

# Düşük Dayançlı Çeliklerde Kırılma Tokluğu (JIC) Değerlerinin Bulunması

Bu çalışmada, düşük dayançlı bir çelikten alınan ön çatlaklı numuneler ile, -80 ile 70°C sıcaklık aralığında, üç noktalı, yavaş eğme deneyleri yapılmıştır. Komplians, analitik ve eşdeğer enerji metotları ile J-entegrali bulunmuş ve 0.95 P<sub>mak</sub> olarak alınan kritik yüke uygun, çatlama tokluğu (J<sub>IC</sub>) değerlerinin çeşitli çatlak uzunluklarında sıcaklık ile değişimi gösterilmiştir.

Deneyleerin gerçekleştirildiği tüm sıcaklıklarda, analitik metotla bulunan J<sub>IC</sub>-değerlerinin en büyük ve eşdeğer enerji metodu ile bulunanların ise en küçük olduğu görülmüştür. Kırık yüzeylerin tarama elektron mikroskobu ile incelenmelerinden J<sub>IC</sub>-değerlerinin, kırılmanın oluşum tarzına bağlı olduğu ve sıcaklık ile sünek-kırılğan dönüşüm gösterdiği gözlenmiştir.

Rafet ARIKAN

Makina Mühendisliği Bölümü  
Gazi Üniversitesi  
Ankara

Mustafa DORUK

Prof.Dr.  
Makina Mühendisliği Bölümü  
Orta Doğu Teknik Üniversitesi  
Ankara

## GİRİŞ

Kırılma olgusuna dayalı tasarımın en temel koşullarından biri, kırılma tokluğu olarak tanımlanan malzeme özelliğinin bilinmesidir. Çatlak ucunda oluşan plastik bölgenin çatlak uzunluğu ve parça boyutlarına göre çok küçük olduğu yüksek dayançlı malzemelerde kırılma tokluğunun saptanması doğrusal elastik kırılma mekaniği yaklaşımına dayalı olarak gerçekleştirilir. Ölçülen kırılma tokluğu (K<sub>IC</sub>) ile hesaplanan  $2.5(K_{IC}/\sigma_y)^2$  değerinin çatlak uzunluğu ve çatlak ilerleme yönünde ölçülen yük taşıyıcı kesit genişliğinden daha küçük olduğu durumlarda, bulunan değer düzlemsel gerilim kırılma tokluğu (plane strain fracture toughness) (K<sub>IC</sub>) olarak kabul edilir.

Azalan malzeme dayanç seviyesine paralel olarak, çatlak ucunda yer alan plastik bölgede büyüme görülür. Açık ki, bu durumda doğrusal elastik kırılma mekaniği geçerli sayılamayacak sonuçlar verecektir. Diğer bir deyişle, bir doğrusal kırılma mekaniği parametresi olan gerilim şiddet faktörü (K) çatlak ucundaki gerilim dağılımını tanımlamaktan uzaktır. O halde, dayanç düzeyi düşük malzemelerde kırılma tokluğunun doğrusal elastik kırılma mekaniği dışındaki bazı yöntemlerle saptanması gerekecektir. Bunların dayalı olduğu temel yaklaşım elastik-plastik kırılma mekaniği olarak tanınmaktadır.

Öncelikle hacim merkezli kübik kristal yapıya sahip düşük dayançlı malzemelerde göz önünde tutulması gereken diğer bir olgu, azalan sıcaklıkla kırılma tavrında meydana gelen ani değişimdir. Düşük ve kısmen de orta dayanç seviyesindeki çeliklerden yakinen tanıdığımız bu tavrı sünek-kırılğan dönüşümü olarak adlandırılır. Tasarımcı, bir yandan güvenilir kırılma tokluğu değerleri ile çalışırken, bir yandan da, sünek-kırılğan dönüşüm sıcaklığının yeterince uzağında kalmayı amaçlamak zorundadır.

Yukarıdaki tanıma uygun düşük dayançlı malze-

melerde kırılma tokluğu sıcaklıkla ani değişerek sünek-kırılğan dönüşümü yansıtır. Bu nedenle, tokluğun sıcaklığa bağlı olarak saptanması büyük önem taşır. Bu çalışmanın amacı, elastik-plastik tavrı gösteren malzemelerde kırılma tokluğunun bulunması için izlenebilir yaklaşımları tartışmak ve bunların verdiği sonuçları kendi aralarında kıyaslayarak değerlendirmektir.

## ELASTİK-PLASTİK KIRILMA MEKANIĞI YAKLAŞIMLARI

Elastik-plastik kırılma mekaniği parametreleri arasında en yaygın kullanımı Rice [1] tarafından geliştirilen J-entegralidir. Aynı amaçla uygulanabilir diğer yaklaşımlar çatlak ucu açınımlı ve eşdeğer enerji metodu olarak tanımlanırlar. Bunların hepsinde kırılma tokluğunun bulunması için çatlakın büyümeye başladığı kritik yükün (P<sub>C</sub>) yük-sehim eğrilerinden belirlenmesi gerekir. Kritik yük yerine maksimum yükün kullanılması özellikle elastik-plastik kırılma mekaniğinin geliştirilmesinde uygun değildir. Bunun nedeni, çatlakın genellikle maksimum yüke ulaşmadan önce parça içinde yayılmaya başlamasıdır.

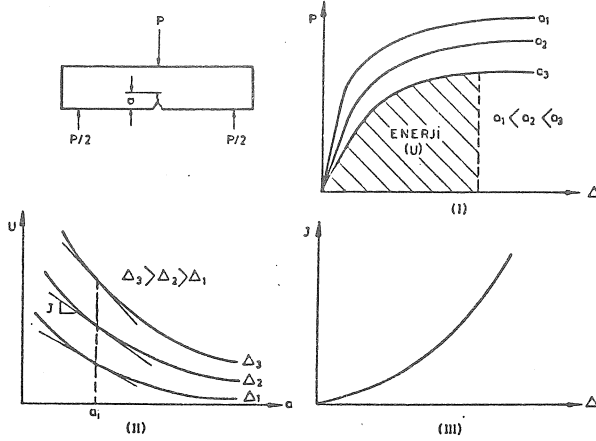
J-entegralinin saptanmasında aşağıdaki tanımdan hareket edilir:

$$J = - \frac{1}{B} \frac{du}{da} \Big|_{\Delta=\text{sabit}} \quad (1)$$

Burada, U yük-sehim eğrisi altındaki enerji, a çatlak uzunluğu, B parça veya numunenin kalınlığı ve  $\Delta$  sehimi gösterir. Begley ve Landes [2,3] farklı çatlak uzunluklarında numuneler kullanarak J-entegralini

$$J = - \frac{1}{B} \frac{U(a+\Delta a) - U(a)}{\Delta a} \quad (2)$$

olarak saptamışlardır. Denklem 1'deki temel tanım uyarınca bilinmesi gereken, çatlakın  $\Delta a$  kadar büyümesi sonucu sistemden boşalan enerji miktarıdır. Bu ise, Denklem 2'de görüldüğü gibi, çatlak uzunlukları  $a$  ve  $a+\Delta a$  olan iki numunenin deformasyon enerjileri arasındaki farktan ibarettir. Begley ve Landes'in kompliance benzeyen bu metodunda, çatlak uzunlukları farklı çok sayıda numunenin eşit koşullar altında test edilmesi gereklidir (Şekil 1).

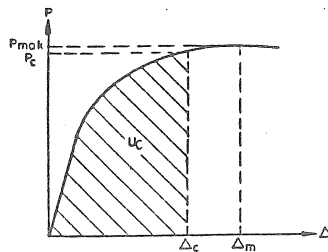


Şekil 1 J-entegralinin compliance metodu ile değerlendirilmesi

Eğme deformasyonuna göre tasarlanmış numuneler (eğme ve kompakt çekme numuneleri) kullanarak, Rice ve diğerleri [4] tek bir numune ile J-entegralinin aşağıdaki formülden hesaplanabileceğini göstermişlerdir:

$$J = \frac{2U}{B(W-a)} \quad (3)$$

Burada,  $U$  çatlaklı numune üzerinde yapılan toplam iş,  $W$  ise numune genişliğidir.  $U$ , sehime bağlı olarak yük-sehim eğrisinden değerlendirilerek Denklem 3' de yerine konulur. Böylece, J-entegrali sehimin bir fonksiyonu olarak saptanabilir. Çatlak başlangıcındaki tokluğun ( $J_{IC}$ ) hesaplanmasında ise, yük-sehim eğrisinde kritik yüke ( $P_c$ ) uyan enerji ( $U_c$ ) kullanılmalıdır (Şekil 2).  $J_{IC}$ 'nin Denklem 3'den bulunması, yazının bundan sonraki bölümünde analitik metot olarak adlandırılacaktır.

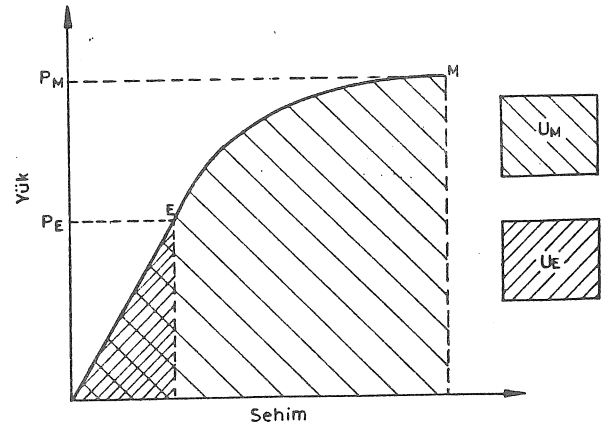


Şekil 2 Yük-sehim eğrisi ve çatlak büyümesinin başladığı kritik yüke uyan enerjinin değerlendirilmesi

Elastik-plastik malzemelerde kırılma tokluğunun ölçülmesi için kullanılabilir yaklaşımlara bir seçenek de, Witt ve Mager [5,6] tarafından geliştirilen eşdeğer enerji metodu'dur. Eşdeğer enerji metodunun bazı değişikliklerle düzlemsel gerinim kırılma tokluğu testi için uygun olmayan numunelere bile uygulanabileceği ve böylece kırılma tokluğunun ölçülmesinde kullanılabileceği önerilmiştir [7]. ASTM E 399 (veya BS DD3)'da tariflenen test yöntemine göre bulunan yük-sehim eğrisinde  $M$  maksimum yükü,  $E$  ise eğrinin doğrusal kısmı üzerinde herhangi bir noktayı göstermektedir. Buna göre, kırılan numune yüzeyi incelendiğinde yavaş çatlak büyümesine ilişkin bir kanıt yoksa kırılma tokluğu aşağıdaki ifadeden hesaplanır:

$$K_{IC} = \frac{P_E}{B\sqrt{W}} Y(a/W) \sqrt{\frac{U_M}{U_E}} \quad (4)$$

Burada,  $U_E$  ve  $U_M$  Şekil 3'de verilen eğrinin  $E$  ve  $M$  noktalarına uygun şekil değiştirme enerjisini gösterir.  $Y(a/W)$  ise ASTM E 399 veya BS DD3'de verilen numune compliance'sıdır. Yavaş çatlak büyümesine ilişkin bir kanıt rastlanması halinde,  $M$  noktası maksimum yük yerine yavaş çatlak büyümesinin meydana geldiği yük olarak alınmalıdır.



Şekil 3 Eşdeğer enerji metodunun girdileri  $U_E$  ve  $U_M$  enerjilerinin yük-sehim eğrisinden bulunmaları

Bu çalışmada,  $-80^\circ$  ile  $70^\circ\text{C}$  arasında çeşitli sıcaklıklarda üç noktalı eğme numuneleri test edilerek elastik-plastik kırılma davranışı için

- kompliance
- analitik
- eşdeğer enerji

metodunun verdiği sonuçlar karşılaştırmalı olarak tartışılmaktadır. Her üç yaklaşımda da, çatlak büyümesinin başladığı yük olarak  $P_c=0.95 P_{max}$  alınmıştır.

## DENEYSSEL ÇALIŞMALAR

## Malzeme ve Numuneler

Deneylerde, gemi yapımında kullanılan ABC Gr. A 3701 tanımla, 25 mm kalınlığında sıcak haddelemiş çelik levha kullanılmıştır. Bu çelik % 0.22 C, % 0.70 Mn, % 0.05 Si, % 0.02 P, % 0.03 S ve % 0.20 Cu içerir. 875°C sıcaklıkta 1 saat tavlandıktan sonra, çeliğin çeşitli sıcaklıklarda ölçülen mekanik özellikleri Çizelge 1'de verilmiştir.

Çizelge 1 Deney Malzemesinin Çeşitli Sıcaklıklarda Ölçülen Mekanik Özellikleri

Akma gerilimi, MPa	284.5	253.6	352.2	292.0	312.0
Çekme dayanımı, MPa	427.3	428.1	463.8	487.5	512.4
Kopma gerilimi, MPa	363.0	344.8	376.0	384.9	428.8
Kopma uzaması, %	33.4	30.3	29.6	28.9	28.5
Kopma alan küçülmesi, %	57.5	55.7	54.7	53.7	52.3
Elastik modülü, MPa	146100	147000	148000	149600	164000

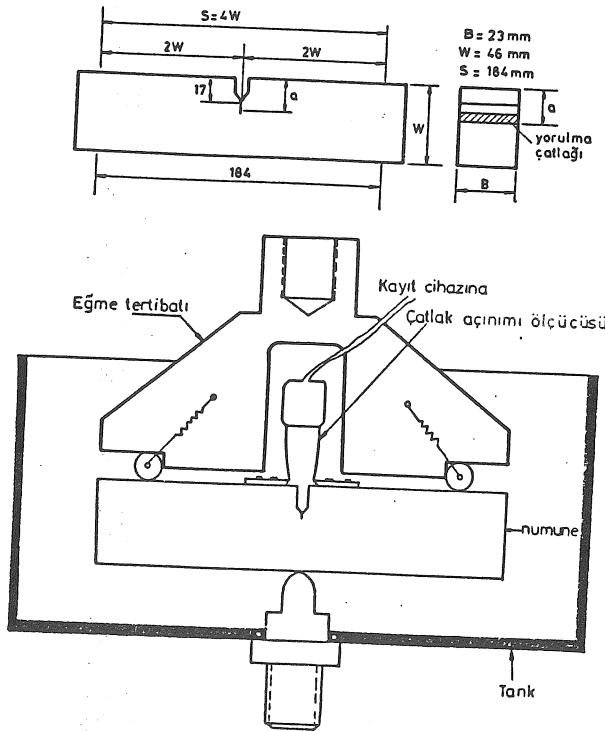
  

ÖZELLİK	70	25	0	-20	-40	-60	-80
Deney Sıcaklığı, °C							

332.6	408.2
523.0	578.8
427.0	522.0
26.6	25.6
48.0	45.7
176800	182900

Deneylerde kullanılan numunelerin boyutları ile üç destekli eğme deney düzeneği Şekil 4'de görülmektedir. Numunelerin uzun eksenini hadde yönünde, çentik eksenini ise levhanın kalınlık yönünde seçilmiştir. Numuneleri yorulma yükü uygulayarak ön çatlama tabii tutulmuş ve 17, 20, 23 ve 26 mm derinliğe kadar ön çatlakların oluşması sağlanmıştır.



Şekil 4 Deneylerde kullanılan numunelerin boyutları (a) ve üç destekli eğme deney düzeneği (b)

## Deneylerin Yapılışı

Yavaş eğme deneyleri üç destekli eğme tertibatı kullanılarak Instron Model 1125 test makinasında yapılmıştır. Oda sıcaklığının (25°C) altındaki deney sıcaklıkları, etil alkol içine sıvı azot verilerek elde edilmiştir. 70°C ise, sıcaklığı bir termostatla kontrol edilen yağ banyo kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Numunelerin ön çatlattırımı MTS Model 810 test makinasında yapılmıştır. Önce 2000 kg yük ile başlamış ve çatlak ilerlemeye başladıktan sonra yük 1000 kg'a düşürülerek çatlak yavaş ilerlemesi sağlanmıştır. Yorulma sırasında çatlak ilerlemesini izlemek için numunenin her iki yüzeyi parlatılmış ve 0.5 mm aralıklı çizgiler çizilmiştir. Çatlak ilerlemesi milimetrik taksimatlı büyüteçle izlenmiştir. Deneylerden sonra çatlak yeniden yorulma ile büyütülmüş ve numune iki parçaya ayrıldıktan sonra kırık yüzeyler üzerinde çatlak uzunluğu hassas bir şekilde ölçülmüştür.

Ön çatlaklı numunelerde uygulanan üç noktalı eğme deneylerinde çapraz başlık hızı 0.5 mm/dak olarak sabit tutulmuştur. Yüklemeden önce numuneler, sıcaklığı kontrol edilen ortam içinde 30 dakika tutulmuştur. Sıcaklığın ölçülmesi için çatlak ucuna yakın bir konuma yerleştirilen bakır-konstantan termo elemanından yararlanılmıştır. Deney sırasında yük-sehim (çapraz başlığın aldığı yol) (P-Δ) ve çatlak ağzı açınımlı-zaman eğrileri (V-t) elde edilmiştir. Yükleme, maksimum yüke ulaşıncaya kadar devam etmiştir.

Deneyler 70, 25, 0, -20, -40, -60 ve -80°C sıcaklıklarda yapılmıştır. Her bir çatlak uzunluğu için birer tane olmak üzere her sıcaklıkta 4 adet numune test edilmiştir.

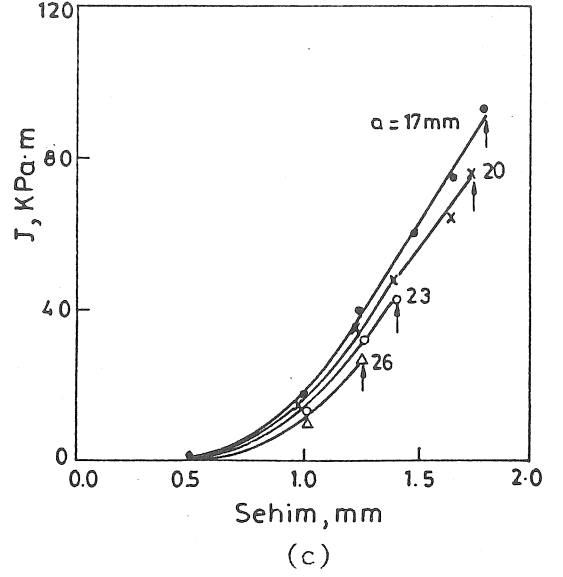
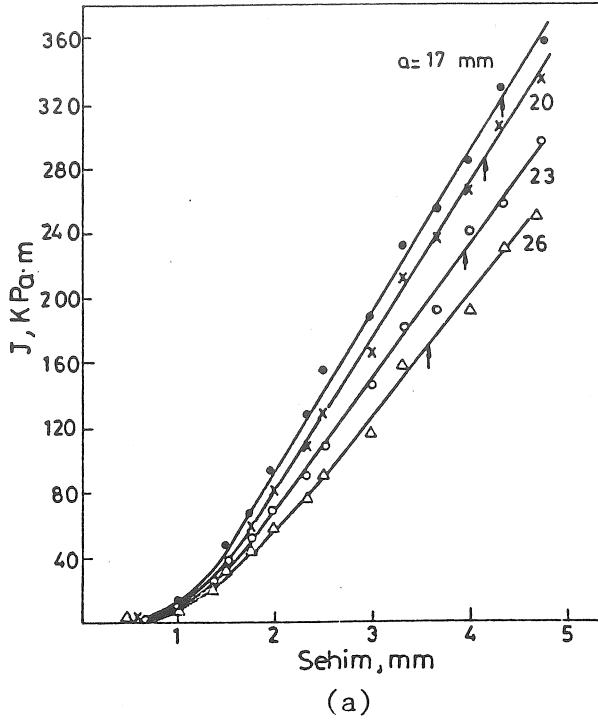
Yükleme sırasında meydana gelen çatlak büyümesi (Δa), yüzeyin pürüzlü ve mat oluşu ile parlak ve oldukça pürüzsüz olan yorulma ön ve son çatlama bölgelerinden kolayca ayırdedilebilmektedir. Çatlak ilerlemesinin en fazla olduğu yer numune kalınlığının orta kısmıdır.

## DENEY SONUÇLARI

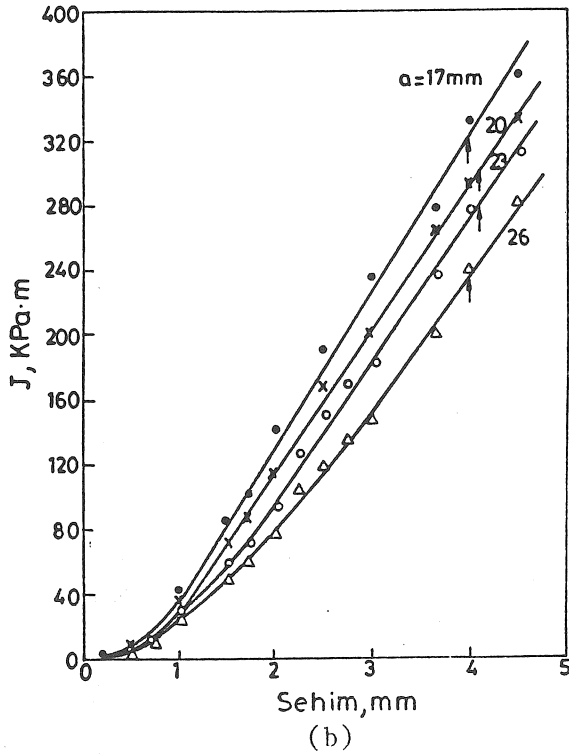
## J-Entegralinin Bulunması

J-entegralinin değerlendirilmesinde kullanılan yaklaşımlardan ilki Begley ve Landes [2] tarafından önerilen komplians metodudur. Bu tür değerlendirmenin ilk basamağı yük-sehim (P-Δ) eğrilerinden enerji-çatlak uzunluğu (U-a) ilişkilerini türetmektir. J-entegrali bu eğrilerin eğiminden, herhangi bir çatlak uzunluğu için ve Δ'nın bir fonksiyonu olarak bulunmuştur (Denklemler 1). Çeşitli sıcaklıklarda elde edilen J-Δ eğrilerinden üç örnek Şekil 5'de görülmektedir.

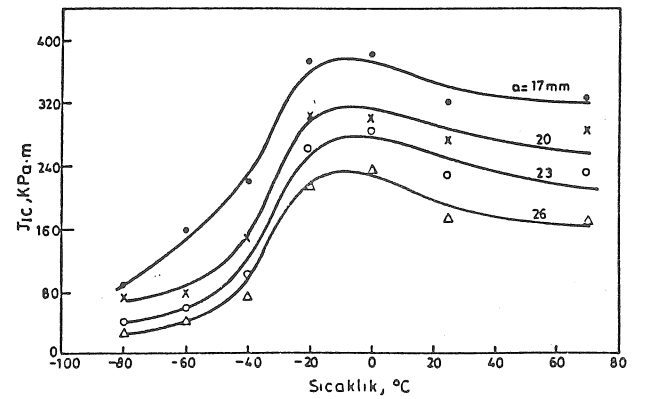
Çatlakın büyümeye başladığı kritik J-değerinin (J<sub>IC</sub>) bulunması için önce kritik sehim (Δ<sub>c</sub>) belirlenmiştir. Bu ise kritik yüke, yani maksimum yükün % 95'ine uyan değer olarak kabul edilmiştir. J<sub>IC</sub>, Δ<sub>c</sub>'e ilişkin verileri J-Δ eğrilerinde yerine koyarak bulunmuş ve kullanılan numune boyutlarında düzensel gerinim durumuna çok yaklaşıldığı için bu



Şekil 5 Ön çatlaklı numunelerin yavaş yüklenmesi ile elde edilen J- $\Delta$  eğrilerinden örnekler: a) 70°C, b) 0°C ve c) -80°C için

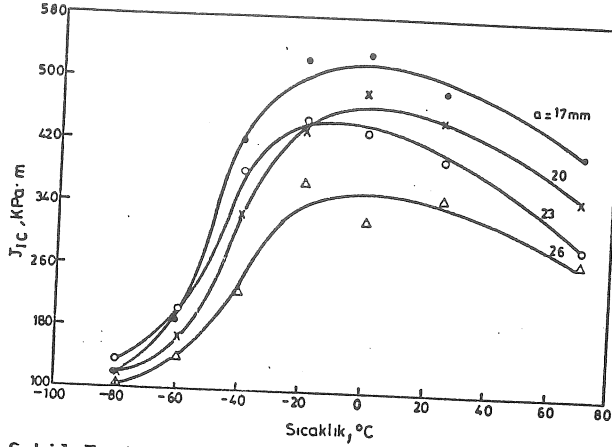


değerler  $J_{IC}$  olarak ifade edilmişlerdir. -60 ve -80°C sıcaklıklarda yapılan deneylerde numunelerin genel akma sınırına çok yakın yerlerde kırılma tarzda koptukları görülmüştür. Bu numunelerin kırık yüzeylerinde tarama elektron mikroskobu ile yapılan incelemelerde, yavaş (kararlı) çatlak büyümesine rastlanmamıştır. Bu nedenle, kritik yük olarak doğrudan kırılma yükü alınarak  $J_{IC}$  değerlendirilmiştir. Komplians metodu ile bulunan  $J_{IC}$  değerlerinin, çeşitli çatlak uzunluklarında, sıcaklık ile değişimi Şekil 6'da verilmektedir.



Şekil 6 Komplians metodu ile bulunan  $J_{IC}$ -değerlerinin çeşitli çatlak uzunluklarında sıcaklık ile değişimi

Komplians metoduna seçenek olarak, bu çalışmada,  $J_{IC}$ 'nin değerlendirilmesi için Denklem 3 ve 4' den yararlanılmıştır. Kritik yüke uyan enerjiyi ( $U_C$ ) kullanarak, önce, Denklem 3'den  $J_{IC}$ -değerleri hesaplanmış ve Şekil 7'de, çeşitli

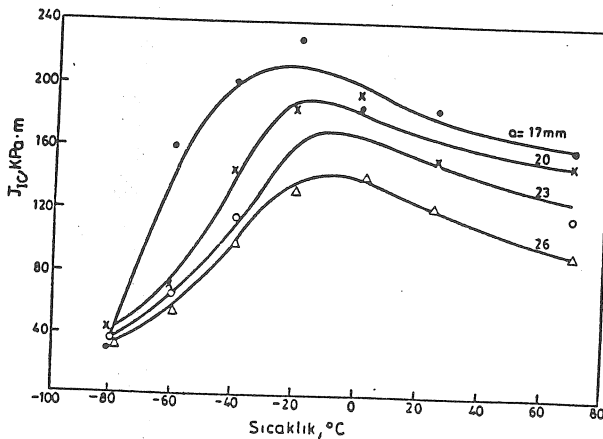


Şekil 7 Analitik metotla (Denklem 3) hesaplanan  $J_{IC}$ -değerlerinin çeşitli çatlak uzunluklarında sıcaklık ile değişmesi

çatlak uzunlukları için sıcaklığa bağlı olarak gösterilmiştir. Denklem 4'ün uygulanmasında ise yavaş çatlak büyümesinin görülmediği -80 ve 60°C sıcaklıklar için yük-sehim eğrisinin altındaki toplam alana eşdeğer enerji  $U_M$  olarak alınmıştır. Yavaş çatlak büyümesinin tarama elektron mikroskobu altında görülebildiği diğer sıcaklıklar için ise,  $U_M$  yerine  $U_C$  kullanarak  $K_{IC}$ -değerleri hesaplanmıştır.  $K_{IC}$ -değerleri

$$J_{IC} = \frac{K_{IC}^2(1-\gamma^2)}{E}$$

denklemini yardımı ile  $J_{IC}$ -değerlerine dönüştürülmüş ve çeşitli çatlak uzunluklarında, sıcaklığa bağlı olarak Şekil 8'de verilmiştir. Yukarıdaki ifade, E deney sıcaklığında malzemenin elastik modülünü ve  $\gamma$ 'de poisson oranını göstermektedir.



Şekil 8 Eşdeğer enerji metodundan (Denklem 4) hesaplanan  $J_{IC}$ -değerlerinin çeşitli çatlak uzunluklarında sıcaklık ile değişmesi

Ayrıca, çeşitli sıcaklıklarda yapılan deneylerden elde edilen kırık yüzeylerin tarama elektron mikroskobunda çekilen fotoğrafları Şekil 9'da görülmektedir.

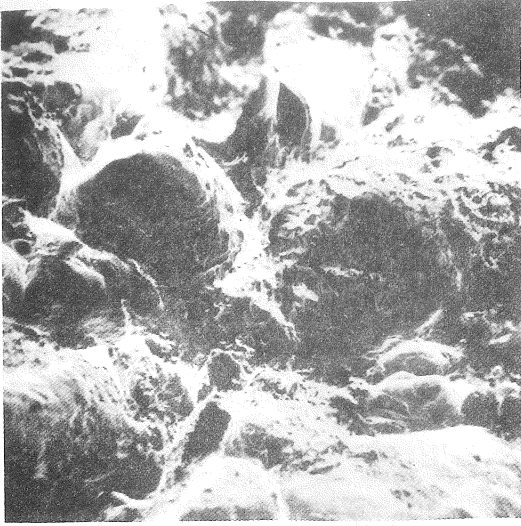
## SONUÇLARIN TARTIŞILMASI

$J_{IC}$ -sıcaklık eğrileri ile kırık yüzey fotoğrafları birlikte incelendiğinde 0°C ve üstündeki sıcaklıklarda çatlak sünnek tarzda büyümeye başladığı görülmektedir. Büyüme sırasında çatlak önünde bir dizi mikroboşluklar oluşur. Yüksek deney sıcaklıklarında (25 ve 70°C) boşluk çaplarının büyüdüğü görülür. Bu bölge üst dönüşüm sıcaklık alanı olarak tanımlanabilir. Buna karşılık -60 ve -80°C sıcaklıklarda çatlak kırılma tarzda büyümeye başladığı ve aynı mekanizma ile yayılarak ayrılma (klivaj) türü kırılmaya neden olduğu gözlenmektedir. Bu ikinci bölge ise alt dönüşüm sıcaklık aralığı ile birbirine bağlanır. Nitekim -40 ve -20°C sıcaklıklarda çatlak sünnek tarzda büyümeye başlamakta, ancak malzeme içindeki yayılması kırılma tarzda oluşmaktadır.

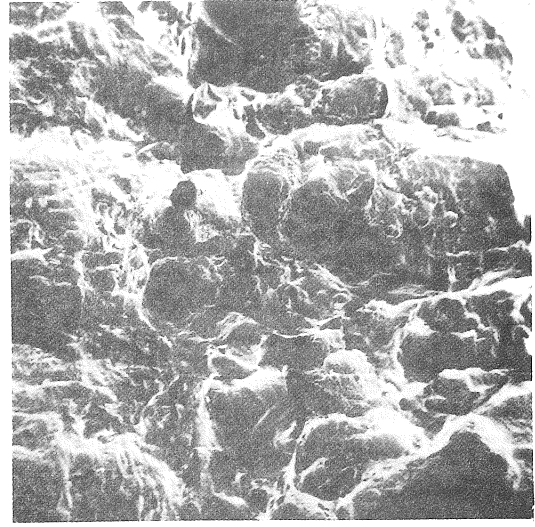
Farklı yaklaşımlarla elde edilen kırılma tokluğu değerlerinin mukayesesine geçmeden önce kırılma mekanizmasına ilişkin bazı gözlemlere açıklık getirmekte yarar vardır. 0°C ve üstündeki sıcaklıklarda, kırık yüzeyler giderek artan miktarda sünnek görünüm vermektedirler (Şekil 9a). Bu çatlak ucundaki deformasyonun artmasının bir sonucudur. Özellikle plastik şekil değiştirmenin tüm kesite yayıldığı genel akma durumundan sonra, numunenin makroskopik şekil değiştirmesi giderek etkinleşen düzlemsel gerilim durumu tarafından kontrol edilir [8]. Bu gelişme, bir yandan çatlak ucundaki plastik bölgenin büyümesine ve diğer yandan da numune üzerinde gözlenen sehimin büyük ölçüde artmasına neden olur. O halde, bu bölgede yükte küçük bir artış  $J$ -değerinde önemli bir yükselmeyi beraberinde getirecektir.

Çatlak büyümesinin sünnek bir tarzda oluştuğu durumlarda önce çatlak önünde iç boşluklar oluşmakta ve bunlar daha sonra birbirleriyle ve ana çatlakla birleşmektedir. Çatlak önünde boşlukların oluşması ve büyümesi üç eksenli gerilme durumunun etkinliğini giderek kaybetmesinin bir sonucudur. Kırık yüzeylerin incelenmesinden de açıkça görüldüğü gibi, sünnek tarzdaki kararlı çatlak büyümesi düzlemsel gerilim durumunun ağırlıkta olduğu numune yüzeylerine yakın yerlerde oluşur. Kırık yüzey merkezine doğru çatlakın kavilenecek yayılması üç eksenli gerilim durumunun etkinleşmesinin doğal bir sonucudur. Numunenin gerilme artışının çok sınırlı olduğu dış yüzeylerinde, sünnek kayma, çatlama düzlemine 45° açılı eğik yüzeylerle kendini gösterir.

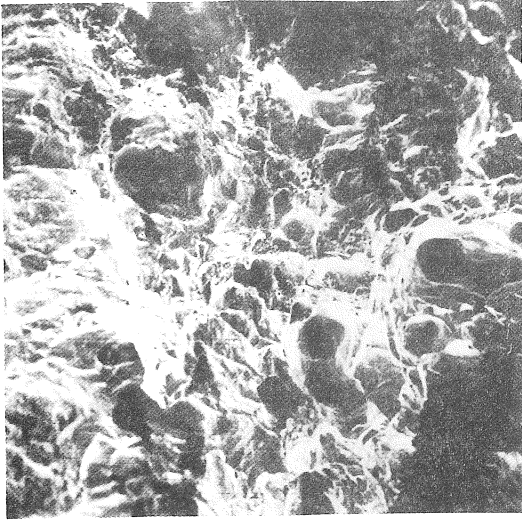
-20 ve -40°C sıcaklıklarda üç eksenli gerilim durumunun deformasyon üzerindeki kısıtlayıcı etkisi, çatlakın kavis yerine düz bir çizgi şeklinde oluşmasının temel nedenidir. Bu sıcaklıklarda yavaş çatlak büyümesi, çatlak ucundan gerilme durumuna bağlı



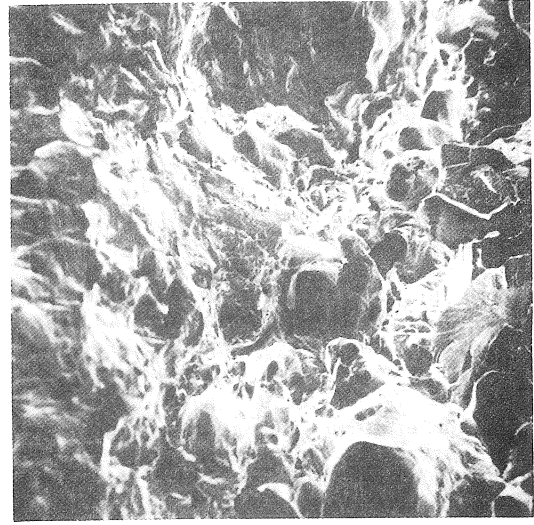
a



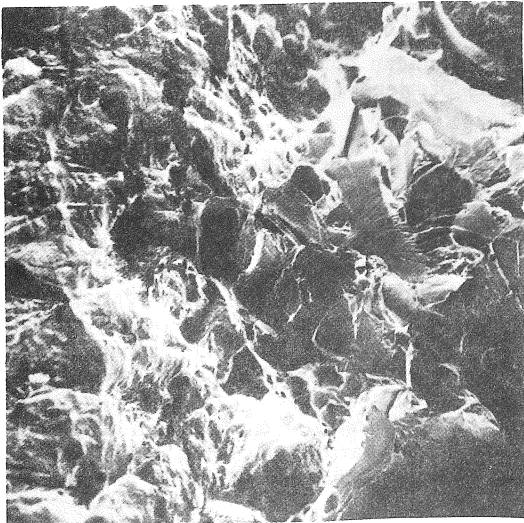
b



c



d



e



f

Şekil 9 Kırık yüzeylerin tarama elektron mikroskobu ile çekilen fotoğrafları: a) 70°C, b) 0°C, c) -20°C, d) -40°C, e) -60°C ve f) -80°C için



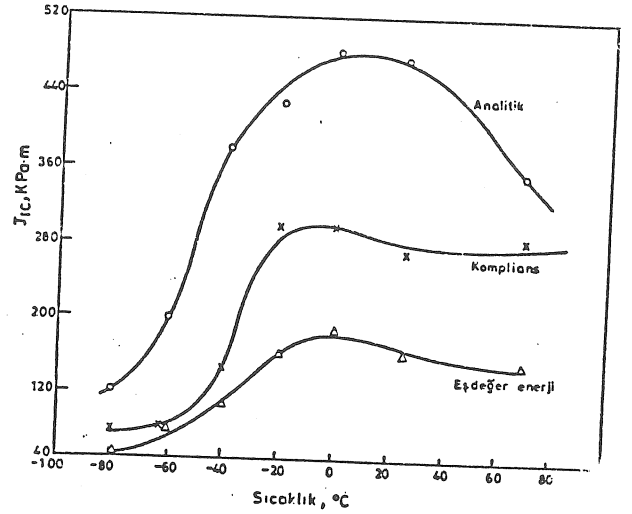
belirli uzaklıklarda, kritik miktarlarda plastik deformasyonun oluşmasını gerektirir [9-11]. Böylece başlayan çatlak büyümesi daha sonra yerini gevrek tarzda büyümeye terketmiştir. Bu oluşumları, numunenin kalınlık yönünde deformasyonun azalması ve sonuçla çatlak ucu çevresinde üç eksenli gerilme durumunun etkinlik kazanmasına bağlamak mümkündür [12]. Bütün bu gelişmeler klivajı destekler niteliktedir. Böylece sünek tarzda başlayan çatlak büyümesinin gevrek hızlı kırılmaya dönüşmesi kaçınılmaz bir olgu olarak ortaya çıkmaktadır.

Üst dönüşüm sıcaklık alanında (25-70°C)  $J_{IC}$ -sıcaklık ilişkisinde düşme görülmektedir (Şekil 6-8). Diğer araştırmacılar (örneğin [13]) tarafından da gözlenen bu tavrın yorumlanmasında yarar görülmektedir. Bu bölgede malzemenin kırılma tokluğunun artan sıcaklıkta azalmasını malzeme davranışı ve gerilme durumu gibi temel faktörlere bağlamak mümkün değildir. Burada  $J_{IC}$ 'nin değerlendirilmesinde esas alınan  $P_C=0.95 P_{mak}$  ilişkisi üzerinde durmak gerekir. Yük-sehim eğrisinin artan sıcaklıkla giderek yataylaştığı üst dönüşüm sıcaklık alanında,  $P_C=0.95 P_{mak}$  kriteri çatlakın çok küçük bir sehim altında oluşabileceği varsayımını beraberinde getirmektedir. Bu ise çatlakın küçük bir enerji ile büyümeye başladığı anlamındadır. Oysa ki, kırık yüzeyler üzerinde görülen büyük çukurcuklar, çatlak büyümeye başlamadan önce malzeme içinde, önemli ölçüde, plastik deformasyonun oluştuğunun bir kanıtıdır. Bu çatlak büyümesinin,  $P_C=0.95 P_{mak}$  kriterinden elde edilen küçük sehimler altında başlamadığını açıkça göstermektedir. Sünek tarzda başlayan çatlak büyümesi için  $P_C=P_{mak}$  kriteri esas alınabilir miydi? Bu sorunun yanıtı için maksimum yükte ölçülen çatlak büyümelerine (bütün numunelerde 1.32-2.77 mm arasında değişmiştir) bakmak gerekir. Diğer yandan,  $J_{IC}$ 'nin değerlendirilmesinde esas olan kritik yük ve kritik sehimin bulunmasında ana kriter çatlakın kanıtlanabilir düzeyde bir büyüme ( $\Delta a=0.05$  mm) göstermesidir [14]. Maksimum yükte ölçülen çatlak büyümeler bu değerlerin hayli üstündedir. O halde çatlaklar, yük, maksimum yüke ulaşmadan önce büyümeye başlamışlardır. Sonuç olarak denebilir ki, kritik yükün seçiminde esas alınacak kriter, özellikle çatlamanın sünek tarzda başladığı ve gene sünek tarzda devam ettiği üst dönüşüm sıcaklık alanında, sonuçlayabileceği hatalar nedeni ile önem taşımaktadır.

Üç farklı metotla bulunan  $J_{IC}$ -değerlerinin sıcaklık ile nasıl değiştikleri karşılaştırmalı olarak Şekil 10'da verilmiştir. Görüldüğü gibi bütün sıcaklıklarda, eşdeğer enerji metodu ile bulunan  $J_{IC}$ -değerleri komplians ve analitik metotlarla bulunanlardan daha düşüktür. -80°C sıcaklıktan başlayarak eğriler artan sıcaklıkla yükselmekte, ancak yukarıda belirtilen nedenlerle, 0°C'ın üstündeki sıcaklıklarda düşme göstermektedirler. Şekil 10'da görülen karşılaştırmadan çıkarılacak önemli sonuç, eşdeğer enerji metodu ile bulunan  $K_{IC}$  değerlerinin kırılma tokluğu olarak diğerlerine tercih edilerek kırılma olgusuna dayalı tasarımda kullanılabileceğidir. Bu değerlendirmede eşdeğer enerji metodunu destekleyen bir başka olgu  $J_{IC}$  için geçerlilik kriteri olarak alınan

$$a, B \geq 25 \frac{J_{IC}}{\frac{1}{2}(\delta a + \delta c)}$$

ilişkisinin, tüm sıcaklıklarda, bu metotla elde edilen  $J_{IC}$ -değerleri ile sağlanabilmiş olmasıdır. (Bu ilişkide  $\delta a$  ve  $\delta c$  sırası ile, malzemenin söz konusu sıcaklıklarda ölçülen akma ve çekme dayanımı göstermektedir.) Diğer iki metotda ise, yukarıdaki ilişki yalnız -40, -60 ve -80°C sıcaklıklarda sağlanmıştır.



Şekil 10 Aynı çatlak uzunluğunda komplians, analitik ve eşdeğer enerji metodu ile bulunan  $J_{IC}$ -değerlerinin karşılaştırılması (a=20 mm)

## SONUÇ

Bu çalışmadan elde edilen önemli sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir:

1. Üç farklı metotla bulunan  $J_{IC}$ -sıcaklık ilişkileri sünek-kırılma dönüşümü göstermektedir.
2. Çatlak büyüme tavrı esas alınarak, taranan sıcaklık alanı içinde, üst dönüşüm ve alt dönüşüm sıcaklık alanları ile dönüşüm sıcaklık aralığı arasında ayırım yapılmıştır. Yaklaşık olarak, çatlakın sünek tarzda başladığı ve devam ettiği 25 ile 70°C sıcaklık alanı üst dönüşüm, buna karşılık çatlakın kırılma tarzda başlayıp aynı mekanizma ile büyüdüğü -60 ile -80°C sıcaklık alanı ise, alt dönüşüm sıcaklık alanları olarak tanımlanmıştır. Çatlakın sünek olarak başlayıp kırılma tarzda büyüdüğü -20 ile -40°C sıcaklık alanı ise, dönüşüm sıcaklık aralığını vermektedir.
3. Üst dönüşüm sıcaklık alanında  $J_{IC}$ -değerlerinin artan sıcaklıkla düşmeleri değerlendirilmede kullanılan çatlak büyümesinin başladığı yük kriterinden kaynaklanmaktadır.

4. Deneilerin yapıldığı bütün sıcaklıklarda analitik metot ile bulunan  $J_{IC}$ -değerlerinin en büyük, eşdeğer enerji metodu ile bulunanların ise, en küçük olduğu görülmüştür.

5. Geçerli doğrusal-elastik kırılma tokluğunun ( $K_{IC}$ ) bulunmasında eşdeğer enerji metodu öncelikle kullanılmalıdır.

#### DETERMINATION OF INITIATION FRACTURE TOUGHNESS ( $J_{IC}$ ) OF LOW-STRENGTH STEELS

In this study three-point slow bend tests were performed on precracked specimens taken from a low-strength steel. Tests were conducted over the temperature range -80 to 70°C. Using compliance, analytic and equivalent energy methods, values of J-integral were determined. The fracture initiation toughness ( $J_{IC}$ ) corresponding to a critical load taken to be 0.95  $P_{mak}$  were plotted against the test temperature for different crack lengths.

It was found that for all the test temperatures  $J_{IC}$ -values determined by the analytical method are the highest and  $J_{IC}$ -values obtained from the equivalent energy method are the lowest. The fractographic examination of fracture surfaces revealed a relationship between the experimental  $J_{IC}$ -values and the fracture initiation mode. Furthermore, the fracture initiation toughness exhibited a ductile-to-brittle transition with decreasing temperature.

#### KAYNAKÇA

- 1 Rice, J.R., Journal of Applied Mechanics, Transactions, American Society of Mechanical Engineers, (1968), 379-386.
- 2 Begley, L.A. and Landes, J.D., Fracture Toughness, ASTM STP 514, American Society for Testing and Materials (1972), 1-20.
- 3 Landes, J.D. and Begley, J.A., Developments in Fracture Mechanics Test Methods Standardization, ASTM STP 632, W.R. Brown, Jr. and J.G. Kaufman, Eds., American Society for Testing and Materials, (1977), 57-81.
- 4 Rice, J.R., Paris, P.C. and Merkle, J.G., Some Further Results of J-Integral Analysis and Estimates, ASTM STP 536, (1972), 231-245.
- 5 Witt, F.J. and Mager, T.R., A Procedure for Determining Bounding Values on Fracture Toughness  $K_{IC}$  at any Temperature, Report ORNL-TM 3894, Oak Ridge National Laboratory, 1972.
- 6 Witt, F.J. and Mager, T.R., Nuclear Engineering and Design, 17 (1971), 91-102.
- 7 Harrison, R.P., Loosemore, K. and Milne, I., Assessment of the Integrity of Structures Containing Defects, Rev. 1, Berkley Nuclear Laboratories and Central Electricity Research Laboratories, 1977.
- 8 Anderson, H., Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 20 (1972), 23.
- 9 Rice, J.R. and Johnson, M.A. in Inelastic Behavior of Solids, M.F. Kanninen et al, Eds., McGraw-Hill, New York, (1970) 641.
- 10 McClintock, F.A., International Journal of Fracture Mechanics, 4 (1968), 101.
- 11 MacKenzie, A.C., Hancock, J.W. and Brown, D.K., Engineering Fracture Mechanics, 9 (1977), 167.
- 12 Hancock, J.W. and Cowling, M.J., Fracture, 4th International Conference on Fracture, D.M.R. Taplin, Ed., University of Waterloo, Waterloo, Ont., Canada, 2 (1977).
- 13 Joyce, J.A., Hasson, D.F., Engineering Fracture Mechanics, 13 (1980), 417.
- 14 Arıkan, R., Doruk, M., 1. Ulusal Kırılma Konferansı Bildirileri, Ed., M. Doruk ve O. Aksoğan, ODTÜ, Ankara, (1981), 107.