

## Bir Yüzey Altı Çatlağın Yayılma Davranışının Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Analizi

Kubilay ASLANTAŞ, Süleyman TAŞGETİREN

*Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Makine Eğitimi Anabilim Dalı,  
Afyon-TÜRKİYE  
e-mail: aslantas@aku.edu.tr*

Geliş Tarihi 14.12.2000

### Özet

Temas halinde çalışan yüzeyler birbiri üzerinde hareket ederken normal ve teğetsel yüklerden dolayı yüzeyde ve yüzey altında bir takım gerilmeler oluşur. Yüzeye etkileyen normal ve teğetsel yüklerin tekrarlı olarak etkimesi yüzey altında bulunan çatlakların yayılımında etkili olmaktadır.

Bu çalışmada yüzeye etkileyen normal ve teğetsel yüklerden dolayı yüzey altında bulunan farklı uzunluktaki çatlakların nasıl bir yayılma eğilimi gösterdiği araştırılmıştır. Problemin çözümünde değişken olarak farklı çatlak boyları ve temas eden yüzeyler arasındaki farklı sürtünme katsayıları alınmıştır. Çatlak yüzeyindeki deplasman değerlerinden faydalanılarak  $K_I$  ve  $K_{II}$  gerilme şiddet faktörleri hesaplanmıştır.

**Anahtar Sözcükler:** Sonlu elemanlar metodu, Gerilme şiddet faktörü, Çatlak yayılımı

## Analysis of Propagation Behaviour of a Subsurface Crack by the Finite Element Method

### Abstract

When contacting surfaces have relative motion, applied normal and tangential forces cause stresses on surfaces and subsurfaces. If these forces are applied cyclically, they cause crack propagation in the subsurface.

In this study, due to normal and tangential forces acting on the surface, the tendency of propagation of subsurface cracks is investigated. Several crack lengths and friction coefficients are considered.  $K_I$  and  $K_{II}$  stress intensity factors are calculated by the crack surface displacements technique.

**Key Words:** Finite element method, Stress intensity factor, Crack propagation

### Giriş

Yüzey altı çatlakları genellikle metal içerisindeki ikinci faz tanecikleri veya metal olmayan kalıntılar etrafında oluşmaktadır. Oluşan bu çatlaklar yüzeye etkileyen normal ve teğetsel yüklerin etkisiyle yüzeye doğru büyümekte ve pullanma aşınması (Spalling Wear) olarak isimlendirilen yüzeyden tabaka şeklinde kopmalar meydana gelmektedir.

Çatlağın yayılım hızı ve yönü yüzeye uygulanan normal ve teğetsel yüke, çatlak boyuna ve malzeme özelliklerine bağlıdır (Suh, 1973-Suh ve Fleming, 1977). Yüzey altı çatlak oluşum ve yayılım mekanizması üzerine ilk çalışmalar Suh tarafından ortaya konmuştur. Fleming ve Suh çalışmalarında Lineer Elastik Kırılma Mekanikliği yaklaşımını kullanarak normal ve teğetsel yüklere maruz kalan yüzey altı

çatlakları için  $K_I$  ve  $K_{II}$  gerilme şiddet faktörlerini hesaplamışlardır (Fleming ve Suh, 1977). Dally ve Chen elastik olarak deforme olmuş malzemelerin yüzey altında çatlak yayılımının analizini analitik ve deneysel yapmışlardır. Çalışmanın deneysel boyutunda çatlak ucu civarındaki gerilme dağılımı fotoelastik yöntemle tayin edilmiş ve elde edilen veriler analitik yöntemle yapılan çözümle karşılaştırılmıştır. Ayrıca  $K_I$  ve  $K_{II}$  değerleri hesaplanarak çatlak hangi yöne doğru büyüme eğilimi gösterdiği tespit edilmeye çalışılmıştır (Dally and co-worker, 1990).

Kaplanan malzeme ile kaplama arasında var olan bir ara yüzey çatlaklarının hareketli bası yükleri altında ne gibi bir davranış göstereceği Lee, Jinn ve Earmme tarafından araştırılmıştır. Yapılan bu çalışmada; sürtünme değerine, kaplama kalınlığına ve çatlak boyuna bağlı olarak gerilme şiddet faktörü hesaplanmış ve her iki çatlak ucu için  $G$ , enerji salıverme oranı hesaplanarak çatlak büyüme eğiliminde olup olmadığı araştırılmıştır (Lee and co-worker, 1992). Dubourg ve Villechaise tarafından yapılan diğer bir çalışmada, elastik izotropik bir plaka içerisindeki iki farklı çatlak yayılma davranışı araştırılmıştır. Çalışmada, plaka içerisinde var olan çatlaklar dislokasyon teorisi baz alınarak modellenmiştir (Dubourg ve Villechaise, 1992). Sonlu elemanlar metodunu kullanarak yüzey altı çatlaklarının yayılımını araştıran Komvopoulos ve Cho yaptıkları çalışmada; yüzey üzerinde hareket eden asperiteye uygulanan yükün ve yüzeyler arasındaki sürtünme kuvvetinin çatlak yayılımını nasıl etkilediği araştırılmıştır. Çatlak boyu sabit alınmış ve asperite ile düzlem yüzey arasındaki farklı sürtünme katsayısı için farklı çözümler yapılmıştır. Uygulanan yükün konumuna göre  $K_I$  ve  $K_{II}$  gerilme şiddet faktörleri elde edilmiştir (Komvopoulos ve Cho, 1997). Komvopoulos tarafından yapılan diğer bir çalışmada da uygulanan yükün konumuna bağlı olarak çatlak yüzeylerindeki yapışma kayma ve açılma bölgeleri tespit edilmiştir (Komvopoulos, 1996).

Bu çalışmada yüzey altında ve farklı boylardaki çatlakların yüzeye uygulanan normal ve teğetsel yüklerin etkisiyle nasıl etkilendiği araştırılmıştır. Farklı çatlak boyları ve farklı sürtünme katsayıları için çözümler yapılmıştır. Problem Lineer Elastik Kırılma Mekaniği ve Hertz'in elastik temas teorisi temelinde sonlu elemanlar metodu ile çözülmüştür. Açılma modu olan  $K_I$  ve kayma modu olan  $K_{II}$  gerilme şiddet faktörü yüzeye etkileyen yükün konumuna ve sürtünme katsayısına bağlı olarak hesap-

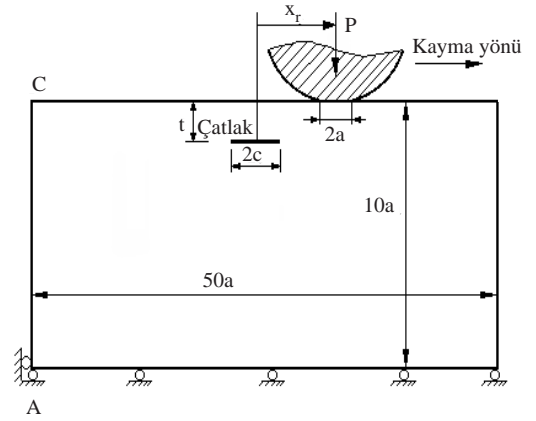
lanmış ve grafiklerle ifade edilmiştir. Ayrıca hesaplanan  $K_I$  ve  $K_{II}$  gerilme şiddet faktörlerine bağlı olarak çatlak hangi yöne doğru büyüme eğiliminde olduğu araştırılmıştır.

## Yöntem

Problemin çözümünde kullanılan sonlu elemanlar metodu bir nümerik yaklaşımdır ve elde edilen sonuçların kesin doğruluğu söz konusu olmayabilir. Sonuçların gerçek çözüme olan yaklaşıklığı, problem için belirlenen sınır şartlarına ve modelin doğruluğuna bağlıdır. Aynı şekilde temas problemlerinde de ortaya çıkan maksimum basınç, yük dağılımı ve sürtünme kuvveti gibi unsurlar gerçek manada oluşturulan nümerik modele aktarılamaz. Bu nedenle daha önceden kabul görmüş teoriler baz alınarak modelleme yoluna gidilir. Bu çalışmada da temas sonucunda meydana gelen basınç ve yük dağılımı için Hertz Elastik temas teorisi baz alınmıştır. Sonlu eleman çözümlerinde Taşgetiren ve Topçu tarafından iki boyutlu gerilme analizi için geliştirilen bilgisayar programı kullanılmıştır (Topçu ve Taşgetiren, 1998). Hem ısıl hem de mekanik yüklemeler altında gerilme analizi yapmak üzere geliştirilen programın verdiği sonuçlar fotoelastik ölçümlerle kanıtlanmıştır (Taşgetiren, 1997).

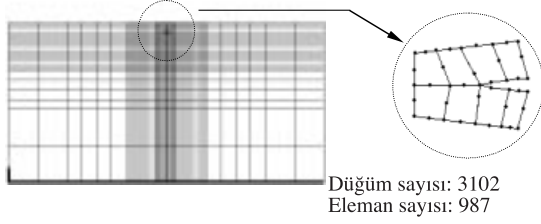
## Sonlu eleman modeli

Problemin çözümünde kullanılan sonlu eleman modeli için değişken olarak; yükün konumu, çatlak boyu ve yüzeydeki sürtünme katsayısı alınmıştır. Modelin oluşturulmasında kullanılan plaka boyutları şekil 1 de verilmiştir.



Şekil 1. Modelin oluşturulmasında kullanılan plaka ve plaka üzerinde kayan silindir

Çatlaklı problemlerin modellenmesinde genellikle altı düğümlü üçgen veya sekiz düğümlü izoparametrik elemanlar kullanılmaktadır (Komvopoulos ve Cho, 1997). Bunun nedeni; elemanların, çatlak yüzeyine gelen orta düğümlerinin kaydırılabiliyor olmasıdır. Böylece oluşturulacak Quarter Point elemanlar çatlak ucunda meydana gelen gerilme şiddet faktörlerinin hesaplanabilmesine imkan tanınmaktadır. Bu çalışmada da sekiz düğümlü izoparametrik elemanlar kullanılmıştır. Oluşturulan sonlu eleman modeli ve çatlak civarında kullanılan elemanlar şekil 2 de verilmiştir.



Şekil 2. Plakanın sonlu eleman modeli ve çatlak civarında kullanılan elemanlar

Çalışmada çatlakın yüzeyden itibaren olan derinliği değiştirilmemiş ve çatlaksız levhalarda maksimum kayma gerilmelerinin meydana geldiği 0.78a (Johnson, 1985) derinliğinde alınmıştır. Bu derinlik bir çatlakın meydana gelmesi için en uygun yer olarak düşünülmüştür.

### Gerilme şiddet faktörünün hesaplanması

Bu çalışmada gerilme şiddet faktörü çatlak yüzeylerinde meydana gelen deplasman değerlerinden faydalanılarak hesaplanmıştır (Aslantaş, 1999). Çatlak yüzeyindeki deplasmanlara bağlı olarak  $K_I$  ve  $K_{II}$  gerilme şiddet faktörü ifadesi

$$u = \frac{K_I(2\pi r)^{1/2}}{8\pi G} [(2T - 1) \cos \theta/2 - \cos 3\theta/2] + \frac{K_{II}(2\pi r)^{1/2}}{8\pi G} [(2T + 3) \sin \theta/2 + \sin 3\theta/2] \quad (1)$$

$$v = \frac{K_I(2\pi r)^{1/2}}{8\pi G} [(2T + 1) \sin \theta/2 - \sin 3\theta/2] - \frac{K_{II}(2\pi r)^{1/2}}{8\pi G} [(2T - 3) \cos \theta/2 + \cos 3\theta/2] \quad (2)$$

şeklinde verilmektedir (Salehizadeh ve Saka, 1992). Bu eşitlikte “u” yatay doğrultudaki deplasmanları,

“v” ise dikey doğrultudaki deplasmanları ifade etmektedir. G kayma modülü,  $\nu$  poisson oranı ve T düzlem gerilme için  $(3-\nu/1+\nu)$ , düzlem şekil değiştirme için  $(3-4\nu)$  olan bir sabittir. Denklem 1ve 2 de  $\theta$  yerine  $+\pi$  ve  $-\pi$  değerleri konularak  $K_I$  ve  $K_{II}$  ifadeleri çekilirse,

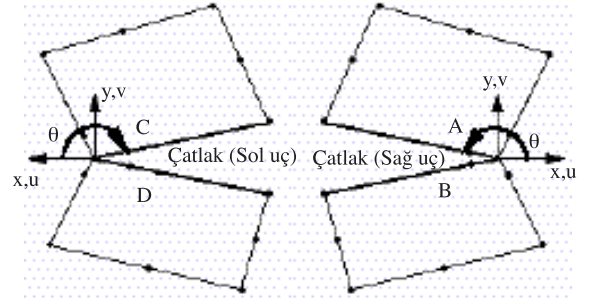
$$K_I = \frac{2\pi G \Delta v}{(2\pi r)^{1/2} T} \quad (3)$$

$$K_{II} = \frac{2\pi G \Delta u}{(2\pi r)^{1/2} (1 + T)} \quad (4)$$

elde edilir. Yapılan çalışmalar  $r= 0.2$  alındığında  $K_I$  ve  $K_{II}$ ' nin doğru sonuçlar verdiğini göstermiştir (Lee and co-worker, 1992).

$K_I$  ve  $K_{II}$  gerilme şiddet faktörlerinin hesaplanmasında kullanılan deplasman değerleri şekil 3'te verilen sağ ve sol çatlak ucuna yakın çatlak yüzeyleri üzerindeki A, B, C ve D düğümlerinden alınmıştır. Çatlak yüzeyinde bulunan bu düğümler  $-\pi$  ve  $+\pi$  açılarını oluşturmaktadır.

Temas halinde çalışan yüzeyler yakından incelendiğinde, temasın, yüzeyler üzerindeki asperity olarak tanımlanan yükseltiler vasıtasıyla gerçekleştiği görülür. Fakat nümerik çözümlemeyi kolaylaştırmak için yüzeyin biri düzgün diğeri de, üzerinde eşit çapta yükseltilerin bulunduğu bir düzlem olarak kabul edilir (Suh, 1973).



Şekil 3. Çatlak yüzeylerinde kullanılan elemanlar ve deplasman değerlerinin alındığı A, B, C ve D düğümleri

Hertz elastik temas teorisine göre R çaplı bir silindirin bir düzlem yüzey üzerinde yuvarlanması sırasında oluşan yarı temas uzunluğu

$$a^2 = 4PR/\pi E^* \quad (5)$$

olarak verilmektedir. P uygulanan toplam yük,  $E^*$  ise eşdeğer elastisite modülüdür ve

$$E^* = \left( \frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \right)^{-1} \quad (6)$$

şeklinde hesaplanmaktadır (Johnson, 1985). Buna bağlı olarak temas noktasının merkezinde meydana gelen maksimum basınç,

$$P_o = 2P/\pi a \quad (7)$$

olarak hesaplanır. Temas noktasının merkezinde  $x'$  e bağlı olarak yüzeye etkiyen yük dağılımı ise;

$$p(x) = P_0(a^2 - x^2)^{1/2}/a \quad (8)$$

şeklinde eliptik bir dağılım göstermektedir (Şekil 4). Sürtünmeden dolayı oluşan teğetsel yük,  $\mu$  sürtünme katsayısı olmak üzere,

$$q(x) = 2\mu P(a^2 - x^2)/a^2\pi \quad (9)$$

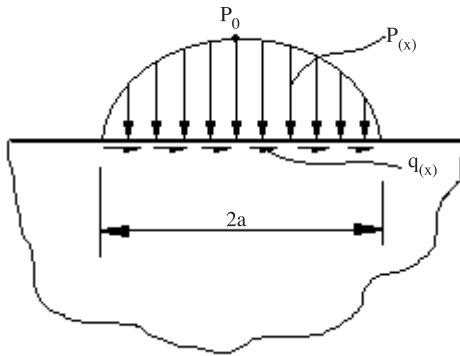
şeklinde olacaktır (Djabella, Arnell, 1993).

Bu çalışmada yüzeydeki sürtünme katsayıları 0, 0.1, 0.25 ve 0.5 olarak alınmış, çatlak boyu  $c/a = 0.5, 1$  ve  $2$  için, uygulanan yükün çatlakla göre bulunduğu konumun çatlak uçlarındaki gerilme şiddet katsayılarına etkisi araştırılmıştır.

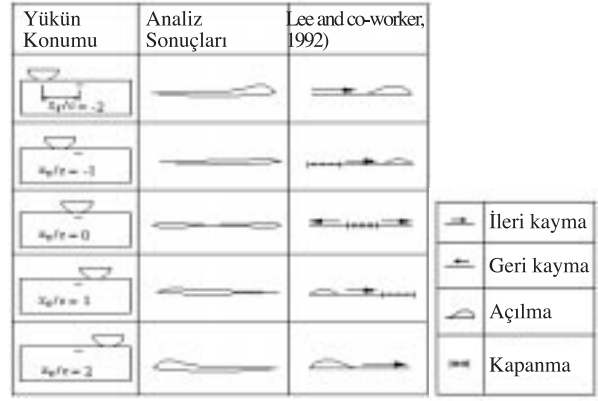
### Analiz Sonuçları ve Değerlendirme

#### Çatlak yüzeylerini oluşturan düğümlerin yer değiştirmesi

Yapılan analiz sonucunda yüzeye etki eden yükün konumuna ve sürtünme kuvvetine bağlı olarak çatlak yüzeyindeki deplasman değerleri elde edilmiştir. Bu deplasman değerlerinden yola çıkılarak çatlak şekli (Lee and co-worker, 1992) nin yapmış oldukları çalışmadaki sonuçlarla karşılaştırılmış ve elde edilen sonuçların birbiri ile uyum gösterdiği gözlemlenmiştir (Şekil 5).



Şekil 4. Yüzeye etki eden yüklerin dağılım şekli



Şekil 5. Yükün konumuna göre çatlak yüzeyindeki değişimler (Lee and co-worker, 1992)'nin sonuçlarıyla karşılaştırılması. (sürtünme katsayısı  $\mu=0.5$  ve çatlak boyu  $c/a=1$  için)

Şekil 5 de görüleceği üzere yük çatlakla yaklaştıkça çatlakın sağ ucu açılma eğilimi göstermektedir. Yani çatlak yüzeyleri birbirinden ayrılmaya zorlanmaktadır. Yine aynı şekilde yük çatlakın bulunduğu yüzey üzerinden uzaklaştığında bu kez çatlakın sol ucu açılmaya zorlanmaktadır. Yük tam çatlak üzerindeyken çatlak yüzeylerini birbirine yaklaştırmakta ve çatlakın uç kısm yüzeylerinin birbiri üzerinde kaymasına neden olmaktadır.

#### $K_{II}$ Gerilme şiddeti faktörünün analizi

Yüzeydeki sürtünmenin neticesinde meydana gelen teğetsel yüklerden dolayı  $K_{II}$  gerilme şiddet faktörü, yükün  $x_r/c = 2$  ve  $x_r/c = -2$  bulunduğu konumlarda çatlakla büyümeye zorlanmaktadır. Şekil 6'da sağ ve sol çatlak ucu için yapılan analiz sonuçları Komvopoulos ve Cho'nun yaptıkları çalışmanın sonuçları ile karşılaştırılmış ve sonuçların iyi bir yaklaşımla uyum içinde olduğu görülmüştür.

$K_{II}$  gerilme şiddet faktörünün çatlak boyu  $c/a=0.5, c/a=1$  ve  $c/a=2$  için uygulanan yükün konumuna ve yüzeydeki sürtünme katsayısına bağlı olarak değişimi araştırılmıştır. Burada  $K_{II}$ , yüzeye etkiyen maksimum basınç ve çatlakın yüzeyden itibaren olan derinliğine bağlı olarak,

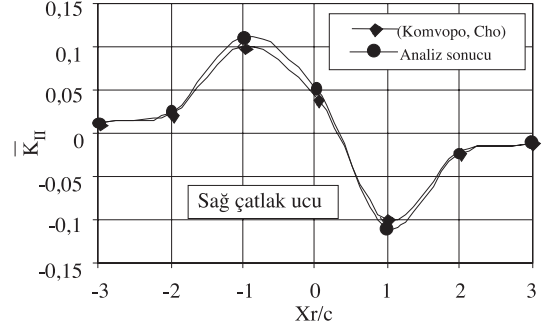
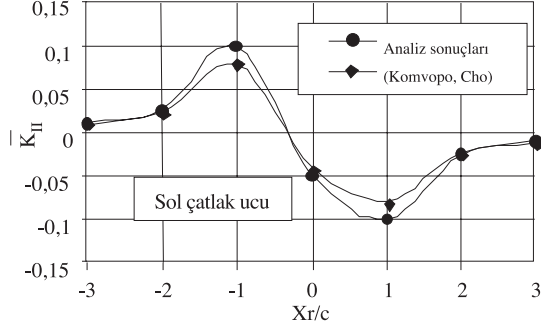
$$\bar{K}_{II} = K_{II}/P_0t^{1/2} \quad (10)$$

şeklinde boyutsuzlaştırılmıştır.

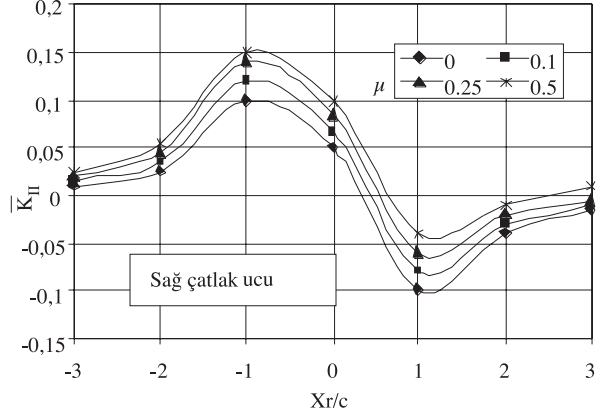
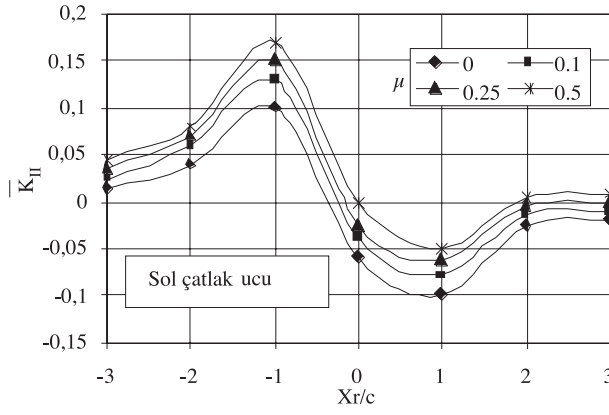
Şekil 7, 8 ve 9 da çatlak boylarına, sürtünme katsayılarına ve yükün konumuna bağlı olarak  $\bar{K}_{II}$ 'nin değişimi verilmiştir. Görüldüğü gibi sürtünme katsayısının ve çatlak boyunun artmasıyla birlikte  $\bar{K}_{II}$

de artmaktadır. Ayrıca yük çatlakla yaklaştığında kayan cismin önündeki bölge bası gerilmeleri etkisinde kaldığından  $\bar{K}_{II}$  pozitif değer almaktadır.  $K_{II}$  gerilme şiddet faktörünün yükün konumuna bağlı

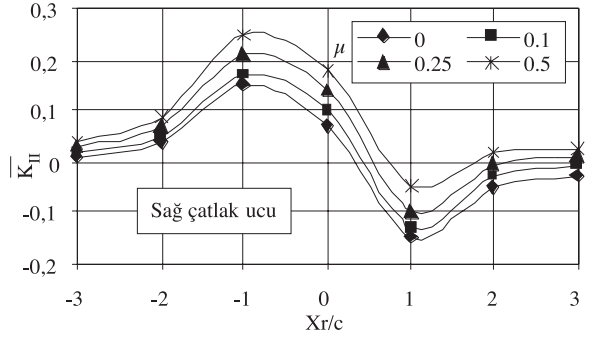
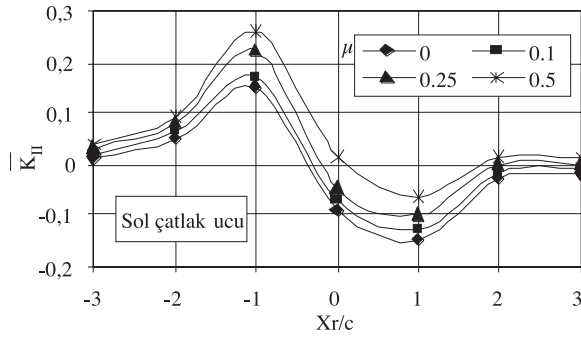
olarak değişimine dair yapılan çalışmada (Dally, Chen, 1990) yüzey altında bulunan çatlaklar, kayma modu olan  $K_{II}$  gerilme şiddet faktörüne bağlı olarak üç farklı şekilde yayılırlar (Şekil 10).



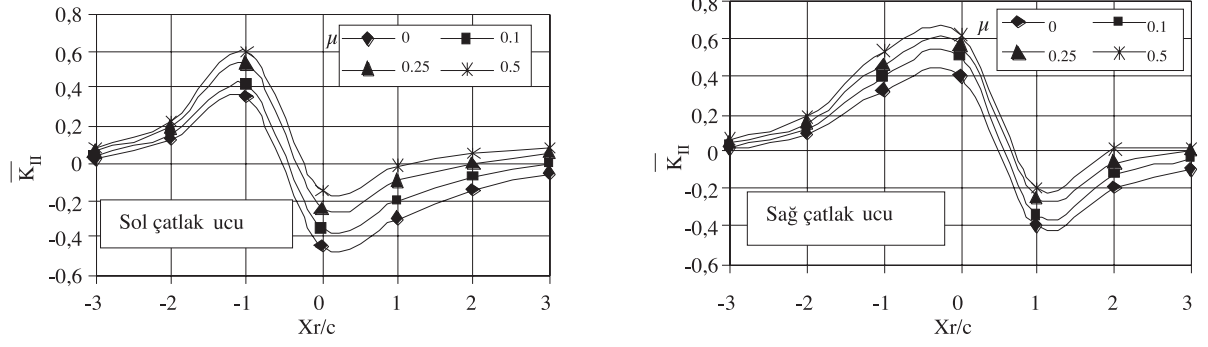
Şekil 6. Sol ve sağ çatlak ucu için  $K_{II}$  gerilme şiddet faktörünün yüküne bağlı olarak değişiminin (Komvopoulos ve Cho, 1997)'nin sonuçlarıyla karşılaştırılması. (sürtünme katsayısı  $\mu=0$  ve çatlak boyu  $c/a=0.5$  için)



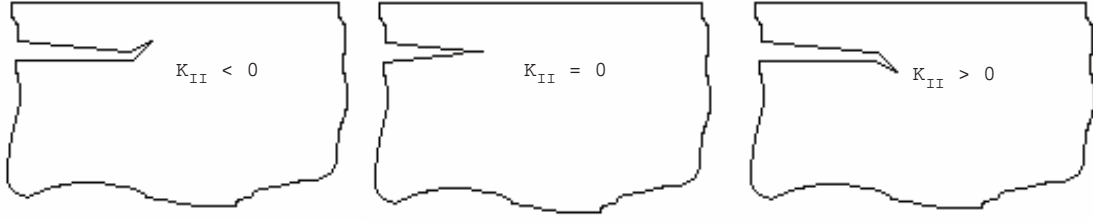
Şekil 7. Çatlak boyu  $c/a = 0.5$  için yükün konumuna ve sürtünme katsayısına bağlı olarak  $K_{II}$ 'nin değişimi.



Şekil 8. Çatlak boyu  $c/a = 1$  için yükün konumuna ve sürtünme katsayısına bağlı olarak  $K_{II}$ 'nin değişimi.



Şekil 9. Çatlak boyu  $c/a = 2$  için yükün konumuna ve sürtünme katsayısına bağlı olarak  $K_{II}$ 'nin değişimi.



Şekil 10.  $K_{II}$  gerilme şiddet faktörünün çatlak yayılımı üzerine etkisi.

Uygulanan yük çatlak yüzeylerinin birbiri üzerinde kayma hareketi yapmasına neden teşkil etmektedir. Bunun neticesi olarak çatlak yüzeye paralel yada yüzeyden uzaklaşarak büyüme eğilimi göstermektedir.  $x_r/c \geq +1$  bölgesinde  $K_{II}$ , uygulanan yüklerden dolayı negatif değer almaktadır. Çatlak, kayan cismin gerisinde kaldığı için çatlak çeki gerilmelerine maruz kalmakta, böylelikle çatlak yüzeye doğru büyüme eğilimi göstermektedir. Sürtünme katsayısının artışı yüzeyde meydana gelen teğetsel kuvveti artırırken aynı zamanda  $|\bar{K}_{II}|$ 'nin de artmasına neden olmaktadır. Örneğin, çatlak boyu  $c/a = 2$  için çatlakın sol ucunda  $\mu=0$ 'da maksimum değer 0.35 den  $\mu = 0.5$  için 0.6 ya çıkmaktadır. Aynı şekilde minimum değer de -0.15 den -0.45 düşmektedir. Çatlak boyunun büyümesi ile  $|\bar{K}_{II}|$  değerleri artmaktadır. Sol çatlak ucu için çatlak boyu,  $c/a=0.5$ ,  $\mu=0$  için  $K_{II(max)}=0.1$  iken çatlak boyu,  $c/a=2$ ,  $\mu=0$ , için ise  $K_{II(max)}=0.35$  değerini almaktadır. Bu durum çatlakın boyunun büyümesi ile yüzeyden parça kopmasının daha kolay bir şekilde gerçekleşeceğini göstermektedir. Çatlakın sol ucu için maksimum değerlere  $x_r/c = -1$  konumunda, sağ ucu için minimum değerlere  $x_r/c = 1$  konumunda ulaşılmaktadır.

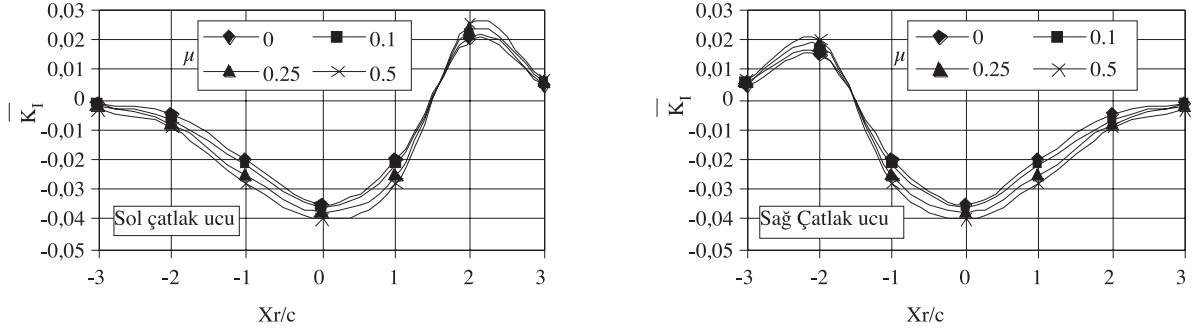
#### $K_I$ Gerilme şiddeti faktörünün analizi

$\bar{K}_I = K_I/P_0t^{1/2}$   $K_I$  gerilme şiddet faktörü de  $K_{II}$  gibi yüzeye etkiyen maksimum yük ile çatlakın yüzeyden itibaren derinliğine bağlı olarak;

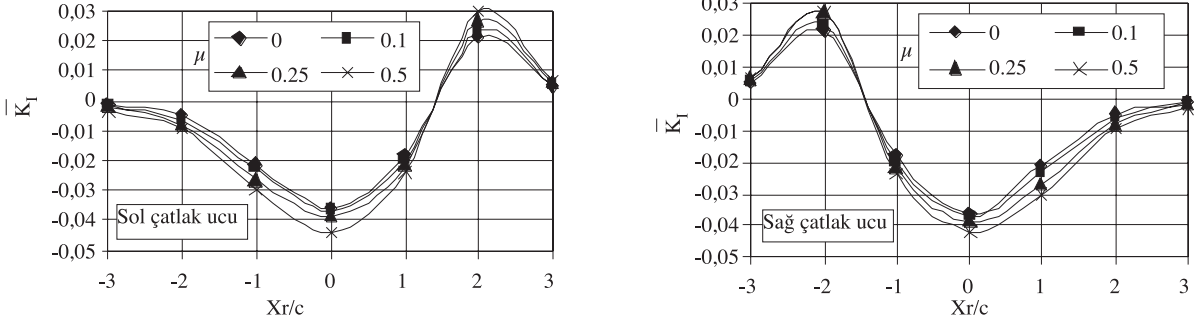
$$\bar{K}_I = K_I/P_0t^{1/2} \quad (11)$$

şeklinde boyutsuzlaştırılmıştır.  $\bar{K}_I$ 'deki değişimler yükün konumuna ve sürtünme katsayısına bağlı olarak çatlak boyları  $c/a=0.5$ ,  $c/a=1$  ve  $c/a=2$  için şekil 12, 13 ve 14 de verilmiştir.

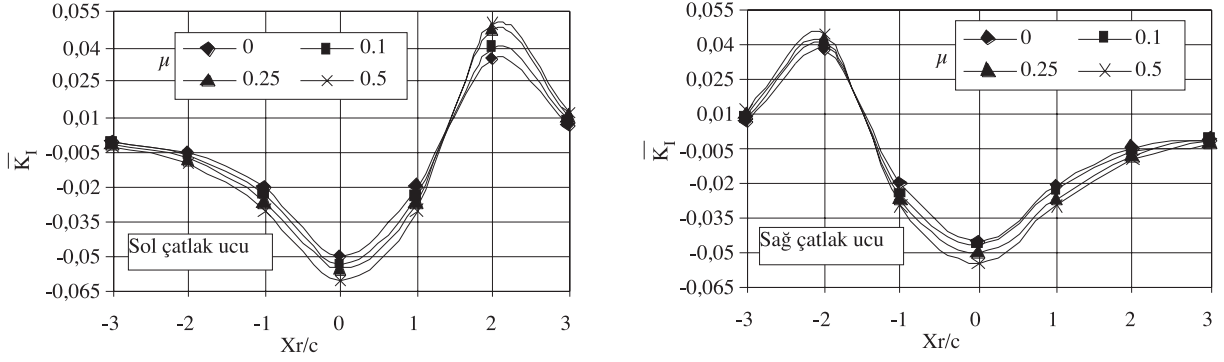
Bu tür yüzey altı çatlaklarında,  $K_I$  gerilme şiddet faktörünün negatif değer alması çatlak yüzeylerinin birbirine yaklaşarak kapandığını göstermektedir. Çünkü yüzeye etkiyen yük çatlakın açılması yönünde değil tam tersine kapanması yönünde etki etmektedir. Bu nedenle  $K_I$ ' in negatif değerleri dikkate alınmamıştır. Fakat yüzeye etkiyen yükün konumu  $x_r/c = 2$  iken normal yükün etkisiyle çatlakın sol ucu açılmaya zorlanmaktadır. Benzer durum  $x_r/c = -2$  konumunda sağ çatlak ucu için geçerlidir. Yüzeydeki sürtünme katsayısının artması ile birlikte, yüzeye etkiyen teğetsel kuvvetler çatlakın açılması yönünde önemli bir rol üstlenmektedir. Örneğin, çatlak boyu  $c/a = 2$  için yük konumu  $x_r/c = 2$  ve  $\mu = 0$  durumunda  $\bar{K}_I = +0.035$  değerini alırken, aynı yük konu-



Şekil 11. Çatlak boyu  $c/a = 0.5$  için yükün konumuna ve sürtünme katsayısına bağlı olarak  $\bar{K}_I$ 'in değişimi.



Şekil 12. Çatlak boyu  $c/a = 1$  için yükün konumuna ve sürtünme katsayısına bağlı olarak  $\bar{K}_I$ 'in değişimi.



Şekil 13. Çatlak boyu  $c/a = 2$  için yükün konumuna ve sürtünme katsayısına bağlı olarak  $\bar{K}_I$ 'in değişimi.

munda  $\mu = 0.5$  için  $\bar{K}_I = +0.05$  değerini almaktadır. Aynı şartlar altında, sol çatlak ucu için, çatlak boyu  $c/a = 2$ , yük konumu  $x_r/c = -1$  ve  $\mu = 0$  durumunda  $\bar{K}_{II} = 0.35$  değerini alırken, aynı yük konumunda  $\mu = 0.5$  için  $\bar{K}_I = 0.6$  değerini almaktadır. Tüm bu sonuçlar göz önünde bulundurulduğunda bir yüzey altı çatlak yayılmasında  $K_I$ 'in  $K_{II}$  kadar etkili olmadığı sonucuna varılabilir.  $K_{II}$ 'nin artmasına neden olan en önemli unsurlar ise; yüzeyler arasındaki sürtünme katsayısı, çatlak boyudur.

Bu tür yüzey altı çatlaklarında,  $K_I$  gerilme şiddet faktörünün negatif değer alması çatlak yüzeylerinin birbirine yaklaşarak kapandığını göstermektedir.

Çünkü yüzeye etkien yük çatlakın açılması yönünde değil tam tersine kapanması yönünde etki etmektedir. Bu nedenle  $K_I$ 'in negatif değerleri dikkate alınmamıştır. Fakat yüzeye etkien yükün konumu  $x_r/c = 2$  iken normal yükün etkisiyle çatlakın sol ucu açılmaya zorlanmaktadır. Benzer durum  $x_r/c = -2$  konumunda sağ çatlak ucu için geçerlidir. Yüzeydeki sürtünme katsayısının artması ile birlikte, yüzeye etkien teğetsel kuvvetler çatlakın açılması yönünde önemli bir rol üstlenmektedir. Örneğin, çatlak boyu  $c/a = 2$  için yük konumu  $x_r/c = 2$  ve  $\mu = 0$  durumunda  $\bar{K}_I = +0.035$  değerini alırken, aynı yük konumunda  $\mu = 0.5$  için  $\bar{K}_I = +0.05$  değerini almaktadır.

Aynı şartlar altında, sol çatlak ucu için, çatlak boyu  $c/a = 2$ , yük konumu  $x_r/c = -1$  ve  $\mu = 0$  durumunda  $\bar{K}_{II} = 0.35$  değerini alırken, aynı yük konumunda  $\mu = 0.5$  için  $\bar{K}_I = 0.6$  değerini almaktadır. Tüm bu sonuçlar göz önünde bulundurulduğunda bir yüzey altı çatlak yayılmasında  $K_I$ ' in  $K_{II}$  kadar etkili olmadığı sonucuna varılabilir.  $K_{II}$ ' nin artmasına neden olan en önemli unsurlar ise; yüzeyler arasındaki sürtünme katsayısı, çatlak boyudur.

### Sonuç

Bu çalışmada yüzey altında bulunan bir çatlakın davranışı sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak analiz edilmiştir. Düz bir yüzey üzerinde hareket eden bir silindir göz önüne alınmış, silindirin çeşitli konumları için  $K_I$  ve  $K_{II}$  faktörleri hesaplanmıştır. Elde edilen veriler ışığında  $K_{II}$ ' nin çatlak yayılması açısından oldukça etkili olduğu gözlemlenmiştir. Buna karşılık silindirin konumu  $x_r/c = 0$  iken  $K_I$ , negatif değer alması nedeniyle, çatlak açılması değil bilakis kapanması yönünde etkili olmaktadır. Fakat sol çatlak ucu için  $x_r/c = 2$  de ve sağ çatlak ucu için  $x_r/c = -2$  konumlarında pozitif değer alarak çatlak uçlarını açmaya zorlamaktadır.

Elde edilen verilere bağlı olarak  $K_{II}$ ' nin artmasına en önemli etken yüzeydeki sürtünme katsayısıdır. Sürtünme katsayısının artması ile birlikte yüzeye etkiyen teğetsel kuvvet de artmaktadır. Yüzeye etkiyen teğetsel kuvvetin artması ise çatlak yüzeylerinin birbiri üzerinde kayarak büyümesine neden olmaktadır. Çatlakın sol ucu  $x_r/c \leq 0$  duru-

munda bası gerilmelerine maruz kaldığında  $K_{II}$  pozitif değer almakta ve çatlak yüzeyden derinleşerek büyümeye zorlanmaktadır. Yükün konumu  $x_r/c \leq 1$  olduğunda sol çatlak ucu çeki gerilmelerine maruz kaldığı için negatif değer almakta ve çatlak yüzeye doğru büyümeye zorlanmaktadır. Meydana gelen bu bası ve çeki gerilmelerinin büyüklüğü ise yüzeye etkiyen teğetsel yüklerle doğru orantılıdır. Çalışma sonunda yüzey altı çatlaklarının yayılmasında en önemli unsurun kayma modu olarak bilinen  $K_{II}$  gerilme şiddeti faktörü olduğu ortaya konulmuştur. Yüzeye etkiyen teğetsel yüklerin ve çatlak boyunun artmasıyla birlikte  $K_{II}$  faktörü de artmakta ve çatlak yayılımını hızlandırmaktadır.

### Semboller

$a$	yarı temas uzunluğu
$t$	çatlak yüzeyden itibaren derinliği
$c$	yarı çatlak uzunluğu
$x, y$	kartezyen koordinatlar
$P$	silindire etkiyen yük
$K_I, K_{II}$	mod I ve Mod II gerilme şiddet faktörleri
$G$	kayma modülü
$E$	elastisite modülü
$\mu$	sürtünme katsayısı
$u, v$	x ve y yönlerindeki deplasman değerleri
$R$	silindirin çapı
$P_0$	max basınç
$\nu$	poison oranı

### Kaynaklar

Aslantaş, K. "Tabakalanma Aşınmasının Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Modellenmesi", A.K.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 1999

Dally, J. M., Chen, Y. M., Jahanmir, S., "Analysis of Subsurface Crack Propagation and Implications for Wear of Elastically Deforming Materials", Wear 141, 95-114, 1990

Djabella, H., Arnell, R. D., "Finite Element Analysis Of The Contact Stresses in Elastic Coating/Substrate Under Normal and Tangential Load", Thin Solid Film, 223, 87-97, 1993

Dubourg, M. C., Villechaise, B., "Analysis of Multiple Fatigue Crack-Part II: Result", Journal of Tribology, 114, 462-468, 1992

Fleming, J. R., Suh, N. P., "Mechanics of Crack Propagation in Delamination Wear", Wear, 44(1) 39-56, 1977

Fleming, J. R., Suh, N. P., "The relationship between crack propagation rates and wear rates", Wear, 44, 57-64, 1977

Johnson, K. L., "Contact Mechanics" Cambridge University Press, London, 202-206, 1985

Komvopoulos, K., Cho, S. S., "Finite Element Analysis Of Subsurface Crack Propagation in a Half-Space Due To Moving Asperity Contact", Wear, 209, 57-68, 1997

Komvopoulos, K., "Subsurface Crack Mechanisms Under Indentation Loading", Wear, 199, 9-23, 1996



Lee, K. S., Jinn, J. T., Earmme, Y. Y., "Finite Element Analysis of a Subsurface Crack on the Interface of a Coated Material Under a Moving Compressive Load", *Wear*, 155(1), 117-136, 1992

Salehizadeh, H., Saka, N., "Crack Propagation in Rolling Line Contact", *Journal of Tribology*, 114, 690-697, 1992

Suh, N. P., "The Delamination Theory of Wear", *Wear*, 25(2) 111-124, 1973

Taşgetiren, S., "Thermomechanical Analysis of Bimaterials With an Interfacial Crack" Ph. D. Thesis, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir, 1997

Topçu, M., Taşgetiren, S., "Mühendisler için Sonlu Elemanlar Metodu", PAÜ Mühendislik Fakültesi, Denizli, 230-231, 1998