



Ankara Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi
Jeoloji Mühendisliği Bölümü



JEM234 MUKAVEMET

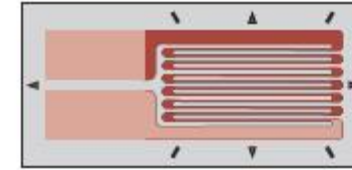
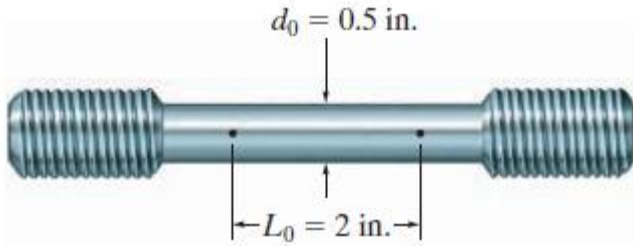
Ders Notları

Doç. Dr. Koray ULAMIŞ

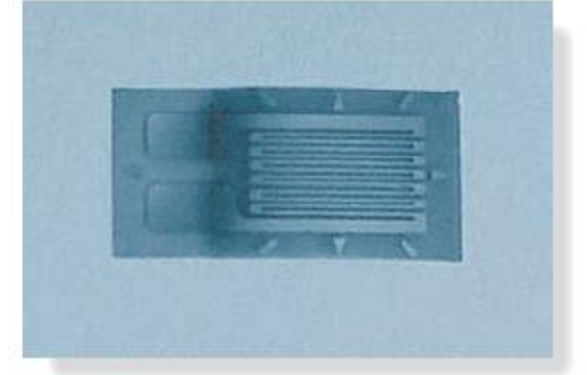
4. MALZEMELERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİ

Çekme (Tension) ve Sıkışma (Compression) Testleri

Malzeme dayanımı yenilme olmadan maruz kalabileceği yük ile ifade edilir. Deneysel çalışmalar ile çekme ve sıkışma altında bir çok malzemenin gerilme-yamulma ilişkisi ile bazı mekanik özellikleri belirlenebilmektedir. Deneysel çalışmaların temelinde malzemenin standard bir şekli olması gereklidir. Dairesel kesitli silindirik örneklerde yüklemeye başlamadan önce boydaki değişimin belirlenmesi için referans noktalar işaretlenir. Deneysel çalışmada da yüke bağlı olarak boydaki ve taban alanındaki değişim kaydedilir. Deneysel çalışmalar için tasarlanan presler farklı malzemelere göre farklı boyutlarda olabilmektedir. Boydaki değişimin kaydedilmesi için strain gauge ve/veya transducer (LVDT) düzenekleri kullanılır. Özellikle değişimin çok dar aralıklarda olması beklenen malzemelerde boy değişiminin hassas olarak kaydedilmesi önemlidir.



Electrical-resistance strain gauge



Çekme testi (Hibbeler, 2010; Beer, vd. 2011)

4.1. Mühendislik Gerilme-Yamulma Grafiği

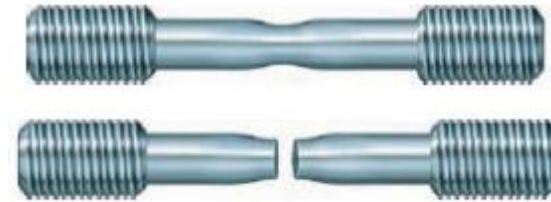
Her malzemede standard boyutlarda örnek olmayabileceğinden, deneylerin farklı boyutlarda örneklerde de uygulanması önemlidir. Deneyler yük veya deformasyon kontrollü yapılabilmekte olup, gerilme-deformasyon ilişkisinin belirlenebilmesi için grafik şeklinde sunulmaktadır. Nominal (mühendislik) gerilmesinde basitçe P/A ile gerilme hesaplanır. Burada gerilmenin kesit alanı boyunca ve gage uzunlu boyunca aynı olduğu varsayımı geçerlidir. Aynı şekilde nominal (mühendislik) yamulması da boydaki değişimin ilk boya oranı olarak belirlenebilir. “Konvansiyonel gerilme-yamulma” ilişkisi çoğunlukla çelik malzeme için geliştirilmiş olup, diğer malzemelerin karakteristiklerine bağlı olarak “Gerçek gerilme-yamulma” ilişkisi farklı olacaktır.

$$\sigma = \frac{P}{A_0}$$

$$\varepsilon = \frac{\delta}{L_0}$$



Çekme altında metal malzemede boyun oluşumu ve yenilme



Çekme testi (Hibbeler, 2010; Beer, vd. 2011)

Elastik Bölge (1)

Eğrinin eğiminin tek olduğu, dolayısıyla yamulmanın gerilme ile doğru oranıtılı olduğu kısımdır. Burada malzeme “lineer elastik” davranış gösterir. Üst limiti ise “orantılılık sınırı” olup, gerilmenin bu sınırı aşması durumunda eğrinin eğimi azalmaya başlar. Bu noktaya kadar malzemede yükleme kaldırılırsa original şekle dönüş olur.

Akma (Sünme) Bölgesi (2)

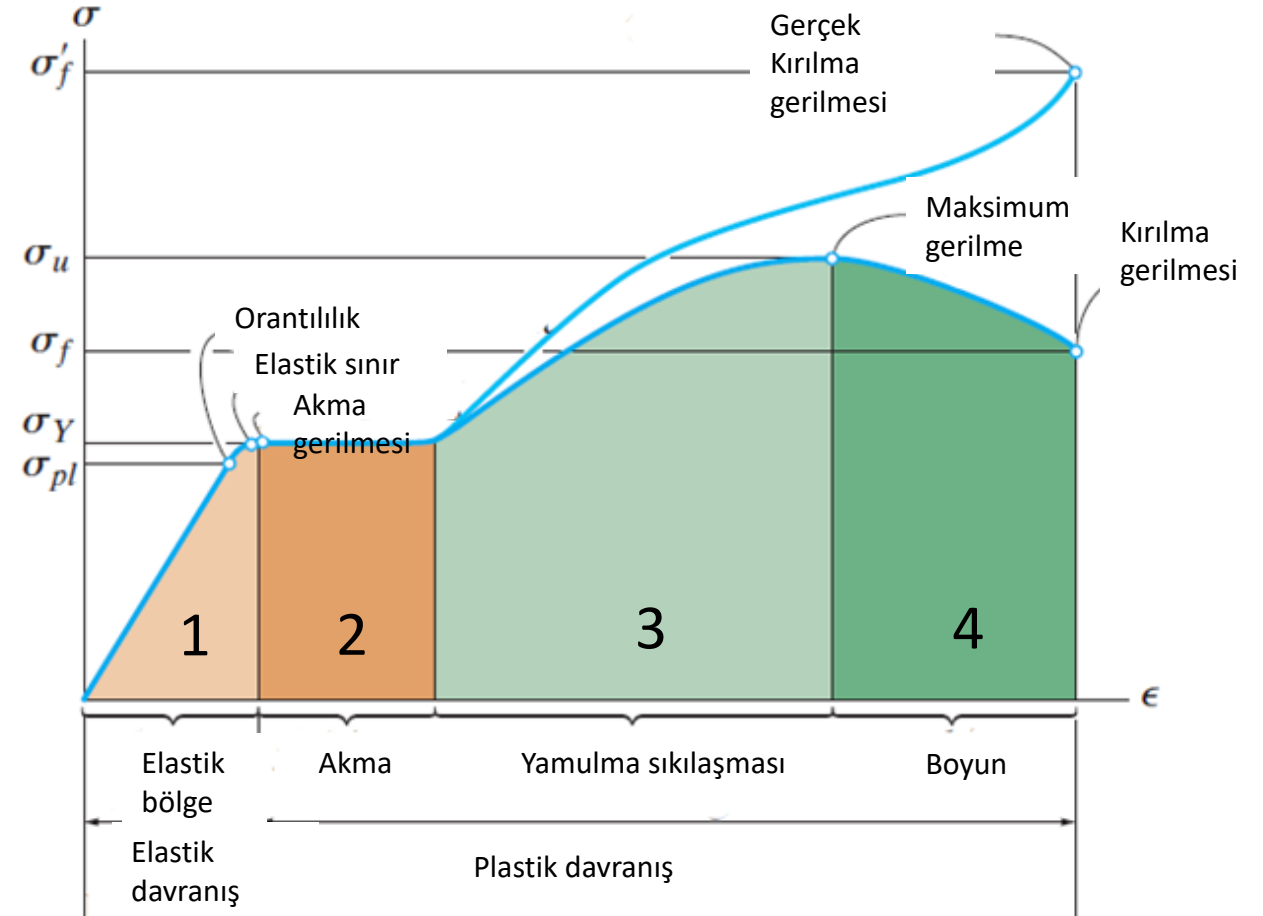
Elastik limiti aşan gerilme seviyesinde malzemede kalıcı yamulma ve türüne/kökenine göre farklı boyutlarda yenilmeler başlar. Bu bölgede “plastic deformasyon” gerçekleşir. Bu noktaya ulaşıldığında yükte artış olmasa bile yamulma artışı izlenebilir. Malzeme bu bölgede “mükemmel plastic” davranış gösterir.

Yamulma Sıkılaşması (Strain Hardening) (3)

Akma (sünme) sona erdiğinde gerilme artışı malzeme tarafından karşılanabilir ve “en büyük dayanım” noktasına kadar yenilme olmadan yükleme devam edebilir. Eğrinin buradaki karşılığı “yamulma sıkılaşması” adını alır.

Boyun (Necking) (4)

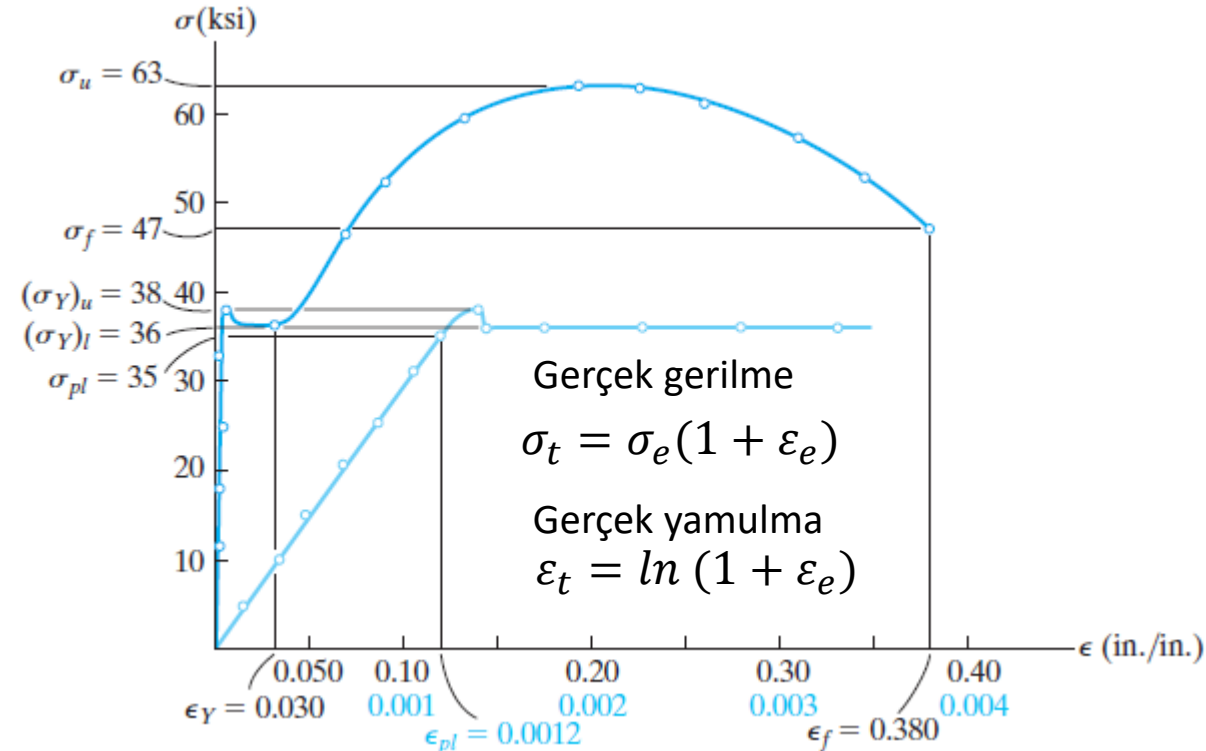
Nihai (maksimum) gerilmeye kadar örneğin boyundaki uzamaya bağlı olarak kesit alanında azalma başlar. Nihai gerilmede kesit alanındaki azalma local olarak farklılaşmaya başlar. Bu durumda “boyun-neck” oluşur. Boyun oluşumundan sonra malzemenin fiziksel olarak ayrılmaya (yenilme) başladığı “kırılma gerilmesi” ne kadar gerilme azalır yamulma artmaya devam eder.



Gerilme-deformasyon ilişkisi (Hibbeler, 2010; Beer, vd. 2011)

4.2. Gerçek Gerilme-Yamulma Grafiği

Mühendislik eğrisinin aksine her yük aşamasındaki anlık kesit alanı değişimlerinin kullanılması durumunda gerçek eğri elde edilir. Yamulmanın düşük seviyelerinde ve elastik deformasyon alanında her iki eğri hemen hemen aynı olup, yamulma sıkılaştırma bölgesinde fark görülmeye başlar. Bu aşamada yamulma daha fazla olup en büyük farklılık boyun oluşumu aşamasında gerçekleşir. Bu bölgede mühendislik eğrisinde örnek azalan yükü taşıyabilir iken, kesit alanı (A_0) sabit kabul edilmektedir ($\sigma = P/A_0$). Gerçek eğerde ise boyun bölgesindeki anlık "A" alanı yenilme anına kadar (σ'_f) azalmaktadır. Buna bağlı olarak da malzeme artan gerilmeyi halen yenilme olmadan karşılayabilmektedir. **Gerilme ile alan ters orantılı olduğundan, azalan alan gerilme artışını karşılayabilmektedir.**



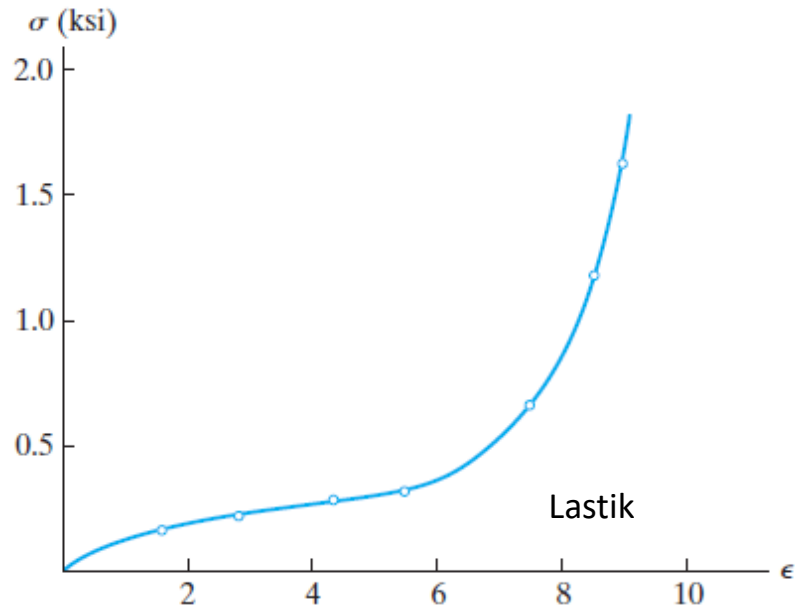
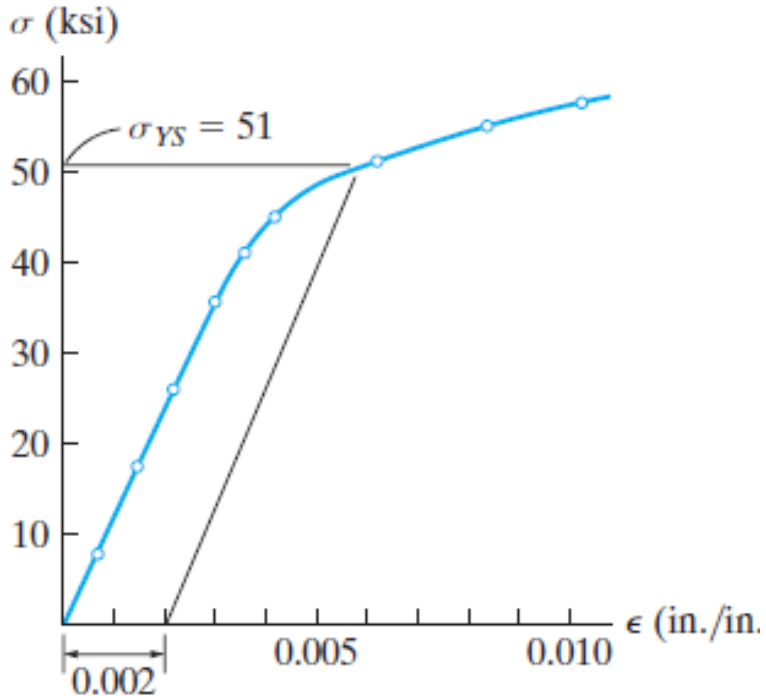
Farkı anlatmak için çelik örneğinde yapılan çekme deneyine göz atalım. Açık mavi eğerde (altta) orantılılık sınırında gerilme 35 ksi (241 Mpa) ve buna karşılık boy uzaması 0.0012 in/in olarak belirlenmiştir (elastik bölgede). Akma üst limiti gerilmesi 38 ksi (262 Mpa), alt limiti ise 36 ksi (248 Mpa) dır. Akmanın bitiminde ise boy uzaması 0.030 in/in olup, orantılılık sınırındaki gerilmenin 25 katı kadardır. Örnek 63 ksi (434 Mpa) lık nihai gerilmeye ulaşana kadar yamulma sıkılaştırmasına maruz kalmış olup, yenilme gerçekleşene kadar 63 ksi (324 MPa) lık gerilmeye maruzur (boyun bölgesi). Yenilme anındaki boy uzaması ise 0.380 in/in olup, elastik bölgenin 317 katı kadardır.

4.3. Sünek ve Gevrek Malzemelerin Gerilme-Yamulma Davranışı

Sünek (Ductile) Malzemeler

Yenilme gerçekleşmeden büyük oranda yamulmaya maruz kalabilen malzemelerdir. Yumuşak çelik, yüksek ısıda kaya gibi örnekler verilebilir. Dizaynda tercih edilmeleri özellikle darbe ve enerjiyi absorbe edebilmelerinden dolayıdır. Yüzde uzama veya yüzde kesit alanı azalması (yenilme anında) ile karakterize edilebilirler.

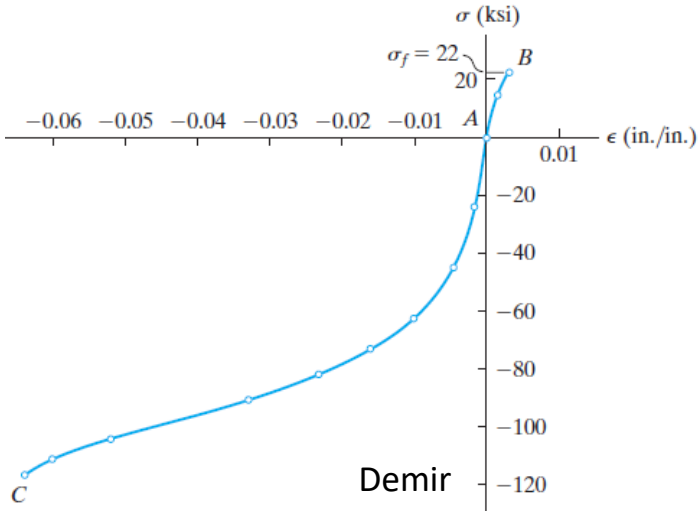
Uzama yüzdesi = $(L_f - L_0)/L_0$ ve Kesit alanı azalma yüzdesi = $(A_0 - A_f)/A_0$ Not: “f” yenilme anındaki, “0” ilk boy ve alanı ifade eder. Bazı malzemelerde askma noktasını ve gerilme değerini belirlemek problemlili olabilmektedir (örn. Alüminyum). **Bu durumda “öteleme metodu” kullanılır. Eğri üzerinde noktanın yeri belirli değil ise orijinden %0.2 yamulma değerinden lineer-elastik eğri parçasına paralel çizilir ve eğrinin kalanını kestiği noktanın karşılığı akma gerilmesi değerini yaklaşık olarak verir (σ_{YS}).**



Akma dayanımı malzemenin fiziksel özelliği olmayıp, kalıcı yamulmaya neden olan bir gerilmedir. Mühendislikte kullanılan farklı malzemelerde bilinen dışında davranışlar izlenebilir. Örneğin lastikte gerilme-yamulma orantılı olmadığından bir orantılılık sınırı gelişmez. Bu tür davranışa “Lineer Olmayan Elastik Davranış” adı verilir. Ahşap malzemeler orta derecede sünek davranış sergileyebilirler. Hemen her türünde özellikle değişken olduğundan (nem içeriği, yaş, vs.) elastik yükleme koşulu ile kullanılabilirler.

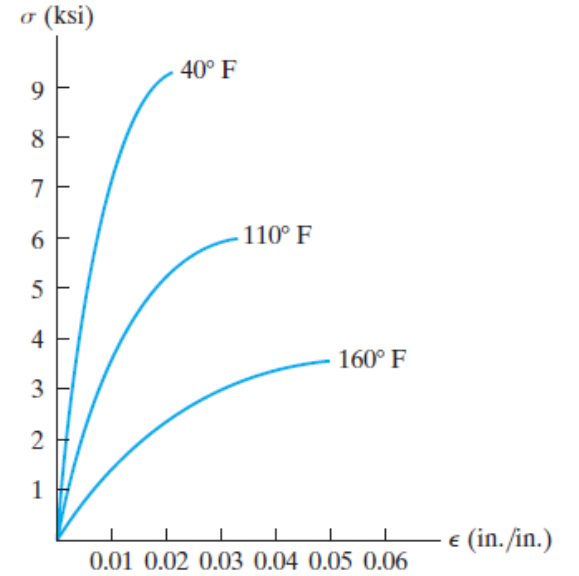
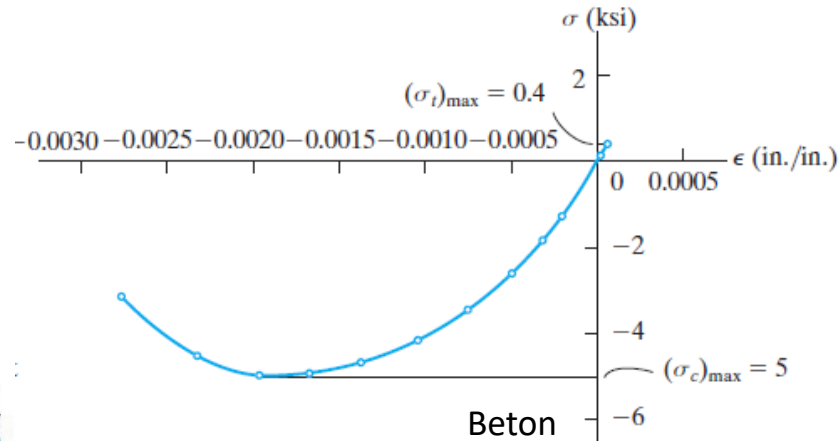
Gevrek (Brittle) Malzemeler

Yenilme gerçekleşmeden önce akma özelliği göstermeyen malzemelerdir. Gevrek malzemeler sünek olanlara göre daha kırılğan olup, düşük yamulma derecesinde yenilme gerçekleşebilir. Demir örneğinde yapılan çekme deneyinde yenilme 22 ksi (152 Mpa) da gelişmiştir (AB). Detaylı mikroskobik incelemelerde mikro çatlakların yenilmeye başlaması ile kısa sürede örnekte kırılma başlamıştır. Çekmenin tersine, sıkışma deneylerinde daha yüksek dayanımlar elde edilmiştir (AC eğrisi). Çekmenin tersine mikro çatlakların kapanarak dayanıma katkıları olduğu belirlenmiştir. Bu tür sıkışma yüklemelerinde malzemelerde fıçı benzeri “bulge” türü yapılar gelişir. Çeliğe benzer şekilde beton da çekmede daha düşük dayanımlı olup, gevrek davranış sergiler. Aynı örnekte yapılan deneylerde sıkışma dayanımı çekme dayanımınının 12.5 katı kadar büyük elde edilmiştir. Ayrıca malzemelerde her iki davranış da izlenebilmektedir. Örneği yüksek karbon içerikli çelik gevrek iken, karbon içeriği azaldıkça sünek davranış sergileyebilir. Düşük sıcaklıklarda gevrek malzemeler, çok yüksek sıcaklıklarda sünek davranabilmektedir.



Çekme

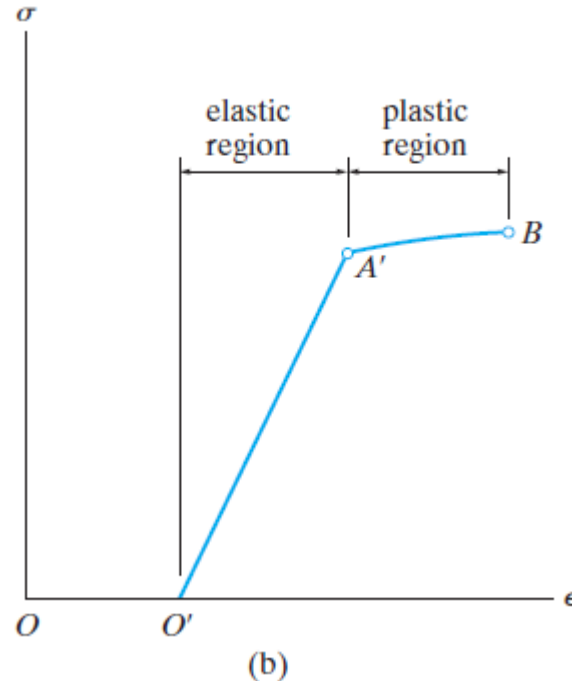
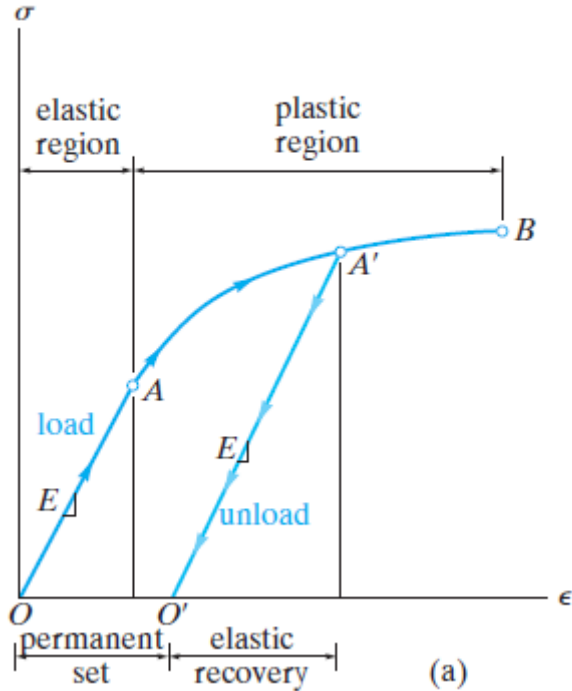
Sıkışma



Sıcaklığın dayanıma etkisi (plastic)

Yamulma Sıkılaştırması (Strain Hardening)

Sünek bir malzemede plastic bölgede yükleme durdurulursa elastik yamulma bitiminde plastic yamulma başlar. Sonuçta örnek üzerinde “Kalıcı Set” oluşur ve cisimde kalıcı boy değişikliği ve alan değişikliği gerçekleşir (a). Akma bölgesinden sonra A' noktasına kadar yükleme devam eder. Yüklemede atomlar arası kuvvetler çekmede boy uzamasına elastik olarak karşılık verebilirken yük kaldırıldığında atomlar birbirlerini çekmeye başlar. Elastik doğru parçasına paralel gelişen O'A' kalıcı deformasyon noktasına karşılık gelir. Tekrar yükleme başlarsa öncekine benzer şekilde O'A' arasında elastik bölge gelişir ancak akma gerilmesi yamulma sıkılaştırmasına bağlı olarak daha büyük bir değer alır (A'). Diğer deyişle, aynı malzemede daha büyük bir elastik bölge alanı gelişirken daha az sünek ve ilk haline göre daha küçük plastic bölge gelişir.



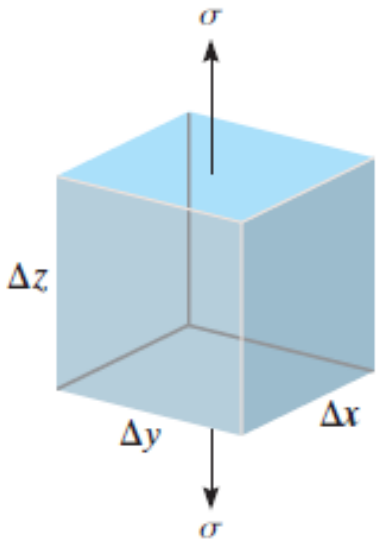
Yamulma Enerjisi

Harici yükleme sonucunda deforme olan malzemede hacmi dahilinde içsel enerji depolama eğilimi başlar. Malzemeyi oluşturan yapıtaşlarındaki yer değiştirmeye bağlı yamulmaya bağlı gelişen enerjiye “Yamulma Enerjisi” adı verilir. Tek eksenli çekmeye maruz birim malzeme elemanında $\Delta F = \sigma \Delta A = \sigma (\Delta x \Delta y)$ kadar bir kuvvet eki edecektir. Birim alanda Δz bulunmaz ancak boy olduğundan Δz boyunca $\epsilon \Delta z$ kadar düşey yer değiştirme gerçekleşir. Tanım itibariyle iş, kuvvet ve yer değiştirmenin çarpımı kadar kuvvet yönünde gelişecektir. Kuvvetin sıfırdan nihai ΔF değerine ulaşmasına kadar $\epsilon \Delta z$ gelişecektir ve iş ise ortalama kuvvet ile boydaki değişimin çarpımı kadar olacaktır. Bu harici iş içsel iş kadar olmak durumundadır. Ancak, ısı ile hiç enerji kaybolmadığı varsayımı ile bu varsayım geçerlidir. Yamulma enerjisi (ΔU);

$$\Delta U = \left(\frac{1}{2} \Delta F \right) \epsilon \Delta z = \left(\frac{1}{2} \sigma \Delta x \Delta y \right) \epsilon \Delta z$$

Elemanın hacmi $\Delta V = \Delta x \Delta y \Delta z$ olduğundan;

$$\Delta U = \left(\frac{1}{2} \sigma \epsilon \Delta V \right)$$



Yamulma enerjisi (Hibbeler, 2010)