

DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SERAMİK MALZEMELERİN
KIRILMA TOKLUĞU DEĞERLERİNİN
ÜÇ BOYUTLU SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ
İLE TEORİK OLARAK BELİRLENMESİ

Asım ÖZDEMİR

Kasım, 2006

İZMİR

**SERAMİK MALZEMELERİN
KIRILMA TOKLUĞU DEĞERLERİNİN
ÜÇ BOYUTLU SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ
İLE TEORİK OLARAK BELİRLENMESİ**

**Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Yüksek Lisans Tezi
Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü
Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı**

Asım ÖZDEMİR

Kasım, 2006

İZMİR

YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

ASIM ÖZDEMİR, tarafından YRD.DOÇ.DR.MUSTAFA TOPARLI yönetiminde hazırlanan “SERAMİK MALZEMELERİN KIRILMA TOKLUĞU DEĞERLERİNİN ÜÇ BOYUTLU SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE TEORİK OLARAK BELİRLENMESİ” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

.....
YRD.DOÇ.DR.MUSTAFA TOPARLI

Yönetici

.....
DOÇ.DR.İ.AKIN ALTUN

Jüri Üyesi

.....
YRD.DOÇ.DR.EVREN TOYGAR

Jüri Üyesi

PROF.DR.CAHİT HELVACI

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın ortaya çıkarılması ve yürütülmesi esnasında destek ve yardımları için başta Sayın YRD.DOÇ.DR.MUSTAFA TOPARLI hocam ve Sayın PROF.DR.TEVFİK AKSOY hocam olmak üzere, bölümümüz öğretim üyelerine teşekkür ederim.

Dokuz Eylül Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Mekanik Anabilim Dalı Araştırma Görevlisi Sayın YUSUF ARMAN ve Sayın SEMİH BENLİ'ye ANSYS yazılımı ile ilgili yardımları için teşekkür ederim.

Ayrıca, Celâl Bayar Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü Öğretim Üyesi Sayın YRD.DOÇ.DR.HAKAN ÇETİNEL hocama destek ve yardımları için teşekkür ederim.

Son olarak, bu çalışmanın her aşamasında maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen aileme teşekkürü bir borç bilirim.

ASIM ÖZDEMİR

İzmir, 2006

SERAMİK MALZEMELERİN KIRILMA TOKLUĞU DEĞERLERİNİN ÜÇ BOYUTLU SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE TEORİK OLARAK BELİRLENMESİ

ASIM ÖZDEMİR

ÖZ

Her ne kadar malzemelerin kırılma tokluğu değerlerinin belirlenmesinde, deneysel metotlar önemli bir yer tutsa da, seramik malzemeler gibi yüksek sertliğe sahip malzemelerin, deney numunelerinin hazırlanmasında, başlangıç çatlak oluşturulmasının zorluğu, üç nokta eğme deneyinde uygulanan yükün, çatlak merkezinin uzantısıyla çakıştırılmasının zorluğu ve deney sonuçlarının geçerliliği gibi sebepler, bilim adamlarını daha etkin metotlar geliştirmeye yönlendirmiştir.

Bu çalışmada, bor karbür ve magnezyum oksit partikülleri içeren iki farklı tip seramik kompozit malzemenin kırılma tokluğu değerleri, bilgisayar ortamında, üç boyutlu sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak belirlenmiştir. Kırılma tokluğu değerlerinin belirlenmesinde Lineer Elastik Kırılma Mekaniği (LEFM) yaklaşımı kullanılmıştır. ANSYS programı kullanılarak yapılan analizlerden elde edilen sonuçlar, deneysel sonuçlarla karşılaştırılmış ve sonlu elemanlar yönteminin güvenilirliği açıkça görülmüştür.

Anahtar sözcükler : Ansys, kırılma mekaniği, kırılma tokluğu, lineer elastik kırılma mekaniği, seramikler, sonlu elemanlar metodu, üç boyutlu çatlak analizi

**THE THEORETICAL DETERMINATION OF
FRACTURE TOUGHNESS VALUES OF CERAMIC MATERIALS
BY THREE DIMENSIONAL FINITE ELEMENTS METHOD**

ASIM ÖZDEMİR

ABSTRACT

Although while determining fracture toughness values of materials experimental methods are important, the reasons like the difficulty of forming a commencement crack while preparing experiment samples of the materials which has a high hardness like ceramic materials, the difficulty of boozing the load used in three point bending experiment with the expansion of crack center and the validity the experiment results have led scientists to improve more active methods.

In this study, fracture toughness values of two different kinds of ceramic composite materials including boron carbide and magnesium oxide particles have been designated in a computer environment using the three dimensional finite elements method. While determining fracture toughness values Linear Elastic Fracture Mechanics (LEFM) approach has been used. The results being taken from analysis using ANSYS programme have been compared with the experimental results and reliability of finite elements has been understood clearly.

Keywords : Ansys, fracture mechanics, fracture toughness, linear elastic fracture mechanics, ceramics, finite elements method, three dimensional crack analysis

İÇİNDEKİLER

Sayfa

YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ÖZ	iv
ABSTRACT.....	v
BÖLÜM BİR - GİRİŞ.....	1
1.1. Kırılma Mekaniğinin Tarihçesi Ve Gelişimi.....	1
1.2. Kaynak Özetleri.....	5
BÖLÜM İKİ - KIRILMA.....	7
2.1. Makroskobik Açıdan Kırılma Tipleri.....	7
2.1.1. Gevrek Kırılma	7
2.1.2. Sünek Kırılma	7
2.1.3. Sürünme Kırılması.....	7
2.1.4. Yorulma Kırılması.....	8
2.2. Mikroskobik Açıdan Kırılma Tipleri	8
2.2.1. Klivaj (Ayrılma) Kırılması	8
2.2.2. Kayma Kırılması.....	8
2.3. Taneleri Kesip Kesmemeye Göre Kırılma Tipleri	9
2.3.1. İntergranüler (Taneler Arası) Kırılma	9
2.3.2. Transgranüler (Taneleri Keserek) Kırılma	9
BÖLÜM ÜÇ - KIRILMA MEKANİĞİ	10
3.1. Griffith Teorisi	10
3.2. Irwin Teorisi	11
3.3. Kırılma Modelleri.....	13
3.3.1. Çatlak Açılma Deformasyon Tipi (Mode I)	13
3.3.2. Çatlak Kayma Deformasyon Tipi (Mode II)	13

3.3.3. Çatlak Yırtılma Deformasyon Tipi (Mode III).....	13
3.4. Gerilme Ve Germe İlişkisi	14
3.5. Kırılma Tokluğuna Numune Boyutlarının Etkisi.....	15
3.6. Çatlak Ucu Plastik Bölgesi.....	16
3.7. Kırılma Tokluğuna Sıcaklığın Etkisi.....	17
3.8. Elastik Plastik Kırılma Mekanikliği	17
BÖLÜM DÖRT - KIRILMA TOKLUĞU DENEYLERİ	19
4.1. Komplians Metodu	21
4.2. Başlangıç Çatlak Derinliği Metodu.....	21
4.3. Çatlak Ağız Açılma Deplasmanı Metodu	22
4.4. J - İntegral Metodu	22
BÖLÜM BEŞ - SERAMİK MALZEMELER	23
5.1. Geleneksel Seramikler.....	23
5.1.1. Gözenekli Seramikler	24
5.1.2. Geçirimsiz Seramikler	24
5.2. Endüstriyel Seramikler	25
5.2.1. Oksitler	25
5.2.2. Karbürler.....	25
5.2.3. Nitrürler	25
5.2.4. Borürler.....	25
5.2.5. Silisürler.....	25
5.3. Seramik Malzemelerin Özellikleri	26
5.3.1. Kimyasal Özellikler.....	26
5.3.2. Mekaniksel Özellikler.....	26
5.3.3. Fiziksel Özellikler.....	27
5.3.4. Termal Özellikler.....	27
5.3.5. Elektriksel Özellikler	27
5.3.6. Manyetik Özellikler	28
5.4. Seramiklerin Uygulama Alanları.....	28
5.4.1. Mekaniksel Uygulamalar.....	28

5.4.2. Elektriksel Ve Manyetik Uygulamalar	28
5.4.3. Uzay Sanayi Uygulamaları	30
5.4.4. Biyoseramik Uygulamaları	30
5.4.5. Nükleer Güç Uygulamaları	30
5.4.6. Yapı Ve İnşaat Uygulamaları	31
5.4.7. Seramik Kaplama Uygulamaları	31
5.5. Endüstriyel Seramiklerin Mekaniksel Özellikleri	32
BÖLÜM ALTI - SONLU ELEMANLAR METODU	33
6.1. Sonlu Elemanlar Yönteminin Avantajları	34
6.2. ANSYS Yazılım Programı	35
6.3. ANSYS Ve Kırılma Mekanikliği Problemleri	36
6.4. Sonlu Elemanlarla Model Oluşturma Aşamaları	36
6.5. Çatlak Bölgesinin Modellenmesi	37
6.6. Çatlak Analizinde Kullanılan Eleman Tipleri	38
6.6.1. Plane 82 Eleman Tipi	38
6.6.2. Solid 95 Eleman Tipi	39
6.7. Çatlak Ucu Veya Çatlak Önü Koordinat Sistemi	39
6.8. Üç Nokta Eğme Deneyi	41
BÖLÜM YEDİ - ANSYS İLE ÇATLAK ANALİZİ	42
7.1. SiC+50% ZrB ₂ +10% B ₄ C Seramik Malzemenin Analizi	43
7.1.1. Analiz Dosyasının Belirlenmesi	43
7.1.2. Analiz Tipinin Belirlenmesi	44
7.1.3. Eleman Tipinin Belirlenmesi	45
7.1.4. Malzeme Özelliklerinin Tanımlanması	46
7.1.5. Anahtar Noktaların (Keypoints) Tanımlanması	47
7.1.6. Çizgilerin Oluşturulması	48
7.1.7. Çizgilerin Bölünmesi (Meshlenmesi)	49
7.1.8. Çatlak Ucunun Yoğunlaştırılması	50
7.1.9. Alan Oluşturulması	51
7.1.10. İki Boyutlu Mesh Edilmiş Model	51

7.1.11. Üç Boyutlu Mesh Edilmiş Model	52
7.1.12. Sınır Şartlarının Uygulanması	52
7.1.13. Yükün Uygulanması	53
7.1.14. Çözümün Başlatılması	53
7.1.15. Çatlak Ucu Koordinat Sistemi Tanımlanması	54
7.1.16. Çatlak Yüzey Yolu Tanımlanması	55
7.1.17. Gerilme Şiddet Faktörü Değerinin Okunması	56
7.2. Si ₃ N ₄ +30% SiC+3% MgO Seramik Malzemenin Analizi	57
7.2.1. Anahtar Noktaların (Keypoints) Tanımlanması	57
7.2.2. Üç Boyutlu Mesh Edilmiş Model	58
7.2.3. Gerilme Şiddet Faktörü Değerinin Okunması	58
BÖLÜM SEKİZ - SONUÇLAR VE YORUMLAR	59
8.1. Kırılma Tokluğu Sonuçları.....	59
8.2. Kırılma Tokluğunun Numune Kalınlığına Bağlı Değişimi	60
8.3. Von Mises Gerilme Değerleri	61
8.4. Gerilme Değerinin Numune Kalınlığına Bağlı Değişimi.....	63
KAYNAKLAR	64

BÖLÜM BİR

GİRİŞ

Kırılma, insan eliyle oluşturulmuş yapılar varolduğu sürece, toplumun karşı karşıya olduğu bir problemdir. Bu problem, günümüzde, önceki yüzyıllardan daha fazla olmaktadır. Çünkü sahip olduğumuz ileri teknoloji ve dizayn ettiğimiz karmaşık yapılar bu duruma davetiye çıkarmaktadır. Örneğin başlıca havayolu kazaları, modern uzay teknolojisi olmaksızın gerçekleşmeyecekti.

Kırılma mekaniği alanındaki gelişmeler, teknolojik karmaşıklığın artmasıyla ortaya çıkan olası tehlikelerin bir kısmının, engellenebilmesine yardımcı olmuştur. Malzemelerin nasıl hasara uğradığını anlamamız ve onları hasarlardan koruyabilme kabiliyetimiz 2 nci Dünya Savaşından bu yana oldukça artmıştır.

Felaketle sonuçlanan hasarlar; avukatlar ve mahkemelerce bilirkişi tayin edilen mühendisler için büyük bir gelir kapısı olurken, bu tür olaylar neticede ekonomiye büyük zararlar vermektedir. Bir ekonomik araştırma, kırılmanın, Amerika Birleşik Devletleri ekonomisine maliyetinin 1978 yılında 119 milyar dolar olduğunu ve bu rakamın ulusal üretimin % 4'ü düzeyinde olduğunu değerlendirmektedir. Daha da önemlisi, aynı araştırma, bu maliyetin günümüz teknolojisi uygulanarak 35 milyar dolar düşürülebileceği ve kırılma mekaniği alanındaki gelişmeler sayesinde de ek olarak 28 milyar dolar daha düşürülebileceğini ortaya koymuştur.

1.1. Kırılma Mekaniğinin Tarihçesi ve Gelişimi

Kırılma mekaniği, hemen hemen tümüyle kırılmayla belirlenen hasarları inceler. Kırılmayla ilgili bir problemin ilk başarılı analizi 1920 yılında Griffith tarafından camlardaki gevrek çatlakların ilerleyişinin izlenmesiyle gerçekleştirilmiştir. Griffith, sistemin toplam enerjisindeki azalmayla önceden var olan bir çatlakın ilerlemeye başlayacağını formüle etmiştir. Griffith basit bir enerji dengesi öngörmüştür; gerilme altındaki bir sistemde çatlak ilerledikçe elastik germe enerjisinde bir azalma olur, ki

bu enerji de yeni çatlak yüzeylerinin oluşması için gerekli enerjidir. Bu teori, gevrek katılarda teorik mukavemetin tahminine yaradığı gibi kırılma mukavemetiyle hata boyutu arasındaki ilişkiyi de verir.

Griffith yaklaşımı, 1944 yılında Zener ve Hollomon tarafından metalik malzemelerin gevrek kırılmasına da uygulanmıştır. Bundan hemen sonra Irwin, Griffith tipi enerji dengesinin; depo edilen şekil değiştirme (germe) enerjisi ile yüzey enerjisi + plastik deformasyon sırasında yapılan iş arasında olması gerektiğini irdelemiştir. Irwin aynı zamanda sünek malzemelerde yeni çatlak yüzeylerinin oluşması için gerekli enerjinin, plastik deformasyon sırasında yapılan iş yanında genellikle önemsiz derecede olduğunu savunmuştur. Böylece G diye bir malzeme özelliği tanımlamıştır. G , birim kalınlık başına çatlak uzunluğundaki birim artış için absorblanan toplam enerjidir. G , enerji yayılım hızı veya çatlak itici gücü olarak da adlandırılır.

1950'lerin ortalarında Irwin, kırılma mekaniğinde yeni bir çığır açmıştır. “Enerji yaklaşımı, gerilme yoğunluğu yaklaşımıyla eşdeğerdir”. Buna göre, çatlak ucunda kritik bir gerilme dağılımına erişildiğinde kırılma oluşur. Böylece kritik gerilme yoğunluğu K_c veya enerji terimleriyle G_c kritik değeri, bir malzeme özelliğidir.

G ve K 'nin eşdeğerliği, Lineer Elastik Kırılma Mekaniğinin (LEKM) gelişmesine temel oluşturmuştur. Çünkü, bir çatlak ucunun etrafındaki ve yakınındaki gerilme dağılımı durumu her zaman (tüm malzemeler için) aynıdır. Dolayısıyla, belirli standart numunelerle K_c 'yi belirlemek için yapılan deneyler sonucunda, gerçek yapılarda ve belirli şartlar altında malzemedeki hatalara izin verilebileceği saptanabilir. Ayrıca, gerilme yoğunluğu yaklaşımıyla yapılan deneyler sonucunda malzemelerin yorulma çatlak ilerleyişi veya gerilmeli korozyon çatlama gibi kritik-altı çatlama olan hassasiyetleri de bir dereceye kadar tahmin edilebilir.

LEKM, çatlak ucunda sınırlı plastik deformasyonun olduğu durumlarda geçerli olduğundan, çatlak ucunda önemli ölçüde plastik deformasyon söz konusu

olduğunda Elastik-Plastik Kırılma Mekanîği (EPKM) devreye girer. EPKM de, 1961 yılında Wells' in çatlak açılması (COD) üzerine yaptığı çalışmalarla başlar.

19 ncu yüzyılda Endüstri Devrimi'nden sonra, başta demir ve çelik olmak üzere yapılarda metal kullanımında büyük ölçüde artış olmuştur. Ancak bununla beraber bu yapılarda oluşan hasarlardan dolayı büyük can kayıplarına yol açan kazalar da görülmüştür. Bu kazaların bir kısmından tasarım hataları sorumludur. Fakat zamanla gözlenmiştir ki malzeme içinde üretimden gelen hatalar çatlamaı başlatmakta ve yapı elemanları kırılmaktadır. Daha iyi üretim yöntemleri kullanılarak malzemelerin iç yapılarındaki bu hataların önlenmesi, oluşan hasarların sayısını kabul edilebilir düzeylere indirmiştir.

Yeni bir kazaya yatkın yapılar devri kaynaklı tasarımların ortaya çıkmasıyla başlamıştır. Özellikle de 2 nci Dünya Savaşı'nda müttefiklerin gemi ve tankerlerinde çok sayıda hasarlarla karşılaşmıştır. Üretilen 2700 müttefik gemisinden yaklaşık 400 tanesi hasara uğramış, hasara uğrayan gemilerden 20'ye yakını ortadan ikiye bölünürken 90 tanesi de ciddi bir biçimde zarar görmüştür. Bu arada birçok köprü ve diğer yapılar da hasar görmüştür. Bu hasarlar genellikle çok düşük gerilmeler altında ve hatta gemiler limanda demirlemişken oluştuğundan, bu konuda geniş araştırmalar yapılmış ve sonuç olarak kırılmaların gevrek kırılma olduğu ve bundan da malzemedeki hataların ve gerilme yığılmalarının sorumlu olduğu bulunmuştur. Ayrıca kullanılan çeliklerin gevrek kırılmaya, düşük sıcaklıklarda daha yatkın olduğu fark edilmiştir. Belirli bir geçiş sıcaklığının altında çelikler gevrek davranış göstermekte ve kırılma için gerekli enerji büyük ölçüde azalmaktadır.

Günümüz üretim ve tasarım işlemleriyle, malzemenin uygun bir düşük geçiş sıcaklığına sahip olması ve kaynağın bu sıcaklığı yükseltmemesi sağlanarak gevrek kırılma olayı kaynaklı çelik yapılarda önlenmiştir.

Yüksek mukavemetli malzemelerin kullanılmalarının tarihçesine bakarsak; 1935'lerde kaynaklı çelik yapılar, 1944'den sonra yüksek mukavemetli alüminyum alaşımları, 1948'den sonra yüksek mukavemetli çelikler ve 1954'de titanyum

alaşımları kullanılmaya başlanmıştır. Bu malzemeler çoğunlukla, uçaklarda olduğu gibi ağırlıktan kazanç sağlamak amacıyla tercih edilmişlerdir. Ağırlık kazancı ayrıca, gerilme analizi konusundaki gelişmeler sonucu tasarım iyileştirmeleriyle de sağlanmıştır. Gerçekte gevrek olmayan bu yüksek mukavemetli malzemelerin kırılma enerjilerinin nispeten düşük olduğu ancak 1950'lerin sonlarına doğru fark edilmiştir. Yüksek mukavemetli malzemelerin kırılma enerjilerinin düşük olması modern kırılma mekaniğinin gelişmesi için bir teşvik niteliği taşımıştır.

1.2. Kaynak Özetleri

Bu bölümde, kırılma mekaniği ve sonlu elemanlar yöntemi ile ilgili olarak yapılan bazı çalışmaların özetleri sunulmuştur. Yapılan kırılma mekaniği çalışmalarında, kırılma tokluğu deneyleri yapılmış, çeşitli kırılma modelleri oluşturulmuş ve malzemelerin kırılma dayanımına etkileri araştırılmıştır.

Toparlı ve Aksoy (1998), diş kemiği kompozit reğine yüzeyinin yapıştırıcı bağının tokluğunun güvenilirliği ve geçerliliğini kırılma mekaniği açısından araştırmışlardır. İki farklı yapıdaki reğinenin kırılma tokluğu ve kırılma enerjisini üç nokta eğme deneyinde yükleme yapılarak t-test metoduyla analiz yapmışlardır. Sonuçta, çiğneme güçlerinin altındaki çatlakların başlaması ve ilerlemesinin kırılma tokluğu veya kırılma enerjisi ile izlenebileceğini söyleyerek, kırılma yükünün başlangıçtaki çatlak uzunluğuna bağlı olarak arttığını belirtmişlerdir. Ayrıca kırılma tokluğu değerinin diğer dayanım parametrelerinden daha iyi gösterge olduğunu ifade etmişlerdir.

Gogotsi *et al.* (2002), yaptıkları çalışmada birkaç farklı çeşit seramik partikül kompozit malzemenin kırılma tokluğu değerlerini deneysel metotla elde ederek, sonuçlarını yayımlamışlardır. Kırılma tokluğu değerlerini belirleyebilmek için numunelere üç nokta eğme testi uygulanmış, sonuçların geçerliliği açısından deneyler birçok sayıda tekrarlanmıştır. Deneyler oda sıcaklığında ve 1400 °C sıcaklıkta yapılmış, bu sıcaklıklarda elde edilen kırılma tokluğu değerleri makalenin sonunda yayımlanmıştır.

Karaaslan, Topuz ve Yıldırım (2003), yaptıkları çalışmada alüminyum oksit ve silisyum karbür takviyeli alüminyum matrisli kompozit malzemelerin mekaniksel davranışlarını incelemişlerdir. Çalışmalarında, alüminyum matrisli alüminyum oksit ve silisyum karbür takviyeli kompozit malzemeleri toz metalürjisi yöntemiyle üretmişler ve farklı hacimlerde alüminyum oksit ve silisyum karbür içeren kompozit malzemelerin mekaniksel özelliklerini yorumlamışlardır. Araştırmalarından elde ettikleri sonuçlara göre, düşük takviye elemanı içeren alüminyum matrisli kompozit malzemelerin mekaniksel özelliklerini yüksek takviye elemanı içerenlere göre daha üstün olarak belirlemişlerdir.

Hattatoğlu, Hınıslioğlu ve Özel (2003), düşük sıcaklıktaki asfalt betonu kırımlarının kırılma tokluğunun sonlu elemanlar yöntemi ile tahmin edilmesi üzerine bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada, düşük sıcaklıktan dolayı asfalt kaplamalarda meydana gelen çatlamların Lineer Elastik Kırılma Mekaniği (LEKM) kanunlarıyla araştırılabileceğini ortaya koymuşlar ve buna bağlı olarak asfalt malzemeler için ömür tahmini yapmışlardır.

Avcı, Arıkan ve Akdemir (2003), yaptıkları çalışmada çelik fiber takviyeli polimer kompozitin kırılma davranışını incelemişlerdir. Yapılan çalışmada, çelik fiber takviyeli parçacık dolgulu polimer kompozit kırımlar ağırlıkça farklı çelik fiber oranlarında üretilmiş ve deney için başlangıç çatlakları açılmıştır. Hazırlanan numunelere üç nokta eğme testi uygulanmış ve Mod I'e göre kırılma davranışları incelenmiştir. Numunelerin gerilme şiddet faktörleri başlangıç çatlak derinliği, komplians ve J-integral metotları gibi farklı metotlar kullanılarak hesaplanmış ve sonuçlar birbirleriyle karşılaştırılmıştır.

Avcı, Uyaner ve Şahin (2003), yaptıkları çalışmada cam kumaş-polyester kompozit levhalarda takviye açısının kırılma davranışına etkilerini deneysel olarak incelemişlerdir. Bu amaç için, ASTM E-399 standardına uygun olarak kompakt çekme numuneleri hazırlamışlar ve bu numunelerle kırılma mekaniği deneyleri yapmışlardır. Yapılan deneyler sonucunda kompozit malzemenin kırılma tokluğu değerini belirlemişlerdir. Takviye açısı farklı numunelerle deneylere devam etmişler,

takviye açısına bağlı olarak elde ettikleri kırılma tokluğu sonuçlarını grafik olarak yayınlamışlardır.

Aslantaş ve Taşgetiren (2003), yaptıkları çalışmada tabaka bağlı çatlaklarda gerilme şiddet faktörü değerini sonlu elemanlar analizi ile elde etmişlerdir. Yapılan çalışmada, farklı malzemelerden oluşmuş yapı, tabaka bağ ile bir araya getirilmiş ve elde edilen numunenin gerilme şiddet faktörü değeri sonlu elemanlar metodu ile belirlenmiştir. Analiz için mode I kırılma modeli kabul edilmiştir. Her bir tabakanın homojen, lineer elastik ve izotropik olduğu öngörülmüştür. Elde edilen sonuçlar makalenin sonunda yayınlanmıştır.

Karaaslan, Topuz ve Yıldırım (2003), yaptıkları çalışmada alüminyum oksit ve silisyum karbür takviyeli alüminyum matrisli kompozit malzemelerin mekaniksel davranışları üzerine incelemelerde bulunmuşlardır. Yapılan çalışmada, alüminyum oksit ve silisyum karbür takviyeli kompozit malzemeler toz metalürjisi yöntemi ile üretilmiş, elde edilen sonuçlar, üretilen kompozit malzemenin elastisite modülü ve mikro yapısına göre yorumlanmıştır. Deneylere farklı hacimlerde takviye elemanı kullanılarak devam edilmiş ve araştırmada elde edilen sonuçlara göre %5 ve %10 takviye elemanı içeren alüminyum matrisli kompozit malzemenin mekanik özellikleri, %15 ve %20 takviye elemanı içerenlere göre daha üstün olarak belirlenmiştir.

Yang, Chen, Hu ve Wang (2005), yaptıkları çalışmada piezoelektrik seramiklerin kırılma kriteri ve hasar analizi üzerine araştırmalar yapmışlardır. Çalışmalarında piezoelektrik seramiklerin mekaniksel ve elektriksel hasarlarını sonlu elemanlar yöntemi ile incelemişler ve sonuçlarını tablo halinde makalenin sonunda yayınlamışlardır. Araştırmadan elde edilen sonuçlara göre, piezoelektrik seramiklerde, mekaniksel hasar kırılma üzerine elektriksel hasardan çok daha etkili bir rol oynamaktadır.

BÖLÜM İKİ

KIRILMA

Kırılma, malzemelerin gerilme altında birden fazla parçalara ayrılmasıdır. Kırılmanın karakteri malzemedan malzemeye değişir ve genellikle tatbik edilen gerilmeye, sıcaklığa ve deformasyon hızına bağlıdır. Kırılma başlıca iki safhadan oluşur. Birinci safha “çatlak teşekkülü”, ikinci safha ise “çatlağın ilerlemesi”dir.

2.1. Makroskobik Açıdan Kırılma Tipleri

2.1.1. Gevrek Kırılma

Çok az veya hiçbir plastik deformasyon bırakmadan meydana gelen kırılma tipidir. Genellikle camlar, seramikler ve bazı metaller gevrek olarak kırılırlar. Gevrek kırılma önceden uyardıktan oluştuğundan ve genellikle büyük felaketlerle sonuçlandığından istenmeyen ve mutlaka önlenmesi gereken bir kırılma türüdür.

2.1.2. Sünek Kırılma

Çatlak ilerlemesi öncesinde ve esnasında önemli ölçüde plastik deformasyonla karakterize edilir.

2.1.3. Sürünme Kırılması

Yüksek sıcaklıklarda, sabit gerilme veya sabit yük altında, sürünme deformasyonu sonucunda meydana gelen kırılma tipidir. Makroskobik açıdan bakıldığında, sürünme kırılması malzemede plastik deformasyon sonucunda oluşur, bu sebeple sünek kırılmaya benzer. Mikroskobik açıdan ise, sürünme kırılması, düşük sıcaklıklarda meydana gelen sünek kırılmadan farklıdır.

2.1.4. Yorulma Kırılması

Alternatif yükler altında kalan malzemelerde meydana gelen kırılma tipidir. Yorulma kırılmaları genel olarak plastik deformasyon meydana gelmeden de olabilir. Bazen yorulma kırılmaları sünek kırılmalara benzerse de, yorulma kırılmasında çatlak ilerlemesi sünek kırılmadan farklı olup, çatlak her bir yükleme periyodunda ancak belirli bir miktar ilerler.

2.2. Mikroskopik Açıdan Kırılma Tipleri

2.2.1. Klivaj (Ayrılma) Kırılması

Kırılma, klivaj düzlemleri diye bilinen belirli kristallografik düzlemler boyunca meydana gelirse, buna klivaj kırılması denir. Klivaj düzlemleri en düşük yüzey enerjisine sahip düzlemlerdir. Bu tip kırılma, klivaj düzlemine dik normal gerilmelerin kritik bir değeri aşması ile klivaj düzlemine dik atom bağlarının koparılması sonucunda olur.

Tek eksenli gerilme halinde, çatlak, çekme yönüne dik olarak ilerleme eğilimi gösterir, bu sebeple de klivaj kırılmaları düz bir görünüm gösterir. Malzemelerin gevrek kırılması, genellikle klivaj kırılması şeklinde olur.

Klivaj kırılmasında genellikle tanelerin şekli bozulmaz ve yüzeyin görünüşü düzdür, kırılma yüzeyi ışığı çok iyi yansıtır ve parlak olarak görünür.

2.2.2. Kayma Kırılması

Metalik malzemelerde plastik deformasyon, kaymaya karşı direnci az olan atom düzlemlerinin kayması ile meydana gelir. Bu düzlemlere kayma düzlemleri adı verilir. Metalik malzemelerde kayma çatlakları maksimum kayma gerilmesinin bulunduğu kısımlarda ilerleme eğilimi gösterir.

Bu tip kopma, çatlak ilerleyişi makroskobik olarak çekme yönüne dik olduğundan normal kopma veya kırık yüzeyi görünüşü lifi olduğundan lifi kırılma adını alır. Mikroskobik olarak, çatlak çekme eksenini ile 45° lik açı yapan düzlemlerde ilerleyerek kayma kırılmasını meydana getirmiştir.

2.3. Taneleri Kesip Kesmemeye Göre Kırılma Tipleri

2.3.1. İntergranüler (Taneler Arası) Kırılma

Tane sınırlarında meydana gelen kırılma şeklidir.

2.3.2. Transgranüler (Taneleri Keserek) Kırılma

Taneleri keserek meydana gelen kırılma şeklidir.

BÖLÜM ÜÇ

KIRILMA MEKANİĞİ

Kırılma mekaniği, mühendislik yapılarda kullanılan malzemelerdeki çatlak, boşluk ve enklozyon şeklindeki hataların yük taşıma kapasitesine etkisini ve kırılmayla belirlenen hasarları inceler.

Kırılma mekaniği, kırılmayla belirlenen hasarları incelemekte iki türlü yaklaşım öngörmektedir. Bunlardan birincisi Griffith Enerji Dengesi Yaklaşımı (1920), diğeri de Irwin Teoremidir (1956).

3.1. Griffith Teorisi

Griffith camın kırılma mukavemetini incelerken, cam çubuğun boyu uzadıkça mukavemetinin azaldığını görmüştür. Bu durumun, camın yüzey hatalarından ileri geldiği düşünülmüştür, çünkü cam çubuğun boyu uzadıkça yüzey hatalarının bulunma ihtimali artmaktadır.

Griffith gevrek bir malzemede çatlak bulunması halinde, malzemenin kırılmadan dayanabileceği gerilmeyi tayin eden ilk bağıntıyı geliştirmiştir.

$$\sigma_f = \left(\frac{2 \cdot \gamma \cdot E}{\pi \cdot a} \right)^{\frac{1}{2}}$$

σ_f : Kırılma gerilmesi

γ : Yüzey enerjisi

E : Elastisite modülü

a : Çatlak boyunun yarısı

Griffith denklemine göre, kırılmaya sebep olan gerilme miktarı “ σ_f ”, mevcut çatlak boyutu ile ters orantılıdır.

Griffith denkleminde yüzey enerjisi terimi yerine, genellikle kırılma işini gösteren bir parametre “G” kullanılır. Bu durumda denklem;

$$\sigma_f = \left(\frac{E \cdot G_C}{\pi \cdot a} \right)^{\frac{1}{2}}$$

şeklini alır. Burada $G_C = 2 \cdot \gamma$ olup, kırılma için gerekli toplam işi gösterir.

Griffith, analizinde, deformasyon enerjisinin çatlak ilerlemesi sırasında, ara yüzey enerjisine dönüşümünü esas almıştır. Dolayısıyla “G”, aynı zamanda çatlak birim yüzeyde ilerlemesi için gerekli olan enerji miktarıdır. Birimi $\frac{N}{m}$ 'dir. Kırılma, G 'nin kritik bir değeri olan G_C 'de meydana gelir.

3.2. Irwin Teorisi

Irwin ve arkadaşları gevrek kırılmayı ayrı bir görüşle analiz etmişlerdir. Onlar analizlerinde çatlak ucu civarındaki gerilme durumunu esas almışlardır. Çatlak ucu civarındaki gerilmelerin hesaplanmasından, bir gerilme şiddet faktörü “K” parametresi geliştirmişlerdir. Gerilme şiddet faktörü “K” uygulanan gerilmenin, çatlak boyutu ve şeklinin ve bir geometrik faktörün fonksiyonudur.

Griffith denklemi aşağıdaki şekilde yazıldığında;

$$\sigma_f \cdot \sqrt{\pi \cdot a} = \sqrt{E \cdot G_C}$$

elde edilir.

Yukarıdaki eşitlikten $\sigma_f \cdot \sqrt{\pi \cdot a}$ 'nın değerinin $\sqrt{E \cdot G_C}$ 'ye ulaştığında çatlağın ilerleyeceği anlaşılmaktadır. $\sigma_f \cdot \sqrt{\pi \cdot a}$ teriminin çatlak ilerlemesi için gerekli kuvvet ölçüsü olduğu düşünülerek, bu terim *gerilme şiddet faktörü* olarak isimlendirilir.

Dolayısıyla,

$$K = \sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot a}$$

olarak gösterilir. Gerilme şiddet faktörü K 'nın kritik bir K_C değerinde kırılma olur.

Bu durumda,

$$K_C = \sqrt{E \cdot G_C}$$

olur. Kritik gerilme şiddet faktörü " K_C " genellikle *kırılma tokluğu* olarak isimlendirilir. Kırılma tokluğunun birimi $MPa\sqrt{m}$ 'dir.

Gerilme şiddet faktörü " K ", yalnız gerilme durumu ve çatlağın geometrisiyle ilgili bir parametre olup malzemenin özelliklerine bağlı değildir. Halbuki kırılma tokluğu " K_C ", malzeme özelliğiyle ilgili bir parametredir. Kırılma tokluğu " K_C " özelliğini belirlemek için gerilme şiddet faktörü " K " ölçülür. $K = K_C$ olduğunda çatlak ilerler ve kırılma olur.

Yukarıdaki bağıntılar sonsuz boyuttaki levhalar için geçerlidir. Belirli boyuttaki numuneler için gerilme şiddet faktörünün hesaplanmasında deneysel ve teorik yolla geliştirilmiş farklı bağıntılar kullanılır.

3.3. Kırılma Modelleri

Kırılma tokluğu ölçülürken, kırılmada üç model düşünülür.

- i. Çatlak açılma deformasyon tipi (Mode I)
- ii. Çatlak kayma deformasyon tipi (Mode II)
- iii. Çatlak yırtılma deformasyon tipi (Mode III)

3.3.1. Çatlak Açılma Deformasyon Tipi (Mode I)

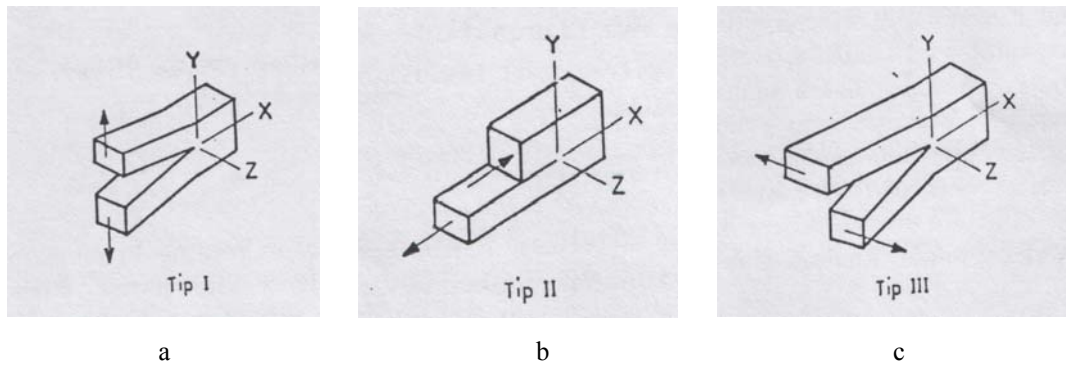
Mode I deformasyon tipinde, gerilmenin normal bileşeni, çatlak yüzeyine dik olarak y eksenine doğrultusunda etki etmektedir. Açılma deformasyon türü bunlar içerisinde en önemlisi olup, bu sebeple en çok bu kırılma şekli incelenmiştir.

3.3.2. Çatlak Kayma Deformasyon Tipi (Mode II)

Mode II deformasyon tipinde, gerilmenin kayma bileşeni, çatlakla x eksenine doğrultusunda etki etmektedir.

3.3.3. Çatlak Yırtılma Deformasyon Tipi (Mode III)

Mode III deformasyon tipinde, gerilmenin kayma bileşeni, çatlakla z eksenine doğrultusunda, çatlakın dip kenarına paralel olarak etki etmektedir. (şekil 3.1)



Şekil 3.1. Kırılma Modelleri a) Mode I tipi b) Mode II tipi c) Mode III tipi

3.4. Gerilme ve Germe İlişkisi

Kırılma tokluğundan bahsedilirken, kritik gerilme şiddet faktörünün genellikle kırılma modellerinden, açılma deformasyon tipi (Mode I) kırılma şeklinden elde edildiği düşünülür.

Açılma deformasyon kırılma tipinin iki aşırı durumu söz konusudur. Çatlak içeren bir numune gerilmeye maruz kaldığında çatlak geometrisi nedeniyle üç eksenli gerilmeler oluşur. Fakat levha gibi çok ince numunelerde x ve y yönünde gerilmeler mevcutken z yönünde yani kalınlık yönünde gerilme yoktur ($\sigma_z = 0$). Çünkü bu yön serbesttir. Böyle bir geometride gerilmeler iki eksenli olduğundan düzlem gerilme hali söz konusudur.

Kalın numunelerde de numune yüzeyinde yine düzlem gerilme hali vardır ve numune üç boyutta deformasyona uğrar. Z yönünde numune içine ilerledikçe üç eksenli gerilmeler ortaya çıkar. Fakat bu defa şekil değiştirme iki boyutludur, numune x-y düzleminde şekil değiştirir. Çünkü malzeme içine ilerledikçe malzeme z eksenini boyunca kendini çevreleyen malzeme tarafından tutulur ve z yönünde deformasyon engellenir ($\varepsilon_z = 0$). Bu durumda da düzlem germe hali söz konusu olmaktadır.

Sonuç olarak, ince levha şeklindeki numunelerde gerilme durumu, düzlem gerilme halini; kalın numunelerdeki gerilme ise, düzlem şekil değiştirme durumunu belirtir.

Düzlem şekil değiştirme durumu en şiddetli ve kritik gerilme durumunu gösterir ki, bu durumda K_{IC} değeri düzlem gerilme durumundaki değerden küçüktür. Düzlem gerilme durumunda numunenin yüzeylerine, düzlem şekil değişimi durumunda ise numunenin merkezine gerilme uygulanmaktadır.

3.5. Kırılma Tokluğuna Numune Boyutlarının Etkisi

Kırılma tokluğu deneyi ile gerilme şiddet faktörünü “ K_C ” tayinde kullanılan kırılma yükü, numunenin boyutlarına bağlı olarak farklı değerler alır. Bu sebeple kırılma toklu denklemini,

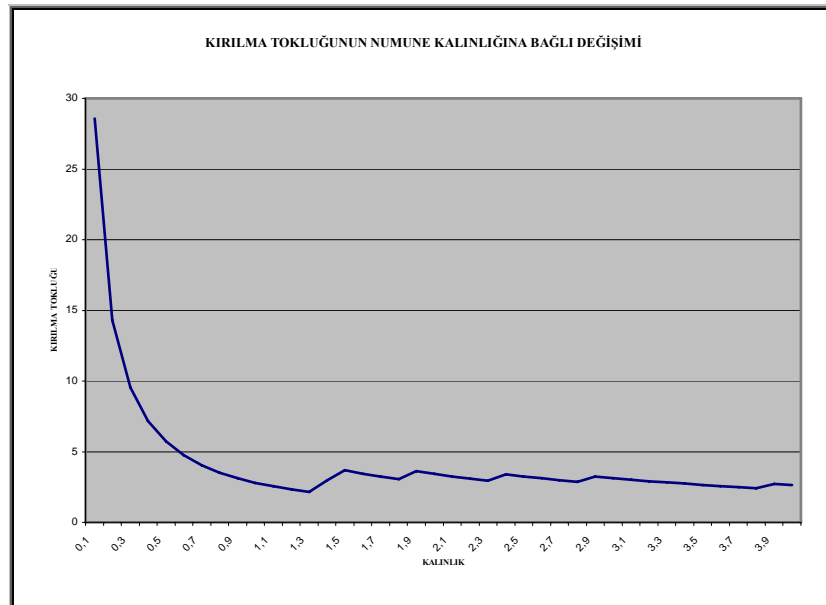
$$K_C = \sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot a} \cdot f\left(\frac{a}{w}\right)$$

şeklinde yazılır.

Burada,

$f\left(\frac{a}{w}\right)$: Numune boyutları ile ilgili geometrik faktördür.

Kırılma tokluğu K_C numunenin kalınlığına bağlı olarak değişir ve numune kalınlığı arttıkça belli bir değere kadar azalır, bundan sonra kalınlık etkisi olmaz. Numunenin kalınlığının limit bir değerinden sonra, numune yüzeyinin etkisi kalmamakta ve esasında düzlem şekil değişimi durumu sağlanmaktadır. (şekil 3.2)



Şekil 3.2. Numune kalınlığının kırılma tokluğuna etkisi

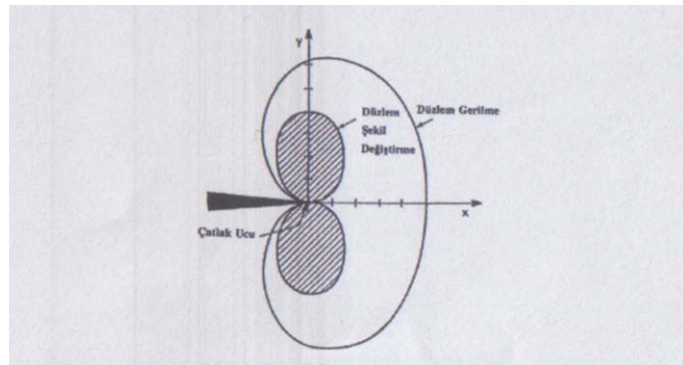
Geçerli bir deney ve doğru olarak K_{IC} 'nin tespiti için numune boyutlarının aşağıdaki kriterleri sağlaması gereklidir.

$$\text{Numune kalınlığı} \geq 2,5 \cdot \left(\frac{K_{IC}}{\sigma_a} \right)^2$$

3.6. Çatlak Ucu Plastik Bölgesi

Kırılma tokluğu deneyinde önemli olan diğer bir faktör de, *plastik bölgenin boyutu* " r_p "dir. Numunedeki çatlağın ucunda, yükleme durumunda plastik deformasyona uğramış bir bölge bulunur. Plastik deformasyona uğramış bu bölge kırılma tokluğu deneyi sonuçlarını önemli ölçüde etkiler, çünkü kırılma tokluğu deneyi malzemenin çatlama direncinin bir ölçümüdür, plastik deformasyona uğramış malzemenin çatlama direncinin ölçümü değildir. Bu sebeple numunedeki plastik deformasyon bölgesi büyüdükçe deneyin anlamı, dolayısıyla deney sonuçlarının geçerliliği azalır.

Numunede çatlağın ucunda meydana gelen plastik deformasyon bölgesine malzemenin akma gerilmesi etki eder. Malzemenin akma gerilmesi azalır, plastik deformasyon bölgesinin boyutu r_p büyür, çünkü plastik deformasyon daha kolay gerçekleşir. Eğer plastik deformasyon bölgesi küçülürse, kırılma tokluğu da azalır, çünkü malzeme deformasyondan ziyade çatlama özelliği gösterir. (şekil 3.3)



Şekil 3.3. Von Mises akma kriterine göre düzlem gerilme ve düzlem germe plastik bölge şekilleri

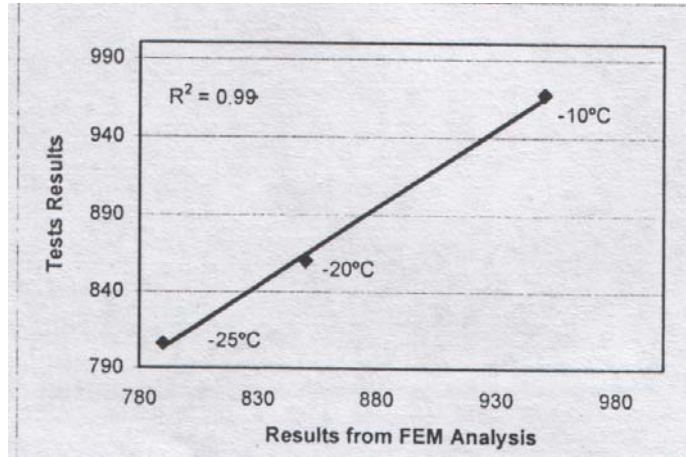
Plastik deformasyon bölgesinin büyüklüğü şu formüllerle bulunabilir.

$$r_p = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{K_I^2}{\sigma_a^2} \quad (\text{Düzlem gerilme durumu})$$

$$r_p = \frac{1}{6 \cdot \pi} \cdot \frac{K_I^2}{\sigma_a^2} \cdot (1 - 2\nu)^2 \quad (\text{Düzlem şekil değiştirme durumu})$$

3.7. Kırılma Tokluğuna Sıcaklığın Etkisi

Sıcaklık azaldıkça malzemenin gevrek davranış gösterme eğilimi artar, dolayısıyla malzemenin kırılma tokluğu değeri azalır. (şekil 3.4)



Şekil 3.4. Kırılma tokluğuna sıcaklığın etkisi

3.8. Elastik Plastik Kırılma Mekanikliği

Buraya kadar incelediğimiz Lineer Elastik Kırılma Mekanikliği (LEKM) yaklaşımı elastik koşullarda çatlak ilerlemesi ve kırılmayı belirlemek için geliştirilmiştir. Bu koşullar daha çok gevrek malzemelerde geçerlidir. LEKM ile incelenemeyecek kadar büyük ölçüde çatlak ucu plastik deformasyona sahip malzemelerde ise EPKM geliştirilmiştir. EPKM yaklaşımında çatlak ilerlemesini karakterize etmek için J integrali, çatlak ucu açılması (COD) kavramları kullanılmaktadır.

J integrali ve gerilme yoğunluk faktörü arasında,

$$J = \frac{K^2}{E^*}$$

ilişkisi vardır. Düzlem gerilme durumunda $E^* = E$ ve düzlem germe durumunda ise $E^* = \frac{E}{(1-\nu^2)}$ olmaktadır. Burada ν , poisson oranını göstermektedir. Çatlak ucundaki yer değiştirme miktarının ölçüsü de plastik şekil değiştirme miktarı ile ilgili olduğundan bu kavram da elastik plastik kırılma mekaniğinde kırılma kriteri olarak kullanılmıştır.

BÖLÜM DÖRT

KIRILMA TOKLUĞU DENEYLERİ

Kritik gerilme şiddet faktörü K_c 'nin belirlenmesi için geliştirilmiş bir çok metot vardır. Bu metotlardan en yaygın kullanılanları,

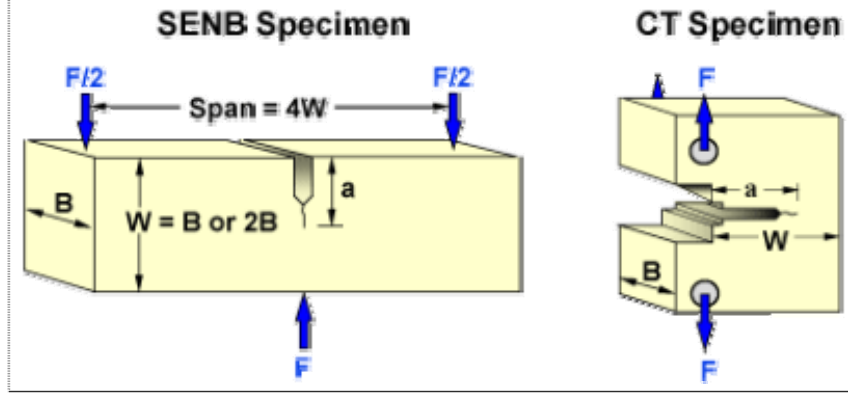
- i. Komplians metodu
- ii. Başlangıç çatlak derinliği metodu
- iii. Çatlak ağzı açılma deplasmanı metodu
- iv. J – integral metodu

olarak bilinmektedir.

Darbe deneyinde ve çentikli çekme deneyinde çentikler makine ile hazırlandığı halde, kırılma tokluğu deneyinde “tabii çatlak teşekkülü” istenir. Kırılma tokluğu deneyi için önce çentikli numune hazırlanır. Daha sonra numunede yorulma deneyi ile çentik dibinde belirli bir boyda tabii çatlak teşekkülü sağlanır. Bu, kırılma tokluğu deneyinde kritik faktörlerden biridir.

Yorulma deneyi ile numunede çatlak meydana getirilirken uygulanan yükün uniform olarak dağılmasına önem verilmeli, böylece çatlağın mümkün olduğu kadar düzgün oluşması sağlanmalıdır. Yorulma yükü de çatlağın ne çok kısa ne de çok uzun bir zamanda teşekkül etmesini sağlayacak şekilde seçilmemelidir. Çatlağın uzun bir zamanda teşekkülünü sağlayacak küçük bir yorulma yükü seçilirse boş yere zaman kaybı olur. Eğer yük çok yüksek seçilirse çatlak hemen teşekkül eder, fakat bu şartlarda çatlak ucunda meydana gelen plastik deformasyon bölgesi büyük olur ve deney sonuçlarını önemli ölçüde etkiler. Gevrek malzemelerde başlangıç yorulma çatlağına gerek duyulmaz.

Bu işlemlerin ardından numune bir çekme cihazında çekilir (şekil 4.1). Genel olarak deney sırasında düşük bir deformasyon hızı seçilir. Kırılma tokluğu deneyinde uygulanan yüke göre çatlakın açılma miktarı cihazda kaydedilir.



Şekil 4.1. Kırılma tokluğu deney numuneleri

Uygulanan yük arttıkça önce malzeme elastik olarak deformasyona uğrar, burada çatlakın açılma miktarı yük ile doğrusal olarak artar. Uygulanan yük elastik sınırı aştığında, malzemenin kırılma özelliğine bağlı olarak farklı durumlar meydana gelir.

Eğer malzeme gevrek yani kırılğan ise, yük elastik sınırı aşar aşmaz numune kırılır ve yük aniden düşer. Bu durumda K_{IC} hesaplanırken maksimum yük alınır.

Eğer malzeme daha az gevrek ise, yük elastik sınırı aştığında yük düşer veya sabit bir değerde kalır, fakat sonra tekrar artar. Bu durum numune kırılıncaya kadar birkaç defa tekrar edebilir. Buna *kademeli çatlak teşekkülü* denir ve bu durumda K_{IC} hesaplanırken, ilk kademede çatlakın teşekkül ettiği yük alınır.

Sünek malzemelerde ise yük elastik sınırı aştığında, çatlakın açılma miktarı yük arttıkça artar ve bu durum numune kırılıncaya kadar devam eder. Sünek malzemelerde K_{IC} 'nin hesaplanabilmesi için eğrinin irdelenmesi gerekir.

4.1. Komplians Metodu

Bu deney metodunda sırasıyla aşağıdaki adımlar takip edilir.

Farklı çatlak boylarında numuneler kullanılarak her bir numune için $P - \Delta L$ değerleri elde edilir ve bu değerlere uygun grafik çizilir.

$P - \Delta L$ grafiğinde eğim komplians sayısını “ c ” verir. Bulunan komplians değerleriyle $c - 2a$ grafiği çizilir.

$$c = f(2a) \text{ fonksiyonu elde edilir. } c = \alpha \cdot 2a + \beta \cdot (2a)^2 + \gamma \cdot (2a)^3 \dots$$

Bu fonksiyonun türevi alınır ve kritik değer $(2a_c)$ yerine yazılarak $\frac{dc}{d(2a)}$ bulunmuş olur.

$G_c = \frac{P_c^2}{2 \cdot B} \cdot \frac{dc}{d(2a)}$ formülünden çatlak birim yüzeyde ilerleyebilmesi için gerekli olan enerji miktarı G_c elde edilir.

$$K_c = \sqrt{E \cdot G_c} \text{ formülünden kırılma tokluğu bulunur.}$$

4.2. Başlangıç Çatlak Derinliği Metodu

Bu metot gevrek malzemelerde kullanılır ve yorulma çatlak açılmasına gerek duyulmaz. Diğer prosedürler komplians metodunda olduğu gibidir.

4.3. Çatlak Ağız Açılma Deplasmanı Metodu

Bu metot içerisinde çatlak ağzının açılma miktarı ölçülür ve $P - \Delta L$ eğrileri elde edilir. Daha sonra komplians metodundaki adımlar uygulanır. (şekil 4.2)



Şekil 4.2. Üç noktadan eğme deneyi ile çatlak ağzı açılma deplasmanı ölçümü

4.4. J – İntegral Metodu

Bu metot, non-linear elastik malzemelerin kırılma tokluğunu bulmak için kullanılır. J – integral metodu, çatlak ilerlemesine bağlı olarak potansiyel enerjideki değişimin belirlendiği, enerjinin korunumu prensibine dayanmaktadır.

$$J = -\frac{1}{B} \cdot \frac{dU}{da}$$

B : Numunenin kalınlığı

U : Potansiyel enerji

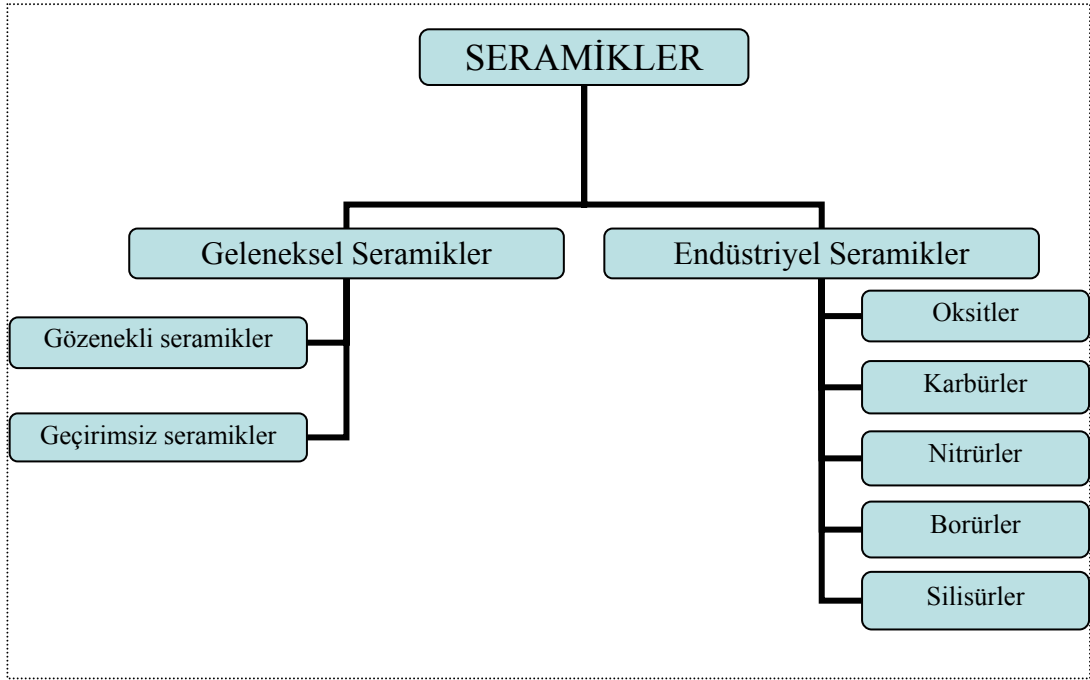
a : Çatlak boyu

BÖLÜM BEŞ

SERAMİK MALZEMELER

Seramik, yunanca kil anlamındaki *keramos* sözcüğünden türemiştir. Seramikler, çoğul olarak kullanıldığı zaman, metaller ve alaşımları hariç, kimyasal açıdan anorganik olan, genellikle yüksek ısıda işlemlerle elde edilen ürün ya da maddelerin tümü olarak tanımlanır. Seramik-metal karışımı ya da az miktarda organik malzeme içeren bileşimler çok zaman seramik malzeme olarak değerlendirilir.

Tablo 5.1. Seramik malzemelerin sınıflandırılması



Seramikler başlıca *geleneksel seramikler* ve *endüstriyel seramikler* olmak üzere iki ana gruba ayrılır.

5.1. Geleneksel Seramikler

Bu grupta, öncelikle camları, hidrolik bağlayıcıları (çimento, kireç) ve sac üstüne emayeleri saymak gerekir. Geleneksel seramik maselerinin ortak ana malzemesi ve plastikleştirici, özlüleştirci öğeleri kildir.

Kilin başlıca türü olan kaolen beyaz seramiklerde, ince fayansta ve porselende kullanılır. Bu kile plastik olmayan malzemeler (kum, kuvars, şamot gibi sertleştiriciler) ve maseyi camlaştıran feldispat, tebeşir gibi eriticiler katılır.

Maseler, duruma göre, ıslatıcılar, karıştırıcılar ya da öğütücü değirmenlerde, malzemelerin sulu olarak karıştırılmasıyla elde edilir. Su fazlası, vakumlu preslerle, kimi zaman da kısmi kurutmaya giderilir.

Bu şekilde hazırlanan topraklar, ya dökümlerde sıvı ya da barbotin olarak işlenir ya da preste az nemlendirilerek basılır ya da plastik çamur kıvamında kullanılır.

Biçimlendirilen ve kurutulan parçalar, süreksiz ya da sürekli fırınlarda pişirilir. Sıradan çanak çömlekler ve seramik parçaları genellikle açıkta ve alevlerin etkisinde kalacak biçimde pişirilir. Buna karşılık ince çanak çömlekler, fayanslar ve porselenler, örtülü olarak, yani kasetler içinde fırına yerleştirilir.

Eskiden beri bilinen bu grup seramikler pişmiş hamurun yapısına göre iki sınıfa ayrılır.

5.1.1. Gözenekli Seramikler

Bu tür seramik ürünlerin kırıkları topraksı, hamurları geçirgendir. Bu tür seramiklere örnek olarak; pişmiş topraklar, kalaylı fayanslar, yüksek ısıya dayanıklı refrakter ürünler ve beyaz geçirgen seramikler verilebilir.

5.1.2. Geçirimsiz Seramikler

Bu tür seramiklerin geçirimsizlik özellikleri, daha yüksek derecede pişerek camlaşmalarından kaynaklanır. Bu tür seramiklere örnek olarak; sert porselenler, yumuşak porselenler ve sıhhi porselenler verilebilir.

5.2. Endüstriyel Seramikler

Endüstriyel seramikler; oksitler, karbürler, nitrürler, borürler, silisürler gibi birçok gruba ayrılabilir. Genelde bunlar kimyasal bakımdan ikili bileşikler olan ve tozlardan sinterlenerek elde edilen ürünlerdir.

5.2.1. Oksitler

Bu grupta, sert ve ateşe dayanıklı malzemeler (alümina Al_2O_3 , silis SiO_2 , zirkon ZrO_2 ve glusin BeO), dielektrikler ($BaTiO_3$), manyetik ferritikler (Fe_3O_4), nükleer enerji yakıtları (UO_2) sayılabilir.

5.2.2. Karbürler

Bu grupta, silisyum karbür (SiC , ateşe dayanıklı ve aşındırıcı) ve tungsten karbür (WC , kesme takımları) sayılabilir.

5.2.3. Nitrürler

1970 yılından bu yana *termomekanik* seramiklerin (motorların ateşleme donanım parçaları), özellikle de silisyum nitrür (Si_3N_4), *SiAlON* ve bor nitrür (BN) bileşiklerinin gelişimine tanık olunmaktadır.

5.2.4. Borürler

Bor karbür (B_4C) gibi bu grup malzemeler çok sert ve aşındırıcıdır.

5.2.5. Silisürler

Korozyona karşı yüksek bir direnç gösteren malzemelerdir ($MoSi_2...$).

Endüstriyel seramikler arasında sermetleri ve yapısında seramik bir evrenin yer aldığı diğer karma malzemeleri de saymak gerekir. Endüstriyel seramiklerin elektriksel, manyetik, mekaniksel, termal ve kimyasal olarak farklı özellikleri ve bu özelliklerine bağlı olarak pek çok kullanım alanları vardır.

5.3. Seramik Malzemelerin Özellikleri

Seramiklerin sahip oldukları kimyasal, mekaniksel, fiziksel, termal, elektriksel ve manyetik özellikler, onları metaller ve plastikler gibi diğer malzemelerden ayırır.

5.3.1. Kimyasal Özellikler

Endüstriyel seramiklerin en belli başlıcaları oksitlerdir (oksijen bileşikleri). Fakat bazı karbürler (karbon ve ağır metal bileşikleri), nitrürler (azot bileşikleri), borürler (bor bileşikleri) ve silisürler (silisyum bileşikleri) de yaygın olarak kullanılırlar. Örneğin alüminyum oksit bir seramiğin ana içeriği olabilir. Alümina seramikler % 85-99 oranında alüminyum oksit içerirler.

Seramikler, metaller ve plastiklerden daha fazla korozyona dirençlidir. Genel olarak seramikler; sıvılar, gazlar, alkaliler ve asitlerle reaksiyona girmezler. Seramiklerin çoğunluğu, çok yüksek ergime noktalarına sahiptir ve bazı seramikler ergime noktalarına çok yakın sıcaklıklarda kullanılabilirler.

5.3.2. Mekaniksel Özellikler

Seramikler, oldukça sert, basma ve eğilme mukavemet değerleri yüksek malzemelerdir. Eğilme mukavemeti, seramiklerin dayanımlarının belirlenmesinde sıklıkla kullanılır. En dayanıklı seramiklerden biri olan zirkonyum dioksit (ZrO_2), çeliğe yakın bir eğilme mukavemeti değerine sahiptir. Zirkonyalar, bu mukavemet değerlerini $900^{\circ}C$ 'nin üzerinde bile korurlar. Silisyum karbür (SiC) ve silisyum nitrür (SiN) ise eğilme mukavemet değerlerini $1400^{\circ}C$ 'nin üzerinde muhafaza edebilirler. Bu silisyum malzemeler, çok yüksek sıcaklıkların olduğu, gaz türbin

motor parçalarının yapımında kullanılırlar. Her ne kadar, seramikler sert, sıcaklığa dayanıklı olsalar da, bu malzemeler oldukça kırılabilirler. Hızlı bir şekilde ısıtıldıklarında ve soğutulduklarında veya düşürüldüklerinde kırılabilirler.

5.3.3. Fiziksel Özellikler

Endüstriyel seramiklerin birçoğu, oksijen, karbon ve azotun metaller veya yarı metaller ile yaptığı bileşiklerdir. Dolayısıyla seramikler, metallerin çoğundan daha düşük bir yoğunluğa sahiptir. Sonuç olarak, hafif bir seramik parça, ağır bir metal parça kadar dayanıklı olabilir. Aynı zamanda seramikler yüksek bir aşınma direncine sahiptir. Bilinen en sert madde elmadır ve bunu kübik kristal formda bor nitrür takip eder. Alüminyum oksit ve silisyum karbür de oldukça sert malzemelerdir. Bu malzemeler metallerin kesilmesi, zımparalanması ve parlatılması işlemlerinde sıklıkla kullanılırlar.

5.3.4. Termal Özellikler

Seramiklerin birçoğu yüksek ergime noktasına sahiptir ve diğer malzemelere göre mukavemetlerini yüksek sıcaklıklarda kaybetmezler. Örneğin, silisyum karbür (SiC) ve silisyum nitrür (SiN) gibi seramiklerin sıcaklık değişimlerine dirençleri birçok metalden daha iyidir. Büyük ve ani sıcaklık değişimleri seramikleri zayıflatabilir.

5.3.5. Elektriksel Özellikler

Bazı seramikler elektriği iletir. Örneğin, krom dioksit (CrO_2) elektriği bir çok metal kadar iyi iletir. Silisyum karbür (SiC) gibi bazı seramikler, elektriği iyi iletmez, fakat bu tür seramikler yarı iletkenlerin yapımında kullanılırlar. Alüminyum oksit (Al_2O_3) gibi bazı seramikler ise elektriği hiç iletmez. Bu tür seramikler, yalıtkan olarak bazı elektrikli aletlerde ve elektronik devrelerde kullanılırlar. Porselen gibi bazı seramikler ise düşük sıcaklıklarda yalıtkan iken, yüksek sıcaklıklarda elektriği iletirler.

5.3.6. Manyetik Özellikler

Demir oksit (Fe_2O_3) içerikli seramikler; demir, nikel ve kobalt gibi manyetik malzemeler ile benzer manyetik özelliklere sahip olabilirler. Bu tür demir oksit tabanlı seramikler *ferritler* olarak isimlendirilir. Diğer manyetik özelliklere sahip seramikler ise nikel oksitleri, mangan ve baryumdur. Manyetik seramikler, elektrik motorlarında ve elektronik devrelerde kullanılır.

5.4. Seramiklerin Uygulama Alanları

Seramikler; sahip oldukları dayanım, uzun ömür ve sertlik gibi mekanik özellikler sayesinde malzeme bilimi içerisinde oldukça önem arz ederler. Elektriksel ve manyetik özellikleri, seramikleri yalıtkan, yarıiletken, iletken ve manyetikler olarak kullanıldıkları elektronik uygulamalarında değerli kılmaktadır. Aynı zamanda seramikler, yapılarda, uzay sanayisinde, biyomedikal ve nükleer endüstride önemli bir kullanıma sahiptir.

5.4.1. Mekaniksel Uygulamalar

Endüstriyel seramikler, dayanım, sertlik ve aşınma direnci ihtiyacı duyulan uygulamalarda yaygın olarak kullanılır. Örnek olarak, makine operatörleri, silisyum karbür (SiC) ve silisyum nitrür (SiN) metal kesme takımlarını metallere şekil vermede; dökme demir, nikel esaslı alaşımlar ve diğer metalleri zımparalayarak parlatmakta kullanılırlar. Ayrıca silisyum nitrür (SiN), silisyum karbür (SiC) ve bazı zirkonya tipleri yüksek sıcaklıkların olduğu gaz-türbin motorlarının kompresörlerinde ve dizel motorlarının supaplarında kullanılırlar.

5.4.2. Elektriksel ve Manyetik Uygulamalar

Seramik malzemeler elektriksel özellikleri bakımından geniş bir kullanım alanına sahiptir. Seramikler, yalıtkan olarak (düşük elektrik iletkenliği sebebiyle), yarı

iletken olarak (yalıtkanlardan daha fazla iletkenlik fakat iyi iletkenlerden daha az) ve iyi iletken olarak kullanılırlar.

Alüminyum oksit (Al_2O_3) gibi seramikler elektriği tamamen iletmezler ve yalıtkan yapımında kullanılırlar. Yüksek voltaj güç hatlarında, iletim direklerinde kullanılan simit diskler bu malzemeden yapılır. Benzer şekilde, yüksek frekanslı akımlara maruz kalan ince alüminyum oksit plakası, elektriksel ve kimyasal kararlılığını koruduğu için mikroçip yapımında kullanılır.

Bazı seramikler yarı iletken yapımında kullanılırlar. Küçük yarı iletken mikroçipler genellikle, baryum titan oksit ($BaTiO_3$) ve stronsiyum titan oksit ($SrTiO_3$) malzemelerden yapılır. Yine aynı malzemelerden yapılan yüz binlerce transistör, elektronik araçların küçük boyutlara indirgenmesinde önemli rol oynamıştır.

Bilim adamları, bakır oksit esaslı seramiklerin bir ailesinin yüksek sıcaklıklarda süper iletken olduğunu ve metallere daha iyi elektrik iletimi sağladığını keşfetmiştir. Süper iletkenlik, özel yöntemlerle soğutulan bir malzemenin hiçbir direnç göstermeden elektrik akımını iletmesidir. Bu hadise, sadece aşırı düşük sıcaklıklarda meydana gelebilir. Yine de, 1988 yılında, araştırmacılar bakır oksit seramiğin $-148\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de süper iletken olduğunu keşfetmişlerdir. Bu sıcaklık, metallere süper iletken oldukları sıcaklıktan bir hayli yüksektir.

Baryum titan oksit ($BaTiO_3$) ve stronsiyum titan oksit ($SrTiO_3$) gibi seramik malzemelerin ince yalıtkan tabakaları, çok küçük hacimlerde, büyük miktarlarda elektrik depolanabilmesine imkan verir. Elektriksel şarjın depolanabildiği bu araçlar *kapasitör* olarak adlandırılır. Mühendisler seramikler sayesinde, daha küçük boyutlarda kapasitörler geliştirmektedirler ve bunları televizyon, bilgisayar ve diğer elektronik ürünlerin yapımında kullanmaktadırlar.

Ferritler (demir oksit içerikli seramikler) elektrik motorlarında düşük maliyetli manyetikler olarak yaygın bir şekilde kullanılırlar. Bu manyetikler elektrik enerjisini mekanik enerjiye dönüştürmede yardımcı olurlar. Bir elektrik motorunda, elektrik akımı, seramik manyetik vasıtasıyla yaratılan manyetik alandan geçirilir. Elektrik akımının manyetik alandan geçme miktarına bağlı olarak motor bobini döner ve mekanik enerji elde edilir. Metal manyetiklerden farklı bir şekilde, ferritler elektrik akımını yüksek frekanslarda iletirler. Bu sayede metal iletkenlerin kaybettiği kadar güç kaybetmezler. Ferritler, aynı zamanda, video, radyo ve mikrodalga teçhizatlarında kullanılırlar. Mangan çinko ferritler, manyetik kayıt kafalarında ve ferrit oksit seramikler bilgisayar disketlerinde yaygın şekilde kullanılırlar.

5.4.3. Uzay Sanayi Uygulamaları

Uzay mühendisleri, seramik malzemeler ve sermetleri, uzay aracının bazı parçalarının yapımında kullanırlar. Uzay mekiği için ısı kalkanı tuğlaları gibi bileşenler seramikten yapılır.

5.4.4. Biyoseramik Uygulamaları

Bazı gelişmiş seramikler kemik ve yumuşak doku ile uyum gösterir ve biyomedikal alanda vücut içerisine implantasyon yapmak amacıyla kullanılır. Örneğin, özel olarak hazırlanan gözenekli alümina, kemik ve diğer doğal yumuşak dokuları birbirine bağlar. Tıp ve diş hekimliği uzmanları, bu tür seramiği, kalça eklemleri yapmak, diş kaplamaları ve köprüler yapmak amacıyla kullanırlar. Kalsiyum hidrosil fosfat gibi seramikler kemikle uyumludur, kemik kırıklarının ve hastalıklı kemiklerin iyileştirilmesinde kullanılırlar.

5.4.5. Nükleer Güç Uygulamaları

Mühendisler, uranyum seramik tanelerini nükleer güç üretmek için kullanırlar. Bu taneler, yakıt imalât fabrikalarında gaz uranyum hekza floridden (UF_6) üretilir.

Taneler daha sonra yakıt çubukları adı verilen içi boş borulara doldurulur ve nükleer güç santrallerine nakledilir.

5.4.6. Yapı ve İnşaat Uygulamaları

İmalâtçılar seramikleri tuğlalar, kiremitler, borular ve diğer inşaat malzemelerinin yapımında kullanırlar. Bu tür seramikler başlıca kilden elde edilir. Evlerde kullanılan lavabo, banyo küveti gibi demirbaşlar kil ve feldispat esaslı seramiklerden yapılır.

5.4.7. Seramik Kaplama Uygulamaları

Seramik malzemeler, yüksek sertliğe ve metallerin çoğundan daha iyi korozyon direncine sahiptir. Bu özellikleri dolayısıyla imalâtçılar tarafından metalleri seramik emaye ile kaplama amacı için kullanılırlar. İmalâtçılar seramik emayeyi, seramik tozu içeren yüksek basınçlı havayı, hidrokarbon-oksijen bileşimi ile 2500 °C sıcaklığa ısıtarak, yüzeye enjekte etmek suretiyle elde ederler. Yarı ergimiş toz parçacıkları metale yapışır ve sert bir emaye tabakası için metal soğutularak biçimlendirilir. Buzdolabı gövdeleri, fırınlar, bulaşık makineleri, çamaşır makineleri ve kurutucular genellikle seramik emaye ile kaplanır. (Microsoft Encarta Reference Library, 2004)

5.5. Endüstriyel Seramiklerin Mekaniksel Özellikleri

Tablo 5.2 de bazı endüstriyel seramik malzemelerin mekaniksel özellikleri verilmiştir.

Tablo 5.2. Endüstriyel seramiklerin mekaniksel özellikleri

Malzeme	Yoğunluk g/cm³	Basma Mukavemeti Mpa	Çekme Mukavemeti Mpa	Eğme Mukavemeti Mpa	Kırılma Tokluğu MPa m^{1/2}
Al ₂ O ₃ (% 99)	3,85	2585	207	345	4
Si ₃ N ₄ (Sıcak Pres)	3,19	3450	-	690	6,6
Si ₃ N ₄ (Tepkime Bağlı)	2,8	770	-	255	3,6
SiC (Sinter)	3,1	3860	170	550	4
ZrO ₂ , % 9 MgO	5,5	1860	-	690	8+

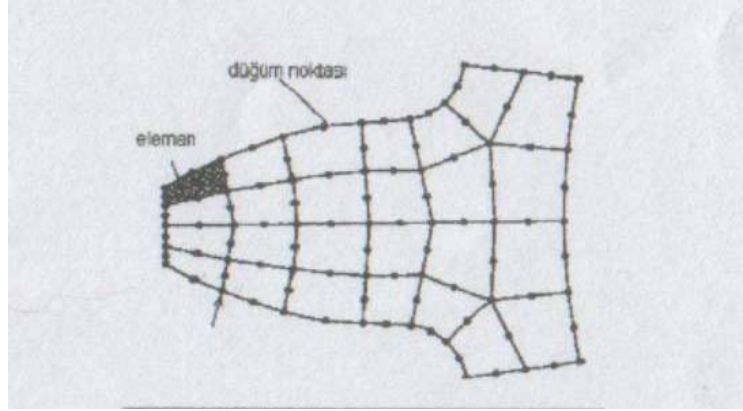
Seramik malzemeler Tablo 5.2 de görüldüğü üzere oldukça düşük kırılma tokluğu değerlerine sahiptir. Çünkü seramik malzemelerde, çatlak ucu plastik deformasyon bölgesi oldukça küçük ve plastik deformasyon miktarı oldukça düşüktür.

BÖLÜM ALTI

SONLU ELEMANLAR METODU

Sonlu elemanlar yöntemi; nümerik bir teknik olup, özellikle katı mekaniği, akışkanlar mekaniği, ısı transferi ve titreşim gibi problemlerin bilgisayar yardımıyla çözümünde kullanılan çok gelişmiş bir tekniktir. Yöntem ilk olarak gerilme analizi problemlerine uygulanmıştır.

Sonlu elemanlar yönteminde yapı, davranışı daha önce belirlenmiş olan bir çok elemana bölünür. Elemanlar *düğüm noktası* adı verilen noktalarda tekrar birleştirilirler (şekil 6.1). Bu şekilde cebrik bir denklem takımı elde edilir. Gerilme analizinde bu denklemler düğüm noktalarındaki denge denklemleridir. İncelenen probleme bağlı olarak bu şekilde yüzlerce hatta binlerce denklem elde edilir. Bu denklem takımının çözümü ise bilgisayar kullanımını zorunlu kılmaktadır.



Şekil 6.1. Bir sonlu eleman modelinde düğüm noktaları ve elemanlar

Sonlu elemanlar yönteminde temel fikir, sürekli fonksiyonları bölgesel sürekli fonksiyonlar ile temsil etmektir. Bunun anlamı; bir eleman içerisinde hesaplanması istenen büyüklüğün değerinin o elemanın düğüm noktalarındaki değerler kullanılarak interpolasyon ile bulunmasıdır. Bu nedenle sonlu elemanlar bilinmeyen ve hesaplanması istenen değerler, düğüm noktalarındaki değerlerdir. Bir varyasyonel prensip (örneğin; enerjinin minimum olması prensibi) kullanılarak büyüklük alanının düğüm noktalarındaki değerleri için bir denklem takımı elde edilir.

Bu denklem takımının matris formundaki gösterimi ise,

$$[K] \cdot [Q] = [F]$$

şeklindedir. Burada $[Q]$ büyüklük alanının düğüm noktalarındaki bilinmeyen değerlerini temsil eden vektör, $[F]$ bilinen yük vektörü ve $[K]$ ise bilinen sabitler matrisidir. Gerilme analizinde $[K]$, rijitlik matrisi olarak bilinmektedir.

6.1. Sonlu Elemanlar Yönteminin Avantajları

Sonlu elemanlar yöntemini diğer yöntemlere üstün kılan başlıca özellikler şunlardır.

- ✓ Sonlu elemanlar, boyutlarının esnekliği nedeniyle, karmaşık şekilli bir cisimi temsil edebilir.
- ✓ Çok bağıntılı bölgeler (bir veya çok delikli cisimler) veya köşeleri olan bölgeler kolayca incelenebilir.
- ✓ Değişik malzeme veya geometrik özellikleri bulunan problemler ek bir zorluk göstermez. Geometri ve malzeme nonlineeriteleri, kalıtsal olsa bile (örneğin zamana bağlı) malzeme özellikleri, kolaylıkla göz önüne alınabilir.
- ✓ Sınır şartları kolayca uygulanır.
- ✓ Seramik malzemeler gibi çok sert malzemelere başlangıç çatlakları açılması çok zor olmaktadır. Ayrıca böylesine zor koşullarda açılan çatlaklar istenen boyutlarda da oluşturulamamaktadır. Sonlu elemanlar yönteminde, başlangıç çatlakları, bilgisayar ortamında, arzu edilen boyutta rahatlıkla oluşturulabilir.

6.2. ANSYS Yazılım Programı

Sonlu elemanlar yönteminin genel uygulanabilirliği, onu geniş bir sahada problemler için güçlü ve esnek bir kullanım aracı haline getirmiştir. Bu nedenle yapısal ve mekanik problemlerin çözümü için çok sayıda yapısal program geliştirilmiştir. ANSYS sonlu elemanlar analiz programı da 1970'li yıllarda Dr. John Swanson tarafından bilgisayarlar üzerinde geliştirilen bir sayısal analiz programıdır. Sürekli olarak geliştirilen ve yenilenen bu program, mühendisliğin hemen her dalında (yapı, otomotiv, endüstri, elektronik, uzay bilimleri vs.) kullanılabilen genel maksatlı bir paket program haline getirilmiştir (Uçar 2002).

Kullanım alanları arasında; statik ve dinamik yapı analizleri, statik ve dinamik diğer analizler, termal analizler, elektromanyetik alan analizleri, akışkanlar mekaniği analizleri, akustik, optimizasyon, yapı burkulma analizleri ve nonlineer yapı analizleri sayılabilir.

ANSYS programında çözümlerin elde edilmesi üç aşamada gerçekleşir. Bu aşamalar,

- Ön işleme (preprocessing)
- İşleme (processor)
- Son işleme (postprocessor)

aşamalarıdır. Ön işleme aşamasında çözüm esnasında gerekli olan dataların oluşturulması söz konusudur. Bu aşamada program kullanıcısı koordinat sisteminin seçimi, eleman tipinin belirlenmesi, malzeme sabitlerinin ve özelliklerinin belirlenmesi, katı modelin oluşturulması ve sonlu elemanlara ayrılması işlemlerini yapar. Daha sonra çözüm aşamasına geçilir. Bu aşamada kullanıcı analiz tipini, analiz opsiyonlarını, yükleme durumlarını ve sonlu eleman çözüm tekniğini belirler ve problemi çözdürür.

6.3. ANSYS ve Kırılma Mekanikçi Problemleri

Kırılma mekanikçi problemleri özel çözümler gerektiren, çözüm süresi genelde uzun olan ve birçok parametreyi içinde bulunduran problemlerdir. ANSYS yazılım programını kullanarak sonlu elemanlar yöntemiyle bu tür problemleri çözmek, birçok kolaylık sağlamaktadır. ANSYS programı ile bulunabilen gerilme yoğunluk faktörü, J integrali ve enerji yayılım hızı gibi kırılma mekanikçi parametreleri gerçek fiziki durumdan uyarlanmış model hakkında bilgiler vererek problemin çözümünü deney yapmadan sağlamış olmaktadır. Ayrıca kompleks yüklemeleri, farklı geometri durumlarını gerçekleştirmek deney şartlarına göre çok daha kolay olmaktadır. Problemler iki boyutlu veya üç boyutlu olarak çözülebilmektedir. Fakat buradaki en önemli konu problemin çözümünde kullanılan elemanların tipi ve kullanım şeklidir. Kırılma mekanikçinde çatlak etrafı hassas bir bölge olduğundan dolayı burasının özel elemanlarla donatılması gerekmektedir. Aksi halde problem yanlış çözümler üretecektir. Doğru modelleme problemin çözümündeki en önemli adımdır. Bu noktada ANSYS programı kırılma mekanikçi problemlerinde analitik sonuçlara çok yakın değerlerde sonuçlar verebilen bir sonlu elemanlar programı olarak karşımıza çıkmaktadır. Program tarafından hesaplanan parametreler gerçek model davranışı hakkında önemli bilgiler sunmaktadır (Hattatoğlu 2003).

6.4. Sonlu Elemanlarla Model Oluşturma Aşamaları

Sıradan bir sonlu elemanlar programı ön işleme (preprocessor), işleme (processor) ve son işleme (postprocessor) kısımlarından oluşmaktadır. İlk kısım kullanıcı tarafından oluşturulur ve diğer iki kısım program tarafından tamamlanır. Her kısım şu aşamalardan oluşmaktadır:

- I. Ön işleme (preprocessor) kısmında kullanıcı tarafından oluşturulan yapı
 - a. Analiz tipinin belirlenmesi (statik, dinamik, termal vs.)
 - b. Boyutların tanımlanması (2 boyutlu veya 3 boyutlu gibi)
 - c. Elemanların tanımlanması
 - d. Malzeme özelliklerinin tanımlanması (elastisite modülü vs.)

- e. Sınır şartlarının belirlenmesi
- f. Yükleme tipinin belirlenmesi (yüzey yükü, tekil yük, moment vs.)

II. İşleme (processor) kısmında problem tarafından oluşturulan yapı

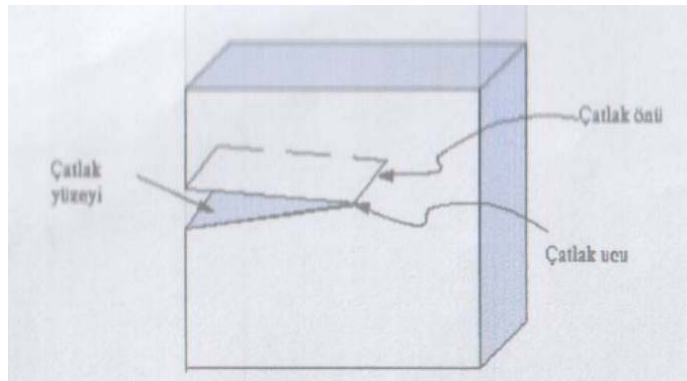
- a. Eleman şekil fonksiyonlarının oluşturulması
- b. Eleman denklemlerinin hesaplanması
- c. Dönüşüm matrislerinin hesaplanması
- d. Eleman denklemlerinin birleştirilmesi
- e. Sınır şartlarının girilmesi
- f. Çözüm prosedürünün yapılması

III. Son işleme (postprocessor) de kullanıcı tarafından elde edilebilen sonuçlar

- a. İstenen değerler için kontur çizdirilmesi ve çıktı alınması
- b. Deformasyon biçiminin çizdirilmesi ve çıktı alınması
- c. Deplasman, dönme vs. için vektör görünümünün elde edilmesi

6.5. Çatlak Bölgesinin Modellenmesi

Çatlak içeren bir yapıyı modelleme işlemi, diğer katı modelleme işlemlerinden farklıdır. İki boyutlu modellemede çatlak ucunda, üç boyutlu modellemede ise çatlak önünde tekil elemanlar (singular elements) kullanılması gerekir.(şekil 6.2)



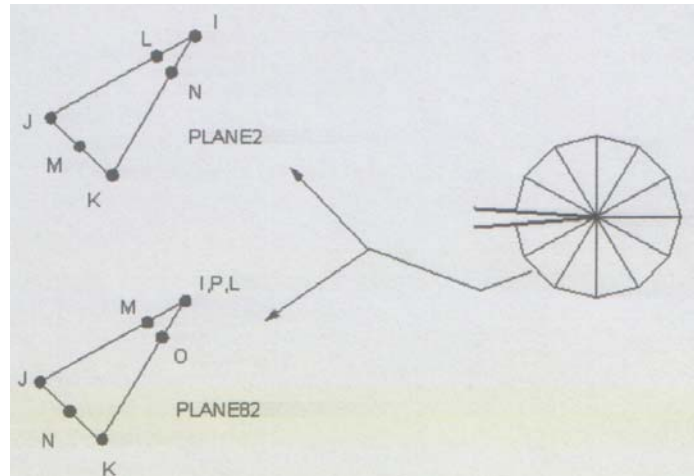
Şekil 6.2. Çatlak ucu ve çatlak önü

6.6. Çatlak Analizinde Kullanılan Eleman Tipleri

Kırılma mekaniği analizi için katı model hazırlamadaki son aşama, alan ve hacimlerde ağ (mesh) oluşturmak için uygun eleman tipinin belirlenmesidir. Eğer model iki boyutlu olarak düşünülürse, düzlem kuadratik elemanlar kullanılması gerekir. Eğer model üç boyutlu olarak düşünülürse o zamanda iki farklı eleman kullanılması gereklidir. Bunlardan birisi alan ağı (mesh) oluşturmada kullanılacak, diğeri de hacim ağı (mesh) oluşturmada kullanılacaktır. Hem alanda hem de hacimde ağ (mesh) yapmak için kuadratik elemanlar hazırlanır. Çünkü bu elemanlar kenarlarında orta noktaya sahiptirler. Bundan dolayı istenen tekillik (singularity) ancak orta noktaların çatlak etrafındaki noktaya yani köşe noktaya dönüştürülmesiyle gerçekleştirilir.

6.6.1. Plane 82 Eleman Tipi

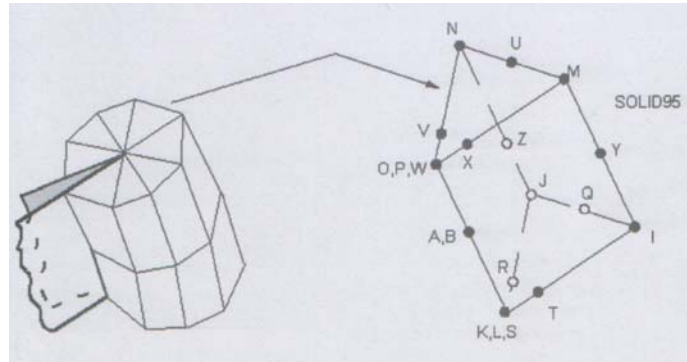
Bu eleman tipi, dört bağlantı noktasına ve iki boyutlu diğeri bağlantı elemanlarına göre daha yüksek bir biçime sahiptir. Plane 82, karmaşık birleştirmelerin mesh edilmesinde dört bağlantı noktasına sahip iki boyutlu diğeri elemanlara göre daha iyi sonuç verir. Plane 82, sekiz bağlantı noktası ile tanımlanır ve her bağlantı noktasının iki serbestlik derecesi vardır (şekil 6.3). Bu eleman, x ve y yönlerinde yer ve şekil değiştirebilir. Elemanın plastiklik, büyük esnemelere dayanma özelliği ve oldukça fazla şekil değiştirme özelliği vardır.



Şekil 6.3. Plane 82 eleman tipi

6.6.2. Solid 95 Eleman Tipi

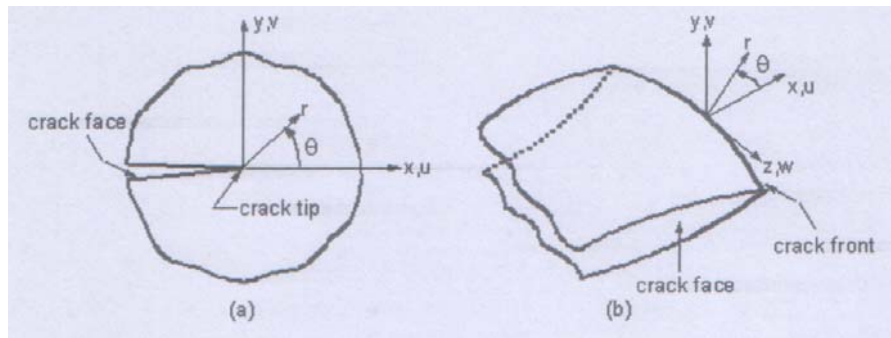
Bu eleman, üç boyutlu kırılma modelleri için tavsiye edilen eleman tipidir. Solid 95, üç boyutlu sekiz bağlantı noktalı diğer elemanlara göre daha yüksek bir biçime sahiptir. Eleman yirmi bağlantı noktası ile tanımlanmıştır ve her bağlantı noktasının üç serbestlik derecesi vardır. Eleman x, y ve z yönlerinde yer değiştirebilir. Elemanın plastikliği, büyük esnemelere dayanma özelliği ve oldukça fazla şekil değiştirme özelliği vardır. (Şekil 6.4)



Şekil 6.4. Solid 95 eleman tipi

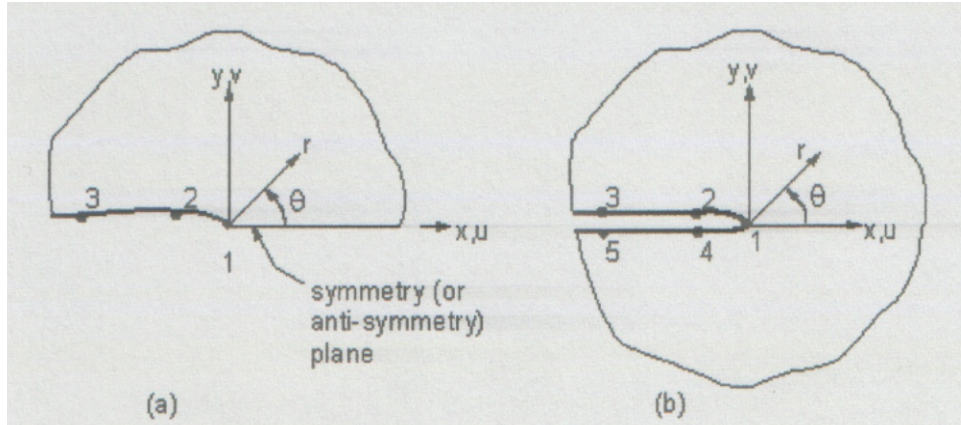
6.7. Çatlak Ucu Veya Çatlak Önü Koordinat Sistemi

Lokal olarak bir çatlak ucu veya çatlak önü koordinat sistemi Şekil 6.5'deki gibi tanımlanır. Bu koordinat sisteminin x ekseninin, çatlak yönüne dik ve çatlak yüzeyine paralel olması gerekir. Dolayısıyla da y ekseninin de çatlak yüzeyine dik olması gerekir. Aksi halde program gerilme yoğunluk faktörünü hesaplamayacaktır. Üç boyutlu modellerde çatlak ucu yerine çatlak önünden bahsedilir.



Şekil 6.5. İki boyutlu (a) ve üç boyutlu (b) modellerde çatlak ucu koordinat sistemi

Gerilme şiddet faktörünü ANSYS programında hesaplayabilmek için, çatlak yüzeyi boyunca bir yol tanımlanır. Bu yol üzerinde de 5 adet düğüm noktası seçilir. Seçilen ilk düğüm noktasının çatlak ucunda olması gerekir. Simetri özelliği kullanılan modellerde modelin bir yüzünde seçilen 3 adet düğüm noktası çözüm için yeterli iken, simetri özelliğinin kullanılmadığı modellerde diğer yüzdeki 2 düğüm noktası daha seçilmelidir. Çatlak yolu ve seçilen düğüm noktaları şekil 6.6'da görülmektedir.



Şekil 6.6. Simetrik (a) ve simetrik olmayan (b) modellerde çatlak yolunun tanımlanması

6.8. Üç Nokta Eğme Deneyi

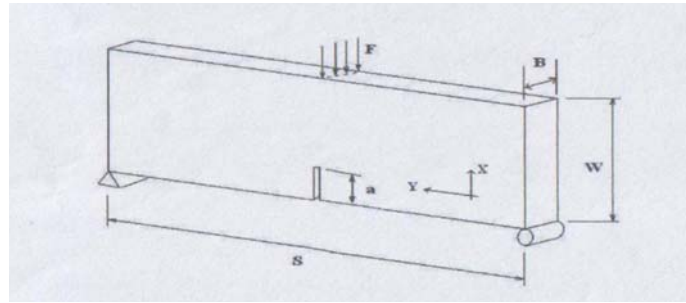
Kırılma mekaniğinde Mod I yükleme durumu için literatürde en sık kullanılan deney ekipmanlarından birisi üç nokta eğme deneyidir. ASTM E399-83 prosedürüne yapılan deney ASTM'de Metalik Malzemelerin Düzlem Germe Kırılma Tokluğu için Standart Deney Metodu olarak geçmektedir.

Gerilme yoğunluk faktörü değerinin boyut ve geometriye bağlı olarak değişmesinden dolayı bu deney ekipmanının boyut ve geometrilerine bağlı olarak şu bağıntı çıkarılmıştır (Uğuz 1996):

$$K_I = \frac{P_I \cdot S}{B \cdot w^2} \cdot f\left(\frac{a}{w}\right)$$

$$f\left(\frac{a}{w}\right) = \frac{3 \cdot \left(\frac{a}{w}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot \left[1,99 - \frac{a}{w} \cdot \left(1 - \frac{a}{w}\right) \cdot \left(2,15 - 3,93 \cdot \frac{a}{w} + 2,7 \cdot \frac{a^2}{w^2} \right) \right]}{2 \cdot \left(1 + 2 \cdot \frac{a}{w}\right) \cdot \left(1 - \frac{a}{w}\right)^{\frac{3}{2}}}$$

Bu formülde; S mesnetler arası uzaklığı, B kiriş derinliğini, w kiriş yüksekliğini, P_I uygulanan kritik yükü ve $f\left(\frac{a}{w}\right)$ geometriye bağlı boyutsuz bir katsayıyı ifade etmektedir. Şekil 6.2.'de üç nokta eğme deneyi için mesnet şartları ve kullanılan parametreler görülmektedir. Deney numunesine deneye başlamadan önce bir başlangıç çatlak açılır. a değeri, başlangıç çatlak uzunluğunu ifade etmektedir.



Şekil 6.7. Üç nokta eğme deneyi numunesi

BÖLÜM YEDİ

ANSYS İLE ÇATLAK ANALİZİ

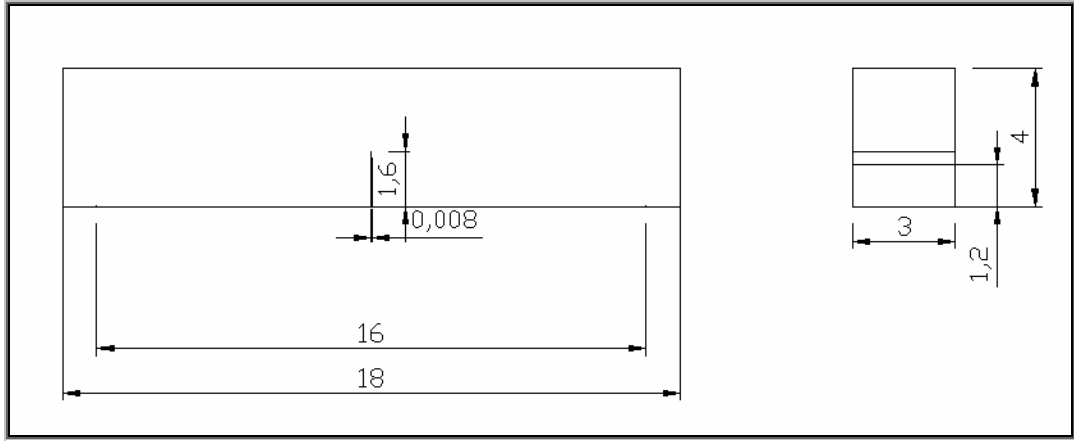
Bu tezin amacı, seramik malzemelerin kırılma tokluğu değerlerini, üç boyutlu sonlu elemanlar yöntemi ile teorik olarak belirlemektir. Ancak tez kapsamındaki çalışmalar, lineer elastik kırılma mekaniği yaklaşımının geçerli olduğu diğer tüm gevrek malzemelerin kırılma tokluğu değerlerinin belirlenmesinde de kullanılabilir.

Ukrayna mukavemet problemleri enstitüsünde (Institute for Problems of Strength) yapılan bir çalışmada, Dr. Gogotsi, yedi farklı tip seramik malzemenin kırılma tokluğu değerlerini deneysel metotla elde ederek, sonuçlarını yayınlamıştır. Çalışma içerisinde özellikle SiC+50% ZrB₂+10% B₄C ve Si₃N₄+30% SiC+3% MgO seramik malzemelerinin yük ve deplasman diyagramları açıkça verilmiştir. Deneyler oda sıcaklığında ve 1400 °C sıcaklıkta yapılmış, bu sıcaklıklarda elde edilen kırılma tokluğu değerleri makalenin sonunda yayınlanmıştır.

Sonuç olarak, bu tez kapsamında, Dr.Gogotsi tarafından deneysel metotla kırılma tokluğu değerleri elde edilen SiC+50% ZrB₂+10% B₄C ve Si₃N₄+30% SiC+3% MgO seramik malzemelerin bilgisayar ortamında simülasyonu yapılmıştır. Üç boyutlu sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak ANSYS yazılımı ile kırılma tokluğu değerleri belirlenmiş ve bulunan sonuçlar deneysel metotla bulunan sonuçlar ile karşılaştırılarak, veriler bir tablo halinde tezin sonunda okuyucuya sunulmuştur. Sonuçların geçerliliği açısından bir yerine iki seramik malzemenin, kırılma mekaniği analizinin yapılması, ANSYS yazılımının ve teorik metodun güvenilirliğini açıkça ortaya koymaktadır.

7.1. SiC+50% ZrB₂+10% B₄C Seramik Malzemenin Analizi

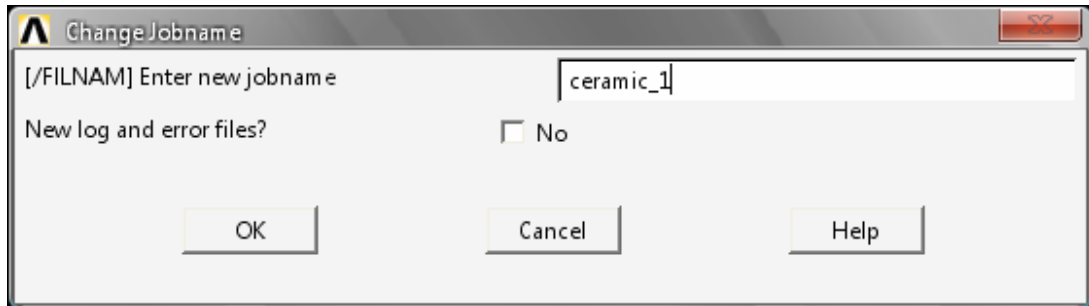
Modeli oluşturulacak seramik malzemenin elastisite modülü 350 GPa ve poisson oranı 0,22 kabul edilmiştir. Elastisite modülünün kırılma tokluğu üzerinde zaten doğrudan bir etkisi yoktur ve elastisite modülünün programa farklı tanıtılması ile elde edilecek kırılma tokluğu değeri değişmeyecektir. Model üzerindeki başlangıç çatlak uzunluğu değeri 1,6 mm'dir. Ayrıca çatlak ağzı açılma yükü oda sıcaklığında 47 N ve 1400 °C sıcaklıkta 57 N olarak makaleden okunmuştur (bkz. makale fig.4). Modelin boyutları 3×4×18 mm ve destekler arası 16 mm'dir. (şekil 7.1)



Şekil 7.1. Numuneye ait teknik resim

7.1.1. Analiz Dosyasının Belirlenmesi

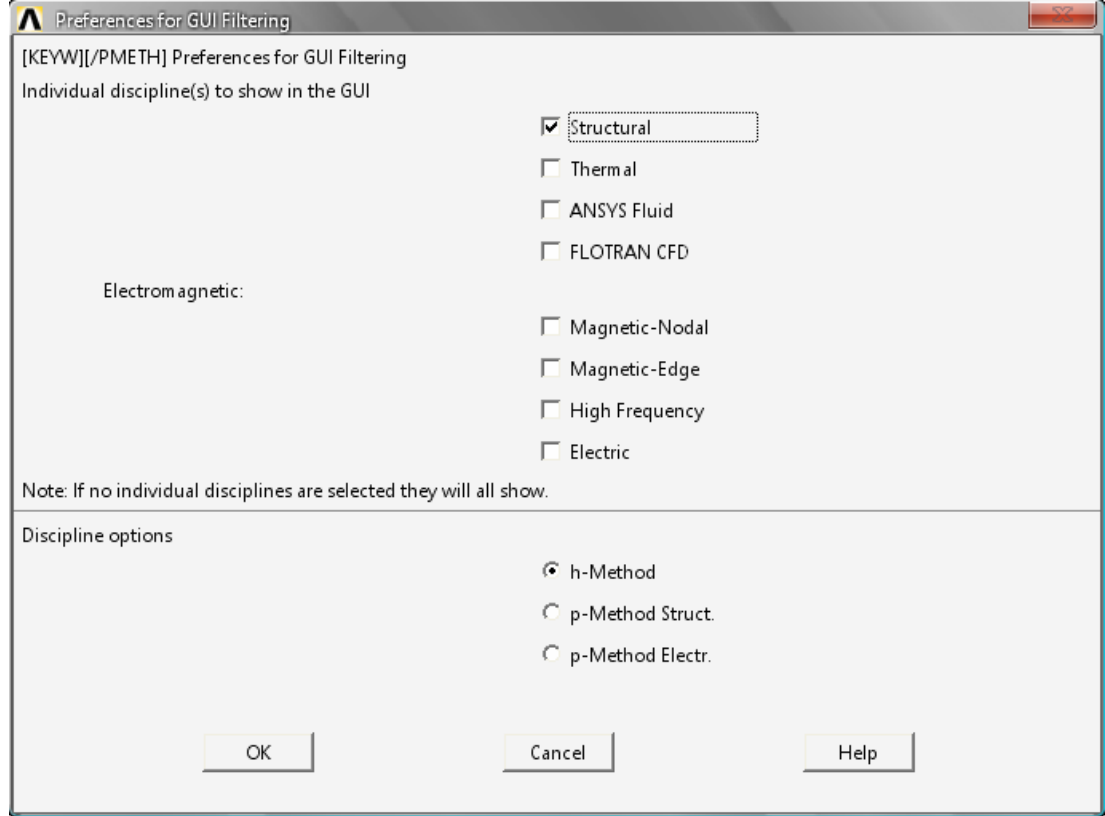
Utility Menu > File > Change Jobname seçeneğinde açılan pencereye belirlediğimiz dosya adı girilir ve OK butonuna tıklanır. (şekil 7.2)



Şekil 7.2. Analiz dosyasının belirlenmesi

7.1.2. Analiz Tipinin Belirlenmesi

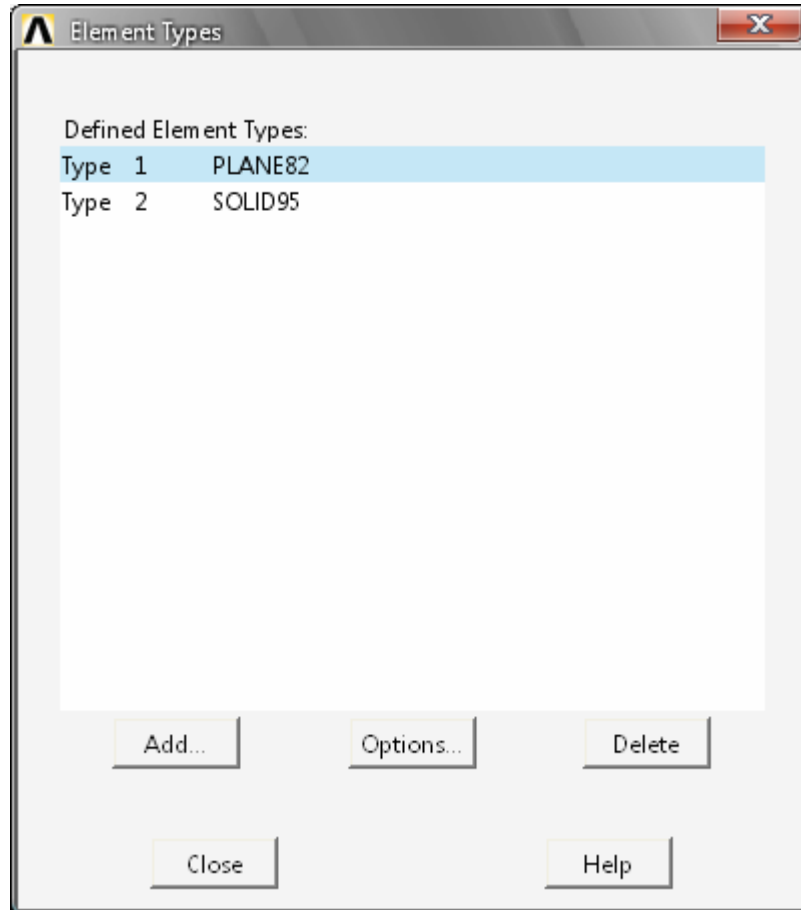
Main Menu > Preferences seçeneğinde açılan pencerede Structural sekmesi işaretlenir. Bu şekilde yapısal analiz tipi seçilmiş olur.



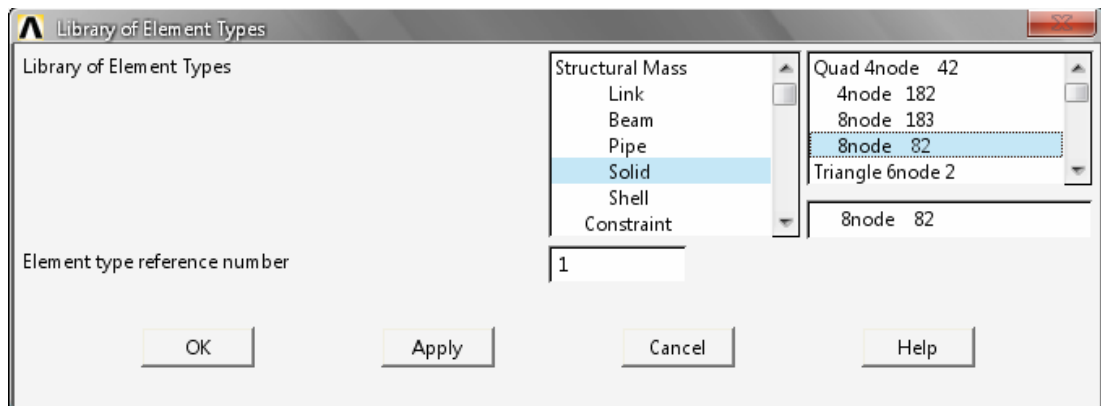
Şekil 7.3. Analiz tipinin belirlenmesi

7.1.3. Eleman Tipinin Belirlenmesi

Main Menu > Preprocessor > Element Type > Add/Edit/Delete seçeneğinden sonra açılan pencerede Add butonuna tıklanır (şekil 7.4) ve daha sonra açılan pencereden analiz için uygun elemanlar seçilir. (şekil 7.5)



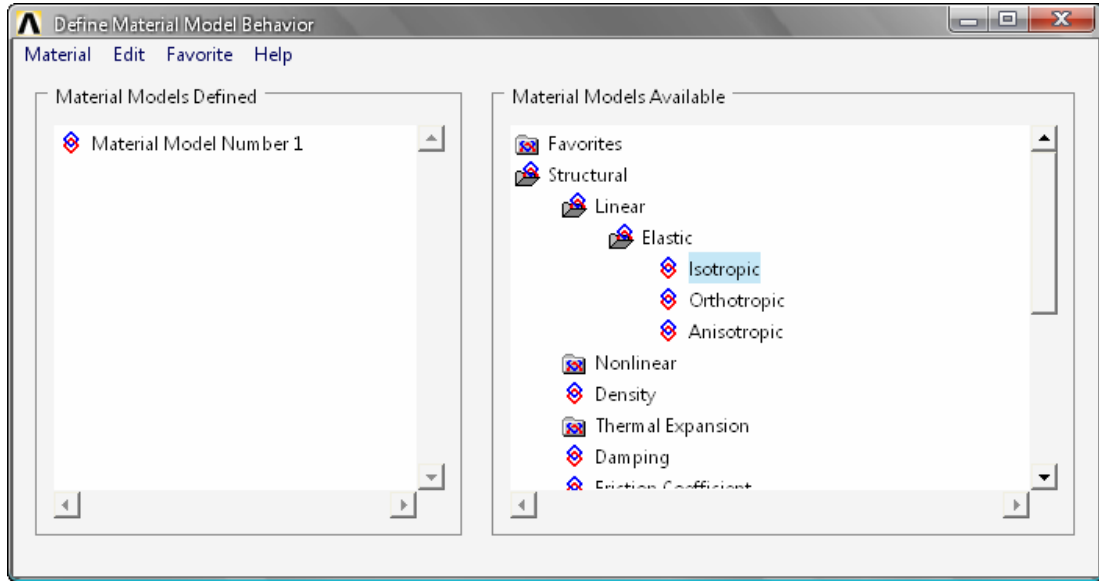
Şekil 7.4. Eleman tipinin belirlenmesi



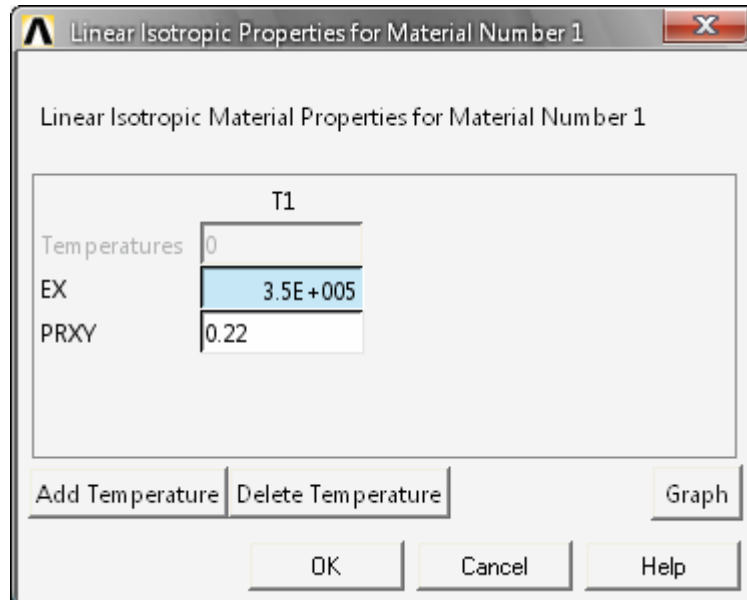
Şekil 7.5. Eleman tipleri

7.1.4. Malzeme Özelliklerinin Tanımlanması

Main Menu > Preprocessor > Material Props > Material Models seçeneğinde açılan pencerede (şekil 7.6) sağ tarafta bulunan malzeme modelleri içinde uygun model tanımlanır. (şekil 7.7)



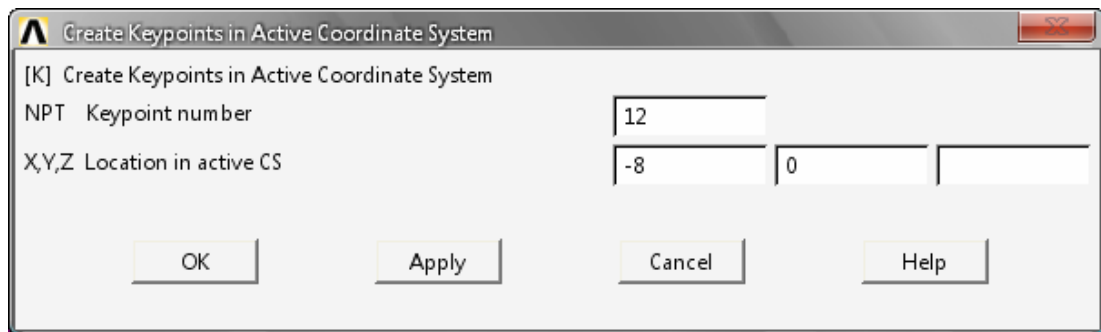
Şekil 7.6. Malzeme özellikleri penceresi



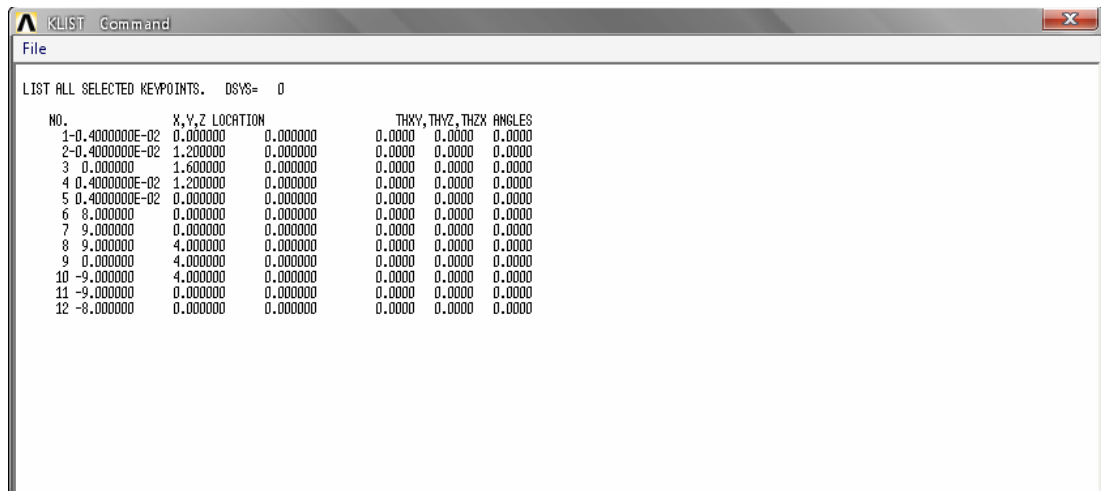
Şekil 7.7. Malzeme özelliklerinin tanımlanması

7.1.5. Anahtar Noktaların (Keypoints) Tanımlanması

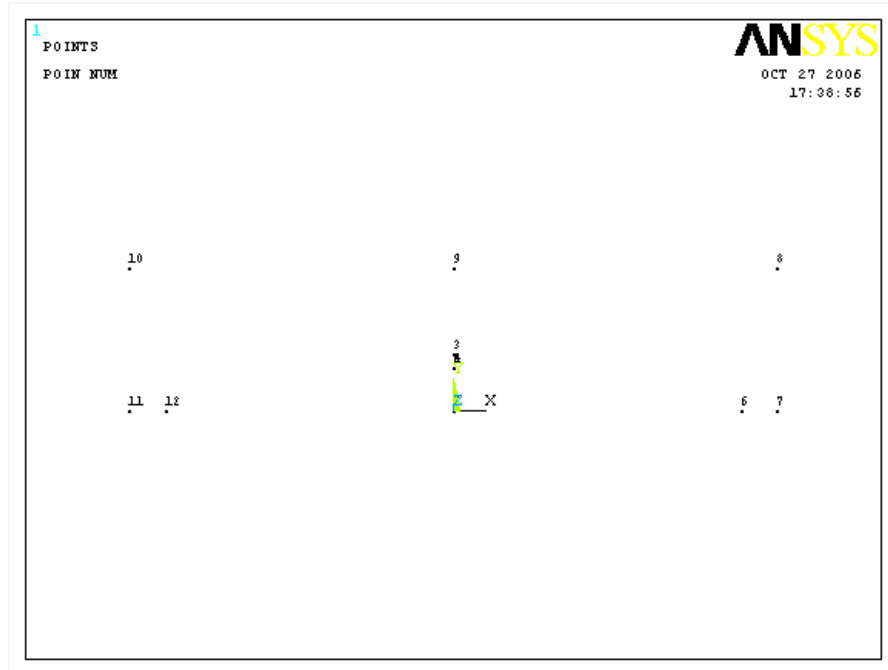
Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Keypoints > In Active CS seçeneğinde açılan pencereye (şekil 7.8) bütün noktaların koordinatları girilir (şekil 7.9). Anahtar noktaların tanımlanmasıyla modelin iki boyutlu taslağı ortaya çıkmış olur. (şekil 7.10)



Şekil 7.8. Anahtar noktaların (keypoints) tanımlanması



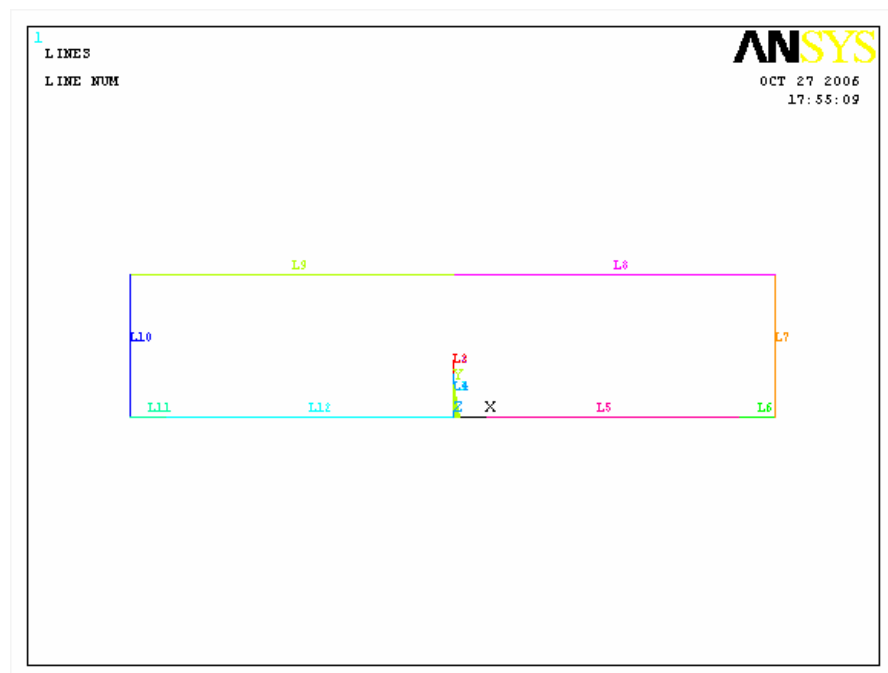
Şekil 7.9. Anahtar noktaların (keypoints) koordinatları



Şekil 7.10. Anahtar noktaların (keypoints) tanımlanmış hali

7.1.6. Çizgilerin Oluşturulması

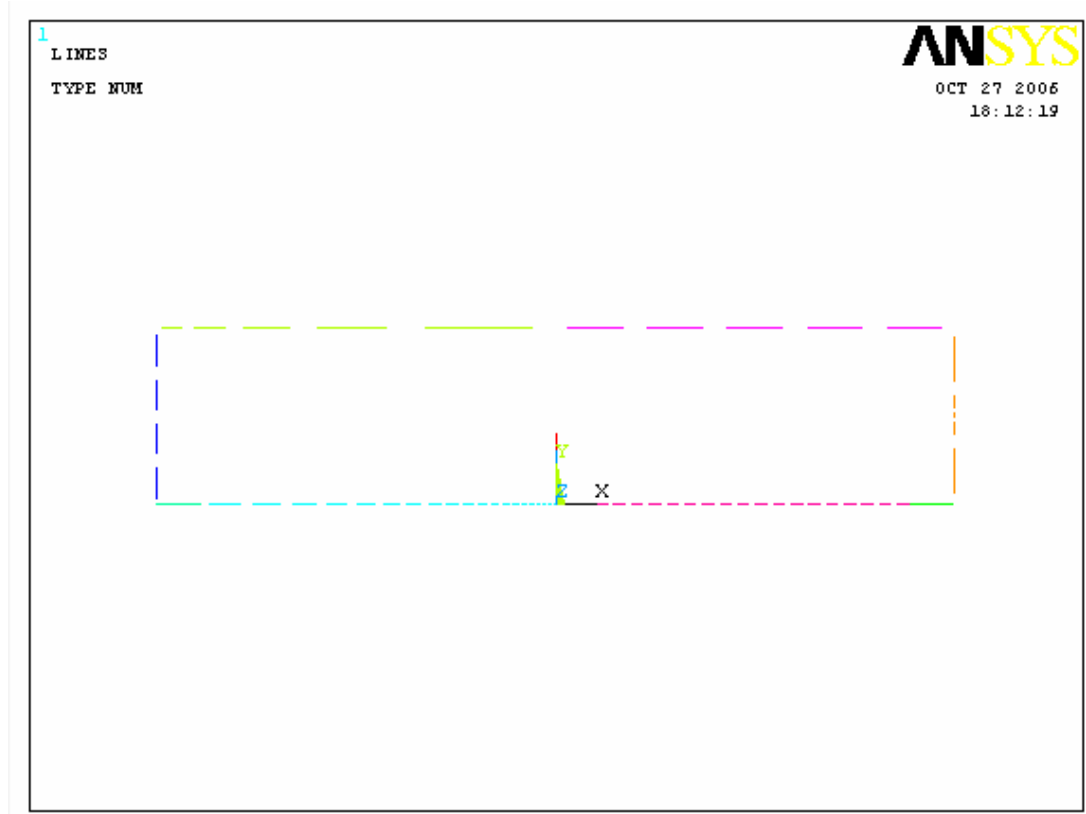
Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Lines > Straight Lines seçeneğinden noktalar sırasıyla mouse ile işaretlenir ve çizgiler oluşturulur.



Şekil 7.11. Çizgilerin oluşturulması

7.1.7. Çizgilerin Bölünmesi (Meshlenmesi)

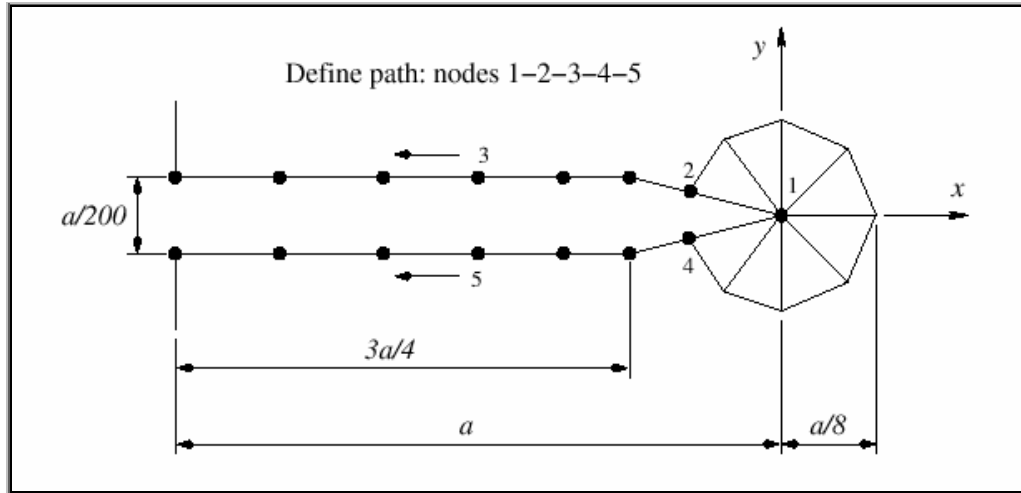
Modeli uygun şekilde mesh edebilmek için çizgiler belirli parçalara bölünür. Main Menu > Preprocessor > Meshing > Size Cntrl > ManualSize > Lines > Picked Lines seçeneğinden sonra bölünmek istenen çizgiler seçilir ve istenilen değerlerde mesh edilir. (şekil 7.12)



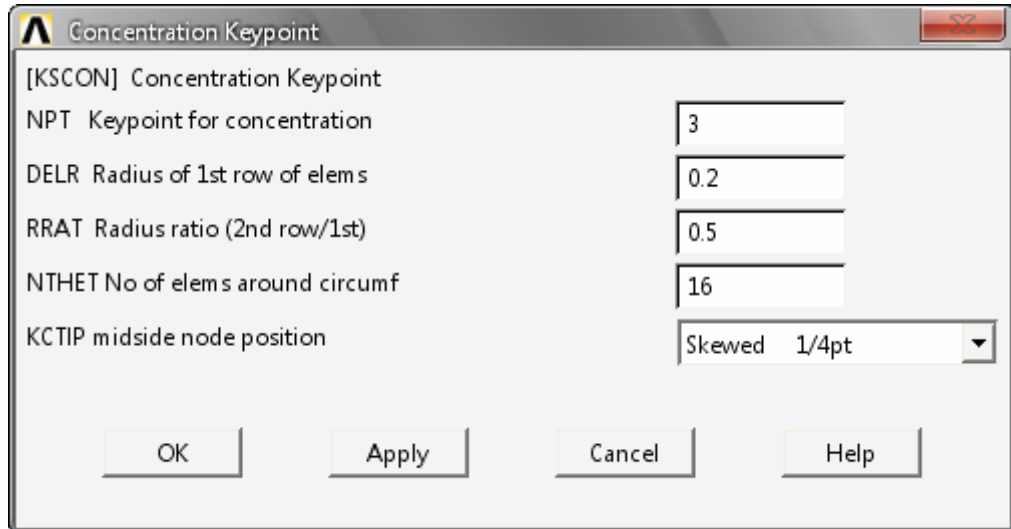
Şekil 7.12. Çizgilerin bölünmesi (meshlenmesi)

7.1.8. Çatlak Ucunun Yoğunlaştırılması

Main Menu > Preprocessor > Meshing > Size Cntrl > Concentrat KPs > Create seçeneği ile açılan pencerede (şekil 7.14) çatlak ucu noktası seçilerek OK'a basılır ve gelen pencereye gerekli değerler girilir. Böylece çatlak ucu etrafında dairesel bir yoğunluk elde edilir. (şekil 7.13)



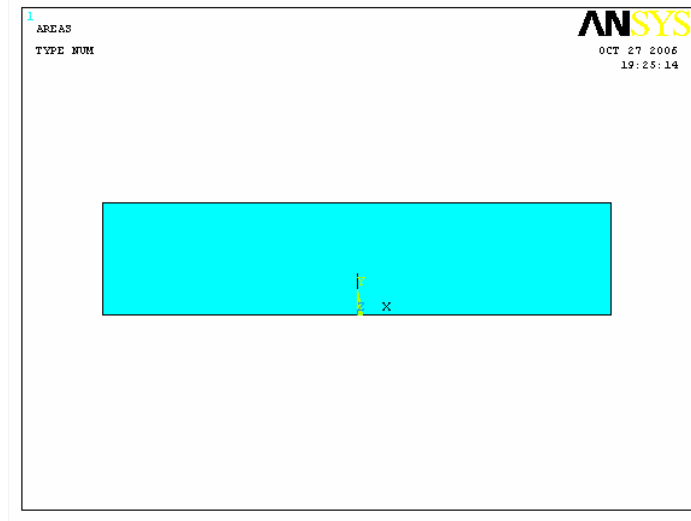
Şekil 7.13. Çatlak bölgesinin modellenmesi



Şekil 7.14. Çatlak ucunun yoğunlaştırılması

7.1.9. Alan Oluşturulması

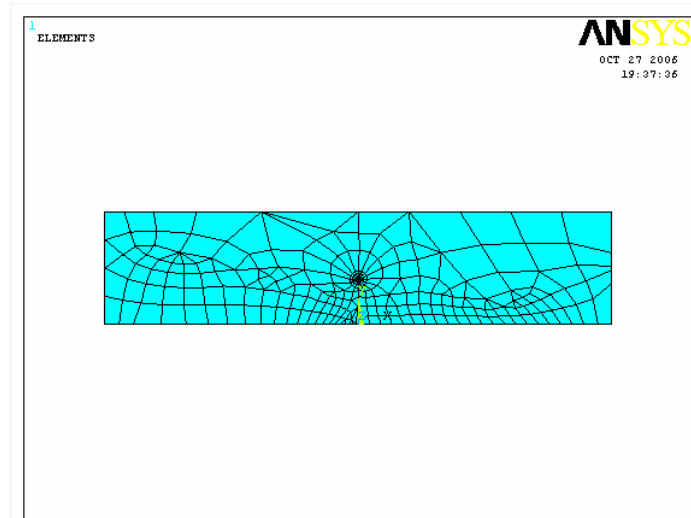
Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Areas > Arbitrary > By Lines seçeneğinin ardından tüm çizgiler seçilir ve alan elde edilir. (şekil 7.15)



Şekil 7.15. Alan oluşturulması

7.1.10. İki Boyutlu Mesh Edilmiş Model

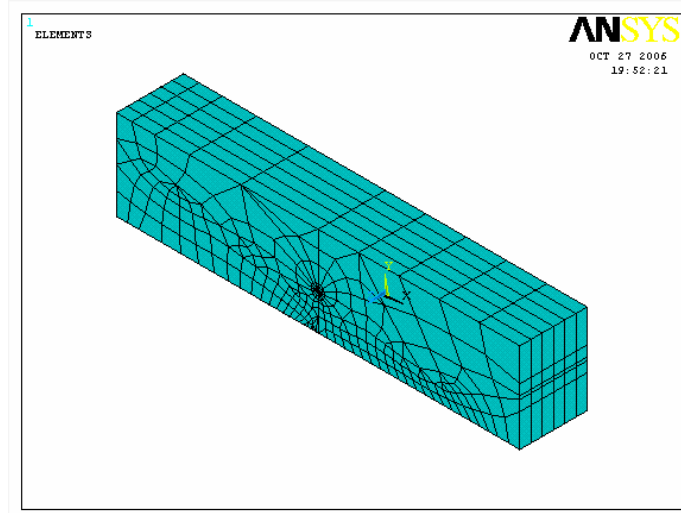
Main Menu > Preprocessor > Meshing > Mesh > Areas > Free seçeneğinin ardından alan seçilir ve mesh edilir. (şekil 7.16)



Şekil 7.16. İki boyutlu mesh edilmiş model

7.1.11. Üç Boyutlu Mesh Edilmiş Model

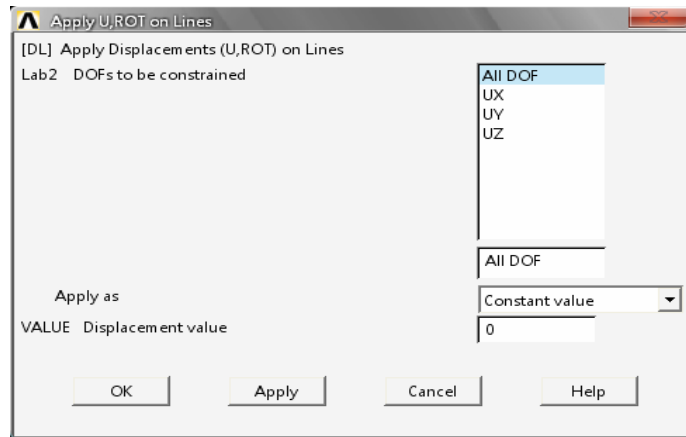
Main Menu > Preprocessor > Modeling > Operate > Extrude > Areas > Along Normal seçeneği ile açılan pencereye parçanın derinliği girilir ve uzatma işlemi yapılır. (şekil 7.17)



Şekil 7.17. Üç boyutlu mesh edilmiş model

7.1.12. Sınır Şartlarının Uygulanması

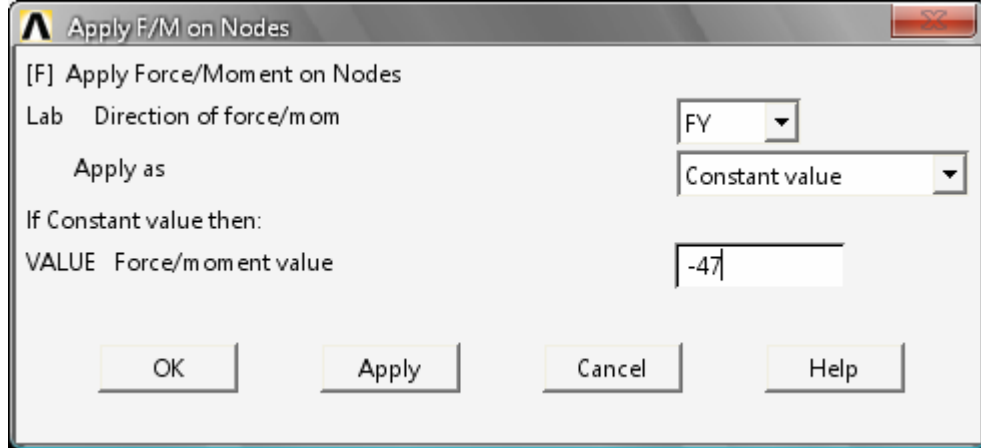
Main Menu > Solution > Define Loads > Apply > Structural > Displacement > On Lines seçeneği ile açılan pencerede mesnet noktalarının bulunduğu çizgiler seçilir ve sınır şartları uygulanır. (şekil 7.18)



Şekil 7.18. Sınır şartlarının uygulanması

7.1.13. Yükün Uygulanması

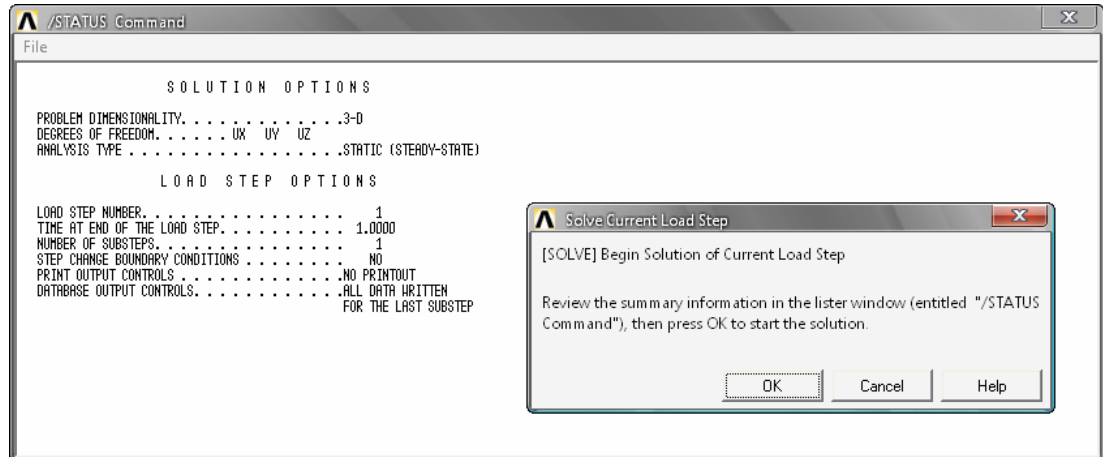
Main Menu > Solution > Define Loads > Apply > Structural > Force/Moment > On Nodes seçeneği ile açılan pencereye 47 N olan yük girilir. (şekil 7.19)



Şekil 7.19. Yükün uygulanması

7.1.14. Çözümün Başlatılması

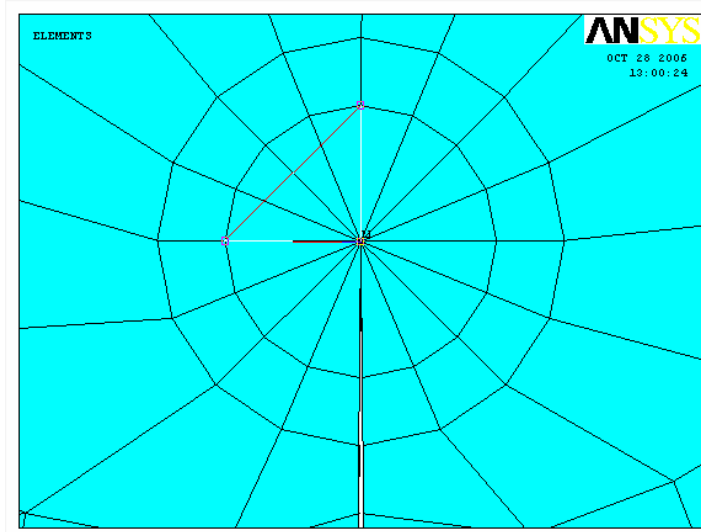
Main Menu > Solution > Solve > Current LS seçeneği ile çözüm başlatılır. (şekil 7.20)



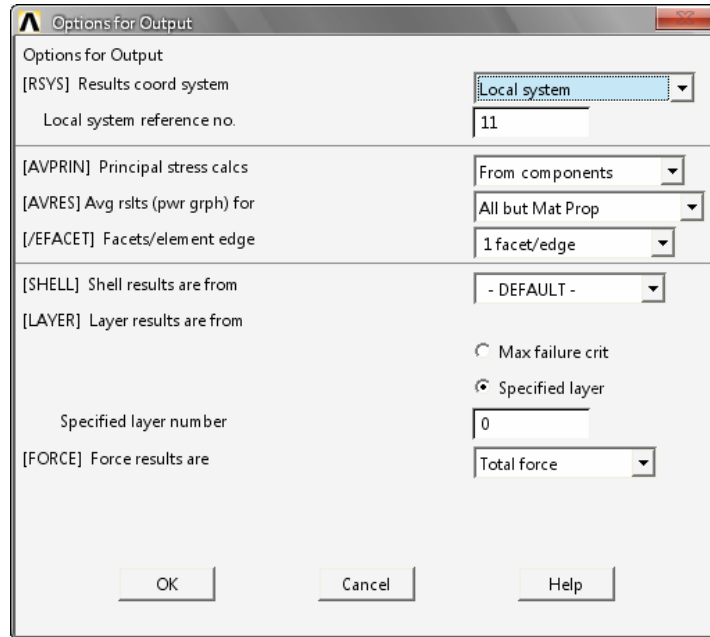
Şekil 7.20. Çözümün başlatılması

7.1.15. Çatlak Ucu Koordinat Sistemi Tanımlanması

Utility Menu > WorkPlane > Local Coordinate Systems > Create Local CS > By 3 Nodes seçeneği ile farklı bir çatlak ucu koordinat sistemi tanımlanır (şekil 7.22). Yeni koordinat sistemi tanımlanırken ilk düğüm noktası çatlak ucu, ikinci düğüm noktası çatlak ucu koordinat sisteminin y ekseninde ve y eksenine dik olan nokta ve son düğüm noktası da x ekseninde ve çatlak ucu koordinat sisteminin x ekseninde olan nokta olarak belirlenir. (şekil 7.21)



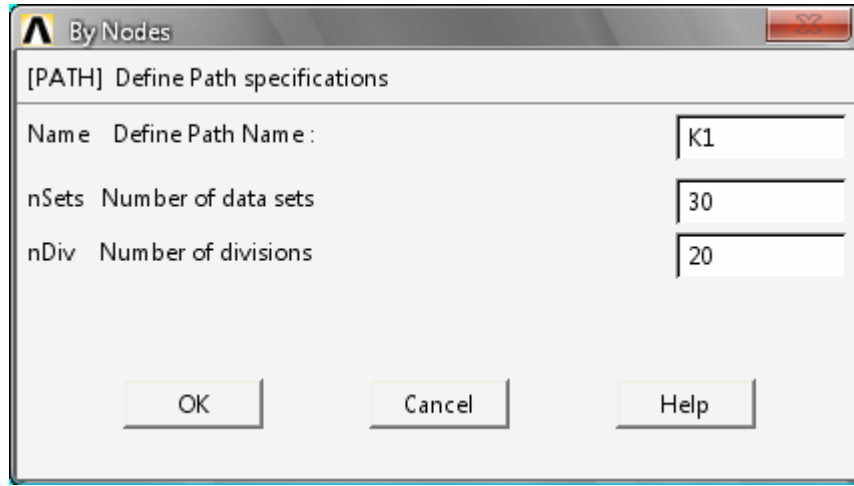
Şekil 7.21. Çatlak ucu koordinat sistemi düğüm noktaları



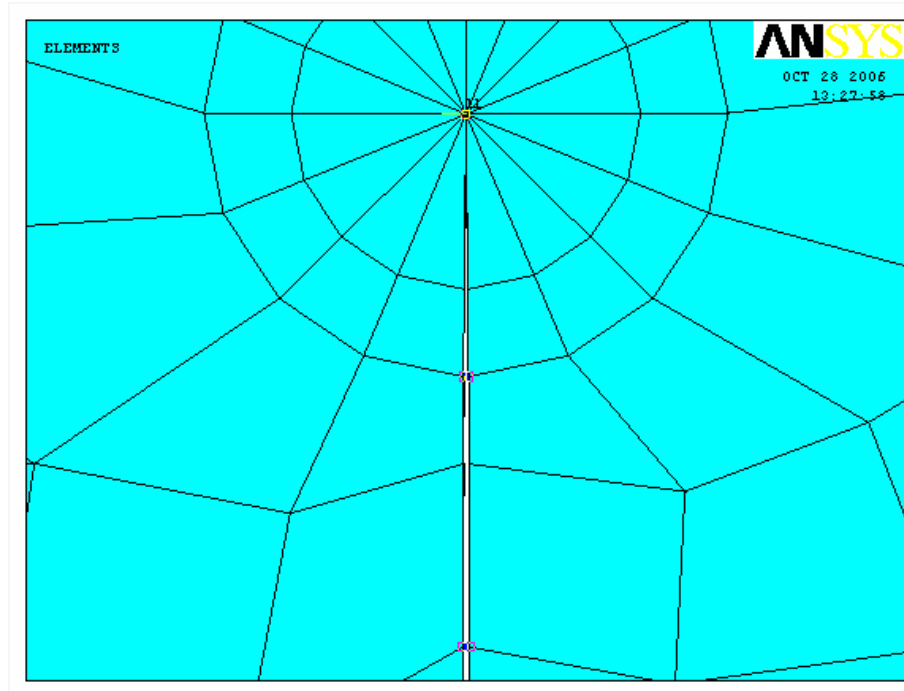
Şekil 7.22. Çatlak ucu koordinat sistemi tanımlanması

7.1.16. Çatlak Yüzey Yolu Tanımlanması

Main Menu > General Postproc > Path Operations > Define Path > By Nodes seçeneğinin ardından simetri özelliğinin kullanılmadığı modelde beş adet düğüm noktası belirlenir (şekil 7.23). Seçilen ilk düğüm noktası çatlak ucunda olup, geri kalan diğer dört düğüm noktasının ikisi çatlak kenarının sol yüzeyi üzerinde, kalan ikisi de sağ yüzeyi üzerinde seçilir. (şekil 7.24)



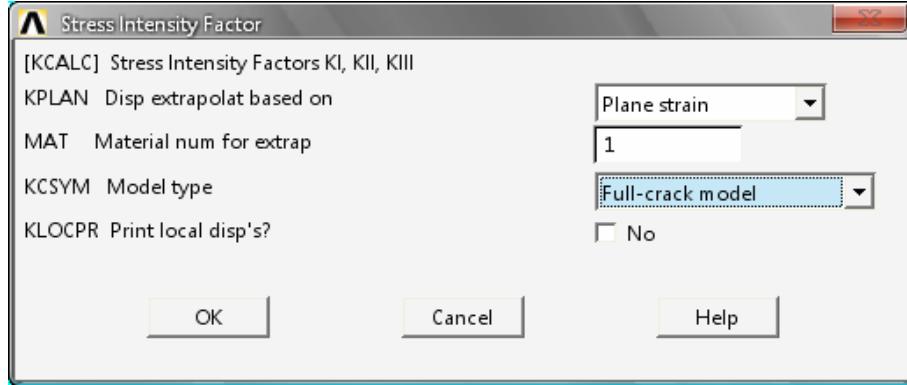
Şekil 7.23. Çatlak yüzey yolu tanımlanması



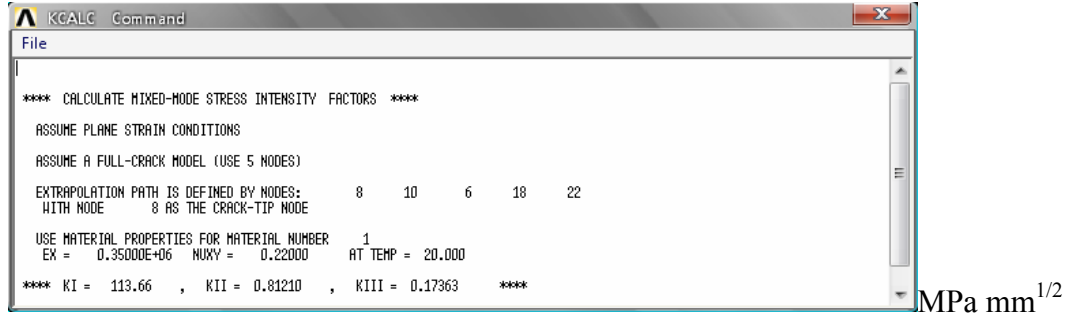
Şekil 7.24. Çatlak yüzey yolu düğüm noktaları

7.1.17. Gerilme Şiddet Faktörü Değerinin Okunması

Main Menu > General Postprocessor > Nodal Calcs > Stress Int. Factr seçeneği ile açılan pencerede düzlem deformasyon durumu seçilir ve gerilme şiddet faktörü değeri okunur. (şekil 7.25)

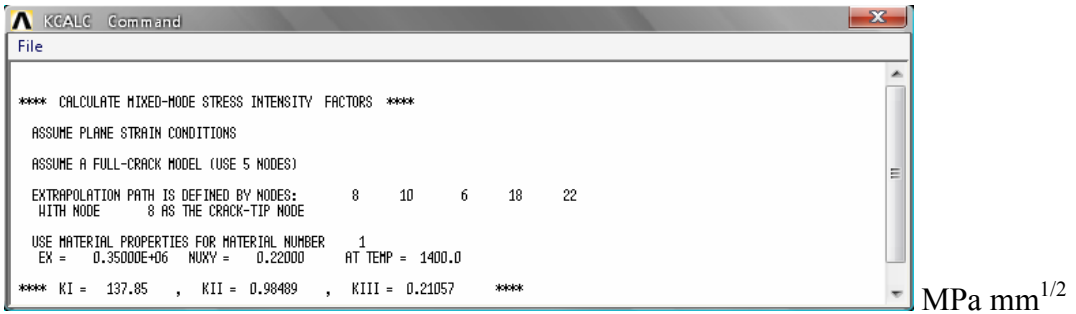


Şekil 7.25. Gerilme şiddet faktörü değerinin okunması



Şekil 7.26. 20 °C sıcaklık için kırılma tokluğu değeri

$K_I = 3,59 \text{ MPa m}^{1/2}$ $K_{II} = 0,026 \text{ MPa m}^{1/2}$ $K_{III} = 0,005 \text{ MPa m}^{1/2}$ bulunur.



Şekil 7.27. 1400 °C sıcaklık için kırılma tokluğu değeri

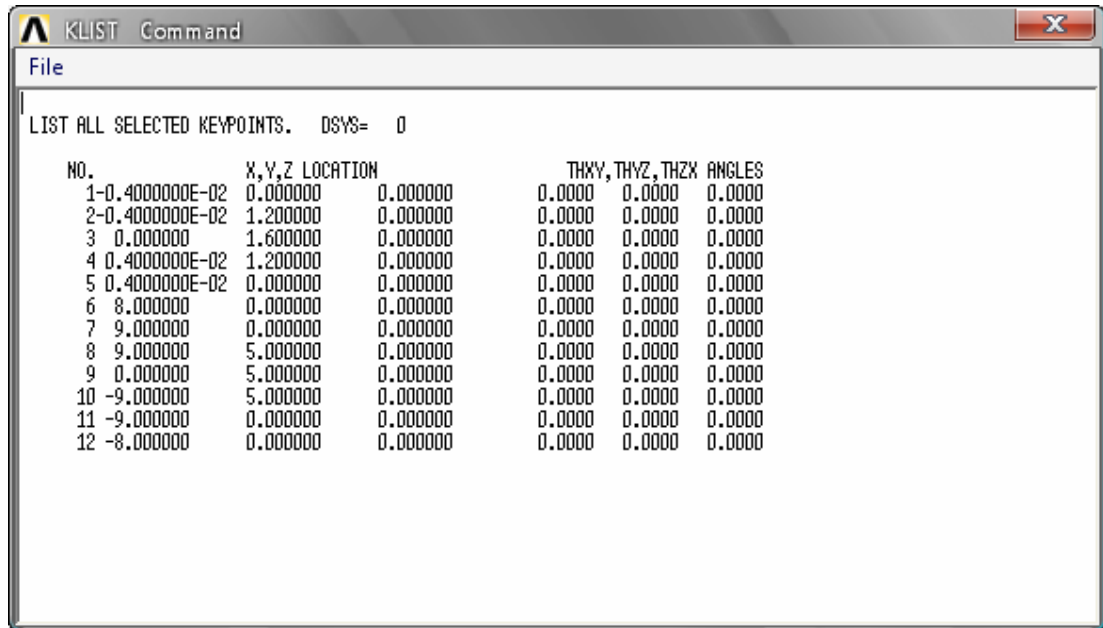
$K_I = 4,36 \text{ MPa m}^{1/2}$ $K_{II} = 0,031 \text{ MPa m}^{1/2}$ $K_{III} = 0,007 \text{ MPa m}^{1/2}$ bulunur.

7.2. Si₃N₄+30% SiC+3% MgO Seramik Malzemenin Analizi

Bu seramik malzemenin elastisite modülü 350 GPa ve poisson oranı 0,22 kabul edilmiştir. Model üzerindeki başlangıç çatlak uzunluğu değeri 1,6 mm'dir. Ayrıca çatlak ağzı açılma yükü oda sıcaklığında 56 N ve 1400 °C sıcaklıkta 58 N olarak makaleden okunmuştur (bkz. makale fig.4). Modelin boyutları 4×5×18 mm ve destekler arası 16 mm'dir. Modelin hazırlanma aşamaları bir önceki örnekte detaylı bir şekilde anlatıldı.

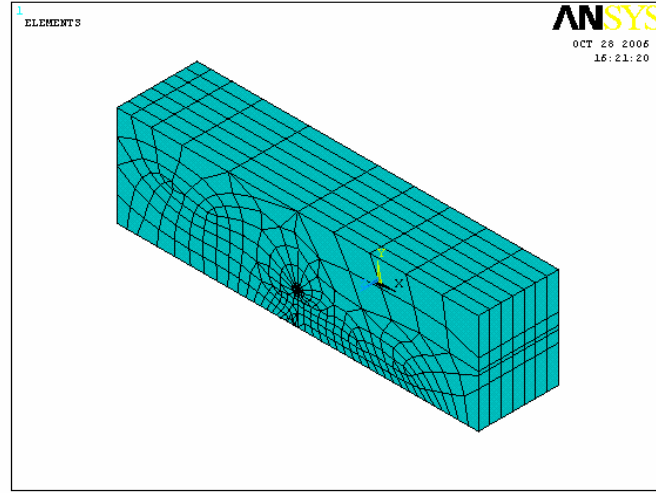
7.2.1. Anahtar Noktaların (Keypoints) Tanımlanması

Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Keypoints > In Active CS seçeneğinde açılan pencereye bütün noktaların koordinatları girilir. (şekil 7.28)



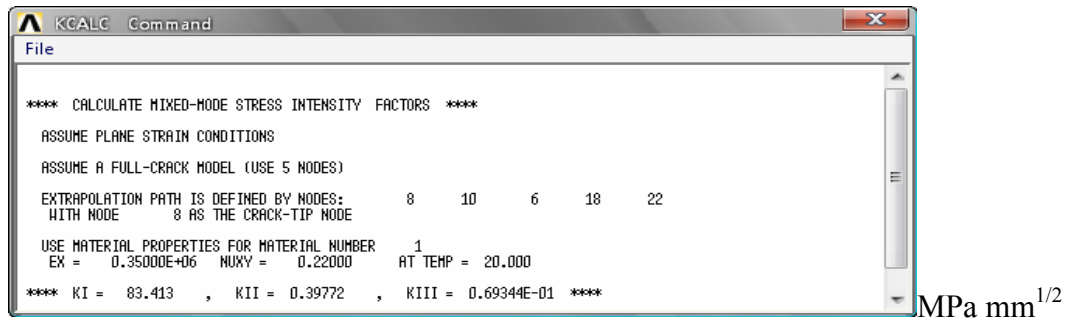
Şekil 7.28. Anahtar noktaların (keypoints) koordinatları

7.2.2. Üç Boyutlu Mesh Edilmiş Model



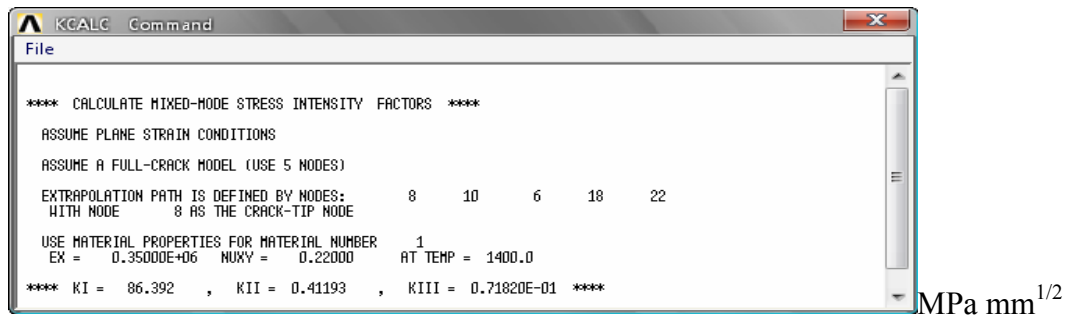
Şekil 7.29. Üç boyutlu mesh edilmiş model

7.2.3. Gerilme Şiddet Faktörü Değerinin Okunması



Şekil 7.30. 20 °C sıcaklık için kırılma tokluğu değeri

$K_I = 2,64 \text{ MPa m}^{1/2}$ $K_{II} = 0,013 \text{ MPa m}^{1/2}$ $K_{III} = 0,002 \text{ MPa m}^{1/2}$ bulunur.



Şekil 7.31. 1400 °C sıcaklık için kırılma tokluğu değeri

$K_I = 2,73 \text{ MPa m}^{1/2}$ $K_{II} = 0,013 \text{ MPa m}^{1/2}$ $K_{III} = 0,002 \text{ MPa m}^{1/2}$ bulunur.

BÖLÜM SEKİZ

SONUÇLAR VE YORUMLAR

Bu bölümde kırılma tokluğu değerleri, von mises gerilme değerleri ve bunların numune kalınlığına bağlı değişimleri verilmiştir. Tablo 8.1.'de iki farklı sıcaklıkta iki farklı seramik malzemeye ait ANSYS yazılımı ile belirlenen kırılma tokluğu değerleri verilmiş ve bu değerler deneysel metotla belirlenen değerlerle karşılaştırılmış, doğruluk oranları sonuçların hemen altında verilmiştir.

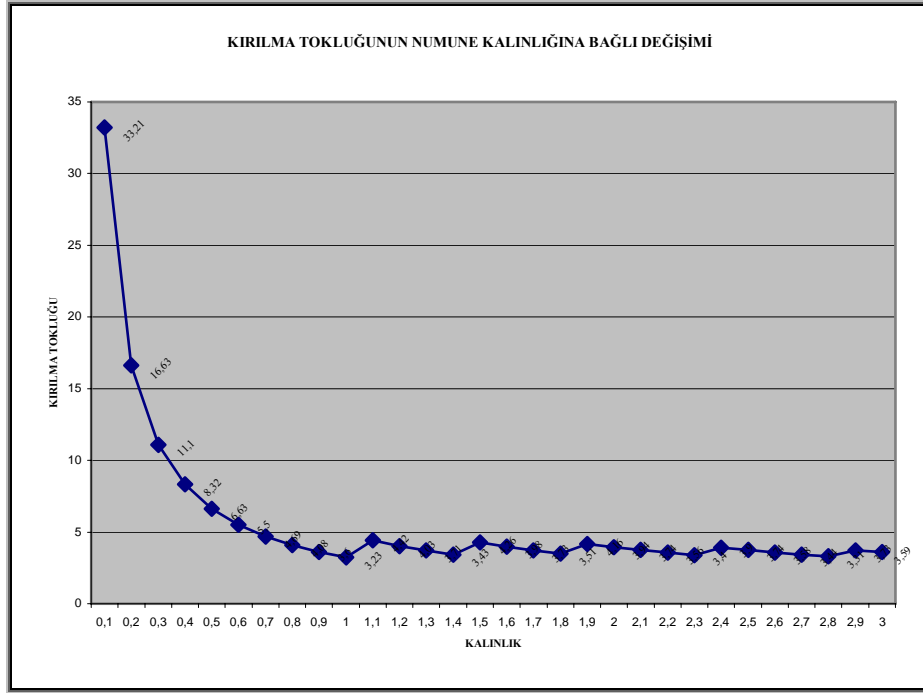
Tablo 8.1.'den elde edilen verilerle ANSYS yazılımının güvenilirliği ve kırılma mekaniği analizleri için uygunluğu açıkça görülmüştür. ANSYS yazılımı kullanılarak yapılan kırılma mekaniği analizlerinde, deneysel metotla oluşan zaman kaybı önlenmiş ve seramik malzemeler gibi çok sert malzemelere başlangıç çatlakları oluşturma gibi yorucu işlemlere gerek kalmamıştır.

8.1. Kırılma Tokluğu Sonuçları

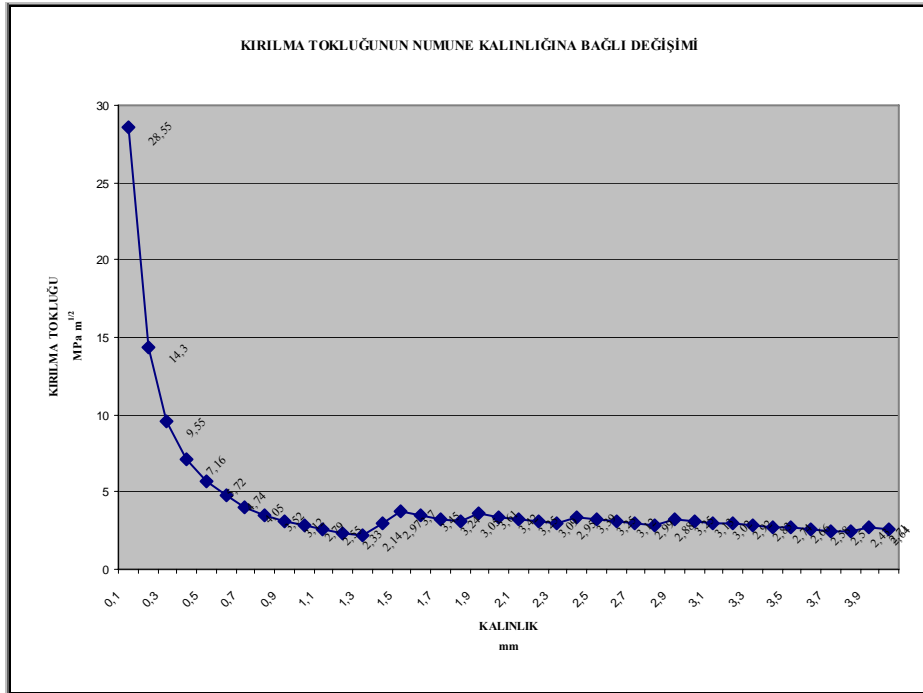
Tablo 8.1. Kırılma tokluğu sonuçları

MALZEME ADI	DENEY SICAKLIĞI	KIRILMA TOKLUĞU DEĞERLERİ MPa m ^{1/2}	
		DENEYSEL OLARAK BELİRLENEN	ANSYS İLE TEORİK HESAPLANAN (% Doğruluk)
SiC+50% ZrB ₂ +10% B ₄ C Seramik Kompozit Malzeme	20 °C sıcaklık	3,42 - 3,62	3,59 (% 99,16)
	1400 °C sıcaklık	3,60 - 3,80	4,36 (% 85,26)
Si ₃ N ₄ +30% SiC+3% MgO Seramik Kompozit Malzeme	20 °C sıcaklık	2,17 - 2,37	2,64 (% 88,61)
	1400 °C sıcaklık	2,58 - 2,78	2,73 (% 98,17)

8.2. Kırılma Tokluğunun Numune Kalınlığına Bağlı Değişimi

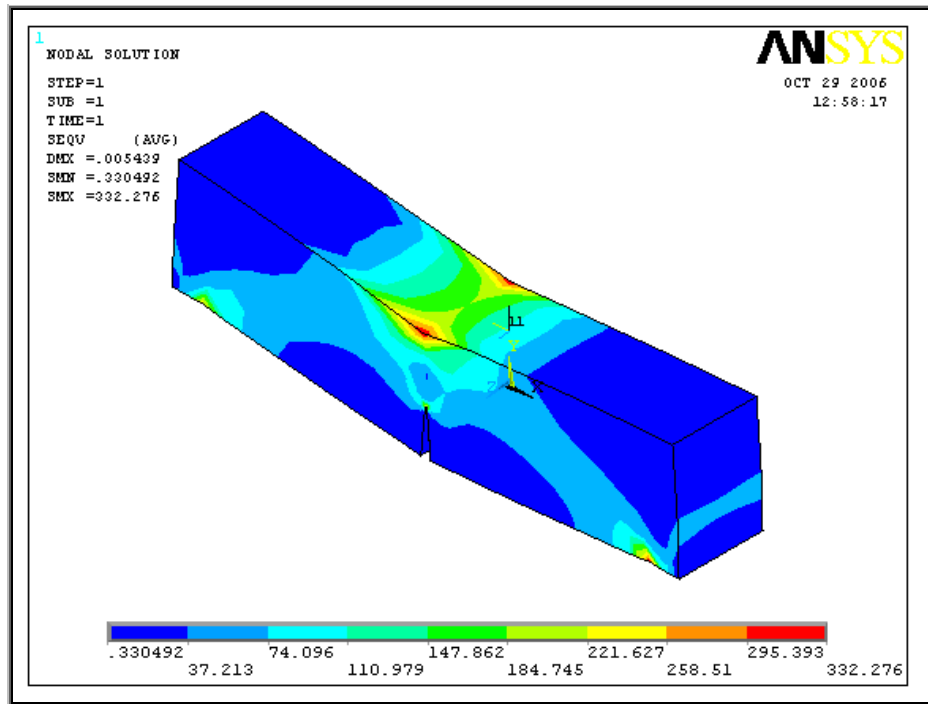


Şekil 8.2. SiC+50% ZrB₂+10% B₄C seramik malzemenin kırılma tokluğunun numune kalınlığına bağlı değişimi

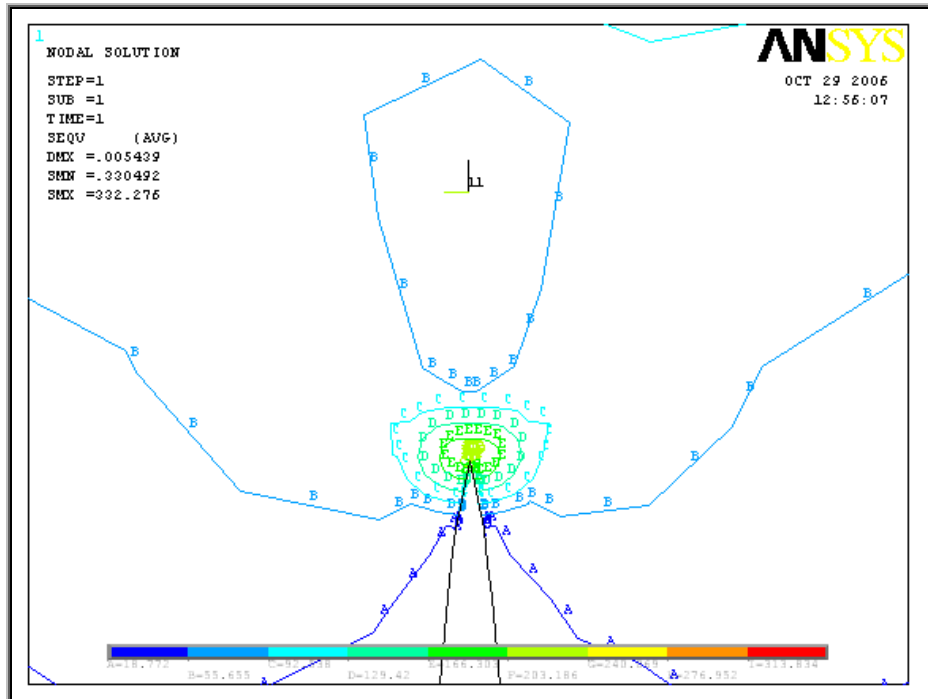


Şekil 8.3. Si₃N₄+30% SiC+3% MgO seramik malzemenin kırılma tokluğunun numune kalınlığına bağlı değişimi

8.3. Von Mises Gerilme Değerleri

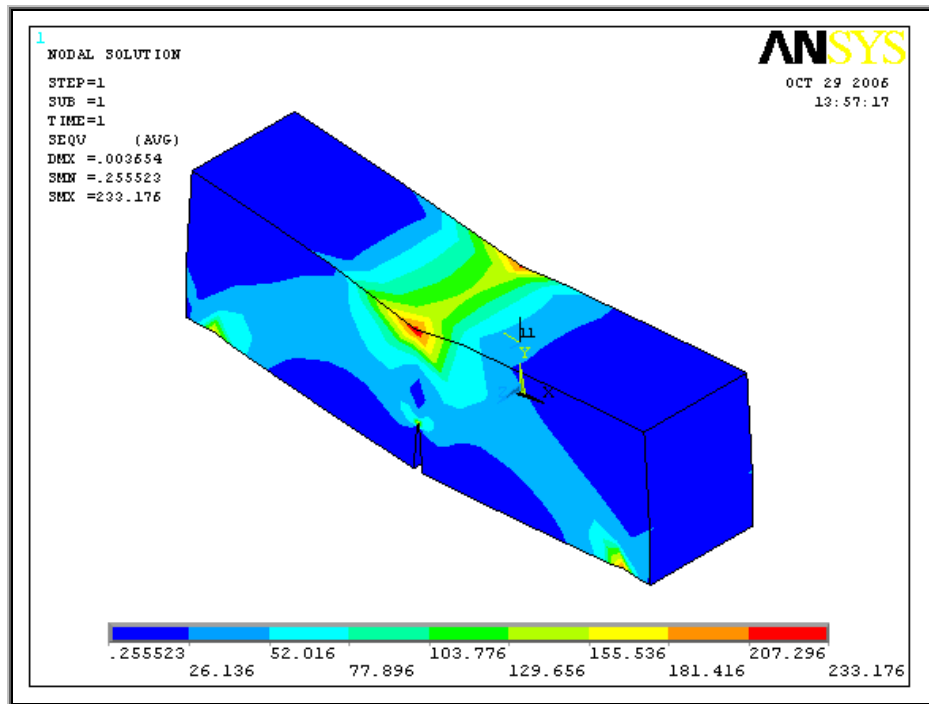


Şekil 8.4. SiC+50% ZrB₂+10% B₄C seramik malzemenin von mises gerilme değeri

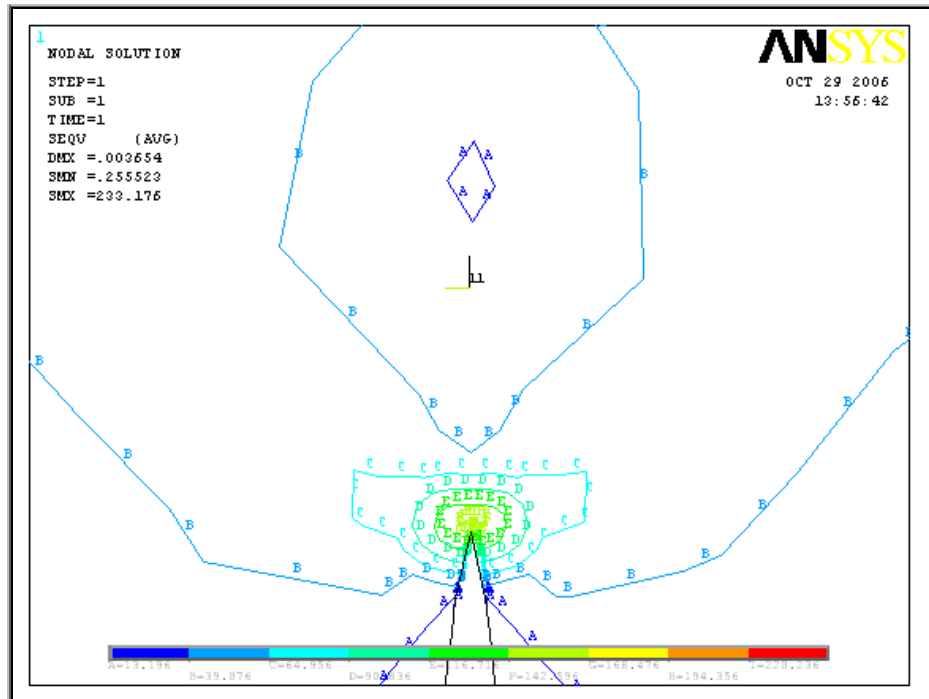


Şekil 8.5. SiC+50% ZrB₂+10% B₄C seramik malzemenin çatlak bölgesi

Von Mises Gerilme Değerleri;

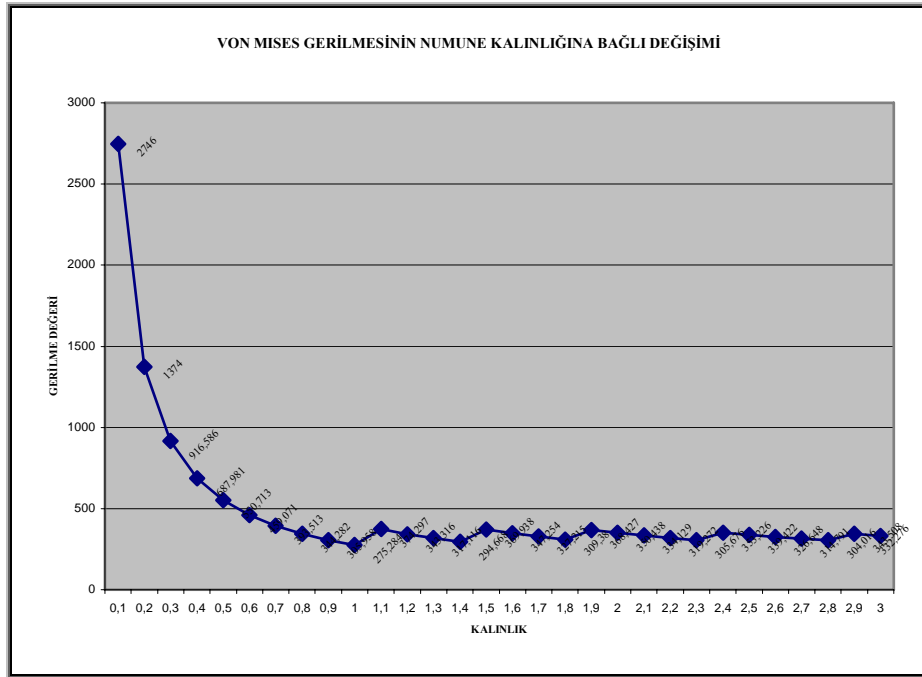


Şekil 8.6. $\text{Si}_3\text{N}_4+30\% \text{SiC}+3\% \text{MgO}$ seramik malzemenin von mises gerilme değeri

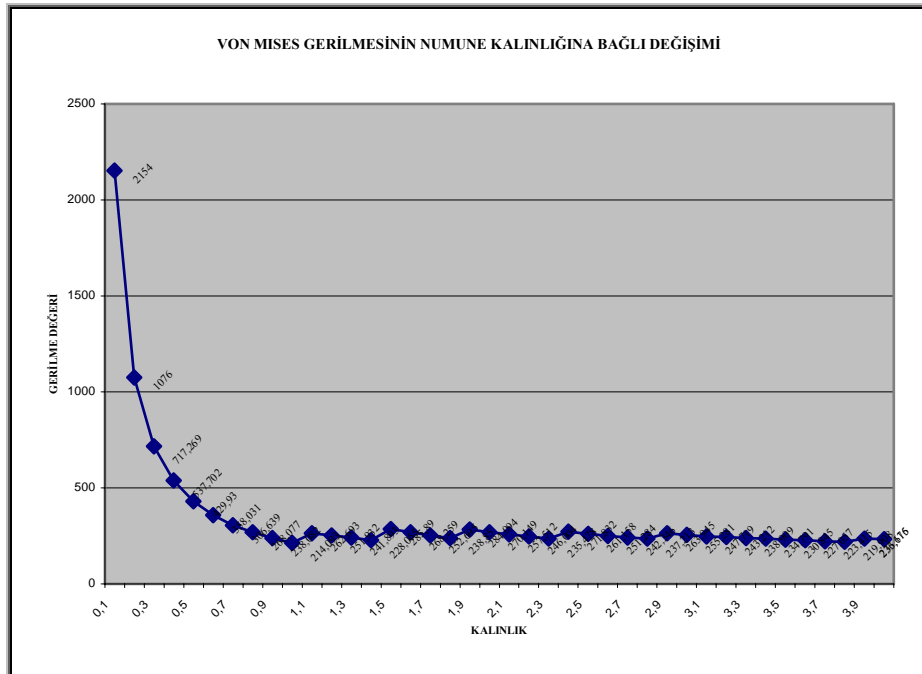


Şekil 8.7. $\text{Si}_3\text{N}_4+30\% \text{SiC}+3\% \text{MgO}$ seramik malzemenin çatlak bölgesi

8.4. Gerilme Değerinin Numune Kalınlığına Bağlı Değişimi



Şekil 8.8. SiC+50% ZrB₂+10% B₄C seramik malzemenin kırılma tokluğunun numune kalınlığına bağlı değişimi



Şekil 8.9. Si₃N₄+30% SiC+3% MgO seramik malzemenin kırılma tokluğunun numune kalınlığına bağlı değişimi

KAYNAKLAR

- Acar, B. (1997). *Finite element analysis of fracture mechanics problems*, Master Thesis, Ankara: The Graduate School of Natural and Applied Sciences of Middle East Technical University
- Aksoy, T. (1984). *Kırılma mekaniği*, İzmir: Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Basım Ünitesi
- Anderson, T.L. (1995). *Fracture mechanics* (2.Baskı), USA: CRC Press, Florida
- ASTM Standard E399-83 (1984). *Standard test method for plane strain fracture toughness of metallic materials*. Annual Book of ASTM Standards, 592-622, Philadelphia
- Çetinel, H. (2004). *Fracture behaviour of welded nodular cast iron*, Doctorate Thesis, İzmir: The Graduate School of Natural and Applied Sciences of Dokuz Eylül University
- Doruk, M., Avcı, A., Akdemir, A., Önal, G. (Ed.). (2003). *6. Uluslararası kırılma konferansı bildiriler kitabı*, Konya: Selçuk Üniversitesi
- Dowling, N.E. (1999). *Mechanical behaviour of materials* (2.Baskı), USA
- Gogotsi, G.A. (2002). *Fracture toughness of ceramics and ceramic composites*. Ceramics International, (Vol.29), 777-784
- Hattatoğlu, F. (2003). *Asfalt betonunun yorulma ömrünün üç boyutlu sonlu elemanlar yöntemi ile tahmin edilmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Erzurum: Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Keleştemur, M.H., Vardar, Ö., Doruk, M. (Ed.). (2001). *5. Uluslararası kırılma konferansı bildiriler kitabı*, Elazığ: Fırat Üniversitesi

Microsoft encarta reference library (2004). Redmond, USA

Moaveni, S. (1999). *Finite element analysis*, New Jersey: Prentice-Hall, Florida

Smith, W.F. (1993). *Foundations of materials science and engineering (2.Baskı)*, Singapore: Mc Graw-Hill

Tırupathi, R.C. ve Ashok, D.B. (2002). *Introduction to finite elements in engineering (3.Baskı)*, New Jersey: Prentice-Hall

Toparli, M. ve Aksoy, T. (1998). *Fracture toughness determination of composite resin and dentin / composite resin adhesive interfaces by laboratory testing and finite element models*. Dental Materials, (Vol.14), 287-293

Uğuz, A. (1996). *Kırılma mekaniğine giriş*, Bursa: Uludağ Üniversitesi Güçlendirme Vakfı, Yayın No: 118

Vardar, Ö. (1988). *Fracture mechanics*, İstanbul: Boğaziçi University Publication, Yayın No: 453