



SAE MÜHENDİSLİK
ENGINEERING & CONSULTING

TEKNİK YAYINLAR • No. 9

Yorulma ve Ömür Hesabı

Gerilme çevrimi, Wöhler eğrisi ve yorulma limiti; ortalama gerilme, çentik ve yüzey etkileri; Miner kuralı ile değişken genlikli yükleme ve ömrü uzatan uygulamalar

Hazırlayan: Ahmet Asım ESER — SAE Mühendislik ve Danışmanlık Hizmetleri

Sürüm: 1.0 • **Tarih:** Ekim 2026 • **saemuhendislik.com**

Bu doküman SAE Mühendislik tarafından özgün olarak hazırlanmıştır. Kaynak gösterilerek alıntı yapılabilir.

1. Giriş: Statik Hesap Neden Yetmez?

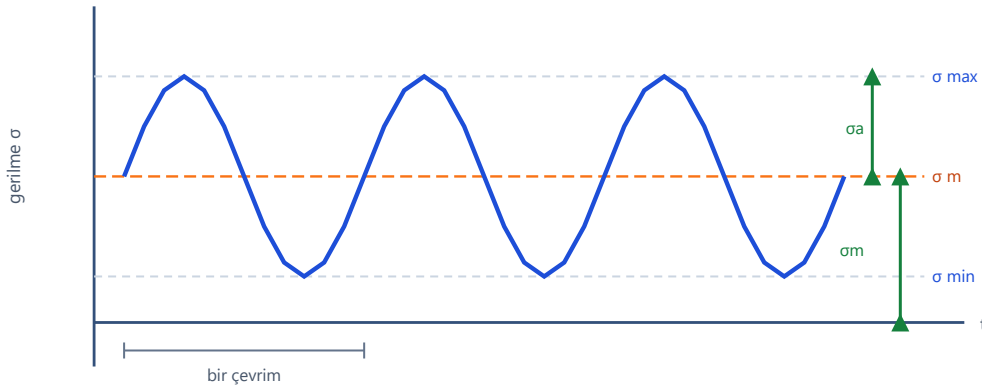
Yorulma, bir parçanın akma dayanımının çok altındaki gerilmeler altında, tekrarlı yükleme nedeniyle çatlak başlatıp kırılmasıdır. Makine parçaları nadiren tek seferde aşırı yüklenir; buna karşılık milyonlarca kez yüklenip boşalır. Servis hasarlarının büyük çoğunluğunun yorulma kaynaklı olmasının nedeni budur.

Statik hesap "bu yük bu parçayı kırar mı?" sorusuna cevap verir. Yorulma hesabı ise farklı bir soru sorar: "**bu yük, bu parçayı kaç çevrimde kırar?**" İkinci sorunun cevabı yalnızca gerilmeye değil; gerilmenin **genliğine**, **ortalamasına**, parçanın **yüzey durumuna**, **çentiklerine**, **boyutuna** ve malzemenin içindeki **kusurlara** bağlıdır.

Temel ilke: Yorulma bir **yüzey ve detay** olayıdır. Çatlak neredeyse her zaman yüzeyden, bir gerilme yığılması noktasından başlar. Bu yüzden yorulma ömrü, malzeme seçiminden çok **tasarım detayı ve yüzey kalitesiyle** kazanılır veya kaybedilir.

2. Gerilme Çevrimi ve Tanımlar

Yorulma hesabının dili, çevrimin dört büyüklüğü üzerine kuruludur:



Şekil 1 — Sabit genlikli gerilme çevrimi ve tanımlar. (SAE Mühendislik özgün çizimi.)

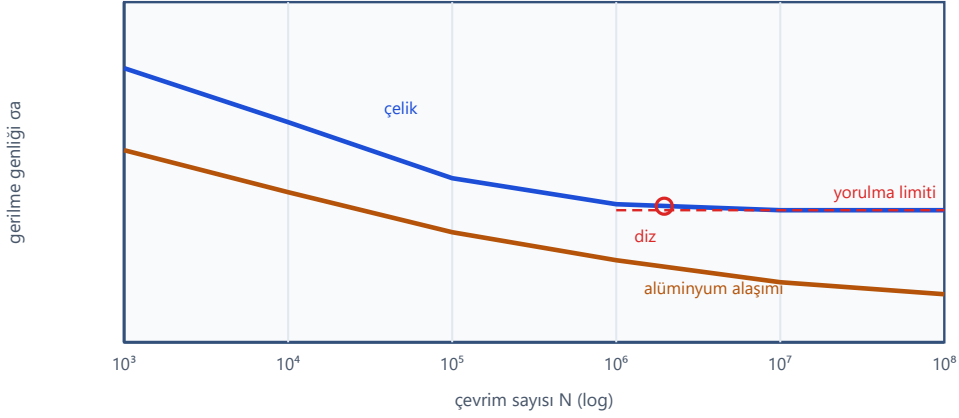
Büyüklik	Tanım	Not
Gerilme genliği σ_a	$(\sigma_{\max} - \sigma_{\min}) / 2$	Yorulma hasarını asıl yürüten büyüklük
Ortalama gerilme σ_m	$(\sigma_{\max} + \sigma_{\min}) / 2$	Çekme yönünde ise ömrü kısaltır
Gerilme aralığı $\Delta\sigma$	$\sigma_{\max} - \sigma_{\min}$	Kaynaklı yapılarda tercih edilen büyüklük
Gerilme oranı R	$\sigma_{\min} / \sigma_{\max}$	R = -1 tam değişken, R = 0 sıfır-çekme

3. Wöhler (S-N) Eğrisi ve Yorulma Limiti

Sabit genlikli deneylerde gerilme genliğine karşı kırılma çevrim sayısı çizildiğinde **Wöhler eğrisi** elde edilir. Logaritmik eksenle eğri, orta bölgede bir doğruya yaklaşır; bu bölge **Basquin bağıntısı** ile ifade edilir:

$$\sigma_a = \sigma'_f \cdot (2N_f)^b$$

Burada b, çelikler için tipik olarak -0,05 ile -0,12 arasındadır. Eğrinin karakteri malzeme ailesine göre köklü biçimde değişir:



Şekil 2 — Wöhler eğrisi: çelikte 10^6 – 10^7 çevrim civarında yatay bir yorulma limiti görülür; alüminyum alaşımlarında böyle bir sınır yoktur, eğri düşmeye devam eder. (SAE Mühendislik özgün çizimi, şematiktir.)

- **Çelikler:** 10^6 – 10^7 çevrim civarında eğri yatay bir platoya oturur. Bu **yorulma limiti** altındaki genliklerde parça teorik olarak sınırsız ömürlüdür. Kaba yaklaşım: düzgün yüzeyli, çentiksiz numune için $S_e' \approx 0,5 \cdot S_u$ ($S_u \approx 1400$ MPa'ya kadar; üstünde yaklaşık 700 MPa'da doyar).
- **Alüminyum, bakır, paslanmaz:** Gerçek bir yorulma limiti yoktur; dayanım 5×10^8 gibi belirli bir çevrim sayısında tanımlanır.

Dikkat: "Yorulma limitinin altındayım" güvencesi yalnızca **sabit genlikli ve çentiksiz** durumda geçerlidir. Tek bir aşırı yük darbesi, limitin altındaki çevrimleri de hasar verici hâle getirebilir; ayrıca korozyon varlığında çeliğin yorulma limiti pratikte ortadan kalkar.

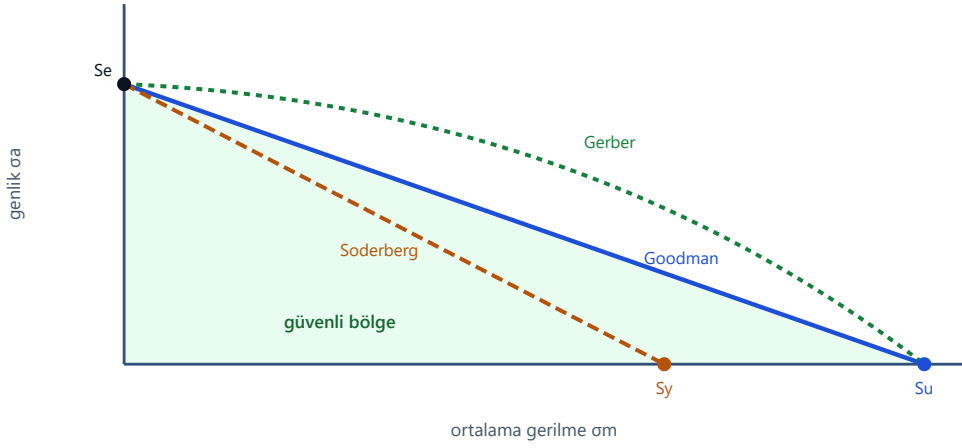
4. Yüksek ve Düşük Çevrimli Yorulma

Tür	Çevrim aralığı	Davranış	Yaklaşım
Düşük çevrimli (LCF)	$N < 10^4$	Her çevrimde plastik şekil değiştirme	Birim şekil değiştirme esaslı (Coffin–Manson)
Yüksek çevrimli (HCF)	$N > 10^5$	Davranış ağırlıklı elastik	Gerilme esaslı (Wöhler, Basquin)

Düşük çevrimli yorulmada ömür, gerilmeyle değil **plastik şekil değiştirme genliğiyle** ilişkilidir; termal çevrimlerle zorlanan parçalar, pres kalıpları ve nadir ama şiddetli yük alan elemanlar bu sınıfa girer. Makine elemanlarının çoğu ise yüksek çevrimli yorulma bölgesinde çalışır ve bu dokümanın ağırlık merkezi oradadır.

5. Ortalama Gerilmenin Etkisi

Aynı genlikte bile, çevrim bir **çekme ortalaması** üzerine biniyorsa ömür kısalır. Bu etki Haigh diyagramında üç klasik ölçütte modellenir:



Şekil 3 — Haigh diyagramı: Soderberg en muhafazakâr, Gerber deneysel veriye en yakın, Goodman ikisi arasında ve endüstride en yaygın ölçüttür. (SAE Mühendislik özgün çizimi.)

Ölçüt	Bağıntı	Kullanım
Goodman	$\sigma_a/S_e + \sigma_m/S_u = 1$	Gevrek-sünek genel kullanım; endüstri standardı yaklaşım
Gerber	$\sigma_a/S_e + (\sigma_m/S_u)^2 = 1$	Sünek malzemede deneysel veriye en yakın
Soderberg	$\sigma_a/S_e + \sigma_m/S_y = 1$	Akmayı da dışlar; en güvenli, en konservatif

Basma yönündeki ortalama gerilme yorulma ömrünü kısaltmaz, aksine uzatır. Bilye püskürtme (shot peening) ve yüzey sertleştirme gibi işlemlerin işe yaramasının temel nedeni, yüzeyde tam da bu **artık basma gerilmesini** bırakmalarıdır.

6. Çentik Etkisi

Delik, kanal, çap değişimi, diş dibi, kama yuvası — her geometrik süreksizlik yerel gerilmeyi büyütür. Teorik gerilme yığılma katsayısı K_t , elastik çözümünden gelir; ancak yorulmada etkili olan değer, malzemenin çentiğe duyarlılığıyla hafifletilmiş K_f 'dir:

$$K_f = 1 + q \cdot (K_t - 1)$$

Burada q çentik duyarlılığıdır (0 ile 1 arası): yumuşak, sünek ve iri taneli malzemelerde küçük; sert, yüksek dayanımlı çeliklerde 1'e yakındır. Bunun önemli bir sonucu vardır: **malzemenin dayanımını artırmak, çentikli bir parçada beklenen kazancı vermez**, çünkü aynı anda çentik duyarlılığı da artar.

Tasarımın en ucuz kazancı: Kesit geçişine yarıçap vermek, keskin köşeyi kaldırmak, kanal dibini yuvarlatmak — bunlar malzeme değiştirmeden yorulma ömrünü katlarla artırabilir. Yorulma problemlerinde ilk bakılacak yer malzeme sertifikası değil, **teknik resimdeki yarıçaplardır**.

7. Numuneden Parçaya: Düzeltme Katsayıları

Laboratuvar numunesinin yorulma limiti S_e' , gerçek parçaya doğrudan uygulanamaz. Aradaki fark düzeltme katsayılarıyla kapatılır (Marin yaklaşımı):

$$S_e = k_a \cdot k_b \cdot k_c \cdot k_d \cdot k_e \cdot S_e'$$

Katsayı	Neyi düzeltir	Pratik etki
k_a	Yüzey işlemi	Taşlanmış yüzey $\approx 0,9$; işlenmiş $\approx 0,7-0,8$; sıcak haddelenmiş $\approx 0,5$; dövme kabuğu $\approx 0,3-0,4$. En büyük tek kayıp kalemi.
k_b	Boyut	Kesit büyüdükçe düşer; eğilme/burulmada belirgin, eksenel yükte alınmaz
k_c	Yükleme tipi	Eğilme $1,0$ · eksenel $\approx 0,85$ · burulma $\approx 0,59$
k_d	Sıcaklık	Yüksek sıcaklıkta dayanım ve limit düşer
k_e	Güvenilirlik	%50 için $1,0$; %99 için $\approx 0,81$; %99,9 için $\approx 0,75$

Tabloya dikkatle bakıldığında görülen şudur: dövme kabuğu yüzeyiyle bırakılmış bir parça, tek başına bu nedenle yorulma dayanımının yarısından fazlasını kaybedebilir. **Yorulma, yüzeyde kazanılır veya kaybedilir.**

8. Değişken Genlikli Yükleme ve Miner Kuralı

Gerçek parçalar sabit genlikle yüklenmez. Değişken yük geçmişi önce **çevrim sayma** (yaygın olarak rainflow yöntemi) ile sabit genlikli çevrim gruplarına ayrılır; sonra birikimli hasar toplanır:

$$D = \sum (n_i / N_i) \leq 1$$

Burada n_i uygulanan, N_i ise o genlikte kırılmaya karşılık gelen çevrim sayısıdır. Miner kuralı doğrusaldır ve **yük sırasını dikkate almaz**; bu yüzden gerçek hasar değeri 0,3 ile 2,0 arasında dağılır. Tasarımda bu belirsizlik, D için 1 yerine **0,2–0,5 gibi bir hedef** seçilerek karşılanır.

Hesabın girdisi, hesabın kendisinden önemlidir: Yük spektrumu ölçülmemişse Miner toplamı bir sayı üretir ama bir bilgi üretmez. Yorulma hesabının güvenilirliği, ölçülmüş yük-zaman geçmişinin kalitesiyle sınırlıdır.

9. Yorulma Ömrünü Uzatan Uygulamalar

- **Yüzey pürüzlülüğünü düşürmek:** taşlama, parlatma; çizik ve takım izleri çatlak başlangıç noktasıdır.
- **Artık basma gerilmesi oluşturmak:** bilye püskürtme, yüzey ezme (roller burnishing), delik genişletme; indüksiyon ve sementasyon da bu etkiyi verir.
- **Çentikleri yumuşatmak:** radius büyütmek, kesit geçişini uzatmak, boşaltma kanalı açmak.
- **Malzeme temizliği:** inklüzyon ve gözenek, yüzey altı çatlak başlangıcı yaratır; kritik parçalarda temizlik derecesi şartnameye yazılır.
- **Korozyondan korumak:** korozyon yorulması, çeliğin yorulma limitini pratikte ortadan kaldırır.
- **Montaj gerilmelerini kontrol etmek:** aşırı sıkma torku, zorlamalı montaj ve hizasızlık, hesaba girmeyen ortalama gerilme ekler.

10. Deney ve Raporlama

Yorulma verisi, dağılımı geniş bir veridir; tek numuneyle sonuç çıkarılmaz. Deneyler ve değerlendirme standartlara bağlanır:

Konu	Standart
Eksenel kuvvet kontrollü yorulma	ISO 1099 · ASTM E466
Dönen çubuk eğilme	ISO 1143
Birim şekil değiştirme kontrollü (LCF)	ISO 12106 · ASTM E606
S-N verisinin istatistiksel değerlendirmesi	ASTM E739 · ISO 12107
Kaynaklı çelik yapılarda yorulma	EN 1993-1-9 (Eurocode 3)

Raporda bulunması gerekenler: numune geometrisi ve yüzey durumu, yükleme tipi ve R oranı, frekans ve ortam, kırılan numune sayısı, dağılım ve güven aralığı. Kırılan numunelerin **kırık yüzeyi** ayrıca değerlendirilir; çatlağın yüzeyden mi yoksa iç kusurdan mı başladığı, verinin yorumunu değiştirir — bu inceleme için **Teknik Yayınlar No.6: Hasar ve Kırık Yüzey Analizi**'ne bakılabilir.

11. Yararlanılan Temel Kaynaklar

1. Suresh, S., *Fatigue of Materials*, 2. baskı, Cambridge University Press, 1998.
2. Stephens, R.I., Fatemi, A., Stephens, R.R., Fuchs, H.O., *Metal Fatigue in Engineering*, 2. baskı, Wiley, 2000.
3. Schijve, J., *Fatigue of Structures and Materials*, 2. baskı, Springer, 2009.
4. Murakami, Y., *Metal Fatigue: Effects of Small Defects and Nonmetallic Inclusions*, 2. baskı, Elsevier, 2019.
5. Budynas, R.G., Nisbett, J.K., *Shigley's Mechanical Engineering Design*, 11. baskı, McGraw-Hill, 2020.
6. ASM International, *ASM Handbook Vol. 19: Fatigue and Fracture*, 1996.
7. *İlgili standartlar*: ISO 1099, ISO 1143, ISO 12106, ISO 12107, ASTM E466, ASTM E606, ASTM E739, EN 1993-1-9.