

MAKİNE ELEMANLARI DERS SLAYTLARI



YORULMA

Prof. Dr. İrfan KAYMAZ

Prof. Dr. Akgün ALSARAN

Arş. Gör. İlyas HACISALİHOĞLU

Aloha Havayolları Uçuş 243: Hilo'dan Honolulu (Havai) Uçuşu

Tarih: 28 Nisan 1988



Yorulma Hasarı

Mukavemette malzemelerin maruz kaldığı yükleme şekilleri malzeme gerilmesini etkilemektedir. Bunu için **herhangi bir makine elemanının da maruz kaldığı kuvvetin şiddeti, doğrultusu, yükleme şekli belirlenerek malzeme için emniyet değerleri, profil ve boyutlandırma seçimine karar verilmektedir.**



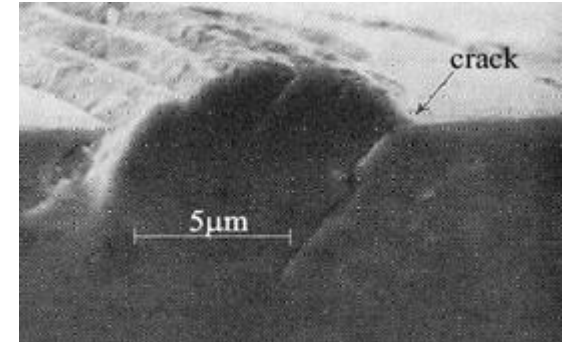
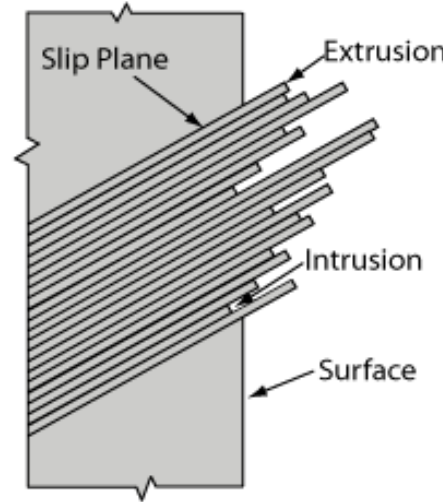
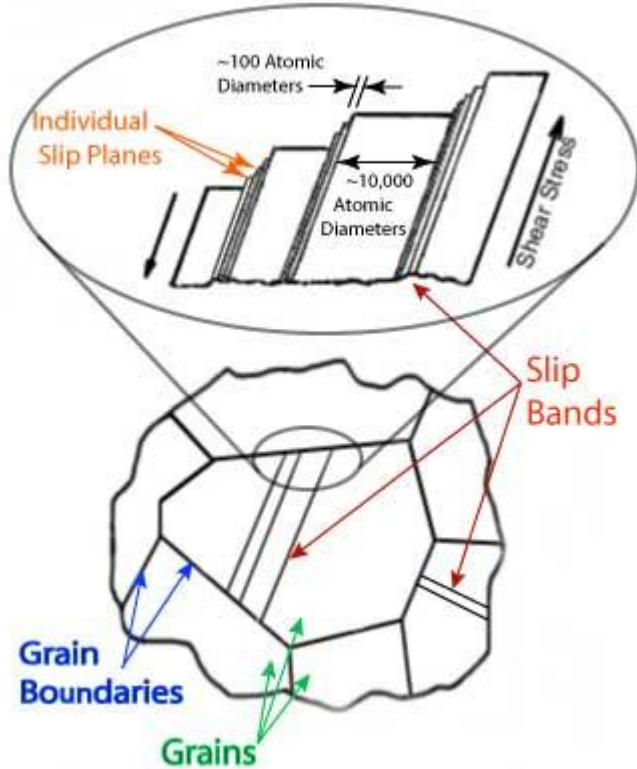
Dinamik yükleme
(Arka aks gövde)

Statik yükleme



Kaynak: <http://www.businessinsider.com>

- Yeteri derecede çevrimsel (değişken) yükleme neticesinde, dislokasyonlar yığılı sürekli kayma bantlarını oluşturur.
- Bu hareketler yüzeyde, gerilme yığılmasına sebep olacak alanlar doğurur.
- Bu alanlardan yorulma çatlağı başlar.



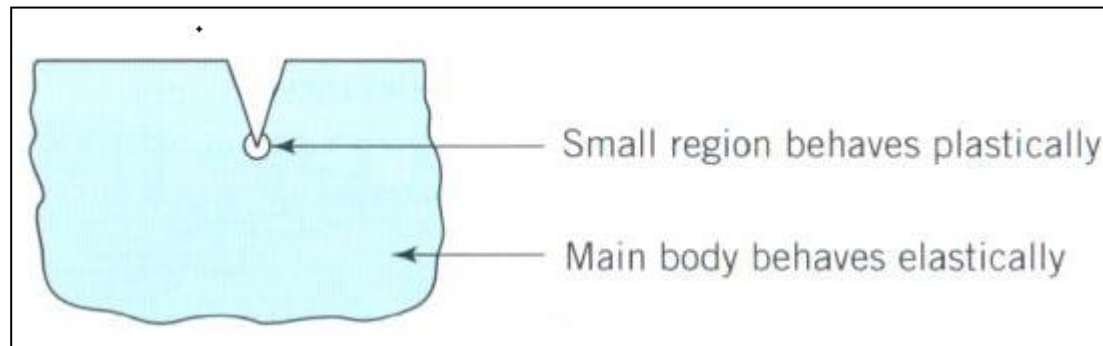
Yorulma; değişken gerilmeler altında malzemenin iç yapısında meydana gelen değişimlerdir.

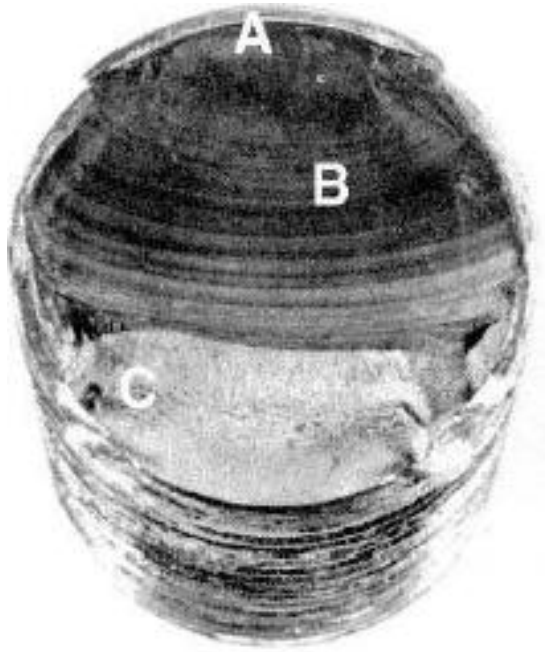
Ömür; makine elemanının kırılincaya kadar direnç gösterebildiği süre/çevrim sayısıdır.

Yorulma hasarının meydana gelmesi;

- Yükleme değişken olmalıdır
- Bu yükleme belirli bir çevrim sayısında etki etmelidir.

Etki eden yük; akma gerilmesinin çok altında bir gerilmeye neden olsa da lokal plastik deformasyonlar yorulmaya neden olur.





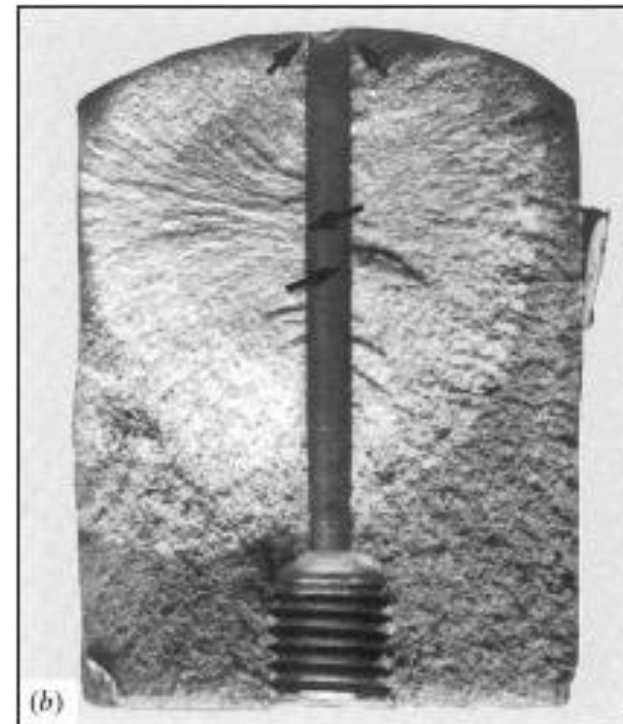
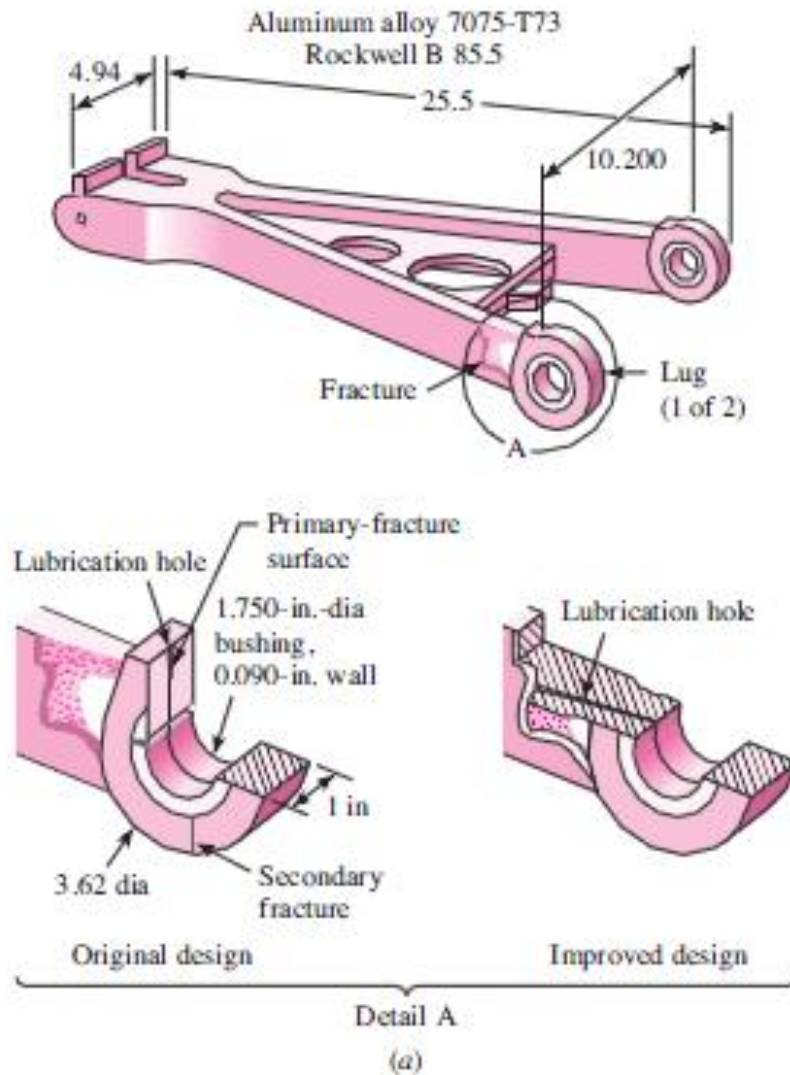
Çatlak vida diş dibinden başlamış

A: çatlağın başladığı bölge
B: çatlak ilerlemesi
C: son kırılma bölgesi



B: çatlak ilerlemesi
C: son kırılma bölgesi

Kırılmadan önceki alanın küçük olması yüklerin az olduğuna işaret eder.



Yorulma kırılmasına göre tasarım değişikliği

Gerilme oranı R (stress ratio) aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}$$



$R=-1$ ise tam değişken yükleme

$R=0$ ise sıfır-çekme gerilmesi yüklemesidir.

Gerilme aralığı:

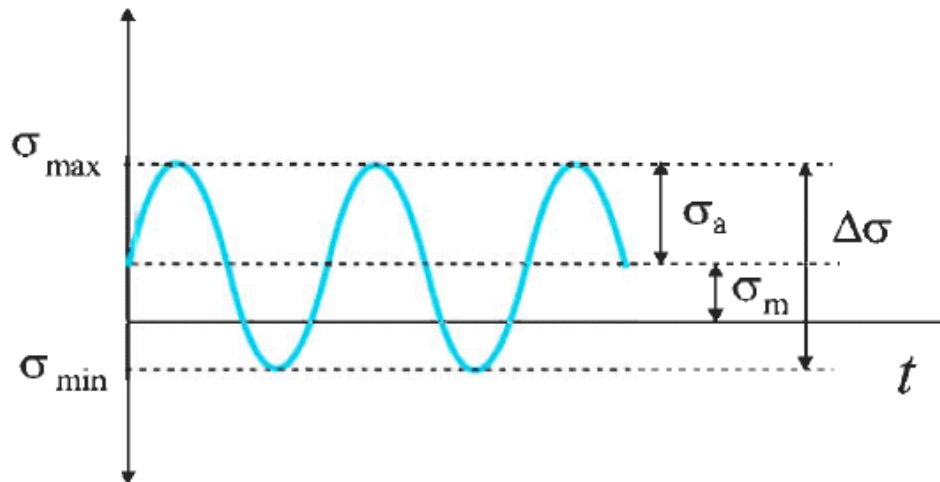
$$\Delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min}$$

Gerilme genliği:

$$\sigma_a = \frac{1}{2} (\sigma_{\max} - \sigma_{\min})$$

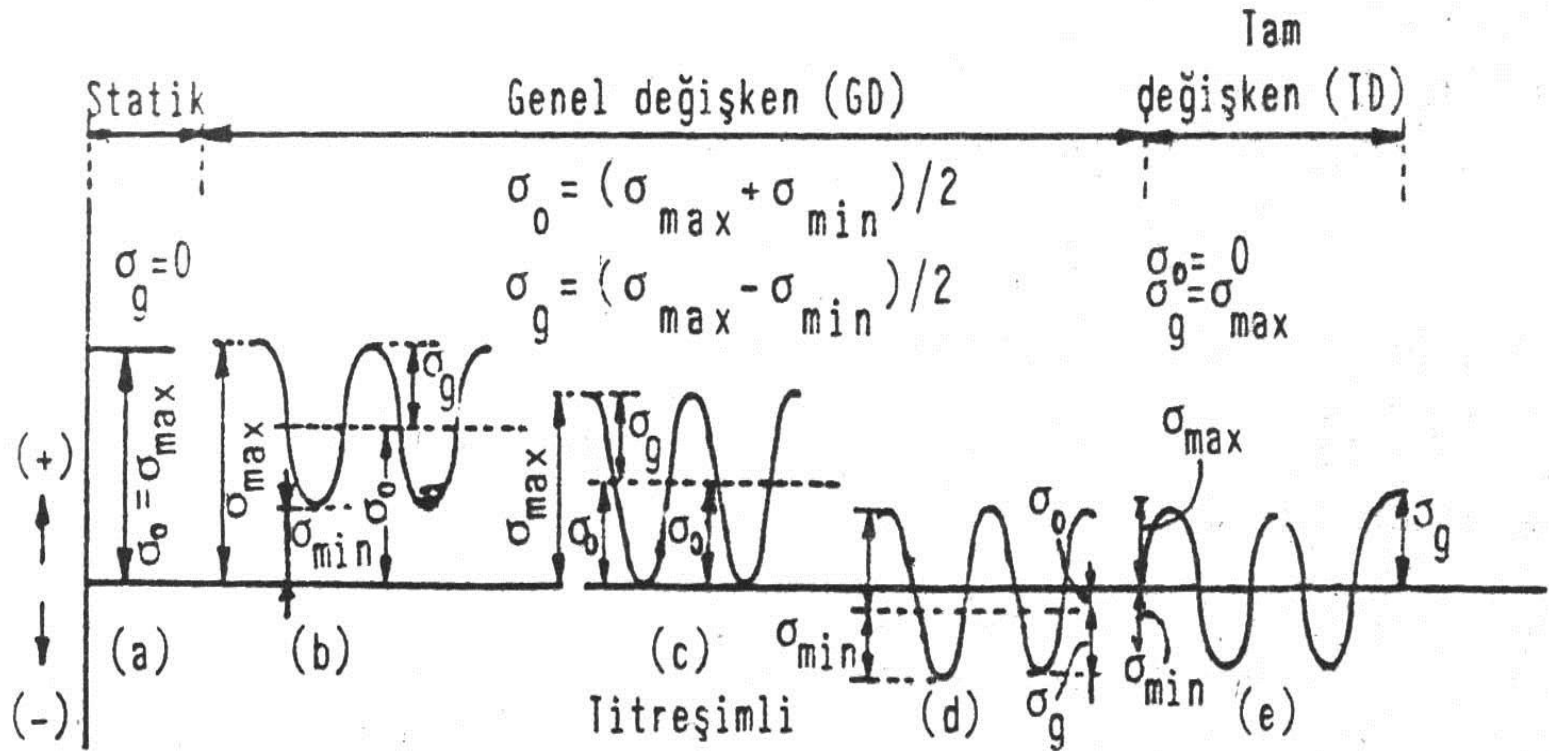
Ortalama Gerilme:

$$\sigma_m = \frac{1}{2} (\sigma_{\max} + \sigma_{\min})$$



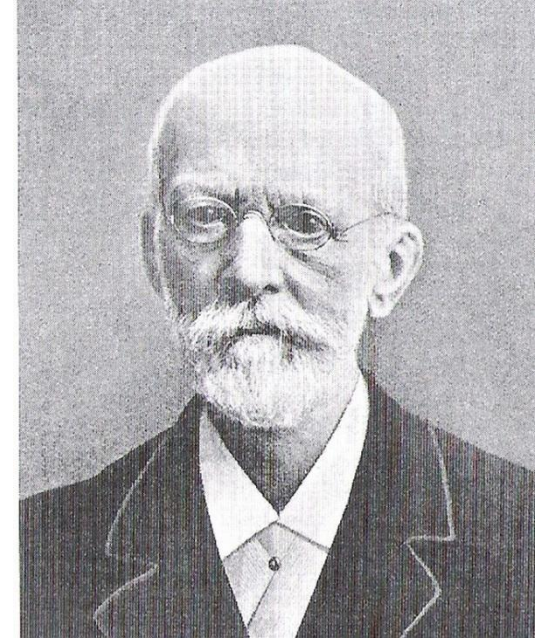
Tekrarlı yükleme: Temel kavramlar

Makine elemanları sabit, tam değişken, titreşimli değişken ve genel değişken yükleme şekillerine ve buna göre de gerilmelere maruz kalmaktadır.



Değişken zorlanmaya maruz bir makine elemanının tasarımı **ömür** esas alınarak yapılır.

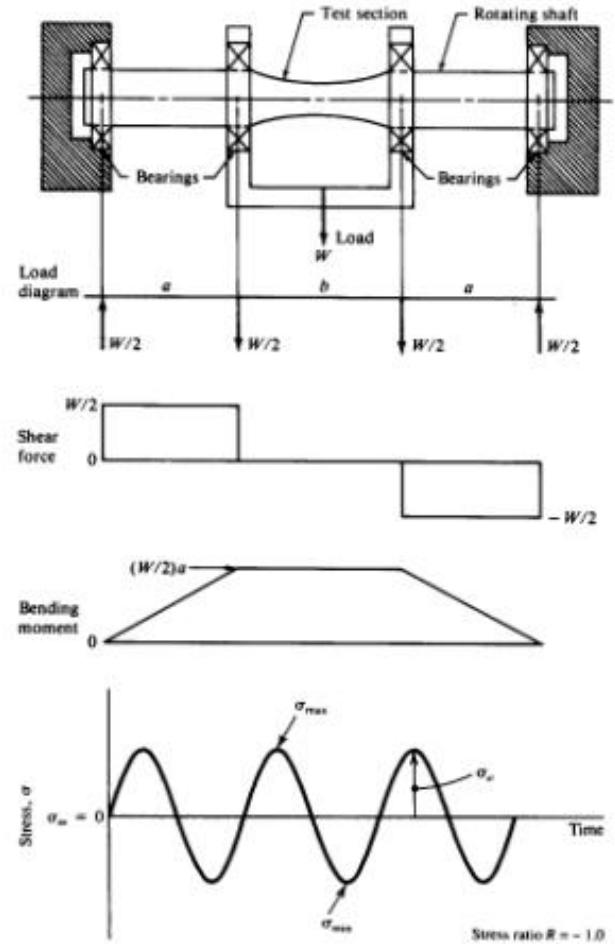
Değişken yükler altında malzeme davranışı ilk defa 1866'da **Wöhler** tarafından gerçekleştirilmiştir.



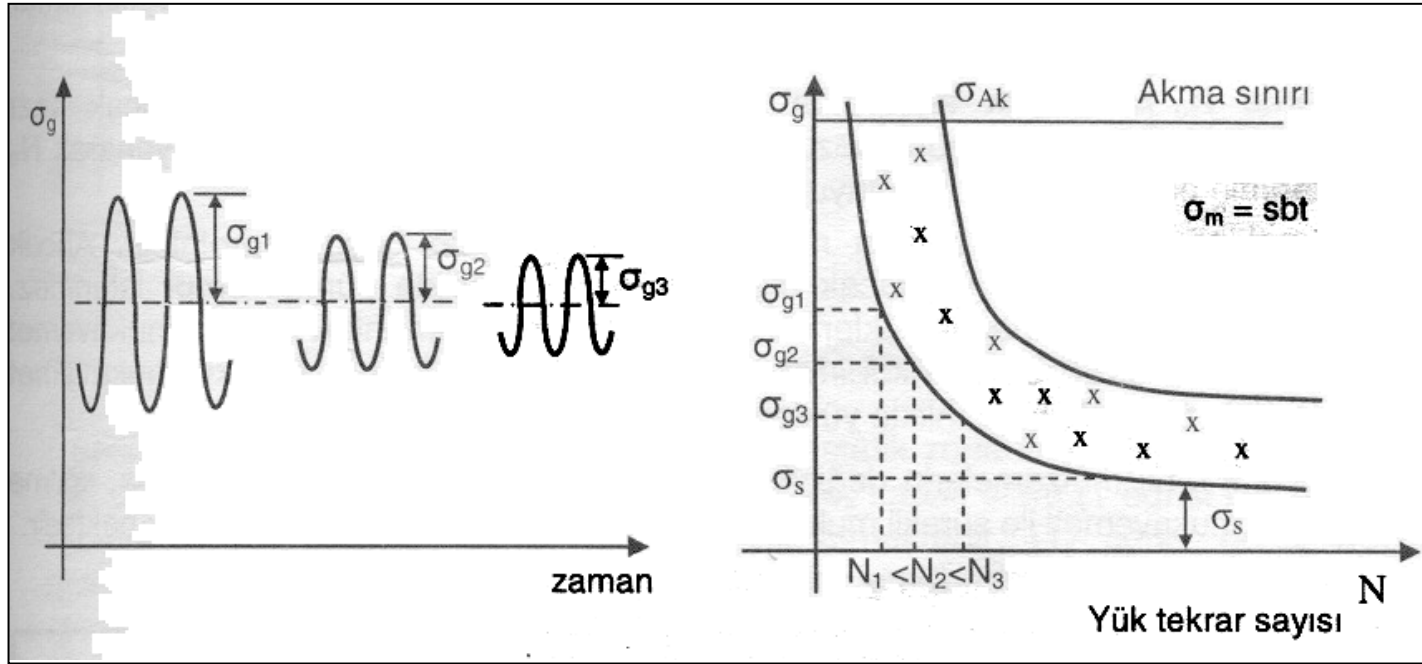
Döner Eğilmeli yorulma test cihazı

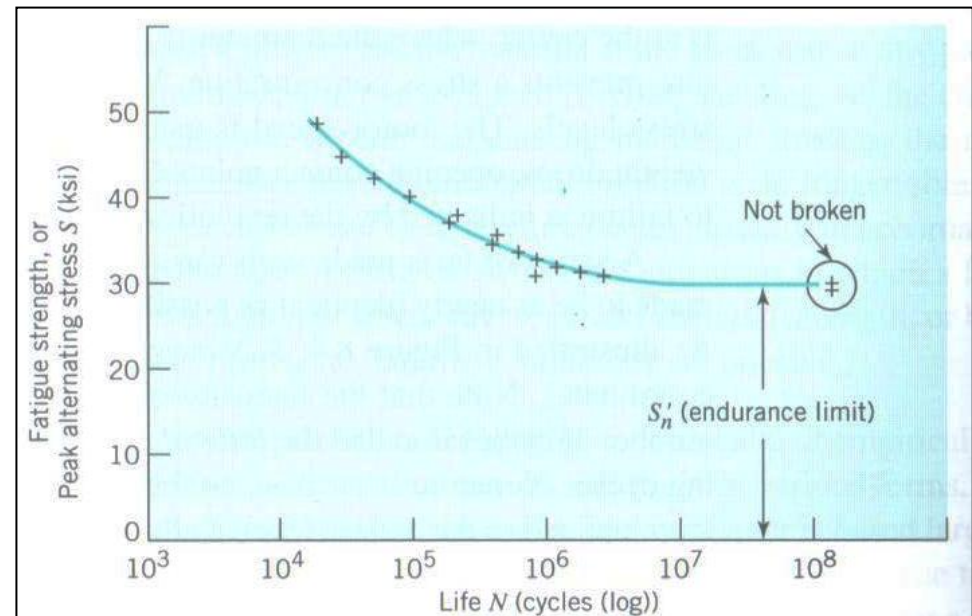
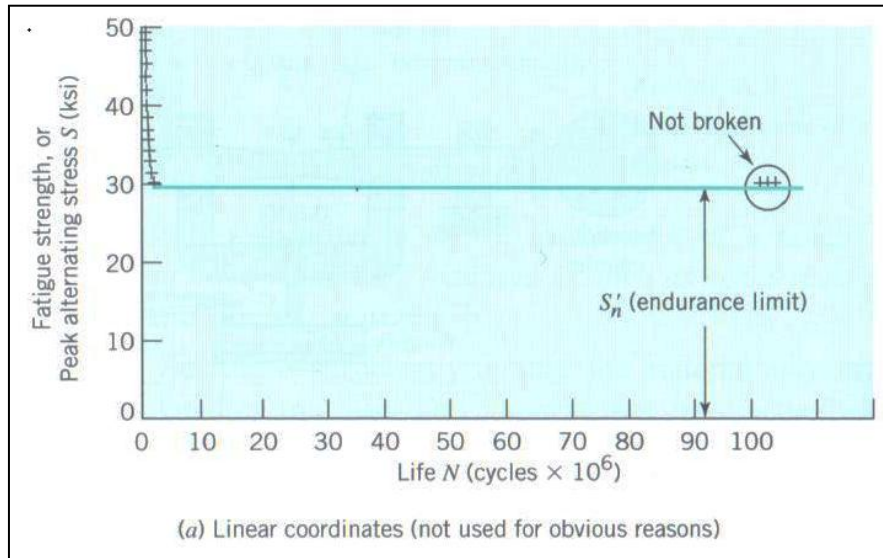


Yorulma numunesinin yüklenmesi

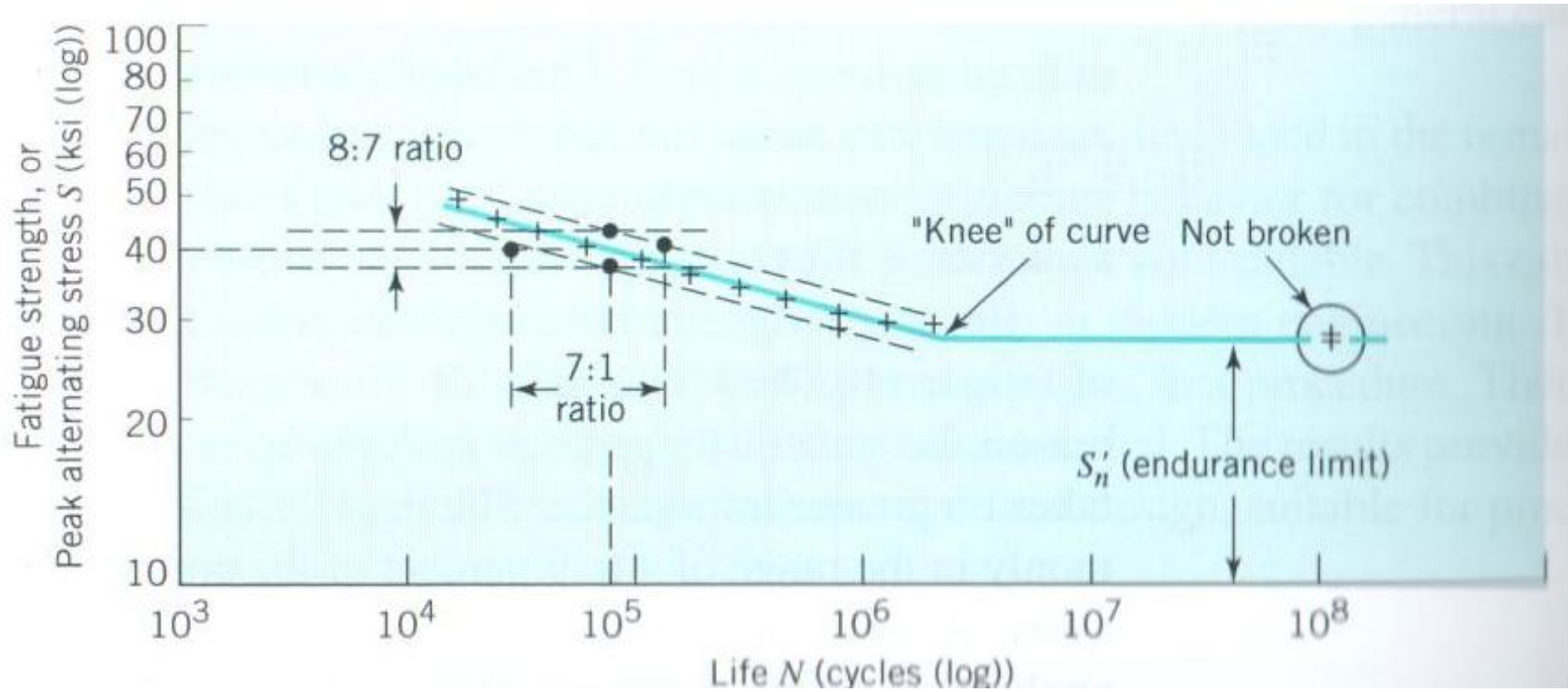


Yorulma Eğrisi (Wöhler Eğrisi)





Yorulma testi:Semi-log kullanım nedeni



Yorulma testi: sonuçlardaki değişkenlik

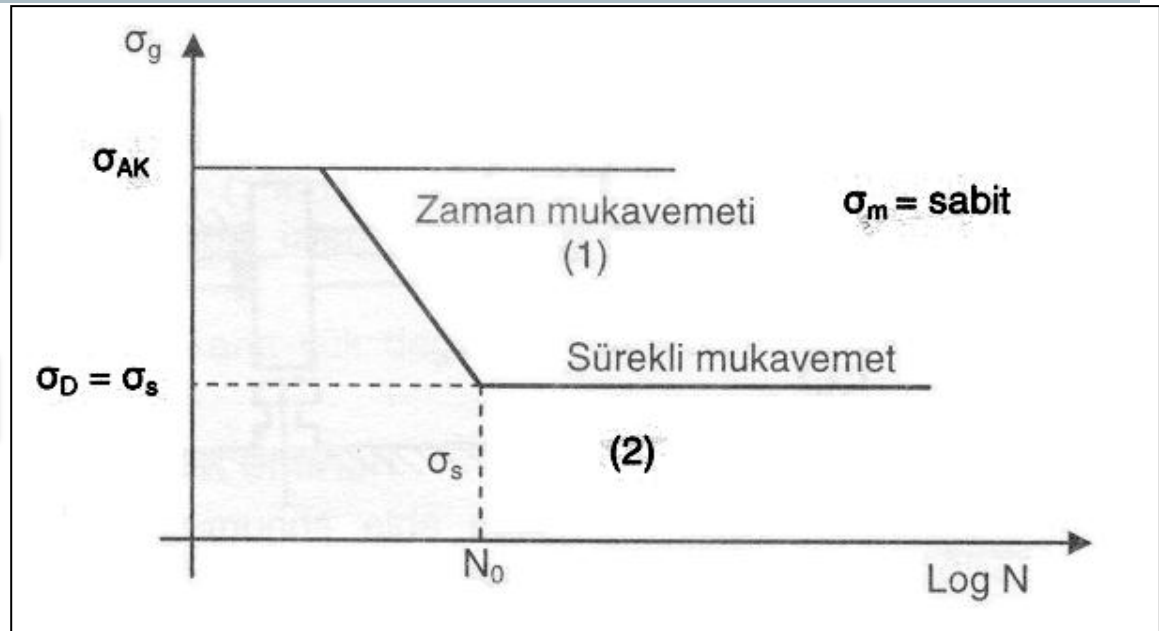
Yorulma eğrisi; sabit bir ortalama gerilme değeri için değişik gerilme genliğinde numunenin kopuncaya kadar yüklenmesi ve bir seri **Gerilme-Ömür** değerlerinin elde edilmesiyle çizilir.

YORULMA EĞRİSİNİN ÖZELLİKLERİ

- İki kısımdan oluşur ve eğik olarak inen kısma ait mukavemet değerlerine **zaman mukavemeti** denir.
- Eğrinin yatay kısmındaki değerler ise **sürekli mukavemet sınırı** olarak adlandırılır.

$\sigma_S = \sigma_D$:
Yorulma limit değeri

$N_o = \text{Sonsuz Ömür}$

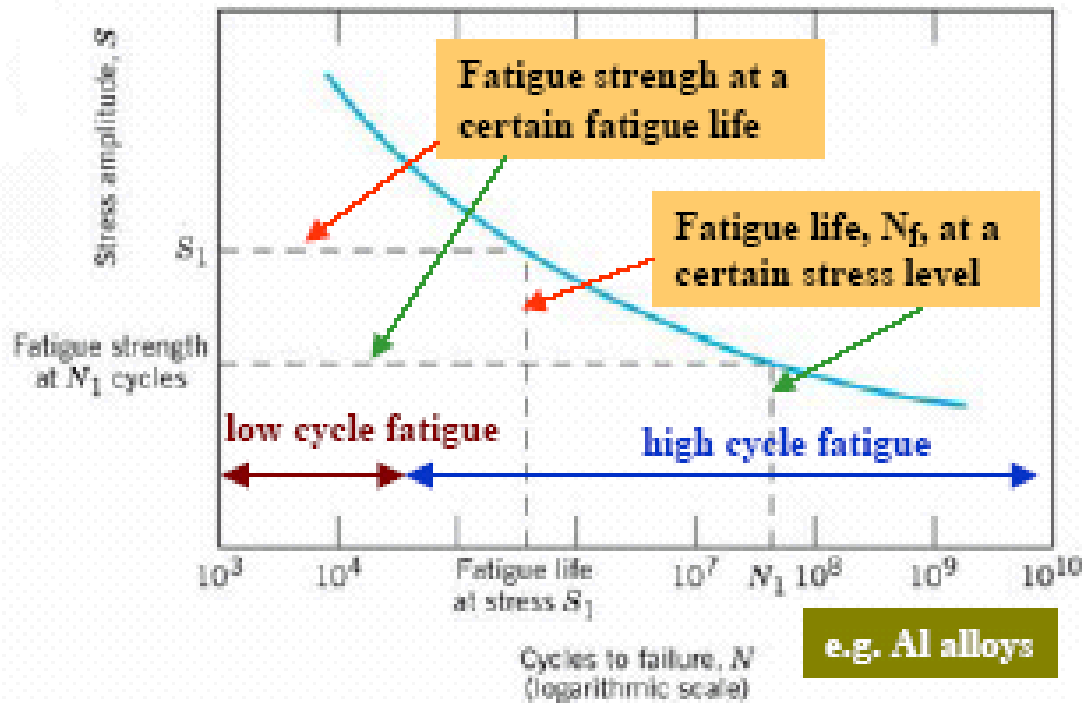


Yorulma Eğrisi (Wöhler Eğrisi)

Yorulma Dayanımı: belirli bir yorulma ömrüne (çevrimine) karşılık gelen gerilme değeri

Yorulma Ömrü: belirli bir gerilme seviyesine karşılık gelen çevrim sayısı

Düşük çevrim yorulması (Low Cycle Fatigue): Yorulma, genelde 10.000 çevrimden az bir çevrimde (yüksek gerilme altında) meydana gelir.



Az kullanılacak makine elemanları zaman mukavemet bölgesinde boyutlandırılır.

Neden??

Normal şartlar altında, dinamik olarak yüklenen makine elemanları **sürekli mukavemet bölgesi** esas alınarak boyutlandırılır.

SÜREKLİ MUKAVEMET SINIRLARI

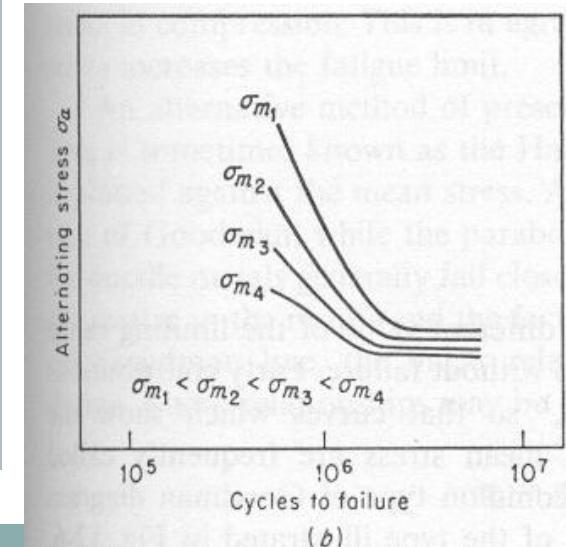
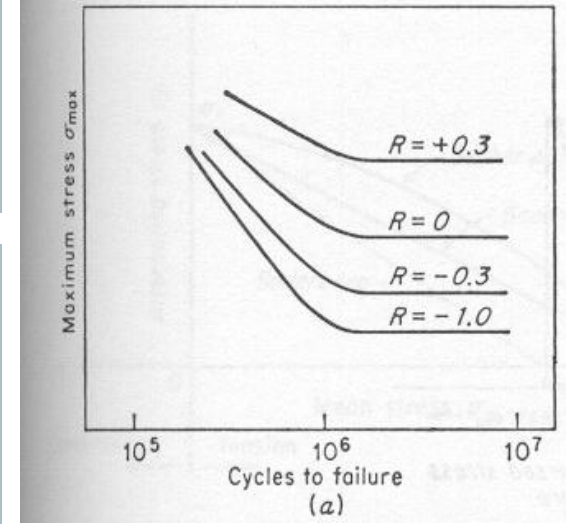
Malzeme	σ_{AK}	Eğilme σ_{eD} [daN/mm ²]		Çekme-Basma $\sigma_{\varphi D}$ [daN/mm ²]		Burulma τ_D
		$\sigma_K \leq 140$	$\sigma_K > 140$	$\sigma_K \leq 140$	$\sigma_K > 140$	
Çelik	$0.5 \sigma_K$ veya $0.577 \sigma_K$	$\sigma_{eD} \approx 0.5 \sigma_K$	$\sigma_{eD} = 70$	$\sigma_{\varphi D} \approx 0.4 \sigma_K$	$\sigma_{\varphi D} \approx 60$	$0.58 \sigma_D$ veya $0.29 \sigma_K$
Dökme demir ve Dökme çelik	-	$\sigma_{eD} \approx 0.40 \sigma_K$		-		$0.8 \sigma_D$ veya $0.32 \sigma_K$ (sadece dökme demir)
Alüminyum ve Magnezyum alaşımları	$0.5 \sigma_K$ veya $0.577 \sigma_K$	$\sigma_{eD} \approx 0.35 \sigma_K$		-		$0.5 \sigma_D$ veya $0.577 \sigma_D$

Yorulma eğrisi **ortalama gerilmenin sıfır** olduğu değişken gerilme genliğinde çizilmektedir yani $R=-1$ (tam değişken yükleme)

Herhangi bir ortalama gerilme için yorulma eğrisi elde etmek **yeniden** yorulma deneylerinin yapılması gerekir. Yada belirli yaklaşımlar kullanılır.

Ortalama gerilmenin yorulma limitine etkisi şekillerde gösterilmiştir.

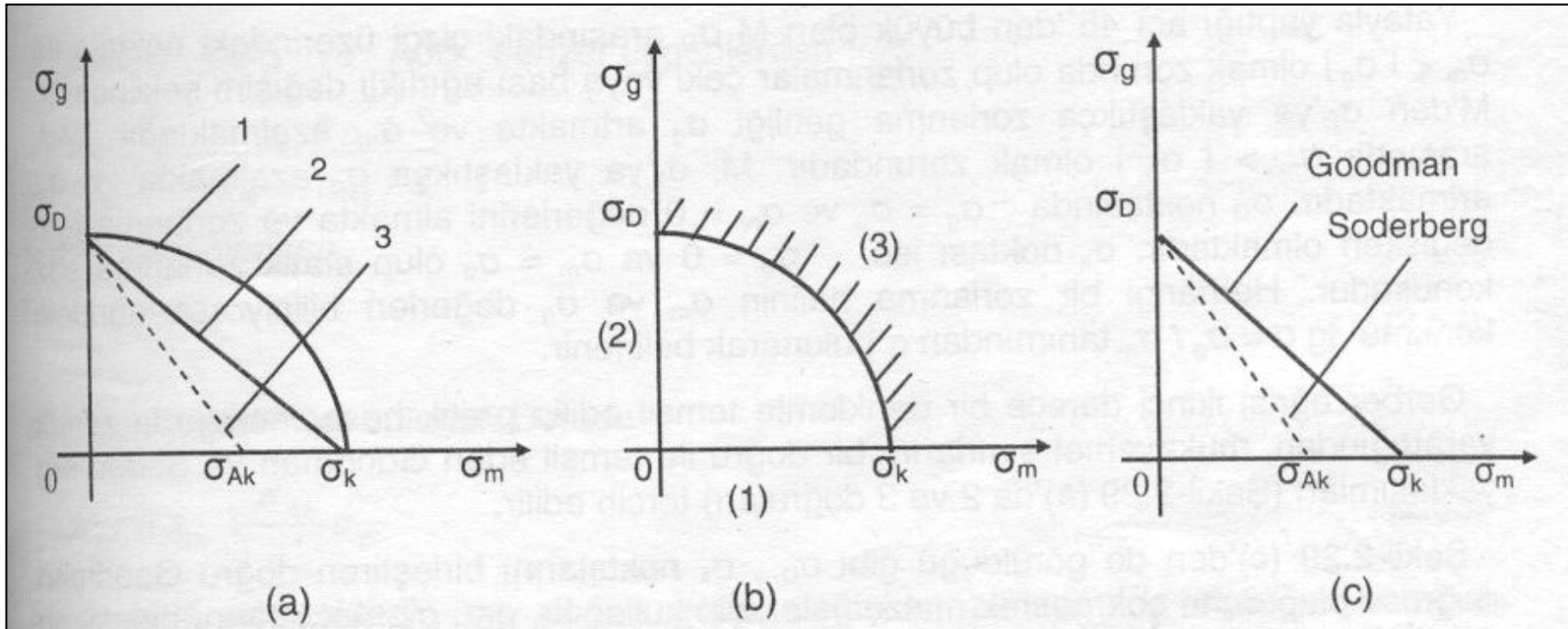
- Şekil a'da gösterildiği S-N eğrisi maksimum gerilme-çevrim sayısı olarak çizildiğinde, R değeri pozitif değere doğru gittikçe yani ortalama gerilme değeri arttıkça yorulma limit değeri de artmaktadır.
- Eğer S-N eğrisi, gerilme genliği-çevrim sayısı olarak çizilirse, ortalama gerilmenin değeri arttıkça müsaade edilen gerilme genliği değeri düşer.



Ortalama Gerilmenin Yorulmaya Etkisi

- Yorulma eğrisi **sabit bir ortalama gerilmede** değişken gerilme genliğinde çizilmektedir.
- Herhangi bir ortalama gerilme için ilgili malzemenin dinamik mukavemet değerlerini belirlemek için farklı ortalama değerde ve zorlanmada **yeniden** yorulma deneylerinin yapılması gerekir.
- Bu zorluk nedeniyle pratikte deneyler $\sigma_m = 0$ olan tam değişken yükleme durumu için yapılır.
- Pratik durumda makine elemanların çoğu genel değişken zorlamalar altında çalışır. Dolayısıyla bu durumda kullanılacak dinamik mukavemet sınırlarını belirlemek için:
 - Goodman-Sodeberg Yaklaşımı
 - Smith diyagramı

- Bu yaklaşımda yatay eksen, statik mukavemet sınırından elde edilen mukavemet değerleri ve ortalama gerilme değerleri belirlenir.
- Düşey eksen ise gerilme genliği ve tam değişken gerilmeden elde edilen mukavemet sınırı değeri belirlenir.



Goodman doğrusu $\Rightarrow$ **gevrek** malzemelerde

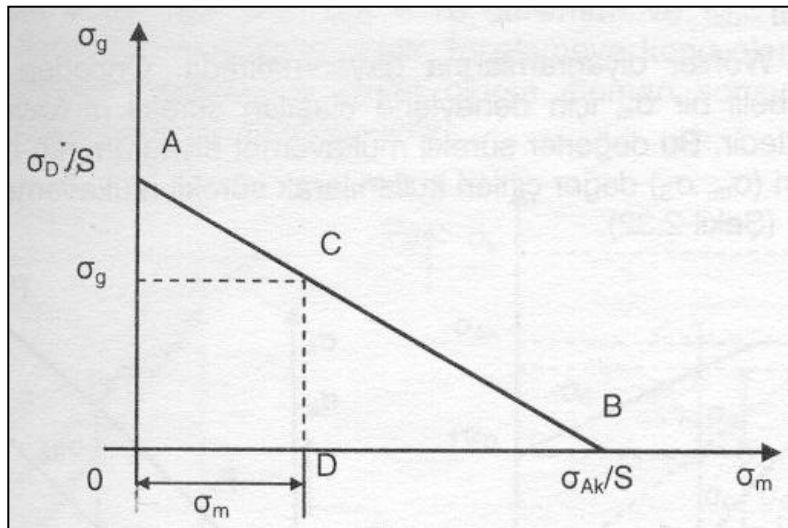
Soderberg doğrusu $\Rightarrow$ **sünek** malzemelerde

SODERBERG DOĞRUSU İLE SÜREKLİ MUKAVEMET SINIRININ BELİRLENMESİ

SINIR GENLİK GERİLMESİ

(genel değişken zorlanmada eşdeğer nominal gerilme):

$$\sigma_{gd} = \sigma_m + \frac{\sigma_{Ak}}{\sigma_D^*} \sigma_g$$



Burulmaya maruz elemanlarda sınır genlik gerilme

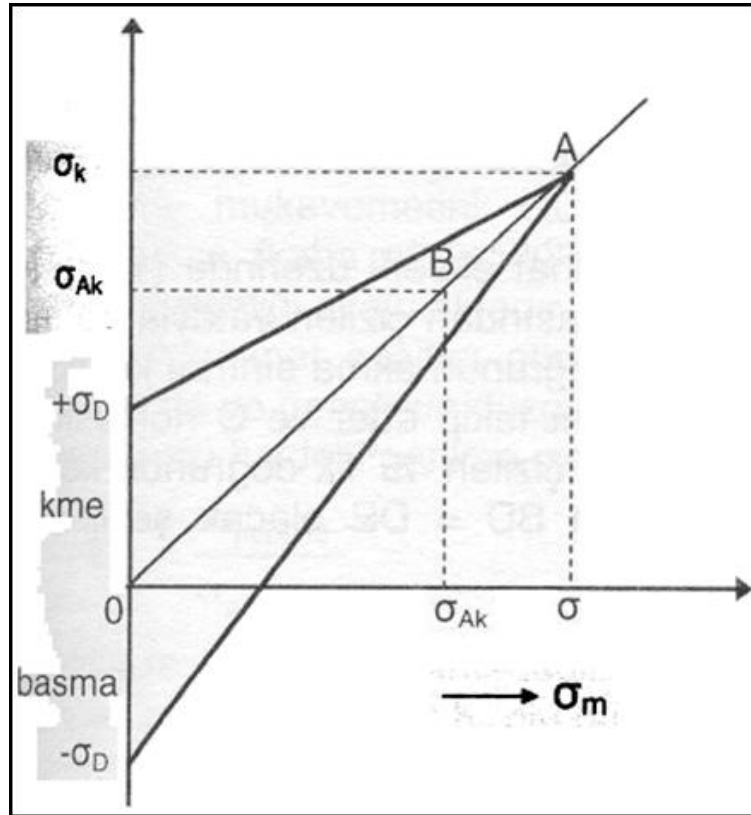
Yorulmaya karşı emniyetli bir tasarım için

$$\sigma_{gd} \leq \sigma_{em}$$

$$\tau_m + \frac{\tau_{Ak}}{\tau_D^*} \tau_g \leq \frac{\tau_{Ak}}{S}$$

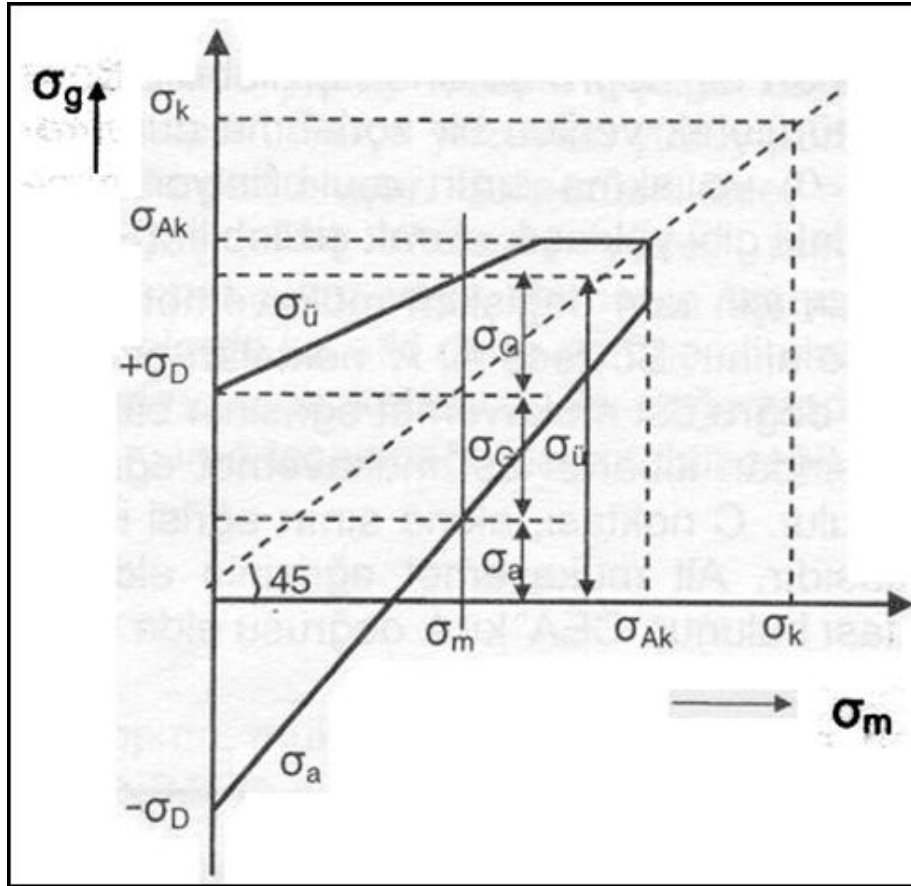
Smith Diyagramı aşağıdaki adımlar gerçekleştirilerek çizilir:

- Yatay eksene ortalama gerilmeler, düşey eksene ise sürekli mukavemet sınırı, akma ve çekme mukavemet değerleri işaretlenir.
- Sürekli mukavemet sınırları statik mukavemet sınırında (A noktasında) birleştirilir
- Sünek malzemeler için mukavemet sınırı akma gerilmesi olduğundan aşağıdaki şekilde verildiği gibi sınırlar belirlenir (B noktası)



SMITH DİYAGRAMI (Sürekli Mukavemet Diyagramları)

- Elde edilen bu diyagram vasıtasıyla, belirlenen herhangi bir ortalama gerilme için, gerilme genliği, maksimum ve minimum gerilme değerleri diyagramdan okunabilir.
- Eğer nominal gerilmeler diyagram içinde kalırsa numune sonsuz ömürlü, diyagram dışında ise sonlu ömürlüdür.



SMITH DİYAGRAMI (Sürekli Mukavemet Diyagramları)

- Mukavemet sınır değerleri standart deney numunelerden elde edilir.
- Gerçek makine elemanların boyutları, geometrik ve yüzey özellikleri farklıdır.
- Bu farklılıklar, tasarımdaki mukavemet azaltıcı faktörler dikkate alınarak, sürekli mukavemet sınır değerleri **düzeltilir**.



PARÇA BÜYÜKLÜĞÜ ETKİSİ

Gerçek makine elemanlarının boyutları deney numunesinden farklıdır.

Boyut ↑ mukavemet ↓

10 mm çaptan daha büyük makine elemanların tasarımında çap düzeltme katsayısı K_b kullanılır

Çap d (mm)	10	15	20	30	40	60	120
K_b	1.00	0.98	0.95	0.90	0.85	0.80	0.75

Mukavemet azaltıcı faktörler

YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜ ETKİSİ

Yüzey pürüzlülüğü yorulma mukavemetine olumsuz etkiler



Elemanın taşıyabileceği gerilme genliği düşer

Bu etki yüzey pürüzlülük katsayısı ile hesaplamalara katılır

$\sigma_k(N/mm^2)$ Yüzey durumu	300	400	500	600	700	800	1000
Çok ince parlatılmış	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Parlatılmış	1.0	0.99	0.985	0.98	0.975	0.972	0.97
Taşlanmış	0.97	0.96	0.95	0.94	0.935	0.937	0.93
İnce talaş alınmış	0.93	0.92	0.91	0.90	0.89	0.885	0.88
Kaba talaş alınmış	0.91	0.90	0.88	0.86	0.84	0.82	0.78
Tufallı	0.80	0.76	0.67	0.61	0.56	0.51	0.43

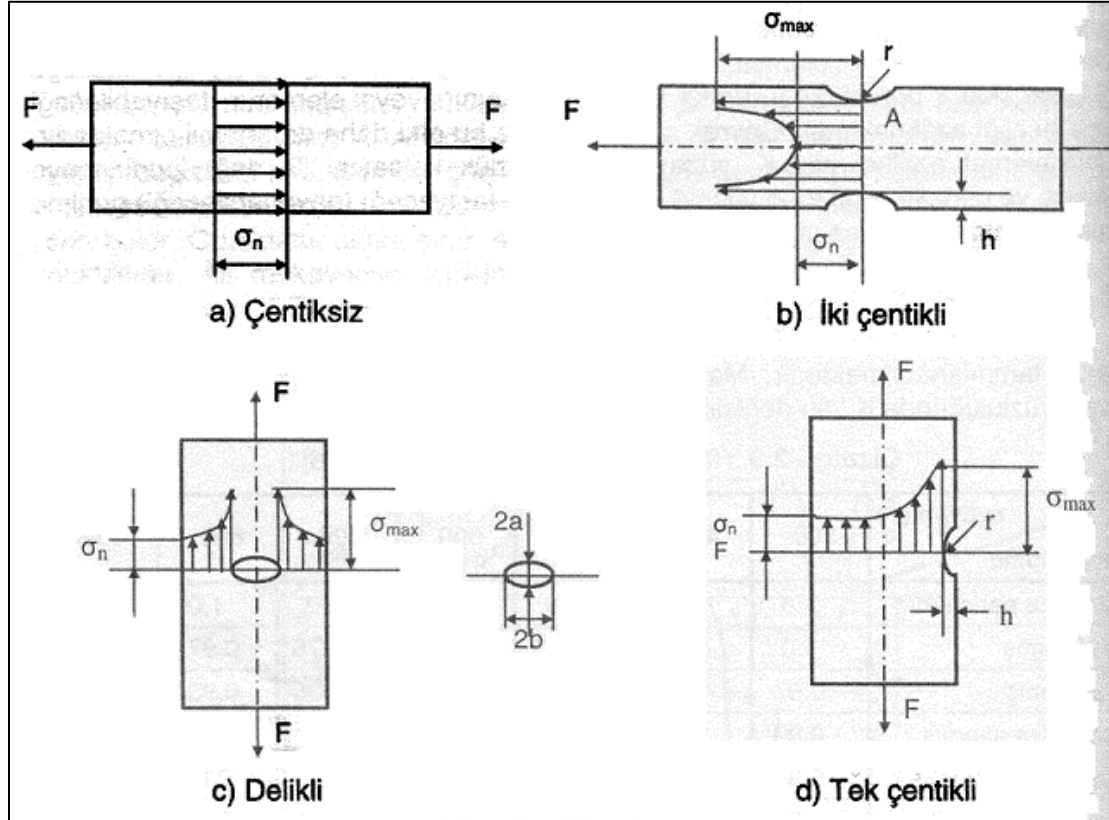
Mukavemet azaltıcı faktörler

ÇENTİK ETKİSİ

Makine elemanlarında kimi tasarım zorunluluğu nedeniyle geometrik düzgünsüzlük veya süreksizlikler bulunur



Kuvvet akışında bozukluklar ve gerilme yığılmalarına neden olur



Mukavemet azaltıcı faktörler

ÇENTİK ETKİSİ

- Çentik bölgesinde gerilme maksimum değerine ulaşılır.
- Çentik nedeniyle oluşan maksimum gerilme

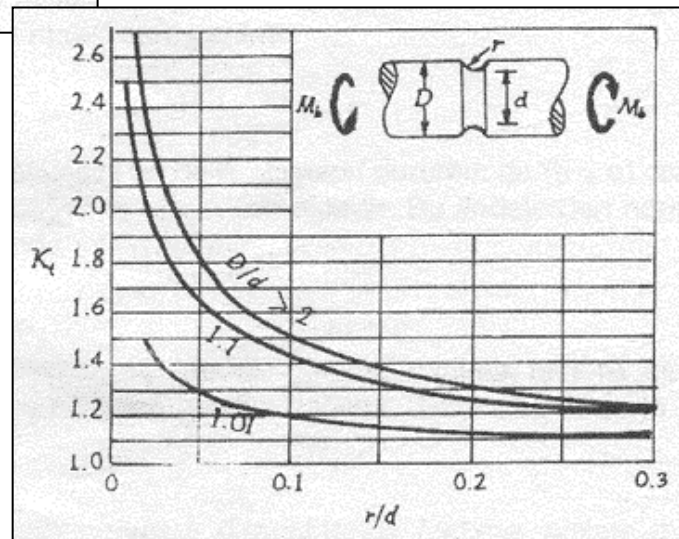
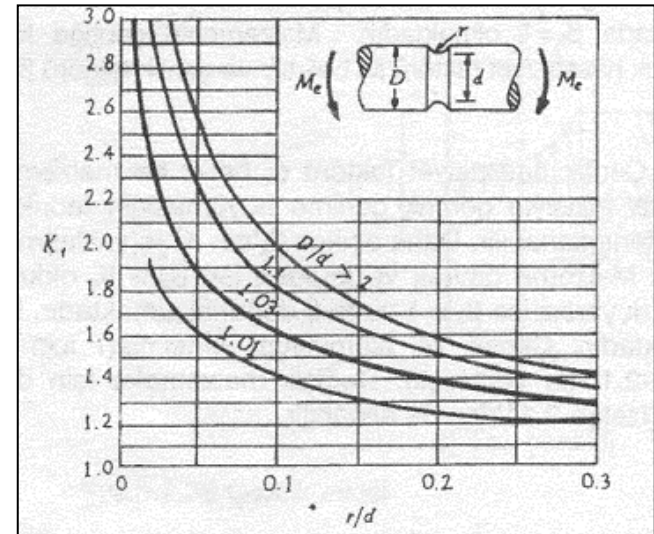
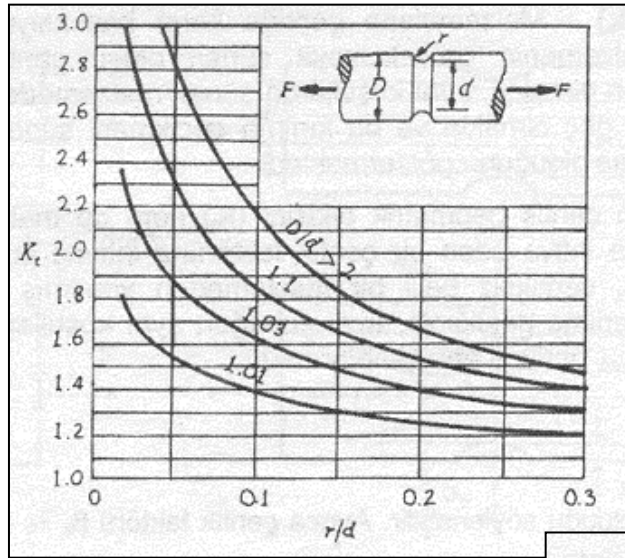
$$\sigma_{max} = K_t \sigma_n$$

K_t : teorik gerilme yığılma faktörü

σ_n : Nominal (hesaplanan) gerilme

- Teorik gerilme yığılma faktörü, belirli bir zorlanma şekline göre çentik geometrisine bağlıdır.
- Teorik gerilme yığılma faktörünün değeri tablolardan belirlenir

ÇEŞİTLİ ZORLANMALAR İÇİN SİLİNDİRİK ELEMANIN TEORİK GERİLME YİĞİLME FAKTÖRÜ



Mukavemet azaltıcı faktörler

ÇENTİK FAKTÖRÜ: K_{ζ}

Sünek malzeme $\Rightarrow$ çentik hassasiyeti az

gevrek malzeme $\Rightarrow$ çentik hassasiyeti fazla

Çentik faktörü; hem çentik geometrik etkisini (K_t) ve hem de malzemenin çentik hassasiyetini içeren bir faktördür.

$$K_{\zeta} = 1 + q(K_t - 1)$$

q : Çentik hassasiyet katsayısı

r (mm)		0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0
Çelikler σ_k (daN/mm ²)	140	0.88	0.91	0.92	0.94	0.95	0.955	0.96	0.96
	105	0.80	0.85	0.88	0.90	0.91	0.915	0.92	0.92
	70	0.67	0.76	0.79	0.81	0.83	0.84	0.85	0.86
	42	0.56	0.64	0.68	0.72	0.74	0.76	0.77	0.78
Alüminyum Alaşımları		0.40	0.55	0.64	0.70	0.75	0.77	0.80	0.83

Mukavemet azaltıcı faktörler

Yüzey pürüzlülüğü, boyut etkisi, çentik etkisi dikkate alındığında

Statik zorlanma

Sünek malzeme

$$\sigma^* = K_b \sigma_{ak}$$

$$\tau^* = K_b \tau_{ak}$$

Gevrek malzeme

$$\sigma^* = \frac{K_b \sigma_{ak}}{K_\zeta}$$

$$\tau^* = \frac{K_b \tau_{ak}}{K_\zeta}$$

Dinamik zorlanma

Çekme-basma

$$\sigma_{\zeta D}^* = \frac{K_y K_b}{K_\zeta} \sigma_{\zeta D}$$

Eğilme

$$\sigma_{ED}^* = \frac{K_y K_b}{K_\zeta} \sigma_{ED}$$

Burulma ve kesme

$$\tau_D^* = \frac{K_y K_b}{K_\zeta} \tau_D$$

Tasarım Aşamasında Kullanılacak Kriterler

Elemanın tecrübe edeceği çevrim sayısına göre, eğer malzemeye ait S-N eğrisi yoksa, statik mukavemet değerleri kullanılarak aşağıdaki yorulma limit değerleri mukavemet sınırları olarak kullanılır.

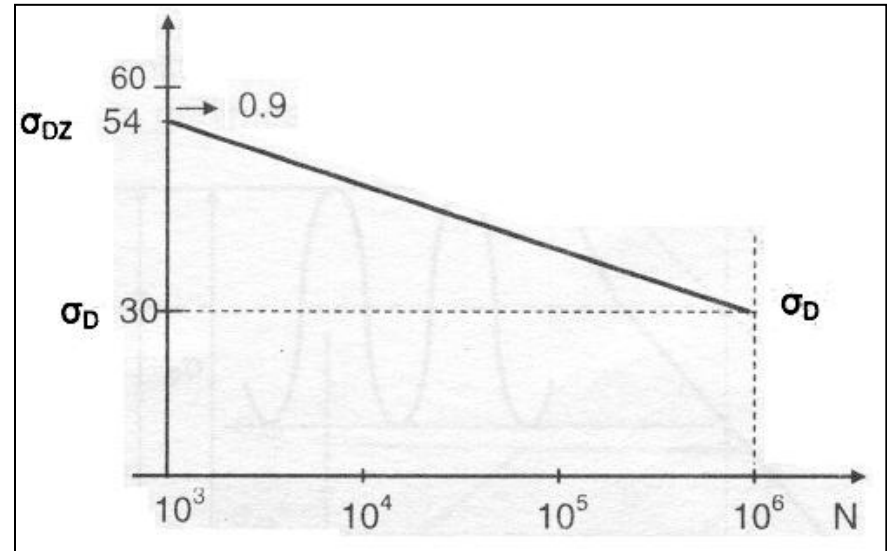
$$N=1 \longrightarrow \sigma_D \approx \sigma_k + 200 \text{ ksi}$$

$$N=1000 \longrightarrow \sigma_D \approx 0.9\sigma_k$$

$$N=1e6 \longrightarrow \sigma_D \approx 0.5\sigma_k$$

Genel kural olarak;

- $N \leq 10^3$ ise statik mukavemet sınırı
- $10^3 < N < 10^6$ ise zaman mukavemet sınırı
- $N \geq 10^6$ ise sürekli mukavemet sınırı



Farklı yükleme modlarında yorulma hesabı

Hem burulma momentinin hem de eğilme momentinin birlikte etki ettiği ve bu yüklemelerin değişken olduğu durumlarda yorulma analizi aşağıda verilen akma hipotezi ifadesi yardımıyla hesaplanır.

Von-Mises ortalama gerilme:

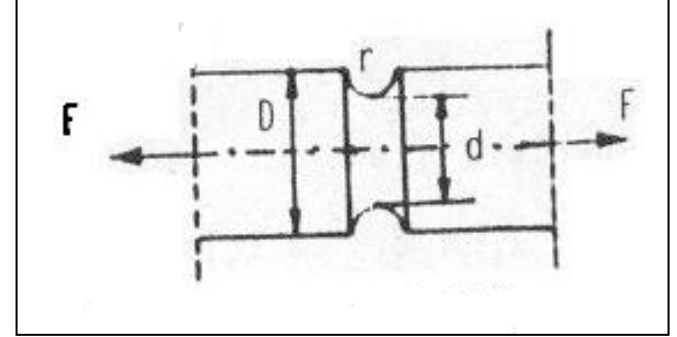

$$\sigma'_m = \sqrt{\sigma_m^2 + 3\tau_m^2}$$

Von-Mises gerilme gerilme:


$$\sigma'_g = \sqrt{\sigma_g^2 + 3\tau_g^2}$$

Şekilde verilen eleman

1. $F=10500 \text{ daN}$
2. $F=2500..7500 \text{ daN}$
3. $F=-1500...+12000 \text{ daN}$
4. $F=\pm 6500 \text{ daN}$



Kuvvetlerle çekmeye zorlanmaktadır. Elemanın boyutları $D=40 \text{ mm}$, $d=35 \text{ mm}$, $r=7 \text{ mm}$, elemanın malzemesi C45, kopma mukavemeti 63 daN/mm^2 , akma sınırı 42 daN/mm^2 çentik hassasiyet faktörü 0.7 , yüzey pürüzlülük faktörü 0.85 , boyut faktörü 0.86 olarak verilmektedir. Sodeberg diyagramında

- a) Deney çubuğunu mukavemet sınır doğrusu, elemanın mukavemet sınırı doğrusunu, $S=2$ için sodeberg emniyet doğrusunu çizin
- b) Yukarıda verilen yükleme durumlarını Sodeberg diyagramında gösteriniz ve emniyet açısından değerlendiriniz

Şekilde bir halat çarkın yardımıyla dönen bir mil gösterilmiştir. $S=2$ için milin mukavemet açısından kontrolü istenmektedir. Çarkın çevresine uygulanan kuvvet $F=50$ daN, çarkın çapı $D=250$ mm, mil çapı $d=25$ mm, kullanılan malzeme St42, akma sınırı 25 daN/mm², $l=50$ mm, milin çentik faktörü 1.25 boyut faktörü 0.93 yüzey pürüzlülük faktörü 0.9 olarak verilmektedir.

