

FRAKTAL GEOMETRİYLE MODELLENMİŞ RİJİT PÜRÜZLÜ YÜZEY İLE KAYMA TEMASI YAPAN YARI-SONSUZ ORTAMDAKİ ÇATLAK İLERLEMESİNİN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİYLE ANALİZİ

Alaettin ÖZER^a ve Hasan SOFUOĞLU^b

^aBozok Üniversitesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Yozgat.

^bKaradeniz Teknik Üniversitesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Trabzon.

ÖZET

Bu çalışmada, pürüzlü bir yüzey ile kayma teması yapan yarı-sonsuz bir ortamın yüzeyinin altındaki çatlak ilerlemesinin lineer elastik kırılma mekaniği ve sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak analizi yapılmıştır. Yüzey pürüzlülüğünü ölçmek için geleneksel yaklaşımlarda kullanılan örnek uzunluğu, ölçüm cihazı çözünürlüğü ve istatistiksel parametrelerin tespitinde ölçüm cihazının etkisi bilindiği için, bu çalışmada pürüzlü yüzeyleri daha gerçekçi olarak modellemek amacıyla bütün bu olumsuzlukları bertaraf eden fraktal geometri kullanılmıştır. Yüzey pürüzlülüğünün yüzey-altı çatlak ilerlemesi üzerindeki etkilerini araştırmak amacıyla; yarı-sonsuz ortamın pürüzlü yüzey ile yaptığı kayma teması, sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak analiz edilmiştir. Yarı-sonsuz ortamın yüzeyi altındaki yatay bir çatlak yayılma davranışı mod I ve mod II gerilme şiddet faktörleri kullanılarak çalışılmıştır. Temas eden yüzeydeki pürüzlerin pozisyonuna, temas ara yüzeyindeki sürtünme katsayısına bağlı olarak çatlak ara yüzeyinde ileri ve geri kayma ile aralık oluşumu gibi mekanizmalar birlikte meydana gelebildiği, bu mekanizmaların meydana gelmesinin, gerilme şiddet faktörlerinin dağılımını ve alanını etkilediği görülmüştür.

Anahtar kelimeler: Yüzey Pürüzlülüğü, Fraktal Yüzey, Yüzey Altı Çatlak, Çatlak İlerlemesi, Gerilme Şiddet Faktörü, Kuru Sürtünme, Elastik Temas, Sonlu Elemanlar Yöntemi.

FINITE ELEMENT ANALYSIS OF CRACK PROPAGATION IN A SEMI- INFINITE MEDIUM IN SLIDING CONTACT WITH A RIGID ROUGH SURFACE MODELLED BY FRACTAL GEOMETRY

ABSTRACT

In this study, the propagation of horizontal crack under the semi-infinite medium surface in sliding contact with a rigid rough surface was investigated by using linear elastic fracture mechanics and finite element method. Since the surface topography parameters derived from traditional statistical methods exhibit dependencies on the sample length and the instrument resolution limit, the fractal geometry was used for characterization of the rough surface topography in order to overcome such shortcomings and to present more realistic surface

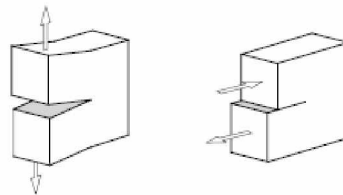
modeling. In order to investigate the effect of surface roughness on the crack propagation, the sliding contact of the semi-infinite medium with rigid rough surface was analyzed by using the finite element method. The propagation of the subsurface horizontal crack was studied within the mode I and mode II stress intensity factors. According to the position of contacting asperities and the friction coefficient at the contact interface, the occurrence of separation, forward and backward slips were presented together at the crack interface. It was shown that these mechanisms affected the distribution of stress intensity factors.

Keywords: Surface Roughness, Fractal Surface, Subsurface Crack, Crack Propagation, Stress Intensity Factor, Dry Friction, Elastic Contact, Finite Element Method.

1. GİRİŞ

Temelde doğadaki bir dizi obje veya doğal olay Euclid geometrisiyle karakterize edilemeyen düzensizliği gösterir ve onları tasvir etmek için çok küçük boyutlar gerekir. Pürüzlü yüzey bunlardan biridir. Eğer bir pürüzlü yüzey artan bir biçimde büyütülürse, pürüzlülüğün artan detayları görünmeye devam eder ve yüzey asla düzgün olmaz. Yüzeylerin sahip olduğu bu çok ölçekli pürüzlülüğü sebebiyle gerçek temas, pürüz teması olarak adlandırılan yüzey çıkıntılarının uçlarıyla sınırlıdır. Bu nedenle, yüzey ve yüzey altı çatlaklarının gerçekçi analizi için çatlak ilerleme davranışını belirleyen çatlak ucu gerilmelerinde yüzey pürüzlülüğünün etkilerini hesaba katmak gerekir. Yüzey pürüzlülüğünü ölçmek için geleneksel yaklaşımlarda kullanılan örnek uzunluğu, ölçüm cihazı çözünürlüğü ve istatistiksel parametrelerin ölçümünde ölçüm cihazının etkisi bilindiği için mühendislik yüzeylerini modellemek amacıyla fraktal geometri [1] kullanılır.

Fleming ve Suh [2]' un yüzey altı yatay bir çatlakın yayılması üzerine olan çalışmasından sonra değişik temas yükleri altında çatlak büyüme davranışını incelemek için pek çok araştırma yapılmıştır. Keer vd. [3], hareket eden Hertz tarzı bir yüzey kuvveti nedeniyle yüzey altı yatay bir çatlak ile yüzeyi kesen çatlak arasındaki etkileşimi araştırmıştır. Bu araştırma ile mod I (açılma modu gerilme şiddet faktörü, K_I), mod II (kayma modu gerilme şiddet faktörü, K_{II}) gerilme şiddet faktörleri için (şekil 1) ve sürtünmesiz çatlak ara yüzeylerindeki çatlak büyüme doğrultuları üzerine çözümler elde etmiştir. Bower [4], hareket eden normal ve teğetsel yüzey kuvvetlerine maruz kalan eğimli yüzey çatlakları problemini analiz etmek için lineer elastik kırılma mekaniği yaklaşımını kullanmıştır. Çalışmasında ayrıca, çatlak ara yüzeyi sürtünmesinin etkilerini de dikkate alarak çatlak yüzeylerindeki yapışma, kayma ve aralık oluşumunun yüzey kuvvetinin pozisyonuna bağlı olduğunu bulmuştur. Çatlak ara yüzeyinde daha büyük bölge açık kaldığında, çatlak ara yüzeyindeki kayma gerilmesinin büyüklüğünün azaldığını ve böylece mod I gerilme şiddet faktörünün de azaldığını bildirmiştir.



Şekil 1. Açılma modu (K_I) ve kayma modu (K_{II}) gerilme şiddet faktörleri

Yüzey çatlaklarıyla karşılaştırıldığında, temas yükleri altında yüzey altı çatlaklarını araştıran daha az sayıda çalışma yapılmıştır. Kaneta vd.[5], kayma ve çekme çatlak büyümesinin sırasıyla maksimum kayma ve çekme gerilme şiddet faktörleri düzleminde olduğunu

varsayarak bir yüzey altı silindirik çatlaklarının yayılma doğrultusunu çalışmış ve iz (trailing) çatlak ucundaki büyümenin kayma mekanizması nedeniyle yüzeye doğru olduğunu bildirmiştir.

Sheppard vd. [6], çatlak ara yüzeyi açılması durumunu araştırmış ve çatlak ara yüzeyindeki en karmaşık durumun üç farklı mekanizmadan oluştuğunu tespit etmiştir. Yüzey altı çatlak oluşumunun deneysel gözlemleri yeterince açık olmadığı için daha önceki analitik çalışmalarda düşünülen çatlak ara yüzeyi mekanizmaları sezgisel olarak beklenmiş çatlak davranışlarını temel alır. Analitik metotlardaki bu sınırlamanın bir alternatifi sonlu elemanlar yöntemidir. Kaneta vd. [5], tarafından yapılan sonlu elemanlar simülasyonları, Hertz tipi yüklemeye altı çatlak yüzeylerinin açılma ve kapanmasını ortaya çıkarmıştır. Salehizadeh ve Saka [7] yuvarlanma temasında, çatlak yüzeyi sürtünmesinin ve çatlak uçlarındaki plastik akma etkisini kısa yüzey altı çatlakların (hem düzgün hem de ağaç dalı şeklinde) yayılmasını çalışmak için sonlu elemanlar yöntemini kullanmıştır. Doğrusal çatlakların gerçek mod II yüklemeye maruz kaldığını ve gerilme şiddet faktörleri ve çatlak ucu kayma yer değiştirmesinin çatlak ara yüzeyindeki artan sürtünme ile birlikte azaldığını belirtmişlerdir.

Komvopoulos [8], sonlu elemanlar yöntemi kullanarak normal temas nedeniyle yüzey altı çatlak oluşumu probleminin analizini yapmış ve çatlak ara yüzeyindeki farklı yüklemeye pozisyonları ve çatlak ara yüzeyi sürtünme katsayıları için kayma, yapışma ve açılma bölgelerini gösteren çatlak mekanizması haritaları geliştirmiştir. Komvopoulos ve Cho [9] yüzeyinde önce normal hemen ardından pozitif x doğrultusunda kayma teması yapan, hareketli küresel bir pürüz ile yüklenmiş homojen yarı-sonsuz ortamın yüzeyinin d kadar altında düzgün bir yatay çatlak yayılma davranışının analizini yapmıştır. Çatlak uzunluğuderinlik oranı, temas bölgesindeki ve çatlak ara yüzeyindeki sürtünme ve kayma, çekme modu çatlak ilerleme doğrultuları üzerindeki yüklemeye durumunun etkisi aydınlatılmıştır.

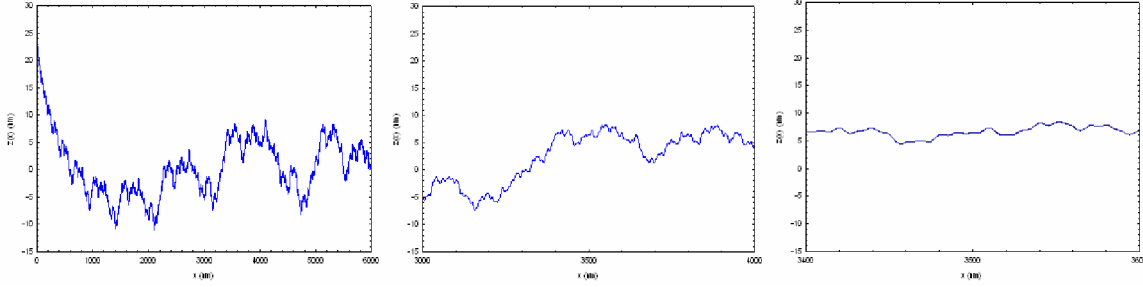
2. YÜZEY KARAKTERİZASYONU

Yüzey karakterizasyonu için, yüzey topografisi parametrelerinin belirlenmesinde örnek uzunluğu ve ölçüm cihazının hassaslığı gibi olumsuz etkilerin üstesinden gelmesi sebebiyle, skaladan-bağımsız parametreler kullanan fraktal geometriden [1] yararlanmak avantajlı olmaktadır. Fraktal davranış gösteren pürüzlü yüzeylerin iki-boyutlu temas mekaniği analizlerinde kullanılan yüzey profili [10-14], Weierstrass-Mandelbrot (W-M) fonksiyonu [15] ile aşağıdaki gibi temsil edilir.

$$z(x) = L \left(\frac{G}{L} \right)^{D-1} \sum_{n=0}^{n_{\max}} \frac{\cos \left(\frac{2\pi\gamma^n x}{L} \right)}{\gamma^{(2-D)n}} \quad (1)$$

Burada L fraktal örnek uzunluğu; G fraktal pürüzlülük; D fraktal boyut ($1 < D < 2$); γ , yüzey profilindeki frekansların yoğunluğunu kontrol eden bir parametre (tipik olarak $\gamma=1.5$ [14]), ve n ise $n_{\max} = \text{int}[\log(L/L_s)/\log\gamma]$ ile verilen frekans indisidir. Buradaki L_s ise kesim uzunluğudur. Fraktal pürüzlülük G , frekanstan bağımsız olan bir yükseklik ölçü parametresidir. Fraktal boyut D ' nin büyüklüğü $z(x)$ yüzey fonksiyonundaki yüksek ve düşük frekans bileşenlerinin katkılarını belirler. (1) eşitliğiyle verilen fonksiyon, D ve G fraktal parametrelerinin deneysel olarak belirlendiği gerçek yüzeylere benzeyen yüzey topografilerinin simülasyonu için uygundur. Şekil 1' de gösterilen ve $z(x)$ fonksiyonuyla verilen yüzey profili, bir isotropik ve homojen pürüzlü yüzeyin istatistiksel olarak geçerli bir gösterimidir.

Bu çalışmada kullanılan rijit pürüzlü yüzey $G=9.46 \times 10^{-4}$ nm, $D=1.44$, $\gamma=1.5$, $L=4379$ nm parametreleri ve (1) eşitliği kullanılarak elde edilmiş ve şekil 1’ de gösterilmiştir. Öncelikle, verilen değerler için (1) eşitliğinin 0-6000 nm arasındaki grafiği elde edilmiştir. Ancak yüzey profilinden oluşan dalga uzunluklarını hesaba katmak için tüm hard-disk yüzeyinin yüksek mesh çözünürlüğü ile sonlu elemanlar modelinin yapılması pratik olmadığından; analizlerde kullanmak için bu 6000 nm ‘lik kısmı yeniden modelleyebilen 3400-3600 nm arasındaki pürüzlü yüzey seçilmiştir. Sayfa kısıtlaması sebebiyle, fraktal geometri ile yapılan yüzey modellemesi hakkında ancak sınırlı bilgi burada verilmiş olup daha detaylı bilgi [16] referansından elde edilebilir.



Şekil 2. Analizlerde kullanılan rijit fraktal pürüzlü yüzeyin belirlenmesi aşamaları

3. MODELLEME YÖNTEMİ

3.1. Gerilme Şiddet Faktörlerinin Hesaplanması

Bir kırılma mekaniği probleminin sayısal çözümü elde edildiğinde, gerilme şiddet faktörleri tahmin edilebilir. Bunun için ya çatlak ucu elemanlarının düğüm noktalarındaki yer değiştirmeleri ve gerilmelerini temel alan direkt yöntemler veya elastik şekil değiştirme enerji salıverme oranı ve J-integrali gibi dolaylı yöntemler kullanılabilir. Mod I gerilme şiddet faktörü K_I , dörtgensel isoparametrik çatlak ucu elemanlarının düğüm noktalarındaki yer değiştirmelerin terimleri şeklinde aşağıdaki gibi ifade edilebilir [17].

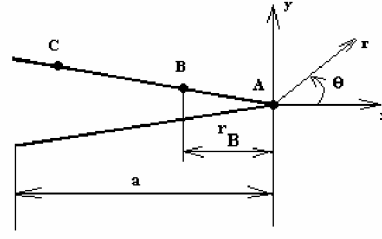
$$K_I = \frac{2G\sqrt{2\pi}}{k+1} \left[\frac{4u_y^B - u_y^C}{\sqrt{a}} \right] \quad (2a)$$

Burada G kayma modülü, düzlem şekil değiştirme için $k=3-4\nu$ ve u_y ise şekil 3’ de gösterilen çatlak ucu elemanında B ve C düğümlerinde y doğrultusundaki yer değiştirmeleri göstermektedir.

Benzer şekilde mod II gerilme şiddet faktörü K_{II} , aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$K_{II} = \frac{2G\sqrt{2\pi}}{k+1} \left[\frac{4u_x^B - u_x^C}{\sqrt{a}} \right] \quad (2b)$$

Burada u_x , x doğrultusundaki yer değiştirmeleri gösterir. Alternatif olarak K_I ve K_{II} değerleri çatlak ucunun kenarındaki düğüm noktalarının yer değiştirmelerinden bir lineer ekstrapolasyon tekniği kullanılarak hesaplanabilir [18].



Şekil 3. Hesaplamalarda kullanılan çatlak ucu elemanının şematik görünüşü

Klasik lineer elastik kırılma mekaniğinde mod I ve mod II gerilme şiddet faktörleri aşağıdaki gibi verilir.

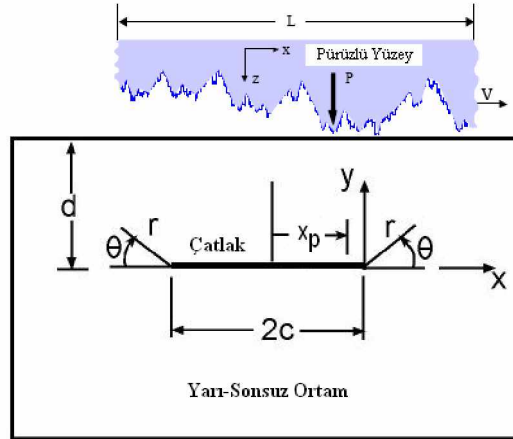
$$K_I = \lim_{r \rightarrow 0} \sqrt{2\pi r} \sigma_{yy}(r, \theta) \quad (3a)$$

$$K_{II} = \lim_{r \rightarrow 0} \sqrt{2\pi r} \tau_{xy}(r, \theta) \quad (3b)$$

Bu yöntemde, çatlak düzleminde, çatlak ucunun etrafındaki farklı düğüm noktalarındaki σ_{yy} ve τ_{xy} gerilmeleri (3a) ve (3b) eşitlikleri temel alınarak K_I ve K_{II} değerleri elde edilmektedir. Detaylı bilgi referans [16]' dan elde edilebilir.

3.2. Çözüm Yöntemi ve Sonlu Elemanlar Modeli

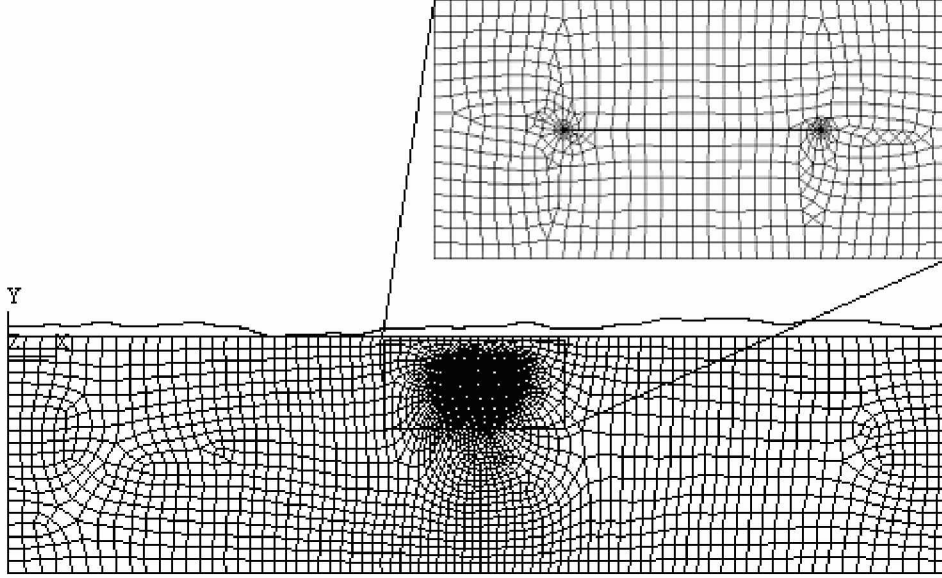
Bağıl hareket yapan iki katı temas ettiğinde, temas bölgesinde oluşan normal ve kayma gerilmeleri, mikro temas bölgeleri olarak adlandırılan pürüzlerin değme noktalarından iletilir. Yüzeyler belli bir pürüzlülük dağılımına sahip olduğunda; manyetik rijit diskler gibi, üç-boyutlu problem, şekil 4' te görüldüğü gibi pürüzlü yüzeyin yarı-sonsuz ortam ile temasta olduğu iki-boyutlu düzlem şekil değiştirme problemine dönüştürülebilir.



Şekil 4. Bir homojen yarı-sonsuz ortam içindeki yatay yüzey altı çatlakın pürüzlü yüzey ile temasının şematik gösterilişi

Bu çalışmada manyetik depolama aygıtlarında (bilgisayar kafa-diski), yüzeyi altında yatay bir çatlak içeren bir disk yüzeyinde ve çatlak etrafında oluşan gerilme problemi ele alınmaktadır. Fiziksel olarak problem, fraktal geometri ile modellenmiş rijit pürüzlü yüzeyin belli bir girişim mesafesinde, yüzeyden d derinliğinde ve 2c uzunluğunda yatay bir çatlakla sahip yarı-sonsuz homojen pürüzsüz bir ortama bastırılması ve istenen girişim mesafesine ulaştıktan sonra girişim mesafesi korunarak yarı-sonsuz ortam üzerinde +x doğrultusunda

kaydırılmasından oluşmaktadır. Girişim mesafesi olarak literatürle karşılaştırma yapabilmek amacıyla 0.3 nm alınmıştır. Normal temas ve sonrasında kayma teması simülasyonlarında temas ara yüzündeki sürtünme katsayısı, $\mu= 0.0, 0.25, 0.5, 0.75, 1.0$ değerlerini almıştır. Yüzeyden $d=4$ ve 8 nm derinliklerinde $2c=8$ nm uzunluğa sahip yatay çatlak modellenmiştir. Simülasyonlarda manyetik depolama aygıtlarını temsil edebilmek için, $E=92$ GPa ve $\nu=0,3$ malzeme özelliklerine sahip olan bir elastik isotropik yarı-sonsuz ortam kullanılmıştır.



Şekil 5. Yüzey altı çatlak analizi yapılan yarı-sonsuz ortamın sonlu elemanlar modeli ve çatlak etrafındaki ağın detayı

Yüzey altındaki çatlak uzunluğunun derinliğe oranı $2c/d=1$ olduğu yarı-sonsuz ortamın sonlu elemanlar modeli şekil 5’ de gösterilmiştir. Yarı-sonsuz ortamın boyutları daha önceki bölümde verildiği gibi 200×50 nm alınmıştır. Sonlu elemanlar ağı, çatlak uçlarındaki tekilliği modelleyebilen $2c/d=1$ için 3139 tane, $2c/d=2$ için ise 3919 tane 8 düğümlü isoparametrik, dörtgen, düzlem şekil değiştirme elemanlardan oluşmuştur. Pürüzlü yüzey ile yarı-sonsuz ortamın normal ve kayma temasını modellemek amacıyla bu yüzeylerde sırasıyla hedef ve temas elemanları kullanılmıştır. Ayrıca çatlak ara yüzünün birbiri üstüne kapanmasını önlemek için de yine çatlak ara yüzünde hedef ve temas elemanları kullanılmıştır. Çözümler için çok amaçlı ANSYS Multyphysics sonlu elemanlar paket programı kullanılmıştır. Analizlerde yakınsamayı sağlamak amacıyla simetrik olmayan matrislerle birlikte tam Newton-Rapson iteratif yöntemi kullanılmıştır.

4. BULGULAR VE DEĞERLENDİRME

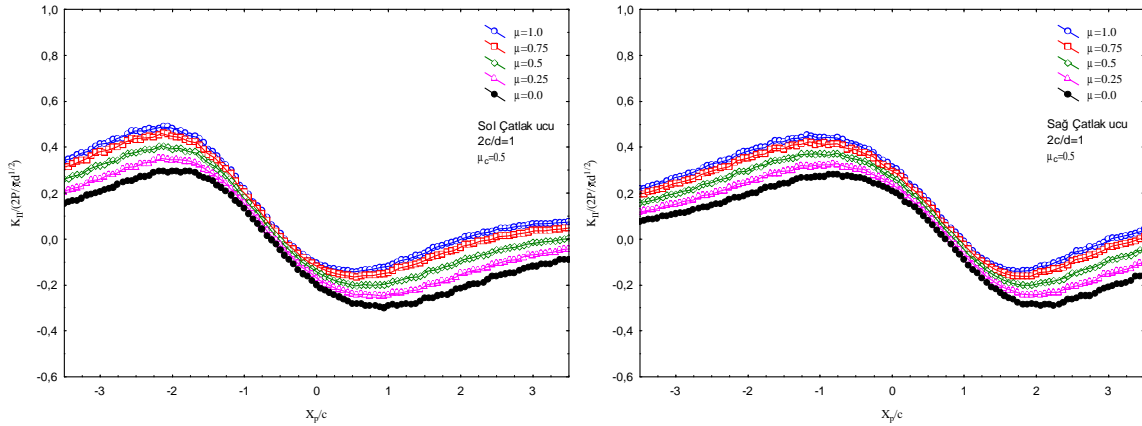
Çalışmalar, özellikle normal ve kayma temasının K_{II} ve K_I gerilme yığılma faktörleri ve sonrasında bu faktörlerin çatlak ilerlemesi üzerindeki etkileri üzerine yoğunlaştırılmıştır. Çatlak uzunluğu/derinlik oranı, temas ve çatlak ara yüzelerindeki sürtünme ve yüklemenin kayma ve çekme modundaki çatlak ilerlemesi üzerindeki etkileri belirlenmeye çalışılan çalışmalar sonucunda aşağıdaki bulgular elde edilmiştir.

Şekil 6 ve 7, $\mu_c=0.5$ ve çatlak uzunluğu/derinlik oranının ($2c/d$) sırasıyla 1 ve 2 değerleri için K_{II} ’ nin pürüzün sağ ya da sol çatlak ucundaki pozisyonuna göre değişimini göstermektedir. Normal ve kayma teması sonuçları μ ’ nün 0.0-1.0 arasındaki değerleri için verilmiştir. Bu iki

şekilden kolaylıkla görüldüğü gibi bütün sürtünme değerleri için K_{II} eğrileri paralel değişim göstermektedir. K_{II} 'nin maksimum ve minimum değerleri, pürüz her bir çatlak ucunun üzerindeki konuma ulaşmadan önce ve sonra oluşur. K_{II} 'deki bu artış ve azalmalar çatlaktaki yorulma sebebiyle büyümenin birinci sebebi olarak düşünülmektedir. 6 ve 7 şekilleri karşılaştırıldığında görülür ki $2c/d$ oranı arttığında K_{II} 'nin maksimum ve minimum değerleri artmakta ve K_{II} 'nin bu maksimum ve minimum değerlerine karşılık gelen pürüz pozisyonları arasındaki mesafe de azalmaktadır. 6 ve 7 şekillerinde gösterilen K_{II} eğrileri, artan temas ara yüzeyi sürtünmesi ve çatlak uzunluğu/derinlik oranı ile birlikte çatlak ucu gerilmelerinin etkileyici artışını açığa vurmaktadır. Bu davranışın sebebi, artan sürtünme ile birlikte yüzey kayma gerilmesindeki artma ve $2c/d$ 'nin daha yüksek değerler aldığı çatlak ucunda meydana gelen çok daha yüksek gerilmeler olarak görülebilir.

$2c/d=1$ olduğu durumlarda elde edilen K_{II} dağılımlarının son derece düzenli olduğu ve geçişlerin yumuşak olduğu oysa, $2c/d=2$ olduğu, yani çatlakın yüzeye ilk derinliğinin yarısı kadar daha yaklaştığı durumda ise, K_{II} dağılımının çok daha düzensiz ve geçişlerin daha keskin olduğu görülmektedir. Bunun sebebi ise, çatlak derinliği azaldıkça temas arayüzeyi ile çatlak arasındaki mesafenin azalması ve etkiyen yük nedeniyle oluşan gerilme dağılımının çatlak uçlarında çok daha yüksek değerlere ulaşmasıdır.

Fraktal geometri ile modellenmiş pürüzlü yüzey yarı-sonsuz ortam üzerinde soldan sağa doğru kayma teması yapmaya başlayıp, yük sol çatlak ucuna yaklaştığında K_{II} faktörü pozitif değer almakta yani sol çatlak ucunun yüzeyleri birbiri üzerinden kaymaya zorlanmaktadır (şekil 6). Ayrıca bu çalışmada çatlak yüzeyleri temas elemanlarıyla modellendiğinden çatlak yüzeylerinin birbirleri üzerine kapanmasının üstesinden gelinmiştir. Pürüz çatlak ucunun üstüne geldiğinde K_{II} faktörü azalmakta ve sıfıra yaklaşmaktadır (şekil 6). Çatlak ucunu geçtiğinde ise bu sefer K_{II} faktörü negatif değer alıp bir minimum yapmaktadır (şekil 6). Yük çatlaktan ayrıldıktan sonra K_{II} tekrar artmaya başlamakta ve sıfıra yaklaşmaktadır.

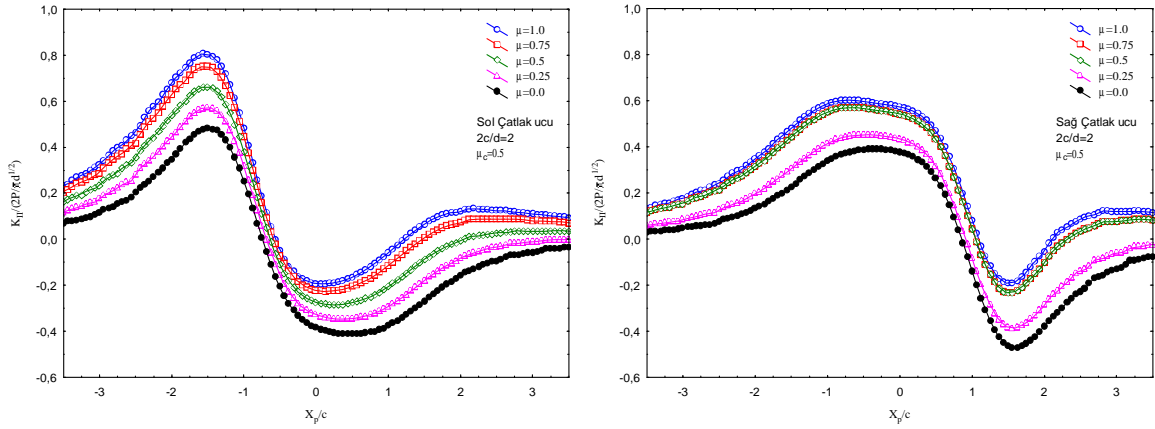


Şekil 6. Fraktal yüzeyle temas eden yarı-sonsuz ortamın mekanik analizi sonucunda yatay çatlakta oluşan boyutsuz K_{II} faktörünün pürüz pozisyonuna ve sürtünme katsayısına göre değişimi

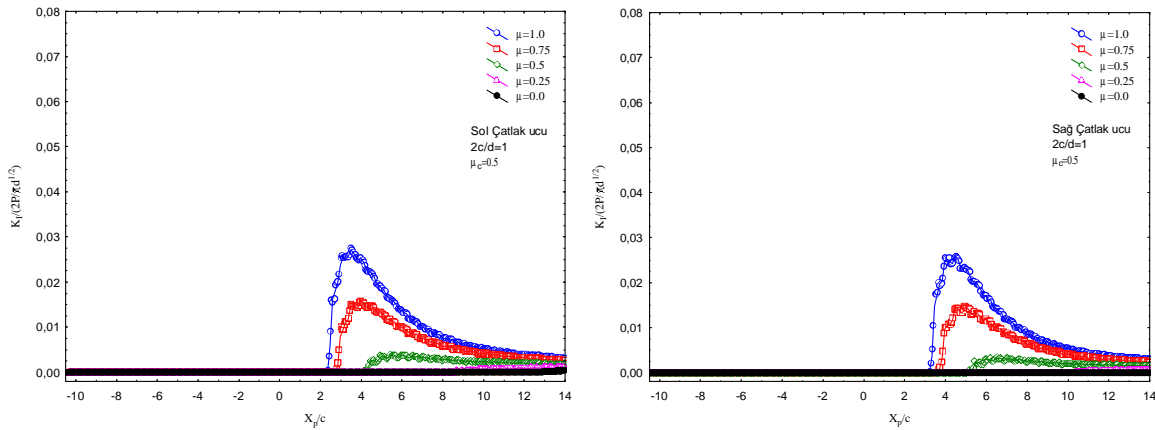
Temas ara yüzeyinde sürtünme katsayısının artışı sürtünme kuvvetini de artırmakta, grafiklerden de görüldüğü gibi aynı zamanda K_{II} faktörünün de artmasına sebep olmaktadır. Şekil 8 ve 9 ise, $\mu_c=0.5$ ve sırasıyla $2c/d=1$ ve 2 için K_I 'in, pürüzün sağ ya da sol çatlak ucundaki pozisyonuna göre dağılımını vermektedir. Bu şekillerden açıkça görüldüğü gibi, nispeten yüksek kayma sürtünmesi ($\mu \geq 0.5$) değerleri için K_I , sıfır olmayan değerler almaktadır. Oysaki düşük sürtünme katsayıları ($\mu \leq 0.25$) için elde edilen K_I değerleri, bütün

pürüz pozisyonları için ya sıfırdır ya da sıfıra yakın çok küçük değerlerdedir. $\mu \geq 0.5$ değerleri için K_I hızlı bir şekilde maksimum değere yükselir ve hemen ardından pürüz sağa doğru hareket ettikçe yavaş yavaş düşer ve sıfır olur. K_I , sürtünme katsayısı ve çatlak uzunluğunun derinliğe oranı olan $2c/d$ parametrelerinin artmasıyla artmaktadır. Özellikle $2c/d=2$ için aynı yükleme şartlarında sağ çatlak ucunda daha büyük değerler alır. Bu tür yatay yüzey altı çatlaklarda K_I faktörünün negatif değer alması çatlak yüzeylerinin birbirlerine yaklaşarak kapanmaya çalıştığını göstermektedir. Çünkü yüzeye etki eden yük çatlakın kapanması yönünde zorlamaktadır. Bu nedenle K_I ' in negatif değerleri sıfır alınmıştır.

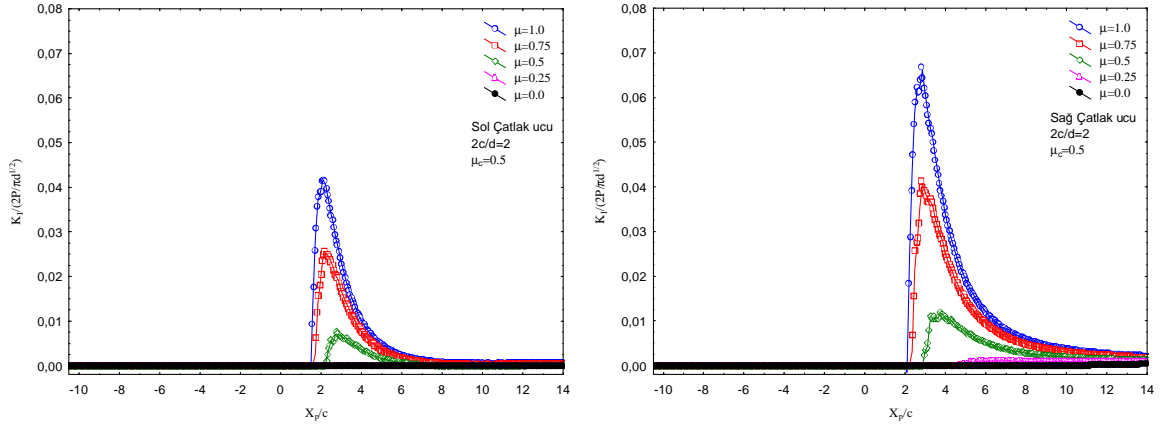
Sol çatlak ucu için $x_p/c \geq 2$ 'den itibaren K_I faktörü pozitif değer almaktadır. Sağ çatlak ucu için ise bu değer 3 'den başlamaktadır. K_I ve K_{II} değerleri birbirleriyle karşılaştırıldığında ise K_{II} değerlerinin merteye olarak K_I ' den daha büyük olduğu ortaya çıkmaktadır. Bu da çatlakta kayma tipi gerilme şiddetinin etkin olduğunu göstermektedir.



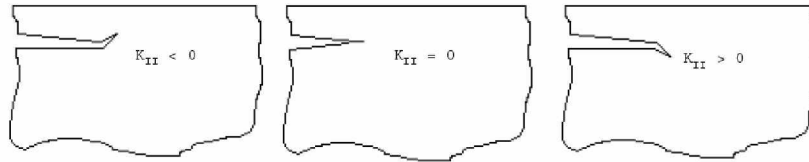
Şekil 7. Fraktal yüzeyle temas eden yarı-sonsuz ortamın mekanik analizi sonucunda yatay çatlakta oluşan boyutsuz K_{II} faktörünün pürüz pozisyonuna ve sürtünme katsayısına göre değişimi



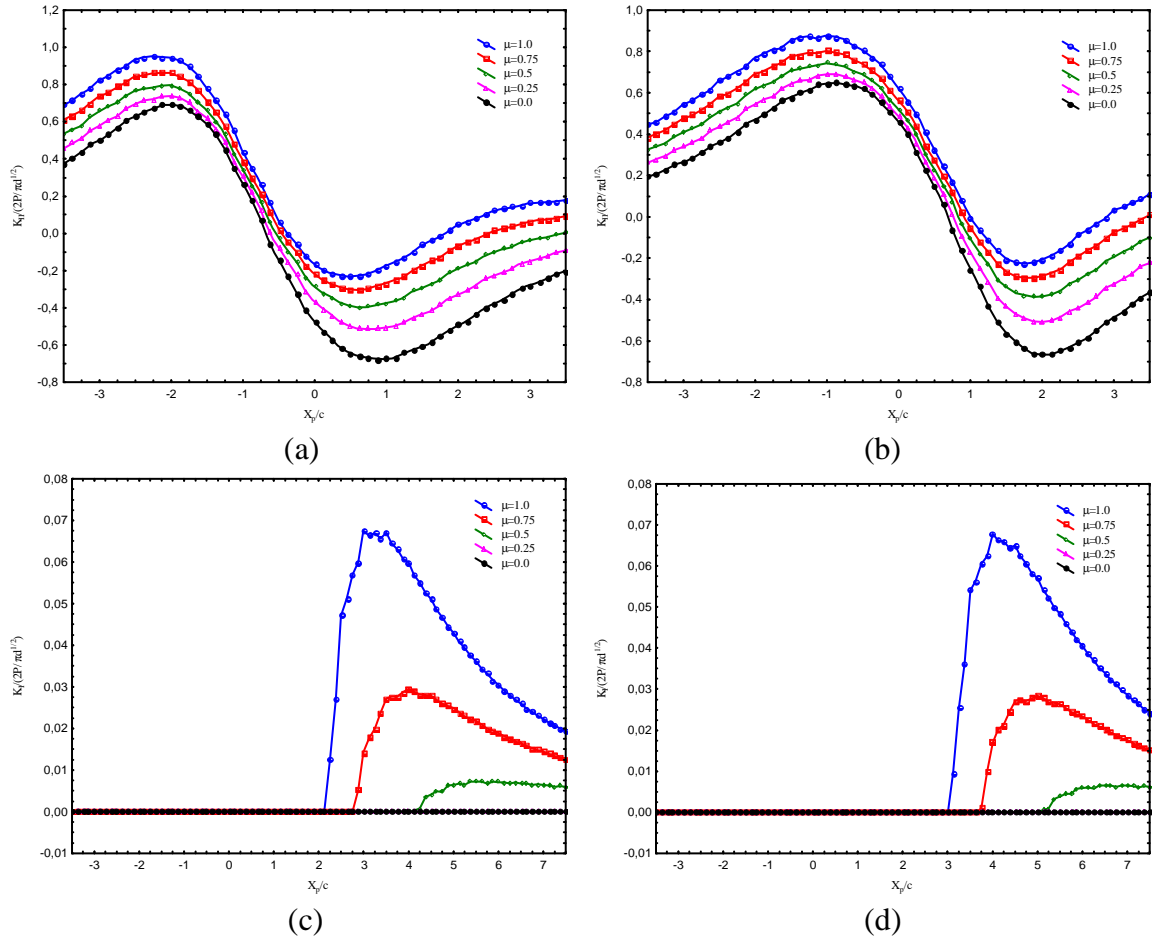
Şekil 8. Fraktal yüzeyle temas eden yarı-sonsuz ortamın mekanik analizi sonucunda yatay çatlakta oluşan boyutsuz K_I faktörünün pürüz pozisyonuna ve sürtünme katsayısına göre değişimi



Şekil 9. Fraktal yüzeyle temas eden yarı-sonsuz ortamın mekanik analizi sonucunda yatay çatlakta oluşan boyutsuz K_I faktörünün pürüz pozisyonuna ve sürtünme katsayısına göre değişimi



Şekil 10. K_{II} faktörünün çatlak yayılımı üzerine etkisi [20]



Şekil 11. Komvopoulos ve Cho [9] ' nun elde ettiği a) sol, b) sağ çatlak ucu için K_{II} ve c) sol, ve d) sağ çatlak ucu için K_I gerilme şiddet faktörü dağılımları

Yüzey altındaki yatay çatlakın K_{II} faktörüne bağlı olarak yayılma davranışı Dally vd.[19] tarafından şekil 10' daki gibi verilmiştir. Buna göre çatlak ucu büyümesi, K_{II} faktörünün büyük olduğu yerlerde aşağıya doğru küçük olduğu yerlerde ise yukarıya doğru olmaktadır. K_{II} ' nin sıfır olduğu yerlerde ise çatlak büyümesi çatlak düzlemi boyunca olmaktadır. Sol çatlak ucunda $x_p/c \geq -1$, sağ çatlak ucunda ise $x_p/c \geq 1$ olan bölgelerde K_{II} faktörü negatif değer almaktadır. Bunun sebebi ise çatlak uçlarının pürüzün gerisinde kalması sebebiyle çatlak ucunun çeki gerilmesine maruz kalmasıdır. Böylece çatlak ucu yüzeye doğru bir büyüme göstermektedir. Bu çalışmada elde edilen K_{II} faktörü sonuçları ile şekil 11' de verilen Komvopoulos ve Cho [9]' nin küresel pürüz için elde ettiği K_{II} sonuçlarıyla aynı karakteristik davranışları sergilediği görülmektedir. Yani, Komvopoulos ve Cho [9]' nun küresel tek pürüz için elde ettiği K_{II} faktörü dağılımlarında olduğu gibi, temas ara yüzeyinde sürtünme katsayısı arttıkça K_{II} faktörü değerlerinin de arttığı görülmektedir. Ayrıca K_{II} 'nin minimum ve maksimum değerlerinin pürüz sol ve sağ çatlak ucunun üzerindeki konuma ulaşmadan önce ve sonra oluşması her iki çalışmanın ortak sonuçlarındandır.

Yine benzer şekilde sürtünme katsayısının 0.5' den büyük değerleri için K_I ' in sıfır olmayan değerler alması da benzer sonuçlardan biridir. Buna karşın fraktal geometrili yüzey ile elde edilen boyutsuz K_{II} değerlerinin Komvopoulos ve Cho [9]' nun elde ettiği değerlerden daha düşük olduğu ve her bir sürtünme katsayısı için elde edilen K_{II} dağılımlarının da Komvopoulos ve Cho [9]' da verilenlere göre birbirine çok daha yakın oldukları görülmektedir.

5. SONUÇLAR

Elde edilen bulgular ve yapılan değerlendirmelerin ışığı altında aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

1. Temas eden yüzeydeki pürüzlerin pozisyonuna, temas ara yüzeyindeki sürtünme katsayısına bağlı olarak çatlak ara yüzeyinde ileri ve geri kayma ile aralık oluşumu gibi mekanizmalar birlikte meydana gelebilir. Bu mekanizmaların meydana gelmesi, gerilme şiddet faktörlerinin dağılımını ve alanını etkiler.

2. K_{II} gerilme şiddet faktörünün büyüklüğü K_I gerilme şiddet faktörünün büyüklüğünden anlamlı şekilde büyük olup bu da düzlem içi kayma modu çatlak büyümesinin yaygın olduğunu göstermiştir.

3. K_{II} faktörünün çatlakın yayılma davranışı üzerinde daha fazla etkisi olduğu görülmüştür. Buna karşın K_I faktörü ise fraktal dağılımlı pürüzlü yüzeyde sol çatlak ucu için $x_p/c \geq 2$ den itibaren sağ çatlak ucu için 3 ' den itibaren pozitif değer alması nedeniyle sadece bu değerlerden sonra çatlak ucunun açılması yönünde etki yapmaktadır. Bu değerlerin öncesinde ise, negatif değerler alması sebebiyle çatlakın kapanması yönünde etki yapmaktadır.

4. Çatlak ucunun etrafındaki gerilme alanı temas ara yüzeyindeki sürtünmeden kaynaklanan kuvvetten büyük ölçüde etkilenir. Temas ara yüzeyindeki sürtünme katsayısındaki artışın K_{II} ve K_I faktörünü anlamlı bir şekilde (özellikle $\mu=0.5$ ' den sonra) artırdığı görülmüştür. Bunun sebebi ise temas ara yüzeyinde meydana gelen kayma kuvvetinin güçlü etkisidir.

5. Bu çalışmada pürüzlü yüzeyleri çok daha gerçekçi olarak modelleyebilen fraktal geometri kullanılmak suretiyle elde edilen mekanik analiz sonuçları literatürde yüzey pürüzlülüğünü idealleştirerek yapılan çalışmalardan farklı olmuştur. Daha düzensiz ve gerçekçi bir yüzey dağılımına sahip fraktal geometrili pürüzlü yüzey ile elde edilen gerilme şiddet faktörü dağılımları bize çok daha farklı ideal ve düzgün olmayan değişimler

vermektedir. Böylece gerçek şartlarda ortaya çıkabilecek durumlar hakkında da gerçekçi değerler elde edilebilecektir.

KAYNAKLAR

1. Mandelbrot, B. B., 1983. *The Fractal Geometry of Nature*, Freeman, New York, NY.
2. Fleming, J. R. ve Suh, N.P., 1977. Mechanics of Crack Propagation in Delamination Wear, *Wear*, 44,39-56.
3. Keer, L. M., Bryant, M.D., ve Haritos, G.K., 1982. Subsurface and Surface Cracking Due to Hertzian Contact, *J. Lubric. Technol.*, 104, 347-351.
4. Bower, A.F., 1988, The Influence of Crack Face Friction and Trapped Fluid on Surface Initiated Rolling Contact Fatigue Cracks, *J. Tribol.*, 110, 704-711.
5. Kaneta, M., Murakami, Y. ve Okazaki, T., 1986. Growth Mechanism of Subsurface Crack Due to Hertzian Contact, *J. Tribol.*, 108, 134-139.
6. Sheppard, S.D., Barber, J.R. ve Comninou, M., 1987. Subsurface Cracks Under Conditions of Slip, Stick and Separation Caused by a Moving Compressive Load, *J. Appl. Mech.*, 54, 393-398.
7. Salehizadeh, H. ve Saka, N., 1992. Crack Propagation in Rolling Line Contacts, *J. Tribol.*, 114, 690-697.
8. Komvopoulos, K., 1996. Subsurface Crack Mechanisms Under Indentation Loading, *Wear*, 199, 9-23.
9. Komvopoulos, K ve Cho, S. –S., 1997. Finite Element Analysis of Subsurface Crack Propagation in a Half-Space Due to a Moving Asperity Contact, *Wear*, 209, 57-68.
10. Majumdar, A. ve Bhushan, B., 1991. Fractal Model of Elastic-Plastic Contact Between Rough Surfaces, *ASME J. Tribology*, 113, 1-11.
11. Wang, S. ve Komvopoulos, K., 1994a. A Fractal Theory of The Interfacial Temperature Distribution in the Slow Sliding Regime: Part I- Elastic Contact and Heat Transfer Analysis, *ASME J. Tribology*, 116, 812-823.
12. Wang, S. ve Komvopoulos, K., 1994b. A Fractal Theory of The Interfacial Temperature Distribution in the Slow Sliding Regime: Part II- Multiple Domains, Elastoplastic Contacts, and Applications, *ASME J. Tribology*, 116, 824-832.
13. Wang, S. ve Komvopoulos, K., 1995. A Fractal Theory of the Temperature Distribution at Elastic Contacts of Fast Sliding Surfaces, *ASME J. Tribology*, 117, 203-215.
14. Yan, W. ve Komvopoulos, K., 1998. Contact Analysis of Elastic-Plastic Fractal Surfaces, *Journal of Applied Mechanics*, 84, 3617-3624.
15. Majumdar, A. ve Tien, C.L., 1990. Fractal Characterization and Simulation of Rough Surfaces, *Wear*, 136, 313-327.
16. Özer, A., 2006, Mechanical and Thermomechanical Analysis of Elastic-Plastic Semi-Infinite Medium in Sliding Contact with Fractal Surface, Ph.D. Dissertation, Karadeniz Technical University – Trabzon.
17. Shih, C.F., deLorenzi, H.G. ve German, M.D., 1976. Crack Extension Modeling with Singular Quadratic Isoparametric Elements, *Int. J. Fract.*, 12, 647-651.
18. Chan, S.K., Tuba, I.S. ve Wilson, W.K., 1970. On the Finite Element Method in Linear Fracture Mechanics, *Eng. Fract. Mech.*, 2, 1-17.
19. Dally, J. M., Chen, Y.M. ve Jahanmir, S., 1990. Analysis of Subsurface Crack Propagation and Implications for Wear of Elastically Deforming Materials, *Wear*, 141, 95-114.