



Dokuz Eylül Üniversitesi  
İnşaat Mühendisliği Bölümü



**İNŞ2023 YAPI MALZEMESİ I**

**PERİYODİK YÜKLEME ve  
YORULMA**

*Dr. Öğr. Üyesi Çağlar YALÇINKAYA*  
[www.caglaryalcinkaya.com](http://www.caglaryalcinkaya.com)

# YORULMA



## STATİK DAYANIM



- ✓ Malzeme yavaşça artan yükler altında denendiği zaman, belirli bir sınır gerilmede dayanımı sona erişip kopmaktadır.

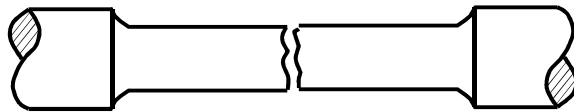


- ✓ Bulunan bu gerilme değerine malzemenin **statik dayanımı** adı verilir.

# YORULMA



## YORULMA



✓ Ancak aynı malzemeyi, zorlayan gerilmeler zaman ile değişecek olursa, malzeme çekme deneyindeki kopma değerinin altındaki bir gerilmede, sünek de olsa plastik şekil değiştirmeden kırılır.

✓ Bu olaya yorulma denilir.

# YORULMA



## YORULMA

- ✓ Yükleme ve boşaltmanın periyodik olarak çok sayıda tekrarı sonucunda cisim içinde oluşan karmaşık termik ve mekanik olaylar nedeniyle, cisimde çözülme, yıpranma ve ayrışmalar meydana gelir.
- ✓ Bu olayın nedeni yükün şiddetinden çok onun, periyodik olarak uzun bir süre değişmesidir. İç mekanizması oldukça karışık olan bu olaya kısaca **malzemenin yorulması** denmektedir.
- ✓ Uygulamada statik yüklere (zorlamalara) en ender olarak rastlanır.

# YORULMA



## YORULMA

- ✓ Özellikle metalik malzemelerin göçmesinin en önde gelen etkeni olması nedeniyle yorulma olayı çok önemlidir.
- ✓ Yorulma kopmasına uğrayan parçalara örnek olarak miller, bağlantı çubukları ve dişliler gibi hareketli parçalar gösterilebilir.
- ✓ Makinelerdeki hasarların yaklaşık % 80'nin yorulma kopmalarından kaynaklandığı düşünülmektedir.
- ✓ Bu tür hasarlar polimer ve seramik (cam hariç) malzemelerde de ortaya çıkabilmektedir.

# YORULMA



## YORULMA

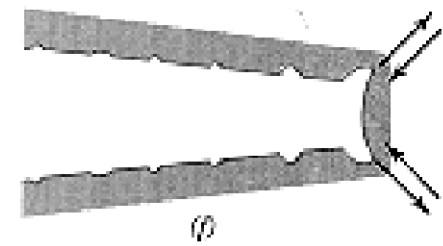
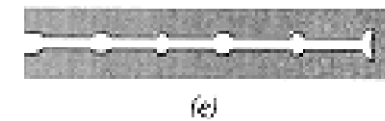
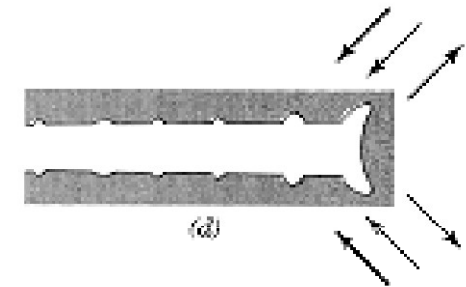
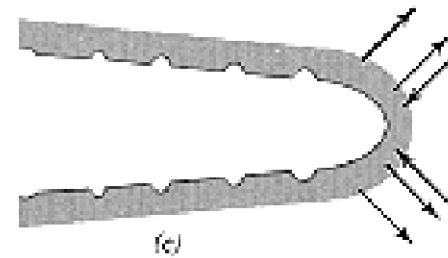
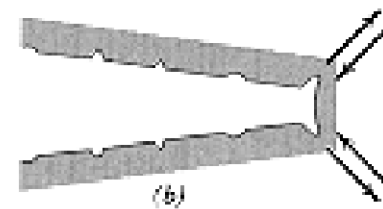
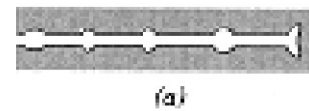
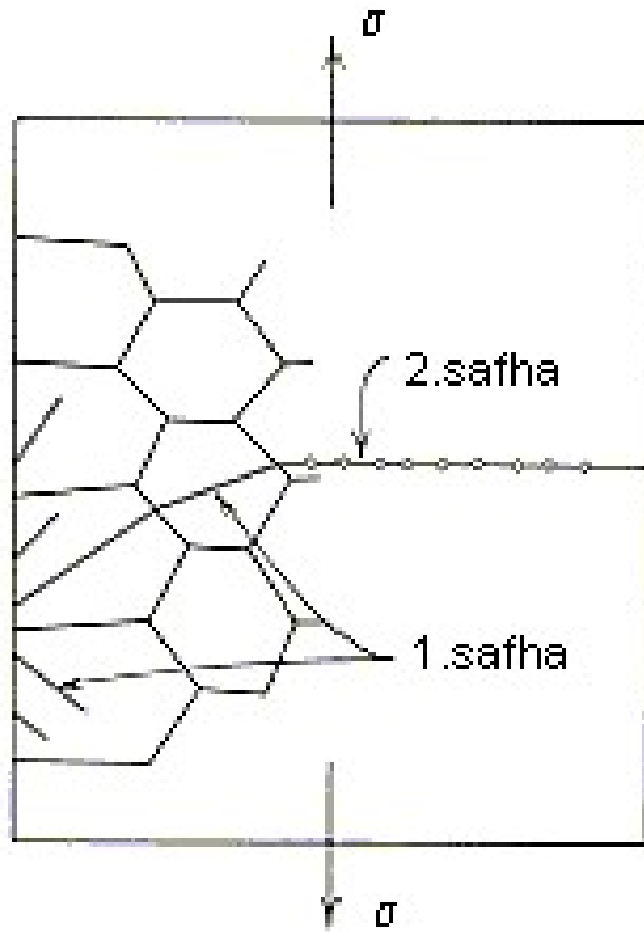
✓ Yorulma olayı üç aşamada değerlendirilebilir:

- 1. Çatlak Başlangıcı:** Genellikle yüksek gerilme yığılmalarının olduğu bölgelerde veya kristal yapıdaki hatalı noktalardan çatlak başlar.
- 2. Çatlak ilerlemesi:** Çatlak genellikle yüzeyden başlayıp, kayma hatları ile orta kısımlara iletilir. Ayrıca, malzeme içinde mikro çatlaklar var ise ve çatlak ucunda oluşan gerilme yığılması çatlağı ilerletebilecek seviyede ise çatlak ilerler. Uygulanan gerilme çatlağın ilerlemesi için yeterli değilse malzeme yorulmaz. Gerilme çatlağın ilerlemesini sağlayacak kadar büyük ise çatlak gevşek yerlerden ilerler. Böylece yıpranma yavaş yavaş tüm keside yayılır. Ayrıca büyük ve haber verici bir uzama veya büzülme görülmez.

# YORULMA



## YORULMA



# YORULMA



## YORULMA

- ✓ Yorulma olayı üç aşamada değerlendirilebilir:
- 3. Kırılma:** Yıpranma nedeniyle ayrışma yeter derecede ilerledikten sonra kesidin geri kalan kısmı yükü taşıyamaz hale gelir ve malzeme aniden kopar.
- ✓ Yorulma olayı malzemede önemli bir plastik şekil değişimi yapmadığından ve uyarı vermeden elastik limitin altındaki gerilmelerde malzemenin ani olarak göçmesi nedeniyle tehlikelidir.
- ✓ Bu tip gevrek kırılma olaylarına çelik köprülerde, kötü yolda giden arabalarda, uçak kanatlarında rastlanabilir.

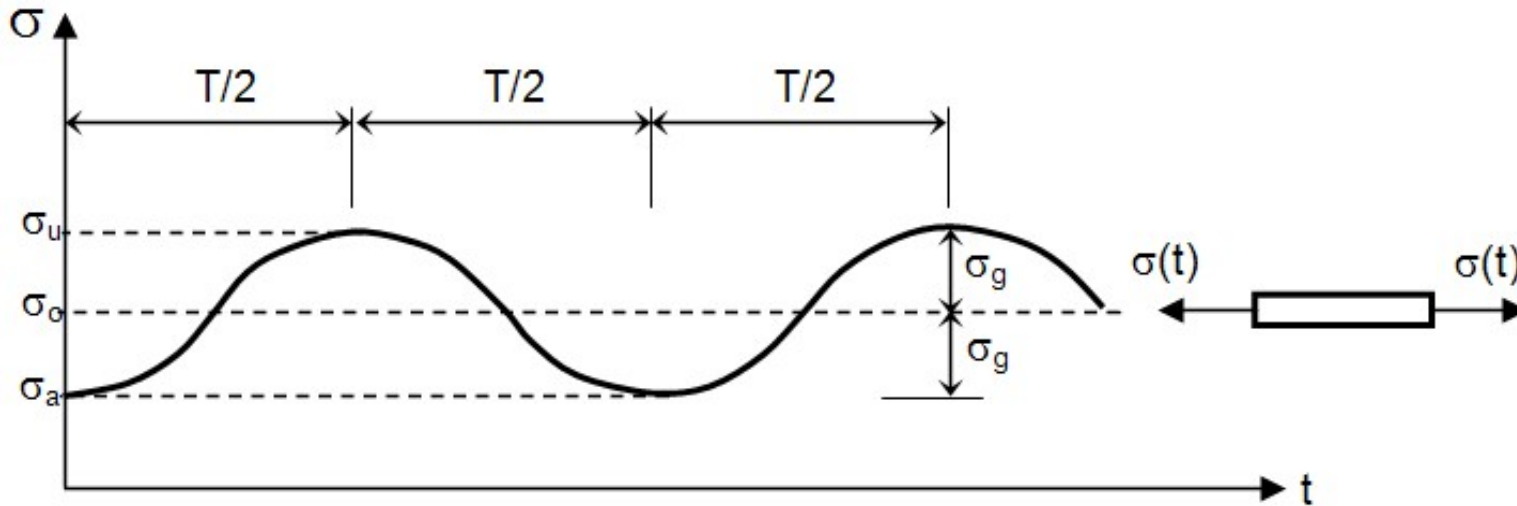


# YORULMA



## PERİYODİK YÜKLEME

- ✓ Aşağıdaki grafikte cismi zorlayan  $\sigma = \sigma(t)$  gerilme fonksiyonu görülmektedir.

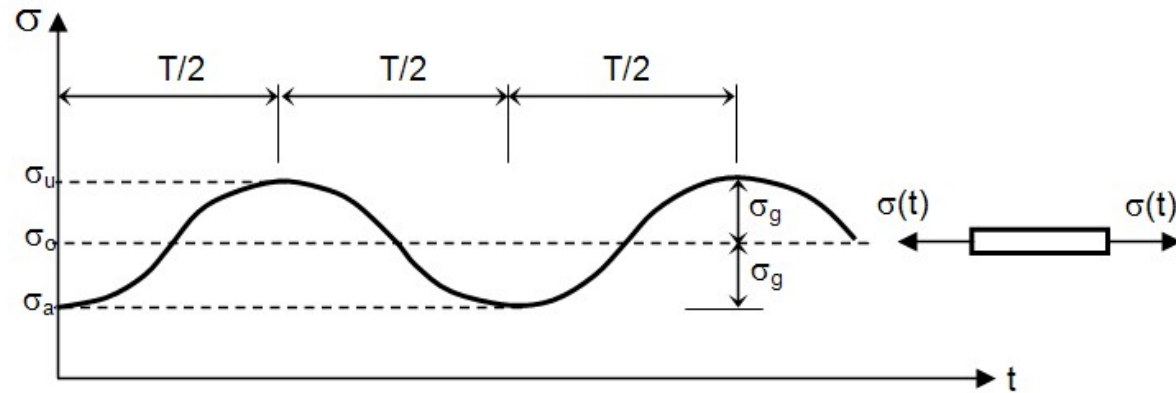


$\sigma_u$  = Üst sınır gerilmesi     $\sigma_o$  = Ortalama gerilme  
 $\sigma_a$  = Alt sınır gerilmesi     $\sigma_g$  = Genlik gerilmesi

# YORULMA



## PERİYODİK YÜKLEME



Bu gerilme değerleri dinamik bir yükleme için önemli sınırlardır ve aralarında;

$$\sigma_o = \frac{\sigma_u + \sigma_a}{2}$$

$$\sigma_o + \sigma_g = \sigma_{u,\max}$$

$$\sigma_g = \frac{\sigma_u - \sigma_a}{2}$$

$$\sigma_o - \sigma_g = \sigma_{a,\min}$$

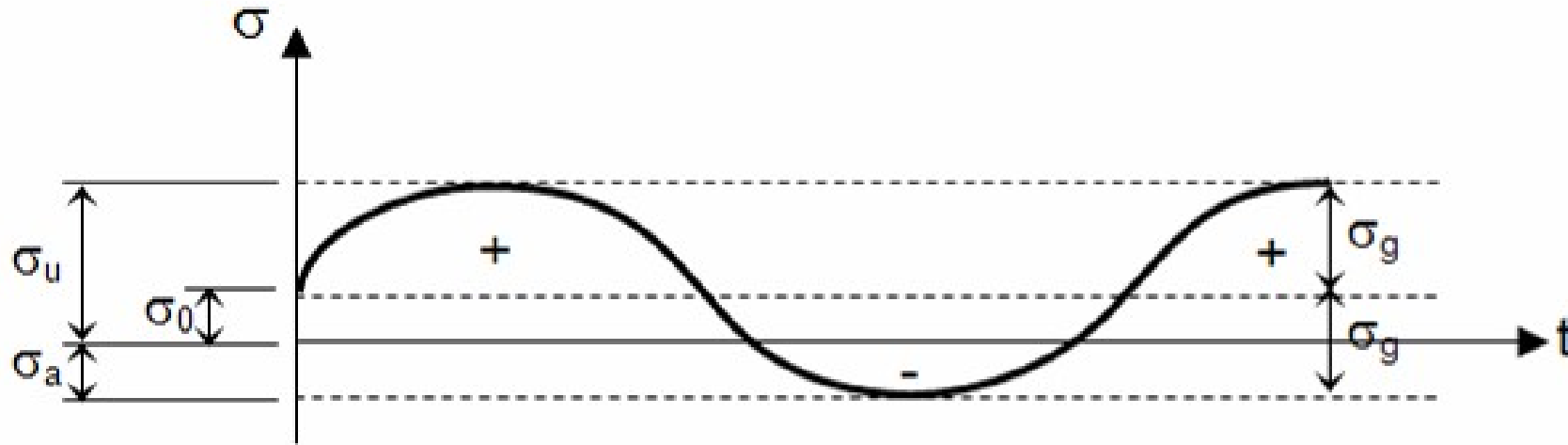
Bağıntıları vardır.

# YORULMA



## PERİYODİK YÜKLEME

- ✓ Periyodik yüklemde  $\sigma_u$  ve  $\sigma_a$  sınırlarının farklı işaretlerde olması cismin yorulmasını kolaylaştırır.
- ✓ Diğer bir deyişle, cisim burada devirli olarak basınç ve çekme gerilmelerine maruz kalmaktadır.

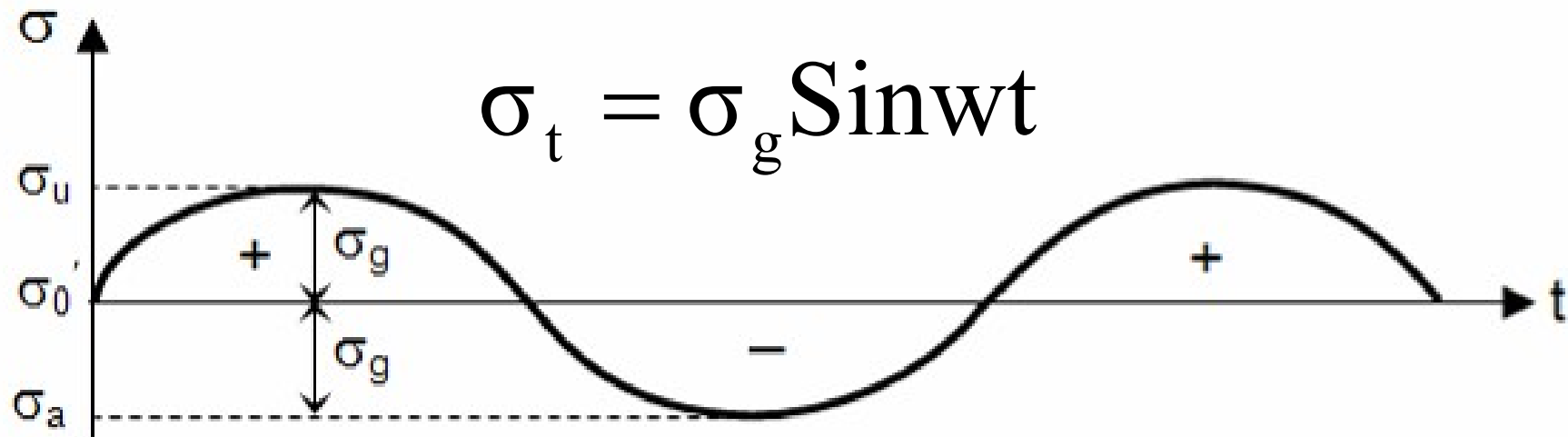


# YORULMA



## PERİYODİK YÜKLEME

- ✓ Ortalama gerilmesi sıfır olan  $\sigma_u = -\sigma_a$  haline tam harmonik titreşim (alternatif gerilme) denir.



- ✓ En olumsuz yükleme şekli alternatif gerilmedir.

# YORULMA



## PERİYODİK YÜKLEME

- ✓ Ayrıca herhangi bir sabit  $\sigma_0$  yüklemesi ile harmonik  $\sigma = \sigma(t)$  fonksiyonu birleşince,

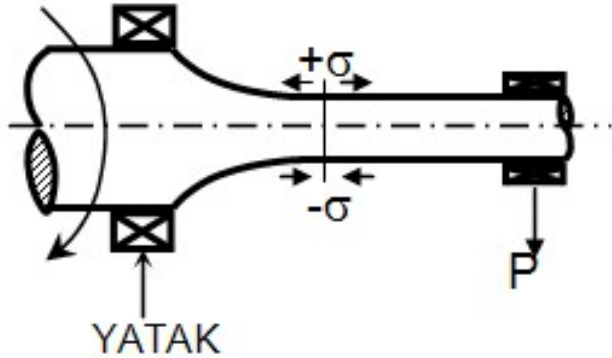
$$\sigma_t = \sigma_0 + \sigma_g \sin \omega t$$

- ✓ şeklinde bir yükleme durumu ortaya çıkar.

# YORULMA



## Yorulma Deneyleri ve Yorulma Sınırları



a) Dönen Konsol Kiriş

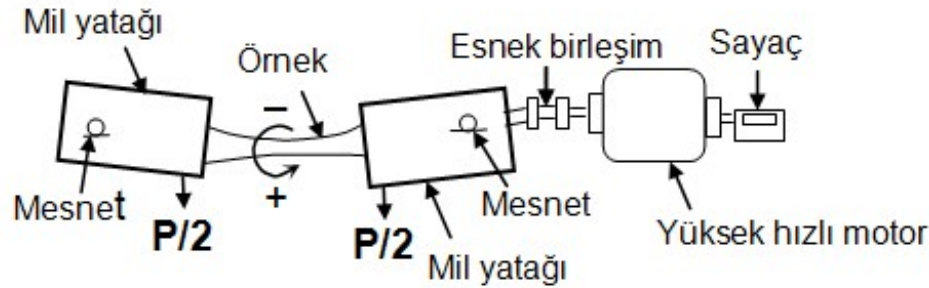
- ✓ En basit şekilde alternatif gerilme, yanda görülen dönen bir konsol kiriş yardımıyla sağlanır.

- ✓ Konsol kirişin üzerinde eksene paralel bir lif, üstte iken en büyük çekme, altta iken en büyük basınç gerilmelerine maruz kalır.
- ✓ Dolayısıyla bir devirde, bir maksimum ve minimum değerlerinden geçen gerilmenin değişimi bir sinüsoidal eğri şeklinde olur.

# YORULMA



## Yorulma Deneyleri ve Yorulma Sınırları



Döner mil deneyi

- ✓ Bunun yanında günümüzde kullanılan en yaygın yorulma deneyi, numunelerin dönerken birbiri arkasına, eşit genlikte çekme ve basınç gerilmelerine maruz bırakıldığı döner mil deneyidir
- ✓ Bu deneylerden elde edilen  $P$  yükünden  $\sigma_m = -\sigma_a = \sigma_u$  gerilmesi hesaplanır.
- ✓ Periyodik yükleme sonucunda kırılmanın olduğu **N tekrar sayısı** ölçülür.

# YORULMA



## Yorulma Deneyleri ve Yorulma Sınırları

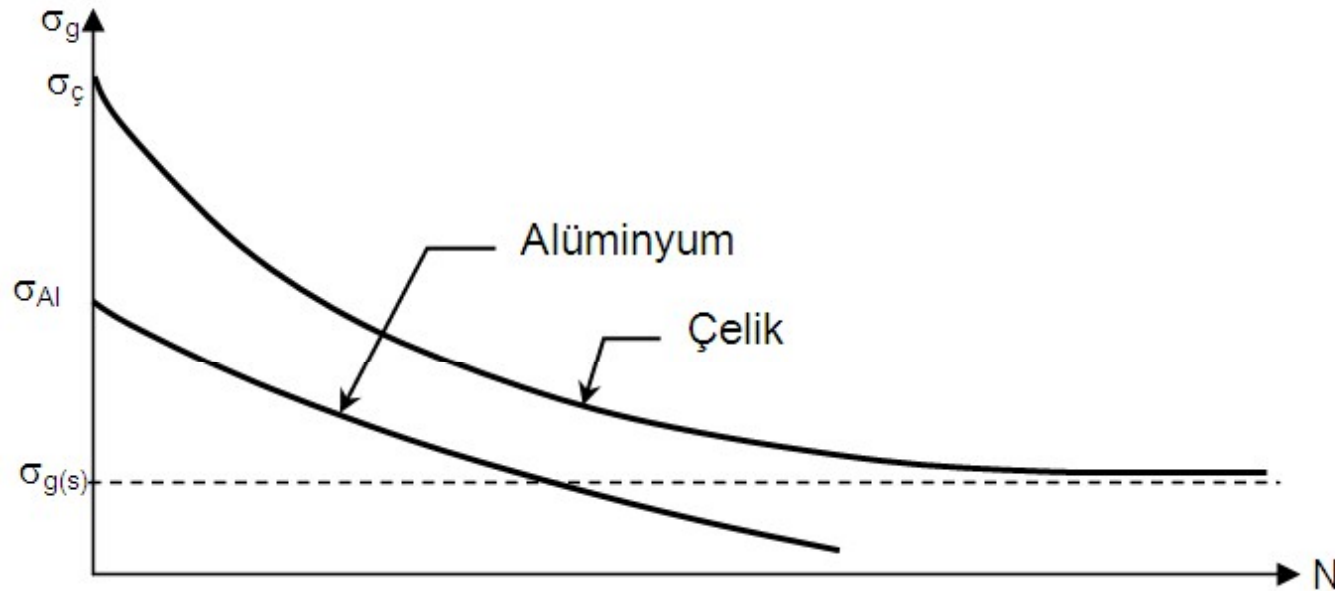
- ✓ Periyodik yükleme sonucunda kırılmanın olduğu **N tekrar sayısı** ölçülür.
- ✓ Bu şekilde P, yükü dolayısıyla  $\sigma_g$  değiştirilerek  $\sigma_g$  - N eğrisi çizilebilir.
- ✓ Elde edilen bu eğriye Wöhler eğrisi adı verilir.
- ✓ Deneyler göstermiştir ki,  **$\sigma_g$  genlik gerilmesi azaldıkça, malzemenin N kırılma sayısı artmaktadır**



# YORULMA



## Yorulma Deneyleri ve Yorulma Sınırları

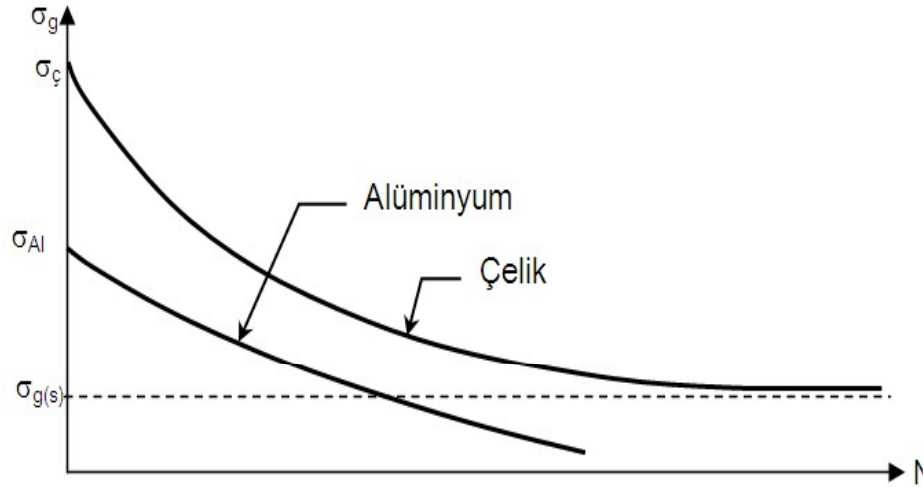


- ✓ Wöhler eğrisi demir esaslı malzemelerde  $10^6 - 10^7$  tekrar sayılarında yatıklaşmaya başlar.

# YORULMA



## Yorulma Deneyleri ve Yorulma Sınırları



- ✓ Malzemenin yorulma hasarına uğramadığı bu gerilmeye literatürde **sürekli dayanım gerilmesi, yorulma limiti veya süresiz yorulma dayanımı** adları verilir.

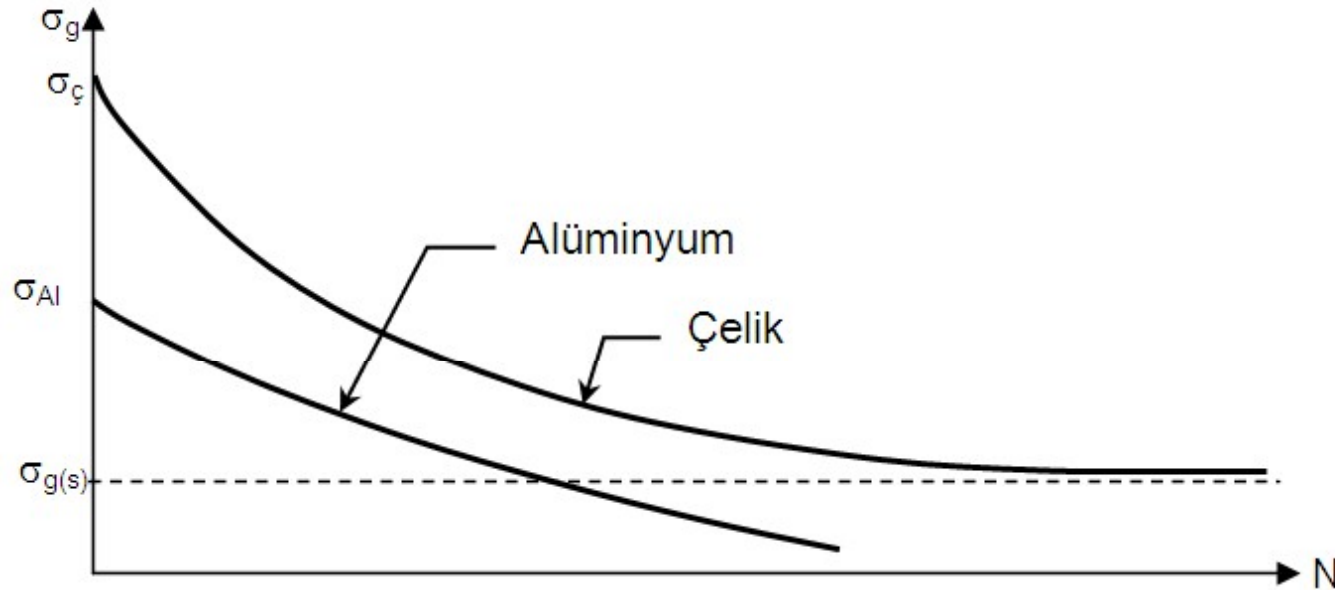
- ✓ Bu gerilme değerinin altında malzeme, yükleme sayısına bağlı olmaksızın sürekli dayanır.

- ✓ Birçok demir esaslı alaşım yorulma limiti değerine sahiptir ve bu sınır yaklaşık olarak çekme dayanımının yarısıdır.

# YORULMA



## Yorulma Deneyleri ve Yorulma Sınırları

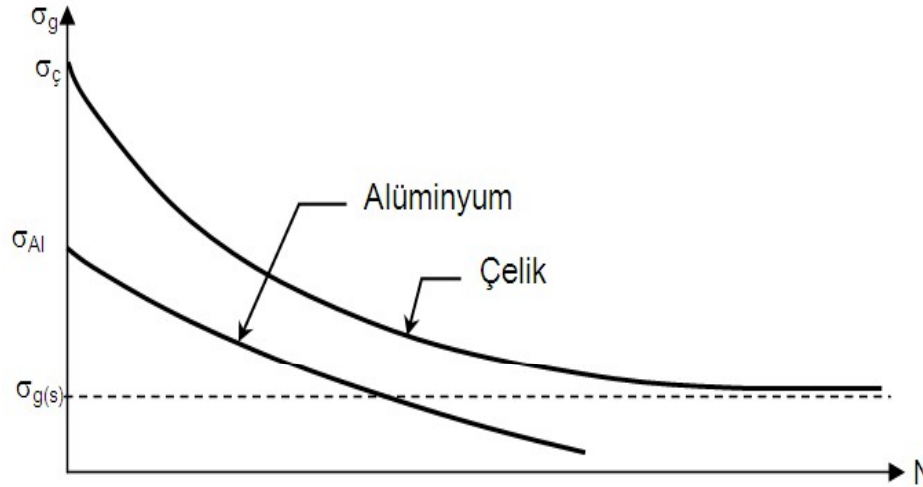


- ✓ Hafif metallerin veya alaşımların (alüminyum alaşımları vb) yorulma eğrilerinde asimptotik değer olmayıp, sürekli düşme görülür.

# YORULMA



## Yorulma Deneyleri ve Yorulma Sınırları



✓ Böyle malzemeler için **yorulma dayanımı veya süreli yorulma dayanımı** tanımı yapılır.

✓ Genellikle  $N = 10^8$  sayısına karşıt gelen gerilme değeri malzemenin yorulma dayanımı olarak alınır.

✓ Bu tür malzemeler için yorulma gerilmelerinin çekme dayanımlarının yaklaşık üçte biri olduğu kabul edilir.

✓ Yorulma limiti göstermeyen bir diğer malzemedir betondur.

# YORULMA



## YORULMA

- ✓ **Betonun yorulma dayanımı statik dayanımının yaklaşık olarak % 55'i dir.**
- ✓ **Gerilme genliği sabit tutularak yapılan deneylerle elde edilen kırılma tekrar sayısı farklılık gösterir.**
- ✓ **Bundan dolayı Wöhler eğrisi çizilirken istatistiki ortalama alınır.**
- ✓ **Literatürde verilen yorulma değerleri genellikle %50 kırılma ihtimali olan değerlerdir.**

# YORULMA



## YORULMA

- ✓ Sürekli dayanım gerilmesi,  $\sigma_o$  sabit gerilmesi ile birleşince,

$$\sigma_{u(s)} = \sigma_o + \sigma_{g(s)}$$

$$\sigma_{a(s)} = \sigma_o - \sigma_{g(s)}$$

- ✓ gibi iki sınır gerilme elde edilir. Bunlara malzemenin **sürekli dayanım sınırları** denir.
- ✓ Malzemeyi bu iki sınır arasında değişen yüklerle, yükleme sayısı ne kadar fazla olursa olsun koparmanın olanağı yoktur.
- ✓ Sürekli dayanım sınırlarının dışındaki hallerde cisim sonlu bir N sayısından sonra mutlaka geçer, diğer bir deyişle cismin kuvvetlere karşı gösterdiği dayanıklılık belirli bir zaman içindir.

# YORULMA



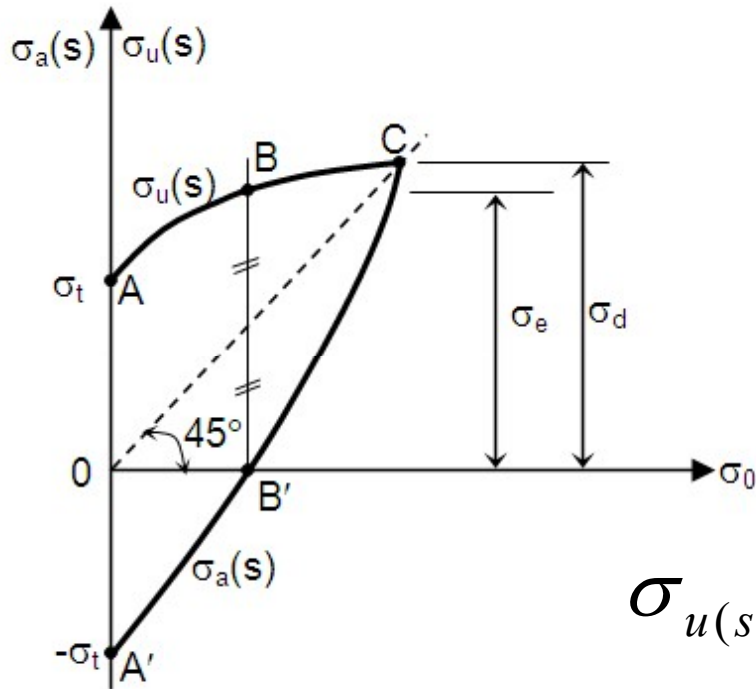
## YORULMA

- ✓ Yukarıdaki açıklamalardan anlaşılacağı gibi, sürekli dayanım sınırları belirli bir ortalama gerilme için bulunmuştur.
- ✓ Bu ortalama gerilme değiştirilecek olursa asimptotik genlik gerilmesi ve dolayısıyla cismin sürekli dayanım sınırları da değişir.
- ✓ Bu bağıntıdaki en karakteristik taraf, ortalama gerilme arttıkça asimptotik genlik gerilmesinin azaldığıdır.
- ✓ Diğer bir deyişle sürekli dayanım sınırları birbirlerine yaklaşır.

# YORULMA



## YORULMA



- ✓ Bir cismin sürekli dayanım sınırlarını yanda olduğu gibi grafiksel olarak tanımlamakta yarar vardır.

Bu sistemde

$$\sigma_{u(s)} = f_1(\sigma_o) \text{ ve } \sigma_{a(s)} = f_2(\sigma_o)$$

gibi iki eğri verilebilir.

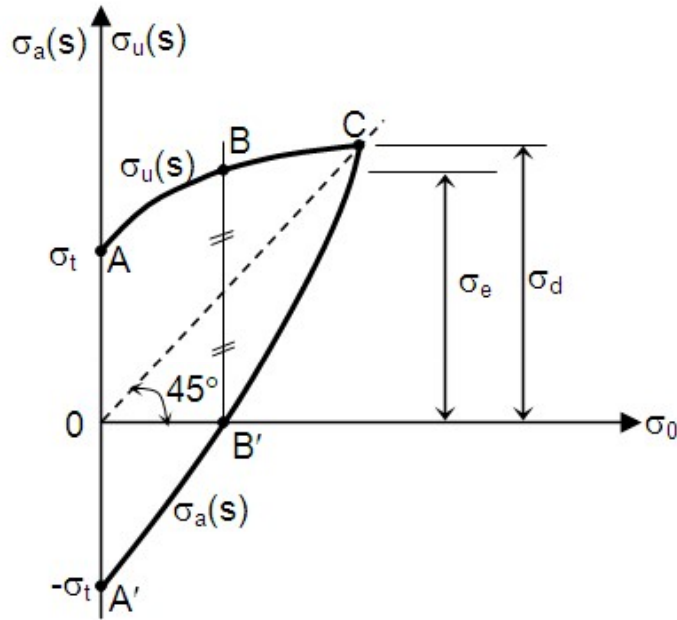
- ✓ Çok sayıda deney yapılmasını gerektiren bu diyagrama **Goodman diyagramı** adı verilir.



# YORULMA



## YORULMA



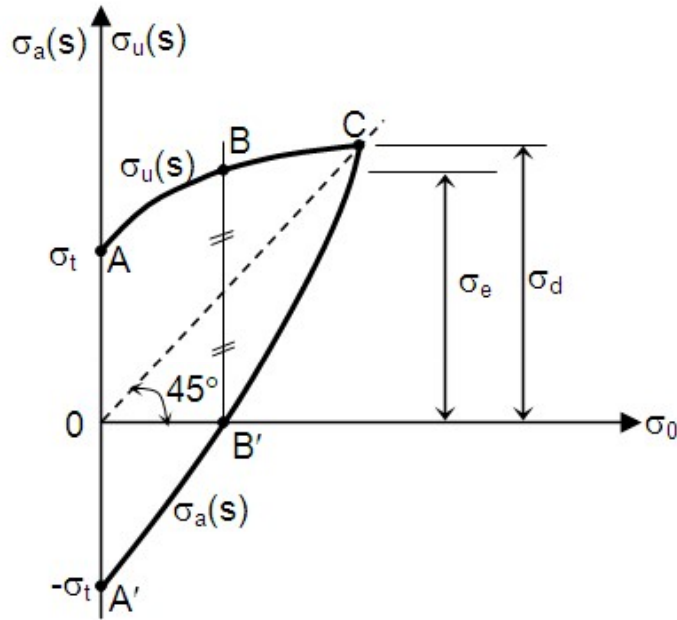
✓ Yandaki iki eğri,  $\sigma_0$  serbest değişken alınarak çizilmiştir.

✓ Yatay eksen ile  $45^\circ$  lik açı yapan OC doğrusu, üst ve alt sürekli dayanım eğrileri arasındaki düşey aralığı iki eşit parçaya böler; parçalardan her biri asimptotik genlik gerilmesidir.

# YORULMA



## YORULMA



✓ Sürekli dayanım eğrileri üzerinde bir kaç tipik noktayı incelemekte yarar vardır.

$\sigma_0 = 0$  halinde (A, A') noktalarıyla,

$$\sigma_{u(s)} = -\sigma_{a(s)} = \sigma_t$$

özelliğindeki sınırlar gösterilmektedir.

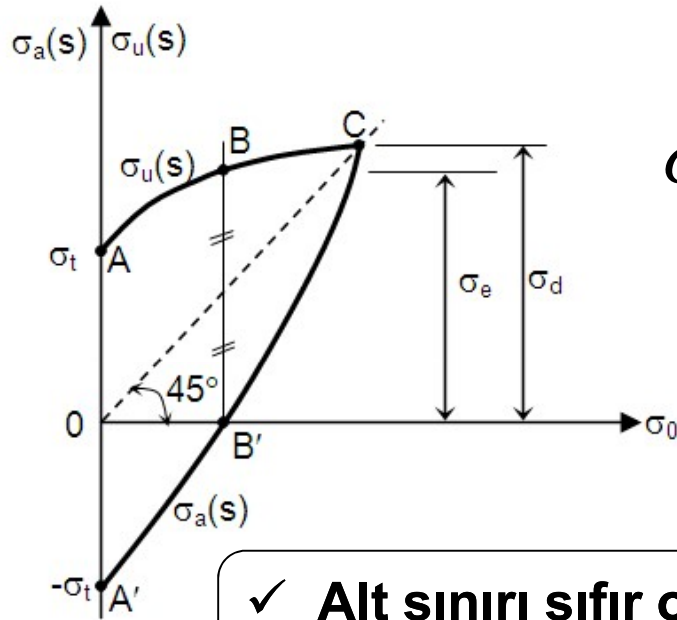
✓  $\sigma_t$  ye cismin titreşim dayanımı denir.

✓ Çelik için bu değer akma sınırının hayli altındadır

# YORULMA

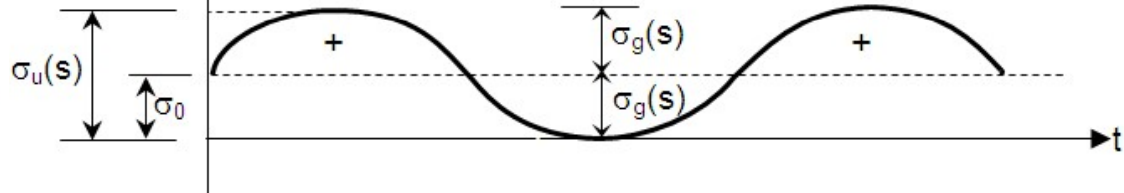


## YORULMA



(B, B') noktalarındaki özellik ise,

$$\sigma_{a(s)} = 0 \text{ ve } \sigma_{u(s)} = 2\sigma_{g(s)} = 2\sigma_o = \sigma_e$$



✓ Alt sınırı sıfır olan bu durumun üst sınır değerine de malzemenin **eşik dayanımı** denir

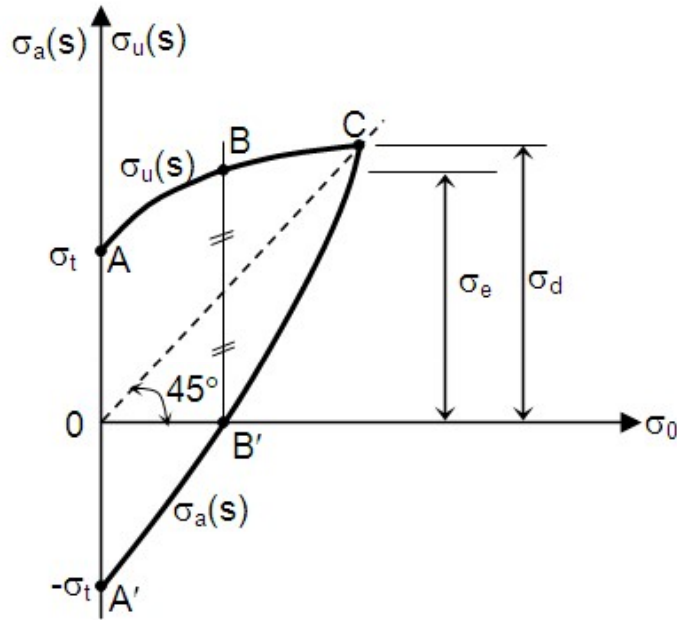
✓  $\sigma_e$  değeri aynı zamanda  $N = \infty$  değerine de karşıt gelen  $\sigma_a = 0$  halindeki yorulma dayanım değeridir.

✓ Çelikte bu değer akma sınırından küçük olmakla beraber çok yakındır.

# YORULMA



## YORULMA



✓ Son olarak iki sınır eğrisinin birbirlerini kestiği C noktasına gelince, bu durum için artık yük değişimi söz konusu değildir.

✓ Malzeme sabit gerilme altındadır.

✓ Bu gerilmeyi süresiz olarak taşıyabilir ve bu gerilmeye malzemenin **direnme sınırı** denir.

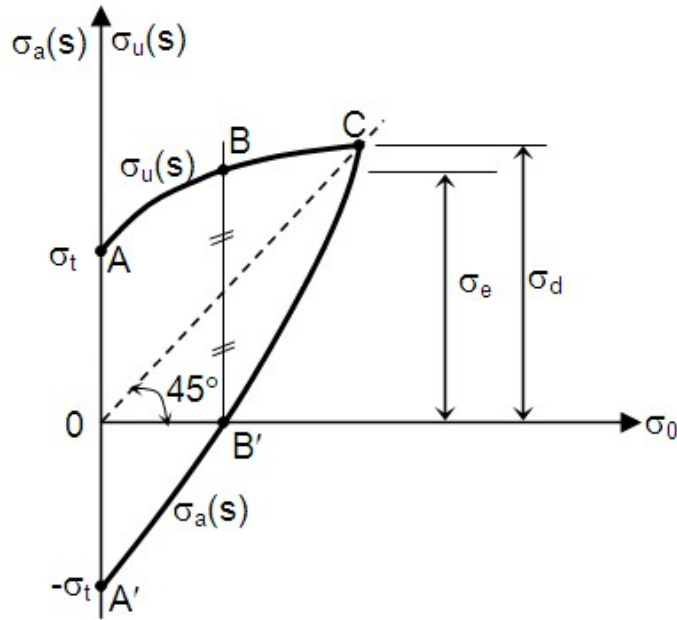
✓ Bu değer, yük altında sünme olayı yok sayılırsa cismin statik dayanımına eşittir.

✓ Sünme olayı da göz önüne alınırsa bu değer daha da düşer.

# YORULMA



## YORULMA



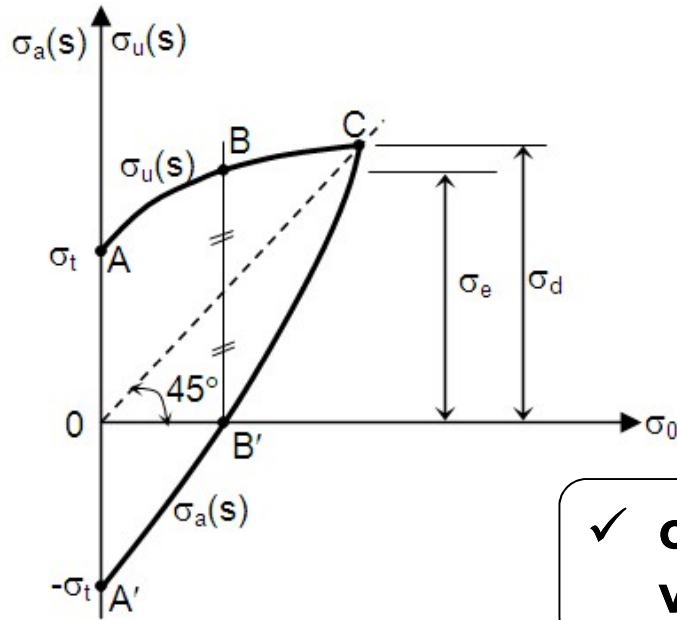
✓ Ortalama gerilmenin basınç olması hali için sürekli dayanım eğrilerini şeklin soluna uzatmak gerekir.

✓ Çelik gibi çekme ve basınçta aynı davranışı gösteren cisimlerde diyagramlar orijine kıyasla simetriktir.

# YORULMA



## YORULMA



✓ Verilen herhangi bir  $\sigma_u$  ve  $\sigma_a$  değerlerinin sürekli dayanım sınırlarını aşıp aşmadıklarını, aşağıdaki şekilde tayin edebiliriz:

$$\frac{\sigma_u + \sigma_a}{2} = \sigma_o$$

✓ olarak ortalama gerilme hesaplanır ve  $\sigma_{u(s)}$  ve  $\sigma_{a(s)}$  sınırları yandaki şekilden bulunur.

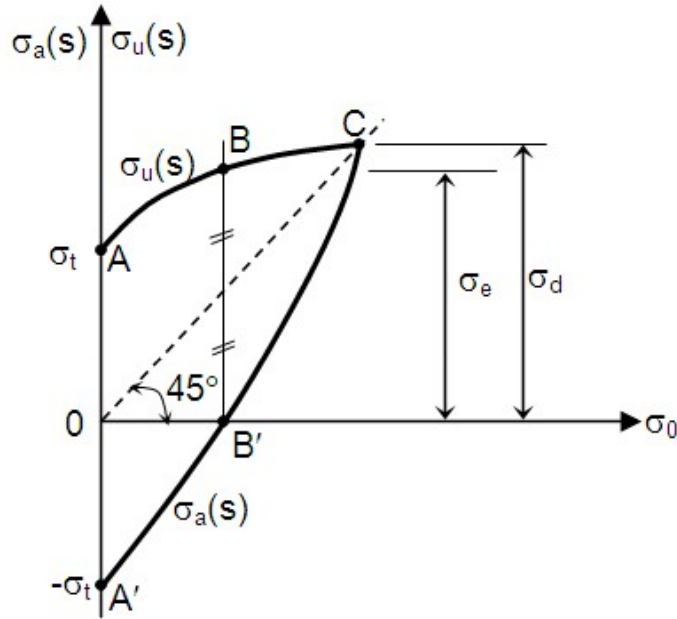
$$\sigma_u < \sigma_{u(s)} \quad \text{ve} \quad \sigma_a > \sigma_{a(s)}$$

✓ arasında ise, bu gerilmeler etkisinde malzeme sürekli dayanım sınırları arasında olup ömrü sonsuzdur, aksi halde belirli bir süre sonra cisimde kopma görülür.

# YORULMA



## YORULMA



✓ Plastik şekil değiştirmeleri önemli olan malzemelerde, sürekli dayanım sınırlarına ait yanda verilen eğrileri biraz değiştirmek gerekir.

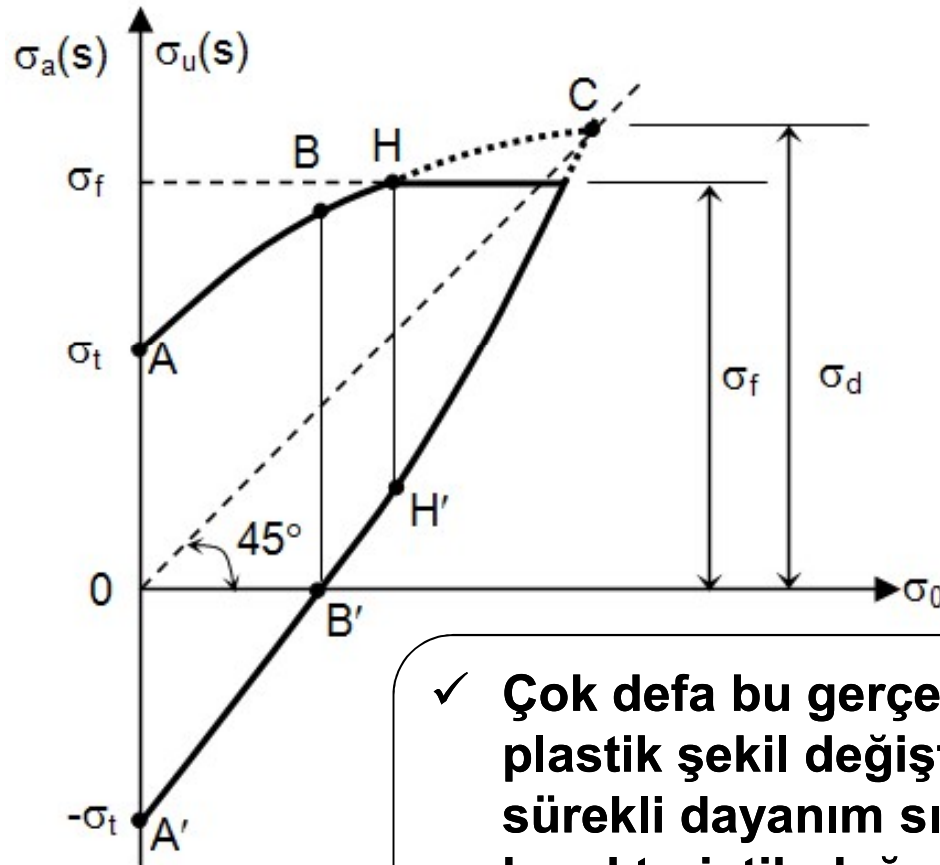
✓ Örneğin, çelik gibi malzemede, sınır gerilmeler akma değerine ulaştınca, çatlakların doğması yorulmadan çok plastik şekil değiştirmelerden olur.

✓ Bu gibi durumlarda sürekli dayanım sınırları akma gerilmesiyle sınırlandırılır, diğer bir deyişle akma gerilmesinden daha büyük değerler sınır olarak alınmaz.

# YORULMA



## YORULMA



✓ Böyle bir sınırlandırma yanda gösterilmiştir,  $\sigma_f$  malzemenin akma gerilmesidir.

✓ Çok defa bu gerçek göz önünde bulundurularak, plastik şekil değiştirme yeteneği fazla olan bir cismin sürekli dayanım sınır eğrilerini, o malzemenin bir kaç karakteristik değerine bağlı olarak bir takım doğrularla yaklaşık olarak simgelemek olanaklıdır.



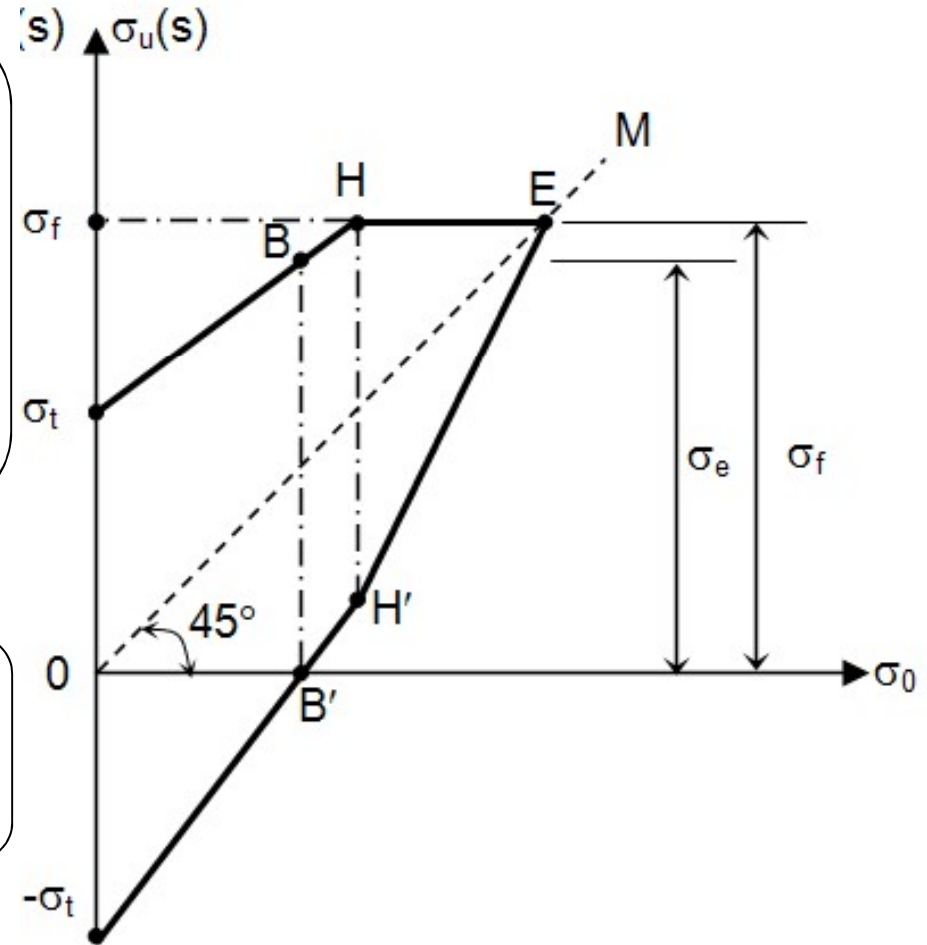
# YORULMA



## YORULMA

- ✓ Örneğin, çeliğin  $\sigma_t$  titreşim dayanımı,  $\sigma_e$  eşik dayanımı ve  $\sigma_f$  akma sınırı ise bu üç değere bağlı olarak sürekli dayanım diyagramı yanda görüldüğü gibi doğru parçalarıyla çizilebilir.

- ✓ Bu kabule bağlı olarak çizilen yeni çizime **Smith Diyagramı çizimi** denir.



# YORULMA

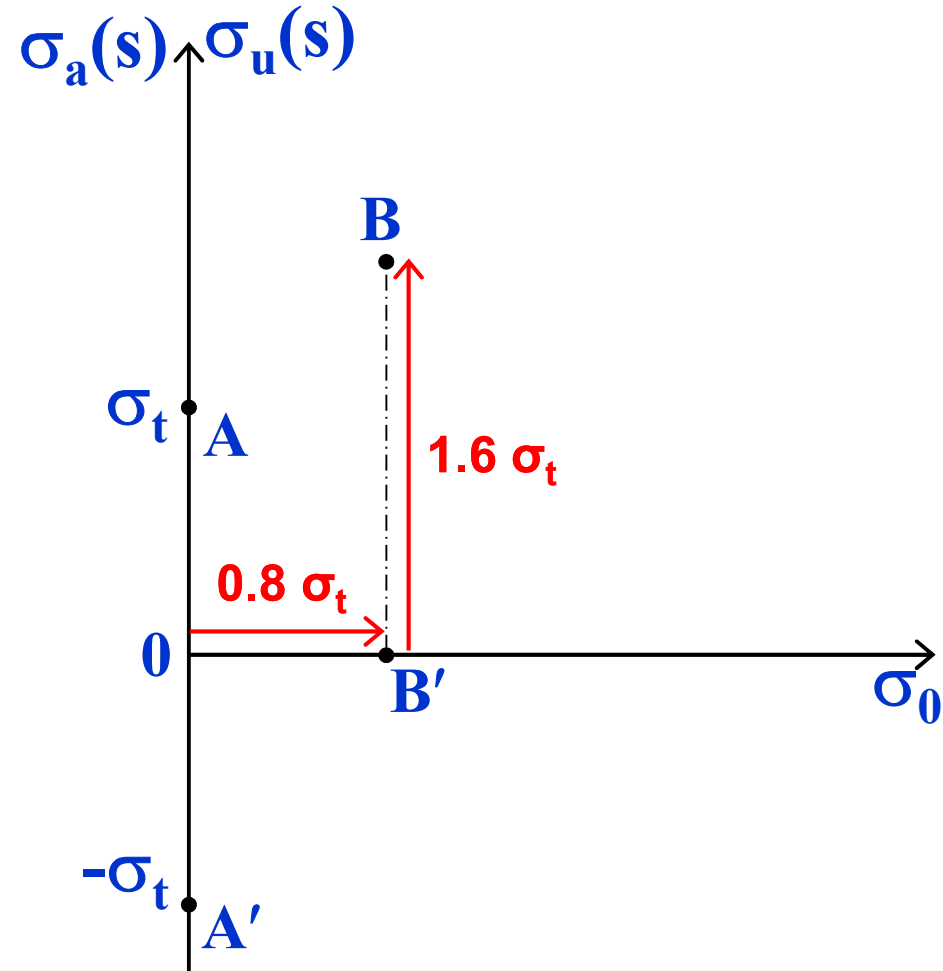


## SMITH DİYAGRAMI ÇİZİMİ

1. Düşey eksende  $\sigma_t$  değerleri işaretlenir.

2. Yatay eksende  $OB'=0,8 \sigma_t$  alınarak B' noktası belirlenir (Eşik dayanımı biliniyorsa  $OB'$  eşik dayanımının yarısı alınır).

3.  $BB'=1,6 \sigma_t$  alınıp yatay eksenden dik çıkılarak B noktası bulunur. Bulunan bu değer eşik dayanımıdır. Bu değer deneylerle saptanmadığı takdirde alınır.



# YORULMA

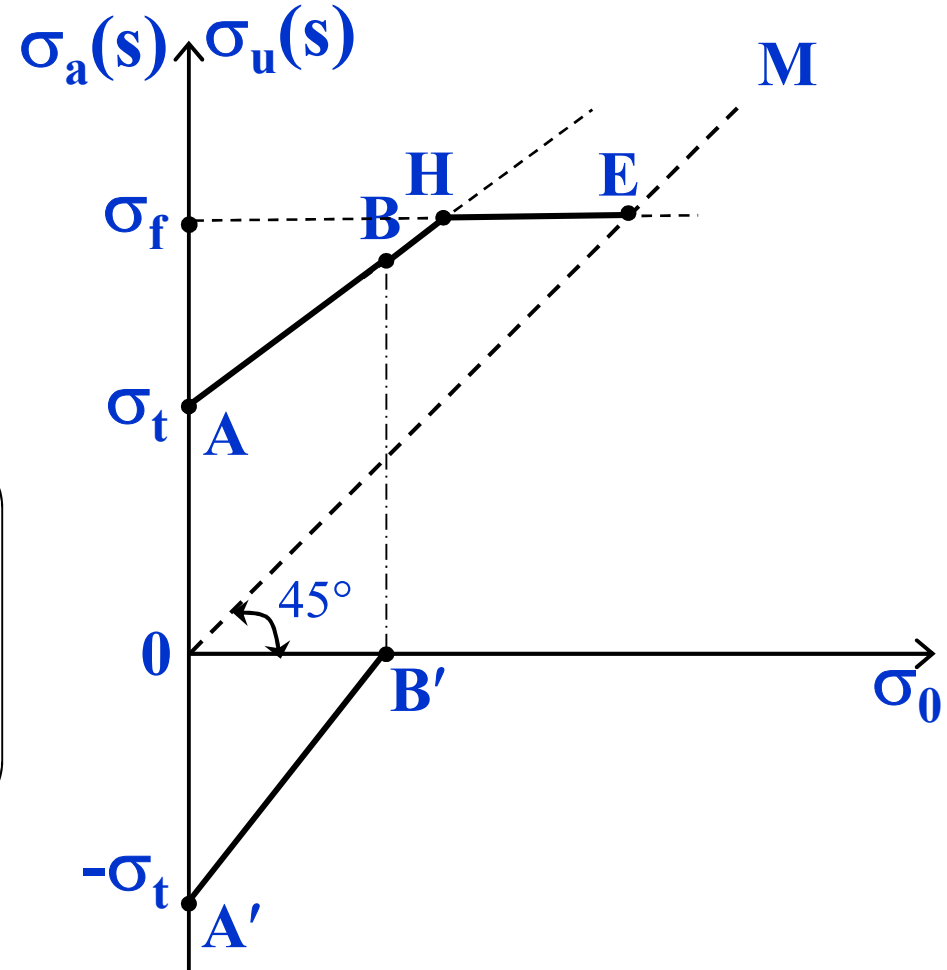


## SMITH DİYAGRAMI ÇİZİMİ

4. A noktası ile B noktası, A' noktası ile B' noktası birleştirilir.

5. Orijinden  $45^\circ$  lik açı alarak OM doğrusu çizilir.

6.  $\sigma_f$  noktasından çizilen yatay doğrunun AB doğrultusu ve kesiştiği noktada H noktası, OM doğrultusu ile kesiştiği noktada E noktası belirlenir.



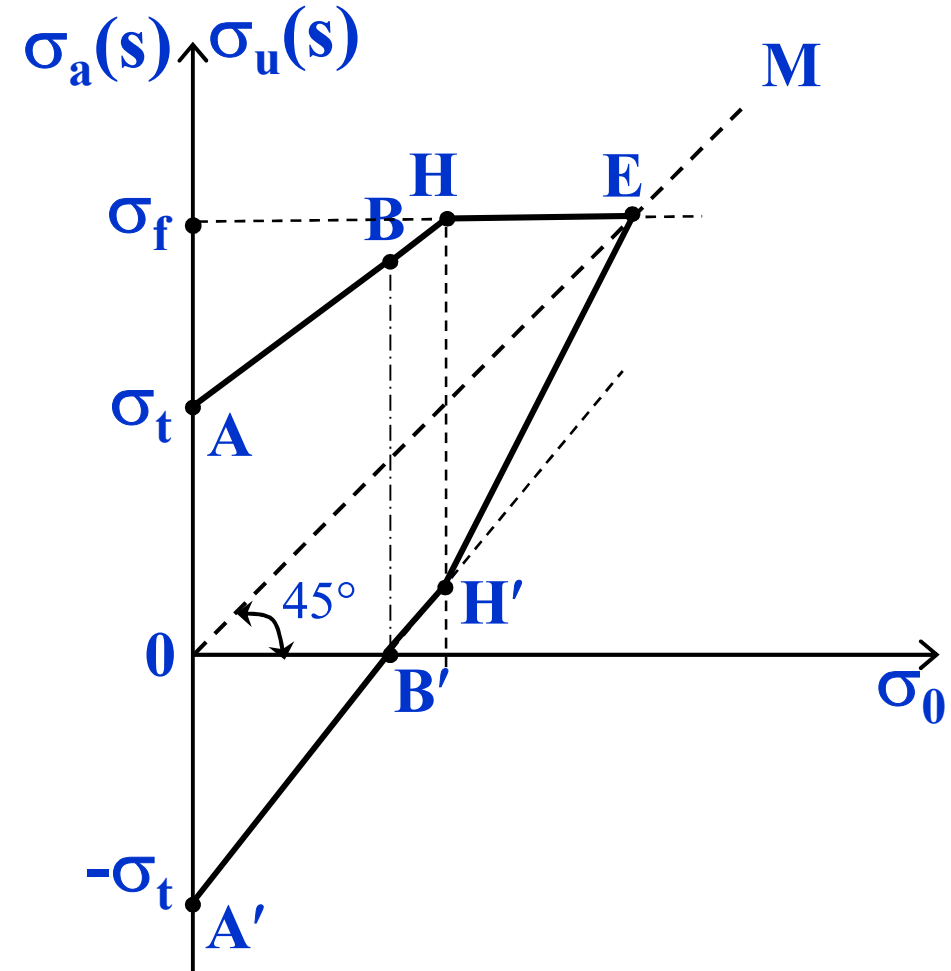
# YORULMA



## SMITH DİYAGRAMI ÇİZİMİ

7.  $A'B'$  doğrultusu üzerinde H noktasından düşey inerek  $H'$  noktası belirlenir.

8.  $H'$  noktası ile E noktası birleştirilerek diyagram kapatılır.

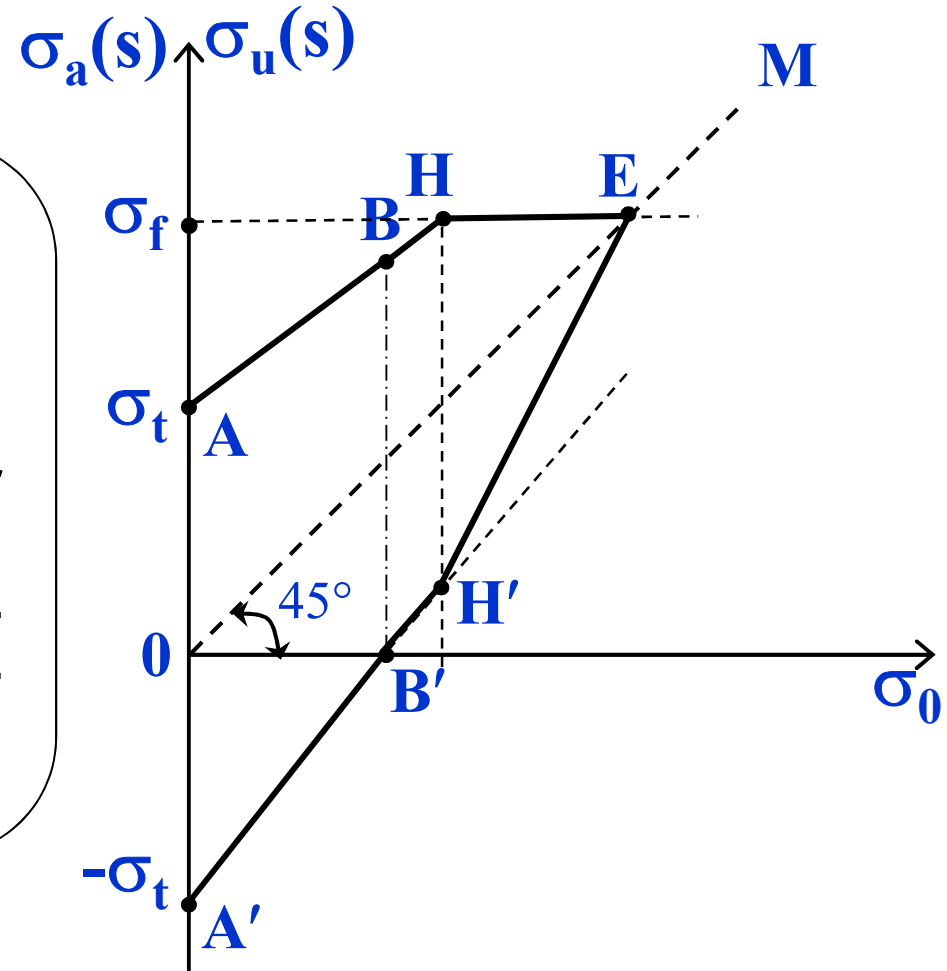


# YORULMA



## SMITH DİYAGRAMI ÇİZİMİ

9.  $\sigma_0$  değeri hesaplanarak bu değere karşılık gelen üst veya alt gerilme değerlerinden biri oluşturulan diyagram üzerinde işaretlenir. Diğer nokta sınırlanan bölge içinde kalıyorsa malzeme söz konusu gerilmeyi süresiz olarak taşıyabilir.



# YORULMA



## YORULMA DAYANIMI

|       | STATİK DENEME                                        |                                                   | DİNAMİK DENEME                                          |                                                     |
|-------|------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| ÇELİK | ÇEKME<br>DAYANIMI<br>$\sigma_{\text{ç}}(\text{MPa})$ | AKMA<br>SINIRI<br>$\sigma_{\text{f}}(\text{MPa})$ | TİTREŞİM<br>DAYANIMI<br>$\sigma_{\text{t}}(\text{MPa})$ | EŞİK<br>DAYANIMI<br>$\sigma_{\text{e}}(\text{MPa})$ |
| ST 37 | 370                                                  | 240                                               | 130                                                     | 220                                                 |
| ST 52 | 520                                                  | 360                                               | 170                                                     | 280                                                 |

# YORULMA



## YORULMA DAYANIMI

- ✓ Ayrıca, bu konuda bazı ülkelerin örneğin, İsviçre Çelik Yapılar Şartnamesi'nin öngördüğü yorulma bağıntıları vardır :

$$\sigma_u = \sigma_e \left( 1 + 0.3 \frac{\sigma_a}{\sigma_u} \right)$$

$$\sigma_t = 0.7 \sigma_e$$



Dokuz Eylül Üniversitesi  
İnşaat Mühendisliği Bölümü



**İNŞ2023 YAPI MALZEMESİ I**

# **PERİYODİK YÜKLEME ve YORULMA**

*Dr. Öğr. Üyesi Çağlar YALÇINKAYA*  
[www.caglaryalcinkaya.com](http://www.caglaryalcinkaya.com)