

CİSİMLERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİ

Malzemeler uygulamada dış kuvvetlere maruzdur. Cisimler artan dış kuvvetler etkisinde önce şekil değiştirir sonra dayanımını yitirerek kırılır. Mekanik özellikler malzemelerin dış kuvvetler etkisinde ne kadar dayandığını ne kadar şekil değiştirdiğini ve nasıl şekil değiştirdiğini belirten özelliklerdir. Dayanım, rijitlik, süneklik ve sertlik tipik mekanik özelliklerdir. Düşük gerilmeler altında şekil değiştirmeler elastiktir, yani tersinirdir. Gerilme elastik sınırı aşarsa plastik, yani kalıcı şekil değiştirmeler oluşur. Elastik şekil değiştirmeye karşı direnç veya rijitlik malzemenin elastiklik modülü ile belirlenir. Elastiklik modülü içyapıya ve deney koşullarına duyarlı değildir. Diğer taraftan malzemenin plastik şekil değiştirme yeteneğini ve dayanımını temsil eden süneklik, mukavemet ve sertlik içyapıya ve uygulama süresi başta olmak üzere gerilmenin uygulama hızı, sıcaklık ve malzemenin mikro yapısına büyük ölçüde bağlıdır. Bu itibarla cisimlerin mekanik özellikleri laboratuvarında belirlerken uygulanan yükün doğası ve uygulama süresi ile çevresel etkiler mutlaka dikkate alınmalıdır. Mekanik özelliklerin kaynağı atomlararası bağ kuvvetleri olmakla beraber içyapıya ve çevre koşullarına büyük ölçüde bağlı olduklarından aralarında doğrudan bir bağ kurmak olanaksızdır.

İnşaat mühendisinin görevi belirli yüklere maruz yapı elemanında meydana gelen gerilmeleri ve gerilme dağılımını belirlemektir. Bu deneysel olarak ve/veya teorik olarak matematiksel gerilme analizi yapmak suretiyle gerçekleştirebilir. Bir malzemenin uygulanan bir kuvvet etkisinde nasıl dayandığını belirlemek için çeşitli deneyler gerçekleştirilir. Bu deneylerden elde edilen sonuçlar malzemelerin mekanik özellikleridir.

Gerilme ve Şekildeğiştirme

Cisim içinde belirli bir noktada belirli bir doğrultuda sonsuz küçük bir alana etkiyen iç kuvvet *gerilme* olarak bilinir. Gerilme σ ile gösterilir ve $\sigma = \frac{F}{A_0}$ şeklinde belirlenir. Burada F kesit alanına dik olarak etkiyen kuvveti ve A_0 kuvvet uygulanmadan önceki cismin kesit alanını göstermektedir. Gerilme kgf/cm² veya MPa cinsinden ifade edilir. 1 MPa=10⁶ N/m²=1 N/mm².

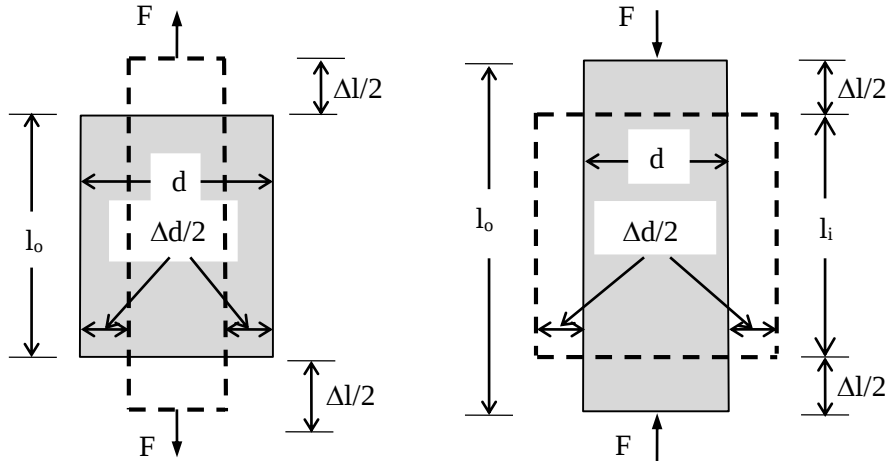
Birim boyda meydana gelen deformasyona *birim şekildeğiştirme oranı* adı verilir ve ε ile gösterilir. Buna göre, birim şekildeğiştirme oranı $\varepsilon = \frac{l_i - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0}$ şeklinde ifade edilir. Burada

l_0 yük uygulanmadan önceki boy ve l_i yük uygulandıktan sonra herhangi bir andaki boydur. Genellikle $l_i - l_0$ miktarı Δl ile gösterilir ve bu orijinal boyda kıyasla boyda meydana gelen değişimi ifade etmektedir. Şekildeğiştirme oranı birimsizdir ancak sıklıkla mm/mm, cm/cm veya m/m şeklinde ifade edilir. Şekildeğiştirme oranı genellikle 100 ile çarpılır ve genellikle yüzde (%) olarak ifade edilir.

Dış kuvvet cisimde çekme, basınç ve kayma gibi üç temel gerilemeye neden olabilir. Gerçekte çoğu zaman dış kuvvet sadece kayma etkisinden ziyade burulma etkisi yaratır. Gerilme tipine

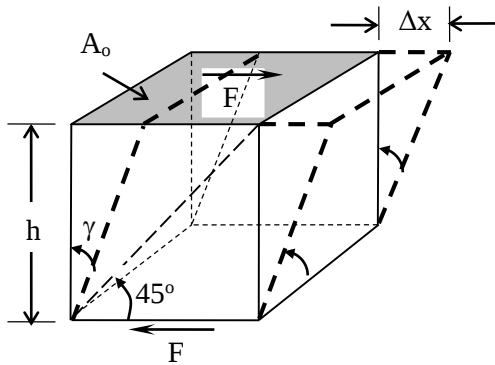
bağı olarak malzeme bünyesinde meydana gelen şekil değiştirme çekme şekil değiştirme, basınç şekil değiştirme veya kayma şekil değiştirme olabilir.

Gerilme etkisinde cismin boyutları değişir. Çekme halinde boy uzar, cismin eni daralır. Basınç etkisinde tersi olur. Her iki halde de açılarda değişiklik olmadığı kabul edilir. Kayma etkisinde ise yalnız açılar değişir, boyutlarda bir değişme olmadığı kabul edilir.



Basınç kuvveti genel olarak negatif kabul edilir ve dolayısıyla neden olduğu gerilme de negatif olarak alınır. Bunun sonucu olarak, $l_i < l_o$ olduğu için hesaplanan basınç şekil değiştirmeleri de negatif alınması gerekir. Özellikle metaller için çekme deneyinin uygulanabilirliği ve değerlendirilmesi daha kolaydır.

Kayma gerilmesi τ ile gösterilir ve $\tau = \frac{F}{A_o}$ şeklinde hesaplanır. Burada, F cismin alt ve üst yüzeylerine etkiyen kuvveti, A_o bu kuvvetin etki ettiği yüzeyin alanını göstermektedir. Kayma şekil değiştirme, şekil değiştirme açısı γ 'nın tanjantı olarak tanımlanır. Kayma gerilmesi ve deformasyon birimleri, çekme gerilmesi ile aynıdır.

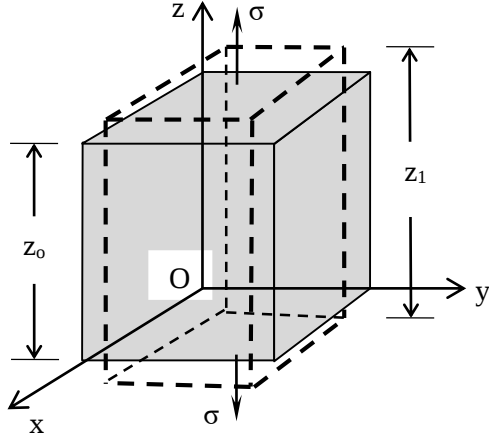


γ şekil değiştirme açısı çok küçük olduğu

için $\gamma = \frac{\Delta x}{h}$ olarak alınabilir. Böylece,

$$\tan \gamma = \frac{\Delta x}{h} \quad \gamma \text{ çok küçük olduğu için}$$

$$\tan \gamma = \gamma \quad \gamma = \frac{\Delta x}{h} \text{ yazılabilir.}$$



Uzunluğu z_0 olan bir cismin eksen boyunda σ gerilmesine maruz kaldığında cisim Δz kadar uzar. Çekme şekil değiştirmesi ε_z , cismin boyunda meydana gelen değişimin orijinal boyuna oranı $\Delta z / z_0$ şeklinde bulunur.

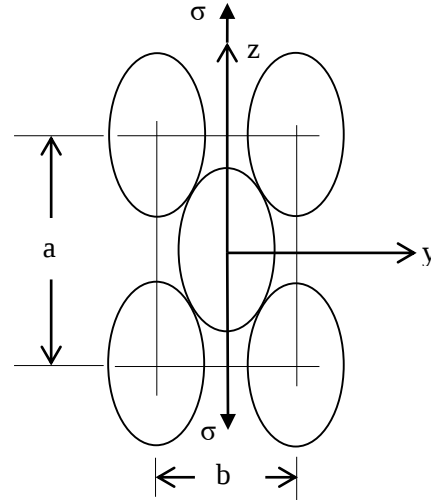
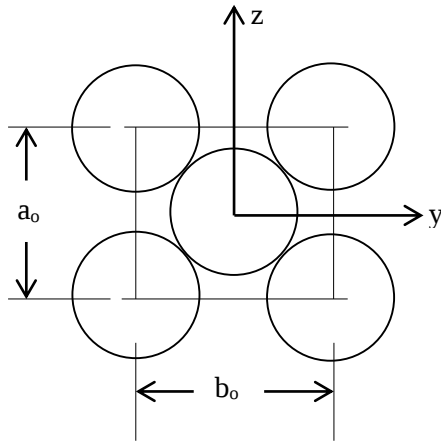
Hooke yasasına göre,

$$\sigma = E \times \varepsilon_z = E \times \frac{\Delta z}{z_0} \text{ dir.}$$

Burada E, cismin elastiklik modülüdür.

Çekme halinde gerilme doğrultusunda meydana gelen uzamayı gerilmeye dik doğrultularda meydana gelen daralma takip eder. Eksene dik doğrultularda meydana gelen şekil değiştirme izotrop cisimlerde birbirine eşittir. Yani, $\varepsilon_x = \varepsilon_y$ dir. Uygulanan gerilmeye dik doğrultudaki şekil değiştirme oranının gerilme doğrultusundaki şekil değiştirme oranına oranı *Poisson oranı* olarak bilinir ve ν ile gösterilir. Poisson oranı basitçe aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\nu = \frac{\text{Gerilmeye dik yönde meydana gelen deformasyon oranı}}{\text{Gerilme yönünde meydana gelen birim deformasyon oranı}}$$



$$\varepsilon_z = \frac{a - a_0}{a_0} > 0$$

$$\varepsilon_y = \frac{b - b_0}{b_0} < 0$$

$\nu > 0$ dır.

$$\nu = -\frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_z} = -\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_z}$$

İfadedeki negatif işaret, Poisson oranının ν her zaman pozitif olduğu gerçeği nedeniyle. Zira ε_x ve ε_z oranları birbiriyle daima zıt işaretlidir.

Poisson oranı izotropik cisimlerde teorik olarak $\frac{1}{3}$ olup alacağı maksimum değer 0.50 dir. Pek çok metal ve alaşımlar için Poisson oranı 0.25 ila 0.35 arasında değerler aldığı deneysel olarak ortaya konmuştur. Betonlar için $\nu = 0.15$ ila 0.20 arasında değerler alır. Poisson oranı mantarda 0 iken kauçukta yaklaşık olarak 0.5 dir. Bu itibarla şekil değiştirme hesaplarında kauçuk için sıkıştırılmaz malzeme varsayımı kullanılır.

Hidrostatik basınç gerilmesi etkisinde cismin hacmi azalır. Hacimdeki azalma miktarı $\varphi = \frac{\Delta V}{V_0}$

bağıntısıyla bulunur. Burada ΔV hacimdeki değişimi, V_0 cismin ilk hacmidir.

Bu bağıntı $\varphi = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z = \frac{\sigma_1}{E} \times (1 - 2\nu)$ şeklinde de ifade edilebilir.

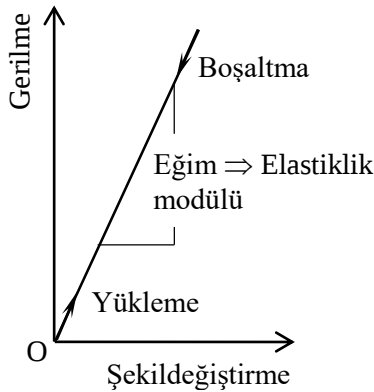
$\nu = 0.5$ ise $\varphi = 0$ olur. Cismin hacmi değişmez.

$\nu < 0.5$ ise $\varphi > 0$ olur. Cismin hacmi artar (basit çekme hali).

$\nu > 0.5$ ise $\varphi < 0$ olur. Cismin hacmi azalır.

ELASTİK ŞEKİLDEĞİŞTİRME

Gerilme altında şekil değiştiren cisim gerilme kalktığında eski haline dönüyorsa bu cisme *elastik cisim* ve bu davranış biçimine *elastik davranış* denir. Hemen hemen tüm katı cisimler belli bir sınıra kadar elastik davranırlar. Cisimlerde kayma açısı çok küçükse şekildeğiştirme yalnız elastik olmakla kalmaz aynı zamanda şekil değiştirmeye neden olan gerilme ile de orantılı olur. Yani, Hooke yasası geçerli olur.



Elastik şekildeğiştirme kalıcı değildir. Yani, gerilme kalktığında cisim ilk boyutlarına döner. Gerilme kalktığında, boşaltma yükleme yolunu geriye doğru takip ederek başlangıç noktasına döner.

$$\sigma = k \times \varepsilon \quad \sigma = E \times \varepsilon$$

Burada E, elastiklik modülü ya da Young's modülü olarak bilinir.

Gerilme ile şekil değiştirmenin orantılı olarak değiştiği davranışa *lineer elastik davranış* denir ve ilişkinin eğimi elastiklik modülünü verir. Elastiklik modülü, elastik şekil değiştirmeye karşı cismin gösterdiği direnç veya rijitlik olarak da tanımlanabilir. Büyük elastiklik modülü daha rijit cisim ya da verilen bir gerilme altında daha küçük şekildeğiştirme anlamına gelir. Elastik şekildeğiştirme, atomsal ölçekte, atomlararası bağların gerilmesiyle atomlararası mesafenin çok küçük miktarda değişmesi biçiminde kendini gösterir. Başka bir ifadeyle, elastiklik modülü atomlararası denge mesafesinde bileşke kuvvet eğrisinin eğimi ile orantılı olup büyüklüğü komşu atomların birbirinden ayrılmasına karşı gösterilen direnç veya atomlararası bağ kuvvetlerinin bir ölçüsüdür.

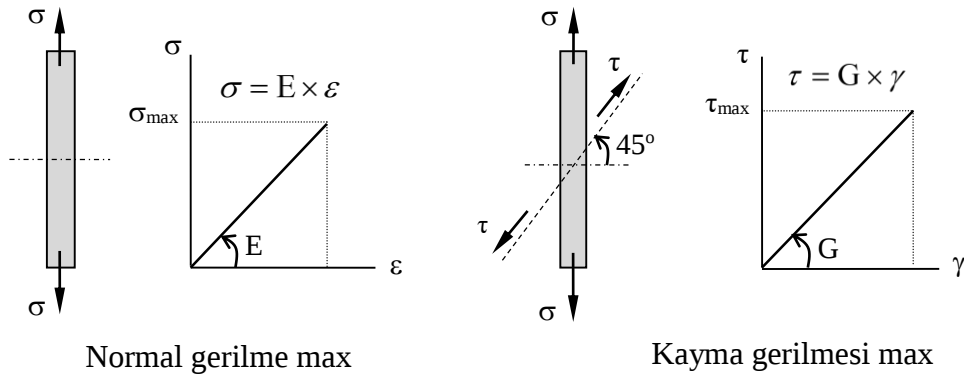
Metallere kıyasla seramiklerin elastiklik modülü daha yüksektir; polimerlerde düşüktür. Bu üç malzeme grubunda elastiklik modülündeki fark farklı atomsal bağın varlığının bir sonucudur. Düşük gerilme düzeyinde gerilme-şekildeğiştirme karakteristikleri çekme ve basınç hallerinde görünüş olarak aynıdır.

Basit kayma halinde, lineer elastik cisimlerde kayma gerilmesi τ ile kayma şekil değiştirmesi γ orantılıdır. Yani, $\tau = G \times \gamma$ bağıntısı geçerlidir. Burada G , kayma modülüdür. Kayma gerilmesi altında cismin hacmi değişmez, sadece biçimi değişir. Elastiklik modülü ile kayma modülü orantılı olup aralarında aşağıdaki gibi bir ilişki vardır.

$$E = 2G \times (1 + \nu) \quad G = \frac{E}{2 \times (1 + \nu)} \quad \text{Elastiklik modülü ve Poisson oranı cisimlerin temel iki özelliğidir.}$$

Çoğu malzeme için $G \cong 0.40 \times E$ ilişkisi geçerlidir. Buna göre elastiklik modülü bilinmesi durumunda kayma modülü pek çok malzeme için yaklaşık olarak belirlenebilir.

Atomlararası kuvvetler atomları sürekli olarak aynı konumda kalmalarını zorlarlar. Bu nedenle bir elastiklik söz konusudur. Daha önce bahsedildiği gibi cisimlerin çoğunluğu küçük şekil değiştirmeler halinde tam elastik davranış gösterirler. Bu küçük elastik şekil değiştirmeler aşılması halinde cisim plastik veya kalıcı şekil değiştirme yapabilir. Hatta kopabilir, kırılabilir. Kalıcı şekil değiştirme yalnızca kayma gerilmesi halinde meydana gelir. Örneğin, $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$ eşitliğinin geçerli olduğu hidrostatik basınç veya basit çekme halinde kayma gerilmesi oluşmaz. Belli bir gerilme etkisinde oluşan kalıcı şekil değiştirmenin büyüklüğü esasta meydana gelen kayma gerilmesinin büyüklüğüne bağlıdır. Buna karşın göçme veya kırılma koşulları genellikle çekme gerilmesinin şiddetine bağlıdır. Örneğin, uygulanan eksenel F kuvveti belli geometrik düzlemlerde, özellikle belli doğrultularda, τ kayma gerilmesinin meydana gelmesine neden olur ve böylece cismin bünyesinde kayma şekil değiştirmeleri meydana gelir. Bileşke kayma gerilmesinin büyüklüğü eksenel çekme kuvvetinin düzlem ve doğrultularla yapmış olduğu açılara bağlıdır. Yalnızca basit çekme veya basınca maruz cisimlerde çekme gerilmesi uygulanan kuvvete dik düzlemler üzerinde maksimum olur. Bileşke kayma gerilmesi, çekme gerilmesi düzlemi ile 45° açı yapan düzlemler üzerinde maksimum olur.



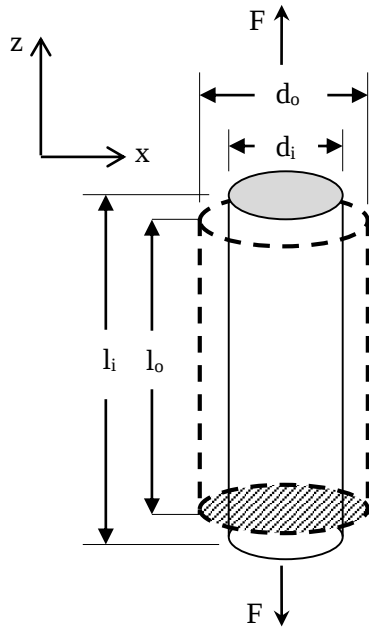
Basit çekme ve basit basınç etkisindeki cisimlerde normal gerilmenin en yüksek olduğu düzlemler uygulanan kuvvete dik olan düzlemlerdir. Buna karşılık kayma gerilmesinin en yüksek olduğu düzlemler kuvvetle 45° lik açı yapan düzlemlerdir.

Bir elastik cisme uygulanan gerilme sürekli olarak arttırıldığında kuvvete dik düzlemlerin iki tarafındaki atomlar sürekli olarak birbirinden uzaklaşırken kuvvetle 45° lik açı yapan düzlemlerin iki tarafındaki atomlar da düzlem boyunca bir miktar kayarak ötelenir. Sonuçta cisim atomların ya uygulanan gerilmeye dik bir kesit boyunca ayrılması veya 45° eğimli bir

düzlem boyunca kayması nedeniyle kopar. Kopma mekanizması nasıl olursa olsun, kopma anında cisme uygulanmakta olan çekme gerilmesine cismin *çekme dayanımı* denir. Dayanım (σ - ϵ) ve (τ - γ) diyagramında en yüksek gerilme değeridir. Kopma anına kadar meydana gelen şekildeğiştirme oranına *kopma-uzama oranı* veya *kırılma-kısalma oranı* denir.

Örnek: 10 mm çapında silindirik pirinç bir çubuğa aksenal bir çekme kuvveti uygulanıyor. Çubuğun çapı 2.5×10^{-3} mm kadar değişmesi için ne kadar bir kuvvet uygulanmalıdır? Pirinç için elastiklik modülü 10.1×10^5 kgf/cm² ve Poisson oranı 0.35 dir. Şekildeğiştirme tamamen elastik kabul edilecektir.

Çözüm: Çubuğun şekil değiştirme durumu şematik olarak aşağıda verilmektedir.



$$\epsilon_z = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{l_i - l_0}{l_0} \quad \epsilon_x = \frac{\Delta d}{d_0} = \frac{d_i - d_0}{d_0}$$

x doğrultusundaki şekil değiştirme oranı, daralma olduğu için negatiftir.

$$\epsilon_x = \frac{\Delta d}{d_0} = \frac{d_i - d_0}{d_0} = \frac{-2.5 \times 10^{-3}}{10} = -2.5 \times 10^{-4}$$

z doğrultusundaki şekil değiştirme oranı,

$$\epsilon_z = -\frac{\epsilon_x}{\nu} = -\frac{(-2.5 \times 10^{-4})}{0.35} = 7.14 \times 10^{-4}$$

Şekil değiştirme elastik olduğuna göre Hooke yasası geçerlidir. Buna göre,

$$\sigma = \epsilon_z \times E = (7.14 \times 10^{-4}) \times 10.1 \times 10^5$$

$$\sigma \cong 721.4 \text{ kgf/cm}^2$$

Uygulanan kuvvet şu şekilde hesaplanabilir.

$$F = \sigma \times A_0 = \sigma \times \pi \times \left(\frac{d_0}{2}\right)^2 = 721.4 \times \pi \times (0.5)^2$$

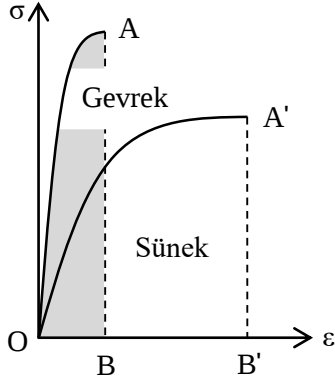
$$F = 180.35 \times \pi \cong 567 \text{ kgf}$$

$$r = \frac{d_0}{2} = \frac{10}{2} = 5 \text{ mm}$$

$$r = 0.5 \text{ cm}$$

SÜNEKLİK

Süneklik cismin kırılmasına veya kopmasına sebebiyet veren plastik şekildeğiştirme miktarıdır. Kırılıncaya kadar çok az şekil değiştiren cisim *gevrek cisim*, kırılıncaya kadar büyük miktarda şekil değiştiren cisim *sünek cisim* olarak tanımlanır. Gevrek malzemelerin kırılma şekil değiştirmeleri yaklaşık %5'ten daha azdır.



Süneklik sayısal olarak ya boyda yüzde olarak uzama ya da kesitte yüzde olarak daralma olarak ifade edilebilir. Yüzde olarak cismin boyunda meydana gelen uzama, kopma anındaki plastik şekil değiştirme olup aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$EL(\%) = \left(\frac{l_i - l_o}{l_o} \right) \times 100$$

Burada l_i cismin kopma anındaki boyunu, l_o , cismin deney öncesi ölçü boyunu göstermektedir.

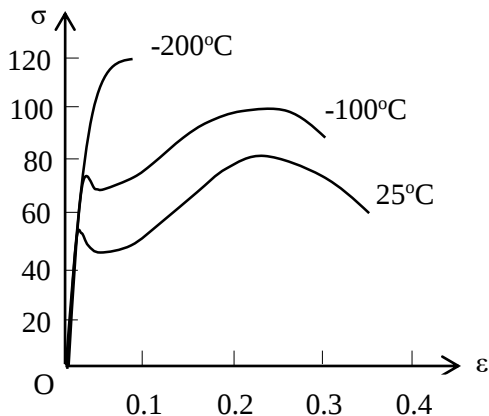
Uzama miktarı numunenin ölçü boyuna bağlıdır. Ölçü boyu l_o küçüldükçe yüzde uzama, $EL(\%)$, büyük değerler alır.

Cismin kesitinde meydana gelen daralma yüzde olarak $AR(\%) = \left(\frac{A_o - A_i}{A_o} \right) \times 100$ şeklinde

hesaplanabilir. Burada A_o cismin orijinal kesit alanı, A_i kopma anındaki kesit alanıdır. Kesit alanındaki daralma l_o ve A_o büyüklüklerinden bağımsızdır. Belli bir cisim için $EL(\%)$ ve $AR(\%)$ büyüklükleri birbirinden farklıdır. Metallerin çoğu oda sıcaklığında hatırı sayılır derecede sünektir. Ancak bazıları sıcaklık düştükçe gevrekleşirler.

Malzemelerin sünekliklerinin bilinmesi en azından iki bakımından önemlidir. İlki, yapı elemanının göçmeden önce ne kadar plastik deformasyon yapabileceğini tasarımcı görebilir. İkincisi, yapım esnasında müsaade edilebilir deformasyon derecesine karar verilebilir.

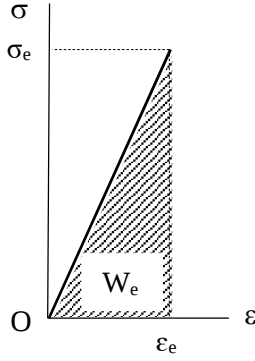
Akma dayanımı, çekme dayanımı ve süneklik gibi mekanik özellikler metalin daha önceki yükleme durumu ile yabancı maddelerin varlığına ve ısı işleme duyarlı olmasına karşın elastiklik modülü bu tür işlemlere duyarlıdır.



Yanda verilen grafikten görüleceği üzere sıcaklık artışına bağlı olarak çeliğin hem akma dayanımı hem çekme dayanımı azalırken elastiklik modülünün değişimi ihmal edilebilir düzeydedir.

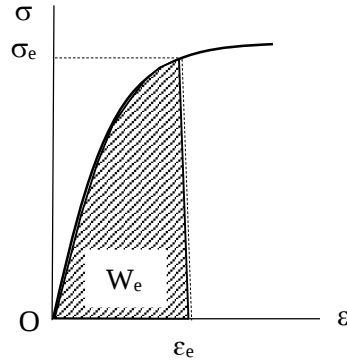
ELASTİK ENERJİ

Bir cisme elastik sınıra kadar şekildeğiştirme yaptırabilmek amacıyla sarf edilen enerji *elastik enerji* olarak bilinir ve gerilme-şekildeğiştirme (σ - ε) eğrisinde elastik sınıra kadar olan kısmın altında kalan alanla gösterilir. Bu alan diyagramının birim ve ölçeğiyle hesaplandığında malzemenin birim hacmi için harcanan enerji veya yapılan işi verir.



Elastik enerji

$$W_e = \frac{1}{2} \sigma_e \times \varepsilon_e$$



Elastik enerji

$$W_e = \int_0^{\varepsilon_e} \sigma \times d\varepsilon$$

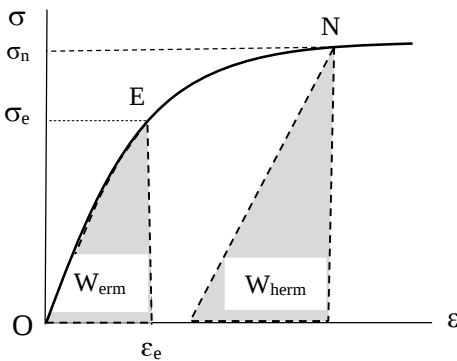
Kopuncaya kadar veya kırılıncaya kadar lineer elastik davranış gösteren malzemeler için elastik enerji eğri altında kalan üçgen alana eşittir. Davranış elastik ancak lineer olmayan hal için elastik sınıra kadar eğri altında kalan alan elastik enerjiyi verir. Bu durumda eğri altında kalan alanı belirlemek için integral alınması gerekir.

Lineer elastik cisim için $\sigma = E \times \varepsilon$ bağıntısı kullanılırsa elastik enerji $W = \frac{1}{2} \sigma \times \varepsilon = \frac{E \times \varepsilon^2}{2}$

elde edilir. $\sigma = \sigma_e$ elastik sınır değeri konursa $W_e = \frac{\sigma_e^2}{2 \times E}$ elde edilir.

Bu bağıntı bir cisimde plastik şekil değiştirme oluşturmaksızın birim hacimde depolanabilecek maksimum elastik şekil değiştirme enerjisini verir ve bu *elastik rezilyans modülü*, W_{erm} olarak bilinir. Bu modül malzeme özelliklerine olduğu kadar malzemenin hangi gerilme düzeyine kadar yüklenmiş olduğuna bağlıdır. Özellikle amortisör gibi yay üretiminde kullanılan malzemelerin yüksek rezilyansa sahip olması istenir. Rezilyant malzemeler olarak bilinen bu malzemelerde elastiklik sınırı yüksek ancak elastiklik modülü düşük malzemelerdir.

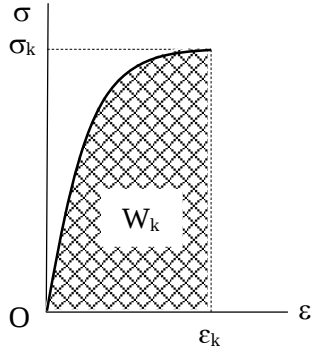
Plastik bölgede şekil değiştirmenin bir kısmı elastiktir. Kuvvet kalkınca bir miktar elastik toparlanma oluşur. Akma sınırı ötesinde tersinir elastik şekil değiştirme enerjisine *hiperelastik rezilyans modülü*, W_{herm} denir.



$$W_{erm} = \frac{\sigma_e^2}{2 \times E}$$
 Lastik rezilyans modülü

$$W_{herm} = \frac{\sigma_n^2}{2 \times E}$$
 Hiperelastik rezilyans modülü

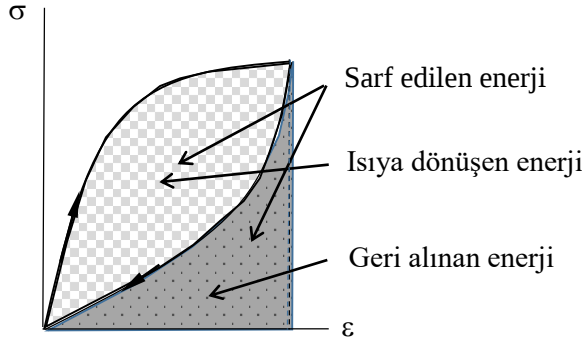
Gerilme-şekil değiştirme eğrisi (σ - ε) altında kalan toplam alan “kopma işi” veya “kırılma işi” olarak bilinir aşağıdaki gibi hesaplanır.



Eğri altındaki alan $W_k = \int_0^{\varepsilon_k} \sigma \times d\varepsilon$ şeklinde hesaplanır.

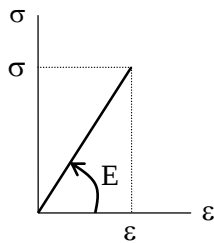
Tam elastik malzemeler bu enerjinin tamamını depolar ve uygulanan kuvvet kaldırıldığında cisim depoladığı enerjiyi geri verir.

Tam elastik olmayan bazı malzemelerde, örneğin termoplastik malzemelerde bu enerjinin bir kısmı ısıya dönüşürken bir kısmı ise yük kaldırıldığında iade edilir.



Burada elastik enerji, yani geri alınan enerji, geri dönüş eğrisinin altındaki alanla gösterilir. Yükleme ve boşaltma eğrilerinin arasındaki alan cisim bünyesinde ısıya dönüşen enerji miktarıdır.

Örnek: Lineer-elastik olduğu bilinen bir malzemeden yapılmış 2 cm^2 kesitinde 50 cm boyunda bir çubuk 5 tonluk bir kuvvetle çekildiğinde 0.5 mm uzamaktadır. Bu malzemenin elastiklik modülünü bulunuz.

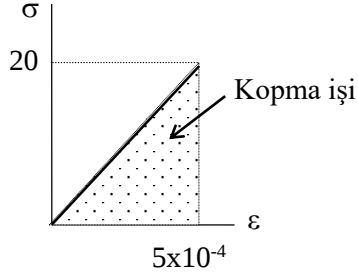


$$\sigma = \frac{F}{A_0} = \frac{5000}{2} = 2500 \text{ kgf/cm}^2 \quad \varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{0.5}{500} = 10^{-3}$$

$$\sigma = \varepsilon \times E \quad \Rightarrow \quad E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

$$E = \frac{2500}{10^{-3}} = 2.5 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2 \text{ olur.}$$

Örnek: Çekme dayanımı 20 kgf/mm², kopma-uzama oranı 5x10⁻⁴ olan bir malzeme için kopma işini hesaplayınız. Malzeme lineer-elastiktir. Bu malzemeden yapılmış 100 mm² kesitinde ve 100 cm boyunda bir çubuğu koparmak için harcanan enerjiyi hesaplayınız.



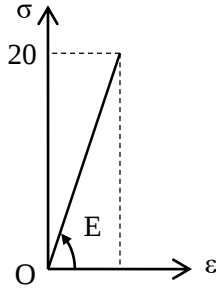
Kopma işi

$$W_k = \frac{1}{2} \times \sigma_m \times \varepsilon_k = \frac{1}{2} \times 20 \times 5 \times 10^{-4} = 5 \times 10^{-3} \text{ kgf/mm}^2$$

Harcanan enerji=Birim kopma işi × Hacim

$$W = W_k \times V_o = 5 \times 10^{-3} \times 100 \times 1000 = 500 \text{ kgf} \times \text{mm}$$

Örnek: Kopuncaya kadar lineer-elastik davranan bir cismin çekme dayanımı 20 kgf/mm² ve elastiklik modülü 10⁴ kgf/mm² dir. Cimin elastik şekil değiştirme enerjisini hesaplayınız.



Birim hacim başına yapılan iş

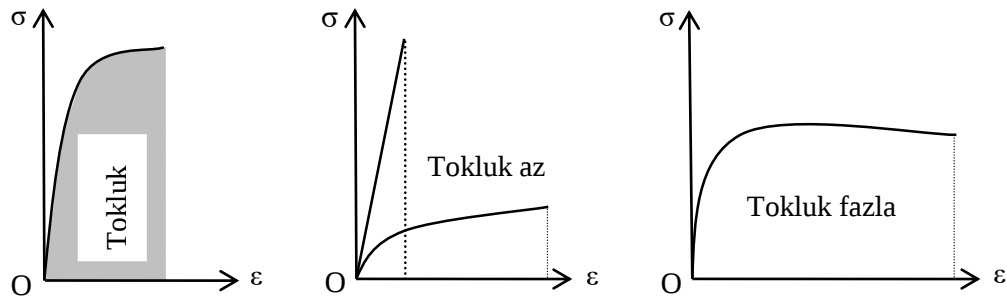
$$W_k = \int_0^{\varepsilon} \sigma d\varepsilon = \int_0^{\varepsilon} E \varepsilon d\varepsilon = \frac{E \varepsilon^2}{2} = \frac{\sigma^2}{2 E}$$

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E}$$

$$W_k = \frac{\sigma^2}{2 \times E} = \frac{(20)^2}{2 \times 10^4} = 0.02 \text{ kgf/mm}^2 \text{ bulunur.}$$

TOKLUK

Tokluk bir cismin kırılıncaya kadar sarf edilen enerji miktarıdır. Başka bir ifadeyle, tokluk birim hacimde bir cismi kırmak veya koparmak için gerekli enerjinin bir ölçüsüdür. Tokluğun belirlenmesinde yükün uygulama biçimi kadar numune geometrisi de önemlidir.

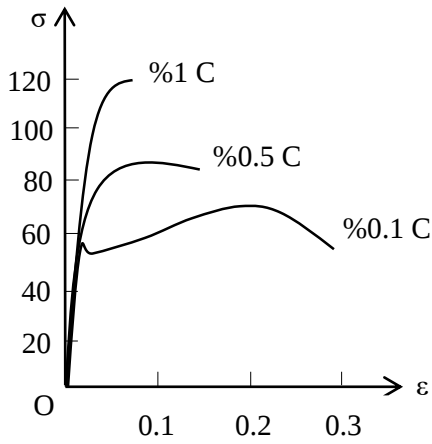


Tokluğun birimi (σ-ε) diyagramının birimi ve ölçeğiyle hesaplandığında cismin birim hacmi için harcanan enerjiyi verir. Basit çekme deneyi için harcanan enerji aşağıdaki şekilde hesaplanabilir.

$$\dot{I}=\int(kuvvet, F)\times(uzama miktarı, dl)$$

$$\text{Birim hacim için harcanan enerji} \quad W_o = \int \frac{F}{A} \times \frac{dl}{L} = \int_0^{\epsilon_k} \sigma \times d\epsilon$$

Burada, A ve L numunenin boyutlarıdır. Bir cismin tok olabilmesi için hem dayanımı yüksek hem de sünek olması gerekir ve çoğunlukla sünek cisimler gevrek olanlara nazaran daha tokurlar. Tok cisimler genellikle orta düzeyde dayanıma ve sünekliğe sahiptirler (eğri altındaki alan maksimum olması hali). Dayanımı yüksek ve sünekliği düşük cisimlerin tokluğu azdır (genellikle dayanım arttıkça süneklik azalır). Dolayısıyla, en yüksek dayanıma sahip cisimler en yüksek kırılma direncine sahip değildir (cismi kırmak veya koparmak için maksimum enerji veya işe gereksinim var).



Süneklik ve mukavemetten başka üçüncü önemli özellik tokluktur. Bazı uygulamalarda tokluğu yüksek malzemelere gereksinim duyulur. Yanda verilen grafikten görüldüğü gibi karbon oranı değiştikçe çeliğin davranışı değişmektedir. Karbon oranı düştükçe çeliğin dayanımı azalırken tokluğu önemli derecede artmaktadır. Yüksek karbonlu çeliklerin dayanımı yüksek ancak tokluğu çok azdır.

PLASTİK ŞEKİLDEĞİŞTİRME

Metaller çoğunlukla sünek davranış gösterirler; kopmadan önce önemli ölçüde plastik şekil değiştirirler. Seramiklerin tümü gevrekler; plastik şekil değiştirme oluşmadan kırılırlar. Lineer polimerler çoğunlukla amorf yapılıdır: Plastik şekil değiştirme molekül zincirlerinin doğrulup birbirleri üzerinde kayması sonucu oluşur. Uzayağı polimerleri ise gevrek davranış gösterirler.

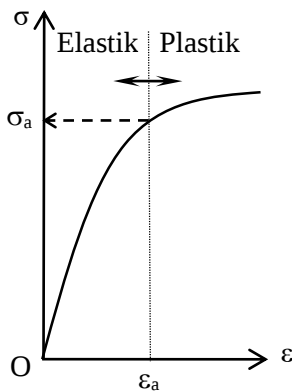
Gerilme etkisinde şekil değiştiren bir katı cisim gerilme kalktığında şekil değiştirmiş haliyle kalıyorsa bu cisme plastik cisim, bu davranış biçimine plastik davranış adı verilir. Bunun nedeni gerilmeye maruz cismin iç yapısında meydana gelen kalıcı değişikliklerdir. Bu değişiklikler malzeme cinsine göre farklılık gösterir. Metallerde kalıcı iç yapı değişiklikleri atom düzlemlerinin birbiri üzerinde kayması biçiminde gerçekleşir. Bunun nedeni büyük ölçüde dislokasyon hareketinden doğan kayma olayıdır. Bir cisim ancak kayma gerilmesi etkisinde plastik şekil değiştirme yapabilir. Hidrostatik gerilme hariç, bütün gerilme halleri daima kayma bileşeni meydana getirirler. Basit çekmeye veya basit basınca maruz cisimlerde maksimum kayma kuvvetleri 45°'lik açı yapan düzlemlerde olduğu bilinmektedir. Metal kristallerinde çok sayıda kolay kayma düzlemi mevcut olduğundan bunların birçoğu kuvvetle 45° veya ona yakın bir açı yapan konumlarda bulunabilir. Kusursuz bir kristalde kayma ancak atomlararası bağ kuvvetlerini yenerek oluşabilir. Bağ kuvvetlerinin kaymaya karşı gösterdiği dirence *teorik mukavemet* denir.

Bir metal numuneye çekme gerilmesi uygulandığında numune önce elastik davranış gösterir; atomlar denge konumlarından bir miktar ayrılırlar. Uygulanan gerilme belirli bir değere ulaştığında yukarıda sözü edilen kolay kayma düzlemlerinde kayma hareketi başlar ve bu hareket sonucu cismin boyunda bir uzama meydana gelir. Ancak bu uzama atom düzlemlerinin kuvvet etkisiyle yer değiştirmesi sonucu gerçekleştiğinden uygulanan kuvvet kaldırıldığında kendiliğinden yok olmaz. Böyle bir cisme uygulanan kuvvet kaldırıldığında cismin yapmış olduğu elastik şekil değiştirmeler yok olur. Kayma sonucu meydana gelen şekil değiştirmeler kalıcı olur.

Metallerde kolay kayma düzlemleri sayısı fazla olduğundan ve atomlar arasında gerçek bir bağ mevcut olmadığından kayma olayı kolayca gerçekleşebilir. Ancak metal alaşımlarında alaşımlama sonucu düzlemlerin kayması zorlaştığından çok az miktarda plastik şekil değiştirme oluşur. Yine çeşitli yollarla sertleştirilmiş metallerde de plastik şekil değiştirme miktarı azdır.

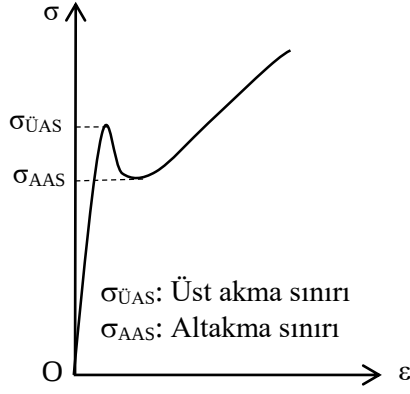
Kayma olayının başladığı gerilme düzeyi elastik davranışın plastik davranıştan saptığı noktaya karşılık gelir. Kaymanın fark edilebilir olduğu gerilme düzeyi *akma dayanımı* olarak bilinir. Kayma sonucu atomlararası bağlar kopar; birbirine göre yer değiştirirler ve yeni komşu atomlarla bağlar oluştururlar. Gerilme kaldırıldığında atomlar orijinal konumlarına dönmezler.

Çoğu katı cisimler yaklaşık olarak sadece 0.005 (%0.5) kadar elastik deformasyon yaparlar. Cisimler bu değer üzerinde bir şekil değiştirmeye maruz kaldıklarında gerilme ile şekil değiştirme arasındaki orantılık bozulur (Hooke yasası geçerliliğini yitirir) ve plastik şekil değiştirme meydana gelir. Plastik deformasyona bağlı olarak meydana gelen kayma şekil değiştirmesi esasta dislokasyon hareketinin bir sonucudur. Bazı durumlar hariç, plastik deformasyon ile dislokasyon hareketi birbiriyle doğrudan ilişkilidir; biri diğeri olmaksızın meydana gelmez. Bu aslında tüm kalıcı deformasyonların dislokasyon hareketinin bir sonucu olduğunu göstermektedir. Başka bir ifadeyle, plastik deformasyon atomların komşu atomlarla olan bağlarının kopması sonucu gerçekleşir. Bunun sonucunda gerilme kaldırılrsa dahi cisim ilk boyutlarına dönmez.



Plastik şekil değiştirme mekanizması kristal ve amorf cisimlerde farklıdır. Kristal yapılu katı cisimlerde deformasyon dislokasyon hareketini gerektiren ve kayma olarak bilinen bir süreç sonucu gerçekleşir. Kristal yapılu olmayan katı cisimlerde (aynı zamanda sıvılarda) plastik şekil değiştirme viskoz akma mekanizması sonucu meydana gelir.

Bazı çelikler ve diğer bazı malzemeler açıkça görülebilen bir elastik-plastik geçiş sergiler ve *akma* olarak bilinen olay sonucu aniden meydana gelir. Öte yandan, belirli düşük karbonlu çelikler için gerilme-şekil değiştirme eğrileri, aşağıda gösterildiği gibi bir "çift akma noktası" gösterir.



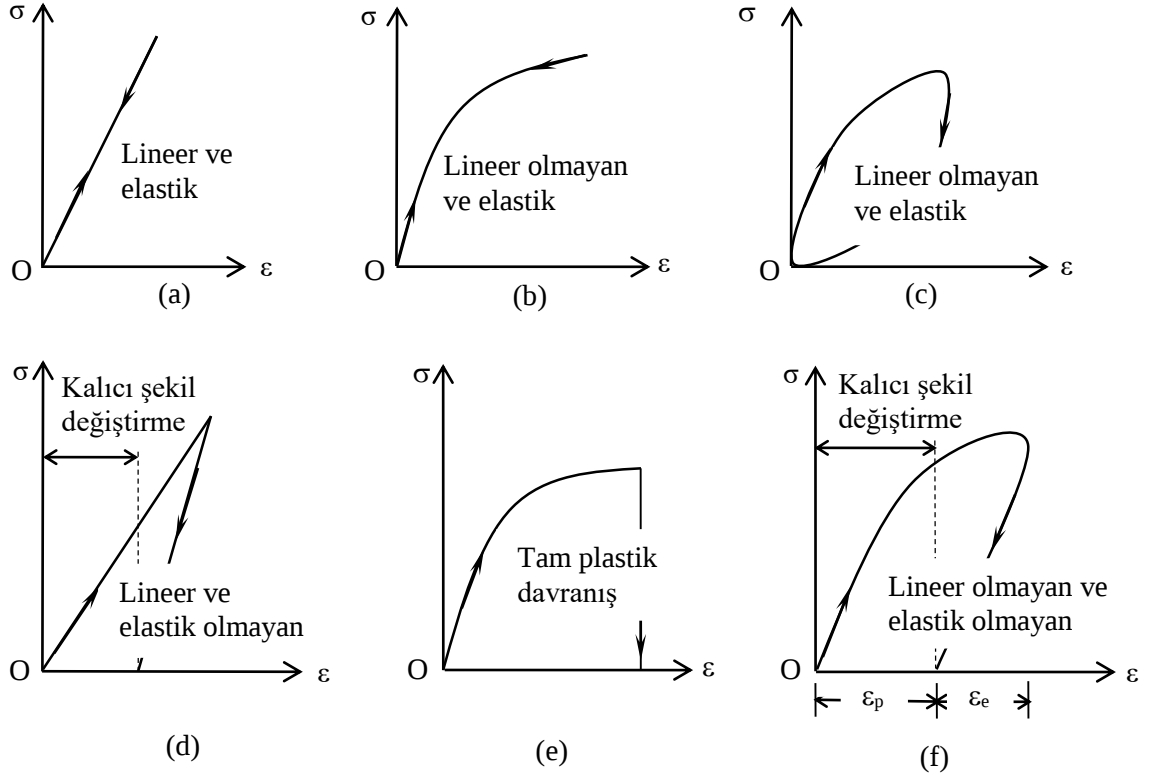
Üst akma noktası, çekme gerilmesinde gerçek bir azalma ile birlikte plastikşekil değiştirmenin başladığı noktadır. Şekil değiştirme, gerilmenin sabit kaldığı aralıkta hafifçe dalgalanma gösterir. Alt akma noktası, gerilmedeki dalgalanmanın sona erdiği ve şekil değiştirmedeki artış nedeniyle gerilmenin artmaya başladığı noktadır. Bu davranışı sergileyen malzemeler için akma sınırı alt ve üst akma sınırı değerleri dikkate alınarak belirlenir.

Seramiklerde bağların yönlü ve sağlam olması nedeniyle kayma olayı dolayısıyla plastik şekildeğiştirme olmaz. Bu yüzden çekme gerilmesi altında bir miktar elastik şekil değiştirme yaptıktan sonra koparlar. Ayrıca bu malzemeler çatlak vb gibi kusurlara karşı çok duyarlı olduğundan düzlemler arasında meydana gelecek bir kayma hareketi anında kırılma-kopma şeklinde son bulur. Seramikler basınç gerilmesi altında da bir miktar elastik şekil değiştirmeden sonra çatlarlar. Malzemenin içyapısına, çatlak sayısına ve büyüklüğüne bağlı olarak malzeme çatlama neticesinde parçalabilir veya parçalanmaz. Parçalanma meydana gelmemesi halinde yük taşımaya devam eder.

Plastiklerin gerilme etkisinde davranışı içyapının sağlamlığı, zaman ve ortam sıcaklığı gibi etkenlere bağlıdır. Yükleme sabit sıcaklıkta ve kısa sürede uygulanması halinde, polimer molekülleri arasındaki bağların sayısı, sağlamlığı, polimer yapısındaki kristalleşme derecesi arttıkça elastik davranış öne çıkar. Plastik şekildeğiştirme miktarı belirgin bir biçimde azalır. Çünkü böyle bir yapı içinde moleküller kolay yer değiştiremezler.

Elastomerler diye bilinen türde helezon biçimindeki moleküller çekme altında açılırlar. Gerilme kalkınca yeniden ilk konumlarına dönerler. Molekülün açılmış ve katlanmış durumdaki boy farkı nedeniyle elastomerler fazlaca elastik şekildeğiştirme yapabilirler.

Aşağıda bazı malzemeler için yükleme ve boşaltma sonucu gerilme-şekildeğiştirme diyagramları verilmektedir. Bunlardan (a) lineer ve elastik, (b) ve (c) lineer olmayan ve elastik davranışı temsil etmektedir. Yük kaldırıldıktan sonra şekil değiştirmenin tamamı geri geldiği için bu üç davranış “tam elastik davranış”ı temsil etmektedir. Bazı plastikler ve ahşap (b) tipi davranış gösterirken çelik akma sınırına kadar (a) tipi davranış gösterir. Cam ve çoğu kayaçlar gibi gevrek malzemeler (d) tipi lineer ve elastik olmayan davranış gösterirken, kil, sakız ve macun gibi bazı malzemeler (e) tipi tam plastik davranış ve bazıları (f) tipi lineer olmayan ve elastik olmayan davranış gösterirler. Gerilme kaldırıldıktan sonra kalıcı şekil değiştirmenin meydana geldiği ve yükleme ve boşaltma eğrilerinin çevrelediği ve “hysteresis” olarak tanımlanan bir bölgenin oluştuğu davranış tipi daha çok betonda görülmektedir. Orta ve yüksek gerilme düzeylerinde yüklenen betonun basınç etkisinde tipik davranışı budur ancak düşük gerilme düzeylerinde bu durum çok belirgin değildir.



Yükleme ve boşaltma döngüsüne dair gerilme-şekildeğiştirme diyagramları

ANELASTİK DAVRANIŞ

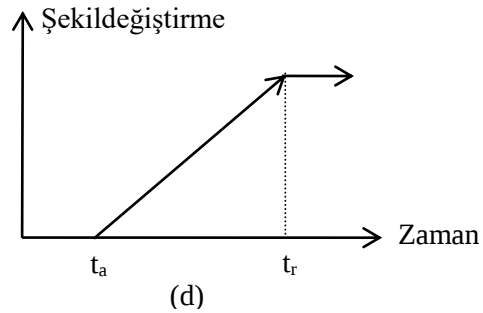
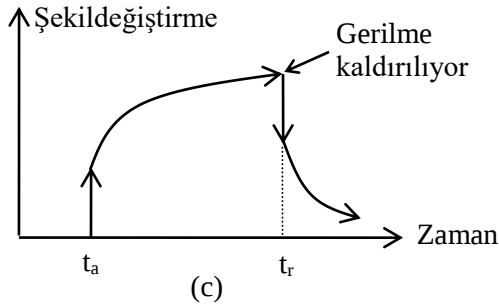
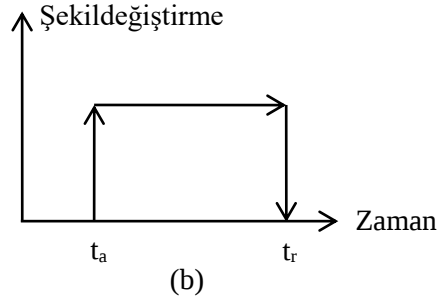
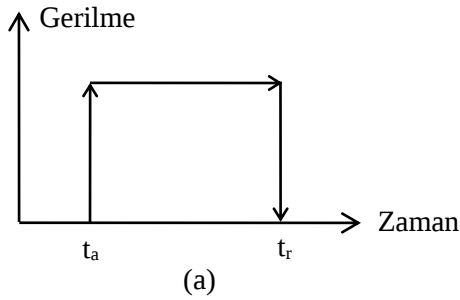
Buraya kadar elastik şekildeğiştirmenin zamandan bağımsız olduğu farz edilmiştir. Yani, uygulanan gerilme etkisinde meydana gelen ani şekildeğiştirme gerilme etkidiği sürece sabit kalır. Gerilme kaldırıldığında şekil değiştirmenin tamamı geri döner; yani, şekildeğiştirme derhal sıfırlanır. Ancak mühendislik malzemelerinin çoğu zamana bağlı elastik şekildeğiştirme yaparlar. Bu gibi malzemeler gerilme altında şekil değiştirmelerinin tümünü ani olarak gerçekleştirmez. Yani, çekme gerilmesine maruz bir malzeme bu gerilme altında yapacağı uzamayı gerilme uygulaması kaldırıldıktan bir süre sonra tamamlar. Benzer şekilde gerilme kaldırıldığında malzeme ilk boyutlarına hemen dönmez; belli bir süre sonra döner. Zamana bağlı meydana gelen bu elastik davranış *anelastisite* olarak bilinir. Buna göre, elastik şekil değiştirmenin uygulanan gerilme ile birlikte zamana bağlı olduğu malzemelere *anelastik malzeme* ve davranış biçimine *anelastik davranış* adı verilir. Metaller için anelastik bileşen normal olarak küçüktür ve genellikle ihmal edilir. Bununla beraber, bazı polimerler için anelastik bileşen büyüktür ve davranış *viskoelastik davranış* olarak tanımlanır.

VİSKOELASTİK DAVRANIŞ

Elastik şekil değiştirmeler gibi plastik şekil değiştirmeler de uygulanan gerilmenin yanı sıra zamana da bağlı olabilir. Örneğin, amorf yapıda polimerler yüksek sıcaklıklarda zamana bağlı şekildeğiştirme yaparlar. Ancak, bazı hallerde, zamana bağlı şekildeğiştirme yük kaldırıldıktan

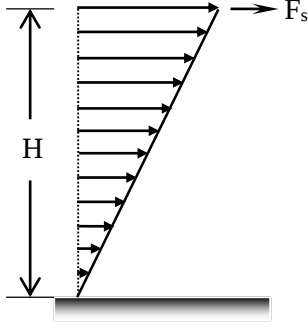
sonra geriye döner. Bu tür gecikmiş elastik deformation *viskoelastisite* olarak bilinir. Elastik deformasyon anidir; yani, şekil değiştirmenin tamamı zamandan bağımsız olarak gerilme uygulandığı anda meydana gelir ve gerilme kaldırıldığında şekil değiştirmenin tamamı geri döner ve cisim orijinal boyutlarına döner. Buna ilişkin davranış (a)'da verilen yüklemeye göre (b)'de verilmektedir. Burada gerilme t_a anında aniden uygulanıyor ve t_r anında yine aniden kaldırılıyor.

Tam viskoz davranışta (d)'de görüldüğü üzere şekildeğiştirme ani değildir ve uygulanan gerilmenin büyüklüğüne göre şekil değiştirme zamana bağlı olarak artar ve gerilme kaldırıldığında değeri muhafaza eder. Viskoelastik davranış biçimi (a)'da verilen yüklemeye göre (c)'de verilmektedir. Gerilme uygulandığında ani elastik şekildeğiştirme meydana gelir ve bunu zamana bağlı viskoz şekildeğiştirme takip eder. Viskoelastik davranışta şekildeğiştirme hızı deformasyonun elastik veya viskoz olup olmadığını belirler. Gerilme t_r 'de kaldırıldığında şekil değiştirmenin elastik kısmı ani olarak, bir kısmı zamana bağlı olarak geri gelirken bir kısmı kalıcıdır.



Kayma şekil değiştirmesinde tabakaların birbiri üzerinden kayması bir sıvının akışı gibidir. Akma olayında iç sürtünmenin bir ölçüsü olarak bilinen ve sıvının akma hızını belirleyen viskozite önemli bir karakteristiktir. Aynı miktarda bir kayma, akıcılığı yüksek yani viskozitesi düşük bir sıvıda kısa sürede gerçekleşirken, akıcılığı düşük yani viskozitesi yüksek bir sıvıda uzun sürede gerçekleşir. Sıvılarda görülen bu davranış biçimine *viskozite* veya *viskoz akma* adı verilir.

Her bir tabakayı oluşturan sıvı parçacıklarının v hızı tabakanın en alt yüzeyi ile en üst yüzeyi arasındaki mesafenin bir fonksiyonudur. Parçacıkların mesafeye bağlı olarak hızlarındaki değişim gradyanı (dv/dh) ile gösterilmektedir.



Newton yasasına göre, kayma kuvveti veya kayma gerilmesi ile hız gradyanı arasındaki ilişki aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$F_s = \eta \times \frac{dv}{dH} \times A \Rightarrow \tau = \eta \times \frac{dv}{dH}$$

Burada F_s kayma kuvvetini, A kayma kuvvetinin etkidiği yüzey alanı, τ kayma gerilmesi ve η viskozite katsayısıdır.

Viskoz akmada kayma hızı uygulanan gerilme ile orantılı olduğu kabul edilir. Buna göre, kayma hızı aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\frac{d\gamma}{dt} = \frac{dv}{dH} = \frac{1}{\eta} \times \tau \Rightarrow \tau = \eta \times \frac{d\gamma}{dt}$$

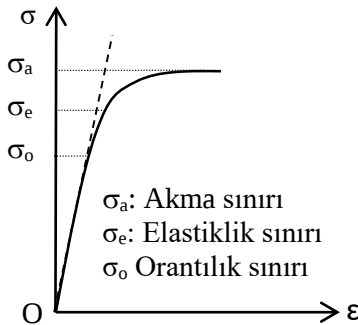
Burada $\frac{d\gamma}{dt}$, kayma şekil değıştirmesi hızıdır.

Viskozite katsayısı Arrhenius yasasına göre değışimi $\eta = A \times e^{\frac{E}{R \times T}}$ şeklindedir. Burada A , E ve R malzeme sabitleri olup T , Kelvin cinsinden sıcaklıktır.

Viskozitenin, η , birimi poise`dir. 1 centi-poise suyun 20°C`deki viskozitesidir.

$$1 \text{ centi-poise} = \frac{1}{100} \text{ poise.}$$

Akma olayı kayma şekil değıştirmesi yapabilen katı cisimlerde de, örneğin bazı metallerde ve plastiklerde, görülür. Bu tür metaller yüklendiğinde önceleri elastik ve genelde lineer-elastik davranır. Gerilmenin belirli bir değeri ulaşıldığında plastik şekil değıştirme başlar. Atom düzlemlerinin birbiri üzerinde kayması biçimindeki bu şekil değışikliği ya atom düzlemlerinin bir bütün olarak kayması ya da dislokasyonların hareket etmesi sonucu gerçekleşir. Dislokasyon yumuşak çelik gibi bazı metallerde genellikle karşılaşılan bir tür atomların birbiri üzerinden kayması olayıdır. Dislokasyon hareketi için küçük bir kuvvet gerektiğinden plastik şekil değıştirme öncelikle bu yoldan başlar. Bir süre sonra dislokasyonlar sayıca çoğalarak sabit gerilme altında kendi kendilerine harekete geçerler. Dislokasyon hareketi uygulanan gerilme azalmadığı sürece devam eder ve dislokasyon kitlenmesi sonucu durur. Cismin sabit gerilme altında yaptığı bu şekil değıştirme “akma” olarak bilinir ve $(\sigma - \epsilon)$ diyagramında “yatay bir bölge” olarak görülür.

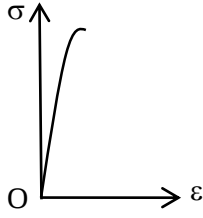


Orantılık sınırı, gerilme ile şekil değıştirmenin orantılı olarak değıştiği bölgenin üst sınırıdır. Bu bölgede Hooke yasası geçerlidir. Şekil değıştirmelerin tamamı elastikse gerilme değeri Hooke yasasından, $\sigma = \epsilon \times E$ hesaplanır.

Akma sınırı, akmanın başladığı gerilme değeri. Cisim σ_0 `ya kadar lineer-elastik,  $\sigma_e$ `ye kadar lineerliği yok olur ve sadece elastik davranır.

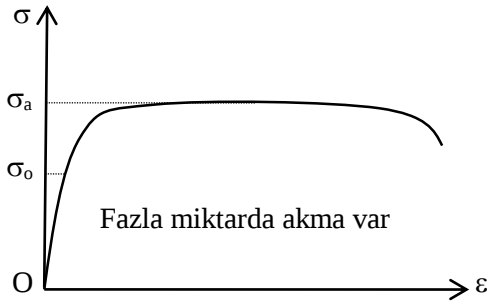
Bazı malzemelere ait (σ - ϵ) diyagramları:

Dökme demir:

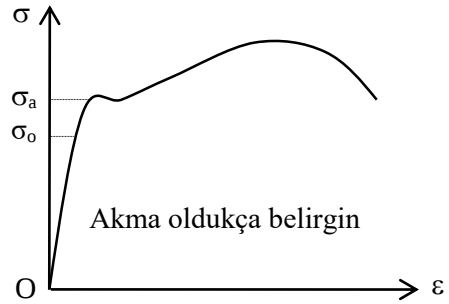


Dökme demir bir demir-karbon alaşıımıdır. Bileşiminde fazla miktarda karbon mevcuttur. Alaşımlama nedeniyle karbon atomları kaymayı zorlaştırır. Yüksek karbon içeriği nedeniyle elastik davrandığı aralık oldukça geniştir.

Bakır:



Yumuşak çelik:



METALLERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN DEĞİŞTİRİLMESİ

Metallerin mekanik özellikleri büyük ölçüde bileşime ve içyapıya bağlıdır. Bileşim aynı kaldığı halde içyapı değiştirilerek mukavemet, sertlik, ısı ve elektriksel iletkenlik önemli ölçüde değiştirilebilir. İçyapı ile ilgili değiştirilebilecek özellikler tane büyüklüğü ve biçimi, fazların türü ve dağılımı, içyapı kusurlarının türü ve miktarıdır. Bu özellikler alaşımlama, soğuk şekil verme ve ısıtma işlemiyle değiştirilebilir. Alaşımlama genellikle dislokasyonların hareketini engeller, şekil değiştirme zorlaşır; dolayısıyla sertlik ve mukavemet artar ancak süneklik azalır.

Diğer taraftan soğuk şekil verme sırasında dislokasyonlar çoğalır ve aralarında etkileşim artar, kristal yapıda distorsiyonlar meydana gelir, şekil değiştirme zorlaşır, sertlik ve mukavemet artar; süneklik azalır. Pekleşme soğuk dövme, haddeleme, burma ve çekme ile sağlanır. Eğer soğuk şekil verme ile sertleşen metal ergime sıcaklığının yaklaşık yarısı düzeyinde bir sıcaklıkta bir süre tavlaniyorsa yeniden kristalleşme oluşur. Sonuçta yumuşar ve sertlik azalır. Başlangıçta ince taneli olan yapı uzun bir süre tavlaniyorsa taneler büyür ve iri taneli yapı oluşur. Tane büyümesi sonucu süneklik artar fakat sertlik ve mukavemet önemli ölçüde azalır.

İnşaat uygulamalarında belirli bir yükü mümkün olduğu kadar az malzeme ile taşıtmak hem hafiflik hem de maliyet bakımından önemlidir. Bu nedenle temel hedef daima dayanımı daha yüksek malzeme üretimi olmuştur. Bu amaçla çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Mukavemet arttırıcı işlemler alaşımlama, soğuk şekil verme, tane büyüklüğünü ayarlama ve ısıtma işlemi olarak dört grupta toplanabilir.

Alaşımlama

Saf metaller genellikle yumuşak ve düşük mukavemetli olurlar ve kolay şekil değiştirirler. Bununla beraber ısı ve elektriksel iletkenlikleri yüksek ve korozyona daha dayanıklıdır. Alaşımlamayla genellikle ısı ve elektriksel iletkenlik azalır, dislokasyon hareketi zorlaşır; dolayısıyla sertlik ve mukavemet artar, ancak süneklik azalır. Bu ilkedan yararlanarak endüstride çeşitli özellikte yüksek mukavemetli alaşımlar geliştirilmektedir. Örneğin, demire katılan %0.8 oranında karbon, mukavemeti yaklaşık üç kat artırır.

Tane Büyüklüğünü Değiştirme

Metallerde tane büyüklüğü azaldıkça birim hacimdeki tane sınırı alanı artar, dislokasyon hareketi engellenir ve dolayısıyla sertlik ve mukavemet yükselir ancak süneklik azalır. Örneğin, tek kristalden oluşan demirin akma sınırı 28 N/mm^2 iken çok kristalli normal demirin akma sınırı 200 N/mm^2 düzeyindedir. Metallerde katılaşma süresinde soğuma hızı tane büyüklüğünü etkiler. Yavaş hızda soğumada büyük taneler oluşur ve dolayısıyla iri taneli yapı oluşur. Hızlı soğuma sürecinde tane boyutları küçük olur ve sonuçta ince taneli yapı oluşur.

Soğuk Şekil Verme ve Pekleşme

Metaller plastik şekil değiştirme süresinde pekleşir, dolayısıyla sertlik ve mukavemetleri artar, süneklikleri azalır. Pekleşme özelliği kafes yapı türüne bağlıdır. HSD sistemlerde kayma kolay oluşur, dolayısıyla pekleşme yeteneği yoktur. YMK sistemlerde başlangıçta pekleşme azdır daha sonra birden fazla kayma sistemi etkin hale gelir ve karşılıklı etkileşim sonucu pekleşme artar. HMK sistemlerde genellikle kafes sürtünmesi yüksek olduğundan daha başlangıçta birden fazla kayma sistemi etkin hale gelerek birbirleriyle etkileşirler ve pekleşme yüksek olur.

Endüstride metallere uygulanan haddeleme, tel çekme ve burulma şeklinde soğuk şekil verme işlemlerinde sarf edilen enerjinin %90'ı ısıya dönüşür, geri kalan şekil değiştirmeye harcanır. Plastik şekil değiştirme işlemleri anizotrop bir yapı oluşturur; mukavemet haddeleme doğrultusunda artar, haddelemeye dik doğrultuda düşük olur. Soğuk işleme sonucu kristal yapı kusurları arttığından yoğunluk biraz azalır, elektriksel ve ısı iletkenlik ve korozyona da dayanıklılık azalır. Soğuk haddelenmiş çelik sıcak haddelenmiş çeliğe göre çabuk paslanır. Pekleşmiş metaller belirli bir sıcaklığın üstünde ısıtılırsa veya tavlanişsa yumuşarlar ve pekleşmenin etkisi kaybolur.

Isıl İşlemler

Metallerde içyapıyı değiştirmek için uygulanan kontrollü ısıtma ve soğutma işlemlerine *ısıl işlemler* denir. Metallerde dengeli soğuma süresinde oluşan yapılar kararlı olup belirli özelliklere sahiptirler. Ancak kontrollü ısıtma ve soğutma işlemleri ile (su içinde soğutma gibi) denge hali faz dönüşümleri kısmen veya tamamen önlenir. Bu şekilde elde edilen bazı denge dışı yarı kararlı fazlar üstün özelliklere sahiptir. Bu ilkelere dayanarak endüstride çeşitli ısıl işlemler geliştirilmiştir. Çeliklere uygulanan su verme sertleşmesi bu işlemlere iyi bir örnektir.

Yumuşatma ve artık gerilmeleri giderici ısıt işlemler

Soğuk şekil verme sonucu sertleşmiş metalleri yumuşatmak için uygulanan ısıt işlem “yumuşatma tavlama” olarak bilinir. Sıcak haddeleme ve kaynak işlemleri sırasında homojen olmayan sıcaklık dağılımı içyapıda artık gerilmelerin oluşmasına neden olur. Bu özellikle çelik yapılarda kaynakla birleştirilen elemanlarda sıkça karşılaşılan bir durumdur. Soğuk işlenmiş ve kaynaklı çelikler 600°C üzerinde tavlendiğinde önce artık gerilmeler yok olur; devamında ferrit fazı yeniden kristalleşir, sertlik azalır ve yumuşama olur.

Su verme ve temperleme işlemi

Çeliğin su ortamı içinde soğutulması işlemine “su verme” denir. Çeliğe su verme sonucu oluşan martenzitin tokluğunu arttırmak için 300-350°C arasında ikinci bir tavlama uygulanır. Bu sıcaklıkta artık gerilmeler azalır; sertlik bir miktar azalır ancak buna karşın tokluk önemli ölçüde artar. Bu işleme “temperleme” denir. Genellikle bu ısıt işlem sonunda metal suda soğutulur. Bu işlem halk dilinde çeliğe çifte su verme diye bilinir. Bu sıcaklıkta çeliğin yüzeyinde mavi renk oksit tabası oluşur. Bu işlem “menevişleme” olarak da bilinir. Martenzitin oluşmasında ana etken karbon olduğundan %0.2`den az karbon içeren çelikler su verme ile sertleştirilemez.