_0/D_{iat}$  şeklinde tanımlanmaktadır. Çekilebilecek en büyük pul çapının istampanın çapına oranı Sınır Çekme Oranı olarak isimlendirilir.

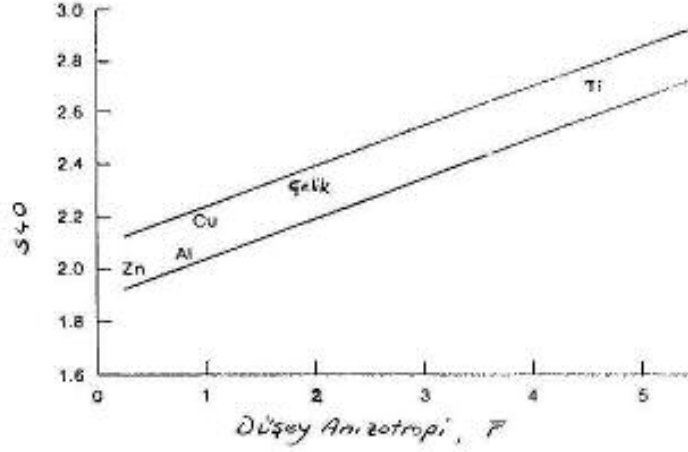
$$SCO = D_0(max) / D_{iat}$$

Pul çapı büyüdükçe çevresel basma gerilmeleri etkisiyle oluşacak daralmalar da artar. Pot (kırışma) oluşumunun önüne geçebilmek için baskı kuvveti arttırılması gerekmekte, bu ise kap tabanında yırtılmanın görüleceği sınır kuvvet değerine daha kolay ulaşılmasına neden olmaktadır.

Genellikle SCO değerleri 1,5 ile 2,3 arasında değişmekte olup, aşağıda verilen malzeme özellikleri ve işlem parametrelerinden etkilenmektedir:

- i. Yüksek pekleşme üsteli n değerleri SCO'ni arttırır.
- ii. Düsey anizotropi katsayısı  $\bar{r}$ 'nin yüksek olması SCO'ni önemli oranda arttırır. Bu durum Şekil 8-27'de grafik halinde verilmiştir.
- iii. İstampa ve matrisin köşe yuvarlatmalarındaki keskinlik SCO'ni azaltmaktadır.
- iv. Pot çemberi ile kalıp arasındaki sürtünmenin yüksek oluşu SCO'ni azaltmaktadır.
- v. Artan  $D_0/h$  oranları SCO'ni düşürmektedir.
- vi. istampanın basma yüzeyindeki sürtünmenin yüksek olması ise SCO'ni arttırmaktadır.

Derin çekmede ortalama redüksiyon yaklaşık olarak %50 mertebelerinde olduğu için uzun kapların bir çekmede üretilmesi mümkün olmayabilir. Bu durumda Kademeli Çekme işlemlerine başvurulmaktadır.

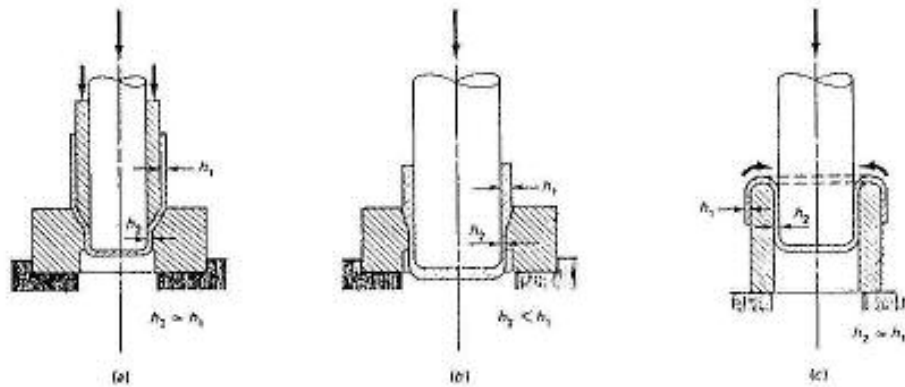


Sekil 8-27: S00'nun malzemelerin düşey anizotropi özellikleri ile değişimi.

Derin çekmede kullanılan kademeli çekme işlemleri:

- Yeniden çekme,
- Ütölleme,
- Ters çekme olarak sınıflandırılmaktadır.

Kademeli çekmede ikinci aşamadaki çekme işlemlerinde peklesmeden dolayı redüksiyonların daha düşük tutulmasına dikkat edilir. Eğer ikinci çekme bir ara tavlı takiben yapılıyorsa daha büyük şekil değişimlerine ulaşılabilir. Derin çekmeye uygun birçok metalde tavsız olarak 850-80 şekil değişimlerine izin verilmektedir. Sekil 8-28'de kademeli çekme işlemlerine ait örnekler verilmektedir.



Yeniden Çekme

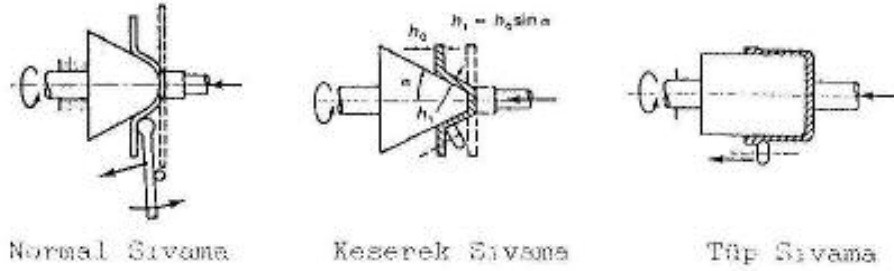
Ütölleme

Ters Yeniden Çekme

Sekil 8-28: Kademeli çekme işlemleri.

### 8.4. Sıvama

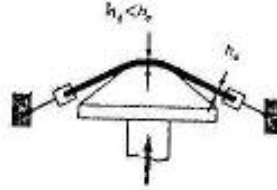
Sıvama adı piyasada yanlış olarak derin çekme işlemi için de kullanılmaktadır. Oysa sıvama da dönel simetriye sahip derin parçalar, düz bir sacın, üretilecek parça biçimine sahip ve dönen bir kalıp üzerine bastırılması yoluyla elde edilmektedir. İşlem el veya makine gücü ile yapılabilir. 3 mm kalınlığa kadar düşük karbonlu saclar ve 6 mm kalınlığa kadar alüminyum levhalar elle biçimlendirilebilmektedir. Şekil 8-29'da gösterildiği gibi normal sıvama, keserek sıvama ve tüp sıvama gibi değişik türleri vardır.



Şekil 8-29: Sıvama ile şekillendirme.

### 8.5. Germe

Bu işlemden sac iki ucundan veya çevresi boyunca çenelere bağlanmakta ve kalıp saca doğru ilerleyerek malzemeyi biçimlendirmektedir. İşlem sonrasında istanpanın saca ilk değdiği bölgedeki sac kalınlığında incelmeye sebep konusudur. Şekil 8-30'da bu işlemin uygulanışı şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 8-30: Germe işlemi.

### 8.6. Sacların Şekillendirilebilme Özelliklerinin Saptanması

Özellikle derin çekme işlemlerinde kullanılacak sacların sünek olması ve belirgin akma göstermemesi istenir. Derin çekmeye uygun bu tür saclar Derin Çekme Kalite'indeki saclar olarak nitelendirilir. Çelik yapımı sırasında Al ve Si ilavesiyle sakınleştirilen bu sacların istenen özellikleri kazanıp kazanmadığını anlamak için bazı deneylere başvurulur.



Bu deneyler;

- a. Malzemelerin standart mekanik deneyleri.
- b. Özel teknolojik deneyler,

olmak üzere iki grupta toplanmaktadır.

### 3.6.1. Standart Mekanik Deneyler

#### a. Sertlik Deneyi

Hızlı ve kolay uygulanabilen bir deney olmasına karşılık çok kaba ve yaklaşık sonuçlar verdiğinden ve yüzey şartları gibi faktörlerden önemli oranda etkilendiğinden pek fazla ilgi görmemektedir. Ancak aynı malzemenin değişik partileri arasında bir karşılaştırma yapabilmek amacıyla kullanılabilir. Düşük sertlik değerleri sacın şekillendirilme kabiliyetinin yüksek olabileceğinin bir işaretidir.

#### b. Çekme Deneyi

Çekme deneyi ile saptanan akma dayanımı, çekme dayanımı, üniform uzama ve kopma uzaması değerleri sacın şekil değiştirme kabiliyeti hakkında fikir verebilir. Aynı deneyle malzemenin belirgin akma gösterip göstermediği de anlaşılabilir.

Bilindiği gibi belirgin akma, yüzeyde kayma bantlarının oluşmasına ve homojen olmayan yerel şekil değişimlerine neden olduğundan şekillendirilecek sacların belirgin akma göstermesi istenmez. Bunun önüne geçmek için sıcak hadde sonrasında saclara %2-5 oranları arasında kalmak üzere soğuk haddeleme işlemi uygulanır. Bu işlem Temper Haddesi adını alır. Böylece malzeme belirgin akma sınırını haddeleme sırasında aşmış olur. Bu işlemi gören malzemenin belli bir süre içinde kullanılması gereklidir. Aksi halde Deformasyon Yaslanması gibi malzemeyi gevrekleştirici ve akmayı yeniden belirginleştirici durumlar ortaya çıkabilir.

Çekme deneyi verileri aynı zamanda gerilme-birim şekil değişimi grafiğinin çizilmesine de olanak sağlar. Bu grafikten malzemenin üniform olarak şekil değiştirebileceği deformasyon miktarı en belirlenebilir.

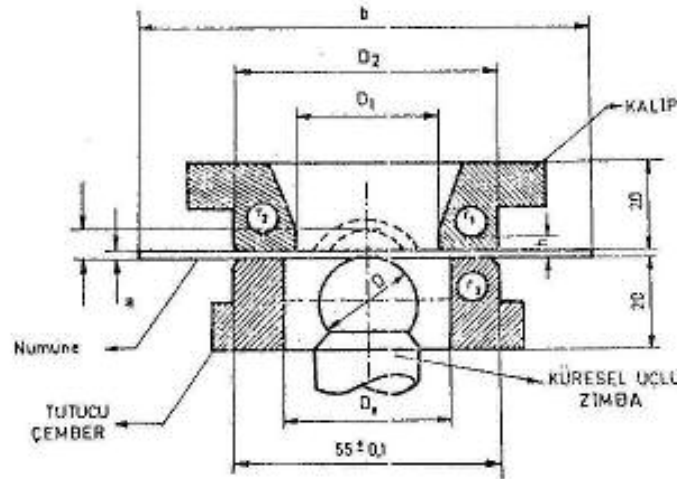
Bilindiği gibi üniform uzama malzemenin pekleşme kabiliyeti ile yakından ilgilidir. Yüksek pekleşme üsteli  $n$  değerine sahip malzemeler daha çok şekillenebilme yeteneği gösterirler. Diğer bir deyişle hızlı pekleşen malzemeler ( $n$  değeri büyük malzemeler) şekil değişiminin lokalize olmasına engel olmakta, deformasyonu diğer bölgelere de üniform olarak yaymaktadır. Böylece deformasyonun sadece bir bölgede yığılarak hasarın (yırtılma) çabuk oluşması engellenmektedir.

Çekme deneyleri yardımıyla düsey anizotropi katsayısı  $\bar{E}$  değerleri de saptanabilir. Bu değer malzemenin incelmeye karşı olan direncinin bir ölçüsüdür ve yüksek olması sacın derin çekme işlemlerine uygunluğuna gösterir.

### 8.6.2. Teknolojik Deneyler

#### a. Erichsen Çökertme Deneyi

Matris üzerine sabitlenmiş bir sacın küresel istampa ile yırtılmadan çökertilebileceği en büyük derinlik Erichsen Çökertme Değeri (mm) olarak tanımlanır. Şekil 8-31'de bu deneyin uygulanışı görülmektedir. Deneysel olarak bulunan değerler standartlarla karşılaştırılarak derin çekme özelliği konusunda yargıya varılmaya çalışılır.



Şekil 8-31: Erichsen çökertme deneyinde sacın ve takımların durumu

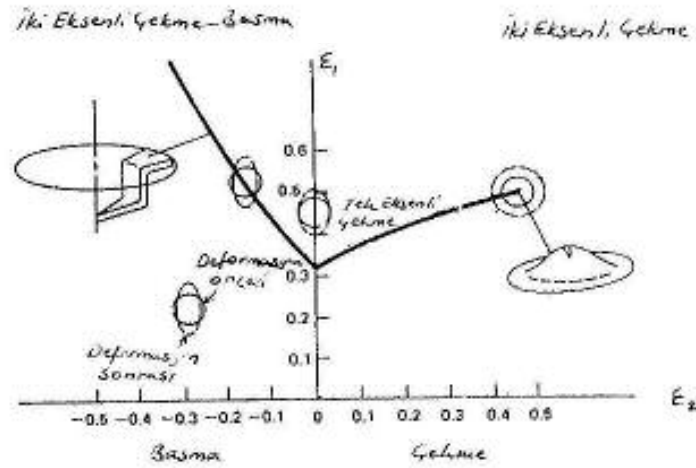
#### b. Derin Çekme Deneyi

Derin çekme şartlarında yapılan bu deneyde düz tabanlı istampa kullanılmakta ve saca yırtılma olmadan çekilebilecek en büyük  $D_0$  pul çapı (dolayısıyla  $SC0$ ) saptanmaya çalışılmaktadır.

#### c. Şekillendirme Sınır Diyagramı (SSD)

Özellikle 1960'lerden sonra geliştirilen bu diyagramlar yardımıyla şekillendirme problemlerinin çözümü için büyük kolaylıklar sağlanmıştır. Bu diyagramların elde edilmesinde önce sac üzerine yuvarlak daireler (grid) çizilmekte, daha sonra yırtılma veya yerel daralma olana kadar şekillendirmeye tabi

tutulmaktadır. Yırtılma olan bölgeye bitişik dairelerdeki şekil değişimleri (iki eksenle, biri büyük şekil değişimi diğeri küçük şekil değişimi olmak üzere) saptanmaktadır. Böylece yırtılmanın oluşacağı değişik koşullar (büyük ve küçük şekil değişimlerinin değişik kombinasyonları) elde edilerek, veri çiftlerinden bir diyagram oluşturulmaktadır. Şekil 8-32'de bu şekilde oluşturulmuş bir sınır şekillendirme diyagramı görülmektedir. Bu diyagramın üzerinde kalan şekillendirme koşulları yırtılmaya, yani sac şekillendirmede hasara yol açmakta, altında kalan bölgedeki şartlarda ise şekillendirme başarıyla tamamlanmaktadır.



Şekil 8-32: Sınır Şekillendirme Diyagramı (SSD).

Bu sınır şekillendirme diyagramları incelendiğinde küçük birim şekil değişimi miktarlarının arttırılması ile daha büyük şekillendirme miktarlarına ulaşabileceği görülmektedir. Yine bu diyagramlar yardımıyla değişik malzemelerin şekillendirme kabiliyetlerinin karşılaştırılması mümkün olmaktadır.

SSD diyagramları genellikle boyun verme (plastik dengesizlik) hali için elde edilmektedir. Ancak yırtılmanın hasar olarak kabul edildiği diyagramlara da rastlanılır. SSD diyagramları yüksek sıcaklıkta şekillendirme ve kalın sac kullanma koşullarında yukarı doğru, düşük pekleşme üsteline sahip malzemeler ve yüksek deformasyon hızlarında aşağı doğru kayar. Malzeme özelliklerinin karşılaştırması söz konusu ise deneylerin her malzeme için aynı koşullarda gerçekleştirilmesi zorunludur.

#### YARARLANILAN KAYNAKLAR

1. L.Çapan, Metallere Plastik Şekil Verme, Çağlayan Kitabevi 2.Basım, İstanbul, 1990.
  2. L.Çapan, Plastik Şekil Verme Teori ve Uygulaması, Birsen Yayınevi, İstanbul, 1984.
  3. S.Kayalı, C.Ensari, Metallere Plastik Şekil Verme ilke ve Uygulamaları, İTÜ Kimya-Metalurji Fakültesi Yayın No:86-1 İstanbul, 1986.
  4. O.Bodur, Metallere Plastik Şekil Verme Usulleri, Arpaz Matbaacılık, İstanbul, 1975.
  5. G.E.Dieter, Mechanical Metallurgy, 2.Baskı, McGraw Hill, Tokyo, 1976.
  6. J.A.Schey, Introduction to Manufacturing Processes, 2.Baskı, McGraw Hill, Singapore, 1987.
  7. T.Altan, S.Oh, H.Gegel, Metal Forming-Fundamentals and Applications, ASM Yayını, Ohio, 1983.
  8. L.E.Doyle, Manufacturing Processes and Materials for Engineers, Prentice Hall, New Jersey, 1969.
  9. O.D.Lascoe, Handbook of Fabrication Processes, ASM Yayını Ohio, 1988.
  10. B.Avitzur, Metal Forming: Processes and Analysis, McGraw Hill, New York, 1968.
  11. K.Lange, Handbook of Metal Forming, McGraw Hill, New York 1985.
  12. J.N.Harris, Mechanical Working of Metals, Pergamon Press, London, 1983.
  13. P.N.Rao, Manufacturing Technology, TaTa McGraw Hil, Delhi 1987.
  14. E.M.Mielnik, Metalworking Science and Engineering, McGraw Hill, New York, 1990.
-