



SAE MÜHENDİSLİK
ENGINEERING & CONSULTING

TEKNİK YAYINLAR • No. 15

Kırılma Mekaniği ve Tokluk

Gerilme şiddet faktörü ve K_{IC} , kalınlık etkisi ve düzlem şekil
değiştirme, plastik bölge, kritik kusur boyutu, CTOD ve J integrali,
sünek-gevrek geçiş

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: Dayanım Hesabı Neden Yetmez?

Klasik mukavemet hesabı tek bir soru sorar: **gerilme, dayanımı aşıyor mu?** Bu soru, malzemenin kusursuz olduğu varsayımına dayanır. Oysa gerçek parçalarda daima bir süreksizlik vardır — döküm boşluğu, kaynak hatası, işleme çiziziği, yorulma çatlakları ya da bir korozyon çukuru.

Kırılma mekaniği, soruyu değiştirir: "Bu parçada şu boyutta bir çatlak varken, hangi gerilmede kırılır?" Böylece üç büyüklük tek bir denklemde birleşir: **gerilme (σ)**, **çatlak boyutu (a)** ve **malzemenin kırılma tokluğu (K_{Ic})**. İki bilindiğinde üçüncüsü hesaplanır — bu, modern hasar analizinin ve "hasara dayanıklı tasarımın" temelidir.

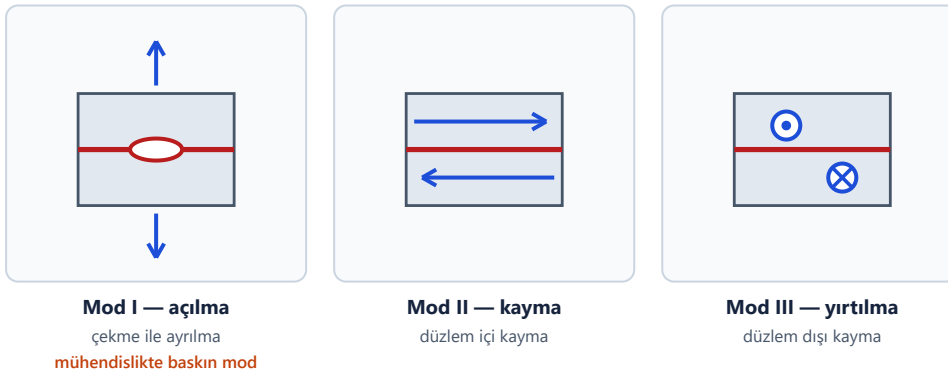
Tarihsel çerçeve: Griffith 1920'de cam için enerji temelli bir ölçüt kurdu; metallerde plastik iş baskın olduğu için bu ölçüt doğrudan çalışmadı. 1950'lerde **Irwin** plastik işi de kapsayan düzeltmeyi ve **gerilme şiddet faktörü K** kavramını getirdi. Kırılma mekaniğinin mühendislik disiplini hâline gelmesini, II. Dünya Savaşı gemilerinde ve ilk jet yolcu uçaklarında yaşanan gevrek kırılma hasarları hızlandırdı.

2. Gerilme Şiddet Faktörü K

Çatlak ucunda elastik çözüm, gerilmenin **teorik olarak sonsuza gittiğini** söyler; dolayısıyla "çatlak ucundaki gerilme" ile hesap yapılamaz. Bunun yerine çatlak ucu gerilme alanının **şiddetini** tek bir sayıyla ölçeriz:

$$K = Y \cdot \sigma \cdot \sqrt{\pi a} \quad [\text{MPa} \cdot \sqrt{\text{m}}]$$

- σ — çatlak yokmuş gibi hesaplanan nominal gerilme
- a — çatlak boyu (kenar çatlaklarında derinlik, iç çatlakta yarı uzunluk)
- Y — **geometri faktörü**: çatlak ve parçanın şekline bağlı boyutsuz katsayı (sonsuz levhada merkezi çatlak için 1,0; kenar çatlakları için $\approx 1,12$). El kitaplarından veya sonlu elemanlar çözümünden alınır.

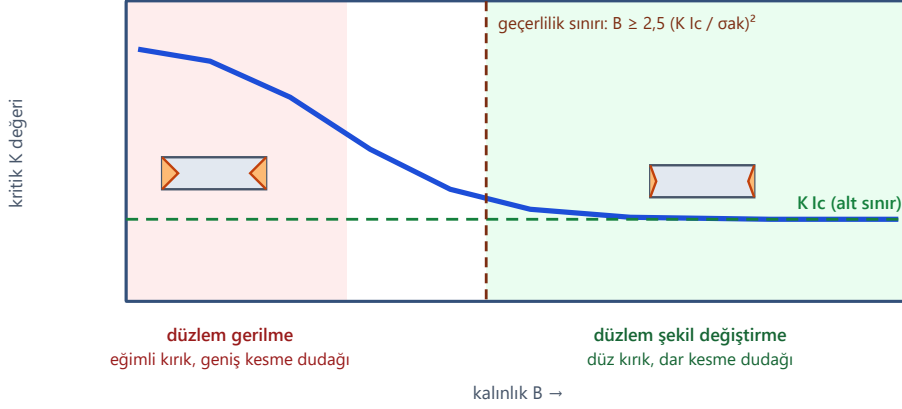


Şekil 1 — Çatlak yüzeylerinin üç temel yüklenme modu. Mühendislik yapılarında hasarların ezici çoğunluğu **Mod I** ile gelişir; bu yüzden tokluk da Mod I için tanımlanır ve K_{Ic} yazılır. (SAE Mühendislik özgün çizimi, şematiktir.)

Çatlak büyüdükçe K büyür. Malzemeye özgü bir kritik değere ulaşıldığında çatlak **kararsız** hâle gelir ve kırılma gerçekleşir. Bu kritik değer malzemenin **kırılma tokluğudur**.

3. Kırılma Tokluğu K_{Ic} ve Kalınlık Etkisi

Ölçülen kritik K değeri, numunenin **kalınlığına bağlıdır**. İnce kesitte malzeme kalınlık yönünde serbestçe daralabilir (**düzlem gerilme**); plastik bölge büyür, tokluk yüksek çıkar ve kırık yüzeyinde geniş **kesme dudakları** görülür. Kalınlık arttıkça bu serbestlik kaybolur (**düzlem şekil değiştirme**), çatlak ucunda üç eksenli çekme oluşur, plastik akma bastırılır ve tokluk düşerek bir **alt sınıra** yakınsar. İşte bu alt sınır, malzeme sabiti kabul edilen K_{Ic} 'dir.



Şekil 2 — Ölçülen kırılma tokluğu kalınlıkla düşer ve K_{Ic} 'ye yakınsar. Kırık yüzeyindeki kesme dudaklarının genişliği, hangi rejimde bulunduğu **göze okunabilir** göstergesidir (bkz. **No.6**). Geçerli bir K_{Ic} deneyi için kalınlık kriteri sağlanmalıdır. (SAE Mühendislik özgün çizimi, şematiktir.)

ASTM E399'a göre geçerli bir düzlem şekil değiştirme ölçümü için kalınlık, çatlak boyu ve kalan kesit şu koşulu sağlamalıdır:

$$B, a, (W - a) \geq 2,5 \cdot (K_{Ic} / \sigma_{ak})^2$$

Pratik sonuç: Tokluğu yüksek, akma dayanımı düşük malzemelerde (yapı çeliği gibi) bu koşul **onlarca santimetre kalınlıkta numune** gerektirir — laboratuvarda üretilemez. Bu yüzden sünek malzemelerde K_{Ic} yerine **CTOD veya J integrali** kullanılır (§6). " K_{Ic} ölçemedik" demek, malzemenin kötü olduğu değil, **çok tok olduğu** anlamına gelebilir.

Malzeme (tipik)	$K_{Ic} \approx (\text{MPa}\cdot\sqrt{\text{m}})$	Not
Alümina / mühendislik seramiği	3 – 5	Gevrek; çatlığa toleransı yok
Dökme demir (gri)	6 – 20	Grafit lamelleri iç çentik gibi davranır
Alüminyum 7075-T6	24 – 29	Yüksek dayanım, düşük tokluk
Alüminyum 2024-T3	30 – 40	Uçak gövde sacında tokluk tercih edilir
Yüksek dayanımlı ıslah çeliği	50 – 100	Dayanım arttıkça tokluk genelde düşer
Ti-6Al-4V	75 – 115	Özgül dayanım + iyi tokluk
Yumuşak yapı çeliği (oda sıcaklığı)	> 150 (çoğu zaman geçersiz)	Düzlem şekil değiştirme koşulu sağlanamaz → CTOD / J

4. Çatlak Ucu Plastik Bölgesi

Gerçek malzemede çatlak ucundaki gerilme sonsuza gitmez; akma dayanımına ulaştınca malzeme plastik davranır ve küçük bir **plastik bölge** oluşur. Yaklaşık yarıçapı:

$$\text{düzlem gerilme: } r_y = (1/2\pi) (K/\sigma_{ak})^2 \cdot \text{düzlem şekil değiştirme: } r_y = (1/6\pi) (K/\sigma_{ak})^2$$

Lineer elastik kırılma mekaniği (LEKM), ancak bu bölge **çatlak boyu ve kalan kesit yanında küçük kaldığında** geçerlidir ("küçük ölçekli akma"). Plastik bölge büyüdüğünde K artık alanı tanımlayamaz; elastoplastik parametrelere geçilir.

5. Kritik Kusur Boyutu — Hesabın Kalbi

Tasarım bağıntısı tersine çevrildiğinde, bir parçanın **taşıyabileceği en büyük çatlak**ı verir:

$$a_{kr} = (1/\pi) \cdot (K_{Ic} / (Y \cdot \sigma))^2$$

Örnek

Kenar çatlaklı bir levha ($Y \approx 1,12$), servis gerilmesi $\sigma = 300 \text{ MPa}$:

Malzeme tokluğu	Kritik çatlak boyu a_{kr}	Yorum
$K_{Ic} = 60 \text{ MPa}\cdot\sqrt{\text{m}}$	$\approx 10 \text{ mm}$	Muayene ile güvenilir biçimde bulunabilir
$K_{Ic} = 120 \text{ MPa}\cdot\sqrt{\text{m}}$	$\approx 41 \text{ mm}$	Tokluk 2 kat → tolere edilen çatlak 4 kat
$K_{Ic} = 30 \text{ MPa}\cdot\sqrt{\text{m}}$	$\approx 2,5 \text{ mm}$	Rutin muayenenin eşiğine yakın — tehlikeli

İki temel çıkarım: (1) Kritik çatlak boyu tokluğun **karesiyle** büyür; tokluktaki küçük kazanım, tolere edilen kusurda büyük kazanımdır. (2) Gerilmeyi yarıya indirmek kritik çatlak **dörde katlar**. Bu yüzden gevrek kırılma riskine karşı en etkili iki önlem, **tokluğu yükseltmek** ve **çalışma gerilmesini düşürmektir** — dayanımı yükseltmek çoğu zaman tersine etki eder.

6. Elastoplastik Yaklaşım: CTOD ve J İntegrali

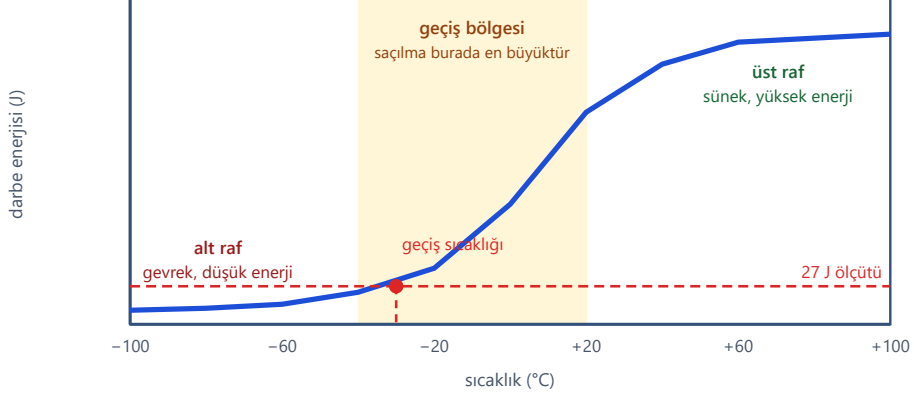
Sünek malzemelerde çatlak ucu belirgin biçimde plastik olarak açılır ve körelir. İki parametre bu davranışı ölçer:

- CTOD (δ) — çatlak ucu açılma yer değiştirmesi:** çatlak ucunun fiziksel olarak ne kadar açıldığıdır. Sezgisel ve saha diline yakındır; kaynaklı yapıların kabul edilebilirlik değerlendirmelerinde yaygındır.
- J integrali:** çatlak ucunu çevreleyen yoldan bağımsız bir enerji integralidir. Lineer elastik koşulda $J = G = K^2/E'$ olur; yani K ile J aynı dilin iki lehçesidir. Elastoplastik bölgede ise yalnızca J geçerlidir.

Deneyler ISO 12135 ve ASTM E1820'ye göre yapılır. Sonuçlar, mevcut bir kusurun kabul edilebilirliğini değerlendirmek için **BS 7910** veya **API 579-1/ASME FFS-1** (Fitness-for-Service) yöntemlerine girdi olur. Bu yöntemler, kırılma ve plastik çökme risklerini birlikte değerlendiren **hasar değerlendirme diyagramı (FAD)** yaklaşımını kullanır.

7. Sünek–Gevrek Geçiş ve Charpy Deneyi

Hacim merkezli kübik yapıdaki çelikler, sıcaklık düştükçe **sünekten gevreğe** geçer. Bu geçiş kırılma mekaniği açısından bağımsız bir risk yaratır: oda sıcaklığında tok olan bir çelik, kış şartlarında gevrek davranabilir.



Yapı çeliklerinde tokluk, **EN 10025** kalite grubu harfiyle satın alınır. Gruplar, 27 J (veya 40 J) enerjinin hangi sıcaklıkta sağlandığını belirtir:

Kalite	Darbe ölçütü	Kullanım
JR	+20 °C'de 27 J	İç mekân, ılıman şartlar
J0	0 °C'de 27 J	Genel dış ortam
J2	-20 °C'de 27 J	Soğuk iklim, kaynaklı taşıyıcı yapı
K2	-20 °C'de 40 J	Daha yüksek tokluk istenen kritik bağlantı

Charpy K_{IC}'nin yerine geçmez. Charpy, çentikli bir numunenin kırılması için gereken **toplam enerjiyi** verir; mutlak ve boyut bağımsız bir malzeme sabiti değildir ve doğrudan hesaba girmez. Buna karşılık ucuz, hızlı ve ayırt edicidir: **kalite kontrol ve geçiş sıcaklığı belirleme** için standart araçtır. Deneyler ISO 148-1 / ASTM E23'e göre yapılır; raporda enerjinin yanında **yanal genişleme** ve **kırık yüzeyindeki kesme oranı** da verilir.

8. Tokluğu Düşüren Etkenler

Etken	Etkisi
Düşük sıcaklık	BCC çeliklerde geçiş sıcaklığının altında tokluk çöker
Yüksek yükleme hızı	Darbe koşulunda geçiş sıcaklığı yukarı kayar; statikte tok olan malzeme darbeye gevrek olabilir
Kalın kesit	Üç eksenli gerilme, plastik akmayı bastırır (§3)
Çentik ve kesit değişimi	Yerel gerilme yığılması + kısıtlama; tasarımda yarıçap vermek en ucuz tokluk kazanımıdır
İri tane	Tane küçültme, dayanım ve tokluğu birlikte artıran tek mekanizmadır (bkz. No.7)
Temper gevrekliği	İslah çeliğinde 350–550 °C bandında yavaş soğuma; P, Sn, As, Sb safsızlıkları tane sınırına çöker
Hidrojen	Gecikmeli gevrek kırılma (bkz. No.11 , No.12)
Kaynak ITAB'ı	İri taneli bölge hattın en düşük tokluklu noktasıdır (bkz. No.11)
Yaşlanma ve ışınlama	Servis süresince geçiş sıcaklığının yukarı kayması (basınçlı kaplarda izlenir)

9. Yorulma Çatlağı ile Bağlantı: Paris Yasası

Çoğu gerçek hasar tek adımda olmaz: önce bir yorulma çatlağı yavaşça büyür, kritik boyuta ulaştığında ani kırılma gerçekleşir. Çatlak ilerleme hızı, gerilme şiddet faktörü aralığı ΔK ile ifade edilir:

$$da/dN = C \cdot (\Delta K)^m \quad (\text{çelikler için tipik } m \approx 2-4)$$

- Bölge I:** ΔK , eşik değeri ΔK_{th} 'nin altındayken çatlak pratikte ilerlemez.
- Bölge II:** Paris bölgesi — log-log grafikte doğrusal; ömür hesabı bu bölgede integre edilerek yapılır.
- Bölge III:** $K_{maks} \rightarrow K_{Ic}$ 'ye yaklaşır, hız hızla artar ve kırılma gelir.

Böylece **No.9**'daki ömür hesabı ile bu bölümdeki kritik boyut hesabı tek bir zincirde birleşir: başlangıç kusuru $\rightarrow \Delta K$ ile büyüme $\rightarrow a_{kr} \rightarrow$ kırılma. Deney yöntemi ASTM E647'dir.

10. Hasara Dayanıklı Tasarım ve Muayene Bağı

Kırılma mekaniğinin mühendislikteki en değerli ürünü, **muayene ile tasarımı aynı hesapta buluşturmasıdır**:

- Malzeme ve gerilmeden **kritik çatlak boyu** a_{kr} hesaplanır.
- Tahribatsız muayenenin **güvenilir biçimde bulabildiği en küçük kusur** a_{bul} belirlenir (bkz. **No.14**, POD).
- Güvenlik şartı: $a_{bul} < a_{kr}$ olmalıdır. Aksi hâlde parça, muayene geçtiği hâlde kırılabilir.
- Paris yasası ile a_{bul} 'dan a_{kr} 'ye ulaşma süresi hesaplanır; **muayene aralığı** bu sürenin güvenli bir kesri olarak (yaygın olarak yarısı) seçilir.

Bir hasar incelemesinde ilk üç soru: (1) Başlangıç kusuru neydi ve ne kadardı? (2) Kırılma anındaki gerilme neydi? (3) Malzemenin o sıcaklıktaki tokluğu neydi? Bu üçü, kırık yüzeyinden ölçülen çatlak boyu (bkz. **No.6**) ile birlikte olayın **sayısal olarak** yeniden kurulmasını sağlar — "gevrek kırılmış" demekle yetinilmez.

11. Standartlar ve Kontrol Listesi

Konu	Standart
Düzlem şekil değiştirme kırılma tokluğu K_{Ic}	ASTM E399
J integrali, CTOD ve direnç eğrisi	ASTM E1820 · ISO 12135
Kaynaklı bağlantıda tokluk deneyi	ISO 15653
Charpy çentik darbe deneyi	ISO 148-1 · ASTM E23
Yorulma çatlak ilerleme hızı (da/dN)	ASTM E647
Kusur kabul edilebilirliği / servise uygunluk	BS 7910 · API 579-1 / ASME FFS-1
Yapı çeliği kalite grupları (JR, J0, J2, K2)	EN 10025-2
Kaynaklı çelik yapılarda yorulma	EN 1993-1-9

1. En düşük **servis sıcaklığı** tanımlandı mı? Malzeme kalite grubu o sıcaklığa göre mi seçildi?
2. Yükleme **darbeli** mi? Öyleyse geçiş sıcaklığı kayması hesaba katıldı mı?
3. Kesit kalınlığı, düzlem şekil değiştirme koşulunu doğuracak kadar büyük mü?
4. Kritik çatlak boyu hesaplandı mı? Doğru **Y geometri faktörü** kullanıldı mı?
5. Muayene eşiği a_{bul} , a_{kr} 'den belirgin biçimde küçük mü?
6. Çatlak büyüme süresi ve buna dayalı **muayene aralığı** belirlendi mi?
7. Kaynaklı bağlantıda ITAB tokluğu ve artık gerilmeler değerlendirildi mi?
8. Çentik, keskin köşe ve ani kesit değişimi tasarımdan temizlendi mi?

12. Yararlanılan Temel Kaynaklar

1. Anderson, T.L., *Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications*, 4. baskı, CRC Press, 2017.
2. Broek, D., *Elementary Engineering Fracture Mechanics*, 4. baskı, Martinus Nijhoff, 1986.
3. Hertzberg, R.W., Vinci, R.P., Hertzberg, J.L., *Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials*, 5. baskı, Wiley, 2012.
4. Griffith, A.A., "The Phenomena of Rupture and Flow in Solids", *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 221, 1921.
5. ASM International, *ASM Handbook Vol. 19: Fatigue and Fracture*, 1996.
6. *İlgili standartlar*: ASTM E399, ASTM E1820, ASTM E23, ASTM E647, ISO 12135, ISO 148-1, ISO 15653, BS 7910, API 579-1/ASME FFS-1, EN 10025-2, EN 1993-1-9.