



SAE MÜHENDİSLİK
ENGINEERING & CONSULTING

TEKNİK YAYINLAR • No. 6

Hasar ve Kırık Yüzey Analizi

Kırılma türleri, makro ve mikro fraktografi okuma kuralları, sayısal değerlendirme araçları, laboratuvar teknikleri ve kök neden metodolojisi

Hazırlayan: Ahmet Asım ESER — SAE Mühendislik ve Danışmanlık Hizmetleri

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

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

1. Giriş: Hasar Analizi Nedir, Neden Yapılır?

Hasar analizi (failure analysis); servis sırasında kırılan, çatlayan, aşınan veya işlevini yitiren bir makine parçasının **neden** hasara uğradığını sistematik yöntemlerle ortaya koyma disiplini. Amaç suçlu aramak değil, hasarın **kök nedenini** (root cause) bulup tekrarını önlemektir: aynı hata düzeltilmezse aynı parça aynı yerden tekrar kırılır.

Kırık yüzey, hasarın "kara kutusudur": çatlağın nereden başladığını, nasıl ilerlediğini, yükün türünü ve büyüklüğünü, hatta malzemedeki üretim kusurlarını üzerinde taşır. Bu izleri okuma bilimine **fraktografi** denir. Doğru okunmuş bir kırık yüzey; tasarım, malzeme, imalat ve kullanım zincirinin hangi halkasının koptuğunu çoğu zaman tek başına söyler.

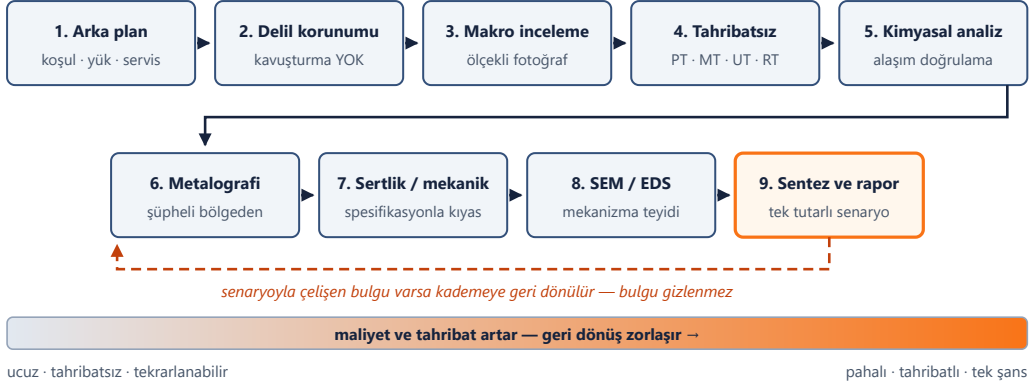
Temel ilke: Hasar analizinin çıktısı ya **kanıta dayalı kesin bir sonuçtur** ya da **eksik verinin açıkça listelenmesidir**. "Muhtemelen yorulmadır" gibi yuvarlak ifadeler mühendislik hükmü değildir; her hüküm bir gözleme ve bir kaynağa dayandırılmalıdır.

2. Metodoloji: Sistematik İnceleme Kademeleri

Hasar analizi, aceleyle SEM'e koşulan bir iş değildir; ucuz ve tahribatsız gözlemden pahalı ve tahribatlı analize doğru ilerleyen bir kademeler dizisidir:

- Arka plan toplama:** parçanın çalışma koşulları, yük spektrumu, servis süresi/çevrim sayısı, bakım ve hasar anı bilgisi.
- Delil korunumu:** kırık yüzeye dokunulmaz, iki parça **asla birbirine kavuşturulmaz** (yüzey ezilir, izler silinir); yüzey temizlenmeden önce fotoğraflarılır.
- Görsel / makro inceleme:** dik açıdan, ölçekli (cetvel/kumpas ile) makro fotoğraf; çatlak başlangıcı, ilerleme yönü ve son kopma bölgesi haritalanır.
- Tahribatsız muayene:** penetrant, manyetik partikül, ultrasonik veya X-ray ile ikincil çatlaklar ve iç kusurlar aranır.
- Kimyasal analiz:** malzemenin standarda uygunluğu (alaşım doğrulama).
- Metalografi:** numune **şüpheli bölgeden** alınır; mikroyapı, kaplama/sertleştirme derinliği, inklüzyon ve tane yapısı incelenir.
- Sertlik ve mekanik testler:** spesifikasyonla kıyas; gerekiyorsa çekme/darbe/yorulma.
- Elektron mikroskobu (SEM/EDS):** kırılma mekanizmasının mikro teyidi; yüzeydeki yabancı elementlerin (korozyon ortamı, kirlilik) tanısı.
- Sentez ve rapor:** tüm bulgular tek bir tutarlı senaryoda birleştirilir; senaryoyla çelişen bulgu varsa senaryo değiştirilir, bulgu gizlenmez.

En güçlü yöntem — karşılaştırma: Hasarlı parça ile aynı partiden/aynı görevden **sağlam bir parça** yan yana incelendiğinde, farklar (sertlik, mikroyapı, kimyasal bileşim, geometri) kök nedeni çoğu zaman doğrudan işaret eder.



Şekil 1. Hasar incelemesinin kademeleri. Sıra rastgele değildir: her adım bir sonrakinin **nereden numune alınacağını** belirler ve geri dönüşü olmayan işlemler (kesme, dağlama, mekanik deney) en sona bırakılır. Kırık yüzeyi temizlemek ya da parçaları kavuşturmak bu sıranın ilk iki adımını iptal eder; bu yüzden en pahalı hata, en başta yapılmalıdır. (şematik — SAE Mühendislik çizimi.)

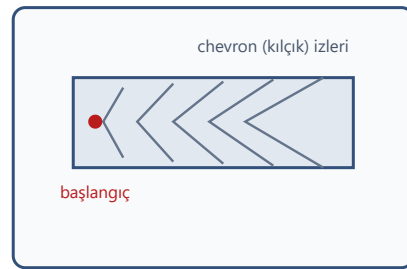
3. Kırılma Türleri

Tür	Makro görünüm	Mikro mekanizma	Tipik koşul
Sünek	Belirgin plastik deformasyon, boyun verme, 45° kesme dudağı, mat lifli yüzey	Mikroboşluk birleşmesi (dimple)	Aşırı yük, tok malzeme
Gevrek	Deformasyonsuz, düz, parlak taneli/granüler yüzey; başlangıcı gösteren chevron (kılçık) izleri	Klivaj (tane içi) veya intergranüler (tane sınırı)	Darbe, düşük sıcaklık, yüksek sertlik, çentik
Yorulma	Düz ve sedefsi ilerleme bölgesi + kumsal izleri; küçük bir son kopma alanı	Çevrimsel kayma → striasyon	Tekrarlı yük; statik dayanımın çok altında gerilmeler
Çevresel	Renk değişimi, çok kollu dallanmış çatlaklar, korozyon ürünleri	Gerilmeli korozyon (SCC), hidrojen gevrekliği, korozyon yorulması	Korozif ortam + çekme gerilmesi

Servis hasarlarının büyük çoğunluğu **yorulma** kaynaklıdır: makine parçaları nadiren tek seferde aşırı yüklenir, ama milyonlarca kez yüklenip boşaltılır. Bu nedenle fraktografinin ağırlık merkezi yorulma izlerinin okunmasıdır.



SÜNEK (koni-çanak)
plastik deformasyon VAR ✓



GEVREK (düz kırılma)
deformasyon YOK — izler kaynağı gösterir

Şekil 2. Sünek ve gevrek kırılmanın makro görünümü; gevrek kırılmada chevron izleri çatlak başlangıcına doğru yakınsar (şematik — SAE Mühendislik çizimi).

4. Makro Fraktografi: Kırık Yüzeyi Okumak

4.1 Yorulmanın imzası: kumsal izleri

Kumsal (plaj) izleri — çatlak cephesinin duraklamalarında oluşan eş merkezli yaylar — yorulmanın kesin makro işaretidir ve merkezleri daima **çatlak başlangıç noktasını** gösterir. Başlangıç noktası bulunduğundan sonra sorulacak soru bellidir: *çatlak neden tam buradan başladı?* (çentik, kusur, korozyon çukuru, işleme izi...)

4.2 İki bölge kuralı ve zamanlama

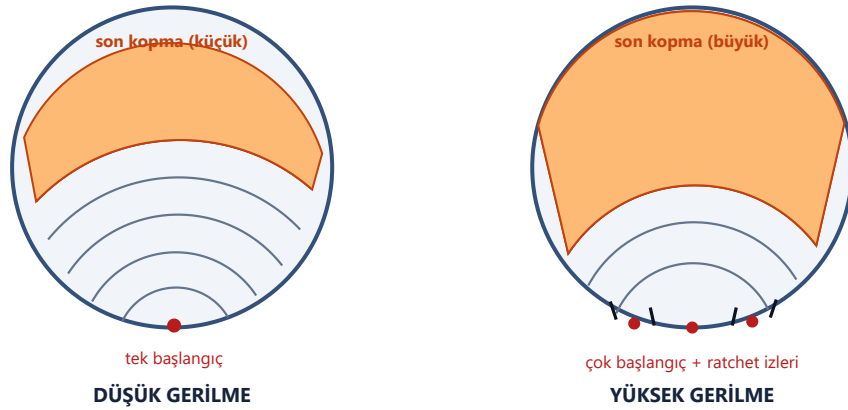
Kırık yüzeyde **koyu/oksitlenmiş bölge**, son kopmadan **önce** açık olan eski çatlağı; **parlak/taze bölge** son ani kopmayı gösterir. Bu ayırım her analizde zorunlu bir zamanlama çıkarımı sağlar: çatlak ne kadar süredir ilerliyordu, parça ne zamandır "yaralıydı"?

4.3 Son kopma alanı → gerilme seviyesi

Yorulma çatlağı, kalan kesit yükü taşıyamaz hâle gelince ani kopmayla tamamlanır. **Son kopma alanının büyüklüğü, parçaya etkiyen anma gerilmesinin göstergesidir:** büyük son kopma alanı = yüksek gerilme; küçük son kopma alanı = düşük gerilme. Düşük gerilme altında erken kopan parçada gizli kusur aranır. Buna karşılık **ömür (çevrim sayısı) yüzeyden okunamaz; ölçülür veya kayıtlardan alınır.**

4.4 Ratchet izleri: kaç noktadan başladı?

Farklı düzlemlerde başlayıp birleşen çatlakların ara basamakları olan **ratchet izleri**, başlangıç sayısını sayar: çok sayıda başlangıç = yüksek gerilme yığılması (keskin çentik, sıkı geçme) veya yüksek yük demektir.



Şekil 3. Dairesel kesitli bir milde yorulma kırık yüzeyi: kumsal izleri başlangıcı gösterir; son kopma alanının oranı gerilme seviyesini, başlangıç sayısı gerilme yığılmasını ele verir (şematik — SAE Mühendislik çizimi).

Ters eğme ipucu: Kesitin **ortasında koyu bant**, iki karşı yüzeyden ilerleyen çatlakların ortada bulunduğu **çift taraflı (ters) eğme** yorulmasının işaretidir ($R=-1$); bantın koyuluğu basma yarı-çevriminde yüzeylerin birbirine sürtünmesinden gelir — metalürjik kusur sanılmamalıdır.

5. Mikro Fraktografi (SEM) ve Tuzaklar

- **Dimple (çukurcuk):** sünek kırılmanın mikro kanıtı; çukurcukların yönü yükleme türünü (çekme/kayma) gösterir.
- **Klivaj:** düz kristalografik fasetler + "nehir izleri"; gevrek tane içi kırılma.

- **Striasyon:** her yük çevriminde çatlağın bir adımını temsil eden ince paralel çizgiler; yorulmanın mikro teyidi. Striasyon aralığından çatlak ilerleme hızı kestirilebilir.
- **İntergranüler yüzey ("kaya şekeri"):** tane sınırlarından kırılma; aşırı ısınma/yanma, temper gevrekliği, hidrojen veya tane sınırı zayıflığının işareti.

İki kritik tuzak: (1) **Striasyonun yokluğu yorulmayı dışlamaz** — sert çeliklerde striasyon çoğu zaman seçilemez; makro kumsal izleri varsa hüküm yorulmadır. (2) Perlitli çeliklerde **perlit lamelleri striasyona çok benzer**; lamel aralığının yük çevrimiyle ilişkisi yoktur — büyütme serisiyle ve yönelimle ayırt edilir.

6. Sayısal Değerlendirme Araçları

- **Gerilme yığılması:** $K_t = 2\sqrt{(a/\rho)}$ (eliptik çentik); yerel gerilme = $K_t \times$ anma gerilmesi. Enine delik için $K_t \approx 3$; keskin köşeli pim delikleri 5–6,5'e çıkabilir. Radyus büyütme, yorulma ömrünün en ucuz iyileştirmesidir.
- **Yorulma sınırı kestirimi:** çeliklerde $\approx 0,5 \times$ çekme dayanımı (genel bant %35–60); **alüminyum ve bakır alaşımlarında belirgin yorulma sınırı yoktur.**
- **Sertlikten dayanım:** çelikte $TS(MPa) \approx 3,45 \times HB$ — spesifikasyon kıyası için hızlı köprü.
- **Küçük kusur etkisi (Murakami $\sqrt{area}$):** $\sigma_w = 1,43(HV+120)/(\sqrt{area})^{1/6}$ — yüzeydeki bir kusurun yorulma sınırını ne kadar düşürdüğünü kestirir; sert malzeme küçük kusura karşı daha hassastır.
- **Ömür dağılımı:** yorulma ömrü doğası gereği saçılımlıdır; aynı koşulda ~2 kat fark normaldir ve $\pm 17\%$ 'lik gerilme farkı ömrü ~10 kat değiştirebilir. **Tek numune kanıt değildir;** karşılaştırmalı hüküm için 3–5 numune gerekir.
- **Erken kırılma eşiği:** ölçülen ömür hedefin $\sim 70\%$ 'inin altındaysa "beklenenden erken kırılma" kabul edilir ve kusur/çentik/sertlik zinciri sorgulanır.

7. Laboratuvar Teknikleri ve Ölçüm Güvenilirliği

Teknik	Ne verir?	Dikkat edilecekler
Optik emisyon (OES)	Hızlı alaşım doğrulama	C, S, P güvenilir ölçülmez; sınır değerler yanma yöntemiyle (LECO) teyit edilir; dökme demirde C okuması artefakt verebilir
Metalografi	Mikroyapı, sertleştirme derinliği, dekarbürizasyon, inklüzyon (ASTM E45)	Numune şüpheli bölgeden alınmalı; makro NEREDEN'i verir, NEDEN'i mikro verir
Sertlik	Isıl işlem doğrulama, kesit taraması, segregasyon haritası	Tek nokta yetmez; kesit boyunca profil alınır
SEM + EDS	Kırılma mekanizması + yüzeydeki yabancı elementler	Yüzey temizliği delili silmeden yapılmalı (replika/ultrasonik)
Tahribatsız muayene	İkincil çatlaklar, iç kusurlar	Kırılmamış "kardeş" parçalarda da çatlak taraması yapılmalı

8. Kök Neden Aileleri

- **Tasarım kaynaklı:** keskin kesit geçişleri, küçük radyuslar, kama yuvası/delik gibi çentikler — çatlak hep en yüksek K_t noktasından başlar.
- **Malzeme kaynaklı:** inklüzyonlar, döküm kusurları (gaz boşluğu **yuvarlak-pürüzsüz**, çekinti **çentikli-dendritik** cıdarla ayırt edilir), sfero dökümde düşük küresellik veya zehirleyici eser elementler, yanlış alaşım.
- **İmalat kaynaklı:** su verme çatlakları, taşlama yanığı, dekarbürizasyon, dövme katlanması (lap), yüzey sertleştirme geçiş bölgesinin yanlış konumu, aşırı ısınmış dövme yapısı. **Kural:** üretim veya montaj anında kırılan parçada, önceden var olan bir anormallik aranır.
- **Servis/montaj kaynaklı:** aşırı sıkma torku, darbeleri aşırı yük, korozyon çukurlaşması, titreşim. Kusur cıdarı ipucu verir: **pürüzsüz/oksitli cıdar** üretim kökenli eski kusuru, **keskin/taze cıdar** servis hasarını gösterir.

9. Raporlama İlkeleri

İyi bir hasar analizi raporu yedi zorunlu bölümden oluşur: (1) arka plan ve servis öyküsü, (2) görsel/makro inceleme, (3) laboratuvar bulguları, (4) mekanizma tayini, (5) kök neden değerlendirmesi, (6) sonuç, (7) düzeltici/önleyici öneriler. Üç yazım kuralı her raporu güçlendirir:

- Her hüküm **gözlem + kaynak atfı** ile desteklenir; yorum ile gözlem cümleleri karışmaz.
- Fotoğraflar ölçekli ve yönü işaretlidir; okuyucu, analizcinin gördüğünü kendi gözüyle doğrulayabilmelidir.
- Sonuç ya kesindir ya da eksik veri (ör. çevrim kaydı, sağlam kıyas parçası, yük spektrumu) açıkça istenir — **belirsizlik gizlenmez, adlandırılır**.

10. Yararlanılan Temel Kaynaklar

1. ASM International, *ASM Handbook Vol. 11: Failure Analysis and Prevention*, 2002.
2. ASM International, *ASM Handbook Vol. 12: Fractography*, 1987.
3. Wulpi, D.J., *Understanding How Components Fail*, 3. baskı, ASM International, 2013.
4. Kayalı, E.S., Eruslu, N., Ürgen, M., Taptık, Y., Çimenoglu, H., *Hasar Analizi Seminer Notları*, TMMOB Metalurji Mühendisleri Odası, 1997.
5. Eryürek, İ.B., *Hasar Analizi*, Birsan Yayınevi, İstanbul, 1993.
6. Murakami, Y., *Metal Fatigue: Effects of Small Defects and Nonmetallic Inclusions*, 2. baskı, Elsevier, 2019.