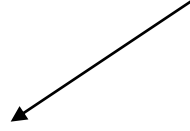


Makina Elemanlarının Mukavemet Hesabı

DEÜ Mühendislik Fakültesi
Makina Mühendisliği Bölümü

Makina elemanlarında

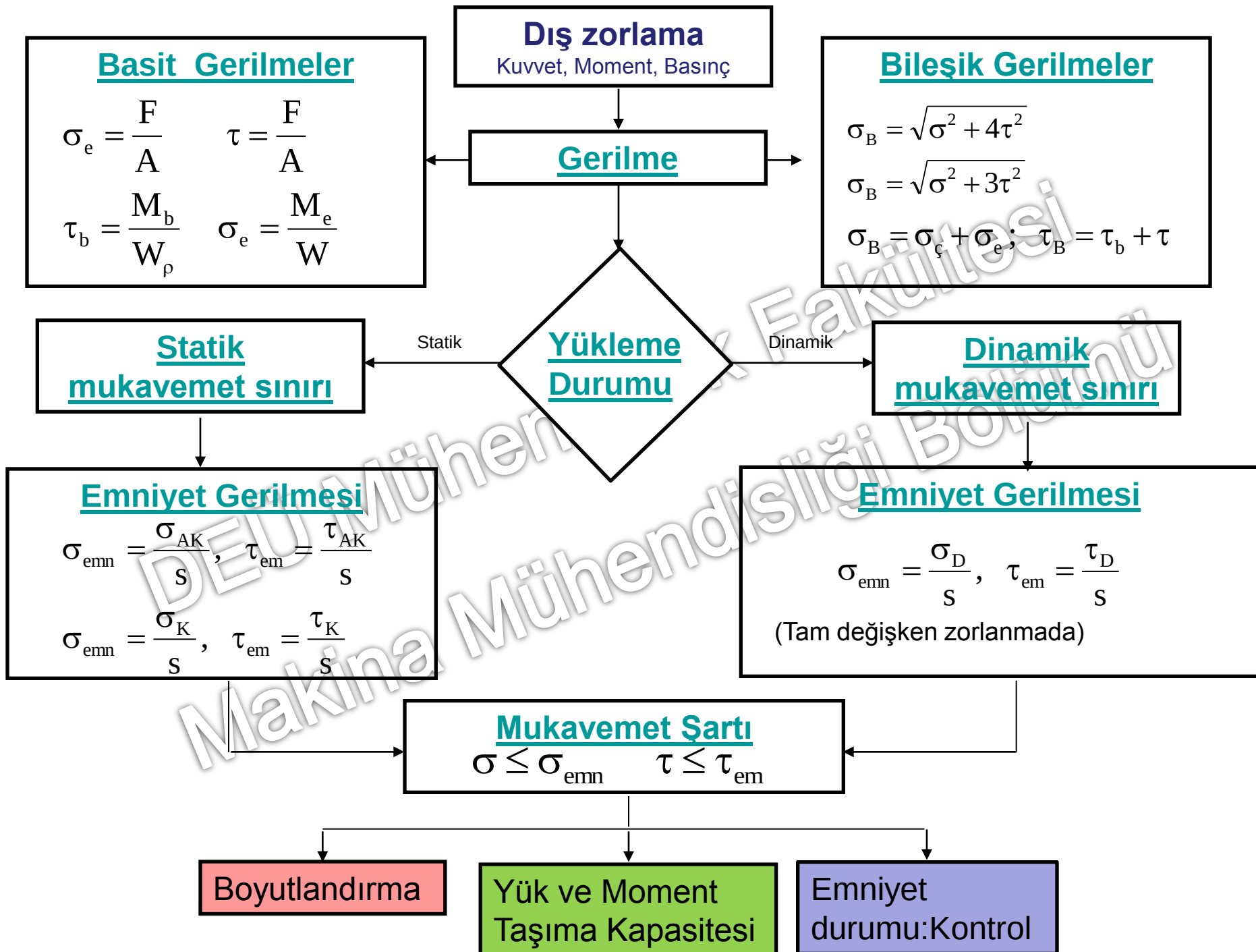
MUKAVEMET HESABININ iki amacı vardır



1- Bir elemanın üzerindeki kuvveti veya momenti;
istenen süre boyunca emniyetli bir şekilde taşıyabilmesi için **HANGİ MALZEMEDEN** ve **HANGİ BOYUTLARDA** imal edilmesi gerektiğinin belirlenmesidir.



2- İmal edilmiş bir elemanın hangi kuvvet veya momenti;
emniyet sınırların aşmadan **NE KADAR SÜRE** taşıyabileceğinin belirlenmesidir.



Özel Mukavemet Konuları

Yüzey Gerilmeleri

Burkulma

Sürünme

DEÜ Mühendislik Fakültesi
Makina Mühendisliği Bölümü

Yüzey Gerilmeleri

Temasta bulunan iki yüzey arasında meydana gelen gerilmelere “**yüzey gerilmeleri**” denir.

Bu gerilmeler basınç şeklindedir.

Basma gerilmeleri ile arasındaki fark;

Basma gerilmeleri bir kuvvet etkisi altında bir elemanın kesitinde meydana gelir.

Yüzey gerilmeleri ise kuvvet etkisi altında temas yüzeylerinde meydana gelir.

Yüzey gerilmeleri

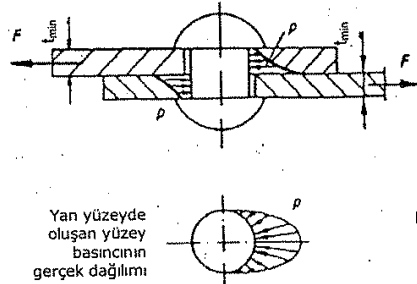
Yüzey basıncı

Hertz basıncı

Temas yüzeylerinin ve elemanların boyutları aynı mertebede olduğu takdirde oluşan gerilme “yüzey basıncı” diye isimlendirilir.

1- temas yüzeyleri arasında bağıl hareket bulunmayan elemanlarda **ezilmeyi** önlemek

$$p = \frac{F}{A} \leq p_{em}, \quad p_{em} = \frac{\sigma_{Ak}}{S}$$

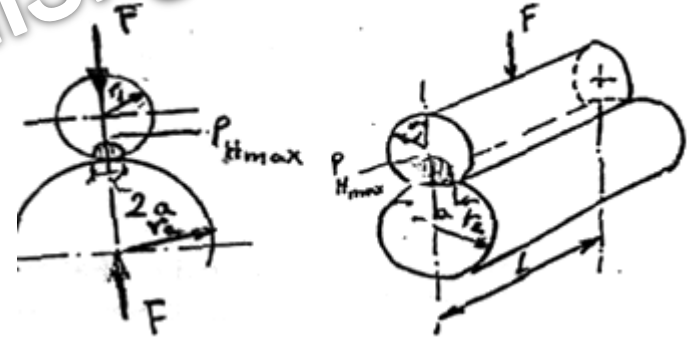


2- temas yüzeyleri arasında izafi hareket olan elemanlarda **aşınmayı** önlemek için yapılır.

$$p = \frac{F}{A} \leq \frac{p_0}{s}$$

p_0 : malzeme aşınma hızına bağlı yüzey basınç sınırı

Temas yüzeyleri çok küçük olduğu takdirde ise oluşan gerilmeler “Hertz basıncı” diye isimlendirilir. Rulmanlı yataklar, dişli çarklar da meydana gelen gerilmeler



$$P_{Hmax} \leq P_{Hem}; \quad P_{Hem} = \frac{HB}{S}$$

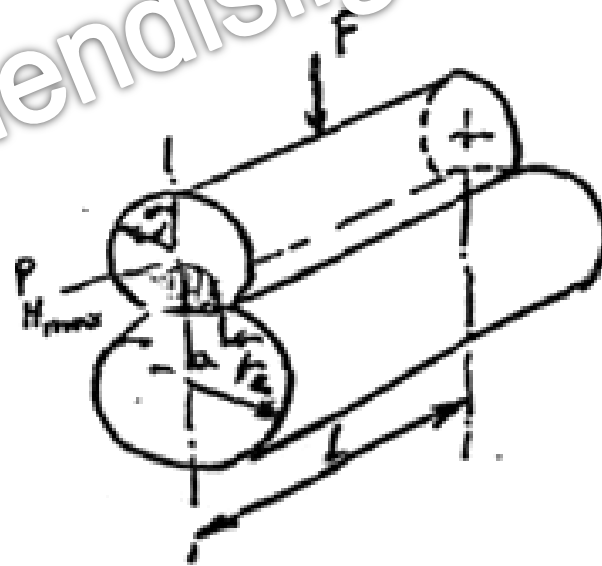
- Hertz Gerilmeleri:
- Hertz gerilmelerine karşı emniyeti sağlamak için:

$$P_{H \max} \leq \frac{HB}{S}$$

$$P_{H \text{em}} = \frac{HB}{S}$$

$$P_{H \max} \leq P_{H \text{em}}$$

Bazen $P_{H \text{em}}$ değeri cetvellerde verilir.



$$\frac{2}{E} = \frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2}$$

E: Eş değer elastisite modülü

E_1 E_2 : Malzemenin elastisite modülü

$$\nu = \frac{1}{m} = \frac{1}{\varepsilon_{boy} / \varepsilon_{kesit}}$$

Enine şekil değiştirme katsayısı

İki kürenin teması:

Temas yüzeyinin yarı çapı:

$$a = \sqrt[3]{1,5 \cdot (1 - \nu^2) \cdot \frac{F \cdot r}{E}}$$

Çelik için ($\nu = 0,3$)

$$a = 1,13 \sqrt[3]{\frac{F \cdot r}{E}}$$

$$\frac{1}{r} = \frac{1}{r_1} \mp \frac{1}{r_2} \quad \text{Eş değer yarıçap}$$

$$\text{Yassılařma: } \delta = \sqrt[3]{2,25 \cdot (1 - \nu^2) \cdot \frac{F^2}{E^2 \cdot r}}$$

$$\text{Çelik için : } \delta = 1,23 \sqrt[3]{\frac{F^2}{E^2 \cdot r}}$$

$$P_{H \max} = -\frac{1}{\pi} \sqrt[3]{\frac{1,5 F \cdot E^2}{r^2 (1 - \nu^2)^2}} = -0,388 \sqrt[3]{\frac{F \cdot E^2}{r^2}}$$

Küre ile düzlem teması:

$$r_1 = r_1 \text{ ve } r_2 = \infty \quad r = r_1 \text{ alınır.}$$

İki silindirin teması

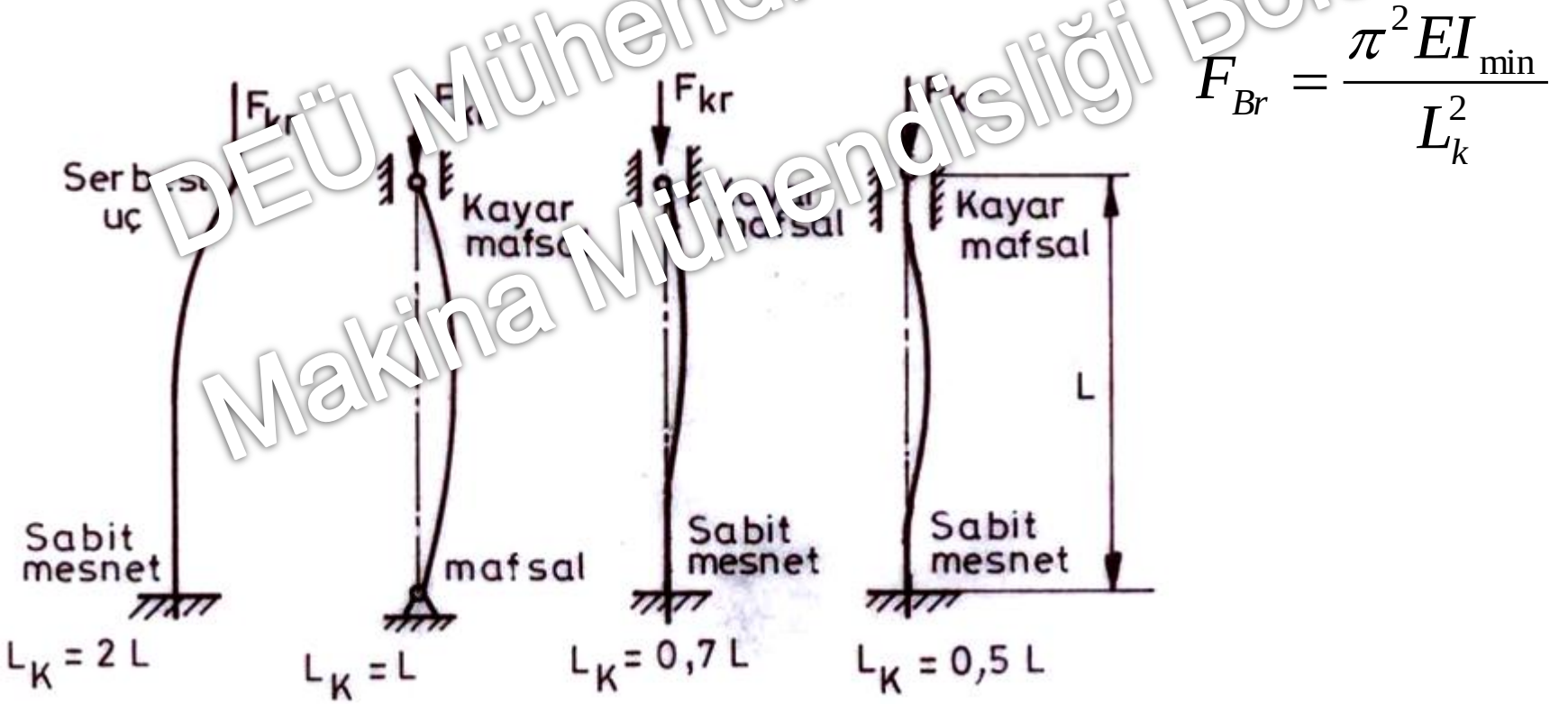
$$\text{Temas yüzeyinin genişliđi: } 2a = 2 \sqrt[3]{\frac{F \cdot r \cdot 8(1 - \nu^2)}{\pi \cdot E \cdot L}} \quad \text{Çelik için : } 2a = 3,04 \sqrt[3]{\frac{F \cdot r}{E \cdot L}}$$

$$P_{H \max} = -\sqrt[3]{\frac{F \cdot E}{2\pi r L (1 - \nu^2)^2}}$$

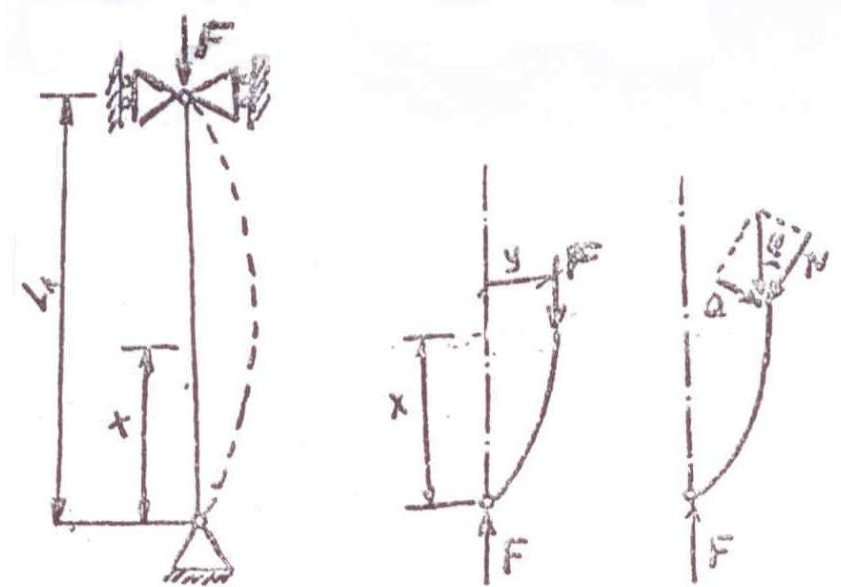
$$\text{Çelik için : } P_{H \max} = -0,418 \sqrt[3]{\frac{F \cdot E}{r L}}$$

Burkulma

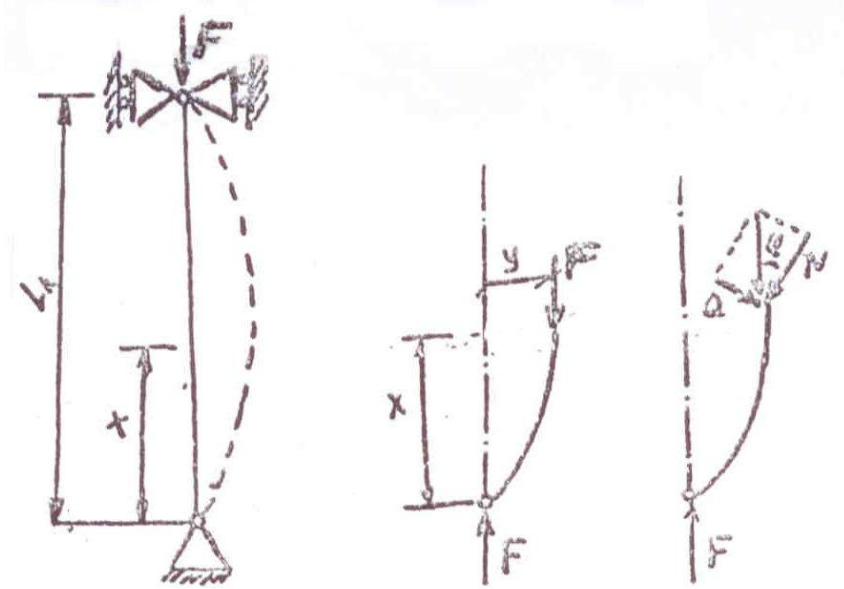
Kendi eksenini doğrultusunda aksenal bir basma kuvvetinin etkisi altında kalan bir çubuk; eğer kesit boyutları uzunluğuna oranla küçük ise kararsız durumdadır. Bu durumda kuvvetin veya mesnetleme sisteminin yer değiştirmesi çubuğun ani olarak burkulmasına yol açar.



- Boyu uzun kesiti değişmeyen bir çubuğun bir ucu sabit mafsallı diğer ucu kuvvet doğrultusunda hareketli kayıcı mafsallı olarak eksenel kuvvetle basmaya zorlandığını düşünelim.



- F basma kuvveti altında bu çubuğun herhangi bir sebeple şekildeki gibi burkulduğunu ve bu durumda dengede durduğunu kabul edelim.



- $N = F \cdot \cos \varphi$ $Q = F \cdot \sin \varphi$
- Şekil değiştirme malzemenin elastik sınırları altında kaldığı takdirde elastik eğrinin eğimi çok küçük olacağı için; $\cos \varphi = 1$; $\sin \varphi = 0$ alınabilir. $Q = 0$, $N = F$ olur.

- Elastik eğrinin diferansiyel denklemi:

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = -\frac{M}{E.I} \quad ; \quad M = F.y$$

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = -\frac{1}{E.I} F.y$$

$$\frac{d^2 y}{dx^2} + \alpha^2 . y = 0$$

DEÜ Mühendislik Fakültesi
Makina Mühendisliği Bölümü

$$y = A.\sin \alpha.x + B.\cos \alpha.x$$

$$x=0 \quad y=0 \quad B=0$$

$$x= L_k \quad y=0 \quad A.\sin \alpha.L_k=0$$

$$\sin \alpha.L_k=0 \quad \sin \alpha.L_k=\sin n.\pi$$

$$\alpha.L_k=n.\pi \quad \alpha= n \pi / L_k$$

En küçük yük değeri $n=1$ için elde edilir.

$$\alpha = \frac{\pi}{L_k} \quad \frac{\pi^2}{L_k^2} = \frac{F_{Br}}{E.I} \quad F_{Br} = \frac{\pi^2 EI}{L_k^2} \quad \text{Euler burkulma yükü "kritik yük"}$$

Elastik alanda flambaj (burkulma) olabilmesi için $F_{Br} \leq \sigma_E A$ olması gerekir.

$\sigma_{Br}=F_{Br}/A > \sigma_E$ olduğunda Euler formülü kullanılmaz.

Euler formülünün kullanılabilmesi için:

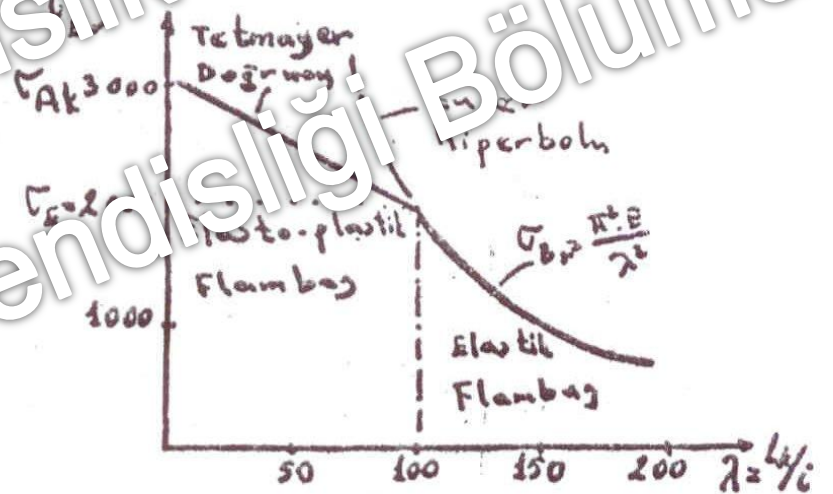
$\sigma_{Br} \leq \sigma_E$ olmalıdır.

$$F_{Br} = \frac{\pi^2 EI_{\min}}{L_k^2} \quad \sigma_{Br} = \frac{\pi^2 E \frac{I_{\min}}{A}}{L_k^2} \quad i^2 = \frac{I_{\min}}{A} \quad i: \text{atalet yarıçapı}$$

$$\sigma_{Br} = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{L_k}{i}\right)^2} \quad \frac{L_k}{i} = \lambda \quad \text{Narinlik katsayısı}$$

$$\sigma_{Br} = \frac{\pi^2 E}{\lambda^2} \leq \sigma_E \Rightarrow \lambda = \pi \sqrt{\frac{E}{\sigma_E}}$$

- [illegible]



	Tetmayer Sınırları	Euler Sınırları	Tetmayer bağıntısı
Ahşap	$1,8 < \lambda < 100$	$\lambda \geq 100$	$\sigma_{Br} = 293 - 1,94 \lambda$
D. Demir	$5 < \lambda < 80$	$\lambda \geq 80$	$\sigma_{Br} = 7760 - 120 \lambda + 0,53 \lambda^2$
Yumuşak Çelik	$10 < \lambda < 105$	$\lambda \geq 105$	$\sigma_{Br} = 3100 - 1,14 \lambda$
%5 Nikelli çelik	$10 < \lambda < 86$	$\lambda \geq 86$	$\sigma_{Br} = 4700 - 23 \lambda$

$$\sigma_{Br} = \sigma_{Ak} - \underbrace{\left(\frac{\sigma_{Ak}}{2\pi} \right)^2 \cdot \frac{1}{E} \cdot \lambda^2}_{K_0} \longrightarrow \sigma_{Br} = \sigma_{Ak} - K_0 \cdot \lambda^2$$

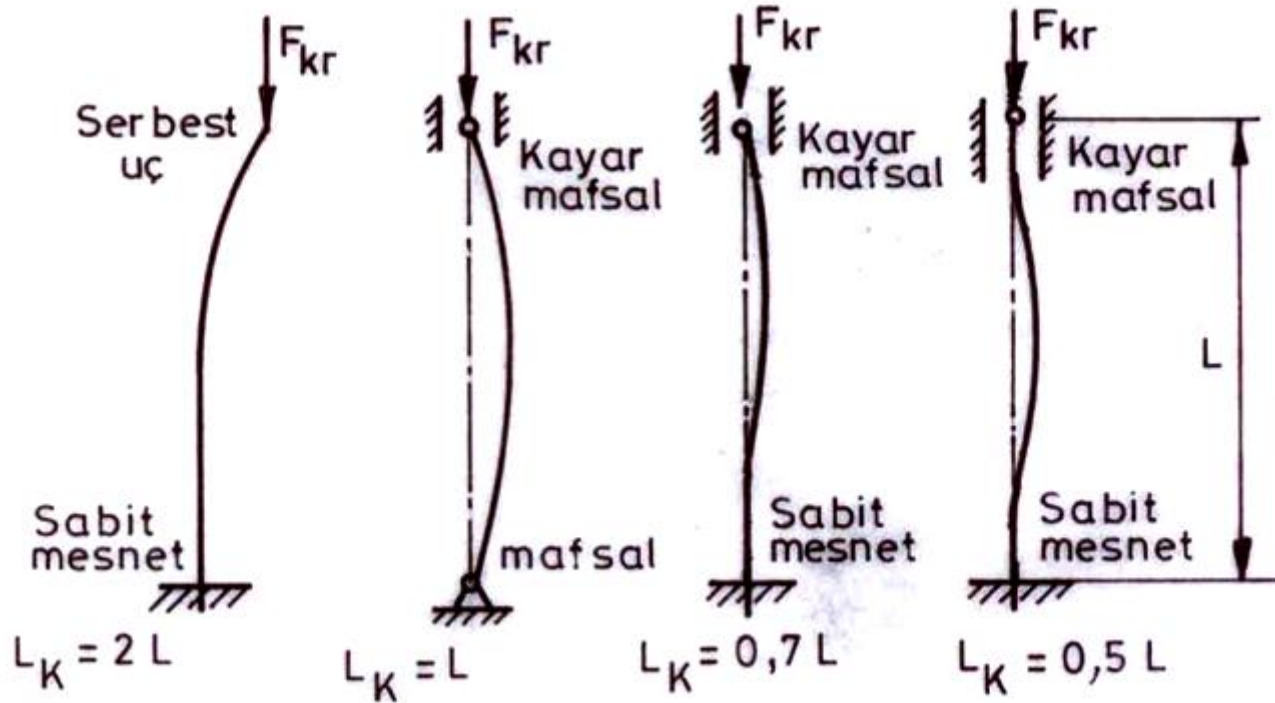
İki bölgenin birleşme noktasında her iki formül geçerlidir. Bu noktadaki narinlik katsayısı λ_0 olduğuna göre

$$\frac{\pi^2 \cdot E}{\lambda_0^2} = \sigma_{Ak} - \left(\frac{\sigma_{Ak}}{2\pi} \right)^2 \cdot \frac{1}{E} \cdot \lambda_0^2 \Rightarrow \lambda_0 = \sqrt{\frac{2\pi^2 E}{\sigma_{Ak}}}$$

$\lambda > \lambda_0$ ise Euler formülü

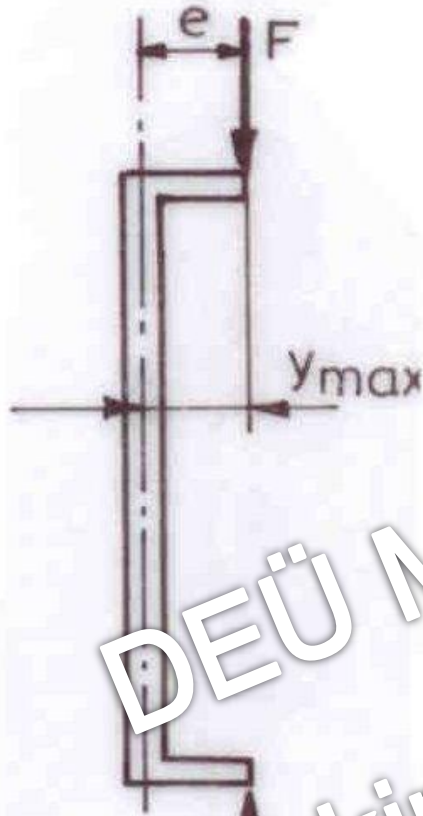
$\lambda < \lambda_0$ ise Johnson veya Tetmayer formülü kullanılır.

Her iki durumda da basma nominal gerilmelerinin $\sigma_b = F/A$; $\sigma_b \leq \sigma_{Br} / s$ olması gerekir.



- $s = 3 \dots 6$ Sabit yükleme
- $s = 8 \dots 11$ Değişken zorlanma
- $s = 15-22$

- Kuvvetin eksantrik olarak etkimesi durumunda:



$$\sigma_{Br} = \frac{F}{A} = \frac{\sigma_{Ak}}{1 + \frac{e \cdot y_{\max}}{i^2} \cdot \text{Sec} \left(\lambda \sqrt{\frac{F_{Br}}{4 \cdot E \cdot A}} \right)}$$

Plastik burkulma hallerinde $\frac{e \cdot y_{\max}}{i^2} \approx 0,25$ alınarak tam eksen doğrultusunda yüklü çubuklar için Sekent bağıntısı uygulanabilir.

Burkulma Hesabı:

a) Çubuğun kesit alanı bilindiği takdirde:

- Sınır narinlik katsayısı λ_0 bulunur

$\lambda > \lambda_0$ ise Euler formülü

$\lambda < \lambda_0$ ise Johnson veya Tetmayer formülü kullanılır.

Her iki durumda da basma nominal gerilmelerinin $\sigma_b = F/A$; $\sigma_b \leq \sigma_{Br}/s$ olması gerekir.

b) Boyutlandırma yöntemi:

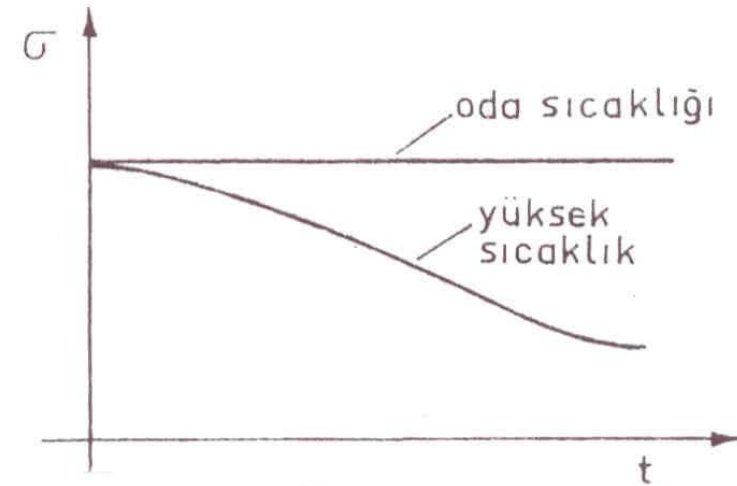
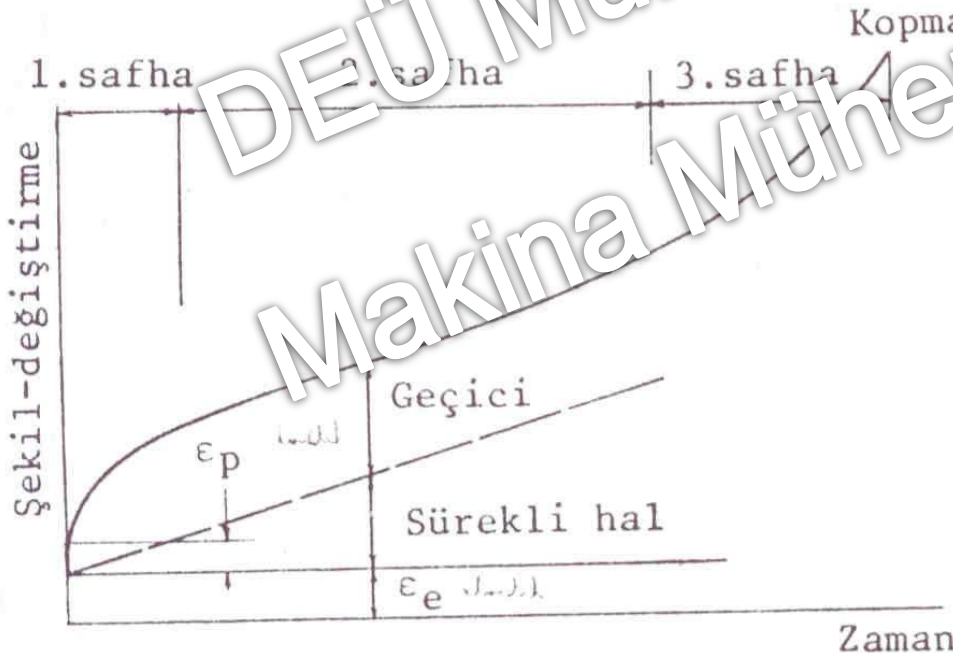
- Euler bağıntısı uygulanır.

- $F_{Br} = \frac{\pi^2 EI_{min}}{L_k^2}$; emniyet katsayısı ve I_{min} hesaplanır

- Çubuğun kesit alanı belirlenir.

- Atalet yarıçapı $i^2 = I/A$ bağıntısı dikkate alınarak narinlik katsayısı ve/veya sınır narinlik katsayısı bulunur. Eğer $\lambda > \lambda_0$ ise hesap uygundur. Aksi takdirde $\sigma_{Br} = \sigma_{Ak} - K_0 \lambda^2$ denkleminde σ_{Br} bulunur. F yükünün $\sigma_{Br} = F/A \leq \sigma_{Br}/s$ bağıntısını sağlaması gerekir.

- Genellikle sıcaklık malzemenin özelliklerini etkiler; ısı gerilmelerini doğurur ve sürünme (creep) olayının ortaya çıkmasına sebep olur.
 - Sabit gerilme altında şekil değiştirmenin sürekli olarak büyüdüğü davranışa *sürünme* denir.
 - Şekil değiştirme sabit kaldığı halde gerilmenin sürekli olarak azaldığı davranışa *gevşeme (relaksasyon)* denir.



- Sürünme olayında şekil değiştirmeyi karakterize etmek için $\dot{\varepsilon} = \frac{d\varepsilon}{dt}$ şekil değiştirme hızı tarif edilir. 1. safhada $\frac{d\varepsilon}{dt}$ gittikçe azalır. 2. safhada $\frac{d\varepsilon}{dt}$ sabit bir minimum değer alır. 3. safhada $\frac{d\varepsilon}{dt}$ süratle artar ve malzeme kopar.
- Malzemelerin sürünme diyagramları başlangıç gerilmelerinin ve sıcaklıklarının değerine bağlı olduğu için bu safhaları bütün sürünme diyagramlarında göremeyebiliriz.
- Esas sürünme olayını karakterize eden 2.safha ve buna bağlı şekil değiştirme hızıdır.

$$\epsilon_{\delta} = \epsilon_0 + \dot{\epsilon}_{\min} \cdot t$$

Zaman

2. Safhadaki şekil değiştirme hızı

Başlangıçtaki şekil değiştirme hızı

Sürünme ile toplam şekil değiştirme

Bu safhada gerilme ile şekil değiştirme arasındaki bağıntı aşağıdaki denklem ile gösterilir.

$$\dot{\epsilon}_{\min} = K \sigma^n$$

Bu denklemdeki K ve n deneysel sabitlerdir.

$$\text{Log } \varepsilon_{\min} = \text{Log } K + n.\text{Log } \sigma$$

- Çeşitli sıcaklıklar için $\varepsilon_{\min}$ ile σ veya zaman ile σ arasındaki bağıntı grafik olarak gösterilir. n bu diyagramdaki doğruların ortalama eğimi, K ise $\sigma=1$ haline karşılık gelen değeridir.
- Sürünme sırasında malzemelerin mukavemet esasları sürünme mukavemeti ve sürünme kopma mukavemeti olmak üzere iki şekilde ifade edilir

Sürünme Mukavemeti; Belirli bir sıcaklıkta ve zamanda elemanda belirli bir kalan şekil değiştirme meydana getiren gerilmedir. Genel olarak $\sigma_{\varepsilon/p/h/T}$ şeklinde ifade edilir. Örneğin $\sigma_{1/10^5/T}$

Sürünme Kopma Mukavemeti: Belirli bir sıcaklıkta ve belirli bir süre sonra kopma mukavemetinin değeridir. $\sigma_{K/h/T}$ şeklinde gösterilir.

- Gevşeme olayında belli bir sıcaklıkta çalışan elemanın kesitindeki σ_i ilk gerilmesinin her hangi bir andaki değeri

$$\frac{1}{\sigma^{n-1}} = \frac{1}{\sigma_i^{n-1}} + K.E.(n-1).t$$

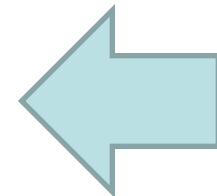
bağıntısı ile bulunur. Gevşeme olayı ön gerilmeli bağlantılarda önemlidir.

Emniyet Gerilmeleri

- Değişken zorlanmada; sürekli mukavemet sınırı bir emniyet katsayısına bölünerek emniyet gerilmeleri denilen gerilmeler elde edilir

Tam değişken zorlamalarda $\sigma_o = 0$ olduğundan $s = \frac{\sigma_D}{\sigma_g}$; $\sigma_{em} = \frac{\sigma_D}{s}$

Genel değişken zorlanmada emniyet katsayısı $s = \frac{1}{\frac{\sigma_o}{\sigma_{Ak}} + \frac{\sigma_g}{\sigma_D}}$



Emniyet Gerilmeleri

- Her malzemenin zorlamalara karşı bir dayanma sınırı vardır. Hiçbir zaman zorlamanın bu sınırlara ulaşması istenmez.
- Statik zorlanmada akma veya kopma gerilmesi bir emniyet katsayısına ($s > 1$) bölünerek emniyet gerilmeleri denilen gerilmeler elde edilir.
- Statik zorlanmada emniyet katsayısının ve emniyet gerilmesinin ifadesi:

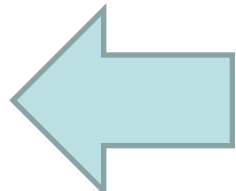
– Kırılgan malzemeler için:

$$s = \frac{\sigma_K}{\sigma} k_e ; \quad s = \frac{\tau_K}{\tau} k_{et} \quad \sigma_{em} = \frac{\sigma_K}{s} k_e ; \quad \tau_{em} = \frac{\tau_K}{s} k_{et}$$

– Sünek malzemeler için:

$$s = \frac{\sigma_{Ak}}{\sigma} ; \quad s = \frac{\tau_{Ak}}{\tau} \quad \sigma_{em} = \frac{\sigma_{Ak}}{s} ; \quad \tau_{em} = \frac{\tau_{Ak}}{s}$$

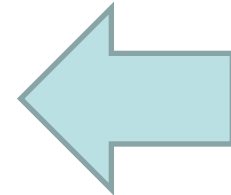
- σ_K , τ_K , σ_{Ak} , τ_{Ak} malzemenin statik mukavemet sınırları;
- σ , τ ise zorlanma hallerine göre nominal gerilmelerdir.



Mukavemet Şartı

Dış zorlamaların elemanda doğurduğu gerilmeler emniyetli gerilme değerlerin altında kalmalıdır.

Elemanda meydana gelen gerilme $<$ Emniyet Gerilmesi



Gerilme

Dış kuvvetlerin ve momentlerin etkisi altında elemanın herhangi bir kesitinde, tepki olarak iç kuvvetler meydana gelir . Birim alana gelen iç kuvvetlere **GERİLME** adı verilir.

Bir elemanın kesiti

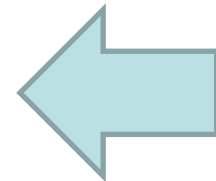
çekme, basma veya eğilme hallerinin etkisi altında ise kesitte

NORMAL gerilmeler, σ

makaslama veya burulmanın etkisinde ise kesitte

KAYMA gerilmeleri, τ

meydana gelir.

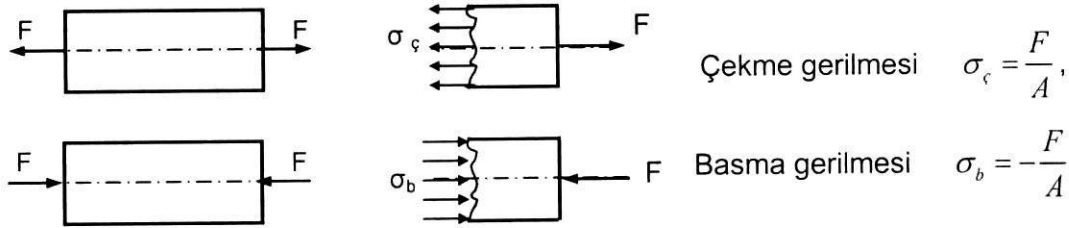


Basit Gerilmeler

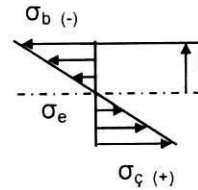
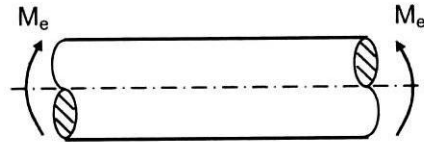
Elemanın kesitinde çekme, basma, eğilme, burulma, makaslama hallerinden yalnız biri varsa **BASİT** gerilme hali söz konusudur.

DEÜ Mühendislik Fakültesi
Makina Mühendisliği Bölümü

a) Çekme-basma



b) Eğilme

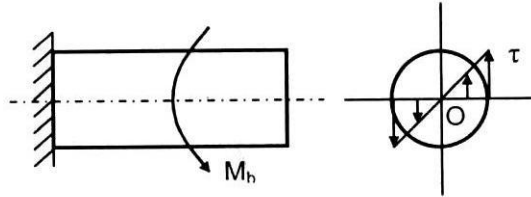


Eğilme gerilmesi $\sigma_e = \frac{M_e}{W_e}$, $W_e = \frac{I}{r}$

Atalet momenti $I = \frac{\pi d^4}{64}$ (dairesel kesit için)

Kesit eğilme mukavemet momenti $W_e = \frac{\pi d^3}{32}$ (dairesel kesit için)

c) Burulma



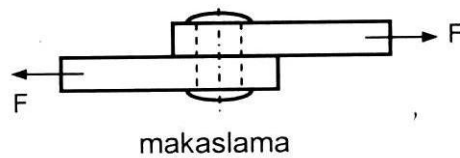
Kayma gerilmesi $\tau_{\max} = \frac{M_b}{W_b}$, $W_b = \frac{I_p}{r}$

Polar atalet momenti $I_p = \frac{\pi d^4}{32}$

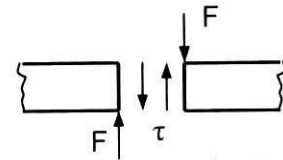
Kesit burulma mukavemet momenti $W_b = \frac{\pi d^3}{16}$ (dairesel kesit için)

d) Kesme/Makaslama

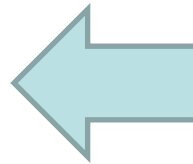
Kayma gerilmesi $\tau = \frac{F}{A}$



makaslama



kesme



Bileşik Gerilmeler

Elemanın kesitinde yukarıda sayılan gerilme hallerinden bir kaçı bir arada ise **BİLEŞİK** gerilme hali söz konusudur. Bu durumda **Bileşke Gerilme σ_B** hesaplanır.

İki türlü bileşik gerilme etkisi ortaya çıkabilir.

Normal gerilmeler **veya**
kayma gerilmeleri var ise

Normal gerilmeler **ve**
kayma gerilmeleri bir arada ise

“Mukavemet Varsayımları”
kullanılır

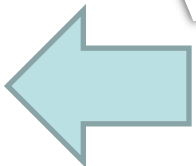
$$\sigma_B = \sigma_{\zeta} + \sigma_e ; \quad \tau_B = \tau_b + \tau$$

Maksimum Kayma Gerilmesi Varsayımı

$$\sigma_B = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2}$$

Maksimum Biçim Değiştirme Enerjisi Varsayımı

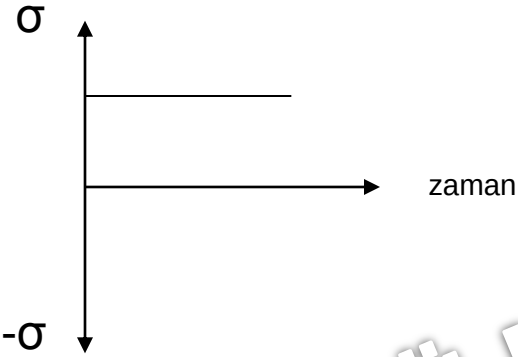
$$\sigma_B = \sqrt{\sigma^2 + 4\tau^2}$$



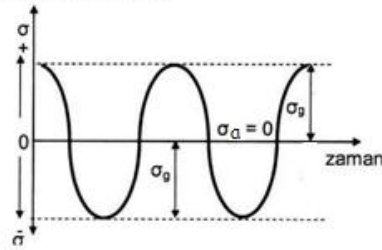
YÜKLEME zaman içinde değişip değişmediğine göre iki şekildedir

Statik yüklemeler zamana göre sabittir.

Değişken yüklemeler maksimum ve minimum iki değer arasında periyodik olarak değişir



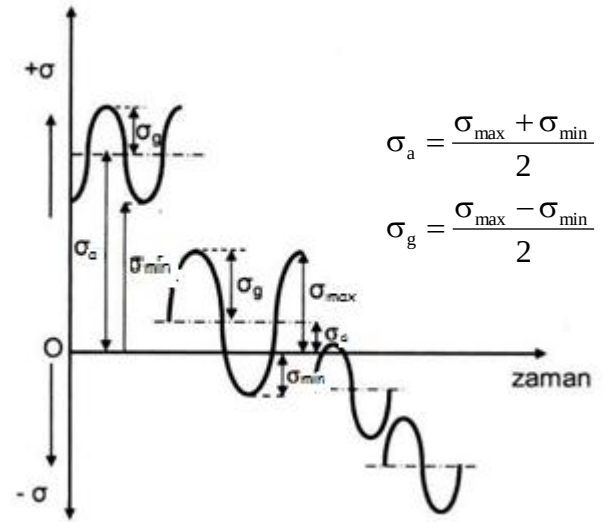
a) Tam değişken yükleme



$$\sigma_a = 0 ;$$

$$\sigma_{\max} = |\sigma_{\min}| = \sigma_g$$

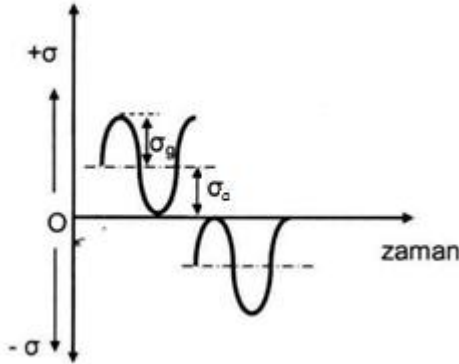
b) Genel değişken zorlanma



$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2}$$

$$\sigma_g = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2}$$

c) Titreşimli yükleme



$$\sigma_{\max} = 0 \text{ veya } \sigma_{\min} = 0$$

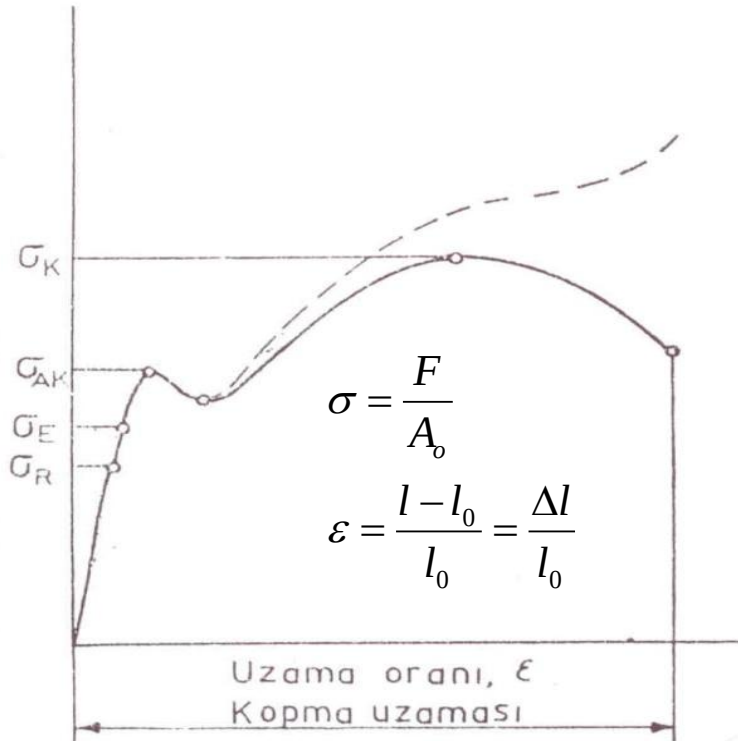
$$\sigma_a < 0 \text{ veya } \sigma_a > 0 \text{ olabilir}$$

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max}}{2} \text{ veya } \sigma_a = -\frac{\sigma_{\min}}{2}$$

Statik mukavemet sınırları

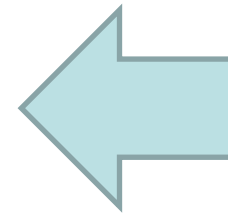
Malzemenin Hasar meydana gelmeden statik olarak yüklenebileceği sınırdır.

Çekme deneyi ile belirlenir.



Gevrek malzemelerde mukavemet sınırı **Kopma Gerilmesi (σ_K, τ_K)** dir.

Sünek malzemelerde mukavemet sınırı **Akma Gerilmesi (σ_{AK}, τ_{AK})** dir.



Dinamik mukavemet sınırları

Malzemenin Hasar meydana gelmeden değişken olarak yüklenebileceği sınırdır. Dinamik mukavemet sınırı **yorulma deneyi** ile belirlenir.

Yorulma Olayı Nedir?

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

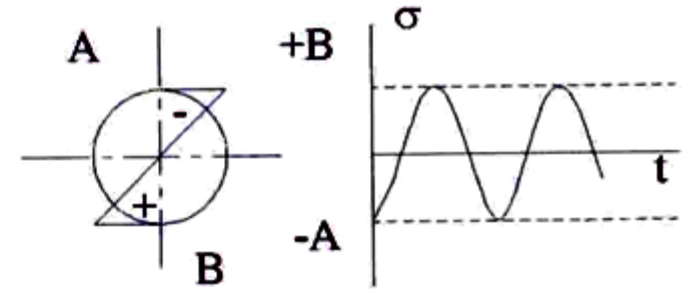
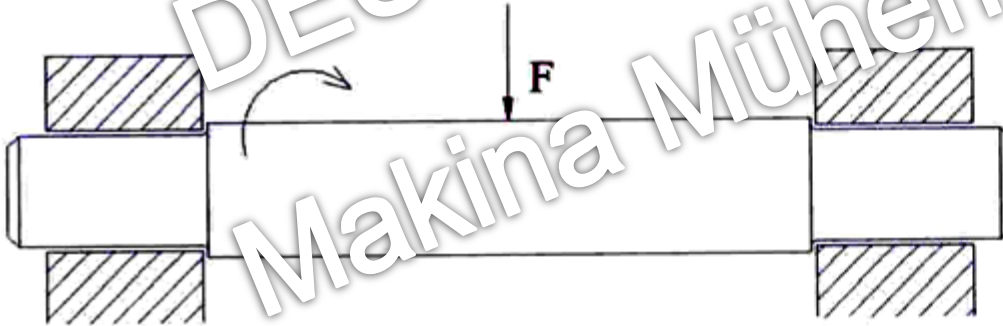
Ömür; malzemenin kopuncaya kadar direnç gösterebildiği süredir.

Sürekli Mukavemet sınırı; Malzemenin sonsuz sayıda yük tekrarına veya sonsuz ömre dayanabildiği minimum gerilme genliğidir. (σ'_D, τ'_D)

Yorulma Olayı

Değişken gerilmelere maruz makine elemanlarında kırılma (hasar) statik mukavemet sınırların çok altında gerçekleşir.

Çevrimsel olarak değişen gerilmeler malzemenin iç yapısında bazı yıpranmalara sebep olur. Böylece kopma olayı statik sınırların çok altında meydana gelir. Elemanın ömrü genellikle çevrim sayısı “N” ile tarif edilir.



- Değişken zorlanmada kopma iç yapıdaki veya dış yüzeydeki bir süreksizlik noktasından başlar. Bu nokta civarında malzeme yorulur bir çatlak meydana gelir. Zamanla bu çatlak derinleşir, sonunda çatlak dışındaki bölgedeki gerilme mukavemet sınırını aşarak elemanın birden bire kırılmasına neden olur.

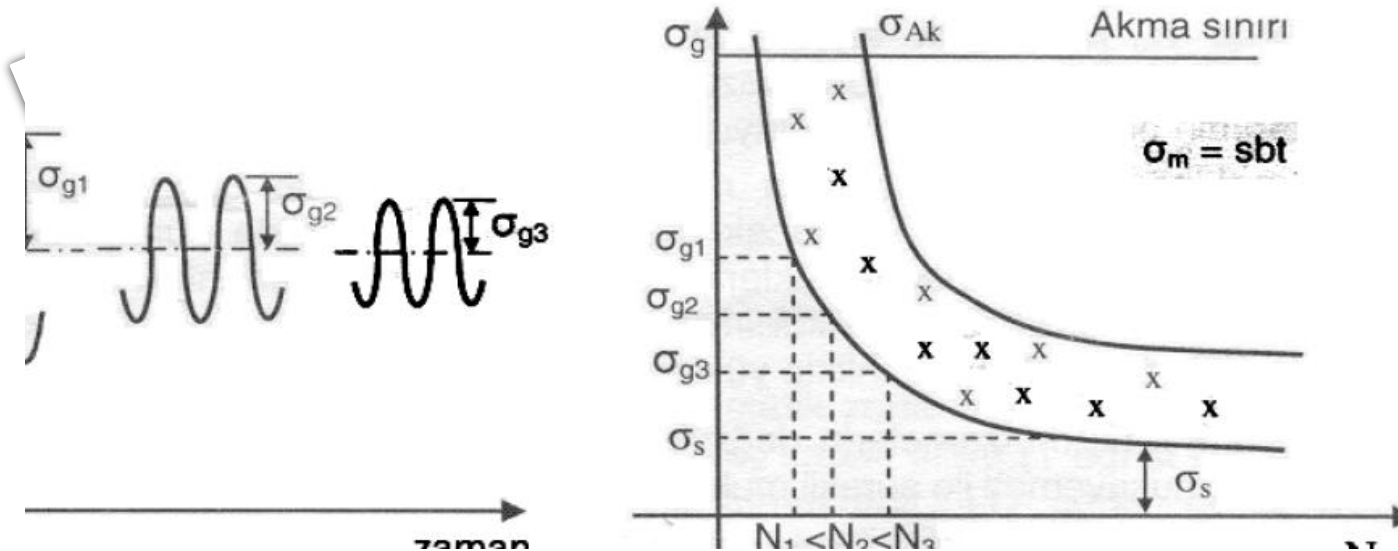
- Bu şekilde oluşan kırılma yüzeylerinde iki bölge görülür. Kırılma yüzeyinin bir kısmı mat ve düz, diğer kısmı ise parlak ve tanelidir. Birinci bölge önceden meydana gelen ve zamanla büyüyen çatlağı gösterir. İkinci bölge ise birden bire kopan kısımdır.

Değişken Zorlanmada Mukavemet Sınırı

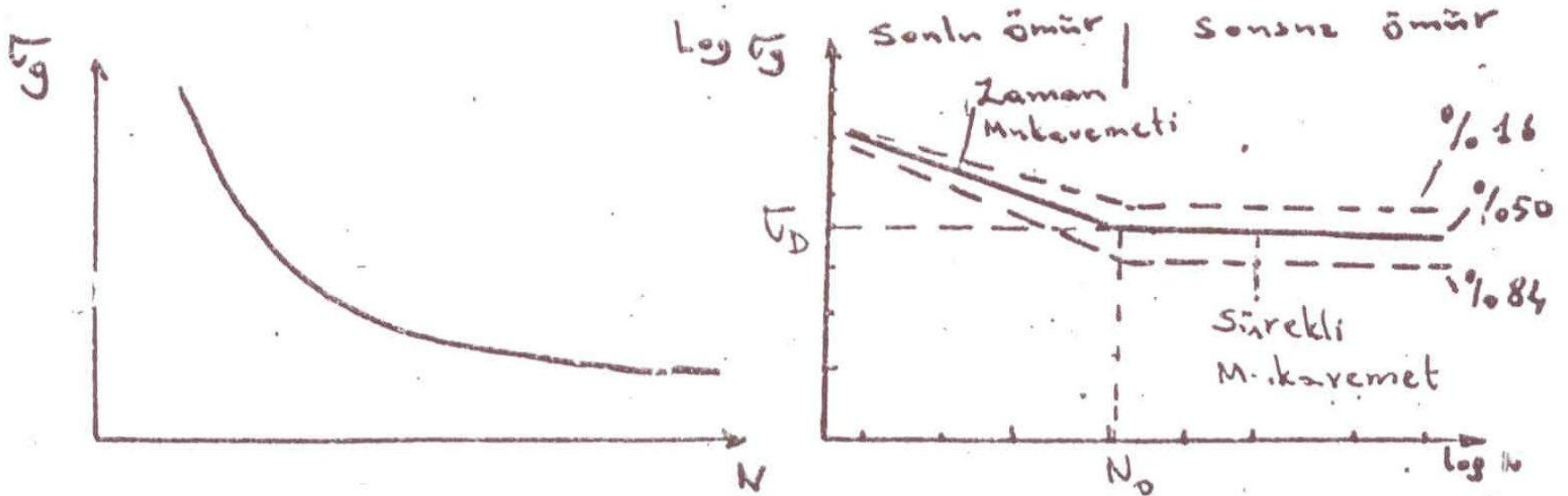
- Değişken zorlanmaya maruz bir makine elemanının tasarımı **ömür** esas alınarak yapılır.
- Değişken yükler altında malzeme davranışı ilk defa 1866'da **Wöhler** tarafından gerçekleştirilmiştir.
- **Tasarlanan makina elemanının ömrünün değişken gerilmenin genliğine bağlı olduğu belirlenmiştir.**

Değişken zorlanmada mukavemet sınırı YORULMA DENEYİ ile belirlenir.

- 10mm çapındaki standart deney numuneleri sabit bir ortalama gerilme üzerine değişen genlikte gerilmeler uygulanarak test edilir. Her genlik değeri için numune kopuncaya kadar ki yük tekrar sayısı (N) kaydedilir. Her defasında genlik değeri biraz azaltılır.



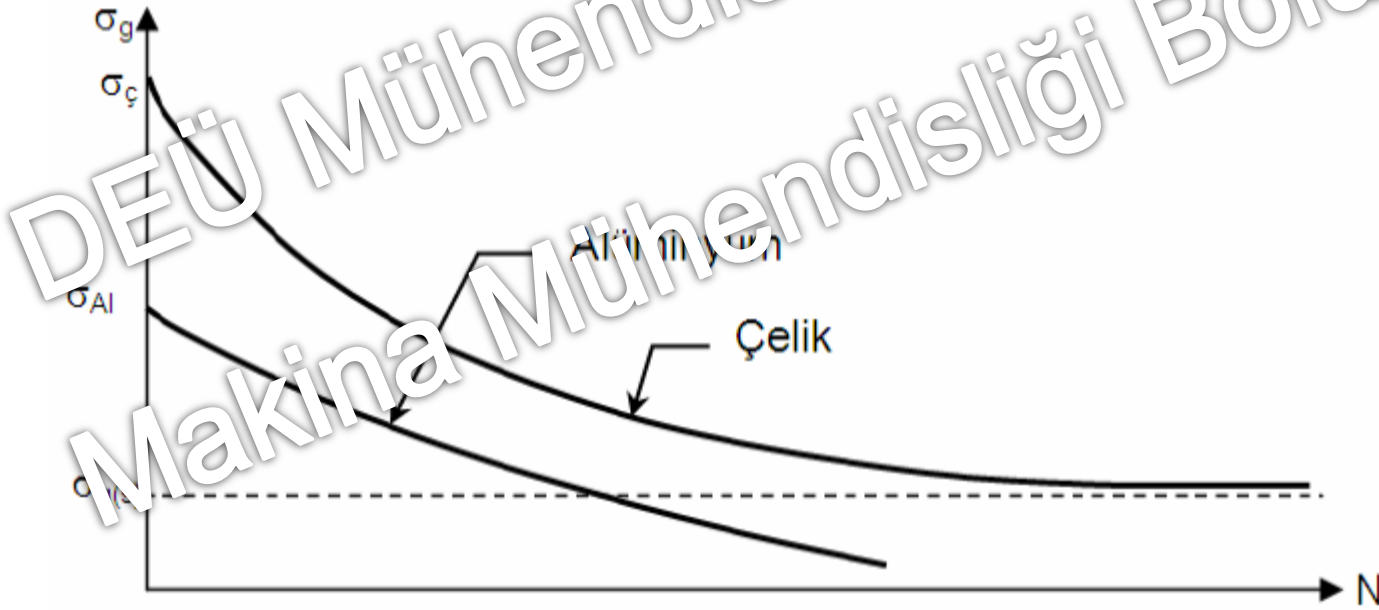
- Gerilme değişim sayısı (N) arttıkça, gerilme genliğinin (σ_g) azaldığı görölür.
- Belirli bir gerilme değişim sayısı için malzemenin hiç kırılmaksızın devamlı olarak dayanabileceği bir minimum gerilme genliği vardır. Bu gerilme genliğine o **malzemenin sürekli mukavemet sınırı (σ_D)** ve buna karşılık gelen yük değişme (çevrim) sayısına (N_0) **sonsuz (sürekli) ömür sınırı** denir. Bu değer çeliklerde $N_0=10^6 \div 10^7$ çevrim arasındadır.



Logaritmik eğri iki kısımdan oluşmaktadır. Dik olan kısımdaki mukavemet değerine zaman mukavemeti, eğrinin yatay kısmındaki değerlere ise sürekli mukavemet değerleri adı verilir.

Yorulma kırılması istatistiki bir değer olduğundan sonuçlar geniş bir saçılma gösterir, bu değerleri iki sınır eğri arasında toplamak mümkündür. Sınır eğriler kırılmama olayının deney parçalarının % kaçında meydana geldiğini bir başka deyişle güvenilirliği ifade etmektedir.

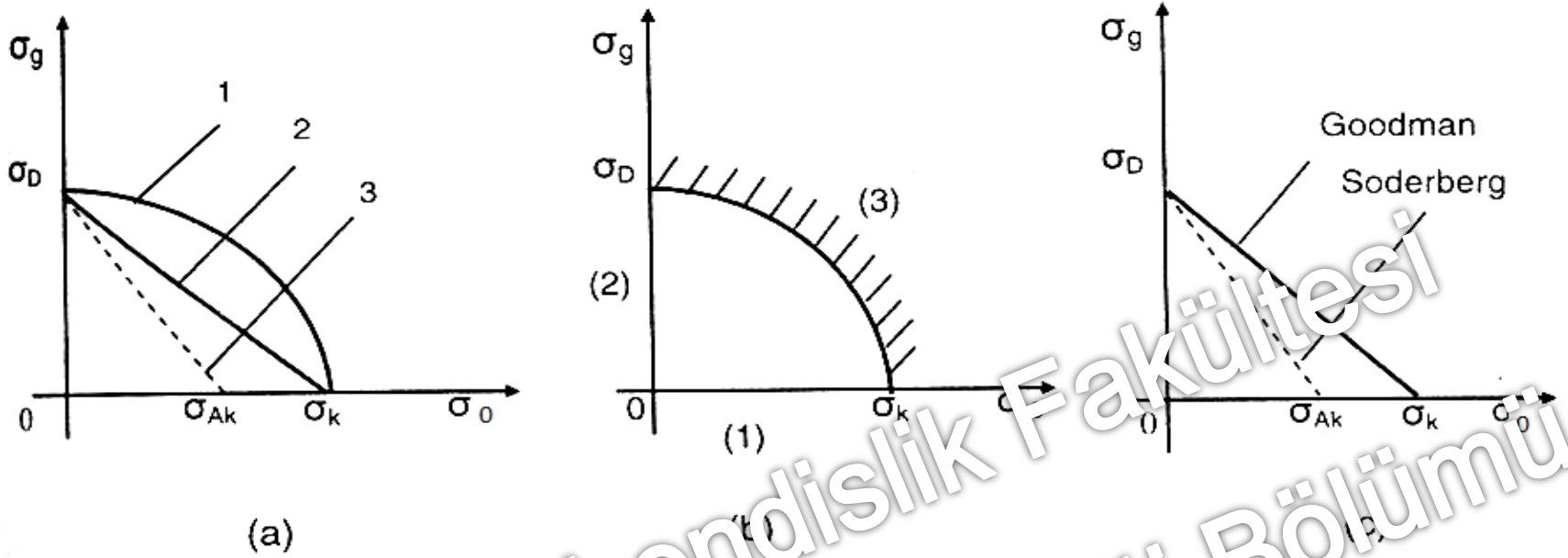
- Çelik ve dökme demir olmayan malzemeler için Wöhler eğrisinin yatay kısmı yoktur. Böyle bir malzemenin sürekli mukavemet sınırının belirlenmesinde değişik bir yol izlenir. Öncelikle deneylere dayanarak malzemenin sonsuz ömrünü tarif eden bir N_0 değeri belirlenir, ve buna karşı gelen değişken mukavemet değeri sürekli mukavemet sınırı olarak kabul edilir.



- Wöhler eğrisi sabit bir ortalama gerilmede değişken gerilme genliğinde çizilmektedir.
- Herhangi bir ortalama gerilme için yorulma eğrisi elde etmek yeniden yorulma deneylerinin yapılması gerekir. Veya belirli yaklaşımlar kullanılır.

GOODMAN-SODEBERG YAKLAŞIMI

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



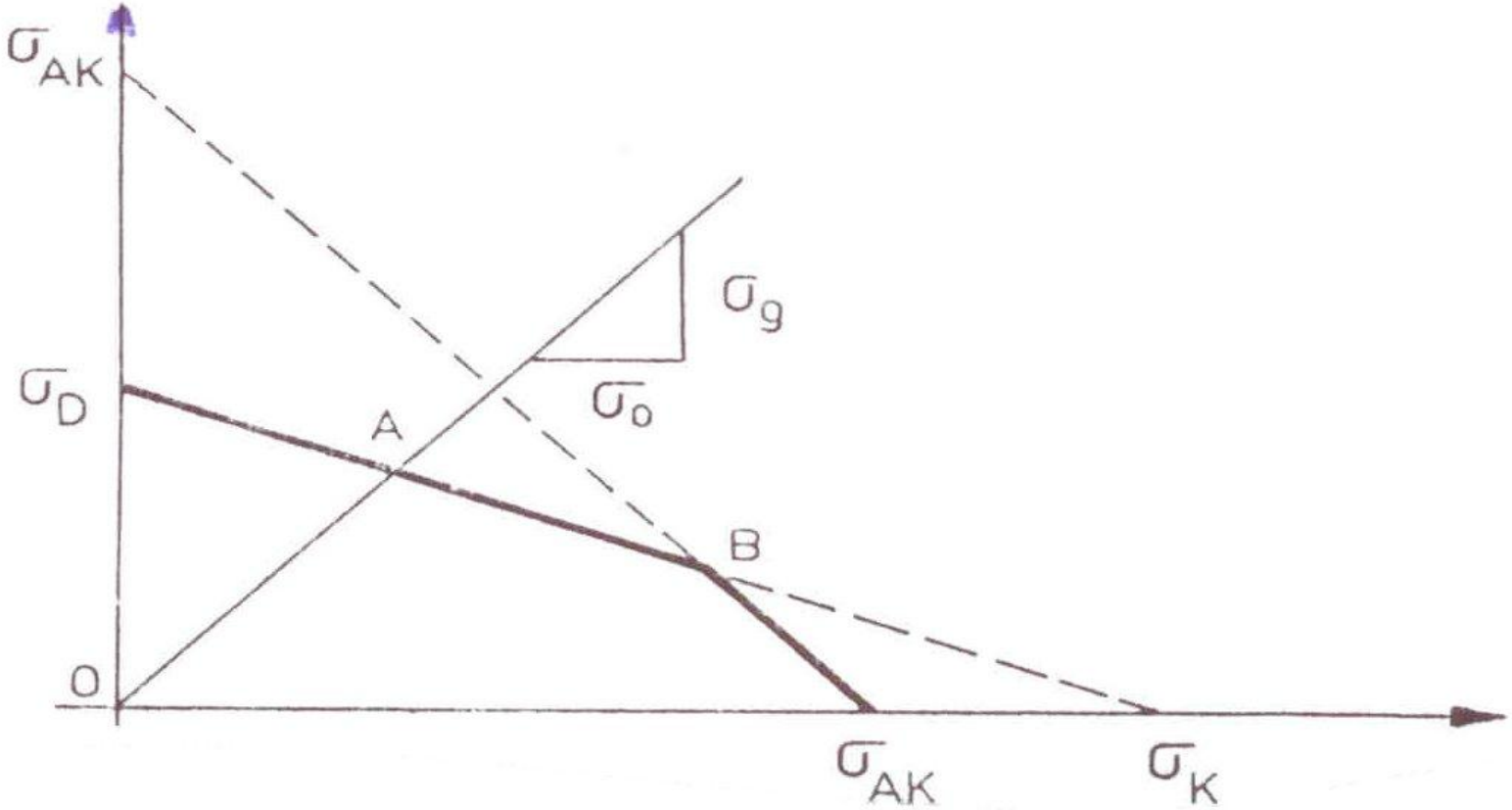
- Deney sonuçları işaretlenecek olursa bir kopma eğrisi elde edilir. Aslında parabol şeklinde olan bu eğri yerine kolaylık sağlamak amacıyla pratikte σ_D ve σ_K noktalarını birleştiren Goodman doğrusu veya σ_D ve σ_{AK} noktalarını birleştiren Soderberg doğrusu alınır.

Soderberg doğru denklemi;

$$\frac{\sigma_g - \sigma_D}{\sigma_D - 0} = \frac{\sigma_0 - 0}{0 - \sigma_{AK}}$$

bağıntısından bulunur. Goodman doğrusu için σ_{AK} yerine σ_K konur.

- Bu doğrular elemanın boyutlandırılmasında ve kontrol hesaplarında kullanılmak üzere değişik bir şekle sokulmuş ve bu yeni diyagrama yorulma diyagramı denmiştir.



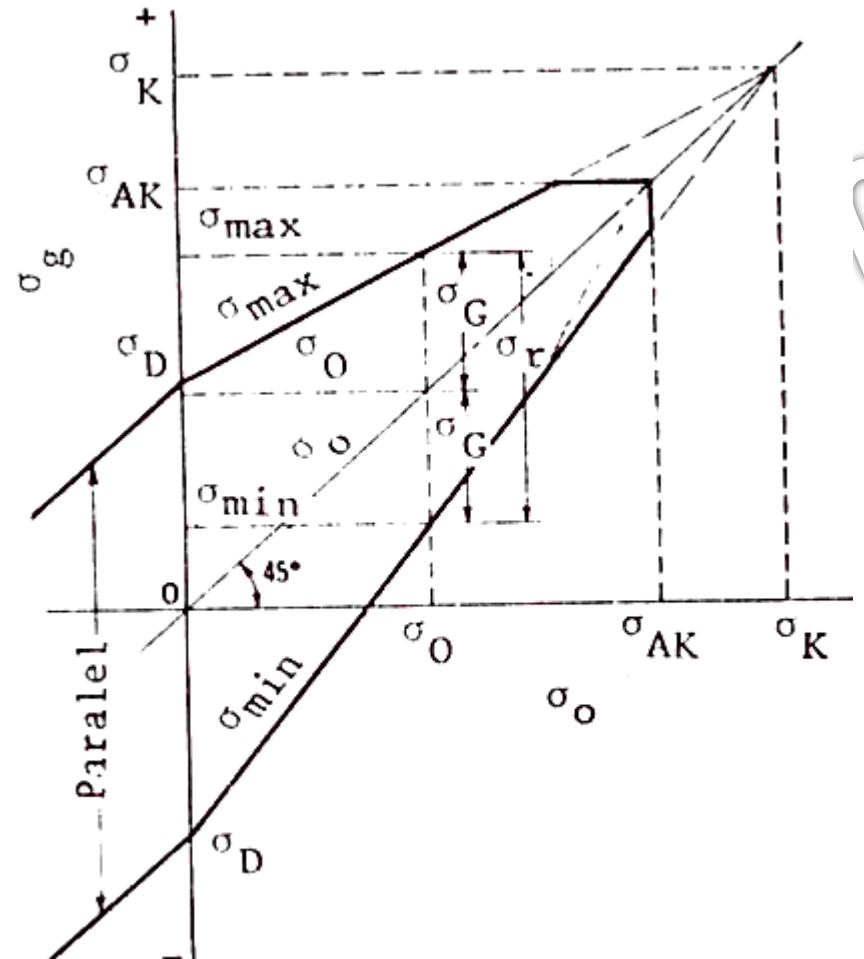
- Bu diyagram mukavemet hesabının esasını belirlemeye de yarar.
- σ_g/σ_o eğimine sahip doğru, diyagramı

σ_D B bölgesinde keserse işe yaramazlık (hasar) **akma** sonucunda oluşur.

B σ_{AK} bölgesinde keserse işe yaramazlık (hasar) **yorulma** sonucunda oluşur.

- Değişken burulma zorlamalarının laboratuvar sonuçları incelendiğinde τ_0 in sürekli mukavemet sınırı üzerindeki etkisinin hemen hemen yok denecek kadar az olduğu görülür. Bu sebeple basit değişken burulmanın etkisi altındaki elemanların hesabı, basit değişken zorlanmada τ_D ye ve statik zorlanmada τ_{Ak} ya göre yapılabilir.

- D

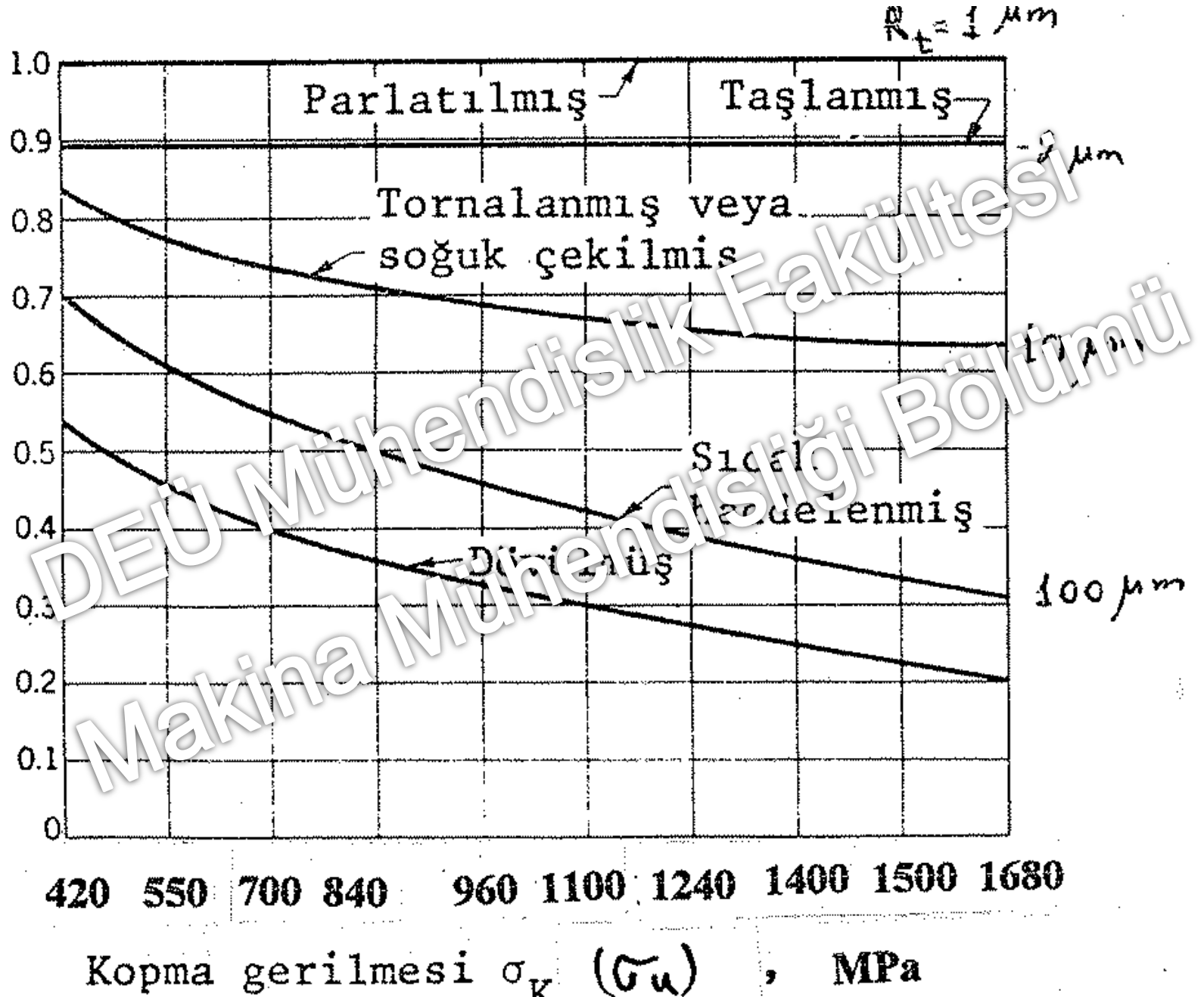


Sürekli Mukavemet Sınırına Etki Eden Faktörler.

- Malzemelerin Sürekli Mukavemet Değerleri, laboratuvarlarda özel olarak hazırlanmış deney çubukları kullanılarak çok dikkatli ve kontrollü deneyler sonucunda elde edilir. Ancak bu değerler gerçek makina elemanları için geçerli değildir. İzole laboratuvar şartları ile gerçek mühendislik uygulamaları arasındaki farklılıkları ortadan kaldırmak için düzeltme faktörlerinin göz önüne alınması gerekir.

$$\sigma_D = \sigma_D^1 k_y k_b k_g k_d k_e k_f \quad \tau_D = \tau_D^1 k_y k_b k_g k_d k_e k_f$$

Yüzey düzgünlüğü faktörü k_y



- **Büyüklik faktörü (k_b):** Deneyler, büyüklüğün artması ile sürekli mukavemetin azaldığını göstermiştir. k_b faktörünün değeri cetvel 12 de verilmektedir.

Cetvel - 12 - Büyüklik faktörü

d, mm	10	20	30	50	100	200	250	300
k_b	1	0,9	0,8	0,7	0,6	0,57	0,56	0,56

- Güvenirlik faktörü (k_g): sürekli mukavemet deneyleri sonucunda elde edilen mukavemet değerleri büyük bir saçılma gösterirler. Başka bir deyişle deneye katılan grubun belli bir yüzdesi işe yaramaz hale gelmekte kalanı ise sağlamlığını korumaktadır. İşe yarama ihtimali güvenirligi ifade etmektedir. (Cetvel-13)

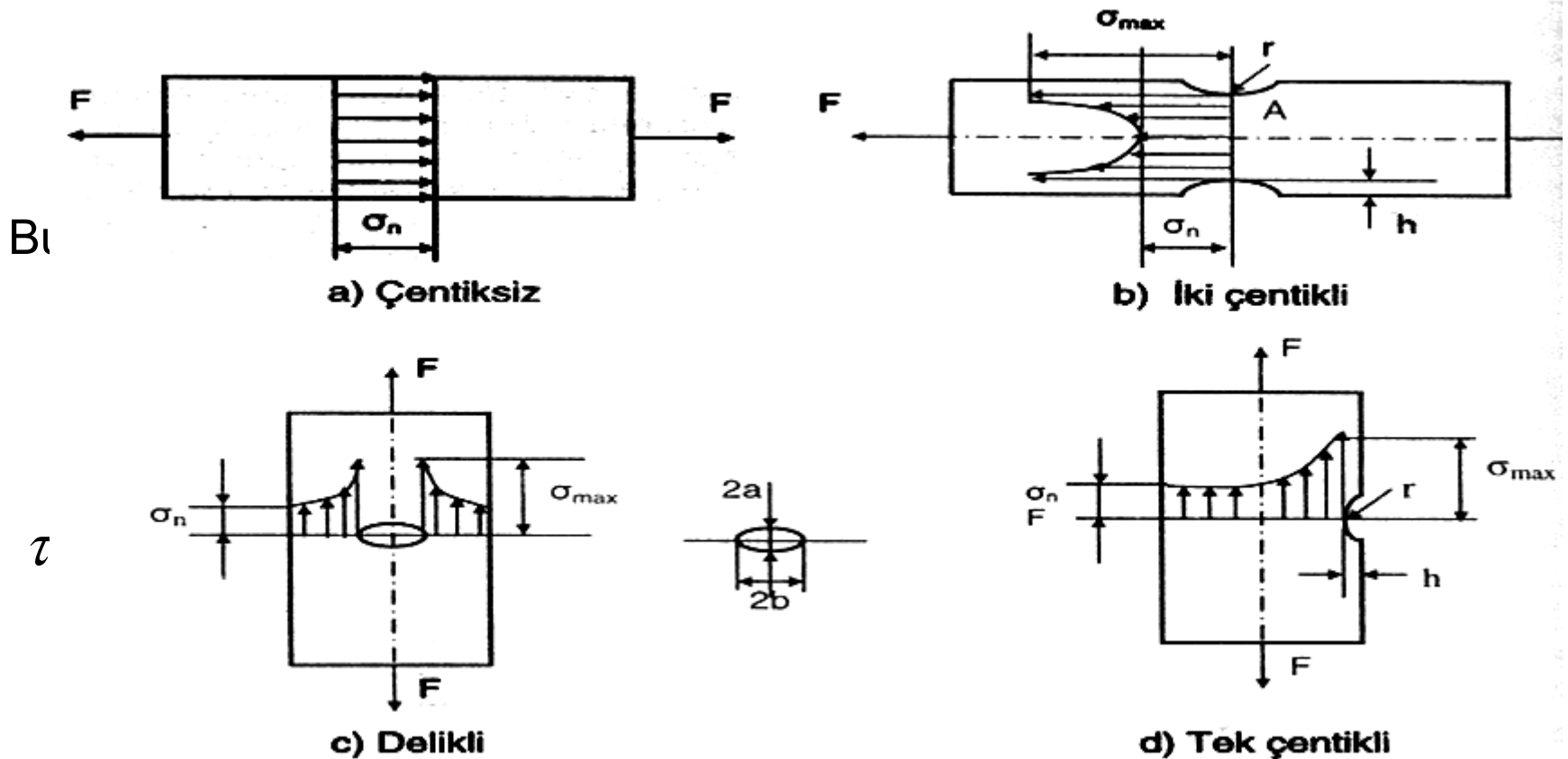
Cetvel 13 Güvenirlik Faktörü (k_g)
Sürekli mukavemet sınırının %8'lik standart sapmasına karşılık gelen)

R	k_g
0,50	1
0,90	0,897
0,95	0,868
0,99	0,814
0,999	0,753
0,9999	0,702
0,99999	0,659

- Sıcaklık faktörü (k_d): yüksek sıcaklıklar dislokasyonları harekete geçirir ve bir çok malzemenin yorulma direncini azaltır. (Cetvel 14)

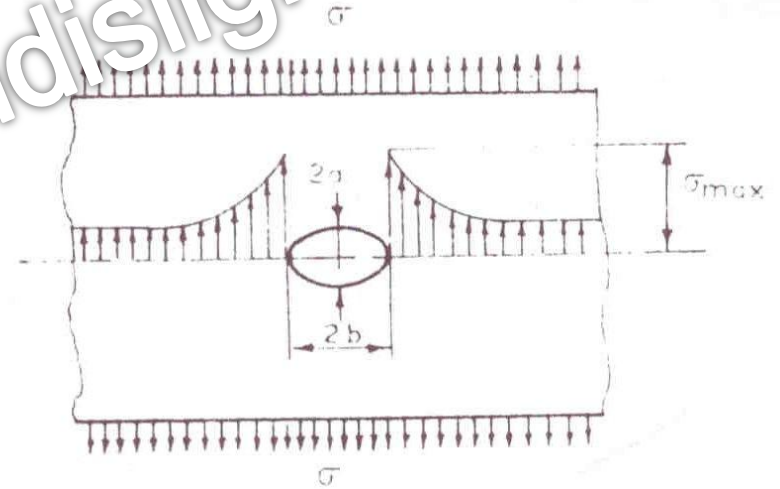
T (°C)	k_d
$T \leq 350$	1
$350 < T \leq 500$	0,5

- **Gerilme yığılması faktörü (k_e):** Basit gerilmelerin yayılışı ancak sabit ve sürekli kesitler için geçerlidir. Eleman üzerindeki ani kesit değişikliği, çentik veya delik gibi kuvvet akışını değiştiren noktalarda ve bu noktalar civarında nominal gerilmeye göre ani gerilme artışları meydana gelir. Bu artış; $\sigma_{\max} = K_t \cdot \sigma$ ve $\tau_{\max} = K_{t\tau} \tau$ şeklinde ifade edilebilir.



K_t ise teorik gerilme yığılması (geometrik veya form) faktörünü ifade etmektedir. Malzemenin cinsi bu değeri etkilemez.

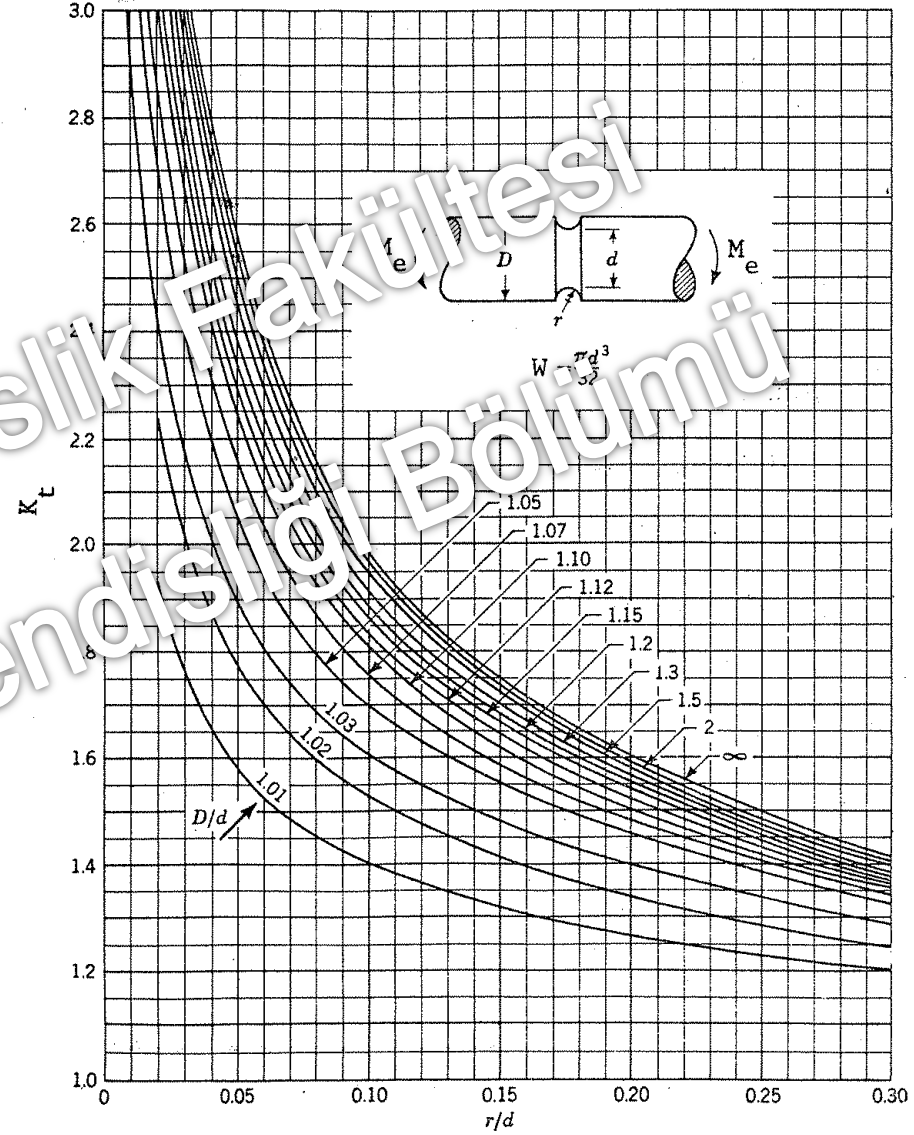
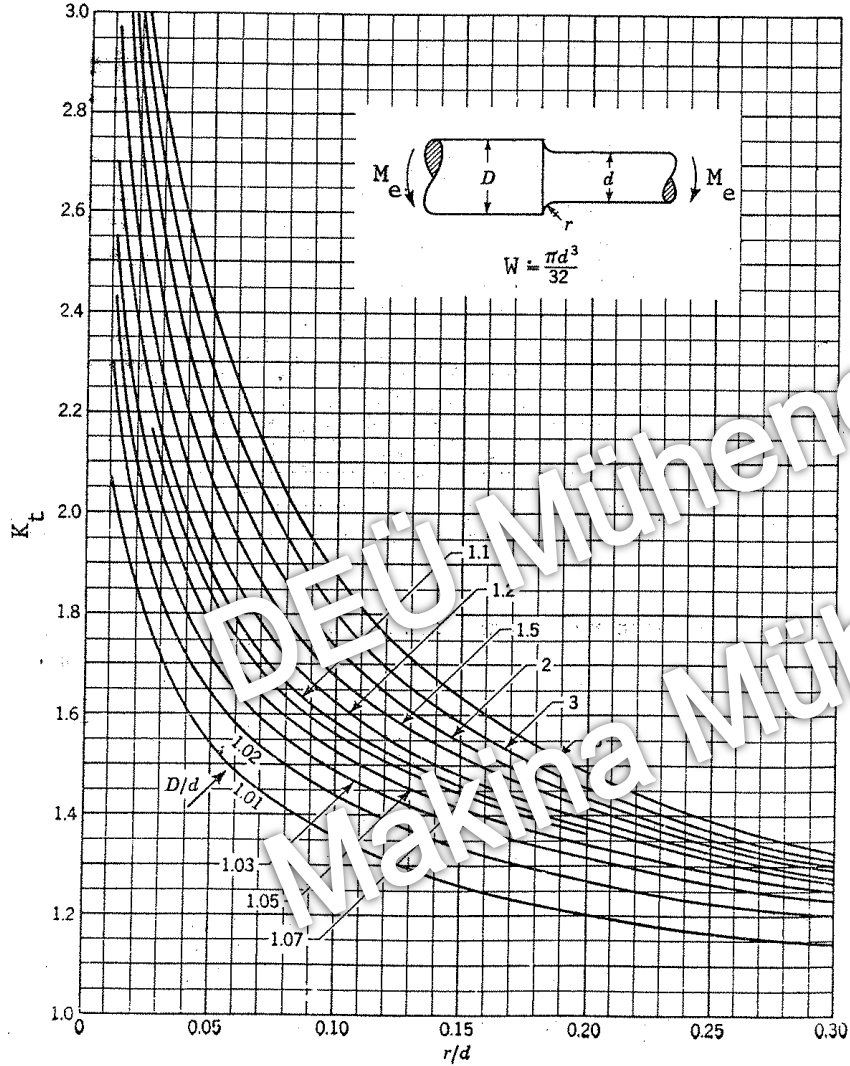
Analitik (elastisite teorisi) veya deneysel (fotoelastisite, strain - guage) yöntemlerle bilinen bu değerler diyagramlar halinde verilmiştir. (şekil 3...7)



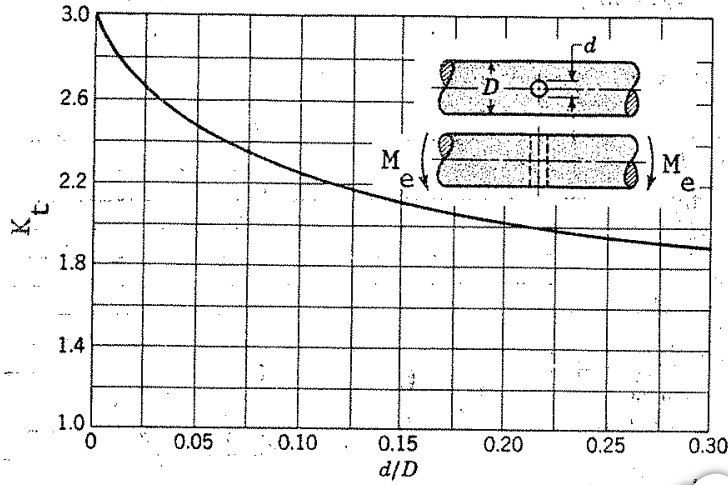
Şekil-3 Eğilmeye çalışan millerde teorik gerilme yığılması faktörü.

3.2- Eğilmeye çalışan çentikli mil

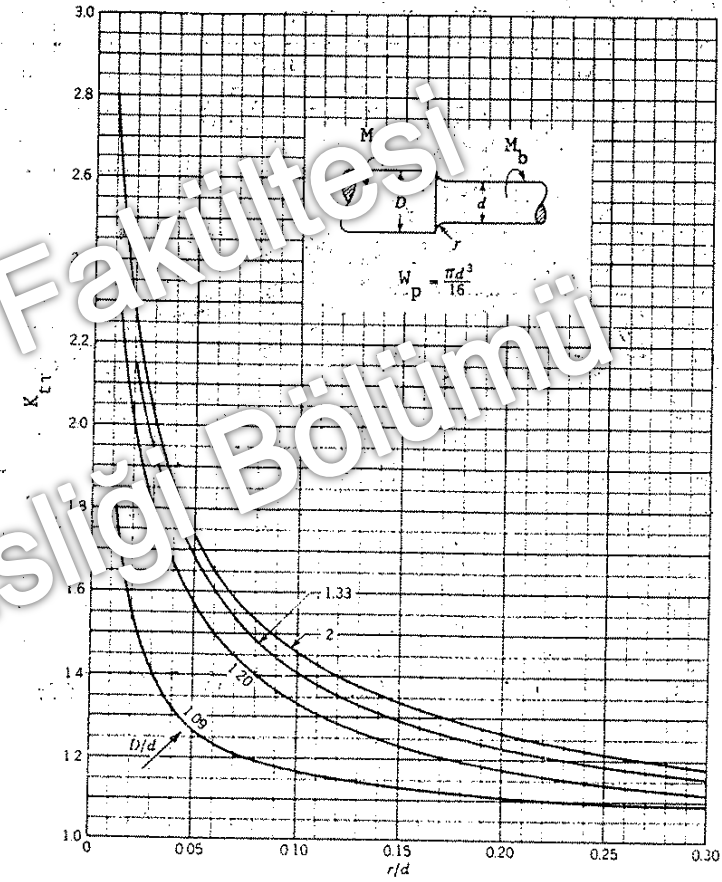
3.1- Eğilmeye çalışan kademeli mil



3.3- Eğilmeye çalışan enine delikli mil



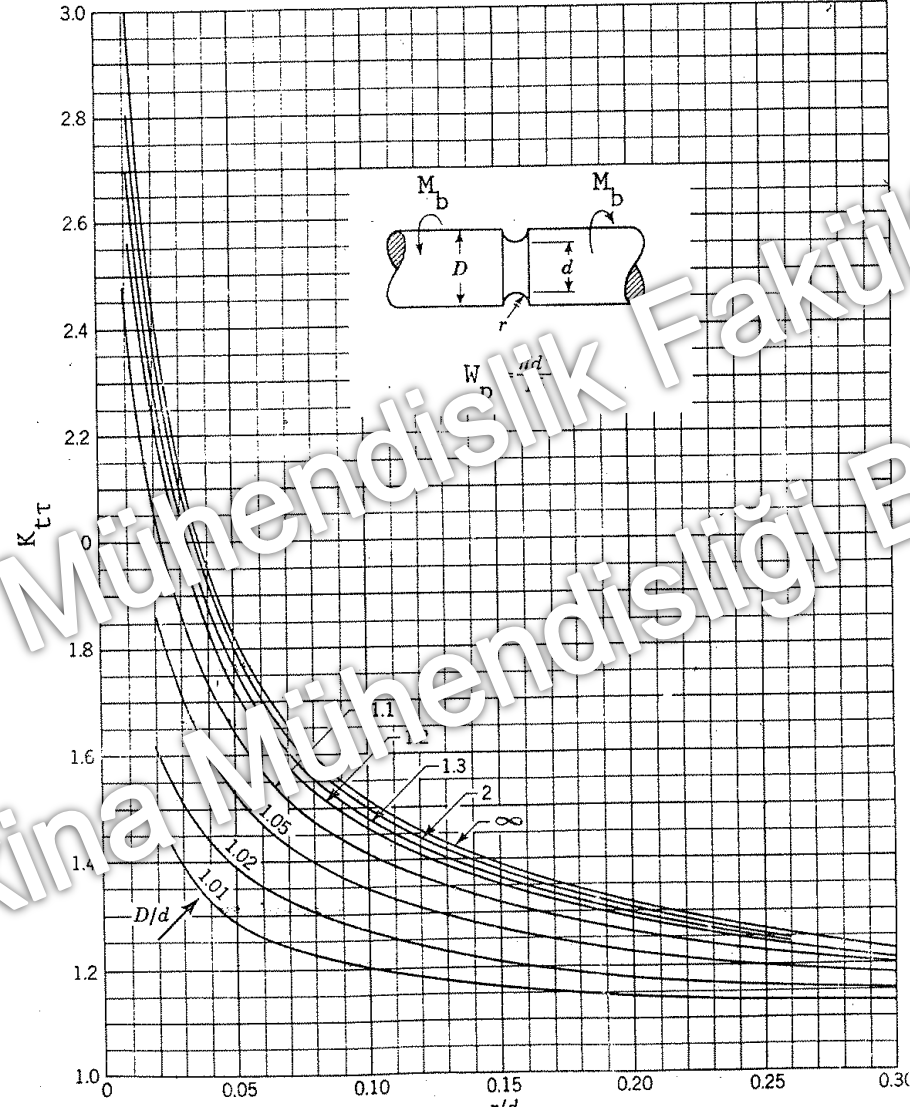
4.1- Burulmaya çalışan kademeli mil



Şekil-4 Burulmaya çalışan millerde teorik gerilme yoğunlaşması faktörü.

4.2- Burulmaya çalışan çentikli mil

Şekil 4.2-1



- Fakat malzemelerin çentik etkisine karşı hassasiyetleri farklı olduğundan yorulma-gerilme yığılma faktörü adı verilen yeni bir faktör tarif edilmiştir.

$$K_{\zeta} = \frac{\text{Çentiksiz deney numunesinin sürekli mukavemet sınırı}}{\text{Çentikli deney numunesinin sürekli mukavemet sınırı}}$$

- K_{ζ} ile K_t arasında; $K_{\zeta}=1+q.(K_t-1)$ bağıntısı vardır. Burada;

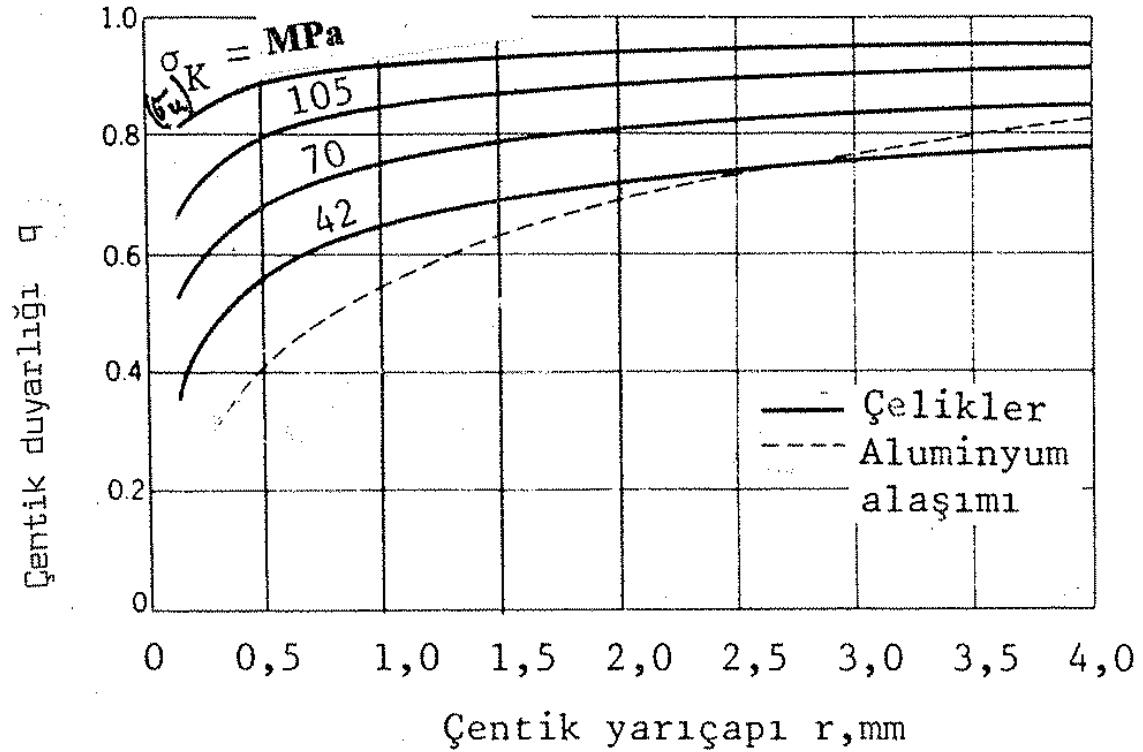
$$q = \frac{K_{\zeta}-1}{K_t-1}$$

faktördür (Şekil 2)

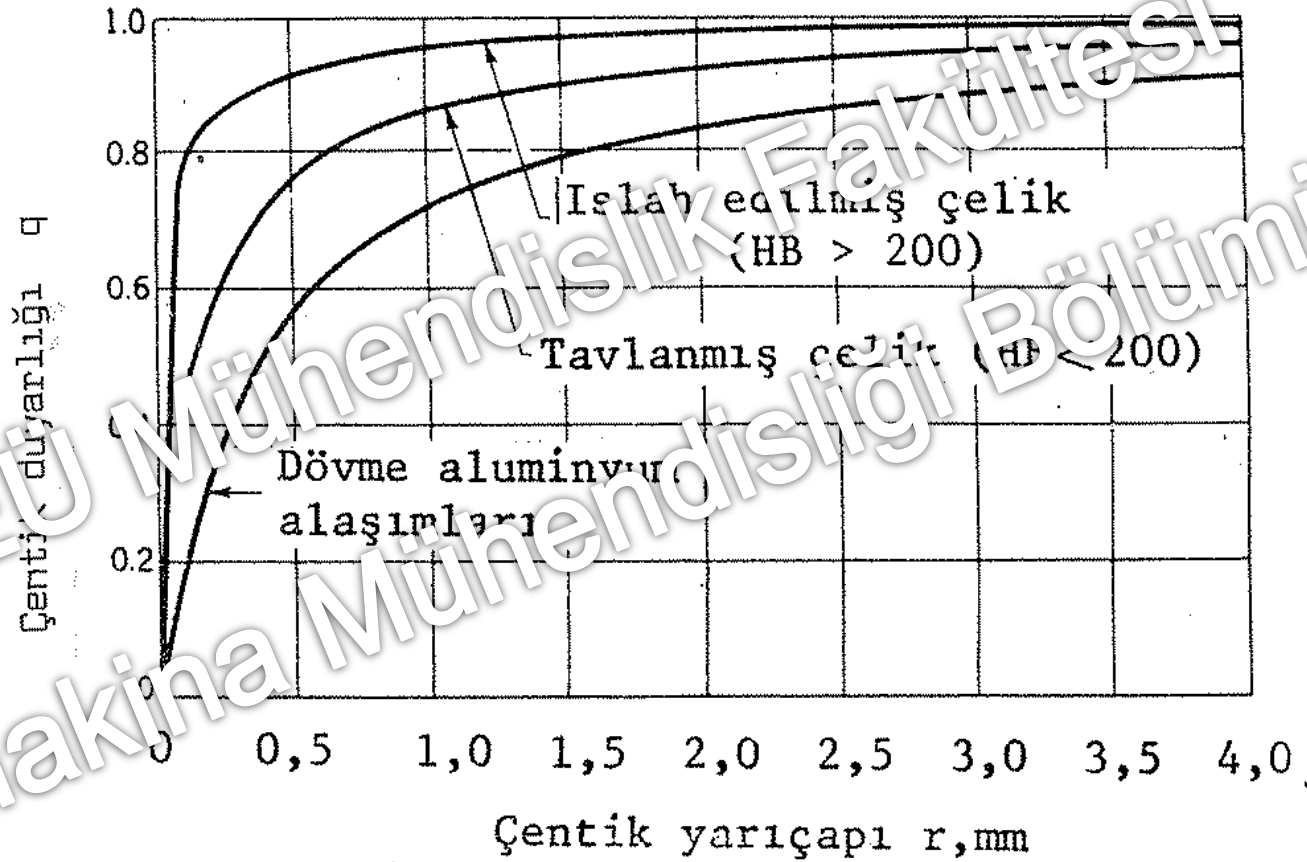
Çentik duyarlılığı az ise $q=0$, $K_{\zeta}=1$

Çentik duyarlılığı fazla ise $q=1$, $K_{\zeta}=K_t$

Şekil-2a Tam değişken eğilmeye veya tam değişken eksenel kuvvetlere maruz çelik ve dövme alüminyum alaşımları için çentik duyarlılığı (q).



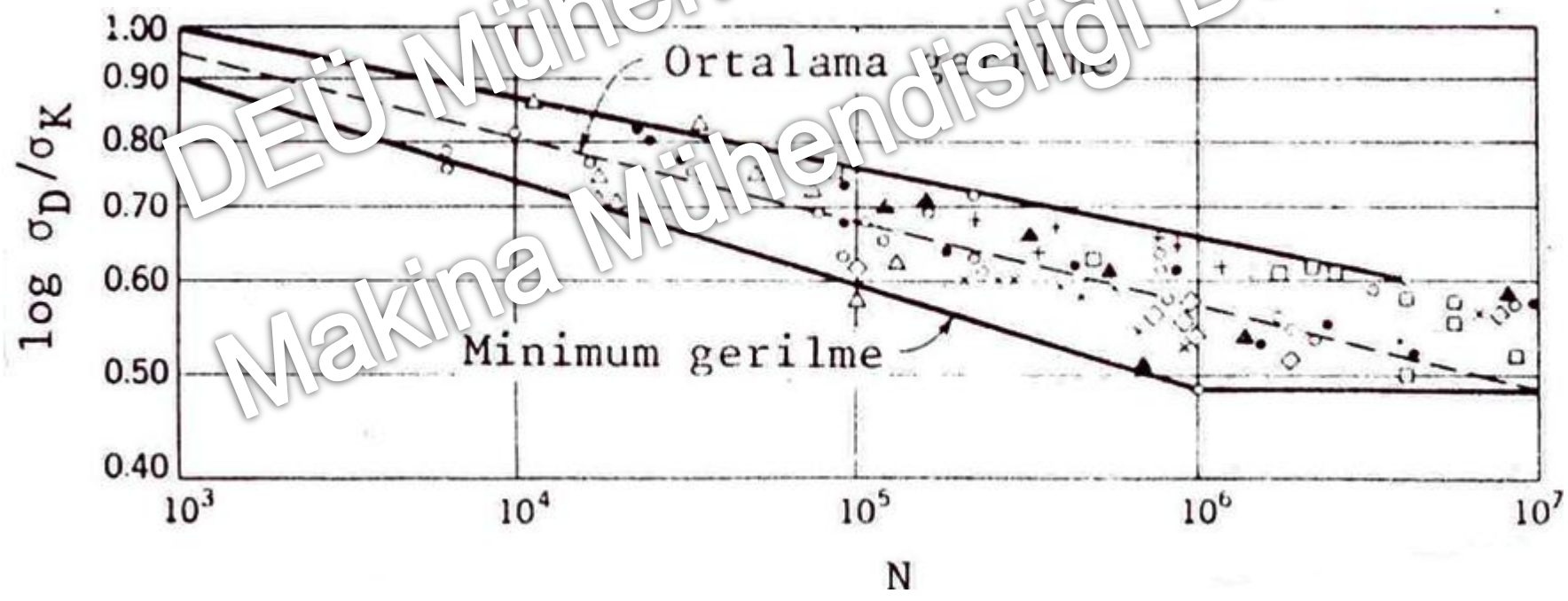
Şekil-2b Tam değişken burulmaya maruz çelik ve alüminyum alaşımları için çentik duyarlılığı (q).



- **Bilinmeyen etkiler faktörü (k_f):** k_f faktörü ile sürekli mukavemet sınırını azaltan bütün etkiler dikkate alınmaktadır. Bu etkenlerde ilgili bilgi birikimi çok fazla değildir. Ancak sürekli mukavemet değerini azalttıkları bilinmektedir. Eldeki az sayıda bilginin sınırlarına düşen bir hesaplama yapılıyorsa bu faktör kullanılır. Örnek olarak artık gerilmeler, metal püskürtme, korozyon elektrolitik kaplama vb. verilebilir.

Sonlu Ömür Mukavemeti

- Uygulamada ömrün sonsuz alınması yerine sonlu alınmasının tercih edildiği alanlar vardır. Bu araştırmacıları sonlu ömür ve sonsuz ömür mukavemet değerleri arasında ilişkiler kurarak deneyler yapmaya itmiştir.
- Bazı araştırmacılar bu amaçla yaptıkları deney sonuçlarını ömür ve σ_D / σ_K arasındaki ilişkiyi gösteren bir Wöhler diyagramı şeklinde vermişlerdir.



- Sonlu ömür bölgesindeki mukavemet sınırına zaman mukavemeti sınırı (σ_{zD}) adı verilir.
- $N=10^3$ çevrim için $\sigma_{zD} \approx 0,9 \sigma_K$
- $N=10^6$ çevrim için $\sigma_{zD} \approx 0,5 \sigma_K$ olarak alınabilir.

Buna göre yük tekrar sayısına bağlı olarak mukavemet hesabının esasları belirlenebilir.

- $N \leq 10^3$ ise hesap statik mukavemet sınırına
- $10^3 < N < 10^6$ ise hesap zamana bağlı mukavemet sınırına
- $N \geq 10^6$ ise hesap sürekli mukavemet sınırına

göre yapılır

- İstatistik değerlere göre sürekli mukavemet bölgesi için statik mukavemet sınırları ile sürekli mukavemet sınırları arasında şu bağıntılar verilebilir:

Çeliklerde

	$\sigma_K \leq 140 \text{ daN} / \text{mm}^2$	$\sigma_K > 140 \text{ daN} / \text{mm}^2$
Eğilme:	$\sigma_D = 0,5\sigma_K$	$\sigma_D = 70 \text{ daN} / \text{mm}^2$
Çekme:	$\sigma_{\zeta D} = 0,4\sigma_K$	$\sigma_{\zeta D} = 60 \text{ daN} / \text{mm}^2$
Burulma:	$\tau_{AK} \cong 0,58\sigma_{AK} ; \tau_K \cong 0,58\sigma_K ; \tau_D \cong 0,58\sigma_D = 0,29\sigma_K$	

Dökme demir ve dökme çelik için;

- Eğilme: $\sigma_D = 0,4\sigma_K$
- Burulma (dökme demir): $\tau_D = 0,8\sigma_D = 0,32\sigma_K$
- Zaman mukavemeti için:

$$\log \sigma_{zD} = -m \log N + b \quad ; \quad m = \frac{1}{3} \log 0,9 \frac{\sigma_K}{\sigma_D}$$

$$b = \log \frac{(0,9\sigma_K)^2}{\sigma_D} ;$$

$$\sigma_{zD} = \frac{10^b}{N^m} \quad 10^3 < N < 10^6 ;$$

$$N = \frac{10^{\frac{b}{m}}}{\sigma_{zD}^{\frac{1}{m}}}$$

