## Giriş

Belirli bir uygulama alanı için malzeme seçimi o malzemenin mekanik özelliklerine bağlı olduğundan, bu özelliklerin ölçülmesinde kullanılan standart deneyleri tanımak ve bu deneylerden elde edilen sonuçları değişik parametrelere bağlı olarak değerlendirmek büyük önem taşır. Bir malzemenin statik yüklere dayanma kapasitesi çekme ve basma deneyleri ile belirlenir. Kalıcı şekil değiştirmelere karşı direnç hakkında bilgi statik deneyler ile sağlanabilir. Bir malzemenin çizilmeye ve aşınmaya karşı direnci ise sertlik nedeniyle ile belirlenebilir. Darbe deneyi malzemenin darbe şeklindeki zorlanmalara dayanımını belirlemek için kullanılır. Bu deneyler değişik sıcaklıklarda yapılarak bir malzemenin sünek-gevrek geçiş sıcaklıkları belirlenebilir. Yorulma deneyi ile bir malzemenin değişken ve tekrarlı zorlanmalar altındaki davranışları ve bu etkiler altındaki faydalı ömrü belirlenebilir. Sürünme deneyleri, malzemenin yüksek sıcaklıkta uzun süreli yüklemeler altındaki davranışlarının belirlenmesi amacıyla uygulanır.

Bu ders notu içerik itibariyle mekanik deneylerle sınırlı olsa da, bu deneylerin ortaya çıkardığı malzemenin mekanik davranışları da ele alınmış ve neden –sonuç ilişkileri ortaya konulmaya çalışılmıştır. Aşağıdaki bölümlerde, metalik malzemelere uygulanan temel mekanik deneyler ve mekanik davranışlar belli bir sıra dahilinde incelenmiştir.

## 1. Çekme Deneyi

Çekme deneyi, malzemelerin mukavemeti hakkında esas tasarım bilgilerini belirlemek ve malzemeleri özelliklerine göre sınıflandırmak amacıyla yapılır. Çekme deneyi, standartlara göre hazırlanmış deney numunesinin tek eksende, belirli bir çekme hızında ve sabit sıcaklıkta koparılıncaya kadar çekilmesidir. Deney sırasında, standartlara göre hazırlanan çekme numunesine uygulanan kuvvet ya da gerilme ile meydana gelen uzama değerleri kaydedilir.

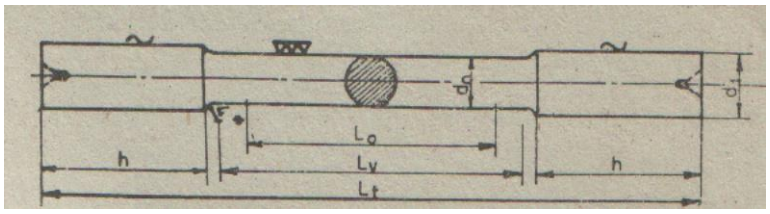
Çekme deneyi sonucunda numunenin temsil ettiği malzemeye ait aşağıdaki temel mekanik özellikler belirlenebilir:

- Akma gerilmesi (Yield stress)
- Çekme gerilmesi (Tensile stress)
- Kopma uzaması (Elongation to failure)
- Kesit daralması (Reduction in cross-section)
- Tokluk (Toughness)
- Elastisite modülü (Elastic modulus)
- Rezilyans (Rezilyance)

### 1.1. Çekme Numuneleri

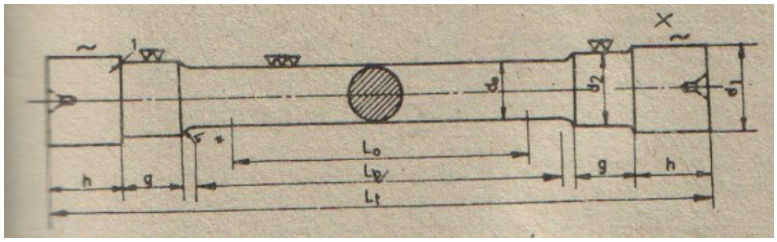
Çekme deneyine tabi tutulacak numuneler, temsil ettiği malzemenin tüm özelliklerini taşımalıdır. Bu nedenle, numunenin alındığı bölgenin, alınış ve hazırlanış şeklinin büyük önemi vardır. Numune hazırlanırken, temsil ettiği malzeme özelliklerinde herhangi bir değişiklik oluşmamasına dikkat edilmelidir. Üretim sırasında aşırı sıcaklık oluşumu önlenmeli, ayrıca deformasyondan kaynaklanan etkilerde elimine edilmelidir. Çekme deneyine tabi tutulacak numunenin şekil ve boyutları standartlarda belirtilmiştir. Bu nedenle deney sonuçlarının güvenilirliği ve karşılaştırılabilir olması açısından deneyler standartlara göre hazırlanmış numuneler ile yapılmalıdır. Aşağıda standartlara uygun, dairesel ve dikdörtgen kesitli numunelerin şekil ve boyutları verilmiştir. Alınacak malzemeye göre çekme

numunesinin kesiti, dairesel, kare, dikdörtgen ve halka şeklinde ve hatta bazı durumlarda özel profil şeklinde olabilir. Türk standartları, TS 138-A'da çekme numunelerini şekil ve boyutlarına göre standartlaştırmıştır. Aşağıdaki şekilde standartta verilen numuneler gösterilmiştir.



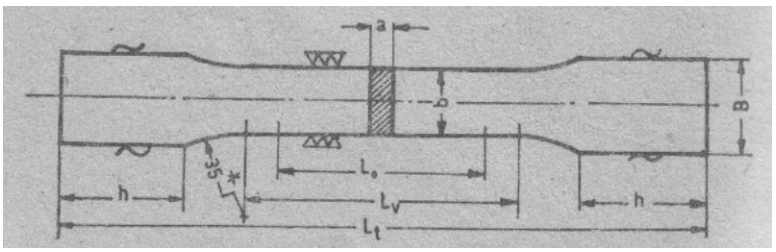

$d_0$ = Numune Çapı
$d_1$ = Baş Kısmının Çapı = 1,2 $d_0$
$L_v$ = İnceltilmiş Kısmın Çapı = $L_0 + d_0$
$L_0$ = Ölçü Uzunluğu = 5 $d_0$
$L_t$ = Toplam Uzunluk
h = Baş Kısmının Uzunluğu

(a)



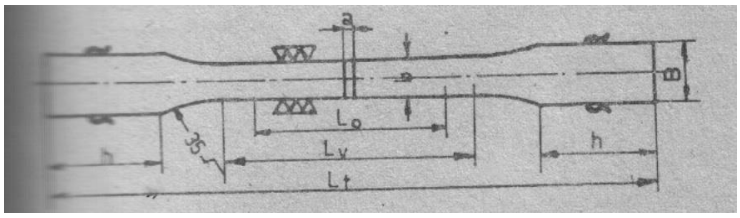

$d_0$ = Numune Çapı
$d_2$ = Basamak Kısmının Çapı = 1,2 $d_0$
$d_1$ = Baş Kısmının Çapı = 1,75 $d_0$
$L_v$ = İnceltilmiş Kısmın Çapı = $L_0 + d_0$
$L_0$ = Ölçü Uzunluğu = 5 $d_0$
$L_t$ = Toplam Uzunluk
h = Basamak Kısmının Uzunluğu =$d_0$
h= Baş Kısmının Uzunluğu = $d_0$ + 5 mm

(b)




a = Numune kalınlığı
b = Ölçü uzunluğu için ölçü genişliği
B = Baş kısmının genişliği: 1.2b+3
$L_v$ = Daraltılmış kısmın uzunluğu: $L_0$ + b
$L_0$ = Ölçü Uzunluğu: $5.65.A_0^{1/2}$
$L_t$ = Toplam Uzunluk
g = Baş Kısmının Uzunluğu:2b + 10 mm

(c)



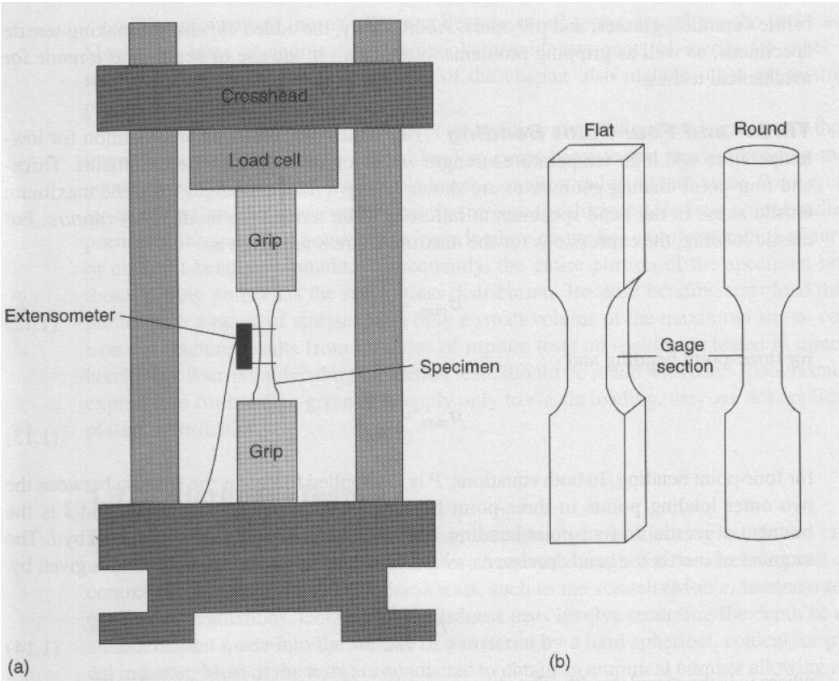

a = Numune kalınlığı (0.15mm<a<5mm)
b = Ölçü uzunluğu için ölçü genişliği (15-20 mm)
B = Baş kısmının genişliği
$L_v$ = Daraltılmış kısmın uzunluğu: $L_0$ + b

$L_0$ = Ölçü Uzunluğu: $5.65.A_0^{1/2}$
$L_t$ = Toplam Uzunluk
h = Baş Kısmının Uzunluğu (en az 50 mm)

Şekil 1.1. Standart çekme numuneleri ve boyutları: (a) Dairesel kesitli, silindirik başlı, (b) dairesel kesitli, basamaklı, (c) dikdörtgen kesitli (kalın yassı malzemeler), (d) dikdörtgen kesitli (ince yassı sac malzemeler).

## 1.2. Çekme makinesi

Günümüzde çok gelişmiş, üniversal çekme-basma deneyi makineleri mevcuttur. Bu makineler hidrolik ve elektronik sistemlerle donatılmış ve değişik yükleme kapasitelerine sahiptir. Ayrıca, uygulanan yük ve meydana gelen uzama değerleri bilgisayarlar yardımıyla anında çizdirilebilmektedir. Bu makinelerde numune boyunda meydana gelen uzama, kontak tipi uzama ölçerlerin (ekstansometer) yanında son yıllarda geliştirilen non-kontak video uzama ölçerler (video extonsomater) ile belirlenmektedir. Üniversal bir çekme makinesi Şekil 1.2'de de gösterildiği gibi temelde iki kısımdan oluşmaktadır. Bunlar, deneyin gerçekleştirildiği elektro mekanik sistem, diğeri ise alına verilerin işlendiği ve sonuçların elde edildiği veri işleme sistemidir. Elekromekanik sistem ise, numunelerin yerleştirildiği çeneler, uygulanan yükün algılandığı yük hücresi, meydana gelen uzamanın ölçüldüğü uzama ölçer (ekstansometre) ve hareketin sağlandığı mekanik sistemlerden oluşmaktadır. Veri işleme sistemi ise modern makinelarda bilgisayarlar vasıtasıyla gerçekleştirilmektedir. Bu sistemde gelişmiş yazılımlar sayesinde, çekme deneyi ile elde edilebilecek bütün veriler toplanıp işlenebilmektedir.




Şekil. 1.2. (a) Bir üniversal çekme-basma deney makinesi ve (b) çekme numunesi örnekleri [Bowman]

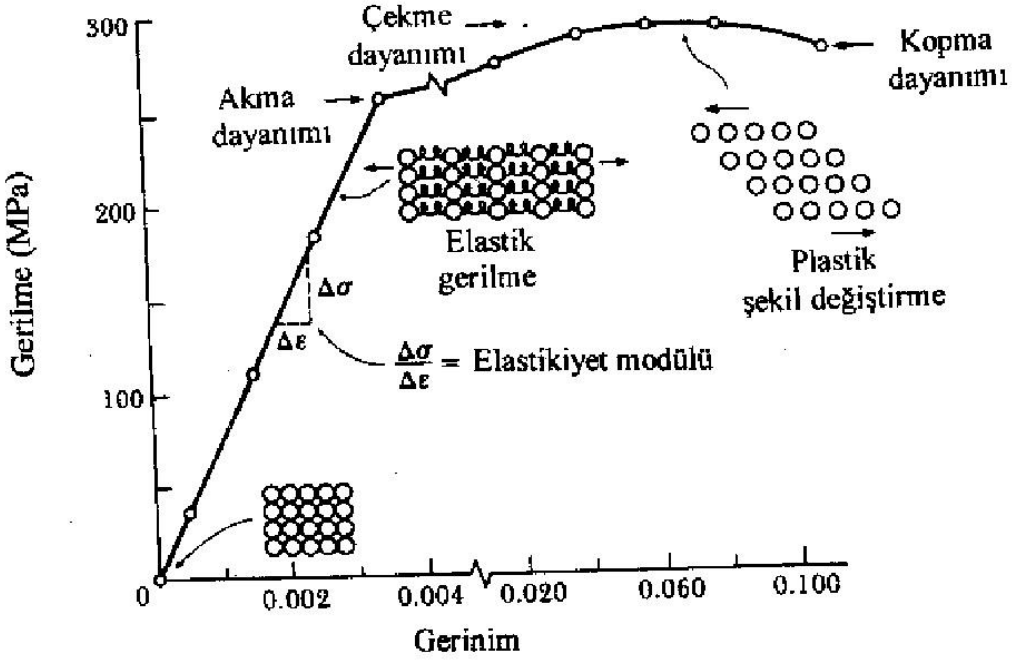
## 1.3. Çekme deneyinden elde edilen veriler ve bu verilerin değerlendirilmesi

### 1.3.1. Mühendislik gerilme-uzama diyagramları (Engineering stress-strain diagrams)

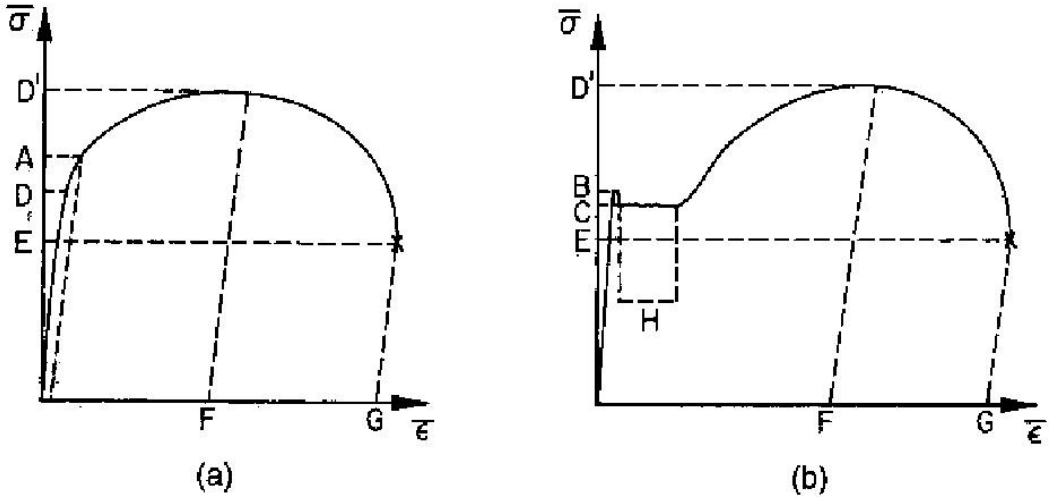
Şekil 1.3'de çekme deneyi sonucunda elde edilen tipik gerilme-uzama diyagramları verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi, gerime-uzama diyagramı üç bölümden oluşmaktadır. Bunlar, elastik deformasyon bölgesi, homojen plastik deformasyon bölgesi ve homojen olmayan plastik deformasyon bölgesidir. Elastik deformasyon bölgesinde gerilme-uzama eğrisi lineer bir değişim gösterir. Yani artan gerilme ile birlikte % uzama değeri de orantılı olarak artar. Bu aralıkta uygulanan gerilme kaldırılırsa yüzde uzama değeri sıfıra iner. Yani numune üzerinde kalıcı şekil değişimi oluşmaz. Bu bölgede *"Hooke Kanunu ($\sigma$=E.e)*" geçerli olup doğrunun eğimi malzemenin "*Elastisite Modülünü*" verir.

Uygulanan gerilme elastik bölgenin dışına çıktığında, malzeme plastik şekil değişimine uğramaya başlar ve homojen deformasyon bölgesine girer. Bu bölgede uygulanan gerilmeyle beraber harekete geçen dislokasyonlar kaymayı meydana getirir ve malzeme kalıcı olarak şekil değiştirir. Bu bölgede malzeme üzerine uygulanan kuvvet kaldırıldığında, elastik şekil değişimi ortadan kalkarken, kaymanın neden olduğu plastik şekil değişimi ise kalıcıdır. Kaymanın başladığı nokta elastik ve plastik davranışı ayıran noktadır.

Çekme işlemine devam edildiğinde, öyle bir noktaya gelinir ki, malzemede plastik kararsızlık oluşur ve numunenin ölçü boyundaki herhangi bir noktada kesit büzülmeye başlar ve numune boyun verir. Bundan sonra kesit daralması nedeniyle deformasyon daha az bir kuvvetle devam eder ve bu bölge sonunda numune kırılır.




Şekil 1.3. Tipik bir gerilme-uzama eğrisi [Erdoğan]




Şekil 1.4. (a) Belirgin akma noktası göstermeyen ve (b) belirgin akma noktası gösteren malzemelerin gerilme-uzama eğrileri.

Çekme deney sonuçlarını daha iyi yorumlayabilmek için gerilme-uzama diyagramını yakından incelemek ve meydana gelen mekanizmaları iyi bilmek gerekir.

**a) Elastik şekil değiştirme ve bu bölgede geçerli olan büyüklükler**

Elastik deformasyon bölgesinde malzeme çok küçük yükler altındadır ve yük kaldırıldığında malzeme ilk şekline geri döner. Elastik deformasyon esnasında atomlar aralarındaki bağı koparmadan hareket ederler ve bu yer değiştirme miktarı uygulanan gerilme ile orantılıdır.

Gerilme/deformasyon oranı=sabit

Bu ilişki *Hooke Kanunu* olarak tanımlanır. Bu denklemdeki sabit malzemenin elastisite modülüdür. Elastisite modülü, malzemenin rijitliği ile ilgili bir değer olup, bu değer özellikle konstrüksiyon mühendisliğinde çok önemlidir. Elastisite modülü de gerilmeler gibi aynı birimler cinsinden ifade edilir. Hooke ilişkisi sadece deformasyon miktarının çok küçük olması halinde uygulanabilir ki bu değer kristal yapılı malzemeler için %1'in altındadır.

*Hooke Kanunu:* $\sigma = E.e$

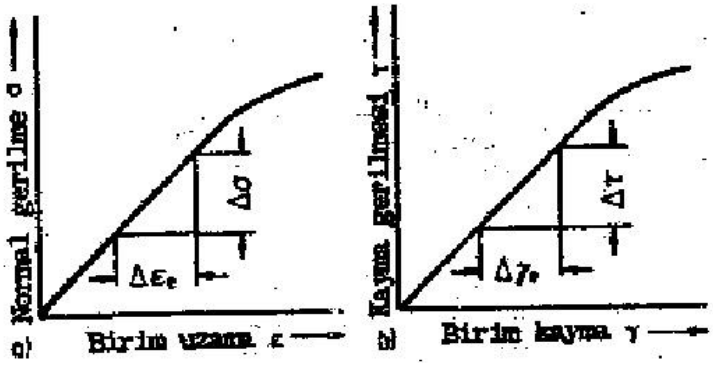
E: Elastisite modülü (kg/mm$^2$ veya N/mm$^2$
$\sigma$: Uygulanan gerilme (kg/mm$^2$ veya N/mm$^2$)
e: Elastik şekil değişimi

Kayma gerilmesi ile elastik birim kayma arasında ise,

$G=\Delta\tau/\Delta\gamma$ şeklinde bir ilişki vardır. Burada, G kayma elastisite modülü, $\tau$ kayma gerilmesi ve $\gamma$ ise elastik birim kayma şekil değişimi olarak alınmaktadır.

$\sigma=E.e$ ve $\tau=G.\gamma$

Birim uzama ve birim kayma boyutsuz büyüklükler olduklarından elastisite ve kayma modüllerinin birimi gerilmeninki ile aynıdır. Bu büyüklükler malzemenin yay katsayısı olarak da düşünülebilir.




Şekil 1.5. Elastisite ve kayma modüllerinin belirlenmesi

Elastisite modülü atomlar arası bağ kuvvetini temsil eder ve malzemenin rijitliğinin bir sonucudur. Bağ enerjisi yüksek olan malzemelerin elastisite modülü ve ergime sıcaklığı da yüksek olur. Elsatisite modülü ne kadar büyükse malzemenin elastik uzaması da o ölçüde düşüktür. Aşağıdaki tabloda bazı malzemelerin elastisite modülü ve Poisson sayısı verilmiştir.

Tablo 1. 1. Bazı malzemelerin Elastisite ve kayma modülü ile Poisson oranları

| Malzeme | Ekastisite Modülü (E) [GPa] | Kayma modülü (G) [GPa] | Poisson Oranı ($\upsilon$) |
|---|---|---|---|
| Alüminyum | 69 | 25 | 0.33 |
| Pirinç | 97 | 37 | 0.34 |
| Bakır | 110 | 46 | 0.34 |
| Magnezyum | 45 | 17 | 0.29 |
| Nikel | 207 | 76 | 0.31 |
| Çelik | 207 | 83 | 0.30 |
| Titanyum | 107 | 45 | 0.34 |
| Tungsten | 407 | 160 | 0.28 |

**TABLE 1.2 Approximate Elastic Properties of Various Materials (and Dilute Alloys) at Room Temperature**

| Material | Young's modulus, $E$ (GPa) | Shear modulus, $\mu$ (GPa) | Poisson's ratio, $\nu$ |
|---|---|---|---|
| Aluminum and aluminum alloys | 69–72 | 24–26 | 0.35 |
| Copper and copper alloys | 125–135 | 47–50 | 0.34 |
| Irons and steels | 205–215 | 80–84 | 0.29 |
| Stainless steels | 190–200 | 75–78 | 0.33 |
| Titanium and titanium alloys | 115 | 42–44 | 0.32 |
| Aluminum oxide | 380–390 | 155–165 | 0.25 |
| Silicon carbide | 440–460 | 195–200 | 0.14 |
| Glass | 70–90 | 28–32 | 0.27 |
| Polyethylene (PE) | 0.2–2 | * | 0.4 |
| Polymethylmethacrylate (PMMA) | 2–3 | * | 0.4 |
| Polystyrene (PS) | 2–4 | * | 0.35 |
| Bone** | 5–30 | 3–8 | 0.25–0.5 |
| Tendon** | 0.8–1.5 | — | — |

*These values are typically about one-third of Young's modulus.

**Bone and tendon are not only strongly anisotropic, but the stiffness also varies with type, position, and moisture content.

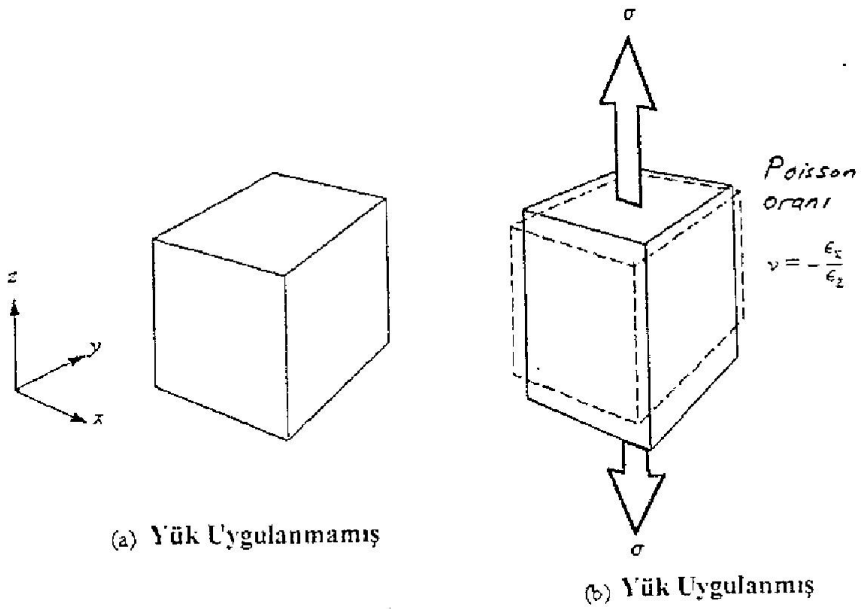
[Bowman]

Elastisite modülü başlıca, *kimyasal bileşim, soğuk deformasyon miktarı ve sıcaklıkla* değişir. Ayrıca yapı kusurları ve ferromanyetik özellikler de elastisite modülüne etki eder:

- Alaşım ilavesi ile eğer ergime noktası yükseliyorsa bu durumda elastisite modülünün de yükseleceği söylenebilir.
- Elastisite modülü anizotropik özellik gösteren malzemelerde veya soğuk deforme olmuş malzemelerde farklı kristalografik doğrultularda farklı değerler alabilir.
- Elastisite modülünün değeri artan sıcaklıkla azalır. Genellikle bu azalma ergime sıcaklığının yarısına kadar doğrusaldır. Bu noktadan sonra azalma artar. Ergime sıcaklığına yaklaşıldığında atomlar arsı çekim kuvveti olmadığından, elastisite modülünün değeri sıfıra yaklaşır.
- Malzemenin dayanımının elastisite modülü üzerinde bir etkisi yoktur. Örneğin, sertleştirilmiş aynı bileşime sahip çeliğin sert ve yumuşak hallerinde aynı elastiklik modülü geçerlidir.

Elastisite modülünün sabit kaldığı doğrusal elastikliğin yanında kır dökme demirde olduğu gibi ender de olsa doğrusal olmayan elastik davranışlar görülür. Böyle malzemeler için Hooke kanunu geçerli değildir. Bu durumda elastisite modülü gerilme ve dolayısıyla birim şekil değişimine bağlıdır.

Tek eksenli gerilme altındaki bir malzeme gerilmeye dik doğrultuda da şekil değiştirmek zorundadır. Tek yönde çekme, bu yöne dik yönlerde basma deformasyonuna neden olur. Diğer bir ifade ile $\varepsilon_x=\varepsilon_y$ olup işareti (-) dir.




Şekil 1.6. Possion oranının belirlenmesi

$\nu = -\varepsilon_{enine}/\varepsilon_{boyuna}$, $\nu = -\varepsilon_x/\varepsilon_z = -\varepsilon_y/\varepsilon_z$

Poisson oranının değeri metalik malzemelerde 0.25-0.32 arasında değişmekte, ancak çoğunlukla 0.30 değerini almaktadır.

Elastik büyüklükler arasında aşağıdaki bağıntının geçerli olduğu söylenebilir.

$E=2.(1+\nu)G \cong 2,6.G$

**b) Plastik şekil değişimi bölgesi**

- **Homojen deformasyon bölgesi**

Malzemeye akma dayanımının üzerinde bir gerilme uygulanması durumunda plastik yani geri dönüşsüz şekil değişimi başlamış olur. Bu durumda dislokasyonlar harekete geçerek kayma mekanizmasını çalıştırırlar ve plastik şekil değişimi başlar. Bu bölgede şekil değişimi devam ederken bazı mekanizmalar sayesinde yeni dislokasyonlar meydana gelir ve uygulanan deformasyon ile beraber dislokasyon yoğunlu da artar. Yoğunlaşan dislokasyonlar gerek kendileriyle ve gerekse başka engellerle (boşluk, ara yer atomu, çökelti, tane sınır vb.) etkileşerek, hareketleri daha güç gerçekleşmeye başlar. Diğer bir değişle daha ileriki hareketi için daha yüksek gerilmeye ihtiyaç duyulur. Buna *"deformasyon sertleşmesi"* (strain hardening or work hardening) veya *"pekleşme"* adı verilir. Bu nedenle homojen deformasyon bölgesinde gerilme-birim şekil değişimi eğrisi artan deformasyon miktarı ile birlikte sürekli olarak yükselir.

Deney sırasında numune sürekli uzadığı için hacim sabitliğine göre kesit sürekli olarak azalır. Kesit daralması uygulanan kuvvetin azalmasını, oluşan pekleşme ise artmasını gerekli kılmaktadır. Bu bölgede pekleşme etkisi kesit daralma etkisinden daha etkili olduğu için gerilme sürekli artar. Ancak artış oranı giderek azalır ve öğle bir noktaya gelinir ki, burada kesit daralması ile pekleşme etkisi birbirini dengeler. Bu noktada elde edilen gerilme değeri o malzemenin dayanabilecek olduğu maksimum gerilme değerini (çekme gerilmesi) verir.

- **Homojen olmayan deformasyon bölgesi**

Gerilmenin pik yaptığı nokta geçildiğinde, kesit pekleşmeye oranla çok büyük bir hızla daralmaya başlar ve numunede *boyun verme (necking)* olayı meydana gelir. Boyun vermenin başladığı noktaya plastik kararsızlık noktası denir ve bu nokta maksimum gerilmeyi yani çekme dayanımını verir. Tepe noktasından sonra numune sadece boyun bölgesinde yerel olarak deforme olur. Boyun bölgesindeki kesitin sürekli azalması, uygulanan yükte düşmeye neden olur ve diyagram aşağı döner. Bu olay deney numunesinin kopmasıyla son bulur. Kopmanın meydana geldiği gerilme değeri ise *"kopma mukavemeti"* olarak alınır.

### 2.3.1.1. Çekme deneyi ile elde edilen temel büyüklükler

#### a) Elastik bölgeden ölçülen büyüklükler

- *Elastisite modülü (E):* Çekme diyagramının elastik bölgesindeki doğrunun eğimi Elastisite Modülü veya Young Modülü'nü verir.

  $E = \sigma/e$

- *Kayma modülü*

  $G=\tau/\gamma$

- *Poisson oranı* ($\nu$)

  $\nu=-\varepsilon_x/\varepsilon_z = -\varepsilon_y/\varepsilon_z$

  $E=2.(1+\nu)G\cong 2,6.G$

- *Orantı sınırı:* Çekme diyagramında Hooke yasasının, yani $\sigma=E.e$ bağıntısının geçerli olduğu doğrusal kısmı sınırlayan gerilme değeridir. Başka bir değişle, uygulanan gerilmenin elde edilen uzamayla orantılı olarak değiştiği, yani aralarında bir orantı katsayısının (E) bulunduğu bölgenin sınırına karşılık gelen gerilme değeridir.

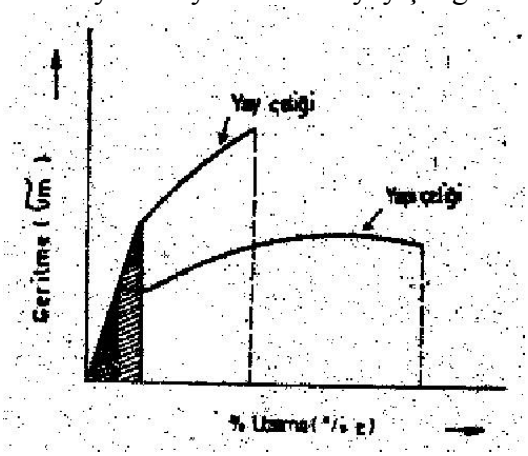
- *Elastiklik sınır:* Malzemeye uygulanan kuvvet kaldırıldığı zaman plastik uzamanın görülmediği veya yalnız elastik şekil değişiminin meydana geldiği en yüksek gerilme değeridir. Hassas olarak belirlenen bu sınırın orantı sınırından daha yüksek olmasına karşın, uygulamalarda genellikle elastik sınır orantı sınırına eşit kabul edilebilir.
- *Rezilyans:* Bir malzemenin elastik olarak şekil değiştirdiğinde absorbe ettiği enerjiyi, şekil değişimi yapan kuvvetin kalkmasıyla geri vermesi özelliğine rezilyans denir. Rezilyans, rezilyans modülü ile ölçülür ve çekme eğrisinin elastik sınıra kadar olan kısmı altında kalan alandır.

  Rezilyans modülü ($U_R$) = $\sigma_a.e/2 = \sigma_a^2/2E$

  $\sigma_a$=Malzemenin akma gerilmesi
  e =Elastik uzama oranı

E =Elastisite modülü

Yukarıdaki bağıntıdan da görüleceği gibi, yüksek akma gerilmesine ve düşük elastisite modülüne sahip malzemeler (örneğin yay çelikleri) yüksek rezilyans modülüne sahiptir. Aşağıdaki şekilde orta karbonlu bir çelik ile yay çeliğinin rezilyans modüllerini veren bölgeler gösterilmiştir. Buna göre akma dayanımı yüksek olan yay çeliğinin rezilyansı da yüksektir.

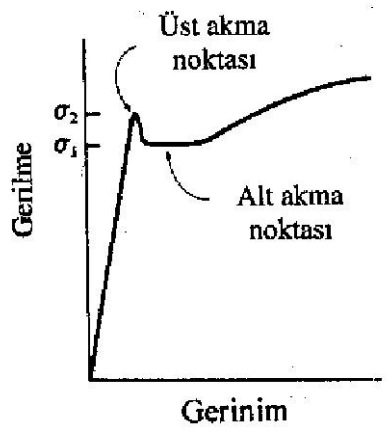



Şekil 1.7. Orta karbonlu bir yapı çeliği ile bir yay çeliğinin çekme diyagramlarının karşılaştırılması.

**b) Plastik bölgede ölçülen büyüklükler**

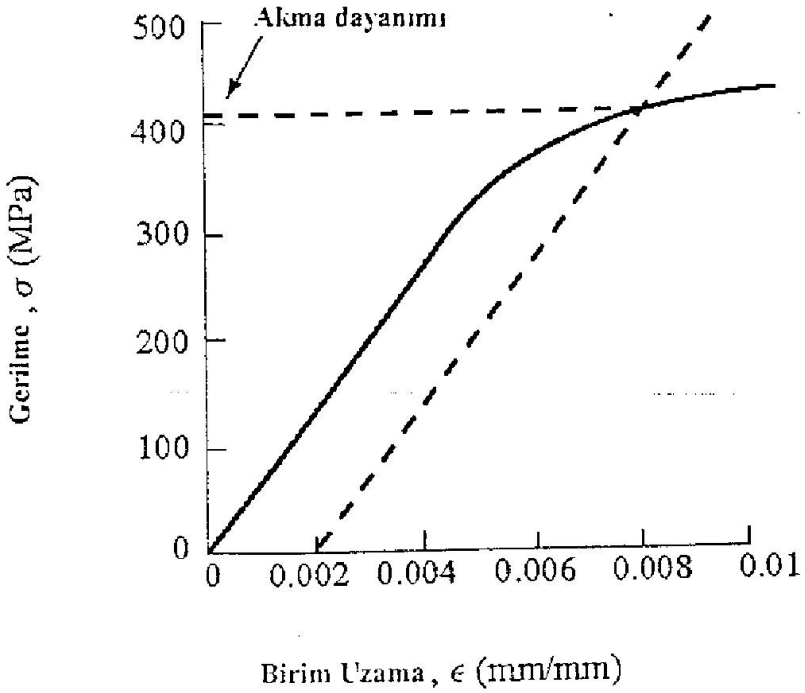
• **Akma gerilmesi ($\sigma_a$):** akma dayanımı, kaymanın fark edilir ve etkili olduğu durumdaki gerilmedir. Düşük karbonlu çelikler gibi belirli bir şekilde akma gösteren malzemelerde akma gerilmesi akma yükünün ($F_{akma}$) numunenin orijinal kesit alanına bölünmesi ile bulunur. Bu tür malzemelerde kuvvetin ilk kez sabit kaldığı veya düşmeye başladığı gerilme, akma sınırı olarak alınır. Önemli bir gerilme düşüşü varsa o zaman alt ve üst diye ayırt edilen iki akma sınırı söz konusudur. Alt akma sınırı süreksizliklerin sona erdiği en küçük gerilmedir. Bu tip bir değişim daha çok ara yer atomu içeren malzemelerde görülür. Küçük ara yer atomları bu bölgede dislokasyonların etrafında kümeleşerek kaymayı engeller ve akma noktasını yükseltir (üst akma noktası). Kayma olayı başladıktan sonra dislokasyonlar küçük atom kümelerinden uzaklaşır ve daha düşük gerilme seviyelerinde (alt akma noktası) hızlı hareket etmeye devam eder. Bu bölge homojen olmayan deformasyonlarla birlikte başlar ve gözle görülen Lüders bantları şeklinde bütün gövdeye yayılır. Bu konu ileride daha detaylı bir şekilde ele alınacaktır. Bu tip gerilme-uzama davranışı sergileyen malzemelerde akma dayanımı kolaylıkla belirlenir.

Akma gerilmesi ($\sigma_a$)= $F_a/A_0$ [kg/mm$^2$ veya N/mm$^{2]}$
$A_0=\pi d_0^2/4$
$A_0$: Deformasyon öncesi (orijina) kesit alanı (mm$^2$)
$F_a$: Akmaya neden olan kuvvet (kg veya N)




Şekil 1.8. Belirgin akma noktası gösteren malzemelerde akma dayanımının belirlenmesi.

Mühendislik malzemelerin çoğu bariz bir şekilde akma noktası göstermez. Bu durumda akma gerilmesi ise, mühendislik çekme diyagramı üzerinden, %0,2 kadar kalıcı bir deformasyona neden olan kuvvetin numunenin orijinal kesit alanına bölünmesiyle bulunur. Söz konusu kuvvetin belirlenmesi için, %0.2 kalıcı şekil değişimi noktası belirlenir ve bu noktadan gerilme-şekil değişimi eğrisinin elastik kısmına bir paralel çizilir. Bu paralelin gerilme-uzama eğrisini kestiği noktaya karşılık gelen gerilme değeri o malzemenin akma dayanımı olarak alınır.




Şekil 1.9. Belirgin akma noktası göstermeyen malzemelerin akma gerilmesinin belirlenmesi.

$\sigma_{a,0.2} = F_{a,0.2}/A_0$

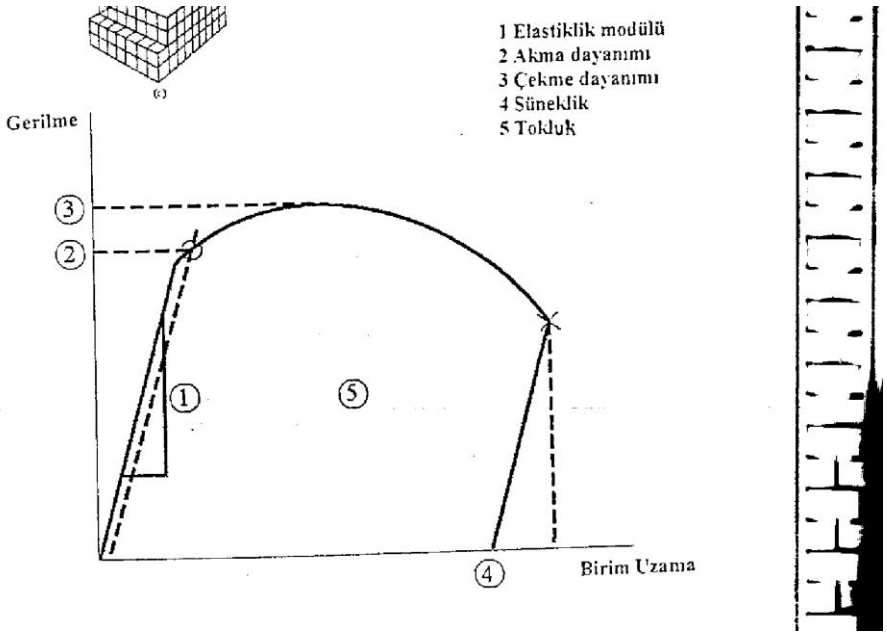
Akma dayanımı, mühendislik malzemelerin en önemli mekanik özelliklerinden biridir. Dizayn mühendisliğinde, akma mukavemeti müsaade edilebilen maksimum sınırdır. Akma mukavemetinin üzerindeki değerler ise malzeme şekillendirme işlemlerinde kullanılır.

Kullanım esnasında, uygulanan kuvvete dayanabilecek parçalar tasarlanıyorsa, parçanın plastik olarak şekil değiştirmediğinden emin olunmalıdır. Motor içindeki krank milleri belirlenmiş şekillerinin dışında şekil değişimine uğratıldıklarında kullanılamazlar. Bu nedenle bu tür yük taşıyıcı parçaların yapımında yüksek akma dayanımlı malzemeler tercih edilmeli veya uygulanan kuvvetin akma dayanımının altında gerilme sağlaması için büyük kesitli parçalar kullanılmalıdır. Diğer taraftan, şekillendirme veya şekil değiştirme işlemi gerektiren uygulamalarda, uygulanan gerilme malzemenin akma dayanımının üzerinde olmalıdır. Bu tür uygulamalarda ise çok yüksek akma noktasına sahip malzemeler pek tercih edilmez.

- **Çekme gerilmesi ($\sigma_ç$)**: Bir malzemenin kopmadan dayanabileceği maksimum gerilmeye maksimum çekme gerilmesi veya çekme dayanımı denir. Bu gerilme değeri numuneye uygulanan maksimum yükün ($F_ç$) orijinal kesit alanına ($A_0$) bölünmesiyle bulunur.

Çekme gerilmesi ($\sigma_ç$)= $F_ç/A_0$ [kg/mm$^2$ veya N/mm$^2$]

Malzemenin süneklik değerleri yanında, akma dayanımının çekme dayanımına oranı ($\sigma_a/\sigma_ç$) da malzemenin şekillendirilme kabiliyetini gösteren önemli bir büyüklük olarak değerlendirilmektedir. Söz konusu oran iyi şekillendirilebilen yumuşak çelikte yaklaşık 0.66 iken, söz konusu özelliğin çok yetersiz olduğu malzemelerde (örneğin sertleştirilmiş çelikler) 1'e yakındır.




Şekil 1.10. Çekme gerilmesinin belirlenmesi.

- **Kopma uzaması:** Kopma uzaması, numunede ortaya çıkan toplam uzama miktarının numunenin orijinal ölçü uzunluğuna oranı olarak tanımlanır.

Kopma uzaması (%)= $\Delta L/L_0 x100=L_k-L_0/L_0 x100$

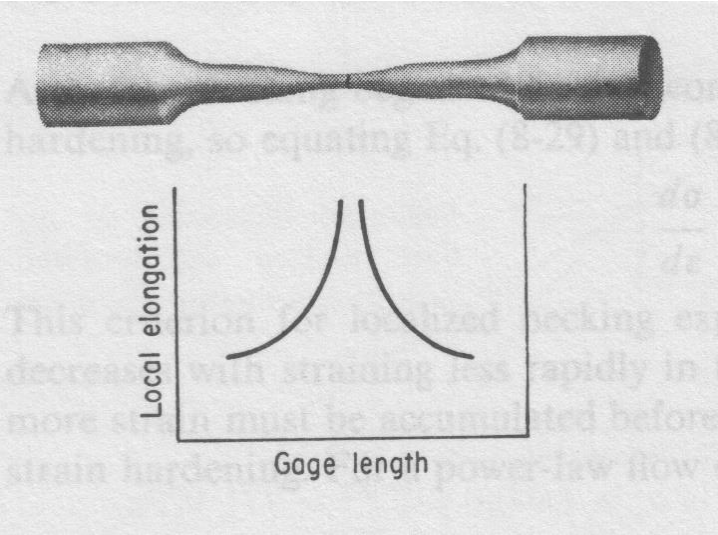
Maksimum yüklemeye kadar numunenin boyunun uzaması homojendir. Başka bir değişle bu bölgede numune kesiti homojen olarak daralır. Bu noktadan sonra ise boyun teşekkülü (numune kesitinin bir bölgede hızlı bir şekilde küçülmesi) başlar ve bundan sonraki deformasyon numunenin uzunluğu boyunca üniform değildir. Bu nedenle, üniform uzama

oranının belirlenmesi de sonuçların irdelenmesi açısından önemlidir. Üniform uzama yüzdesi, en büyük kuvvetin ($F_ç$) oluşturduğu orantısız uzamanın başlangıç ölçü boyuna bölünmesi ile elde edilir.

Üniform uzama (%)=$\Delta L_ü / L_0 x100 = L_ç - L_0 / L_0 x100$

Pekleşmenin kesit daralmasına göre daha etkili oluşu ve sürekli yük artışına neden olan bu davranışın sona ermesiyle, uzama ve enine daralma deney parçasının sadece bir bölümünde devam eder. Büzülme denilen bu yerel kesit daralması sırasında kuvvet ve bunun başlangıç kesit alanına bölünmesiyle elde edilen anma gerilmesi düşer. Üniform uzama yüzdesi büzülmesiz şekillendirilebilme için bir sınır değer olduğundan üretim açısından önemlidir.

Çekme deney numunesinde homojen deformasyon bölgesinden sonra meydana gelen uzama miktarı numunenin ölçü uzunluğu boyunca değişir. Aşağıdaki şekilde, boyun verme bölgesinin tam ortasında (en ince kesit) en büyük uzamanın gerçekleştiği gözlenmektedir.



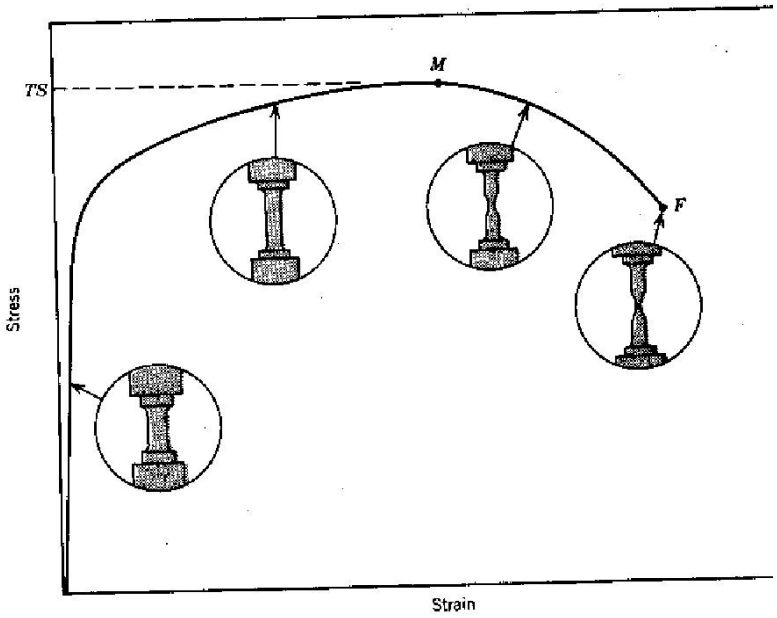

Şekil 1.11. Çekme deney numunesinde meydana gelen bölgesel uzama [Dieter]

• **Kesit daralması (%):** Kesit daralması, numunenin koptuktan sonraki kesit alanındaki daralmanın, başlangıçtaki orijinal kesit alanına oranının % olarak ifadesidir.

Kesit daralması (%)=$\Delta A_k / A_0 x100 = A_0 - A_k / A_0 x100$

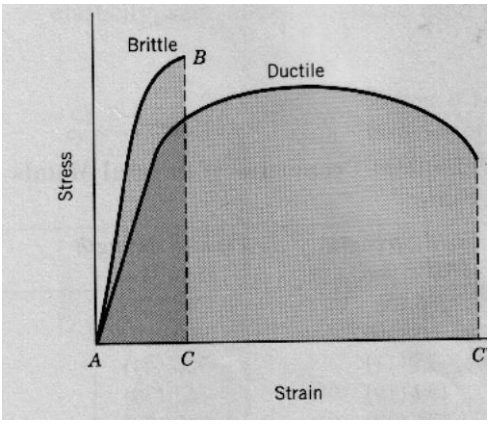
$A_k$: Numunenin kopma bölgesinin kesit alanı

Yüzde uzama ve yüzde kesit daralması malzemenin sünekliği hakkında genel bir fikir elde edilmesini sağlar. Bu değerleri yüksek olan malzemelerin deformasyon kabiliyetlerinin de iyi olduğu anlaşılır. Öte yandan süneklik, hem tasarımcı hem de imalatçı için önemlidir. Bir parçanın tasarımcısı en azından belirli bir süneklik sergileyen malzemeyi tercih eder. Böylece uygulanan kuvvet çok yüksek olsa bile parça kırılmadan önce şekil değiştirebilir. İmalatcı için sünek malzemeler gereklidir. Böylece karmaşık biçimler, işlenme sırasında kopma ve/veya kırılma olmaksızın elde edilebilir.




Şekil 1.12. Kesit daralmasının gerilme-uzama diyagramı üzerinde şematik gösterimi

- **Tokluk:** Bir malzemenin plastik deformasyon sırasında enerji absorbe etme özelliğine tokluk denir. Çekme eğrisi altında kalan alan çekme işini verir ve bu değer tokluğun bir ölçüsüdür. Aşağıdaki şekilde tokluğu yüksek ve düşük iki malzemenin çekme diyagramı verilmiştir. Bu malzemelerden yüksek karbonlu yay çeliğinin akma ve çekme mukavemeti orta karbonlu yapı çeliğinin akma ve çekme mukavemetinden çok daha yüksektir. Ancak, yapı çeliğinin toplam % uzama miktarı daha fazla yani, sünekliği daha iyidir. Yapı çeliği için çekme diyagramı altındaki alan daha büyük olduğundan, yapı çeliği yay çeliğine göre daha tok bir malzemedir. Buna göre tokluk, mukavemet ve sünekliğin her ikisini de içine alan bir özelliktir.




Şekil 1.12. Gevrek ve sünek (tok) iki malzemede tokluğun gösterimi

Tablo 1.2. Bazı mühendislik malzemelerinin oda sıcaklığındaki bazı temel mekanik özellikleri [Bowman]

**TABLE 1.3 Typical Deformation Properties of Various Materials at Room Temperature**

| Material | Yield stress (MPa) | Elongation (%) | Reduction in area (%) | Strain hardening exponent, *n* |
|---|---|---|---|---|
| Aluminum alloys | 80–600 | 10–20 | 10–30 | 0.1–0.25 |
| Copper alloys | 100–800 | 5–29 | 10–60 | 0.5 |
| Iron alloys and steels | 200–1800 | 10–50 | 15–60 | 0.1–0.2 |
| Stainless steels | 250–600 | 20–50 | 10–40 | 0.4–0.6 |
| Titanium alloys | 200–1200 | 5–15 | 20–30 | * |
| Aluminum oxide | 5000 | ≈0 | ≈0 | * |
| Silicon carbide | 10,000 | ≈0 | ≈0 | * |
| Glass | 3000–4000 | ≈0 | ≈0 | * |
| Polyethylenes (PE) | 5–50 | 50–1000 | — | ** |
| Polymethylmethacrylate (PMMA) | 20–50 | 3–6 | — | ** |
| Polystyrene (PS) | 30–80 | 1–3 | — | ** |

*These materials fail without plastic deformation in tension. Given values are for compression.

**The stress-strain behavior does not normally fit Eq. 1.25.

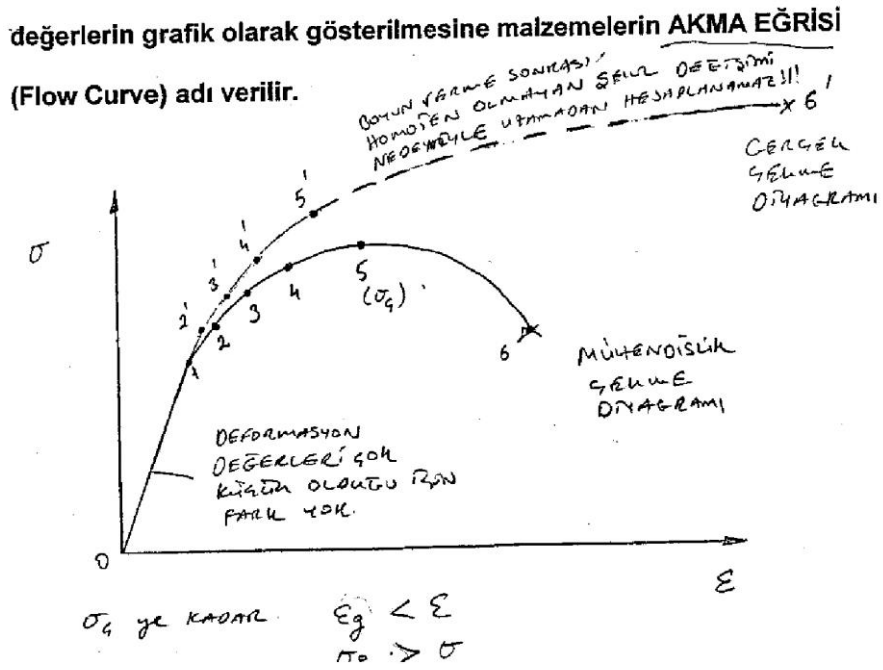
### 1.3.2. Gerçek gerilme-gerçek uzama diyagramı (true stress-true strain diagram)

Çekme deneyi sırasında, numunenin kesiti sürekli olarak azalır ve bu nedenle numuneye etki eden gerçek gerilme değerleri mühendislik gerilme değerine göre farklılık gösterir. Mühendislik gerilmesinin hesabında, çekme kuvveti her seferinde numunenin orijinal kesit alanına bölündüğü için bu fark ortaya çıkmaktadır. Gerçek gerilme, hesaplandığı andaki çekme kuvvetinin o andaki parça kesitine bölünmesiyle bulunur. Ayrıca, çekme deneyi sırasında deney parçasında deformasyonun homojen olmaması nedeniyle, mühendislik birim şekil değişimi ölçü boyuna bağlı ($l_0$) olarak değişmektedir. Bu nedenle, mühendislik birim şekil değişiminden farklı olarak gerçek birim şekil değişimi tanımlanmıştır. Gerçek birim şekil değişimi ise her an için uzayan boya göre bulunur. Dolayısıyla elde edilen mühendislik ve gerçek birim şekil değişimleri birbirinden farklıdır. Aşağıda, gerçek ve mühendislik gerilme-birim şekil değişimini gösteren eğriler bir arada verilmiştir

Aşağıdaki şekilden görüldüğü gibi, gerçek çekme diyagramı mühendislik çekme diyagramı gibi bir maksimumdan geçmez. Gerçek çekme eğrisinin eğimi (pekleşme hızı veya pekleşme derecesi), $d\sigma/d\varepsilon$, gerçek gerilme değerine eşit olduğu anda ($d\sigma/d\varepsilon=\sigma_g$) çekme gerilmesi de maksimum değerini almaktadır.

Bu sonuç, fiziksel bakımdan pekleşme nedeniyle gerilme artışının, kesit küçülmesi nedeniyle gerilmedeki düşmeyi engellediğini gösterir. Çekme deneyi sırasında, çekme gerilmesinin etki ettiği kesit sürekli olarak azalmaktadır. Eğer kesit azalması olmasa, çekme gerilmesi plastik alanda pekleşmeye bağlı olarak sürekli bir şekilde artacaktır. Buna karşılık, eğer pekleşme olmasa kesit küçülmesi nedeniyle çekme gerilmesinin düşmesi gerekecekti. Çekme gerilmesinin maksimum olduğu noktaya kadar, pekleşme nedeniyle gerilmedeki artış, kesit küçülmesi nedeniyle gerilmedeki düşüşten fazladır. Çekme diyagramları incelenirse plastik alanda pekleşme derecesinin sürekli olarak küçüldüğü görülür. Pekleşme derecesinin küçülmesi ise, pekleşme nedeniyle gerilmenin yükseltilmesi gereğini azaltır. Sonuçta, çekme

kuvvetinin maksimum olduğu noktada $d\sigma/d\varepsilon=\sigma_g$ elde edilir. Şekil değişiminin daha da artması plastik dengesizliğe yol açar, deney çubuğu büzülmeye başlar ve bu bölgede yoğunlaşan şekil değiştirme sonunda parça kopar. Bununla beraber, tüm çekme deneyi boyunca, dolayısıyla maksimum noktadan sonra da pekleşme devem ettiği için gerçek çekme diyagramı mühendislik çekme diyagramı gibi bir maksimumdan geçmez ve gerçek gerilme kopma anına kadar artar.




Şekil 1.12. Mühendislik ve gerçek gerilme-şekil değişimini gösteren diyagramlar.

Tasarım mühendisliğinde mühendislik değerlerini kullanmak yeterli olurken, büyük şekil değişimlerin söz konusu olduğu metal şekillendirme işlemlerinin analizinde ise mutlaka gerçek değerler kullanılmalıdır.

Gerçek gerilme $(\sigma_g)=F_i/A_i$
Gerçek birim şekil değişimi $(\varepsilon)$, $d\varepsilon=dL_i/L$,

$$\varepsilon=\int_{e_0}^{e_i}\frac{dL_i}{L}=\ln L_i/L_0$$

$F_i$: Herhangi bir i noktasındaki çekme kuvveti
$A_i$: $F_i$ kuvvetinin tatbik edildiği herhangi bir i noktasındaki numune kesit alanı
Li: Herhangi bir i noktasındaki numune boyu

Çekme deneyi sırasında hacmin değişmediği kabulünden yola çıkılarak, mühendislik ve gerçek değerler arasında bazı ilişkiler kurulabilir. Nitekim, yoğunluk ölçümleri, plastik deformasyon sırasında numunenin hacminde %0.1'den daha küçük olan ve ihmal edilebilecek mertebede değişimler olduğunu göstermiştir. Bu durumda, mühendislik değerlerin bilinmesi durumunda gerçek değerler saptanabilmektedir.

$V_i=V_0$ ve $V_i=A_iL_i=A_0L_0$

$V_0$: Orijinal (deformasyon öncesi) numune hacmi
$V_i$: Deformasyonun herhangi bir i anındaki numune hacmi

$V_0=V_i= A_0L_0= A_iL_i$ veya $L_i/L_0=A_0/A_i$

$e= \Delta L/L_0=L_i-L_0/L_0=L_i/L_0-1$ ve $L_i/L_0=1+e$

$$\varepsilon=\int_{\varepsilon_0}^{\varepsilon_i}\frac{dL}{L}=\ln L_i/L_0$$

$L_i/L_0=1+e$ eşitliği gerçek uzama bağıntısında yerine konursa,

$$\boldsymbol{\varepsilon=LnL_i/L_0=Ln(1+e)}$$

Öte yandan,

$V_0=V_i= A_0L_0= A_iL_i$ veya $A_i=A_0L_0/L_i$

$\sigma_g=F_i/A_i=F_i/A_0.L_i/L_0=\sigma_m.L_i/L_0$ ve $L_i/L_0=1+e$

$$\boldsymbol{\sigma_g= =\sigma_m(1+e)}$$

Gerçek birim şekil değiştirmeyi kullanmanın diğer bir faydalı yanı, her kademedeki birim şekil değiştirmelerin toplamının, toplam birim şekil değiştirmeye eşit olmasıdır. Diğer bir değişle, gerçek birim şekil değiştirme toplanabilir özelliğe sahiptir, fakat mühendislik birim şekil değiştirme için bu özellik söz konusu değildir.

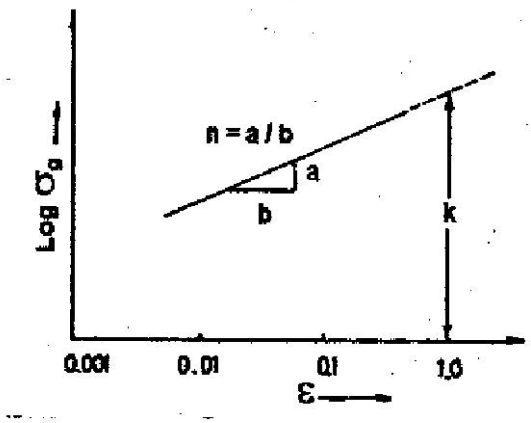
Gerçek gerilme-gerçek birim şekil değişimi eğrisine genellikle *plastik akış eğrisi (akma eğrisi)* denir. Çünkü bu eğri, belirli bir deformasyon oranı için metalin plastik olarak akışını sağlayacak gerekli gerilmeleri belirtmektedir. Metallerin akma eğrisi genellikle *Holloman Bağıntısı* olarak bilinen üstel bir ifade ile temsil edilmektedir. Bu bağıntı plastik deformasyonun başladığı akma noktası ile boyun vermenin başladığı homojen deformasyon bölgesinde geçerli olup, bu bölgenin dışında kullanılmamalıdır. Ayrıca metallerin ilk akma mukavemetini belirlemek amacıyla da bu bağıntının kullanılmasından kaçınılmalıdır.
Bu bağıntı matematiksel olarak aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\sigma_g =K.\ \varepsilon^n$$

Burada;
n: Deformasyon sertleşme üssü (strain hardening exponent)
K: Mukavemet katsayısı

Yukarıdaki eşitliğin her iki tarafının da logaritması alınırsa,

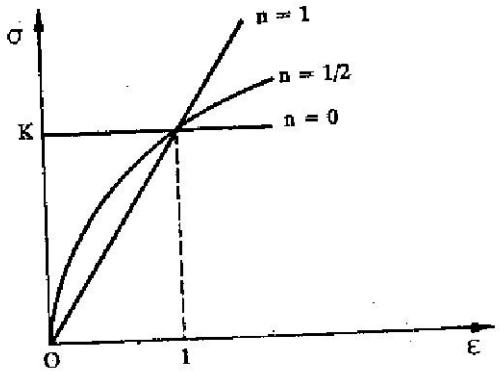
$\ln\sigma_g =\ln K+n.\ln\varepsilon$ olur. Bu ise logaritmik skalada bir doğru denklemi (y=a+b.x) verir.




Şekil 1.13. Deformasyon sertleşme üssü (n) ve K değerlerinin tayini

Elde edilen doğrunun eğimi direk olarak deformasyon sertleşme üssü n değerini verirken, gerçek birim şekil değişimini 1 yapan gerilme değeri de dayanım sabiti olarak K değerini veriri. Metalik malzemelerde n değeri,

$0 \langle n \langle 0.45$ arasında değerler almaktadır.




Şekil 1.14. n değerinin değişimi

n değeri, malzemenin deformasyon sertleşmesine uğrama ve deformasyondan dolayı dayanımı artırma kabiliyetini belirlemektedir. Malzemede pekleşmenin olmadığı durumlarda (sıcak deformasyon şartlarında) n değeri sıfıra yaklaşır. Bir çok mühendislik malzemesi için bu değer 0.15 ile 0.25 arasındadır. Deformasyon sertleşme üssü arttıkça üniform birim şekil değişim miktarı da artmaktadır. Dayanım sabiti K ise doğrudan malzemenin dayanımı hakkında fikir vermektedir. Diğer bir değişle K değerinin yüksek olması durumunda malzemenin dayanımının yüksek olduğu anlaşılır.

K ve n değerleri malzeme sabitleridir. Ancak, gerçekte bu değerler örneğin mikroyapısı ısıl işlemle değiştirilebilen malzemeler için tek bir değer değildir. Örneğin, %0.2 C içeren bir çelikten hazırlanan iki parçadan biri tavlanmış, diğeri de ostenitleştirilip yağda su verilmiş ise bu iki çelik parçanın K ve n değerleri birbirinden farklıdır. Benzer olarak çözeltiye alınmış ve yaşlandırılmış 2024 alüminyum alaşımının K ve n değerleri aşırı yaşlanmış olanlardan farklıdır. Aşağıda çeşitli malzemelerin K ve n değerleri verilmiştir. Deformasyon sertleşmesi üssü (n) sıcaklıktan etkilenen bir malzeme özelliğidir. Sıcaklığın

yükselmesi n değerinin düşmesine neden olur. Ayrıca n değeri deformasyon hızı yükseldikçe küçülür.

Tablo 1. 2. Tavlanmış durumdaki çeşitli malzemelerin oda sıcaklığındaki deformasyon sertleşmesi üssü (n) ve mukavemet katsayısı (K) değerleri

| Malzeme | n | K [MPa] |
|---|---|---|
| 1008 çeliği (%0.08C) | 0.25 | 600 |
| 1015 çeliği (%0.15C) | 0.18 | 620 |
| 1045 çeliği (%0.45C) | 0.12 | 950 |
| 302 paslanmaz çelik | 0.3 | 1300 |
| 410 paslanmaz çelik | 0.1 | 960 |
| Bakır | 0.33 | 450 |
| Pirinç (Cu-30Zn) | 0.41 | 500 |
| Pirinç (Cu-40Zn) | 0.5 | 800 |
| 1100 Alüminyum | 0.25 | 140 |
| 2017 Alüminyum | 0.15 | 380 |
| 5052 Alüminyum | 0.13 | 210 |
| 7075 alüminyum | 0.17 | 400 |

Gerilme-birim şekil değiştirme arasındaki ilişkiyi veren $\sigma_g = K.\ \varepsilon^n$ bağıntısı, homojen plastik deformasyon bölgesi için geçerli olup, $\varepsilon=0$ değeri için $\sigma_g=0$ değerini vermektedir. Bu nedenle Holloman denklemine akma gerilmesi ($\sigma_a$) ilave edilerek bulunan ve çok sık kullanılan *Ludwig* denklemi,

$$\sigma_g = \sigma_a + K\ \varepsilon^n$$

şeklinde ifade edilir.

Homojen deformasyon bölgesinde, deformasyon sertleşme üssü (n) her zaman sabit bir tek bir değere eşit olmayabilir. Özellikle çok küçük ve çok büyük şekil değişimlerinde farklı n değerlerinin olduğu, $\sigma_g = K\ \varepsilon^n$ bağıntısına göre çizilen $\ln\sigma_g$-$\ln\varepsilon$ grafiğinde farklı eğimlerin bulunmasından anlaşılır. Bu durumda plastik deformasyon bölgesi için *Swift denklemi* olarak bilinen,

$$\sigma_g = K(\varepsilon_0 + \varepsilon)^n$$

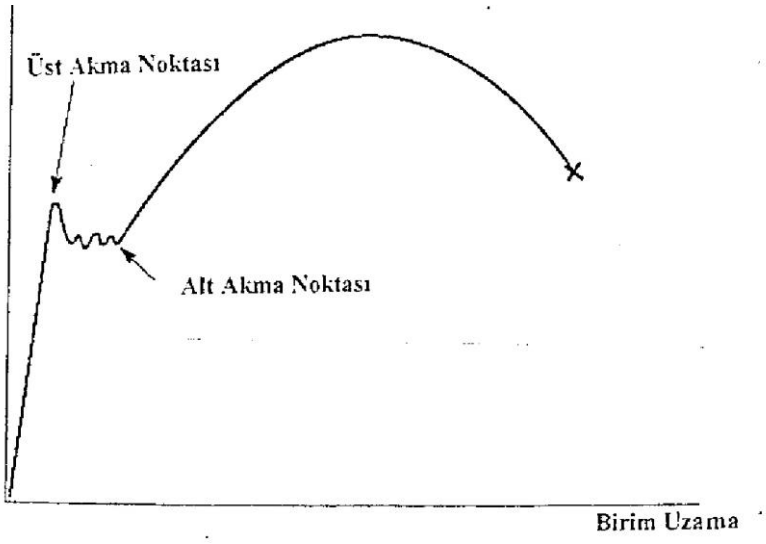
bağıntısını kullanmak daha uygundur. Burada;

$\varepsilon_0$: Malzemeye deney öncesi uygulanan deformasyon miktarı ile ilgili bir sabit. Bu değer tavlanmış malzemelerde $\varepsilon_0=0$, soğuk işlem görmüş malzemelerde ise $\varepsilon_0 \langle n$ değerlerinde olmaktadır.

Bu bağıntı ile ilk deformasyon sertleşmesinin etkisi, ilave birim şekil değişimi ile birleştirilerek elde edilmiştir. Burada, $\varepsilon_0$ değerinin ilk soğuk işlemin neden olduğu birim şekil değiştirme, $\varepsilon$ değerinin ise daha sonra yapılan soğuk işlemin neden olduğu birim şekil değiştirme olduğu ortaya çıkar.

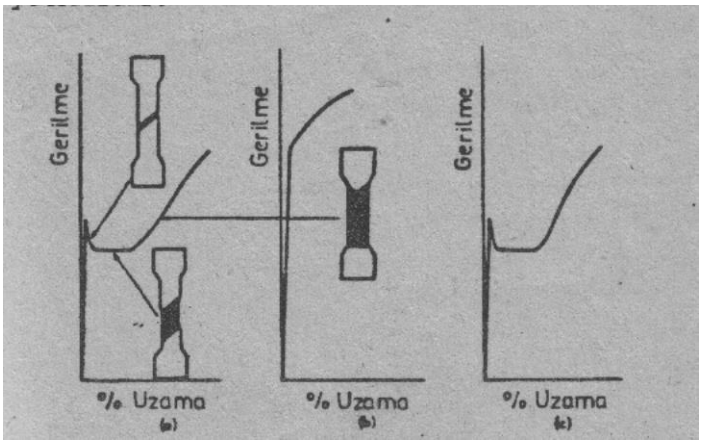
## 1.4. Belirgin akma (süreksiz akma) olayı ve deformasyon yaşlanması

Bazı metalik malzemeler elastik şekil değişiminden plastik şekil değişimine geçerken akma olayını belirgin bir şekilde gerçekleştirirler. Bu malzeme grubuna en iyi örnek yumuşak durumdaki (tavlanmış) düşük ve orta karbonlu çeliklerdir. Bu durum özellikle HMK yapılı ara yer katı çözeltisi içeren metalik malzemelerde görülmektedir. Bu malzemelerde, elastik deformasyon bölgesi ile homojen plastik deformasyon bölgesini birbirinden ayıran, dar bir homojen olmayan plastik deformasyon bölgesi gözlenmektedir. Bu tür malzemelerde, gerilme belirli bir noktaya kadar elastik olarak artar, sonra aniden düşer ve malzeme bir süre bu gerilme civarında homojen olmayan deformasyona uğrar. Daha sonra plastik deformasyon homojen gerilme artımı ile devam eder. Bu tip akma olayına süreksiz akma adı verilir.




Şekil 1.15. Belirgin akma noktası gösteren malzemelerin gerilme-uzama eğrisi

Bu durum özellikle C ve N gibi ara yer atomu içeren düşük ve orta karbonlu çeliklerde görülür. Ara yer elementi içeren diğer katı çözeltilerde (örneğin; N içeren β-princi, Cd ve Zn) de bu tip akma görülmekle birlikte akma bölgesi çelikteki kadar açık değildir. Süreksiz akma olayı ara yer atomlarının mevcudiyetine dayanılarak açıklanmaktadır. Nitekim C ve N gibi ara yer atomlarından tamamen arındırılan bir çelikte belirgin akma olayı gözlenmemiştir. Deformasyon sırasında C ve N gibi ara yer atomları dislokasyon olan bölgelere yerleşerek dislokasyonların önünde bir atmosfer oluşturmakta ve bu sayede onların hareketini zorlaştırmaktadır. Bu oluşuma, ilk defa 1948'de Cottrell tarafından açıklandığı için *Cottrell Atmosferi* adı verilmiştir. Böyle bir malzemede plastik deformasyonu başlatabilmek için, dislokasyonları söz konusu atmosferden kurtararak serbest hale geçirebilecek veya yeni dislokasyonlar oluşumuna neden olacak oldukça yüksek bir gerilmeye ihtiyaç vardır. Bu gerilme *üst akma gerilmesi* olarak tanımlanmaktadır. İlk akmanın gerçekleştiği kayma bandında hemen pekleşme meydana geldiği için burada deformasyonun ilerlemesi durur ve diğer bölgelerde akma olayı gerçekleşmeye başlar. Üst akma noktasından sonra gelişen testere dişi görünümündeki bölge kayma bantlarında akmanın gerçekleştiğini belirtir. Oluşan bu bantlara *Lüders Bantları,* gerçekleşen uzamaya da *Lüders uzaması* denir. Bu bantlar genellikle çekme eksenine 45° eğimle oluşur. Atmosferden kurtulan dilokasyonları hareket ettirmek için gerekli gerilme daha düşük olacağından, üst akma noktasından sonra gerilme düşer. Düşen gerilmenin alt değeri ise alt akma noktasını temsil etmektedir. Bu durumda üst akma gerilmesinin Lüders bandının çekirdeklenmesini, alt akma gerilmesinin ise numune boyunca ilerlemesini sağlayan gerilme olduğu söylenebilir. Bu olay tamamlanınca malzeme homojen olarak pekleşmeye başlar.

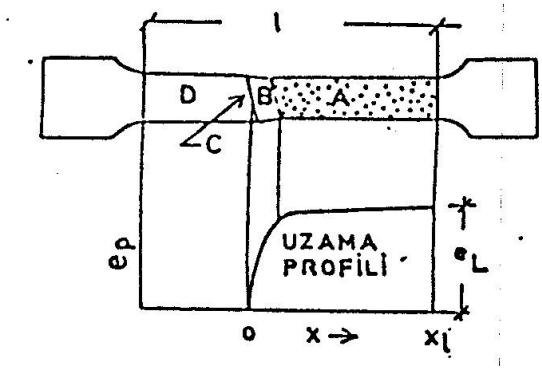


Şekil 1.16. Az karbonlu çelikte süreksiz akma olayı ve lüders bandlarının oluşumu. (a) Tavlanmış, (b) deforme edilmiş, (c) tekrar tavlanmış.

Süreksiz akma olayı görülen malzemelerde, deformasyonun başlaması devam etmesinden çok daha güçtür. Süreksiz akma halinde uzama, Lüders bantlarının numune boyunca ilerlemesi sonucunda meydana gelir. Numuneyi tutan çenelerdeki gerilmeler, numune yüzeyindeki pürüzle, gerilme konsantrasyonuna neden olur ve Lüders bantlarının oluşmasına neden olur. Lüders bantlarının numune boyunca ilerlemesi sırasında aşağıdaki şekilde görüldüğü gibi başlıca üç bölge meydana gelir. Bunlar;

a) Bandın arkasında kalan deforme olmuş bölge (A bölgesi) Bu bölge deformasyon sertleşmesine uğramış olup, deformasyonun ilerlemesi halinde önemli ölçüde deforme olmayan bölgedir.
b) Bandın önünde yer alan deforme olmamış bölge (D bölgesi)
c) Lüders bandı bölgesi (B bölgesi). Bu bölgede toplam uzama miktarı bandın sınırından itibaren sıfırdan başlayarak bandın arkasında toplam Lüders uzamasına ulaşır. Böylece uzama profili, deformasyonun, numune boyuna kıyasla oldukça dar bir bölgede yer aldığını göstermektedir. Deformasyon, Lüders bantlarının ilerlemesi ile devam ettiğinden genellikle uygulanan yükte önemli bir değişim olmaz ve çekme eğrisi Lüders bölgesinde yatay gider. Bu nedenle Lüders bölgesinde deformasyon sertleşmesinin oluşmadığı varsayılırsa da bu kabul tamamen yanlıştır. Çünkü yükün sabit kalmasına rağmen, bant sınırındaki uzama miktarına bağlı olarak kesitte meydana gelen azalma, gerilmenin bant boyunca değişimine neden olur.

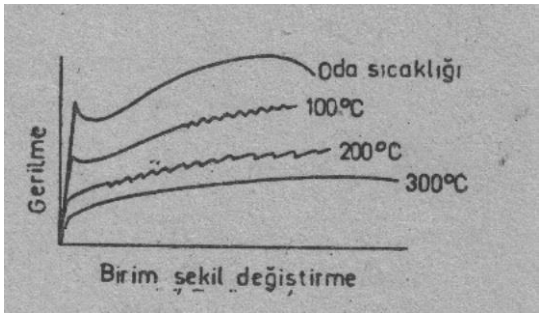
Lüders uzunluğu uygulanan yüke, deformasyon sertleşmesi karakteristiklerine ve numunenin geometrisine bağlıdır. Lüders bant sınırı yaklaşık olarak maksimum kayma gerilmesinin yer aldığı düzlemde uzanır. Üniform süreksiz uzama gösteren malzemelerde akmanın başlangıcında oluşan ani yük düşmesi, Lüders bant sınırı hızının düşmesi ile açıklanmaktadır. Çünkü bant sayısının ve mevcut bantların uzunluklarının aniden artması bu düşmeye neden olur ve kısa bir süre sonra bazı bantlar bir araya gelerek deformasyonun ilerlemesi için gerekli yük miktarı tedricen artar. İki Lüders bandı zıt yönde hareket ettiğinde her ikisinin karşılaşmaları halinde genellikle bunlar tam olarak birbirine paralel olmadığından aralarında deforme olmamış bir bölge kalabilir.




Şekil 1.17. Lüders bantlarının uzaması ve uzama profili. A: deforme olan bölge, B: Lüders bandı, C: Lüders bant sınırı, D: henüz deforme olmamış bölge. X: Lüders bant sınırının arkasında kalmış bölge, $e_L$, $x_l$'nin neden olduğu Lüders uzama oranı.

Çekme deneyi, akma bölgesinden sonra durdurulup yük boşaltıldıktan hemen sonra numune tekrar çekme deneyine tabi tutulursa, yeni çizilen gerilme-birim şekil değiştirme eğrisinde alt ve üst akma noktası görülmez. Akma olayının tekrar oluşması için Cottrell atmosferinin tekrar oluşması gerekir. Bu ise ısıl aktivasyon gerektirir. Soğuk şekil değiştirmiş belirgin akma özelliği gösteren bir malzemeye ısıl aktivasyon verilirse (çelik için 100-200 °C yeterlidir) belirgin akma olayı yeniden ve daha yüksek gerilme seviyelerinde meydana gelir. Buna *statik deformasyon yaşlanması (strain ageing)* adı verilir. Bu olay, ön deformasyonla çoğalan dislokasyonların yaşlanma sırasında eriyen atomlar tarafından tekrar kilitlenmesi sonucunda meydana gelir. Deformasyon yaşlanması bu bakımdan yer alan ve ara yer atomlarının dislokasyon bölgelerine yayınmasına bağlıdır.

Süreksiz akma gösteren malzemelerde, deney sıcaklığı oda sıcaklığının altına düştükçe akma gerilmesi (özellikle üst akma gerilmesi), akma düşmesi ve akma uzaması artmaktadır. Oda sıcaklığının üzerine çıkıldıkça genellikle akma gerilmesi azalır ve süreksiz akma olayı kaybolur. Ancak yaşlanabilen düşük karbonlu çeliklerde, pirinç ve Cu-Al alaşımları gibi bazı malzemelerde belirli sıcaklıklarda *dinamik deformasyon yaşlanması* nedeniyle çekme eğrisinde zig-zaklar meydana gelir. Bu durum Portevei-Chatelier olayı olarak bilinir. Bu olayın meydana geldiği sıcaklıkta, eriyen atomlar hareket halindeki dislokasyonlara yayınma yeteneğine sahiptirler. Deformasyon anında, dislokasyonların hareketi zaman zaman bu eriyen atomlar tarafından önlenir. Böylece, dislokasyonların kilitlenip tekrar serbest hale gelmesi çekme diyagramında zig-zaklara neden olur. Yumuşak çeliklerde, 150-250°C arasındaki sıcaklıklarda yapılan deformasyon sırasında görülen ve "*mavi gevreklik*" adı ile tanınan olay dinamik deformasyon yaşlanmasının en tanınmış örneğidir. Dinamik deformasyon yaşlanması, yumuşak çeliklerin dışında α-pirinci ve çeşitli Al alaşımları gibi demir dışı malzemelerde de görülmektedir. Bu olay genellikle 0.3-0.5Tm sıcaklık aralığında ve $10^{-1}$ $s^{-1}$ gibi tipik deformasyon hızlarında meydana gelmektedir. Düşük karbonlu çeliğin mavi gevreklik bölgesindeki deformasyonunda çekme eğrisinde zig-zag tipi değişimin oluşmasına Lüders bantlarının zaman zaman kilitlenmesinin neden olduğu belirlenmiştir. Şöyle ki, deformasyon esnasında hareket eden Lüders bandı, deformasyon yaşlanması nedeniyle bir süre sonra durmakta ve yük artışına neden olmaktadır. Fakat bu esnada başka bir bölgede teşekkül eden Lüders bandı ve bunun hareketi bu kez yükte azalmaya neden olmaktadır. Fakat, yine deformasyon yaşlanması sonucu yük yeniden yükselmektedir. Neticede deformasyon heterojen bir şekilde devam etmekte ve çekme eğrisi testere dişi görünümünü almaktadır.




Şekil 1.17. Çeliklerde dinamik deformasyon yaşlanması

Süreksiz akma olayının ön deformasyona uğramış ve beklemeden çekme deneyine tabi tutulmuş malzemelerde görülmemesinin nedeni şöyle açıklanabilir. Ön deformasyonda hareket eden dislokasyonların yoğunluğu (serbest dilokasyon yoğunluğu) artmış olacağından, bundan sonraki deformasyonda önemli bir dislokasyon çoğalması olmayacak ve süreksiz akma olayı görülmeyecektir. Zamanla bu tür malzemelerde çözünmüş ara yer atomları dislokasyonlara yayınma yoluyla yerleştiklerinde, onları kilitlerler ve hareketlerine engel olurlar. Böylece, bu tür bekletilmiş malzemelerde, sıcaklığa bağlı olarak zamanla süreksiz akma olayı tekrar görülür.

Yumuşatma tavına tabi tutulmuş düşük karbonlu çelik saclar, oda sıcaklığında çekme deneyine tabi tutulduklarında tipik bir süreksiz akma gösterirler. Bu malzemelerin dövülme, derin çekme ve sıvama ile şekillendirilmeleri sırasında süreksiz akma nedeniyle yüzeyde pürüzler meydana gelir. Boyama ve kaplama gibi nihai işlemler gerektiren parçalar için bu tür yüzey hataları kusur sayılır ve kalite kontrolünden geçmez. Çünkü bu etken boya ve kaplamaların iyi tutmamasına, tutsa bile güzel görünmemesine neden olur. Bu etki ancak parlatma gibi nihai işlemler gerektirmesi ilave işçilik ve masraf demektir. Düşük karbonlu çeliklerde süreksiz akma olayını önlemek için birkaç yol mevcuttur. Bunlar;

a) Malzeme yumuşatma tavına tabi tutulduktan sonra düşük oranlarda soğuk ön deformasyon işlemine tabi tutulur. Uygulanan bu işleme “temper haddesi” denir. Temper haddesinde, çok düşük ezme oranı (%5) gibi) ile haddelenen düşük karbonlu sac tekrar çekme deneyine tabi tutulursa, yeni çekme diyagramında süreksiz akma bölgesi görülmez. Ön deformasyona uğramış (veya soğuk şekillendirilmiş) malzemelerde süreksiz akma bölgesinin ortadan kalkması, ön deformasyon ile malzemede dislokasyon yoğunluğunun artması nedeniyledir. Çekme sırasında dislokasyonların hızlı çoğalmayışı akma düşmesine izin vermemektedir. Malzeme tavlandığında ise dislokasyon yoğunluğu azalmakta ve ara yer atomları bu esnada yayınma imkanı bularak dislokasyonları tekrar kilitlemektedir. Sonuç olarak tipik akma noktası yeniden ortaya çıkmaktadır.

b) Süreksiz akmaya ve deformasyon yaşlanmasına neden olan olay N ve C gibi ara yer atomlarının dislokasyon bölgelerine yayılması ve onların hareketini engellemesidir. Bu nedenle, C ve N gibi ara yer atomlarının uygun alaşım elementleri ile bağlanması veya tamamen arıtılması sonucu süreksiz akma ve deformasyon yaşlanması gözükmez.

Akma bölgesine aşağıda sayılan temel faktörler etki eder. Bunlar:

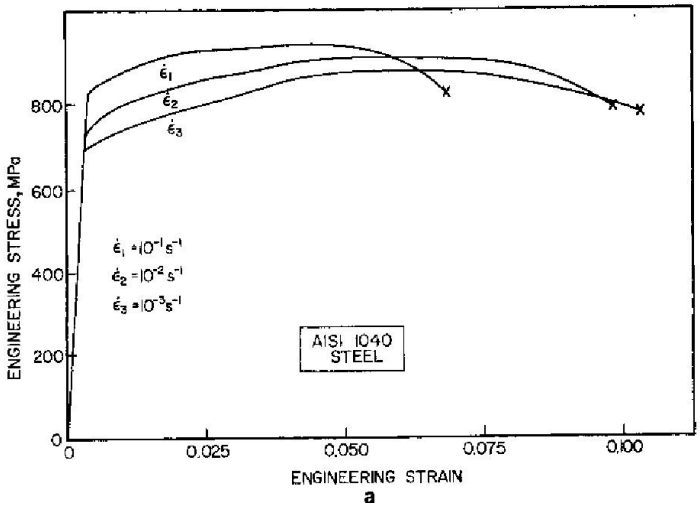
**a) Kimyasal bileşim:** Katı eriyik halindeki alaşımlarda genellikle, çözünen atom miktarı arttıkça akma gerilmesi de artar. Ayrıca, alaşım elementinin yer alan veya ara yer atomu şeklinde çözünmesi akma bölgesine etki eder. Öyle ki, akma düşmesi eriyen atomun ara yer atomu olması halinde daha fazladır. Düşük karbonlu çeliklerde, C ve N miktarlarının azalması ile akma gerilmesi ve Lüders uzaması azalır. Ayrıca, C ve N'u bağlayan elementlerin ilavesi de benzer olaya neden olur.
**b) Deney sıcaklığının etkisi:** Deformasyon sıcaklığı düştükçe, üst akma noktası ve Lüders bölgesi bariz bir şekilde artmaktadır. Ayrıca akma düşmesi ve Lüders uzaması da artmaktadır. Sıcaklık yükseldikçe süreksiz akma bölgesi tedricen kaybolur ve bazı malzemelerde belirli sıcaklıkta çekme eğrisinde zig-zaglar (dinamik deformasyon yaşlanması) meydana gelir.
**c) Deformasyon hızının etkisi:** Deformasyon hızı da süreksiz akma bölgesinin şekline etki etmektedir. Deformasyon hızı arttıkça üst ve alt akma noktası biraz yükselmekte ve akma düşmesi miktarı artmaktadır. Ayrıca akma uzaması da artmaktadır.
**d) Tane boyutunun etkisi:** Tane boyutu, akma bölgesine bariz bir şekilde etki etmekte olup tane boyutu küçüldükçe üst ve alt akma noktaları çekme diyagramında yukarı kaymaktadır. Tane boyutunun akma mukavemetine etkisi genellikle Hall-Petch bağıntısına uymaktadır. Ayrıca, taneler küçüldükçe akma düşmesi de artmaktadır. Ayrıca, yapı inceldikçe Lüders uzamasının da arttığı saptanmıştır.
**e) Çeşitli ön işlemlerin etkisi:** Malzemenin yorulması için uygulanan devir sayısı arttıkça akma uzamasının azaldığı ve akma dayanımının düştüğü görülmüştür. Benzer durum numuneye çekme deneyinden önce hidrojen yüklendiğinde de elde edilmiştir. Çeliklere uygulana ılık işlem sonrası yapıda alt tane oluşumu ile akma mukavemetinin yükseldiği ve deformasyon esnasında süreksiz akma olayının meydana gelmediği saptanmıştır.

## 2.5. Gerilme-birim şekil değiştirme eğrisine etki eden parametreler

Farklı malzemelerin çekme diyagramları farklı olmasına rağmen aynı malzemenin de çekme diyagramları farklı olabilir. Bu farklılık genel olarak, uygulanan deformasyon hızından, deformasyon sıcaklığından ve malzemenin iç yapısındaki farklılıklardan (tane boyutu, safsızlıklar, yapı kusurları vb.) ileri gelmektedir.

### a) Deformasyon hızının çekme eğrisine etkisi

Malzemeye uygulanan deformasyon hızı aşağıdaki şekilde görüldüğü gibi, gerilme-birim şekil değiştirme eğrisinin şekline eti eden önemli bir faktördür. Bu nedenle, çekme deneyi sonuçlarını verirken, çekme hızını veya deformasyon hızını da vermek gerekir. Aksi takdirde elde edilen sonuçları yorumlamak güçleşir. Deformasyon hızı daha çok HMK yapılı metaller üzerinde etkili olmaktadır. Genel olarak, deformasyon hızı arttıkça malzemenin mukavemeti artmakta diğer bir ifade ile çekme eğrisi yukarı doğru kaymakta ve kopma uzaması değerleri ise düşmektedir. Deformasyon hızının akma gerilmesine etkisi, çekme dayanımına etkisinden daha fazladır.




Şekil 1.18. Malzemelerde gerilme-birim şekil değiştirme eğrisine deformasyon hızının etkisi

Deformasyon hızı, birim şekil değiştirmede olduğu gibi *mühendislik deformasyon hızı* ($\dot{e}$) ve *gerçek deformasyon hız* ($\dot{\varepsilon}$) olmak üzere iki şekilde ifade edilebilir.

Mühendislik deformasyon hızı ($\dot{e}$), çekme deneyinde cihazın çene hızı ile orantılı olup;

$\dot{e}$ = de/dt=d[($L_i$-$L_0$)/$L_0$]/dt=1/$L_0$.d$L_i$/dt=v/$L_0$
bağıntısıyla ifade edilir.

Gerçek deformasyon hızı ise,

$\dot{\varepsilon}$ = dε/dt=d[ln$L_i$/$L_0$]/dt=1/$L_i$.d$L_i$/dt=v/$L_i$

bağıntısı yardımıyla bulunur.

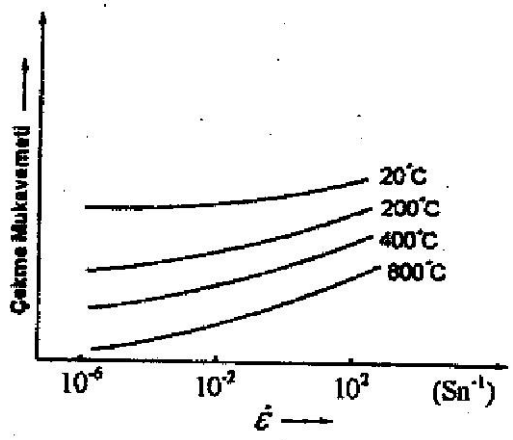
Gerçek deformasyon hızının, numune boyu ve çene hızı ile ilişkisini veren bağıntıya göre, çene hızı v sabit iken, numune uzadıkça gerçek deformasyon hızının azalacağı görülmektedir. Gerçek deformasyon hızı numune boyunun etkisini gösterdiğinden, mühendislik deformasyon hızına göre daha doğru sonuç vermektedir. Buradan da anlaşılabileceği gibi, çekme deneyinde gerçek deformasyon hızının sabit kalabilmesi için deney süresince v çene hızı uygun şekilde artırılmalıdır. Söz konusu deformasyon hızları arasındaki ilişki ise,

$\dot{\varepsilon}$ = v'/$L_i$ = $L_0$/$L_i$ . d$\dot{e}$/dt = $\dot{e}$/1+e

şeklindedir.

Deformasyon hızının mukavemete etkisi aşağıdaki şekilde gösterildiği gibi, sıcaklık yükseldikçe artar. Bu şekilden görüldüğü gibi oda sıcaklığında deformasyon hızının etkisi

nispeten az, yüksek sıcaklıklarda oldukça büyüktür. HMK yapılı metaller, deformasyon hızına karşı diğer metalik malzemelerden daha duyarlıdır.




Şekil 1.19. Çeşitli sıcaklıklarda bakırın çekme mukavemetine deformasyon hızının etkisi.

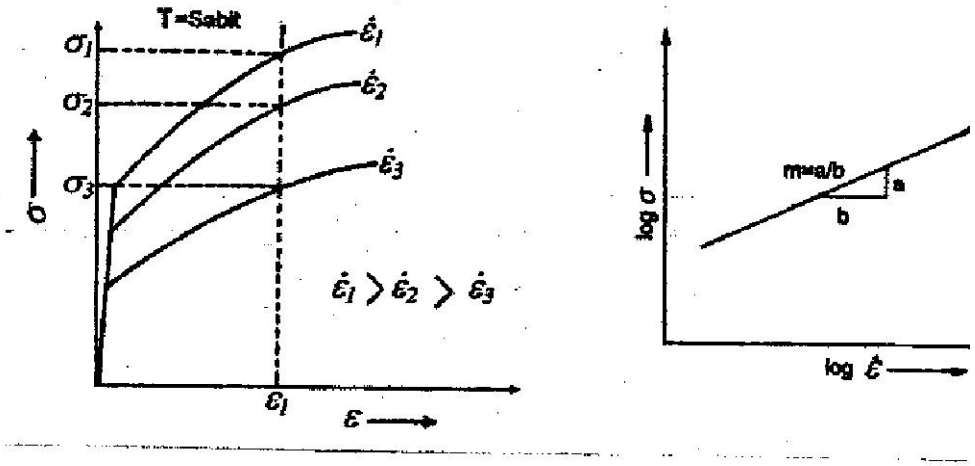
Yüksek sıcaklıklarda ($T \rangle 0.5T_m$) deformasyon hızının malzemenin mukavemetine etkisi çok fazla olup, sabit sıcaklık ve birim şekil değiştirme miktarı için;

$$\sigma_g = C\,\dot{\varepsilon}^{\,m}$$

bağıntısının geçerli olduğu belirlenmiştir. Burada;

$\sigma_g$: Uygulanan gerilme
C: Malzeme sabiti
m: Deformasyon hızı duyarlılık üssü dür.

Deformasyon hızı duyarlılık üssü (m) log$\sigma$-log$\varepsilon$ grafiğinin eğimine eşittir. Böyle bir grafik, sabit sıcaklıkta ancak farlı deformasyon hızlarında yapılan çekme veya basma deneyleri sonucunda çizilebilir.




Şekil 1.20. Farklı deformasyon hızlarında yapılan çekme deneylerinden m değerinin belirlenmesi.

Öte yandan, genellikle deformasyon hızı arttıkça malzemenin sünekliği azalır. Deformasyon hızı duyarlılık üssü oda sıcaklığında genellikle düşüktür ($m \langle 0.1$), fakat sıcaklık arttıkça m'in değeri de artar ve en yüksek 1 değerini alabilir. m= 1 olması durumunda malzeme cam gibi akar. Bu nedenle deformasyon hızı duyarlılık üssü aynı zamanda malzemenin sünekliğini de karakterize eder. Şöyle ki;

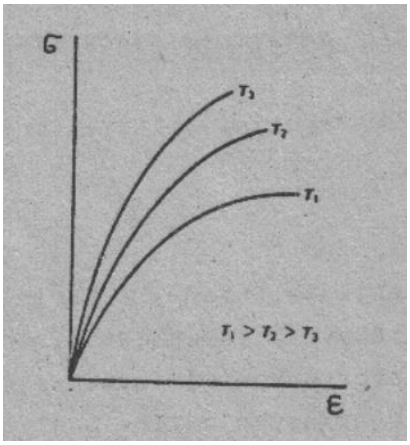
$m \leq 0.1$ : malzeme sünek değildir,
$m \cong 0.3\text{-}0.4$ : malzeme sünektir,
$m \geq 0.5$ : malzeme süperplastiktir,
$m=1$ : malzeme cam gibi akar.

Çekme deneyinde m değerinin büzülmeye önemli bir etkisi vardır. Deneysel gözlemler, yüksek m değerine sahip malzemelerin hasara uğramadan önce büyük miktarda uzadığı, yani yüksek m değerinin büzülmeyi geciktirdiğini göstermiştir. Büzülme başlamak üzere iken, bu bölgede mukavemet geri kalan kısma kıyasla pekleşme nedeniyle daha yüksektir. Ayrıca büzülme bölgesinde uzamanın daha hızlı olması nedeniyle, şekil değiştirme hızı da deney çubuğunun geri kalan kısmına kıyasla daha büyüktür. Bu da büzülme bölgesinin mukavemetini artıran bir faktördür. Büzülme bölgesinde malzeme mukavemetindeki artışın büzülme oluşumunu zorlaştıracağı açıktır. Sonuç olarak yüksek m değerinin büzülme oluşumunu geciktireceği ve kopmadan önceki toplam uzama miktarını artıracağı anlaşılır.

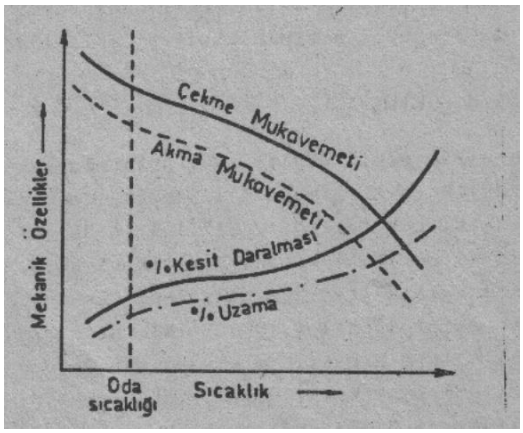
Metallerde mukavemet yükseldikçe genellikle m değeri düşer.

**b) Deney sıcaklığının çekme eğrilerine etkisi**

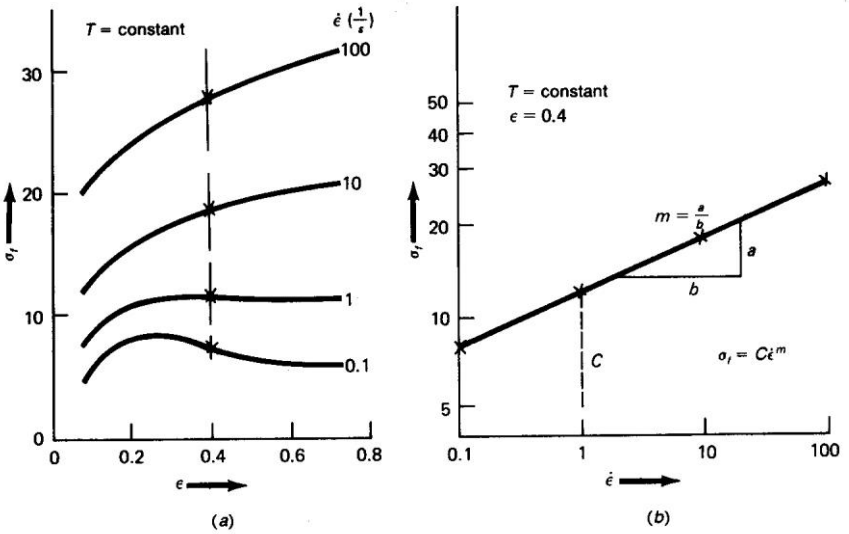
Gerilme-birim şekil değiştirme eğrisinin şekline, mukavemet, süneklik ve kırılma özelliklerine deney sıcaklığının etkisi çok fazladır. Deney sıcaklığı arttıkça, genellikle çekme eğrileri aşağı doğru kayar. Yani çekme ve akma dayanımı azalır buna karşın malzemenin kopma uzaması artar (malzeme sünekleşir). Düşük sıcaklıklarda ise, mukavemet ve kırılganlık artar. Deney sıcaklığının çekme eğrilerine etkisi aşağıdaki şekilde verilmiştir. Deney sıcaklığında malzemede faz dönüşümü oluşuyorsa (yaşlanma, yeniden kristalleşme, martenzitik dönüşüm gibi) çekme eğrileri çok daha farlı bir şekil alabilir. Farklı kristalografik yapıdaki malzemelere sıcaklığın etkisi aynı şiddette değildir. Örneğin, HMK yapılı metallerde sıcaklığın artması ile akma mukavemeti hızla azalırken, YMK sistemdeki metallerde sıcaklık arttıkça akma mukavemetinin azalması çok daha yavaştır. Aynı şekilde, HMK metaller düşük sıcaklıklarda gevrek kırılma gösterirken, YMK metallerde bu durum gözükmez. Yani HMK yapılı metallerde sünek-gevrek geçiş sıcaklığı olmasın karşın YMK yapılı metallerde böyle bir sınır yoktur.




Şekil 1.21. Sıcaklığın gerilme-birim şekil değişimine etkisi.




Şekil 1.22. Malzemelerin mekanik özelliklerine sıcaklığın etkisi




Şekil 23. Sıcak deformasyon işleminde sertleşme ve yumuşamanın beraber etkisi. (a) Akma dayanımı deformasyon hızına çok duyarlı [Schey]

Metalik malzemelerde kırılma tipinin sıcaklık arttıkça transgranüler (tane içi) kırılmadan intergranüler (taneler arası) kırılma tipine geçiş gösterdiği bilinmektedir. Tane içi

kırılmada, kayma düzlemleri tane sınırlarından daha zayıftır ve kırılma taneler içerisindeki kayma düzlemleri boyunca olur. Taneler arası kırılmada ise, tane sınırlarının daha zayıf olması nedeniyle kırılma tane sınırları boyunca ilerler.

Malzemelerin farklı sıcaklıktaki deneylerinden bahsederken, benzeş (Homologous) sıcaklıktan söz etmek yerinde olur. Uygulanan deformasyon sıcaklığının (T), malzemenin ergime sıcaklığına (Tm) oranı olan benzeş sıcaklığa göre uygulanan deformasyon sınıflandırılabilir.

| | |
|---|---|
| $T/Tm \rangle 0.5$ | : sıcak deformasyon |
| $0.5 \rangle T/Tm \rangle 0.3$ | : ılık deformasyon |
| $T/Tm \langle 0.3$ | : soğuk deformasyon |

Soğuk yapılan plastik deformasyonda malzeme deformasyon hızına karşı duyarlı değildir. Fakat deney sıcaklığı, 0.5Tm'in üzerinde ise plastik deformasyon, deformasyon hızına karşı çok duyarlıdır.

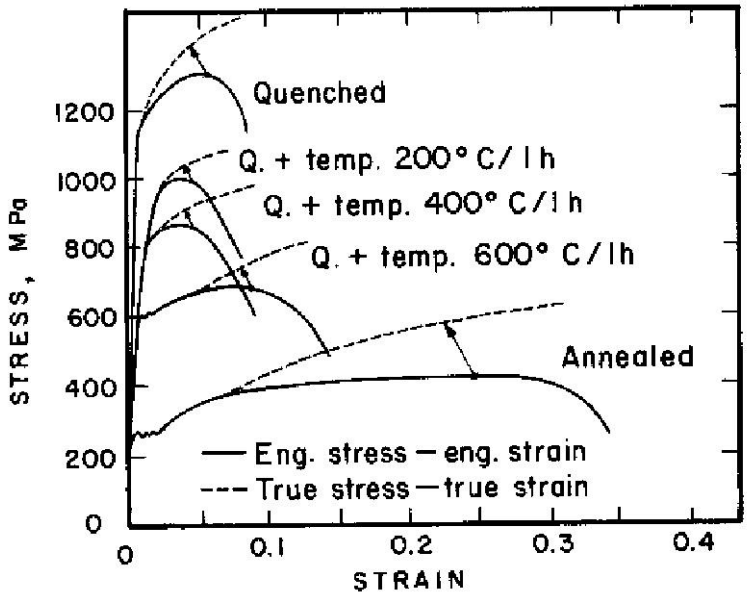
Sıcak deformasyonda, deformasyon sertleşmesi ve bozulan tane yapısı, deformasyon sırasında yeniden kristalleşme sonucu yeni tanelerin oluşması ile giderilir. Bu nedenle büyük oranda deformasyonlar ancak sıcak deformasyonla mümkündür. Sıcak deformasyon esasen sabit gerilme ile gerçekleşir. Soğuk deformasyonda, deformasyon sertleşmesi deformasyona engel teşkil eder ve mukavemet deformasyon miktarı ile artar. Ilık işlem sırasında, yeniden kristalleşme olmaz, fakat dislokasyonların yeniden düzene girmesi sonucu dinamik toparlanma olur. Bu nedenle, ılık işlem sırasında deformasyon sertleşmesi soğuk işlemdeki kadar etkin değildir.

Deformasyon sırasında elde edilen gerilme bağıntıları deformasyon sıcaklığına bağlıdır. Aşağıda, sıcaklığa bağlı olarak verilen deformasyon işlemlerinde geçerli olan gerilme bağıntıları verilmiştir.

| | |
|---|---|
| Soğuk deformasyon ($T/Tm \langle 0.3$) | : $\sigma_g = K.\ \varepsilon^n$ |
| Ilık deformasyon ($0.5 \rangle T/Tm \rangle 0.3$) | : $\sigma_g = D\varepsilon^n\ \dot{\varepsilon}^m$ |
| Sıcak deformasyon ($T/Tm \rangle 0.5$) | : $\sigma_g = C\dot{\varepsilon}^m$ |

**c) Mikroyapının çekme eğrisine etkisi**

Mikroyapının çekme eğrisine etkisi oldukça karmaşıktır. Saf metallerle alaşım elementi içeren malzemelerin çekme eğrileri farklı olup, alaşım elementi ilavesi genellikle eğriyi yukarı doğru kaydırır. Malzemedeki fazların sayısı ve dağılımı da çekme eğrilerine etki eder. Çok fazlı malzemelerde, fazların şekli, dağılımı, mekanik özellikleri, fazlar arasındaki arayüzey enerjisi ve arayüzey bağı çekme eğrisinin karakterini değiştirir. Ayrıca, tek kristal ve çok kristallerin de çekme eğrileri farklı olup kristal içerisindeki tane boyutu küçüldükçe çekme eğrileri genellikle yukarı doğru kayar. Dislokasyon yoğunluğu fazla olan, az olan aynı malzemeye kıyasla daha yüksek mukavemete sahiptir. Aynı malzeme içerisindeki boşluklar ve istenmeyen kalıntı miktarı da çekme sırasında erken kopmaya neden olur ve malzemenin sünekliğini azaltır.



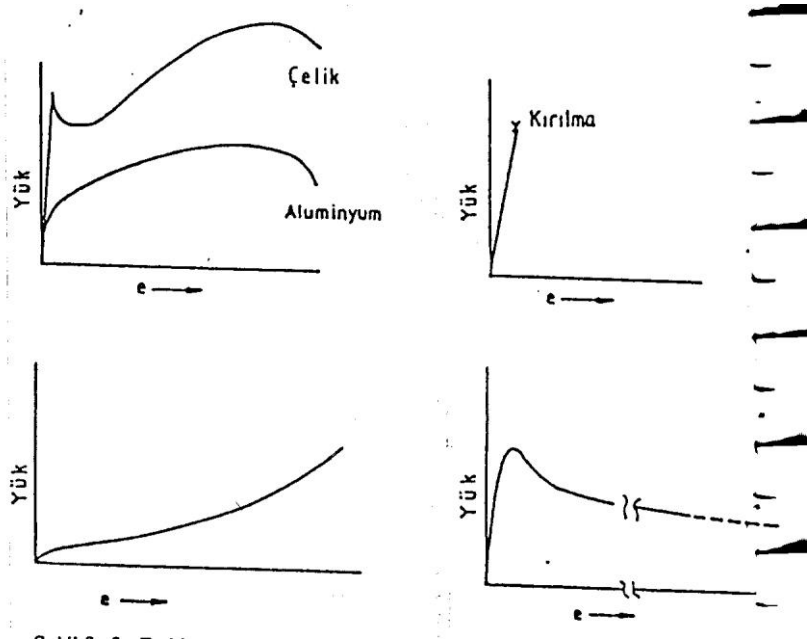
Şekil 1.22. AISI 1040 çeliğine ait gerilme-birim uzama diyagramına ısıl işlemin etkisi

## 2.6. Çekme diyagramı tipleri

Çekme diyagramlarını başlıca 4 grupta toplamak mümkündür. Bunlar sırasıyla;

1. Elastik ve plastik deformasyon gösteren sünek malzemeler,
2. Plastik deformasyon göstermeyen malzemeler. Bu malzemeler elastik deformasyondan sonra kırılırlar (çok gevrek malzemeler)
3. Aşırı elastik deformasyon gösteren malzemeler.
4. Aşırı plastik deformasyon gösteren malzemeler.

Metaller, elastik ve plastik deformasyon gösteririler. Bununla birlikte farklı metallerin çekme diyagramları da farklıdır. Örneğin yumuşak çelik, elastik deformasyondan plastik deformasyona geçişte aşağıdaki şekilde görüldüğü gibi süreksiz akma noktası gösterir. HMK metallerin çoğu bu tip çekme diyagramına sahiptir. Seramik, dökme demir ve yüksek mukavemetli malzemelerde genellikle plastik deformasyon oluşmadan, elastik deformasyonun sonunda kopma oluşur. Öte yandan, bazı malzemeler ise aşırı oranda homojen plastik deformasyona uğrarlar.




Şekil 1.24. Farklı malzemelerde görülen tipik çekme diyagramları

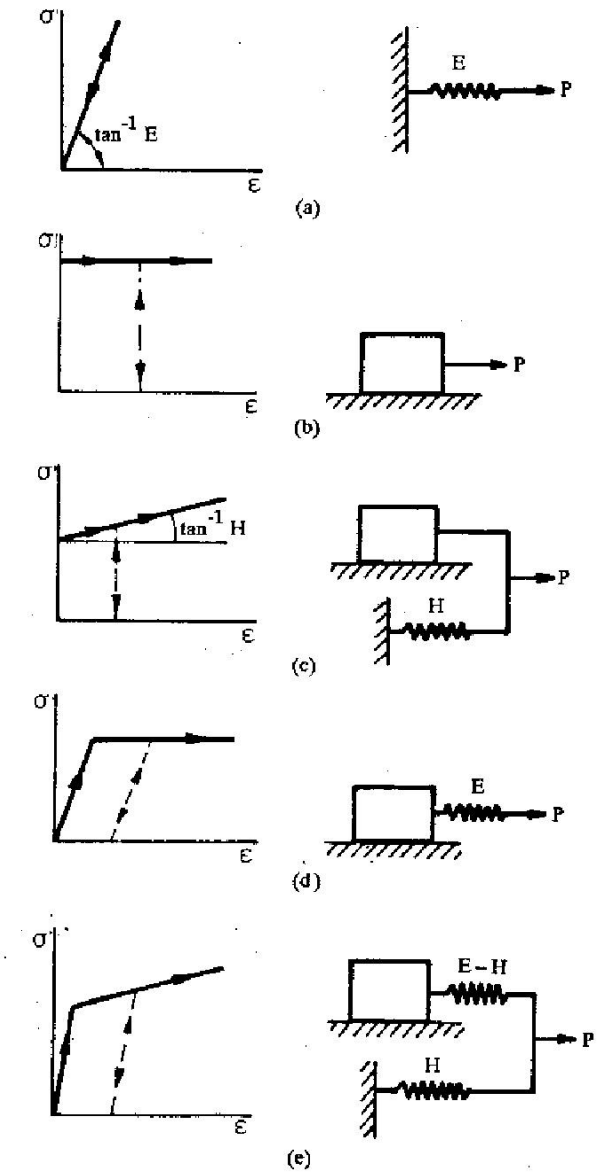
**2.6. İdealleştirilmiş Gerçek gerilme-gerçek şekil değiştirme diyagramları**

Aşağıdaki şekilde idealize edilmiş gerilme-şekil değiştirme eğrileri verilmiştir. Şekil 1.25a'da **tam elastik ideal** bir malzemenin gerçek gerilme-gerçek şekil değiştirme diyagramı ve dinamik modeli görülmektedir. Cam, seramikler ve bazı dökme demirler gibi gevrek malzemelerin davranışı bu tür bir eğri ile gösterilebilir. Kopma uzaması çok küçük (%1-2 kadar) olan ve elastik sınırı aşıldığı taktirde çok az bir uzamadan sonra büzülme göstermeden çekme kuvveti etkisi ile kopan gevrek malzemelerde elastiklik sınırı çekme dayanımına yakındır. Ayrıca gevrek malzemelerin çekme diyagramlarında kopma noktasındaki gerilme değeri ile çekme dayanımı çakışır.

Şekil 1.25b'de **rijit, tam plastik** ideal bir malzemenin gerçek gerilme-gerçek şekil değiştirme diyagramı ve dinamik modeli görülmektedir. Bu tür bir malzemeden (E değeri sonsuz) bir çekme deneyi çubuğu, çekme gerilmesi akma gerilmesine erişinceye kadar tamamen rijittir (elastik şekil değişimi sıfırdır). Çekme gerilmesi akma noktasına eriştiği anda, plastik şekil değişimi başlar ve sabit gerilme altında (pekleşme olmadan) devam eder.

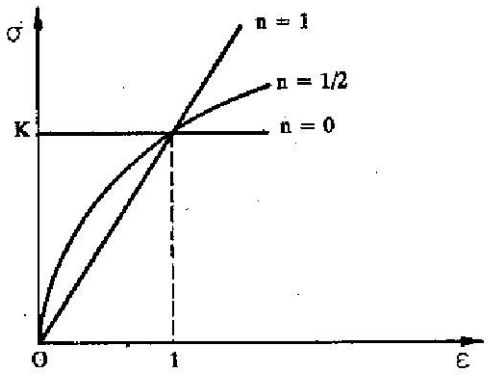
Şekil 1.25c'de **rijit, lineer pekleşen** bir malzemenin gerçek gerilme-gerçek şekil değiştirme diyagramı ve dinamik modeli verilmiştir. Böyle bir malzemede, çekme gerilmesi akma sınırına erişinceye kadar şekil değişimi görülmez. Çekme gerilmesinin akma sınırına eşit olması ile birlikte plastik şekil değişimi başlarsa da, şekil değişimini artırmak için gerilme de sürekli olarak yükseltilmektedir. Gerilmenin plastik şekil değişimi ile artması (pekleşme) doğrusaldır. Rijit tam plastik malzemede olduğu gibi burada da şekil değişiminin elastik bileşeni plastik bileşen yanında ihmal edilmektedir.

Şekil 1.25d, **elastik tam plastik** bir malzemenin gerçek gerilme-gerçek şekil değiştirme diyagramı ile dinamik modelini, Şekil 1.25e ise **elastik lineer pekleşen** bir malzemenin gerçek gerilme-gerçek şekil değiştirme diyagramı ile dinamik modelini göstermektedir.




Şekil 1.25. İdealleştirilmiş gerçek gerilme-gerçek birim şekil değiştirme diyagramları ve dinamik modelleri (tek eksenli gerilme). (a) Tam elastik ideal, (b) rijit tam plastik, (c) rijit lineer pekleşen, (d) elastik ideal plastik, (e) elastik lineer pekleşen [çapan]

Şekil 25'deki bazı davranışlar $\sigma = K\,\varepsilon^n$ denklemi ile n deformasyon sertleşme üssüne değişik değerler vererek elde edilebilir.



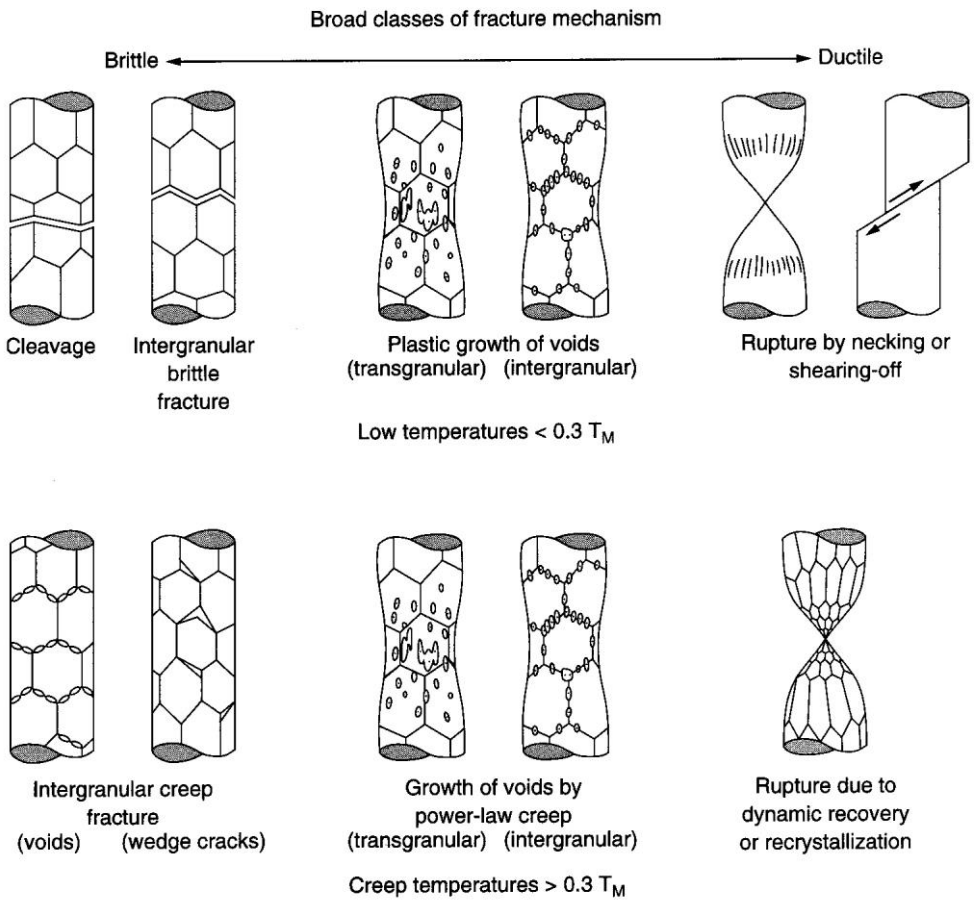

Şekil 1.26. Deformasyon sertleşme üssü n değerinin gerçek gerilme-gerçek şekil değiştirme eğrilerine etkisi. [çapan]

## 2.6. Çekme deneyinde kırılma tipleri

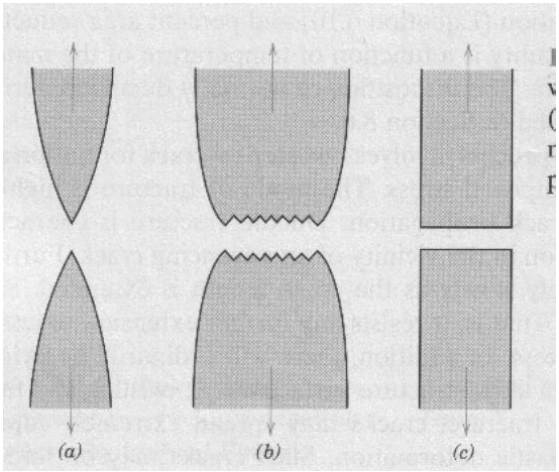
Kırılma çatlak oluşumu ve ilerlemesiyle meydana gelen ve numunenin gerilme altında iki veya daha çok parçaya bölünmesiyle sonuçlanan bir olaydır. Kırılmanın karakteri malzemeden malzemeye değişir ve genellikle uygulanan gerilmeye, sıcaklığa ve deformasyon hızına bağlıdır. Kırılma, kırılma anındaki deformasyon miktarı, kırılma yüzeyinin kristalografik görünümü ve kırık yüzeyin makro görünümü gibi çeşitli kriterlere göre sınıflandırılır.

Atomik seviyede kırılma, kırılma düzlemi boyunca atomlar arası bağların koparak yeni çatlak yüzeyi ortaya çıkarması sonucu meydana gelir. Buna göre, kırılma düzlemine dik bağların kopması sonucu "klivaj kırılma", diğer bir değişle "ayrılma kırılması" meydan gelir. "Kayma kırılması" ise atom düzlemlerinin kayması sırasında atom bağlarının kopması ile meydana gelir. Klivaj kırılma klivaj düzlemleri olarak bilinen bazı kristalografik düzlemler boyunca meydana gelmektedir. YMK yapılı metallerde klivaj düzlemi bulunmadığı için klivaj kırılma gözlenmez.

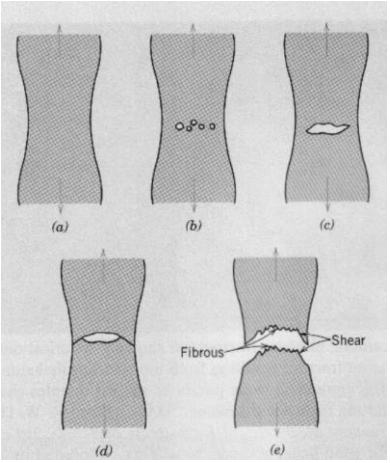
Aşağıda mikroskopik ve makroskopik seviyede çatlak ilerlemesi sonucu meydana gelen kırılma tipleri verilmiştir.

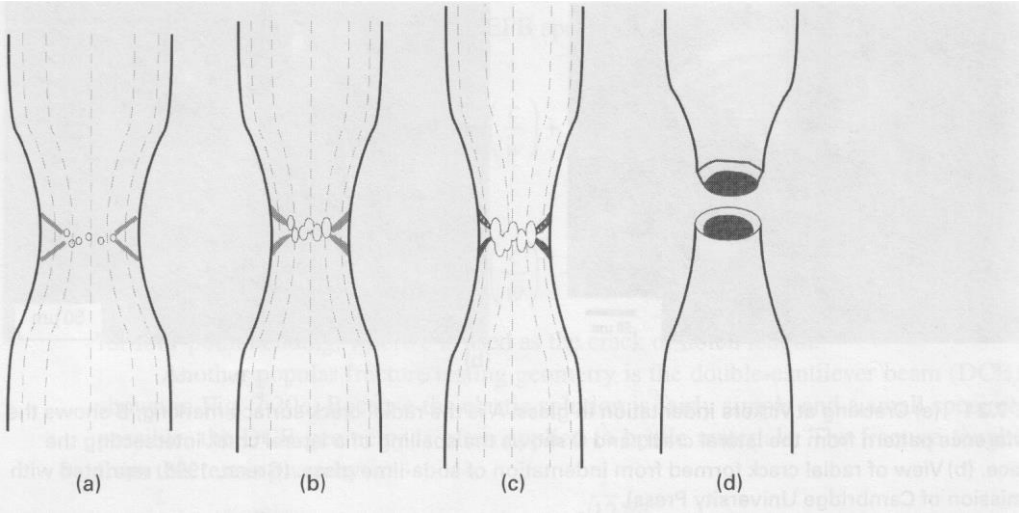



(a) Temel kırılma mekanizmaları [Bowman]

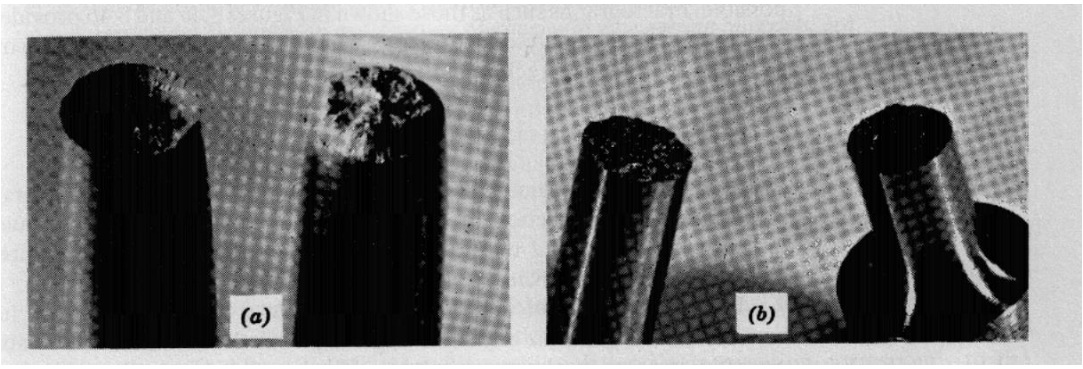



(a) Tam sünek, koni-çanak tipi ve tam gevrek kırılmaların şematik gösterimi




(b) Koni-çanak tipi kırılmanın meydana gelişi




(c) Koni-çanak tipi ve gevrek kırılma gösteren numunelerin kırık yüzey fotoğrafları

Şekil 1.27. Kırılma tipleri.

Tek eksenli gerilme halinde çatlak çekme yönüne dik olarak ilerlediğinden klavaj kırılma tipi düz bir kırılma yüzeyi gösterir. Çok taneli metallerde, klivaj düzlemlerinin yönü her tanede farklı olup, bir taneden diğer taneye geçildikçe çekme doğrultusunu dik olmaz. Bu nedenle bir tane boyutundan daha büyük mesafelerdeki klivaj kırılması düz görünüm göstermez, tane değiştikçe yön değiştirir. Çok gevrek malzemelerde klivaj kırılma bir taneden diğerine klivaj düzlemleri boyunca sürekli olarak ilerleyebilir. Fakat az karbonlu çelikler gibi bazı malzemelerde makroskopik olarak gözlenen klivaj kırılma, mikroskopik seviyede sürekli

değildir. Çoğu tanelerde klivaj kırılma meydana gelirken, bazı tanelerde bunları birleştirecek şekilde kayma kırılması da meydana gelmektedir. Klivaj tipi gevrek kırılmaya neden olan çatlaklar, orijinal malzemede bulunmayıp, deformasyon sırasında ortaya çıkmaktadır. Klivaj kırılma; i) dislokasyon yığılmalarına neden olan plastik deformasyon, ii) çatlak oluşumu ve iii) çatlak ilerlemesi olmak üzere üç aşamada meydana gelmektedir.

Atomik bağların kopması ile oluşan kayma kırılması, yerel olarak meydana gelen bir plastik deformasyon prosesidir. Bilindiği gibi plastik deformasyon, kaymaya karşı direncin az olduğu kayma düzlemleri olarak bilinen atom düzlemlerinin kayması ile meydana gelir. Kayma sadece bir paralel düzlem takımı üzerinde ilerleyerek oluştuğunda *eğimli kırılma* meydana gelirken, iki taraflı olarak gelişirse *noktasal kırılma* oluşur.

Çok taneli malzemelerde kayma çatlakları maksimum kayma gerilmelerinin bulunduğu kısımlarda ilerleme eğilimi gösterir.

Çatlağın izlediği yol yükleme şekline, iç gerilmeleri meydana getiren faktörlere ve matris yapısına bağlıdır. Çatlak büyümesi, boşlukların oluşması ve daha sonra yerel plastik deformasyon ile çoğalması sonucu meydana gelir. Kayma kırılması, kalın levha ve yuvarlak çekme numunelerinde, malzemenin merkezinde (boyun vermiş bölgede) başlar ve dışarıya doğru ilerler. Makroskopik olarak kırılma yüzeyi çekme eksenine diktir. Mikroskopik seviyede ise, çatlak çekme eksenine 30-45°'lik eğime sahip çeşitli düzlemler üzerinde kayma kopması (boşluk çoğalması) geliştiğinden kırık yüzey oldukça pürüzlüdür. Bu tip kırılma dik kopma (kırılmanın izlediği yol çekme eksenine dik olduğundan) veya lifli kırılma (kırık yüzey lifli görünümde olduğundan) olarak isimlendirilir. Koni-çanak tipi kırılma, merkez bölgede dik kopma ile başlar ve çekme ekseni ile 45°'lik eğimli düzlemler üzerinde kayma kopması ile sona erer. Kırılma yüzeyi daha az pürüzlüdür. Bu tip kırılma dik kopmadan daha hızlı oluşur. Benzer olarak ince saclarda klivaj olmayan kırılma kayma kopması şeklinde olur ve eğimli kırılmaya benzer.

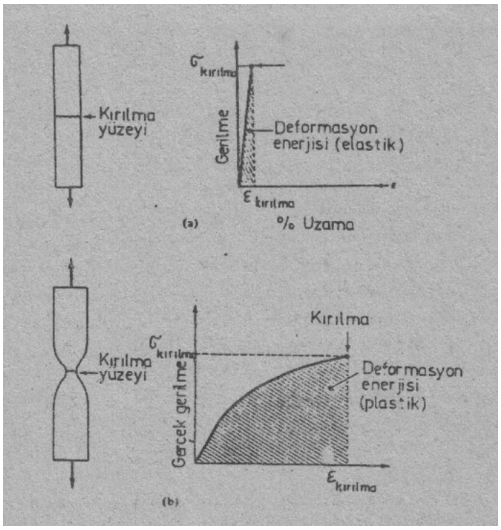
Bazı durumlarda çok taneli malzemelerde, tane sınırları çeşitli nedenlerden dolayı, tanedeki kırılma düzlemlerinden daha zayıf durumda bulunur. Bu durumda kırılma tane sınırları boyunca (intergranüler) meydana gelir. Örneğin çeliklerin tane sınırlarında sementit gibi gevrek bir fazın çözünmesi durumunda kırılma tane sınırları boyunca ilerler. Tane sınırlarında oluşan segregasyon da taneler arası kırılmayı teşvik etmektedir.

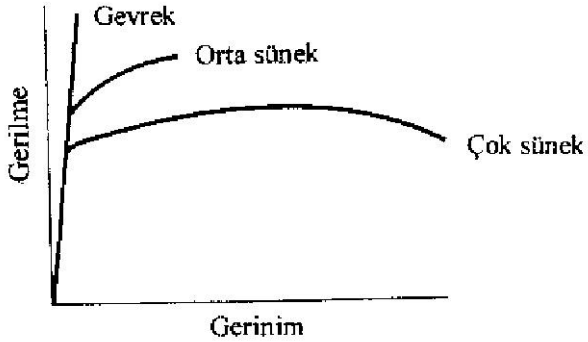
Kırık yüzeyin görünümü kriter olarak alındığında, kırılma lifli ve kristalin olmak üzere iki genel gruba ayrılabilir. Klivaj kırılma tane içi düzlemler boyunca meydana geldiğinden kristalin bir görünüme sahiptir. Klivaj kırılmada genellikle tanelerin şekli bozulmaz ve yüzeyin görünüşü düzdür. Kırıma yüzeyi ışığı çok iyi yansıtır ve parlak olarak görülür. Kayma kırılması sonucu ortaya çıkan kırılma yüzeyi ise gri ve lifli bir görünüme sahiptir.

Malzemenin kırılıncaya kadar uğradığı plastik deformasyon miktarı göz önüne alındığında kırılma *sünek* ve *gevrek* olmak üzere iki gruba ayrılabilir. Gevrek kırılan malzemede çok az plastik deformasyon oluşur. Camlar, seramikler ve gri dökme demir gibi malzemeler gevrek olarak kırılırlar. Gevrek kılımla sırasında çok az bir şekil değişimi oluştuğunda, kırılma sonrası parçalar birleştirildiğinde numunenin yaklaşık kırılma öncesi şekli elde edilebilir. Gevrek kırılmada malzeme kırılıncaya kadar çok az enerji (gerilme-birim şekil değiştirme eğrisinin altında kalan alan) absorbe etmektedir. Kristalografik açıdan gevrek kırılma klivaj kırılma şeklinde oluşmaktadır. Gevrek kırılmada bir çatlağın hiç veya pek az plastik değiştirmeyi izleyerek çok hızlı yayılması sonucu oluşur. Gevrek kırılma, ayrılma düzlemleri yerine tane sınırları boyunca da ilerleyebilir. Buna taneler arası kırılma denir ve tane sınırlarında çökelen kırılgan filmlerin varlığından ileri geldiği söylenebilir. Her iki halde de gevrek kırılma uygulanan çekme gerilmesine dik yönde oluşur.

Sünek kırılmada ise, kırılma öncesi malzeme önemli ölçüde plastik deformasyona uğrar. Bu nedenle kırılan parçaların birleştirilmesiyle elde edilen şekil orijinal numune şeklinden çok farklıdır. Sünek kırılmada parçada büyük ölçüde kesit daralması (büzülme) meydana gelmekte

ve bu sırada büyük oranda enerji absorbe edilmektedir. Bu ise malzemenin tokluğunun yüksek olduğunu gösterir. Kristalografik açıdan sünek kırılma kayma kırılması şeklinde olmaktadır. Sünek kırılma, boşlukların çekirdeklenmesi ile başlar. Çatlak ilerlemesi ve kırılma söz konusu boşlukların büyüyerek birbirleri ile birleşmesi sonucu meydana gelir.




Şekil 1.28. Geverek ve sünek malzemelere ait gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri.

## 2.7. Plastik kararsızlık ve boyun verme

Deformasyon sertleşme hızı ($d\sigma/d\varepsilon$), $\sigma$-$\varepsilon$ eğrisinin eğimi olarak tanımlanır. Holloman denklemine göre deformasyon sertleşmesi gösteren bir malzemede deformasyon sertleşme hızı ($d\sigma/d\varepsilon$);

$\sigma_g = K.\ \varepsilon^n$
$(d\sigma_g/d\varepsilon) = (dK/d\varepsilon).\varepsilon^n + K.n.\ \varepsilon^{n-1}$

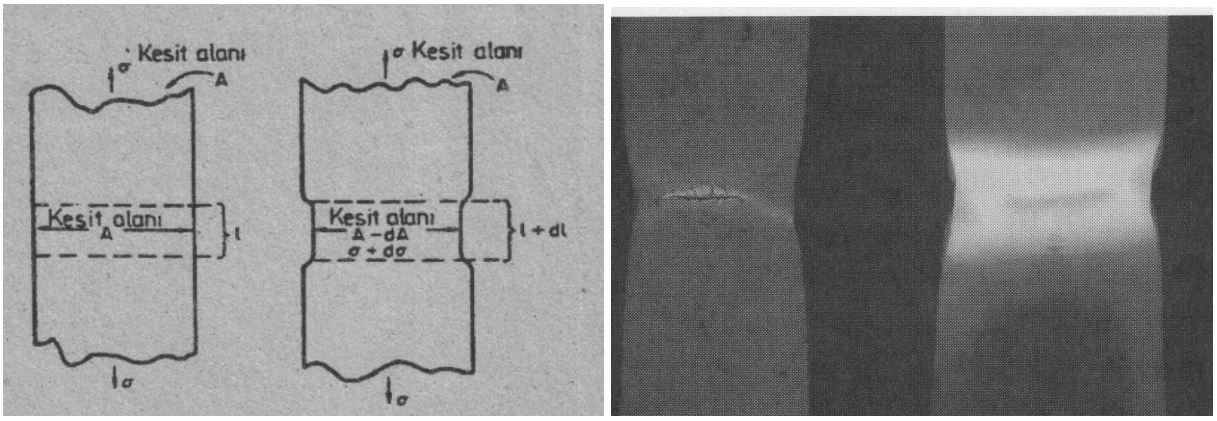
$dK/d\varepsilon = 0$ olduğundan
$(d\sigma_g/d\varepsilon) = K.n.\ \varepsilon^{n-1} = nK\varepsilon^n / \varepsilon = n\sigma_g / \varepsilon$

$(d\sigma_g/d\varepsilon) = n(\sigma_g / \varepsilon)$

Deformasyon sertleşme hızı, çekme deneyi sırasında numunede meydana gelen boyun oluşumunu belirlemede oldukça önemlidir. Çekme deneyinde, plastik kararsızlık olarak

bilinen boyun verme, maksimum yük (veya maksimum mühendislik gerilmesi) noktasında başlar.

Plastik kararsızlığı inceleyebilmek için F kuvveti etkisiyle numunenin bir kesitin diğer bölgelerden biraz daha plastik deformasyona uğradığını düşünelim. Boyun bölgesinin kesiti daha küçük olduğundan, bu bölgedeki gerilme diğer kısımlardan daha fazladır. Eğer deformasyon sertleşmesi akma mukavemetini yeteri kadar arttırmış ise, daralmış kesit F kuvvetini taşıyabilir. Aksi halde plastik deformasyon boyun bölgesinde olur ve malzeme buradan kopar.




Şekil 1.29. Tek yönde çekme kuvveti uygulanan silindirik bir numunede boyun oluşumu [Bowman]

A alan ve $\sigma_g$ mukavemet ise, numunenin herhangi bir kesiti $A.\sigma_g$ yükünü taşıyabilir. $A.\sigma_g$ değeri, deformasyon miktarına bağlı olarak artarsa numune kararlıdır, fakat azalırsa numune kararsızdır ve boyun verir. Malzemenin boyun vermesi için kritik koşul;

$A.\sigma_g = F = sbt$

Buradan,

$dF = A.\sigma_g + \sigma_g dA = 0$ veya $(d\sigma_g / \sigma_g) = -(dA/A)$ bulunur.

Plastik deformasyon süresince hacim sabit kaldığından,

$V = A.L = sbt$

$-dA / A = dL / L = d\varepsilon$

$(d\sigma_g / \sigma_g) = d\varepsilon$

**$(d\sigma_g / d\varepsilon) = \sigma_g$ bulunur.**

Bu bağıntı, gerçek gerilme-gerçek birim şekil değiştirme eğrisinde boyun vermenin veya homojen olmayan deformasyonun başladığı noktanın, eğrinin eğiminin, yani deformasyon sertleşme hızının $(d\sigma_g / d\varepsilon)$ gerçek gerilmeye eşit olduğu nokta olduğunu göstermektedir. $(d\sigma_g / d\varepsilon) > \sigma_g$ ise boyun verme olmaz, deformasyon homojendir. Buradan, plastik deformasyon sırasında homojen olmayan deformasyonun başlamasının deformasyon sertleşmesi tarafından engelleneceği anlaşılmaktadır.

Mühendislik çekme diyagramında boyun verme kriteri ise $d\sigma_m /de = 0$ olup, homojen olmayan deformasyon maksimum gerilme noktasında başlar.

Boyun vermenin başlamasına kadar olan üniform birim şekil değiştirme miktarı ($\varepsilon_u$), karasızlık kriterini belirten denklem ile Holloman denklemi kullanılarak,

$(d\sigma_g / d\varepsilon) = K\, n\, \varepsilon_u^{n-1}$

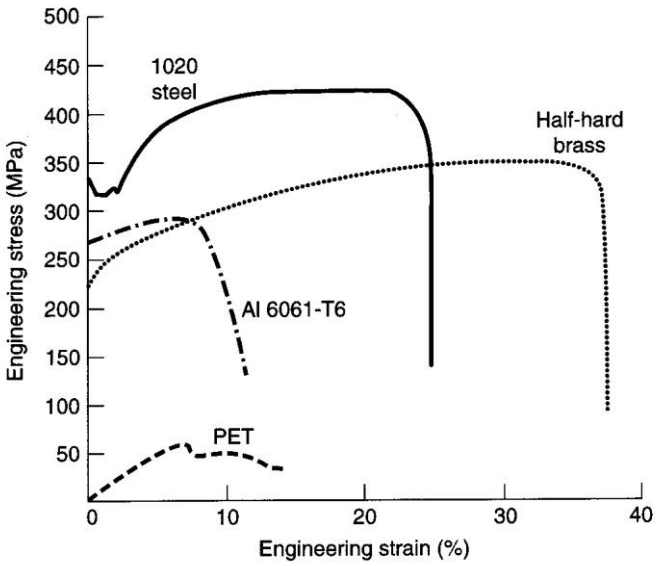
$(d\sigma_g / d\varepsilon) = \sigma_g = K\, \varepsilon_u^{n}$

$K\, n\, \varepsilon_u^{n-1} = K\, \varepsilon_u^{n}$

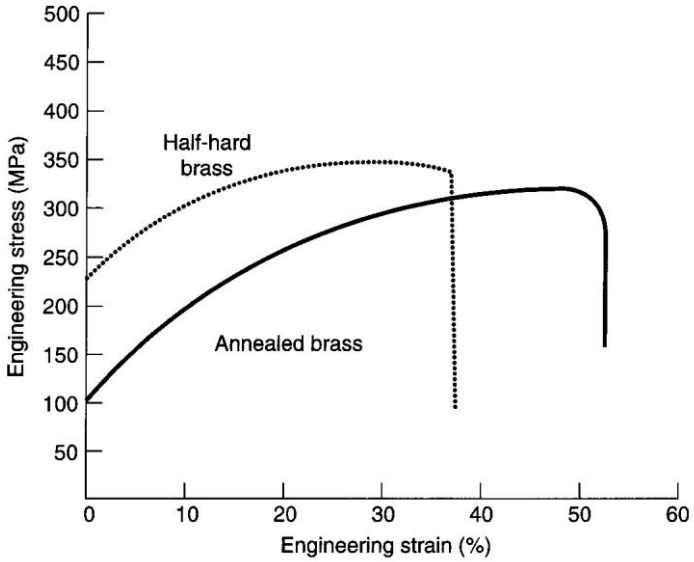
$\mathbf{n = \varepsilon_u}$

Bu sonuç deformasyon sertleşme üssünün üniform birim şekil değiştirmeye eşit olduğunu, deformasyon sertleşme üssü arttıkça homojen olmayan deformasyona neden olan kesit daralmasının gecikerek üniform birim şekil değiştirme miktarının artacağını göstermektedir. Buna göre malzemede oluşturulan birim şekil değişimi miktarı malzemenin deformasyon sertleşme üssü n değerin eşit olduğunda büzülme başlamaktadır. Bu nedenle, n değeri ne kadar büyükse malzemenin boyun vermeye karşı direnci de o oranda yüksek olmaktadır. Bu bağıntı, malzemelerin deformasyon kabiliyetinin bir ölçüsü olarak üniform deformasyon oranının kriter olarak alındığı soğuk şekil verme işlemlerinde, deformasyon sertleşme üssü (n) değeri büyük olan malzemelerin tercihen kullanılacağını da göstermektedir.

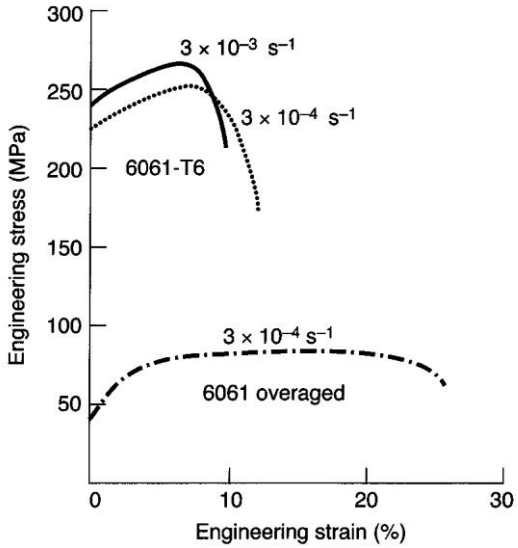
## 1.8. Çekme diyagramına ait örnekler




Şekil 1.30. Bazı sünek karakterli malzemelerin oda sıcaklığındaki mühendislik gerilme-uzama diyagramları [Bowman]




Şekil 1.31. Tavlanmış ve yarı sert pirince ait mühendislik gerilme-uzama diyagramları [Bowman]




Şekil 1.32. 6061-T6 Al alaşımına ait iki farklı deformasyon hızlarında yapılmış gerilme-uzama diyagramları ve bunların bu malzemenin aşırı yaşlandırılmış durumda sergiledikleri değişimle karşılaştırılmaları [Bowman].