

**DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İNSAN DİŞİ KAPLAMASI UYGULAMALARININ**  
**KIRILMA MEKANİĞİ AÇISINDAN**  
**İNCELENMESİ**

**Abdullah Kazım ÖZCAN**

**Temmuz, 2008**

**İZMİR**

**İNSAN DİŞİ KAPLAMASI UYGULAMALARININ  
KIRILMA MEKANİĞİ AÇISINDAN  
İNCELENMESİ**

**Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü  
Yüksek Lisans Tezi  
Makina MühendisliĐi Bölümü, Mekanik Anabilim Dalı**

**Abdullah Kazım ÖZCAN**

**Temmuz, 2008**

**İZMİR**

## YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

**ABDULLAH KAZIM ÖZCAN**, tarafından **DOÇ. DR. MEHMET ZOR** yönetiminde hazırlanan “**İNSAN DİŞİ KAPLAMASI UYGULAMALARININ KIRILMA MEKANİĞİ AÇISINDAN İNCELENMESİ**” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

.....  
DOÇ. DR. MEHMET ZOR

Yönetici

.....  
Jüri Üyesi

.....  
Jüri Üyesi

Prof. Dr. Cahit HELVACI

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

## TEŞEKKÜR

Bu çalıőmanın ortaya çıkarılması ve yürütölmesi esnasında destek ve yardımları için Sayın Doç. Dr. MEHMET ZOR hocama teşekkür ederim.

Ayrıca Ege Üniversitesi Diş Hekimliği Fakóltesi doktora öğrencisi Sayın ENDER AKAN'a ve Dokuz Eylül Üniversitesi Makine Mühendisliđi Bölümü Mekanik Anabilim Dalı Araőtırma Görevlisi Sayın YUSUF ARMAN'a destek ve yardımları için teşekkür ederim.

Abdullah Kazım ÖZCAN

# İNSAN DIŞI KAPLAMASI UYGULAMALARININ KIRILMA MEKANIĞI AÇISINDAN İNCELENMESİ

## ÖZ

Günümüzde diş hekimliği alanında yaygın bir şekilde kullanılan diş kaplamaları alt destek ve üst estetik yapı olmak üzere iki farklı temel bileşenden meydana gelmektedir. Alt destek yapılar metal veya seramik malzemelerden üretilmesine rağmen, üst yapılar sadece seramiklerden meydana gelir. Üretim hataları dolayısıyla özellikle malzeme ara yüzeylerinde çatlaklar oluşabilmektedir. Oluşan çatlaklar tedavi sonrasında çiğneme kuvvetlerinin etkisi ile zamanla ilerlemekte ve diş kaplamasının kırılarak kullanılamaz hale gelmesine neden olmaktadır.

Bu çalışmada, diş kaplamalarında kullanılan alt yapı Ni-Cr alaşımı ile dental porselen arasındaki ara yüzeyde kritik J-integrali değeri ( $J_{IC}$ ) elde edilmiştir. Bunun için öncelikle Ni-Cr ve porselen ara yüzeyine sahip keskin çatlaklı numuneler üretilmiştir. Bu numuneler dört nokta eğme deneyine tabi tutularak kırılma kuvvetleri bulunmuştur. Üretilen numuneler sonlu elemanlar yazılımı ABAQUS programında modellenmiş, deneysel olarak bulunan kırılma kuvvetleri uygulanmış ve bu şekilde kritik J-integrali ( $J_{IC}$ ) değerleri hesaplatılmıştır.

**Anahtar Sözcükler:** Diş kaplamaları, kırılma mekaniği, J-integrali, ara yüzey çatlağı.

# INVESTIGATION OF HUMAN DENTAL CROWN APPLICATIONS IN TERMS OF FRACTURE MECHANICS

## ABSTRACT

At the present day, the dental crowns widely used in dentistry, consist of two different base components; subsupporting material and aesthetic veneering material. Although subsupporting materials are manufactured from metal or ceramic, veneers are only made from ceramics. Because of the problems in production stages, cracks can be formed in material interfaces. These cracks can propagate in time with mastication forces after treatment. And then fracture of the dental crown occurs, so the crown will become unusable.

In this study, the critical J-integral value ( $J_{IC}$ ) of subsupport Ni-Cr alloy and dental porcelain interface, which are used in dental crowns, has been obtained. For this purpose, firstly, specimens have been manufactured which have sharp cracks in Ni-Cr/porcelain interface. Fracture loads of the specimens have been acquired from four point bend tests. Specimens have been modeled in finite element analysis software ABAQUS, the experimentally determined fracture loads have been applied and critical J-integral ( $J_{IC}$ ) values have been calculated.

**Keywords:** Dental crowns, fracture mechanics, J-integral, interface crack.

## İÇİNDEKİLER

### Sayfa

TEZ SONUÇ FORMU .....	ii
TEŞEKKÜR .....	iii
ÖZ .....	iv
ABSTRACT .....	v
<b>BÖLÜM BİR – GİRİŞ .....</b>	<b>1</b>
1.1 Giriş .....	1
<b>BÖLÜM İKİ – DIŞ HEKİMLİĞİNDE KAPLAMALAR ve ÜRETİM YÖNTEMLERİ .....</b>	<b>5</b>
2.1 Diş Kaplamaları .....	5
2.2 Diş Kaplamalarının Tasarımı .....	8
2.3 Diş Kaplamalarında Kullanılan Malzemeler .....	8
2.3.1 Alçılar .....	9
2.3.2 Kaplama Malzemeleri .....	9
2.4 Diş Kaplamalarının Üretimi .....	10
2.4.1 Kalıbın Yapımı .....	10
2.4.2 Üretim ve Yerleştirme .....	11
2.5 Metal-Seramik ve Tüm Seramik Diş Kaplaması Uygulamaları .....	11
2.5.1 Metal Destekli Seramik Kaplamaların Dezavantajları .....	13
2.5.2 Tüm Seramik Kaplamaların Avantajları .....	13
<b>BÖLÜM ÜÇ – DENTAL SERAMİKLERİN DAYANIKLILIĞI, GÜÇLENDİRİLMESİ VE ÇATLAK OLUŞUM SEBEPLERİ.....</b>	<b>15</b>

3.1 Dental Seramiklerin Dayanıklılığı .....	15
3.2 Seramiklerde Üretim Sırasında Oluşan Çatlaklar .....	15
3.3 Dental Seramiklerin Dayanıklılıklarının Arttırılması .....	17
3.3.1 Kimyasal Güçlendirme (İyon Değişimi) .....	17
3.3.2 Termal Güçlendirme (Isıl İşlem Uygulaması) .....	18
3.3.3 Dağılmayla Güçlendirme (Dental Seramiklere Kristal Eklenmesi).....	19
3.3.4 Alt Yapı ile Güçlendirme.....	20
3.3.4.1 Seramiğin Metal Alt Yapı ile Desteklenmesi .....	20
3.3.4.2 Seramiğin Folyo ile Desteklenmesi .....	21
<b>BÖLÜM DÖRT – KIRILMA MEKANIĞI .....</b>	<b>24</b>
4.1 Giriş .....	24
4.2 Kırılma Türleri .....	25
4.3 Lineer Elastik Kırılma Mekaniği .....	30
4.3.1 Gerilme Şiddeti Yaklaşımı .....	30
4.3.2 Enerji Dengesi Yaklaşımı .....	36
4.3.3 Gerilme Şiddeti Faktörü (K) ve Enerji Yayınım Hızı (G) Arasındaki İlişki.....	39
4.4 Elastik Plastik Kırılma Mekaniği .....	40
4.4.1 J-integrali .....	41
4.5 Kırılma Tokluğu Deneyleri .....	45
4.6 Kırılma Tokluğuna Sıcaklığın Etkisi .....	47
<b>BÖLÜM BEŞ – SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ .....</b>	<b>50</b>
5.1 Giriş .....	50
5.2 Gerilmelerin Hesaplanması .....	52
5.3 Sıcaklık Etkisi .....	53
5.4 J-integralinin Sonlu Elemanlar Yöntemi Kullanılarak Hesaplanması.....	53



<b>BÖLÜM ALTI – ARA YÜZEY KRİTİK J-İNTEGRALI (<math>J_{IC}</math>) TAYİNİ .....</b>	<b>56</b>
6.1 Yöntemin Genel Hatları .....	56
6.2 Çalışmada Karşılaşılan Engeller .....	57
6.3 Deneysel Çalışma .....	58
6.3.1 Dört Nokta Eğme Deneyi İçin Numune Üretimi .....	58
6.3.1.1 Ni-Cr Blokların Hazırlanması .....	58
6.3.1.2 Kalıp Hazırlanması .....	59
6.3.1.3 Fırınlama Öncesi Numune Hazırlanması .....	60
6.3.1.4 Pişirme İşlemi ve Deney Numunelerinin Elde Edilmesi .....	60
6.3.2 Dört Nokta Eğme Deneyi .....	63
6.4 Sonlu Elemanlar Analizi ile $J_{IC}$ Hesabı .....	67
<b>BÖLÜM YEDİ – SONUÇLAR VE YORUMLAR .....</b>	<b>70</b>
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>73</b>

# BÖLÜM BİR

## GİRİŞ

### 1.1 Giriş

Günümüzde diş hekimliği alanında yaygın bir şekilde kullanılan kuron (kaplama) ve köprü protezleri, alt destek ve üst estetik yapı olmak üzere iki farklı temel bileşenden meydana gelmektedir. Tedavi edilecek dişin boyutlarına uygun şekilde metal veya seramik malzemedan üretilen alt destek yapının üzerine diş formuna uygun şekilde hamur kıvamındaki porselen malzeme işlenmektedir. Daha sonra birlikte özel fırınlarda yüksek sıcaklıklarda pişirilmek suretiyle porselenin katılaşması ve her iki yapının belirli bir seviyede birbirlerine tutunması sağlanmaktadır. Maksimum sıcaklıkta iken fırının kapağı belli bir süre sonra otomatik olarak açılmakta ve protez oda ortamı ile temasa geçerek soğumaktadır.

Ortamla arasındaki yüksek sıcaklık farkından dolayı kaplama başlangıçta çok hızlı bir şekilde soğumakta, alt ve üst destek yapının farklı mekanik ve termal davranışları sebebiyle üzerinde ısıl gerilmeler ortaya çıkmaktadır. Bazı durumlarda bu ısıl gerilmelerin kaplamanın dış yüzeylerinde bile gözle görülebilen çatlaklara sebep olduğu tespit edilmiştir. Gerilme yığılmalarının daha yüksek şiddette olduğu ara yüzeylerde bu tip çatlakların oluşması daha da muhtemeldir. Ayrıca oda sıcaklığına ulaşmış kaplama üzerinde belli bir seviyede artık gerilmelerin kalması da kaçınılmazdır.

Hasta ağzına uygulanan kaplama ve köprüler gerek çiğneme kuvvetleri gerekse ağza alınan sıcak veya soğuk yiyecekler nedeniyle önemli ölçüde mekanik ve termal yorulmalara maruz kalmakta ve restorasyonun hazırlanışı sırasında oluşan mikroçatlaklar yorulma yükleri etkisiyle zamanla büyüyerek kırılmalara sebep olmaktadır. Günümüzde sıkça karşılaşılan bu durum hasta sağlığını doğrudan etkilemekte ve buna ilaveten tedavi ve malzeme maliyetleri açısından ortaya çıkan önemli kayıplar da düşünüldüğünde, bu problemin giderilmesi veya en az seviyelere çekilmesi gerekliliği ortaya çıkmaktadır.

Bu tip problemlere kırılma mekaniği yaklaşımıyla çözümler geliştirebilmek için alt destek ve üst estetik yapı (porselen) arasındaki ara yüzeyde kritik J-integrali değerlerinin bilinmesi son derece önemlidir. Kırılma parametrelerinin bilinmesi sayesinde üretilen diş kaplaması üzerine, kullanım sırasında çatlak açılmalarına ve dolayısıyla hasara sebep olabilecek maksimum çiğneme kuvvetleri hesaplanabilir. Ayrıca alt ve üst destek malzemelerinin ara yüzey kırılma enerjisi değeri daha yüksek malzeme çifti kombinasyonları belirlenebilir.

Uygulamalarda birlikte kullanılan farklı malzeme çiftleri için malzeme ara yüzeylerinde, kırılma anındaki J-integralinin ( $J_{IC}$ ) hesaplandığı birçok çalışma mevcuttur.

Jiang, Zhao ve Sun (2003), iki farklı metal (LY12 (alüminyum alaşımı 2024)-saf alüminyum ve LY12-20G (basıncılı kap çeliği)) ara yüzeyleri için j-direnç eğrilerini elde etmişlerdir. Bunun için ürettikleri çatlaklı numuneleri üç nokta eğme deneyine tabi tutmuşlar ve yük-uygulama noktası yer değişimi eğrilerini ve karşılık gelen çatlak uzunluğunu ölçmüşlerdir. Elde edilen bu verilerle  $J_{IC}$  değerlerini hesaplamışlardır.

Hirakata, Kitamura ve Kusano (2005) geliştirdikleri yöntemle, ince bakır film ve silikon ara yüzeyinde keskin çatlak oluşturmuşlar ve ürettikleri çatlaklı numuneyi paslanmaz çelik konsol üzerine yapıştırarak elektro-manyetik aktüatöre sahip bir test cihazıyla yük uygulamışlardır. Yükleme noktasının yer değişimi sürekli ölçülmüştür. Elde edilen değerler ABAQUS programında oluşturulan numuneye uygulanarak ara yüzey için kritik J-integrali değeri ( $J_C$ ) hesaplanmıştır.

Kohnle, Mintchev, Brunner ve Schmauder (2000) yaptıkları çalışmada metal-seramik (niobyum-alumina) ara yüzeyinde kırılma anındaki enerji yayılım hızını ( $G_C$ ) elde etmişlerdir. Malzemelerin birbirine yapışması için numuneler 1400°C'de 14 MPa basınçta 3 saat pişirilmiştir. Isınma hızı dakikada 7.8 K, soğuma hızı ise dakikada 11.8 K olarak uygulanmıştır. Bu malzeme çiftinin avantajı yaklaşık aynı ısıl genişleme katsayısına sahip olmaları nedeniyle artık gerilmelerin ortaya

çıkarmasıdır. Ürettikleri numunelere dört nokta eğme deneyi uygulamışlar ve yük-şekil değişimi verilerini elde etmişlerdir. ABAQUS programında, oluşturdukları modele dört nokta eğme deneyinin yük ve test cihazı üst kısım ilerleme verilerini aktararak enerji yayılım hızı değerini hesaplamışlardır.

Korn, Elssner, Cannon ve Rühle (2002) tek kristalli metal-seramik (Nb ve  $Al_2O_3$  kristalleri) ara yüzeyinde  $G_C$  ve  $J_C$  değerlerini hesaplamışlardır. Üretilen numunelere dört nokta eğme deneyi uygulanmış ve kırılma yükleri ve yük noktalarının yer değişimleri kaydedilmiştir. Kullanılan çeşitli formüllerle  $G_C$  ve  $J_C$  değerleri hesaplanmıştır. Bu çalışmada sonlu elemanlar yöntemi kullanılmamıştır.

Kim (2002) yaptığı çalışmada ara yüzey çatlaklı numunelerin dört nokta eğme deneylerinde J-integrali tahmini için denklemler geliştirmiştir. Bu denklemlerin kullanım sınırlamaları bulunmaktadır.

Pidaparti, Boehmer ve Beatty (1993) yaptıkları çalışmada üç dental kompozit malzemeyi üç nokta eğme deneyine tabi tutarak gerilme şiddet faktörü yaklaşımına göre kırılma tokluğu değerlerini bulmuşlardır. Sonlu elemanlar yöntemiyle de kritik J-integrali değerlerini bulmuşlardır.

De Grot, Van Elst ve Peters (1990) yaptıkları çalışmada diş minesine yapışmış kompozit reçineden yapılmış numunelerde  $J_{IC}$  değerlerini bulmuşlardır. Numunedeki çatlak elmas bir diskle oluşturulmuştur ve çatlak iki malzemeden de geçmektedir. Yani bir ara yüzey çatlağı değildir. Numunelere üç nokta eğme deneyi uygulanmış yük-şekil değişimi eğrileri elde edilmiştir. Kullanılan formüllerle  $K_{IC}$  ve  $J_{IC}$  değerleri hesaplanmıştır. De Grot, Van Elst ve Peters (1988) kompozit diş dolgu malzemelerinde yaptıkları benzer bir diğer çalışmada  $K_{IC}$  ve  $J_{IC}$  değerlerini formüllerin yanı sıra sonlu elemanlar yöntemiyle de hesaplamışlardır.

Zor, Küçük ve Aksoy (2002) yaptıkları çalışmayla kemik çimentosu-kemik ve kemik çimentosu-implant ara yüzeylerinin kritik J-integrali değerlerini bulmuşlardır. Bunun için farklı çatlak boylarında ara yüzey çatlağına sahip numuneler üretilip,

çekme deneyleriyle buldukları kırılma kuvvetlerini ANSYS programında oluşturulan numune modellerine uygulayarak  $J_{IC}$  değerlerini hesaplamışlardır.

Toparlı ve Aksoy (1998) yaptıkları çalışmada iki farklı diş kemiği-kompozit reçine ara yüzeyinin kritik J-integrali ( $J_{IC}$ ) değerlerini belirlemişlerdir. Bunun için öncelikle çatlaklı numuneler üreterek bunları üç nokta eğme deneyine tabi tutmuş ve kırılma kuvvetlerini bulmuşlardır. Numuneler beş farklı çatlak boyunda üretilmiştir. Daha sonra Fortran tabanlı sonlu elemanlar yazılımında gerekli modellemeler yapılarak bulunan kuvvetler uygulanmış ve kritik J-integrali değerleri ( $J_{IC}$ ) hesaplatılmıştır.

Literatürde diş kaplamalarında kullanılan metal-seramik malzeme ara yüzeylerinin kritik J-integrali ( $J_{IC}$ ) değerlerinin elde edildiği bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu çalışmada, bu konu ele alınmış ve Ni-Cr alaşımı ile seramik yapıştırıcı (opak) ara yüzeylerinin kırılma anındaki J-integrali ( $J_{IC}$ ) değeri deneysel ve sonlu eleman çalışmalarının birlikte kullanılmasıyla elde edilmiştir.

## **BÖLÜM İKİ**

### **DIŞ HEKİMLİĞİNDE KAPLAMALAR ve ÜRETİM YÖNTEMLERİ**

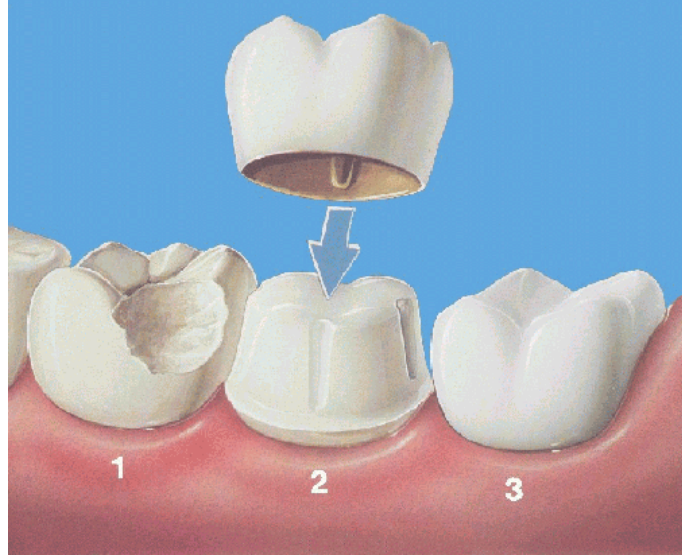
#### **2.1 Diş Kaplamaları**

Diş kaplamaları (kuronlar), üzerine geldiği diş parçasını tamamen kaplayıp o bölgeye yapışan ve diş görünümü taşıyan diş onarımlarıdır. Diş kaplamaları hasarlı dişin şeklini, boyutunu ve dayanımını geri kazandırır ve görünümünü iyileştirir. Bir diş kaplaması dişin görünen kısmının tamamını kapladığı için dişin yeni dış yüzeyini oluşturur.

Bir diş kaplaması şu amaçlarla yapılabilir;

- Zayıf bir dişi (örneğin çürüme nedeniyle) kırılmaktan korumak veya kırılmış bir dişin parçalarını bir arada tutmak.
- Kırılmış veya ciddi şekilde yıpranmış bir dişi eski haline getirmek.
- Geriye çok fazla diş kalmadığı durumlarda büyük bir dolgu ile dişi kaplamak ve desteklemek.
- Şekli veya rengi bozulan dişleri kaplamak.
- Dental bir implantı kaplamak.
- Dental bir köprüyü tutturmak.

Şekil 2.1’de bir diş kaplamasının uygulama aşamaları görülmektedir. Birinci şekil büyük bir boşluğa sahip veya bir kısmı kırılmış bir dişi temsil etmektedir. Bu diş çürümelere ve kırılmalara karşı zayıf durumdadır. İkinci şekilde, diş kaplama için hazır hale getirilmiştir. Diş hazırlanırken, kaplamanın yerinde durması için gereken dayanıklılık ve kaplamayı tutma özellikleri dikkate alınır. Bu özellikler her dişte farklıdır ve dişteki hasara göre belirlenir. Üçüncü şekilde ise dişin özelliklerine uygun olarak üretilen kaplama dişe yapıştırılmıştır. Diş kaplamasının rengi dişe uygun olarak belirlenmektedir.



Şekil 2.1 Bir diş kaplamasının uygulanma aşamaları.

Kaplamalar porselenden (bazı dental seramik çeşitlerinden), metalden veya ikisinin birleşiminden yapılabilir.

Diş kaplamalarında kullanılan metal alaşımları, kıymetli (örn: altın alaşımı), yarı kıymetli (örneğin paladyum alaşımı) veya kıymetsiz (örneğin nikel veya kobalt alaşımları) diye üçe ayrılmaktadır. Sadece metal diş kaplamalarında diğer kaplama türlerine göre daha az diş yapısı çıkartılır. Metal kaplamalar ısırma ve çiğneme kuvvetlerine iyi dayanır ve nadiren kırılırlar. Metal rengi estetik açıdan en büyük dezavantajlarıdır (şekil 2.2).



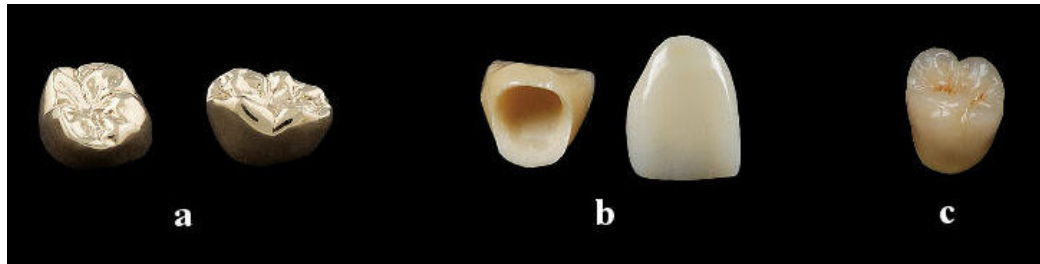
Şekil 2.2 Dört parçadan oluşan metal (paladyum) diş kaplamaları (Rushforth, 2004).

Porselenle kaplanmış metal diş kaplamaları, metal kaplamaların aksine komşu dişlerle renk uyumu içinde olabilmektedir (şekil 2.3). Fakat bu kaplamaların porselen kısmı kırılabilir veya kopabilir. Tüm seramik kaplamalar gibi porselenle kaplanmış metal kaplamalar da normal diş gibi görünürler. Ancak bazen kaplama porseleninin altındaki metal, özellikle dişeti çizgisinde, koyu bir çizgi olarak görülebilir.



Şekil 2.3 Porselenle kaplanmış metal diş kaplaması.

Tüm seramik veya porselen diş kaplamaları (şekil 2.4 b) diğer diş kaplamalarına göre en iyi doğal renk uyumunu sağlarlar ve metal alerjisi olan insanlar için daha uygundur. Fakat porselenle kaplanmış metal kaplamalar kadar sağlam değildirler.



Şekil 2.4 Diş kaplaması çeşitleri, a) tüm altın diş kaplaması, b) tüm porselen diş kaplaması, c) metal-seramik diş kaplaması.

Kuronlar (diş kaplamaları) dişin görünen kısmını kapladıkları için, porselen yüzeye sahip kuronlar dişlerin estetik görünüşünü güzelleştirmek amacıyla kullanılabilir. Fakat kuronlardan, dişlerin görünümünü güzelleştirmenin yanı sıra



dişlerin şeklini düzeltmek veya dişleri güçlendirmek gibi amaçlarla en iyi şekilde yararlanılmaktadır.

## **2.2 Diş Kaplamalarının Tasarımı**

Günümüzde modern teknoloji sayesinde yapay plastik reçinelerden, seramik kompozitlerden ve hafif metal alaşımlarından yüksek kalitede diş kaplamaları üretilmektedir. Diş kaplamalarının tasarımında dikkat edilmesi gereken birkaç ana etmen vardır. Birinci olarak, kaplamanın yapılacağı uygun hammaddeler belirlenmelidir. Bu malzemeler ağız boşluğunda kullanım için yani ağız dokularıyla ve sıvılarıyla uzun süreli temas için uygun olmalıdırlar. Kaplama bileşenleri güvenli olmalı ve alerjenik ve kanserojen olmamalıdırlar. Güvenlik özelliklerinin yanında bu malzemeler ağızda bulunan yüksek nem ve mekanik basınç koşullarına karşı dayanıklı olmalıdırlar. Özellikle sulu ortamda büzülme ve çatlamaya karşı dirençli olmalıdırlar. Metaller dayanıklılıkları için tercih edilirler fakat akrilik reçineler ve porselenler daha doğal bir görünüme sahiptirler. Bu nedenle kaplama malzemesinin seçimi kısmen kaplanacak dişin yerine bağlıdır. Akrilik ve porselen daha yüksek görünürlüğe sahip ön dişler için tercih edilir. Altın ve metal kaplamalar çoğu kez çiğneme için dayanıklılığın ve sağlamlığın gerektiği fakat görünümün daha az önemli olduğu arka dişler için kullanılırlar.

Bir kaplama tasarlanırken göz önünde tutulan ikinci etmen hastanın ağız şeklidir. Diş kaplamaları, kişinin rahatsızlık hissetmemesi için, özgün ağız yüzeyinin ısırma özellikleri taklit ederek tasarlanmalıdır. Her bireyin ağız yapısı farklı olması nedeniyle, her kaplamanın tam olarak uyması için özel olarak tasarlanması gerekir. Başarılı bir kaplama tasarımı, ağız boşluğunun hassas bir kalıbının hazırlanmasını gerektirir.

## **2.3 Diş Kaplamalarında Kullanılan Malzemeler**

Kaplama yapımında kullanılan dört ana malzeme türü vardır. Bunlar; kalıbı üretmek için kullanılan alçılar, kaplamanın yapıldığı malzeme (örneğin metal,

seramik, plastik), kaplamayı yerine yapıştırmak için kullanılan yapıştırıcılar ve kaplamayı kaplamak için kullanılan ve daha estetik görünüm sağlayan kaplamalar.

### **2.3.1 Alçılar**

Alçı kalıplar su ve alçıtaşı tozunun bir karışımından yapılırlar. Alçıların uygulamalara göre farklı çeşitleri kullanılır. Baskı alçısı dişlerin şeklini kaydetmek için kullanılır, model alçısı ağız boşluğunun dayanıklı modelini yapmak için kullanılır ve kuşatma alçısı, metallerin, seramiklerin ve plastiklerin şekillendirildiği kalıpları üretmek için kullanılır. Balmumu da bazen bu amaçla kullanılabilir.

### **2.3.2 Kaplama Malzemeleri**

Metaller sertlik, dayanıklılık, uzun ömürlülük ve korozyon direnci özellikleri nedeniyle kaplama yapımında sıklıkla kullanılırlar. Kaplamalarda yaygın olarak kullanılan alaşımlar temel olarak cıvanın gümüş, krom, titanyum ve altın ile olan karışımlarından oluşur. Bu karışımlar kolayca kalıba dökülüp şekillendirilebilirler ve birkaç dakika içinde katılaşır.

Seramikler doku uyumluluğu, dayanıklılık ve uzun ömürlülükleri nedeniyle kaplamalarda kullanım için oldukça uygundur. Ayrıca gerçek dişlerin görünümünü oldukça yakın bir şekilde taklit etmeyi sağlarlar. Fakat seramiklerin çekme gerilmesinin düşük olması onları, özellikle suyun varlığında, gerilme çatlamasına hassas hale getirir. Bu nedenle seramikler çoğu kez metal yapılı kaplamaları kaplamada kullanılırlar. Kaplamalarda kullanılan iki temel seramik çeşidi potasyum feldispat ve cam-seramikten yapılır.

Günümüzde akrilik polimer reçineler çoğunlukla protezlerde ve kaplamalarda kullanılmaktadır. Polimetil metakrilat en sıklıkla kullanılan çeşididir.

Özel dental yapıştırıcı veya dental macunlar kaplamayı yerinde tutmak için kullanılırlar. Bunlar su içeren veya içermeyen olarak sınıflandırılabilirler. Ayrıca kaplamalar daha doğal görünmesi için porselenle veya reçineyle kaplanabilmektedir.

## **2.4 Diş Kaplamalarının Üretimi**

### **2.4.1 Kalıbın Yapımı**

Kalıbın yapımına başlanmadan önce kaplamanın geleceği alanın hazırlanması gerekir. Bu durum dişin dört tarafından ve ısırma kenarından 2-3 mm'lik diş yapısının kaldırılmasını gerektirebilir. Sonra şeklini kaydetmek için dişin baskısı alınır. Bu adımda en yumuşak olan ve en hızlı sertleşen dental alçı çeşidi olan baskı alçısı kullanılır. Baskı alçısı sıvı hale gelene kadar az miktarda suyla karıştırılır. Bu bulamaç dişin üzerine oturan bir tabla üzerine yerleştirilir. Alçı sertleşene kadar bu tabla yerinde tutulur. Tabla ağızdan çıkarıldığında kaplaması yapılacak dişin üç boyutlu baskısı elde edilmiş olur. Bu baskı dişin negatif veya ters bir kopyasıdır.

Bir sonraki adım model alçısını hazırlamaktır. Bu tip alçı baskı alçısından daha serttir. Alçı yine uygun miktarda suyla karıştırılır ve oluşan bulamaç baskı kalıbının üzerine dökülür. Bu yolla dişin pozitif bir modeli yapılır. Negatif baskıdan yapılan bu pozitif model döküm olarak adlandırılır. Bu döküm diş hekimi tarafından çalışma amacıyla kullanılmaktadır.

Yapılan baskı yüksek sıcaklıklara dayanabilen bir kalıp yapımında kullanılır. Kalıbın yüksek sıcaklıklara dayanabilmesi önemli bir noktadır çünkü bazı metal ve seramikler döküm için 1300°C'den yüksek sıcaklıklara ihtiyaç duyarlar. Bu kalıplar silika ve diğer ajanlarla karışmış kalsiyum fosfattan yapılır.

### 2.4.2 Üretim ve Yerleştirme

Kaplamanın üretimi kalıbın uygun malzemeyle doldurulmasıyla yapılır. Malzeme eğer metalse bu işlem metalin erimiş olduğu yüksek sıcaklıklarda yapılır. Seramik ve plastikler için, karışım başlangıçta sıvıdır fakat malzemelerin sertleşmesi ve pişmesi için ısı ilavesi gerekebilir. Dökümün kalıbı sıkıca doldurmasına yardımcı olması için dikey bir mengene kullanılabilir. Kaplamanın sertleştikten sonra kalıptan kolayca çıkabilmesi için kalıba daha önceden serbest bırakıcı bir madde uygulanması gerekmektedir. Bazı akrilik reçinelerin tamamen sertleşmesi için sekiz saate kadar ısıtılması gerekmektedir. İşlemler tamamlandıktan ve kalıp soğuduktan sonra kalıp bölünür ve kaplama çıkarılır.

Kaplama başarılı bir şekilde tamamlandıktan sonra yerleştirme işlemi yapılabilir. Yüzeyinin içine yapıştırıcı uygulanan kaplama diş üzerine takılır. İşlem sayısındaki fazlalık nedeniyle kaplamanın oturmasında küçük uyuşmazlıklar olabilir ve doğru bir şekilde oturması için kaplama yüzeyinde küçük bilemeler ve düzeltmeler gerekebilir.

Kaplama, görünüşünü iyileştirmek için son bir yüzey kaplaması gerektirebilir. Bu tür kaplamalar genellikle akrilik polimerlerdir. Polimer ince bir film şeklinde uygulanmaktadır.

Kaplamanın uygun bir şekilde oturması ve hissedilmesini sağlamak için döküm işlemi tamamlandıktan sonra kaplamaya küçük detaylar elle eklenebilmektedir.

## 2.5 Metal-Seramik ve Tüm Seramik Diş Kaplaması Uygulamaları

Metal-seramik uygulaması (porselenle kaplanmış metal diş kaplaması) diş hekimliğinde günümüzde hala sıklıkla tercih edilen tedavi seçeneğidir. Ancak metal-seramik uygulamalarında farklı özelliklere sahip iki malzeme bir arada kullanıldığından birbirleriyle uyumlu olmaları gerekmektedir. Kullanılan metal alaşımı ile seramik malzemesi arasında mekanik, kimyasal, ısıl ve estetik özellikler açısından denge kurulabilmesi gerekmektedir. İki malzemenin ısıl genleşme

katsayılarının uyumu, doğal dişlerin şekil, renk, yarı saydamlık ve ışık saçma özelliklerinin kaplamaya kazandırılabilmesi ve ağızda fonksiyon esnasında oluşan gerilmelere karşı direnç gösterebilecek kuvvette bir bağlanma kuvvetinin mevcut olması metal-seramik çalışmalarında başarı için şarttır. Ancak tüm bunlar sağlansa da metal-seramik uygulamaların en büyük olumsuzluğu estetik yetersizlikleridir. Metal alt yapının ışığı geçirmemesi ve özellikle kole bölgesinde metalin yansması arzu edilmeyen özelliklerdir. Metalin seramik yapıdan yansmasını önlemek amacıyla metal alt yapı üzerine uygulanan opak tabakası da çoğu kez kaplamanın estetiğini olumsuz etkilemektedir. Bu durum ön bölgedeki diş eksikliklerine yapılan metal-seramik köprü uygulamalarında daha da önem kazanmaktadır.

Bu olumsuz etkilerin giderilmesi amacıyla tüm seramik diş kaplamaları kullanılmaktadır. Tüm seramik sistemler ile fonksiyon, estetik, biyolojik uyum ve hijyenik özellikler gibi gereksinimler sağlanabilmektedir. Bu özellikler içerisinde estetik, gerek hasta gerekse diş hekimi açısından oldukça önemli bir unsurdur.

Doğal dişlerin sahip olduğu canlı görünüm, dişin yapısındaki prizmatik ve interprizmatik yapıların gelen ışığı yansıtma kapasitesine bağlıdır. Dişlerin rengi yüzey yapısından, kaplamayı çevreleyen diş eti dokusundan ve ortamın ışığından etkilenir. Tamamlanan kaplamanın başarılı kabul edilebilmesi için doğal dişe benzer renk derinliğine ve şeffaflığa sahip olmalıdır. Tüm seramik sistemler ile metal alt yapının yansmasının olumsuz etkisi ortadan kalkmakta ve kaplama yüzeyine gelen ışığın geçişine imkan verilmektedir. Ayrıca kullanılan malzemeler arasında en yüksek biyolojik uyumu gösterdikleri de bilinmektedir.

Tüm seramik kaplamalarda metal alt yapının kullanılmaması ile iyon salınımı sonucu alerjik ve toksik reaksiyonların ortaya çıkması büyük oranda önlenmektedir. Buna rağmen kullanım alanları kırılma dirençlerinin azlığı nedeniyle sınırlıdır. Dental seramik malzemelerin fiziko-kimyasal özellikleri ve camsı yapıları iyi bir görünüm sağlar ve ağız içerisinde bozunmalarını engeller. Bu malzemelerin en büyük avantajı ağız ortamındaki kararlılıklarıdır. Seramiğin; korozyona, aşınmaya ve

asitlere direncinin birçok malzemeye göre daha üstün olması, seramik sistemlere olan ilgiyi arttırmıştır.

### ***2.5.1 Metal Destekli Seramik Kaplamaların Dezavantajları***

Metal destekli seramik kaplamaların %97-99 başarı oranına rağmen bir çok dezavantajları vardır. Bu dezavantajlar şunlardır;

- Seramiğin bağlandığı metalin alerjik reaksiyon potansiyeli ve korozyon zehirliliği,
- Metal alaşımının içerdiği gümüş nedeniyle seramiklerde renk değişimine neden olma olasılığı,
- Metal ile seramik arasındaki ısıl genleşme katsayısı uyumsuzluğu nedeniyle bağlanma dayanıklılığının azalması,
- Fırınlama sonrası metal yüzeyinde ortaya çıkan oksit tabakasının metal-seramik birleşimini etkilemesi,
- Dişte, hem metal hem seramiğe yer sağlamak için yapılacak hazırlık miktarının fazla olması,
- Metalin ışık geçirgenliğinin olmaması nedeniyle, renk derinliğindeki yetersizliği ve kaplamanın doğal görünümünü elde etmedeki güçlük.

Bu dezavantajlar ve ön bölgedeki estetik gereksinim, bu tip kaplamalarda destekleyici olan metalin kaldırılmasına yönelik arayışları arttırmıştır. Önceleri özel basamak malzemeleri (metal yerine shoulder seramiği) kullanılmış, daha sonra platin folyo tekniği ile metal kalınlığı en aza indirilmeye çalışılmış ve zamanla metal destekli olmayan tüm seramik kaplamalar geliştirilmiştir.

### ***2.5.2 Tüm Seramik Kaplamaların Avantajları***

Tüm seramik kaplamalar şu avantajlarından dolayı metal destekli seramik kaplamaların yerine yaygın bir şekilde kullanılmaya başlanmıştır;

- Biyolojik uyumlulukları metallere oranla daha üstündür.
- Alerjik reaksiyon oluşturmazlar.
- Homojendirler.
- Estetikler. Renkte derinlik sağlarlar ve ışığı yansıtma özelliklerine sahip oldukları için doğal diş yapısına daha yakın bir görünümde dirler. Işığın köke kadar ulaşmasını sağlayarak dişeti bölgesindeki gölgelenmeyi ortadan kaldırırlar.
- Doğal diş yapısına yakın ısıl genleşme katsayısına ve ısı iletkenliğine sahiptir.
- Sıkışma kuvvetlerine karşı dayanıklıdır lar.
- Yapım aşamasında metal destekli seramik kaplamalarda karşılaşılan zararlı metal tozlarının ortaya çıkma olasılığı olmadığından teknisyen açısından da sağlıklıdır lar.
- Metal destekli seramik kaplamalarda metal nedeni ile ortaya çıkan oksidasyon problemi ortadan kalkar ve opak fırınlama aşamalarına gerek kalmaz.
- Diş etinde metal nedeni ile oluşan koyu renklenmenin de önüne geçilmiş olur.
- İyon salınımı ve elektrolitik korozyon yönünden güvenilirdirler.
- Diş etinde tahrişe neden olmazlar.

Tüm seramik diş kaplamalarının kullanım yeri ve durumları şunlardır;

- Estetiğin önem kazandığı tüm ön dişlerde,
- Diş dokusunun korunması ve diş eti sağlığının devamı için,
- Özellikle alt keser dişlerde metal destekli seramik kaplamaların çok kaba olacağı ve ışığı fazla yansıtacakları durumlarda,
- Zedelenmiş dişlerde,
- Çürük, aşınmış ve kırık dişlerde,
- Endodontik tedavi görmüş veya renklenmiş dişlerde,
- Tek diş implant ve üç üyeli ön implant köprülerde,
- Metal alerjisi olan hastalarda.

## **BÖLÜM ÜÇ**

### **DENTAL SERAMİKLERİN DAYANIKLILIĞI, GÜÇLENDİRİLMESİ VE ÇATLAK OLUŞUM SEBEPLERİ**

#### **3.1 Dental Seramiklerin Dayanıklılığı**

Tüm seramik restorasyonların metal destekli restorasyonlara oranla en büyük dezavantajları kırılma dayanımlarının düşük olmasıdır. Seramiklerin bası mukavemetleri yüksek olmasına rağmen çeki mukavemetleri düşüktür. Pratikte, çiğneme esnasında makaslama kuvvetleri yanında çarpma kuvvetleri oluşur. Bu kuvvetlerin oluşturduğu gerilmeler restorasyonlarda kırılmalara neden olur. Metal desteksiz seramikler sadece %1'lik elastik deformasyon gösterebilirler. Metallerin elastisite modülleri daha yüksek olduğu için daha fazla elastik şekil değişimi gösterirler ve bu nedenle metal desteksiz seramikler metallere oranla daha kırılğandırılar.

Kırılğan malzemelerin dayanıklılığı, çatlaklar, boşluklar, çatlak konumu, hacim, gerilme yönü ve şiddeti ve geometri gibi faktörlerden etkilenir.

#### **3.2 Seramiklerde Üretim Sırasında Oluşan Çatlaklar**

Isıl genleşme katsayıları uyumsuz tabakalar nedeniyle, seramiklerin yapım aşamalarında (toz karıştırma ve sıkıştırma, şekillendirme, kurutma, fırınlama, son şekillendirme), mikroçatlakların oluşmasından kaçınmak mümkün değildir. Bu mikroçatlaklar çiğneme sırasında tekrarlı yüklere maruz kalırlar. Başlangıçta yavaş ilerleyen mikroçatlaklar, üzerindeki gerilme birikimi ve nemli ortamın etkisiyle daha da ilerlerler ve bir noktadan sonra kırılma gerçekleşir. Çatlak ilerlemesi açısından dayanıklılığı etkileyen faktörler; çatlak boyu, çatlak geometrisi ve malzemenin kırılma tokluğu değeridir. Dental seramiklerde dayanıklılığı etkileyen faktörler; hazırlama biçimi, destek diş dokusunun durumu, restorasyonun biçimi ve uyumu, malzemelerin ısıl ve mekanik özellikleri, dişlerin kapanmasıyla oluşan temasların oluşturduğu gerilme dağılımı, malzemenin kalınlığı ve yapım tekniğidir.



Restorasyonun hazırlanışı sırasında alt destek (örn. metal) üzerine uygun formda hamur kıvamında işlenen estetik malzemenin (porselen) tamamen sertleşebilmesi için, destek malzeme ile birlikte 950°C gibi yüksek sıcaklıklarda belli bir süre fırında pişirilmesi gerekmektedir. Pişirme işleminden sonra ise fırından çıkarılan restorasyonda, dış ortam ve fırın arasındaki yüksek sıcaklık farkı ve iki yapının farklı mekanik davranışları sebebiyle, önemli büyüklükte ısıl gerilmeler ortaya çıkmaktadır. Bu gerilmeler bazı durumlarda dış yüzeylerde bile gözle görülebilen çatlaklara yol açmaktadır. Gerilme yığılmalarının daha yüksek şiddette olduğu ara yüzeylerde bu tip çatlakların oluşması daha da muhtemeldir. Ayrıca oda sıcaklığına ulaşmış restorasyonda belli bir seviyede artık gerilmelerin kalması da kaçınılmazdır. Nitekim yapılan birçok deneysel çalışma ile kuron (kaplama) ve köprü yüzeylerinde bu artık gerilmelerin varlığı ispatlanmıştır. Alt ve üst malzemelerin farklı mekanik davranışlarının yanı sıra fırından çıkarılan restorasyonunun soğuma hızı da gerilmelerin şiddetine ve dolayısıyla çatlak oluşmasına etki eden önemli bir faktördür. Hasta ağzına uygulanan kuron ve köprüler gerek çiğneme kuvvetleri gerekse ağza alınan sıcak veya soğuk yiyecekler nedeniyle önemli ölçüde mekanik ve termal yorulmalara maruz kalmakta ve restorasyonun hazırlanışı sırasında oluşan mikroçatlaklar yorulma yükleri etkisiyle zamanla büyüyerek kırılmalara sebep olmaktadır.

Günümüzde sıkça karşılaşılan bu durum hasta sağlığını doğrudan etkilemekte ve buna ilaveten tedavi ve malzeme maliyetleri açısından ortaya çıkan önemli kayıplar da düşünüldüğünde, bu problemin giderilmesi veya en az seviyelere çekilmesi gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Kuron ve köprünün hazırlanış aşamasında soğuma sonrası ortaya çıkan gerilmeleri ve dolayısıyla çatlakları azaltıcı ve yorulma ömrünü artırıcı tedbirlerin alınması ile bu problemin aşılması mümkündür.

Kuron ve köprülerin alt destek malzemesi ile üst estetik malzemesi için uygulamalarda genelde farklı firmalar tarafından üretilen ürünler tercih edilebildiğinden, birbirleriyle optimum uyum gösteren malzeme çiftlerini belirlemek oldukça önemlidir. Ancak birçok klinik uygulamadaki gözlemsel veriler, birlikte kullanılan malzeme çiftlerinde az veya çok uyumsuzlukların olduğunu göstermiştir.

İki malzemenin farklı mekanik davranışlarının yanı sıra restorasyonun hazırlanışındaki işçilik kalitesinin düşüklüğü bu tip olumsuzluklara yol açabilmektedir.

### **3.3 Dental Seramiklerin Dayanıklılıklarının Arttırılması**

Ağız ortamında yüksek kuvvetlere maruz kalan dental porselenlerin estetik kriterlerinden ödün verilmeksizin dayanıklılıklarının arttırılmasına yönelik birçok yöntem geliştirilmiştir. Bunlar kimyasal güçlendirme, termal güçlendirme, dağılma ile güçlendirme ve alt yapı ile güçlendirmedir.

#### **3.3.1 Kimyasal Güçlendirme (İyon Değişimi)**

İyon değişimi (ion stuffing), kaplama yüzeyinde ince bir bası gerilmesi tabakası oluşturur. Bu da küçük modifiye cam iyonları ile daha büyük iyonların yer değiştirmesiyle meydana gelir. Sodyum ve potasyum iyonlarının yer değiştirmesi en bilinen örnektir. Pişirilmiş kaplamalar platin bir kap içerisindeki potasyum nitrat solüsyonunda bekletilirler. Bu bekleme süresinin en az 24-48 saat olması gerekmektedir. Dayanıklılıkta %45-140 arasında artma olduğu belirtilmiştir. İyon değişimi, erimiş tuzlar kullanılarak bir pasta (Ceramiccoat, Tuff-Coat) yardımıyla gerçekleştirilir. Birçok porselen bu tür bir işlem ile güçlendirmeye olumlu yanıt vermektedir. Büyük iyonlar cam veya porselenin yapısına yüksek ısıda difüzyon yoluyla girerler. Soğuma sırasında büyük iyonlar porselen yüzeyince yakalanırlar ve yüksek molariteleri nedeniyle daha çok yer işgal ederler. Böylece yüzey tabakasının büzülme potansiyelini azaltır ve belli bir basınç altında kalmasını sağlarlar. Derin tabakaların büzülmesi ise tamamen dolu dış tabakanın belirli bir gerilmeye neden olmasından dolayı kısıtlanmış olur. Birçok cam ve seramik yapının başarısızlığının nedeni yüzey kusurları ve yüzeydeki bası gerilmelerinin çatlakların neden olabileceğinden daha erken bir zamanda yükselmesidir.

Bilinen dental (feldspatik) seramiklerin kimyasal yapısı iyon değişimi ile yüzeydeki tabakada yüksek bası gerilmesini arttırmak için uygundur. İyon değişimi

ile güçlendirme en etkili biçimde IPS-Empress seramikte izlenmektedir. Bunun yanında Dicor seramikteki cam fazın kimyasal yapısı potasyum iyonu ile iyon değişimine uygun değildir.

Kimyasal güçlendirme işlemi malzemenin çok ince bir yüzey tabakasını etkiler ve air-abrazyon ile seramiğin 16-18 µm'lik bir tabakasının kaldırılması ile iyon değişimi ile elde edilmiş kimyasal güçlendirmenin etkisi ortadan kalkar. Bu yüzden seramik yapının ajustesinde dönen aletlerin kullanılması, kimyasal güçlendirme işlemlerinin etkisini ortadan kaldırır.

### ***3.3.2 Termal Güçlendirme (Isıl İşlem Uygulaması)***

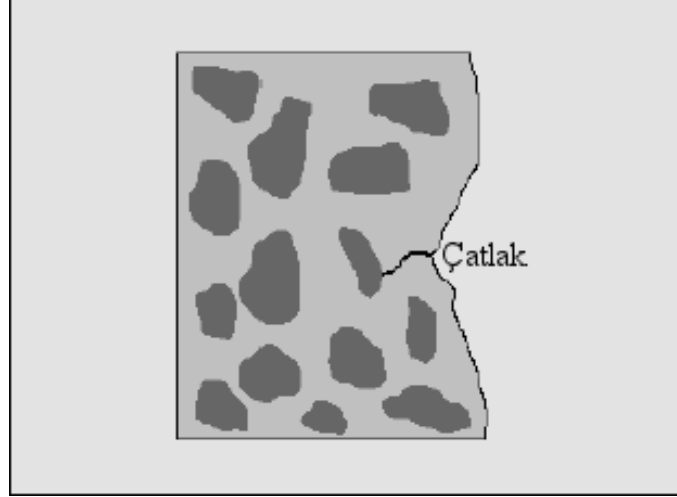
Dental porselenin ısıyla yumuşatılması (tempering) aynı zamanda güçlendirilmesini de sağlar. Termal işlemlerin avantajı; gerilme profilini malzemenin daha derin tabakalarına kadar genişletmesi ve air-abrazyondan etkilenmemesidir. Dental porselenlerin bu şekilde güçlendirilmesi çatlak başlangıcını engeller. Yalnızca forced-air tempering, sadece iyon değişiminden ya da iyon değişimi ve tempering kombinasyonundan daha iyidir. Termal tempering yapılan bir çalışmada bir porselende 150 µm derinliğe kadar etkili olmuştur ve bu termal olarak desteklenmiş en derin bası gerilmesi profilidir.

Kimyasal güçlendirme ile karşılaştırıldığında; termal metodun dazavantajı, soğuma oranının kontrolünün güç olmasıdır ve bu kaplama gibi kompleks şekilli bir malzemede çok daha zorlaşmaktadır. Ancak metal-seramik kaplamalarda yapılan üç boyutlu sonlu eleman analizleri, kaplamanın kompleks yapısına, soğuma özelliğine ve opak porselenin oldukça yüksek gerilmelerine rağmen termal güçlendirmenin kaplama yapımı için uygulanabilir bir yöntem olduğunu göstermektedir.

### 3.3.3 Dağılma ile Güçlendirme (Dental Seramiklere Kristal Eklenmesi)

McLean ve Hughes %50 alümina içeren ilk alt destek malzemesini geliştirmişlerdir. Bu alt destek malzemesinin üzerinde uygun ısıl genişleme katsayılı yüzey seramiği pişiriliyordu. Alümina seramiğin dayanıklılığı alümina kristallerinin kuvvetlendirici etkisinden kaynaklanmaktadır. Fakat klasik sinterizasyon tekniğinde, katılacak alümina miktarında sınırlama olmaktadır. McLean dental seramiklerdeki alüminyum içeriğinin ağırlığının %50' sine kadar arttırıldığında dayanıklılıklarının da artacağını bulmuştur. O tarihten itibaren dental seramiklerdeki alüminyum içeriğinin daha da arttırılmasına doğru yönelme olmuştur. (Hi-Ceram %70, In-Ceram %90, Procera AllCeram ~%100). Yeni geliştirilen bir metot sayesinde düşük vizkoziteli eriyik camın inhibisyonuyla yoğunlaştırılan, hafif sinterlenmiş alümina alt destek yapıları üretilebilmiştir. Sonuçta alümina ile güçlendirilmiş seramiklerde %40 olan  $Al_2O_3$  kristalleri oranı %85 seviyelerine çıkmıştır.

Kristal yapı, çatlakların ilerlemek için gereksinimi olan enerjinin artmasına neden olduğundan, çatlak gelişimini engellemekte ya da azaltmaktadır. Küçük boyutlarda eklenen bu dirençli cam kristaller seramiklerin yapısını güçlendirir ve kaplamanın direncini arttırır. Mikroçatlakları önlemek ya da en aza indirmek için seramik yapısına alümina ( $Al_2O_3$ ) (Vitadur-N, Hi-Ceram, In-Ceram, Procera AllCeram), magnezyum oksit (Cerestore), mika kristalleri (Dicor), zirkonyum oksit (Mirage), leucite (Optec, Cosmotec 2, IPS-Empress) kristalleri eklenir.



Şekil 3.1 Alümina partikülleri çatlak oluşumunu durdurucu etki gösterirler.

Mikroçatlak kristalin merkezinden geçemez ancak etrafını dolaşarak zayıf olan cam yapının içinde ilerleyebilir (şekil 3.1). Bu nedenle matris içerisindeki kristal miktarı artırılıp, zayıf olan cam yapısı miktarı da minimum seviyeye indirilirse, mikroçatlağın ilerleyebilmek için daha fazla kinetik enerjiye sahip olması gerekecektir. Alüminyum oksit bilinen en dayanıklı ve en sert oksittir. Ayrıca yüksek elastisite modülüne sahip olduğu için kristal bileşiğinin sertliğini ve esnekliğini yükseltir.

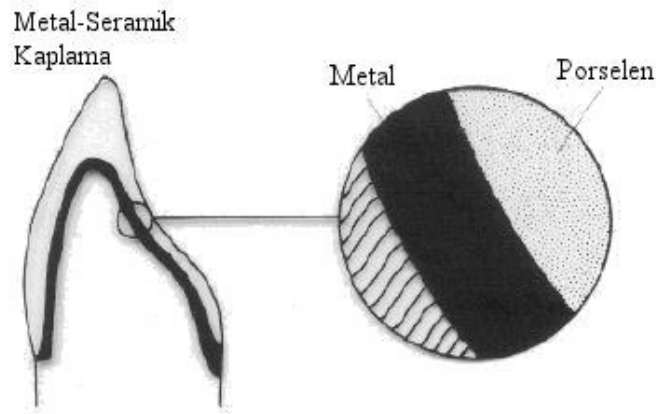
### **3.3.4 Alt Yapı ile Güçlendirme**

Metal ve folyonun destek alt yapı malzemesi olmasına göre iki grupta sınıflandırılabilir.

#### *3.3.4.1 Seramiğin Metal Alt Yapı ile Desteklenmesi*

Dr. Swann ve arkadaşları seramiği güçlendirmede metal kullanmışlar ve seramo-metal kaplamaların gelişimini başlatmışlardır. Weinstein ve arkadaşları ise metal alt yapı seramik restorasyonu, % 11-15 arası frit içeren porselen tozu ile uygulamışlardır. İçeriğinde en az %11 oranında  $K_2O$  içeren sistem, metale bağlanmayı arttıran yüksek genleşmeye sahip cam içermektedir. Bu yüksek termal

genleşme,  $K_2O$  içeriğindeki leucitein kristalizasyonundan ileri gelmektedir. Seramiği desteklemek için metal alt yapı kullanımının birçok sakıncası bulunmaktadır. Metal alt yapının korozyon ve oksidasyon ürünleri; metal-seramik arası bağlantıda risk yaratabildiği gibi, biyo-uyumluluğun da azalmasına neden olur. Metallerin ışık geçirmez ve opak yapısı, estetik açıdan olumsuz ve cansız bir görünüm oluşturur. Bu nedenlerle, daha üstün bir estetik ve yüksek biyo-uyumluluk arayışı, yüksek dayanıklılıktaki tüm seramik sistemlerinin geliştirilmesini sağlamıştır.



Şekil 3.2 Metal alt yapının şematik görünümü.

#### 3.3.4.2 Seramiğin Folyo ile Desteklenmesi

İlk kez 1903 yılında Dr. Charles Land tarafından uygulanan platin folyo tekniği ile yapılmış tüm seramik kaplamalar, kırılğan ve zayıf olmaları nedeniyle çok yaygın kullanılamamışlardır. 1965 yılında Mclean ve Hughes, platin folyo üzerinde alumina taneciklerinin dağılmasıyla güçlendirilmiş bir alt yapı porseleni kullanarak tüm seramik kaplamaların dayanıklılığını arttırmışlardır. Folyo ile güçlendirilmiş seramik kaplama sistemlerinden uygulanabilirliği olan ilk sistem, 1976 yılında McLean ve Sced tarafından geliştirilmiştir. Bu sistemde, platin folyo 2  $\mu m$  kalınlığında kalay ile kaplanır. Oluşan kalay oksit seramiğin bağlanmasını sağlar. Bu sistem Vita-Pt (Vita Zahnfabrik, Sackingen, Germany) ticari adı ile pazarlanmıştır. 1980'li yıllarda folyo ile güçlendirilmiş birçok tüm seramik kaplama sistemi tanıtılmış olup Renaissance (Williams Gold Refining Co, Buffalo, NY), Sunrise (Tanaka Dental, Skokie, IL) ve Captek (Davis Ltd, Herts, England) bu sistemlerdendir.



Şekil 3.3 Folyo alt yapılı Captek kaplamalar.

İlk sistem olan Vita-Pt (Vita Zahnfabrik, Bad Sackingen, Germany) ince bir oksidize platinyum folyonun güdük üzerine adaptasyonu ve bunun üzerine alüminöz porselenin işlenmesiyle yapılan bir metal-seramik teknolojisidir. Bu prensibi kullanan daha sonraki sistemler güdük üzerinde şekillendirilen, adapte edilen ve parlatılan prefabrike altın kullanmışlardır. (Örneğin; Renaissance/ Ceplatec, Williams Gold Refining Co., Sunrise, Tanaka Dental). Bu sistemler mum modelaj, döküm gibi aşamalar içermediğinden zaman kazancı sağlarlar ve diğer tüm seramik sistemlere göre çok daha ucuza mal olurlar.

İstenilen folyo kalınlığı 0,025 mm (platin-bonded alüminöz kaplama, oksidize platin folyo), 0,09-0,159 mm ( Renaissance sistem, %99 soy metal) ve 0,050 mm (Sunrise system, %98 saf altın)'dır. Bu sistemlerde porselen kalınlığındaki artış döküm copinglerle kıyaslandığında 0,10-0,20 mm arasında değişir ki bu da daha fazla renk derinliği elde etmeyi sağlar. Porselende 0,5-1,0 mm arası her kalınlık artışı dikkate değer oranda renk değişimine neden olur ve 1,0 mm'nin altında porselen kalınlığı olduğu zaman final görünümünde altyapının rengi yansır. Termal genleşme katsayıları nedeniyle, alüminöz porselen sadece platin folyolar ile, metal-seramik tekniği için kullanılan feldspatik seramik ise altın folyo alaşımları ile uyumludur.

Tüm seramik sistemlerin önemli bir özelliği yüzey yapılarının doğası ve kalitesidir, pürüzsüz, kusursuz bir yüzey yüksek dayanıklılık sağlar. Platin-bonded alüminöz kaplamalarda standart bir platin folyo, alüminöz veneer porseleni ile kaplanmadan önce kalay kaplanmış ve oksitlenmiştir. Bu şekilde hazırlanan folyo kaplamaların çift eksenli bükülme dayanımında konvansiyonel alüminöz porselen

jaket kaplamalara oranla %83 artış sağlanmıştır. Çünkü böylelikle ince oksit tabakası sayesinde porselen-folyo arasındaki yüzeylerdeki kusurlar azaltılarak porselenin ıslatabilirliği artmış olur.

Folyo kaplamalar ön dişlerde gerekli durumlarda kullanıldığında ve uygun porselen kalınlığı sağlandığında mükemmel klinik performans göstermektedirler. Renaissance folyo kaplamaların metal-seramik kaplamalarla kıyaslandıklarında; Dicor ve Cerestore'dan %40-60 daha üstün oldukları bildirilmiştir. Folyonun soyulması kaplamanın dayanıklılığını %24 azaltmaktadır. Bu muhtemelen açığa çıkan kusurlardan veya porselene gelen gerekli bası gerilmelerinin ortadan kaldırılmasından kaynaklanmaktadır. Folyoyu yerinde bırakmak kusurların açığa çıkmasını ve potansiyel çatlak yayılmasını önler.



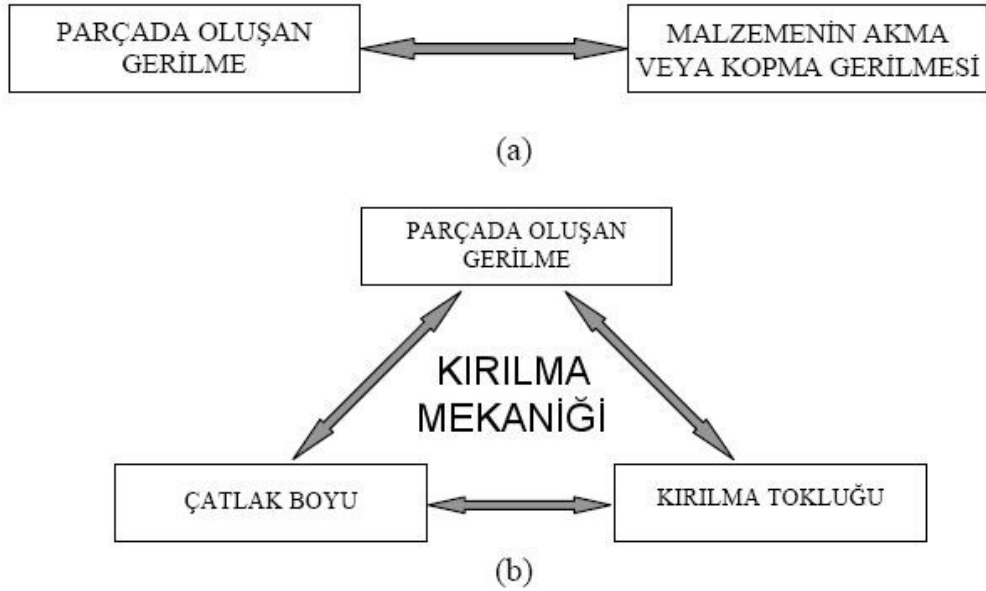
## BÖLÜM DÖRT

### KIRILMA MEKANİĞİ

#### 4.1 Giriş

Kırılma mekaniği, üzerine yük uygulanan çatlak malzemelerdeki mekanik davranışı inceler. Kırılma mekaniği sayesinde çatlak veya boşluk içerebilen mühendislik yapılarının emniyetli bir şekilde çalışmaları sağlanır.

Kırılma olayı, gerilme altında bir malzemenin iki veya daha fazla parçaya ayrılmasıdır. Kırılma, elde edilmek istenen amaca göre istenen veya istenmeyen bir durum olabilir. Örneğin camın kesilerek arzu edilen boyutlara getirilmesi istenen ve amaçlanan bir kırılmadır. Fakat çalışan makine parçalarının kırılması, büyük gemilerin ortadan ikiye ayrılması gibi mühendislik yapılarının kırılması ve parçalanması olayları istenmeyen durumlardır ve bu durumların önlenmesi ve önceden kestirilmesi kırılma mekaniğinin konusunu oluşturur.



Şekil 4.1 Ürün tasarımında; a) klasik mukavemet yaklaşımı, b) kırılma mekaniği yaklaşımı.

Şekil 4.1'de yapısal tasarım ve malzeme seçiminde kırılma mekaniği ile klasik mukavemet yaklaşımı arasındaki fark ortaya konmaktadır. Klasik mukavemet

yaklaşımında, yükleme sonucu parçada ortaya çıkan maksimum gerilme, malzemenin akma veya kopma gerilmesiyle kıyaslanmakta ve malzemenin dayanımı ortaya çıkan gerilmeden daha yüksekse bu malzemenin yeterli olduğu kabul edilmektedir. Bu yaklaşımda iki değişken söz konusudur. Kırılma mekaniği yaklaşımında ise yükleme sonucu elemanda oluşan gerilme ile birlikte parça içinde bulunan çatlaklar veya süreksizlikler de göz önüne alınarak hesaplanan büyüklük, malzemenin akma mukavemeti yerine kırılma tokluğu ile kıyaslanır. Böylece kırılma mekaniğinde iki yerine üç değişkenli bir yaklaşım sergilenir (Yayla, 2007; Anderson, 1995).

Temel olarak, kırılma mekaniği çatlakların çekirdekleşmesi ve büyümesi sonucu ortaya çıkan kırılma işlemiyle ilgilidir. Çatlakların oluşumu, özel bir kristal veya amorf katının mikro yapısına, uygulanan yüke ve çevreye bağlı olan karmaşık bir kırılma süreci olabilir. Bir kırılma işleminde, dislokasyon hareketleri, çökteliler, kalıntılar, tane boyutları ve mikro yapıyı oluşturan faz çeşitlerinden dolayı mikro yapı önemli bir rol oynar. Bütün bu mikro yapıya ait özellikler kusurlardır ve olumsuz koşullar altında kırılmanın başlangıç noktası olabilirler (Perez, 2004).

## 4.2 Kırılma Türleri

Kırılma genel anlamda, gevrek kırılma ve sünek kırılma olmak üzere iki şekilde oluşur. Gevrek kırılmada düşük miktarda enerji açığa çıkar ve çatlak hızı normal olarak yüksek olduğu için uyarı vermeksizin büyük zararlara neden olan kusurlar ortaya çıkabilir. Bu nedenle katının kırılmasından önce az miktarda plastik deformasyon oluşabilir veya hiç oluşmayabilir. Gevrek kırılmaya eğilim, azalan sıcaklık (özellikle hacim merkezli kübik (HMK) sistemde), artan deformasyon hızı ve üç eksenli gerilme (genellikle bir çentiğin yol açtığı) durumlarında artar. Gevrek kırılma önceden uyardıktan oluştuğundan ve genellikle büyük felaketlerle sonuçlandığından dolayı istenmeyen ve mutlaka önlenmesi gereken bir durumdur.

Sünek kırılma, yüksek enerjili bir işlemdir ve çatlak kararsız hale gelmeden önce büyük plastik deformasyonla birlikte yüksek miktarda enerji açığa çıkar. Böylece

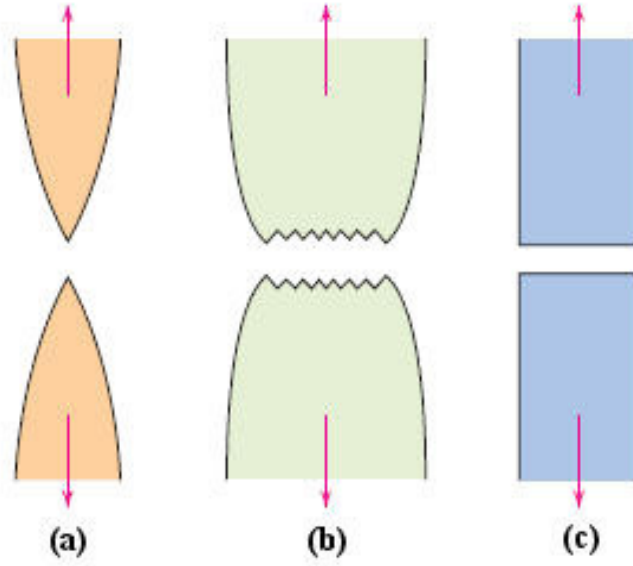
çatlak uç bölgesinde uzama sertleşmesi (strain hardening) nedeniyle yavaş çatlak ilerlemesi gerçekleşir (Perez, 2004). Kırılma yüzeylerinde, oluşan plastik deformasyon gözlenir.

Malzemelerde ortaya çıkan gevrek kırılma aşağıdaki nedenlerin bir veya birkaçının bir araya gelmesi sonucu oluşur (Yayla, 2007);

- Üç boyutlu gerilme hali,
- Yüksek genleme hızları,
- Düşük sıcaklıklar.

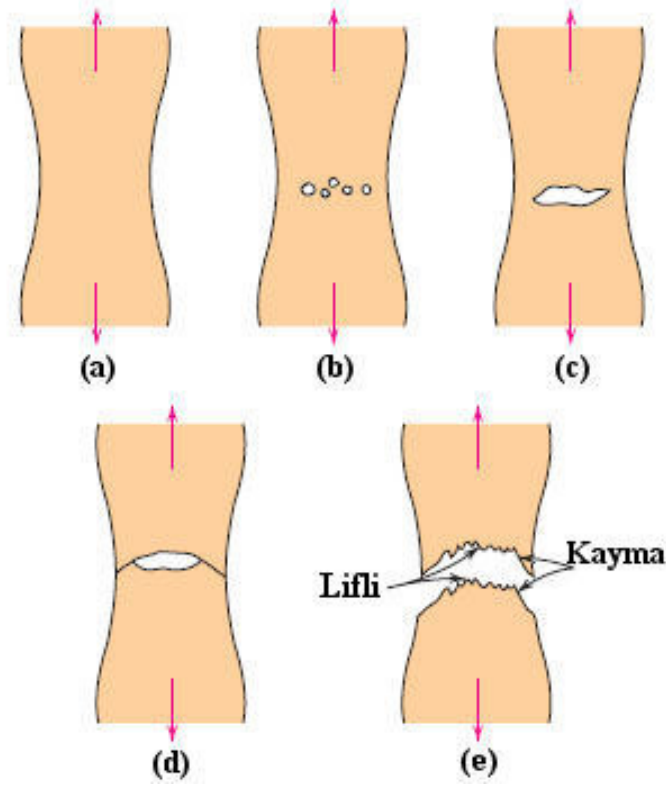
Gevreklik veya süneklik bir malzeme özelliğinden ziyade yükleme şartları sonucunda ortaya çıkan bir malzeme davranışıdır. Aynı malzeme yükleme şartlarına bağlı olarak hem sünek hem de gevrek bir davranış sergileyebilmektedir (Yayla, 2007). Ayrıca gevrek ve sünek kırılma arasındaki sınır, incelenen duruma göre izafidir. Örneğin, küresel grafitli dökme demir, beyaz dökme demirle karşılaştırıldığında sünek, ancak düşük karbonlu çelikte karşılaştırıldığında gevrek (Uğuz, 1996).

Çoğu kırılma iki türü de içerir fakat genellikle bir tür hâkimdir. Kristallografik anlamda, gevrek kırılmalar genellikle, çekme gerilmelerinin komşu atom düzlemlerini tam olarak çekip ayırdığı klivaj (ayrılma) ile meydana gelirken, sünek kırılmalar ise genellikle kayma gerilmelerinin atomları birbirine göre kaydırmasıyla meydana gelir. Kırılma yüzeylerinin görünüşünden dolayı “lifli” kelimesi sık sık sünek davranışı ifade etmekte kullanılırken, “taneli” kelimesi ise gevrek davranışı ifade eder (Zor, 1999).



Şekil 4.2 a) Parçanın tek noktaya kadar boyun verdiği yüksek süneklikteki kırılma, b) bir miktar boyun verdikten sonra oluşan orta süneklikteki kırılma, c) plastik deformasyon olmaksızın gerçekleşen gevrek kırılma (Callister, 2007).

Şekil 4.2’de iki kırılma türü şematik olarak gösterilmektedir. Şekil 4.2 a’da saf altın ve kurşun gibi oda sıcaklığında son derece yumuşak olan metaller ve yüksek sıcaklıklara çıkartılmış diğer metaller, polimerler ve inorganik camların kırılma şekli görülmektedir. Bu yüksek süneklikteki malzemeler bir kırılma noktasına kadar boyun verirler ve kesit alanında %100’lük bir azalma gösterirler. Şekil 4.2 b’de, kırılma öncesinde orta miktarda bir boyun vermenin olduğu, sünek metallerde en yaygın kırılma profili görülmektedir. Şekil 4.2 c’de ise çatlak hareketi yönünün neredeyse uygulanan çekme yükünün yönüne dik olan ve oldukça düz bir kırılma yüzeyi meydana getiren gevrek kırılma görülmektedir (Callister, 2007).



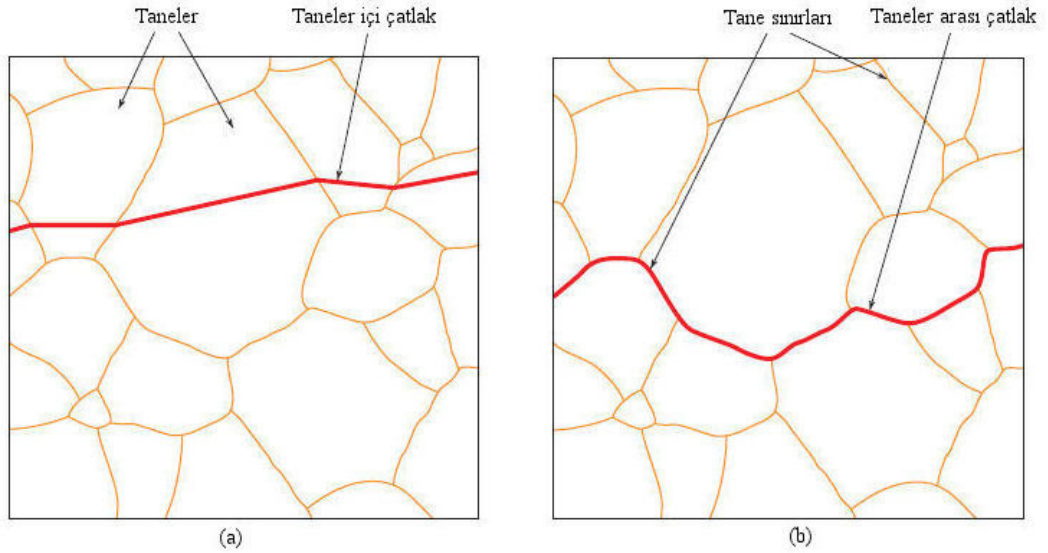
Şekil 4.3 Sünek kırılmadaki aşamalar, a) ilk boyun verme, b) küçük boşlukların oluşumu, c) boşlukların çatlak oluşturmak üzere birleşmesi, d) çatlak ilerlemesi, e) çeki yönüne göre 45° açıda son kayma kırılması (Callister, 2007).

Şekil 4.2 b'deki kırılma işlemi genellikle birkaç aşamada meydana gelir (şekil 4.3). Öncelikle, boyun verme başladıktan sonra, küçük boşluklar şekil 4.3 b'de gösterildiği gibi kesit alanının içinde oluşur. Sonra, deformasyon devam ettikçe, bu küçük boşluklar, uzun eksenine gerilme yönüne dik olan eliptik bir çatlak oluşturacak şekilde, büyür, bir araya gelir ve birleşirler. Bu küçük boşlukların birleşmesi işlemiyle, çatlak ana eksenine paralel bir yönde büyümeye devam eder (şekil 4.3 c). En sonunda, kırılma bir çatlakın boyunun dış çevresinin etrafında hızlı bir şekilde ilerlemesinin ardından gerçekleşir (şekil 4.3 d). Kırılma, çekme eksenine yaklaşık 45°'lik bir açıdaki kayma deformasyonu ile oluşur (bu açı kayma gerilmesinin en büyük olduğu açıdır). Bu şekilde kırılmış bir numunede (şekil 4.4 a), kırılma yüzeyinin ortadaki iç bölgesi, plastik deformasyonu gösteren, düzgün olmayan ve lifli bir görünüme sahiptir. Şekil 4.4 b'de ise kırılma yüzeyi taneli veya kesilmiş bir dokuya sahip gevrek kırılma yüzeyleri görülmektedir (Callister, 2007).



Şekil 4.4 a) Alüminyumun sünek kırılması, b) yumuşak çeliğin gevrek kırılması (Callister, 2007).

Çok kristalli malzemelerde kırılma taneler içi (transgranular) ve taneler arası (intergranular) olmak üzere iki gruba ayrılır (şekil 4.5). Çatlak, taneleri keserek ilerliyorsa taneler içi, tane sınırlarını izleyerek ilerliyorsa taneler arası kırılma söz konusudur. Pratikte çoğu zaman bu iki tip kırılma birlikte görülür (Uğuz, 1996). Taneler arası kırılmada kırılma yüzeyi parlak haldedir. Düşük sıcaklık bu tür kırılmayı teşvik eder. Taneler içi kırılma, tane içindeki faz zayıf olduğunda ortaya çıkar (Yayla, 2007).



Şekil 4.5 a) Taneler içi kırılma ve b) taneler arası kırılmanın şematik gösterilişi (Callister, 2007).

### 4.3 Lineer Elastik Kırılma Mekanikliği

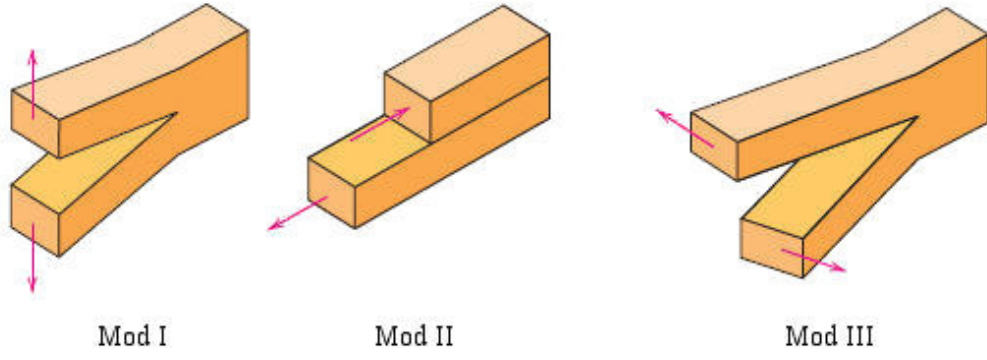
Malzemedeki tüm davranışların elastik sınırlar içinde kaldığı, kırılma mekaniğinin incelenmesinde kullanılan analitik ifadelerin bütününe lineer elastik kırılma mekaniği (LEKM) denir. 1960'a kadar kırılma mekaniği sadece genel davranışı lineer elastik olan malzemelere uygulanmaktaydı. Bu yıldan itibaren çeşitli lineer olmayan malzeme davranışları (plastisite, viskoplastisite ve viskoelastisite) için kırılma mekaniği teorileri geliştirildi (Anderson, 1995).

Lineer elastik kırılma mekaniğinin temel ilkesi çatlak ucunda oluşan gerilmelerin parçaya uygulanan gerilmeye, çatlağın uzunluğuna ve yönüne bağlı olarak ifade edilmesidir. Buna göre, bir çatlağın ilerleyebilmesi; çatlak ucundaki gerilmenin değeri kritik bir değere ulaşmış ise veya yükleme sonucu parçada depolanan enerji kritik bir değeri aşmış ise iki farklı şekilde hesaplanabilir (Yayla, 2007). Bu iki metodun uygulanmasında iki yaklaşım söz konusudur.

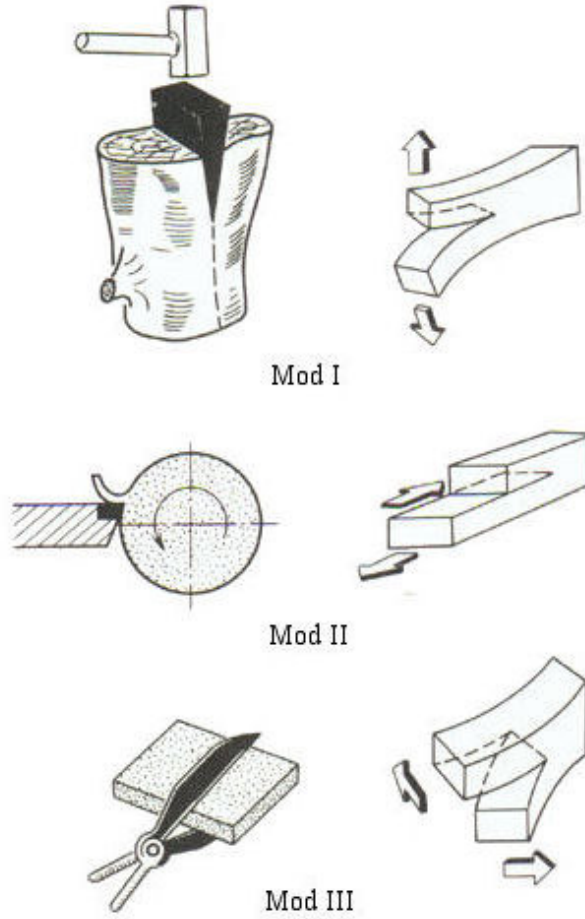
- i) Gerilme şiddeti faktörü yaklaşımı
- ii) Enerji dengesi yaklaşımı

#### 4.3.1 Gerilme Şiddeti Yaklaşımı

Malzemelerdeki mevcut çatlaklar yükleme durumuna bağlı olarak üç şekilde ilerleyebilmektedir (şekil 4.6 ve şekil 4.7). Bunlar; çekme (açılma) modu (mod I), kayma (düzlem içi kayma) modu (mod II), makaslama (düzlem dışı kayma) modu (mod III) olarak sınıflandırılmaktadır. Bu yüklemeler sonucu oluşan kırılmalarda mod I ile ilgili gerilme şiddeti faktörüne  $K_I$ , mod II ile ilgili olanına  $K_{II}$ , ve mod III ile ilgili olanına da  $K_{III}$  denir. Yükleme durumuna bağlı olarak, çatlak ilerlemesi bu modların sadece birisiyle verilen türde olabileceği gibi farklı modların bir birleşimi şeklinde de meydana gelebilir. Çekme altında olduğundan dolayı mod I yükleme durumu altında oluşan çatlak ilerlemesi en sık rastlanan ve en fazla hasara neden olan çatlak ilerleme türüdür (Yayla, 2007). Bundan sonra çıkarılan bağıntılar mod I yükleme durumunu içerecektir.

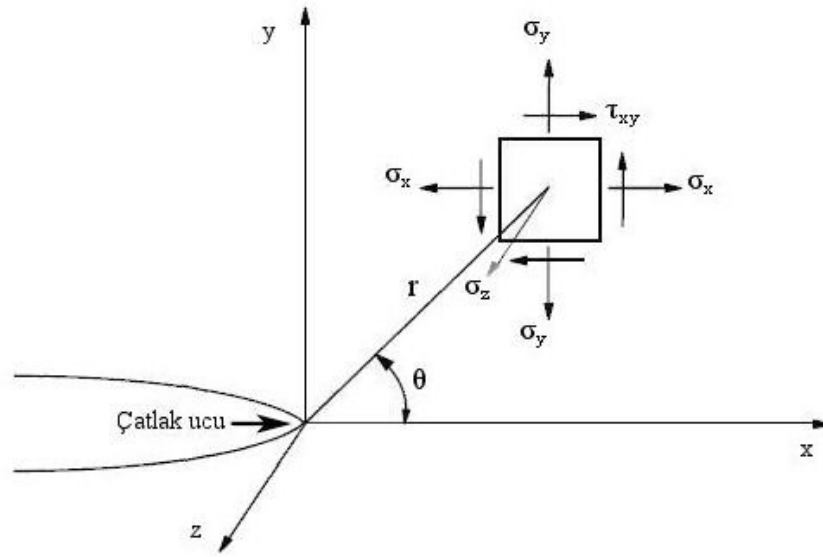


Şekil 4.6 Lineer elastik kırılma mekaniği analizlerinde kullanılan üç yükleme modu (Callister, 2007).



Şekil 4.7 Lineer elastik kırılma mekaniğinde kullanılan üç yükleme moduna örnekler (Patron, 1992).





Şekil 4.8 Çatlak ucunda tanımlanmış koordinat eksenleri.

Mod I yüklem durumu ile yüklenmiş bir çatlak ucuna şekil 4.8'deki gibi koordinat sistemi yerleştirildiğinde çatlak ucunda oluşan gerilme alanını ifade eden denklemler aşağıdaki gibi olacaktır;

$$\begin{aligned}\sigma_x &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left[ 1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right] \\ \sigma_y &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left[ 1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right] \\ \tau_{xy} &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2}\end{aligned}\quad (4.1)$$

$$\sigma_z = 0 \quad (\text{Düzlem Gerilme})$$

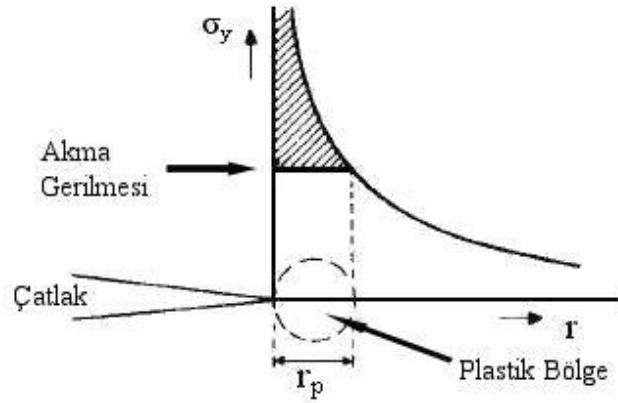
$$\sigma_z = \nu (\sigma_x + \sigma_y) \quad (\text{Düzlem Şekil Değişirme})$$

$$\tau_{xz} = \tau_{yz} = 0$$

Bu denklemlerde; r ve  $\theta$  şekil 4.8'de tanımlanmıştır,  $\nu$  Poisson oranıdır,  $K_I$  ise mod I yüklem altındaki gerilme şiddeti faktörüdür.  $K_I$ , lineer elastik malzemelerde çatlak ucu durumunu tanımlar. Bu denklemler sayesinde  $K_I$  değeri bilindiği takdirde çatlak ucundaki gerilmeler hesaplanabilmektedir.  $K_I$ 'nin değeri, gerilme gibi herhangi bir

fiziksel parametreyi ifade etmemekte, çatlak ucundaki gerilme durumunu belirlemektedir.

(4.1) denklemleri,  $r$  değeri çatlak ucuna yaklaştıkça, bu bölgedeki gerilmeler için iyi sonuç verirler. Fakat bu denklemler, çatlak çevresinde, gerçek malzemelerde gerçekleşmesi mümkün olmayan, çok büyük gerilmelerin ortaya çıkacağını öngörmektedir. Gerçekte oluşan gerilmeler, malzemenin akma mukavemetiyle sınırlanacaktır. Böylece (4.1) denklemlerinin verdiği sonuçlar ne olursa olsun maksimum gerilme değeri akma gerilmesi değeriyle sınırlanacaktır. Şekil 4.9'da  $\theta=0$ 'da  $\sigma_y$  için bu durum görülmektedir.



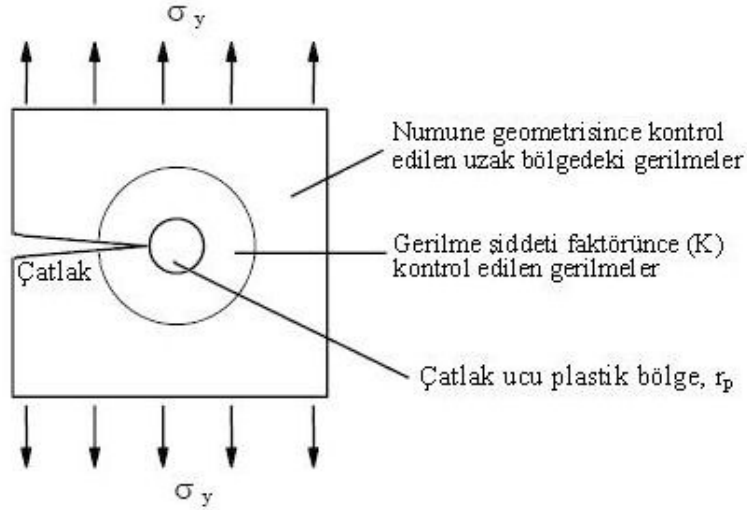
Şekil 4.9 Akma başlangıcında çatlak ucunda plastik bölgenin oluşumu.

Şekil 4.10'daki gibi sonsuz uzunluktaki bir levhaya kenarlarından üniform olarak uygulanan  $\sigma_y$  gerilmesine dik yönde bir çatlak etki etmiş olsun. Malzemenin her bölgede tamamen elastik şekil değiştirdiği ve çatlak ucu keskin kabul edildiğine göre çatlak etrafında  $x$  eksenini boyunca oluşan gerilme (4.1) denklemlerine göre şu şekilde oluşacaktır;

$$\sigma_x = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi x}} \quad (4.2)$$

Bu bağıntıdan anlaşılacağı gibi çatlak ucuna yaklaşıldıkça gerilme sonsuza doğru yaklaşacaktır. Gerçekte ise çatlakın hemen ucunda yukarıdaki denklem ile ortaya

konan çok büyük gerilmeler oluşmayacak, çünkü bu bölgede malzeme lineer elastik olarak davranmayacaktır. Metallerde bu bölgede plastik şekil değiştirme meydana gelerek gerilmenin yeniden dağıtılmasına neden olur (Yayla, 2007). Böylece (4.1) denklemlerinin çatlak ucundaki plastik bölgede geçerli olmadığı ortaya çıkmaktadır.



Şekil 4.10 Bir levhadaki çatlak ve oluşan gerilme alanları.

(4.1) denklemleri çatlak ucundan yeterli uzaklıktaki bölgelerde de geçerli değildir. Bu uzak bölgelerdeki gerilmeler, parçanın şekli ve yükleme durumu tarafından kontrol edilir. Plastik bölge ile bu uzak bölgeler arasında kalan ve adına K kontrollü bölge (region of K dominance) denen bölgedeki gerilme alanı, çatlak tarafından kontrol edilir ve malzeme bu bölgede elastik olarak davranış gösterir. (4.1) denklemleri bu K kontrollü bölgede geçerlidir. Çatlak ucundaki plastik bölgenin büyüklüğü malzemenin diğer boyutlarına göre küçük olduğu sürece K kontrollü bölge çatlakın genel davranışını belirler. Böylece gerilme şiddeti malzemenin kırılma direncini ve kırılma davranışını belirlemek için kullanılır (Yayla, 2007).

Mod I durumunda  $K_I$  için en genel hali ile;

$$K_I = Y \sigma \sqrt{\pi a} \quad (4.3)$$

bağıntısı yazılabilir. Burada;  $K_I$ ; mod I için gerilme şiddeti faktörü,  $Y$ ; parçanın ve çatlak geometrisine bağlı boyutsuz bir parametre,  $\sigma$ ; parçaya uygulanan gerilme,  $a$ ; çatlak uzunluğudur. Böylece  $K$  değeri, çatlak ucundaki gerilme şiddeti ile uygulanan gerilme ve parçanın geometrisi arasındaki bağıntıyı verir.

Gerilme şiddeti faktörü ( $K_I$ )'nın bilinmesi durumunda çatlak ucundaki tüm gerilme ve şekil değişimlerinin (birim uzamaların) büyüklüğü hesaplanabilir. Bu gerilme ve şekil değişimleri belirli bir kritik değere ulaşınca çatlak ilerler. Böylece  $K_I$  değeri belli bir kritik değere ulaştığında çatlak ilerler. Gerilme şiddeti faktörünün bu kritik değerine kritik gerilme şiddeti faktörü denir ve  $K_{IC}$  ile gösterilir. Bu büyüklük kırılma tokluğu (fracture toughness) olarak da bilinir ve tıpkı elastisite modülü veya akma gerilmesi gibi bir malzeme parametresidir (Yayla, 2007).

(4.3) denklemi tasarım aşamasında birçok şekilde kullanılabilir. Bu denklemdeki parça geometrisine bağlı olan  $Y$  katsayısı çeşitli analizlerle belirlenebilir. Böylece yapısal bir malzemede  $K_{IC}$ ,  $\sigma$ , ve  $a$  değerlerinden ikisi belli ise üçüncüsü bulunabilir. Örneğin bir tasarımda eğer malzeme seçimi yapılmış ise bu malzemenin diğer özelliklerinin yanı sıra kritik gerilme şiddeti faktörünün ( $K_{IC}$ ) bilindiğini kabul edelim. Tasarımcı, beklenen gerilmeler altında kabul edilebilecek en büyük çatlak boyunu veya eğer en büyük çatlak boyu inceleme sonucu belirlenmişse, en büyük kabul edilebilir gerilmeyi hesaplayabilir. Eğer tasarımın şekli, gerilmeler ve çatlak boyu değiştirilemiyorsa, tasarımcı yeterli  $K_{IC}$  değerine sahip bir malzeme seçimi yapabilir.

Bir numunede çatlak ilerlemesi;

$$K = K_{IC}$$

olduğunda gerçekleşir. (4.3) denklemi şu şekilde yazılabilir;

$$K_I = Y\sigma\sqrt{\pi a} \leq K_{IC}$$

Burada  $K_I$  gerilme şiddeti faktörü,  $Y$  geometri faktörü,  $\sigma$  tasarım gerilmesi,  $a$  müsaade edilebilir çatlak boyu veya tahribatsız muayene ile tespit edilen çatlak boyu,  $K_{IC}$  ise seçilen malzemenin kırılma tokluğu değeridir. Eğer  $K_{IC}$  ve  $a$  değerleri biliniyor ise tasarım gerilmesi;

$$\sigma_C \leq \frac{K_{IC}}{Y\sqrt{a\pi}} \quad (4.4)$$

olmalıdır. Eğer  $K_{IC}$  ve  $\sigma_C$  değerleri biliniyor ise müsaade edilebilir çatlak uzunluğu;

$$a_C \leq \frac{1}{\pi} \left( \frac{K_{IC}}{Y\sigma_C} \right)^2 \quad (4.5)$$

şeklinde hesaplanır. Burada geometri faktörü olan  $Y$  değeri, parçanın genişliğine ( $W$ ), çatlak uzunluğuna ( $a$ ) ve yükleme durumuna bağlı olarak hazırlanan tablolardan elde edilebilir (Yayla, 2007).

Lineer elastik kırılma mekaniğinde gerilme şiddeti yaklaşımının dayandığı esasları şu şekilde özetlemek mümkündür (Yayla, 2007);

- i) Tüm malzemeler mikro çatlaklar içerir,
- ii) Belirli bir yükleme durumu ve çatlak hali için gerilme şiddeti faktörü ( $K$ ) hesaplanabilir,
- iii) Bir malzeme için gerilme şiddeti faktörü ( $K$ ) belirli bir kritik değeri aştığı zaman o malzemede kırılma nedeniyle hasar oluşabilir.

#### **4.3.2 Enerji Dengesi Yaklaşımı**

Enerji yaklaşımına göre, çatlak ilerlemesi için mevcut olan enerji malzemenin direncini yenmek için yeterli olduğunda çatlak ilerlemesi (ve kırılma) gerçekleşir. Malzeme direnci; yüzey enerjisini, plastik işi ve çatlak ilerlemesi ile ilgili olan diğer enerji yayılım türlerini içerebilir.

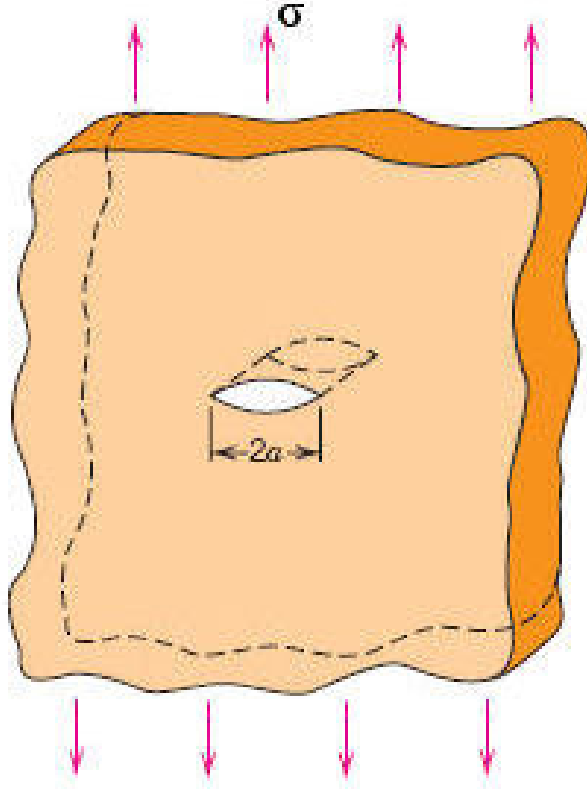
Lineer elastik malzemelerde potansiyel enerjinin çatlak alanına bağlı değişim hızı, enerji yayılım hızı (energy release rate) olarak tanımlanır ve  $G$  ile gösterilir. Enerji yayılım hızı ( $G$ ) aynı zamanda çatlak ilerleme enerjisi olarak da ifade edilir.  $G = G_C$  olduğunda kırılma gerçekleşecektir.  $G_C$ , kritik enerji yayılım hızı'nı ifade eder ve kırılma tokluğunun alternatif bir ölçüsüdür.

İçinde çatlak bulunan bir sistemde en genel anlamıyla enerji dengesi şu şekilde yazılabilir (Yayla, 2007);

$$U_e = U_s + U_k + U_d \quad (4.6)$$

Burada  $U_e$  dış enerji,  $U_s$  şekil değiştirme enerjisi,  $U_k$  kinetik enerji ve  $U_d$  kaybolan enerji yani kırılma enerjisidir. Statik veya yarı statik durumda  $U_k = 0$  alınabileceğinden birim genişliğinde bir levhada bulunan çatlakın ilerlemesi durumunda enerji yayılım hızı ( $G$ ) şu şekilde yazılır (Yayla, 2007);

$$\frac{\partial}{\partial a}(U_e - U_s) = \frac{dU_d}{da} = G \quad (4.7)$$



Şekil 4.11 Çekme gerilmesine maruz kalan sonsuz bir levhada kalınlık boyunca mevcut olan çatlak.

Üzerinde  $2a$  uzunluğunda çatlak bulunan ve çekme gerilmesine maruz kalan sonsuz bir levhada (şekil 4.11), enerji yayılım hızı şu şekildedir;

$$G = \frac{\pi \sigma^2 a}{E} \quad (4.8)$$

Burada,  $\sigma$  uygulanan gerilme,  $E$  elastisite modülü ve  $a$  çatlak yarı uzunluğudur. Denklem (4.8), kırılma anında ( $G = G_C$ ), kritik gerilme ve kritik çatlak boyunu tanımlar;

$$G_C = \frac{\pi \sigma_f^2 a_c}{E} \quad (4.9)$$

Enerji yayılım hızı ( $G$ ) malzemeyi kırılmaya zorlayan etki,  $G_C$  ise malzemenin kırılmaya olan direncidir. Klasik mukavemet yaklaşımıyla arada bir benzerlik

kurmak gerekirse; uygulanan gerilme plastik deformasyona zorlayan etki, akma mukavemeti ise malzemenin deformasyona olan direnci olarak görülebilir.

Çekme gerilmesi karşılaştırması ile benzer kavramlar da ifade edilebilir. Laboratuvar numunesi ile ölçülen bir akma mukavemeti değeri büyük bir yapıya uygulanabilir. Akma mukavemeti, malzeme makul bir oranda homojen ise, numune boyutuna bağlı değildir. Aynı şekilde kırılma tokluğu ( $G_C$ ) değeri de üzerinde çatlak bulunan parçanın boyut ve geometrisinden bağımsızdır. Laboratuvar numunesi üzerinde yapılan bir kırılma tokluğu ölçümü bir yapıya uygulanabilir. Bu yaklaşım geçerli olduğu sürece, bütün konfigürasyon etkileri  $G$  üzerinde değişiklik yapılarak hesaba katılır. Bu benzetme yaklaşımı, malzemenin ağırlıklı olarak lineer elastik davranış göstermesi durumunda geçerlidir.

Benzer şekilde,  $K_I$  malzemeyi kırılmaya zorlayan etki,  $K_{IC}$  ise malzeme direncinin bir ölçüsüdür.  $G_C$  için olan benzetme yaklaşımı  $K_{IC}$  için de geçerlidir;  $K_{IC}$  de boyuttan bağımsız bir malzeme özelliğidir.

#### ***4.3.3 Gerilme Şiddeti Faktörü (K) ve Enerji Yayınım Hızı (G) Arasındaki İlişki***

Çatlak davranışını tanımlayan gerilme şiddeti faktörü ( $K$ ) ve enerji yayınım hızı ( $G$ ) parametreleri önceki başlıklarda anlatıldı. Gerilme şiddeti faktörü çatlak ucu yakınındaki gerilmeleri, şekil değişimlerini ve deformasyonları tanımlarken, enerji yayınım hızı çatlak ilerlemesiyle birlikte oluşan potansiyel enerjideki değişimi ölçer.  $K$  yerel bir parametre iken enerji yayınım hızı genel davranışı tanımlamaktadır. Lineer elastik malzemeler için  $K$  ve  $G$  arasında bağıntı kurulabilir.

Şekil 4.11'deki çekme gerilmesine maruz kalan sonsuz levhadaki kalınlık boyunca mevcut olan çatlak için enerji yayınım hızı ( $G$ ), denklem (4.8) ile verilmişti. Aynı çatlak için gerilme şiddeti faktörü ( $K$ ) ise şu denklem ile verilir;

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi a} \quad (4.10)$$



Denklemler (4.8) ile (4.10)'un birleştirilmesi ile düzlem gerilme durumunda G ve  $K_I$  arasında aşağıdaki bağıntı ortaya çıkar;

$$G = \frac{K_I^2}{E} \quad (\text{Düzlem Gerilme}) \quad (4.11)$$

Düzlem şekil değiştirme durumu için E yerine  $E/(1-\nu^2)$  yazılmalıdır. Bu durumda (4.11) ifadesi düzlem şekil değiştirme için şu şekli alır;

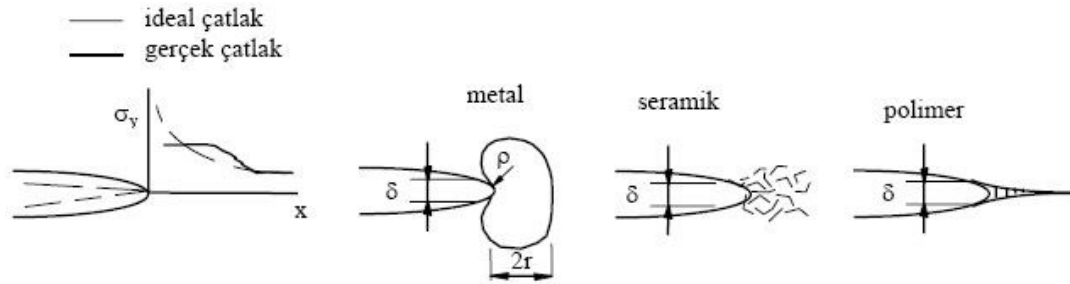
$$G = \frac{K_I^2(1-\nu^2)}{E} \quad (\text{Düzlem Şekil Değiştirme}) \quad (4.12)$$

(4.11) ve (4.12) denklemleri  $G_C$  ve  $K_{IC}$  içinde geçerlidir. G ve K arasında var olan bu ilişki, ister gerilme şiddeti faktörü yaklaşımı isterse enerji dengesi yaklaşımı kullanılsın, her iki durumda da çatlak ilerleme kriterinin aynı olduğunu ortaya koymaktadır.

#### 4.4 Elastik Plastik Kırılma Mekanikliği

Lineer elastik kırılma mekaniği malzemedeki lineer olmayan deformasyonun sadece çatlak ucu çevresindeki küçük bir bölge ile sınırlı kalması durumunda geçerlidir. Birçok malzemede kırılma davranışını lineer elastik kırılma mekaniği ile tanımlamak mümkün değildir. Elastik plastik kırılma mekaniği zamandan bağımsız, lineer olmayan davranış (yani plastik deformasyon) gösteren malzemelere uygulanır. Bu çalışmada incelenecek iki elastik plastik kırılma mekaniği parametresi; çatlak ucu açılma mesafesi (crack tip opening displacement - CTOD) ve J-integralidir. İki parametre de elastik plastik malzemelerdeki çatlak ucu şartlarını tanımlar ve her ikisi de kırılma kriteri olarak kullanılabilir. Çatlak ucu açılma mesafesi ve J'nin kritik değerleri, çatlak ucu plastisitesi büyük miktarlarda olsa bile, kırılma tokluğunun hemen hemen boyuttan bağımsız ölçüsünü verir. J ve çatlak ucu açılma mesafesinin uygulanabilirliği için bazı sınırlamalar vardır fakat bunlar lineer elastik kırılma mekaniğinin geçerlilik gereksinimlerinden daha az sınırlayıcıdır.

Bir malzemede çatlak ucunda oluşan gerilmeler en fazla akma gerilmesi veya çekme gerilmesi kadar olacaktır. Uygulanan gerilme çok fazla değil ise, yani çatlak ucundaki maksimum gerilme malzemenin akma mukavemetini geçmiyor ise, malzeme çatlağın varlığına müsaade edebilir. Sünek malzeme grubunda olan metalik malzemelerde, çatlağın etrafında plastik deformasyona maruz kalmış geniş bölgeler oluşur. Malzemenin plastik deformasyona uğradığı bu bölge çatlak ucu plastik bölgedir. Keskin çatlak uçlarında oluşan aşırı deformasyona maruz kalmış bu bölgede çatlak ucu artık körelmiş ve keskinliği azalmıştır. Bu bölgede çatlak ucu kapalı kalmayıp  $\delta$  kadar açılacaktır. Bu  $\delta$  değerine çatlak ucu açılma mesafesi (CTOD) denir (Yayla, 2007).



Şekil 4.12 Malzemelerde çatlak ucunda plastisite, mikroçatlama ve craze (sır çatlağı) sonucu oluşan deformasyon (Yayla, 2007).

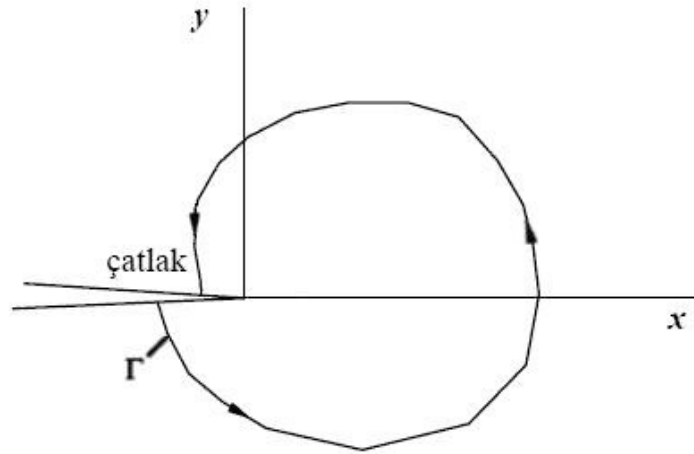
Çatlak ucunda farklı malzemeler farklı tavır sergileyeceklerdir (şekil 4.12). Seramik gibi gevrek malzemelerde bu bölgede küçük boyutta ve farklı yönlerde küçük çatlakların yoğun olduğu bir proses bölgesi meydana gelir. Polimerlerin bir kısmında ise çatlak ucunda boşluklar ve bu boşluklar arasında çekilmiş lifler oluşacaktır. Bu bölgeye craze bölgesi denir. Bu üç durumda da çatlak ucu aşırı bir deformasyona maruz kalır ve yakın bölgelerde ayrılmalar oluşur. Teorik olarak çatlak ucunda olması gereken yüksek gerilme daha geniş bir alana yayılır ve yeniden bir dağılım gösterir (Yayla, 2007).

#### 4.4.1 J-integrali

J-integrali, lineer olmayan (nonlinear) malzemeler için başarılı bir kırılma tanımlama parametresidir. Rice, elastik plastik deformasyonu nonlinear elastik olarak

idealleştirerek kırılma mekaniği metodolojisini lineer elastik kırılma mekaniğinin geçerlilik sınırlarının ötesine taşıyan temeli oluşturmuştur (Anderson, 1995).

Rice deformasyon plastisitesini (yani, nonlinear elastisite) lineer olmayan bir malzemedeki çatlakın analizine uygulamış ve lineer olmayan enerji yayılım hızının (J) yoldan bağımsız çizgi integrali olarak yazılabileceğini göstermiştir. Hutchinson, Rice ve Rosengren J'nin lineer olmayan malzemelerdeki çatlak ucu gerilmelerini ve şekil değişimlerini tanımladığını da göstermiştir (Anderson, 1995). Böylece J-integrali hem enerji parametresi hem de gerilme şiddeti parametresi olarak görülebilir. J-integrali kavramı sonlu elemanlar kullanılarak yapılan sayısal çözümler için uygundur.



Şekil 4.13 J-integrali hesabı için çatlak ucu çevresindeki keyfi bir yörünge.

Bir çatlak ucunun çevresinde saat ibrelerinin tersi yönünde keyfi bir yörünge ( $\Gamma$ ) düşünölsün (şekil 4.13). J-integrali şu şekilde tanımlanır;

$$J = \int_{\Gamma} \left( w dy - T_i \frac{\partial u_i}{\partial x} ds \right) \quad (4.13)$$

Burada  $w$  şekil değiştirme enerjisi yoğunluğu,  $T_i$  çekme vektörünün bileşenleri,  $u_i$  deplasman vektörünün bileşenleri ve  $ds$ ,  $\Gamma$  yörüngesi boyunca bir uzunluk artışıdır. Şekil değiştirme enerjisi yoğunluğu şu şekilde tanımlanır;

$$w = \int_0^{\varepsilon_{ij}} \sigma_{ij} d\varepsilon_{ij} \quad (4.14)$$

Burada  $\sigma_{ij}$  gerilme tensörü,  $\varepsilon_{ij}$  ise şekil değiştirme tensörüdür. Çekme yörüngeye normal olan bir gerilme vektörüdür. Eğer malzemede yörüngeye içine bir serbest cisim diyagramı çizilecek olursa,  $T_i$  sınırlarda etkiyen normal gerilmeleri tanımlayacaktır. Çekme vektörünün bileşenleri şu şekilde verilir;

$$T_i = \sigma_{ij} n_j \quad (4.15)$$

Burada  $n_j$ ,  $\Gamma$  yörüngesine normal birim vektörün bileşenleridir.

Rice, J-integrali değerinin çatlak etrafında integralin alındığı yoldan bağımsız olduğunu göstermiştir (Anderson, 1995). Bu nedenle J, yoldan bağımsız bir integral olarak tanımlanır.

J-integralinin kullanımını sınırlayan bir sınırlama bulunmaktadır. Önemli derecede plastisiteye sahip malzemelerde yük boşaltımı olmaması gerekmektedir. Çünkü bu konunun başında da belirtildiği gibi elastik plastik davranış gösteren malzemeler nonlinear elastik olarak kabul edilerek çözüm yapılmaktadır. Elastik plastik ve nonlinear elastik malzemelerin yükleme davranışları aynıdır fakat yük boşaltma davranışları farklıdır. Yük boşaltımı olmadığı sürece bu yaklaşımın doğruluğunu gösteren birçok örnek mevcuttur (Anderson, 1995; Broek, 1984).

J, enerji yayılım hızının daha genel bir versiyonudur. Lineer elastik bir malzemede  $J = G$  'dir. Ayrıca lineer elastik mod I yükleme durumu için şu denklem yazılabilir;

$$J = \frac{K_I^2}{E} \quad (4.16)$$

Enerji yayılım hızı kavramı elastik plastik malzemelerde biraz farklı bir anlama sahiptir. Çatlak ilerlerken açığa çıkan enerjiyi tanımlamak yerine, J numunenin birbirini takip eden çatlak boyları ile absorbe ettiği enerjideki değişim ile ilgilidir. Bu fark sadece çatlak ilerlediği zaman önemlidir (Anderson, 1995).

J-integrali, lineer elastik kırılma mekaniğinde K parametresinin çatlak çevresindeki elastik bölgede gerilme yoğunluğunu ifade etmesine benzer biçimde, plastik gerilme ve şekil değişimi yoğunluğunu tanımlar. J-integrali gerilmeye, şekil değişimine, çatlak boyu ve geometrisine ve numune geometrisine bağlıdır (Shukla, 2005).

$G_C$ 'ye benzer biçimde J,  $J_C$  gibi bir kritik değeri geçtiğinde kırılma gerçekleşir. Eğer malzeme lineer elastik ise bu değerler birbirine eşittir ( $J_C = G_C$ ). Mod I yükleme durumunda kırılma olması için J,  $J_{IC}$  kritik değerini aşmamalıdır. Benzer durum mod II ve mod III yükleme durumları için de geçerlidir. Eğer sınırlamalar dikkate alınır J, lineer elastik kırılmada olduğu gibi plastik kırılmada da bir kırılma parametresidir (Broek, 1984). Genel olarak,  $G_{IC}$  ve  $K_{IC}$  kırılma kriteri gereksinimlerini karşılamayan bir malzeme davranışını tanımlamak için  $J_{IC}$  gevrek veya sünek kırılma tokluğu kriteri olarak kullanılabilir (Perez, 2004).

Lineer elastik malzeme davranışında düzlem şekil değiştirme durumunda J'nin kritik değeri ( $J_{IC}$ ) ile düzlem şekil değiştirme kırılma tokluğu değeri  $K_{IC}$  arasında şu ilişki vardır (Gdoutos, 2005);

$$J_{IC} = \frac{1-\nu^2}{E} K_{IC}^2 \quad (4.17)$$

#### 4.5 Kırılma Tokluğu Deneyleri

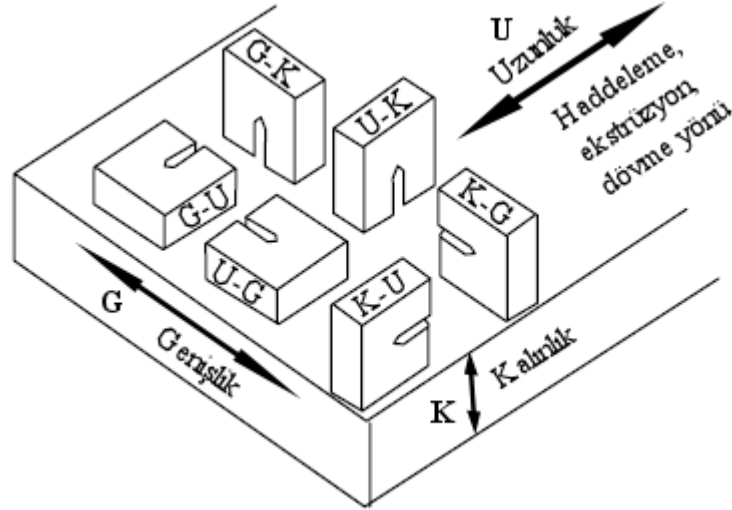
Kırılma tokluğu testleri ile bir malzemenin çatlak ilerlemesine olan direnci ölçülür. Böyle bir testte tek bir kırılma tokluğu değeri elde edilebileceği gibi K, J veya çatlak ucu açılma mesafesi (CTOD) gibi bir kırılma tokluğu değerinin çatlak ilerlemesine karşı çizildiği bir direnç eğrisi de elde edilebilir. Kırılma tokluğu ölçümleri için dünya çapında birçok kurum standartlaştırılmış yöntemler yayınlamaktadır. Bu kurumlar arasında ASTM (American Society for Testing and Materials), BSI (British Standards Institution), ISO (International Organization for Standardization) ve JSME (Japan Society of Mechanical Engineers) bulunmaktadır. K ve J testleri için ilk standartlar ASTM tarafından sırasıyla 1970 ve 1981'de geliştirilmiş, ilk CTOD test yöntemi BSI tarafından 1979'da yayınlanmıştır. ASTM standartları dünya genelinde en yaygın olarak kullanılan standartlardır (Anderson, 1995).

Kırılma tokluğu deneyleri statik ve dinamik olmak üzere iki türlü yükleme durumunda gerçekleştirilir. Ayrıca malzemenin süneklik veya gevrekliğine göre kırılma tokluğu deneyleri lineer elastik ve elastik plastik kırılma tokluğu deneyleri olmak üzere ikiye ayrılır.

Çatlak ilerleme deneylerinde, numune üzerindeki mevcut bir çatlağın statik veya dinamik yükleme sonucunda kararsız olarak ilerlediği koşullar belirlenmektedir. Çatlak durdurma deneylerinde ise gevrek olarak ilerleyen bir çatlağın numune içinde durdurulabilmesi için gerekli sınır koşulları tespit edilmektedir (Yayla, 2007).

Bütün kırılma tokluğu deneylerinin birtakım ortak özellikleri vardır. Deney numunelerinin tasarımı her bir standartta benzerdir. Deney sonuçlarının kalınlıktan ve numunenin geometrisinden bağımsız olmasından emin olmak için deney numunesinin belirlenen minimum ilk çatlak boyu ve numune kalınlığı kriterlerini sağlaması gerekir. Kırılma tokluğu deneylerinde ilk çatlağı numuneye ilave etmek özel bir metotla gerçekleştirilir. Başlangıç çatlağının, çatlak ucunun düz ve numune yüzeylerine dik olması gerekmekte, ayrıca çatlak ucunun keskin olması

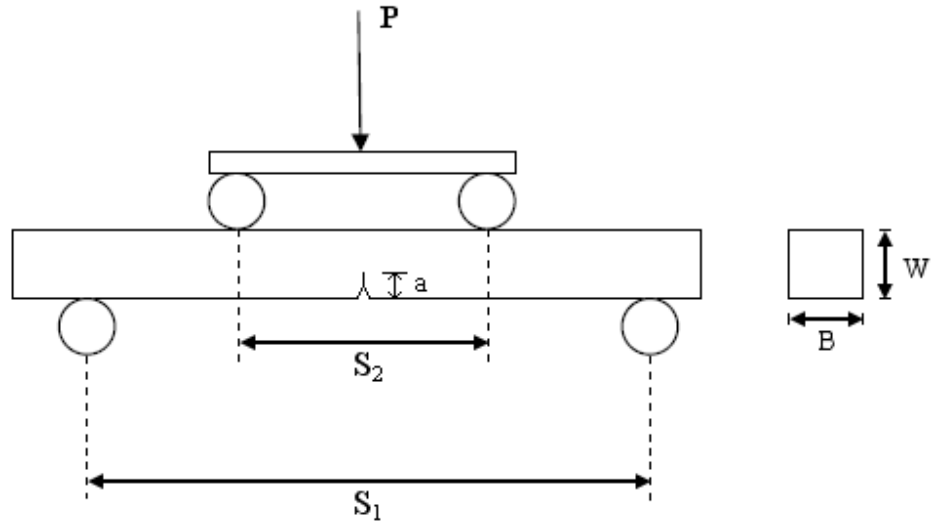
gerekmektedir. Başlangıç çatlığında bu özellikleri elde etmek için en etkili yöntem mevcut çentik uzunluğunun yorulma çatlak ilerlemesi sonucu uzatılmasıdır.



Şekil 4.14 Kırılma tokluğu deneylerinde numunelerin test malzemesinden alınma biçimleri.

Kırılma tokluğu, malzemenin üretimi sırasında ortaya çıkan anizotropisine diğer özelliklerden daha fazla bağlıdır. Bu nedenle numunenin, malzemenin simetri yönlerine göre yönelimi her zaman önemli bir etmendir. Kırılma tokluğu deney numuneleri, test edilecek malzemeden şekil 4.14'teki gibi değişik yönlerde alınarak bu numuneler üzerinde deneyler yapılır. Bu tür anizotropi en fazla haddelenmiş, dövülmüş veya ekstrüzyonla üretilmiş malzemelerde görülür (Yayla, 2007).

Sabit yük (constant load) ve sabit yer değişimi (constant deflection) yöntemleri en yaygın kırılma mekaniği test yöntemlerinden ikisidir. Sabit yük testinde, numuneye bir manivela veya makara sistemi ile sabit ağırlıklı bir yük uygulanır. Bu şekilde test boyunca yük sabit tutulur. Bu yöntem ile daha ziyade çatlak başlama zamanı ve çatlak ilerleme hızının zamana bağlı olarak değişimi belirlenir. Sabit yer değiştirme yönteminde ise kuvvet sabit bir deformasyon hızında parçaya uygulanır. Burada uygulanan kuvvetin artması sonucu çatlak başlaması için gerilme şiddetinin belli bir değeri aşması gerekir. Çatlak başladıktan sonra bir taraftan çatlak ilerlerken bir taraftan da gerilme şiddeti faktörü azalır (Yayla, 2007).



Şekil 4.15 Dört nokta eğme deneyi.

Şekil 4.15'te görülen dört nokta eğme deneyi için kırılma tokluğu değeri,  $K_{IC}$ , şu şekilde hesaplanabilir (van der Laag, 2002);

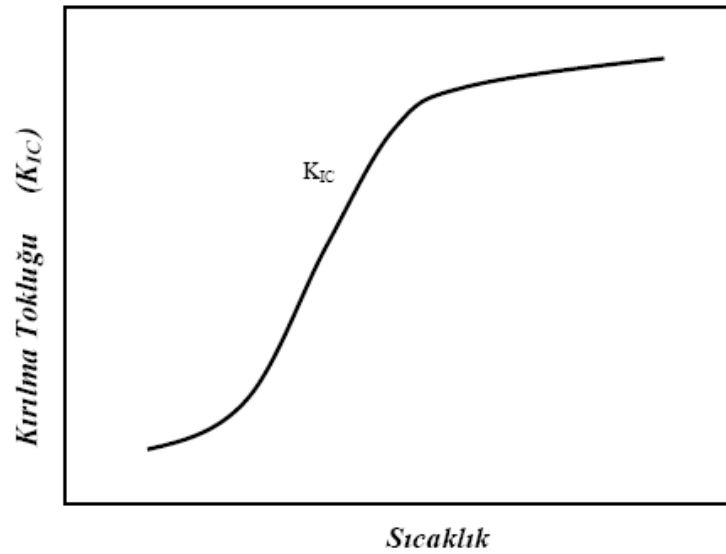
$$K_{IC} = \frac{P(S_1 - S_2)\sqrt{a}}{BW^2} \left[ 1,99 - 2,47 \left( \frac{a}{W} \right) + 12,97 \left( \frac{a}{W} \right)^2 - 23,17 \left( \frac{a}{W} \right)^3 + 24,8 \left( \frac{a}{W} \right)^4 \right]$$

Burada P kırılma kuvvetidir.

#### 4.6 Kırılma Tokluğuna Sıcaklığın Etkisi

Sıcaklık, malzeme özellikleri üzerinde genel olarak önemli ölçüde etkiye sahip olduğu gibi kırılma tokluğu üzerinde de önemli bir etkiye sahiptir. Sıcaklık ve kırılma tokluğu arasındaki ilişki şekil 4.16'da gösterilmektedir.





Şekil 4.16 Geçiş sıcaklığının kırılma tokluğu üzerine etkisi.

Şekil 4.16’da görüleceği gibi  $K_{IC}$ ’nin değeri sıcaklık arttıkça artmaktadır. Bu artışın hızı genellikle sabit olmayıp “geçiş sıcaklığı” denilen belli bir sıcaklığın üzerinde artış belirginleşmektedir. Geçiş sıcaklığının altında çatlak ilerlemesi “gevrek kırılma” şeklinde gerçekleştiğinden daha düşük bir kırılma tokluğuna sahiptir. Geçiş sıcaklığının üzerinde ise kırılma “sünek kırılma” şeklinde olmakta ve kırılma daha yüksek kırılma tokluklarında gerçekleşmektedir. Geçiş bölgesinde kırılmanın makroskobik şeklinde sürekli bir değişim olmaktadır.

Malzemelerde sıcaklığa bağlı olarak görülen kırılma farklılığı bu geçiş bölgesi ile birinden diğerine geçer. Bazı malzemelerde geçiş sıcaklığı çok ani olmakla beraber çoğu malzemede bu geçiş bölgesi belli bir sıcaklık aralığında gerçekleşmektedir. Bu geçiş sıcaklığı bir malzeme karakteristiği değildir. Geçiş sıcaklığı, dolayısıyla taneler arası kırılma duyarlılığı deney numunesinin geometrisine ve test metoduna bağlıdır. Çelikler için geçiş sıcaklığı, parça veya numune kalınlığının, çentik ucu yarıçapının, çentik veya çatlak boyunun ve şekil değiştirme hızının artmasına bağlı olarak artar.

Seramiklerde sünek-gevrek geçiş sıcaklığı oldukça yüksektir. Çeliklerde ise bu malzemenin içerdiği karbon oranına bağlıdır. Tüm alaşımlar bir gevrek-sünek geçişi göstermezler. Genelde karbon miktarı, alaşım elementleri, impuritelere, mikro-yapı,

tane boyutu, üretim yöntemi ve numune yönü gibi parametrelerin tümü malzemenin sünek-gevrek geçiş özelliklerine etki eder (Yayla, 2007).

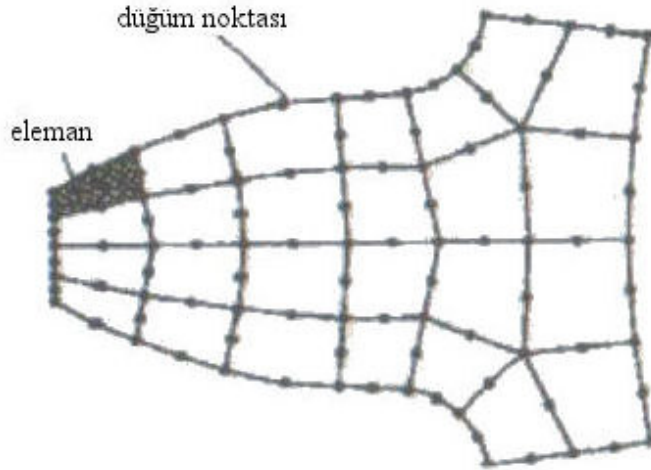
## BÖLÜM BEŞ

### SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ

#### 5.1 Giriş

Sonlu elemanlar yönteminde, incelenen yapı eleman olarak adlandırılan ayrı şekillere bölünmektedir. Eleman tipleri bir boyutlu kirişleri, iki boyutlu düzlem gerilme veya düzlem şekil değiştirme elemanlarını veya üç boyutlu birimleri içerebilir. Elemanlar birbirlerine düğüm noktalarında bağlanırlar ve bu noktalar ile yer değiştirme alanlarının devamlılığı sağlanır. Yapının boyutları elemanın boyutlarına karşılık gelmek zorunda değildir. Örneğin üç boyutlu bir kafes, kiriş elemanlardan oluşturulabilir.

Bir boyutlu yapılar düğümlerle, iki ve üç boyutlu yapılar düğümler, çizgiler ve düzlemlerle sonlu elemanlara bölünür. Bir boyutlu yapılarda oluşturulan elemanlar eşit olmayan uzunluklara sahip olabilir, iki ve üç boyutlu elemanlar da farklı boylara sahip olabileceği gibi farklı şekillere de sahip olabilirler. Her durumda elemanlar düğümlerle birleşmektedirler. Sonlu elemanlar analizinde, incelenen yapı sonlu elemanların oluşturduğu bir sistemle yer değiştirmektedir.



Şekil 5.1 Bir sonlu eleman modelinde düğüm noktaları ve elemanlar.

Bu analiz yönteminde, incelenen yapıyı eleman ve düğümlere bölmekten sonraki adım her elemanın “eleman direngenlik matris”ini belirlemektir. Her eleman için bu matris belirlendikten sonra bunlar birleştirilerek “global direngenlik matrisi” oluşturulur. Ayrıca bütün düğümlerdeki yer değiştirme ve kuvvetlerde hesaba katılarak şu denklem ortaya çıkar;

$$[K]\{\delta\} = \{P\} \quad (5.1)$$

Burada [K] incelenen cismin global direngenlik matrisi; {P}, bütün düğümlere uygulanan dış kuvvetleri içeren kuvvet vektörü; {δ} ise bütün düğümlerdeki yer değiştirmeleri içeren yer değiştirme vektörüdür. Bu denklem incelendiğinde [K]’nın cismin birim şekil değiştirmesini sağlamak için gerekli olan kuvveti ifade ettiği anlaşılmaktadır. Bu nedenle, cismin sonlu eleman modeli eşdeğer bir yay olarak düşünülürse, [K] yayın direngenliğini gösteren bir sabit olacaktır. Sınır koşulları ve cisme etkileyen kuvvetlerin verilmesi halinde düğümlerin yer değiştirmeleri, {δ}, bu denklem ile hesaplanabilir. Yer değiştirmelerden de cisim içerisindeki gerilmeler ve şekil değiştirmeler hesaplanabilir.

Verilen bir problemin sonlu elemanlar yöntemiyle çözümü özetlenen şu adımların sırayla uygulanmasıyla gerçekleşecektir;

- Problemin sonlu elemanlara bölünmesi ve düğümlerin belirlenmesi.
- Eleman direngenlik matrislerinin ve her elemanın kendine özgü özelliklerinin elde edilmesi.
- Global direngenlik matrisinin [K] ve kuvvet vektörünün {P} oluşturulması.
- Denklem (5.1)’in sınır koşullarıyla çözümlenerek yer değiştirme vektörünün {δ} bulunması.
- Düğümlerin yer değiştirme vektöründen {δ}, elemanlardaki gerilme ve şekil değiştirmelerin hesaplanması.

Bilimsel ve mühendislik problemleri büyük boyutlu [K] matrislerinin kullanımını gerektirir, bu nedenle (5.1) denkleminin bilgisayar ile çözülmesi kaçınılmaz hale

gelmektedir. Çok sayıdaki işlemi otomatikleştirmek için basit programlar yazılabilir. Sonlu elemanlar yöntemi, otomatik hesaplama ile birlikte, diğer yöntemlerle çözümü çok zor hatta imkansız olan karmaşık fiziksel problemleri tam olarak çözmek için çok etkili ve mükemmel bir çözüm oluşturur.

## 5.2 Gerilmelerin Hesaplanması

Bir boyutlu durumda elastisite modülü E'ye benzer şekilde, Hooke kanununun üç boyutlu versiyonunda elastisite matrisi, D, kullanılır. Her düğümdeki gerilmeleri veren ifade şu şekildedir;

$$\{\sigma\} = [D]\{\varepsilon\} \quad (5.2)$$

Burada  $\{\sigma\}$  gerilme vektörüdür ve bileşenleri şu şekilde verilir;

$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{xz} \end{bmatrix} \quad (5.3)$$

6x6'lık D matrisinin bileşenleri (5.4) denkleminde gösterilmiştir ve elastisite modülü, E ve poisson oranı,  $\nu$ , olmak üzere sadece iki bağımsız sabit içerir. D matrisi şu şekilde yazılabilir;

$$D = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,5-\nu & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0,5-\nu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,5-\nu \end{bmatrix} \quad (5.4)$$

### 5.3 Sıcaklık Etkisi

Eğer çözüm bölgesindeki sıcaklık dağılımında,  $\Delta T(x,y)$ , bir değişim varsa, bu değişimden kaynaklanan şekil değiştirmeler başlangıç şekil değiştirmesi ( $\varepsilon_0$ ) olarak tanımlanabilir. Başlangıç şekil değiştirmesi düzlem gerilme durumunda şu şekildedir;

$$\varepsilon_0 = \{\alpha\Delta T \quad \alpha\Delta T \quad 0\}^T \quad (5.5)$$

Burada  $\alpha$  ısı genleşme katsayısıdır. Başlangıç şekil değiştirmesi düzlem şekil değiştirme durumu için ise şöyledir;

$$\varepsilon_0 = (1+\nu)\{\alpha\Delta T \quad \alpha\Delta T \quad 0\}^T \quad (5.6)$$

Gerilme ve şekil değiştirmeler arasındaki ilişki ise şu şekilde olur;

$$\{\sigma\} = [D](\{\varepsilon\} - \{\varepsilon_0\}) \quad (5.7)$$

### 5.4 J-integralinin Sonlu Elemanlar Yöntemi Kullanılarak Hesaplanması

Uygun şekil değiştirmeli bir sonlu eleman modeli kullanılarak, çatlaklı bir elastik cismin potansiyel enerjisi şu şekilde hesaplanabilir;

$$U_p = \frac{1}{2}\{u^T\}[K]\{u\} - \{u^T\}\{F\} \quad (5.8)$$

Burada  $\{u\}$  ve  $\{u\}^T$  sırasıyla düğüm şekil değiştirmeleri vektörü ve onun transpozu,  $\{F\}$  düğümlere uygulanan kuvvetler vektörü ve  $[K]$  elastik direngenlik matrisidir. Düğüm şekil değiştirmeleri,  $\{u\}$ , için çözülmesi gereken sonlu eleman denklemi şöyle verilir;

$$\frac{\partial U_p}{\partial \{u\}} = [K]\{u\} - \{F\} = 0 \quad (5.9)$$

a uzunluğundaki bir çatlak için potansiyel enerji yayılım hızı  $-\partial U_p / \partial a$  'dır; bu J-integraline eşittir. Denklem (5.8)'in türevi alınır;

$$J = - \left( \frac{\partial U_p}{\partial a} \right) = - \frac{1}{2} \{u\}^T \frac{\partial [K]}{\partial a} \{u\} + \{u\}^T \frac{\partial \{F\}}{\partial a} - \frac{\partial \{u\}^T}{\partial a} \{ [K]\{u\} - \{F\} \} \quad (5.10)$$

(5.10) denklemini (5.9) denklemini ile birleştirilirse şu şekle gelir;

$$J = - \frac{1}{2} \{u\}^T \frac{\partial [K]}{\partial a} \{u\} + \{u\}^T \frac{\partial \{F\}}{\partial a} \quad (5.11)$$

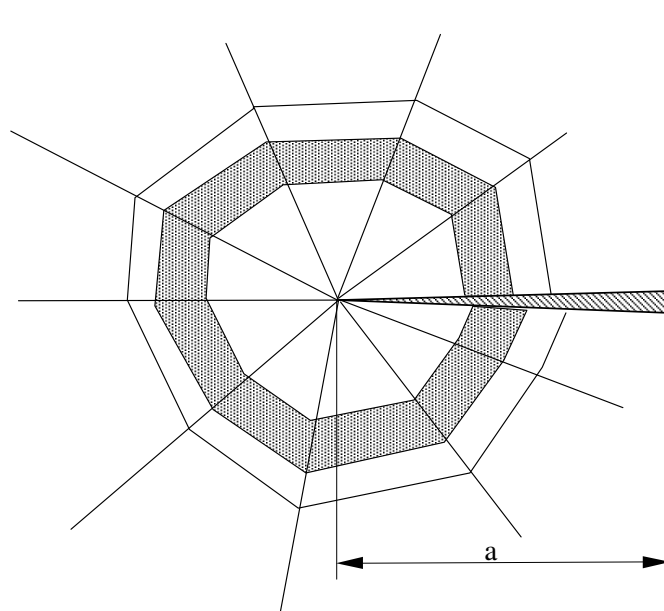
Denklem (5.11)'deki türevler sonlu farklar yöntemiyle ifade edildiğinde;

$$\frac{\partial [K]}{\partial a} = \frac{\Delta [K]}{\Delta a} = \frac{[K]_{a+\Delta a} - [K]_a}{\Delta a} \quad (5.12)$$

$$\frac{\partial \{F\}}{\partial a} = \frac{\Delta \{F\}}{\Delta a} = \frac{\{F\}_{a+\Delta a} - \{F\}_a}{\Delta a} \quad (5.13)$$

elde edilir. Burada  $\Delta a$  uzunluktaki küçük bir artış,  $[K]_a$  ve  $[K]_{a+\Delta a}$  ise sırasıyla “a” ve “a+ $\Delta a$ ” uzunluğundaki çatlaklar için direngenlik matrisleridir. Bu yöntem sonlu elemanlar modelinden J değerini elde etmede basit bir yol sağlar. Bu teknik genellikle Virtüel Çatlak İlerlemesi olarak bilinir. Metod şu şekilde uygulanmaktadır. Öncelikle çatlaklı yapı deplasmanları  $\{u\}$  elde edecek şekilde klasik yoldan çözülmekte, daha sonra çatlak boyuna küçük bir artım verilerek yeni bir çözüm elde edilmektedir. İkinci çözüm için iki yöntem önerilmektedir. Bunlardan birinde çatlak ilerlemesi çatlak ucu civarındaki bir halkayı oluşturan elemanların rijit bir şekilde hareket ettirilmesi şeklinde yapılmaktadır. Buna göre yalnızca halkayı oluşturan

elemanlar şekil değiştirmektedir. Örnek bir eleman halkası şekil 5.2'deki taralı elemanlar olarak gösterilmiştir. Bu durumda şekil değiştiren halka dışındaki bütün elemanlar aynı kalmakta ve ikinci hesap yalnızca bu halkayı oluşturan elemanlar için yapılmaktadır. Dışarıdaki elemanlar için  $\partial[K]/\partial a = 0$  olmaktadır. Denklemlerde verilen çarpma işlemleri de küçük matris ve vektörlerle halledilmiş olmaktadır. Diğer yöntemde ise, çatlak ucuna karşılık gelen düğümün koordinatları çatlak boyunca küçük artışa sebep olacak şekilde ilerletilmektedir. Bu durumda direngenliği değişen elemanlar yalnızca bu düğümüne sahip olan elemanlar olmaktadır. Bu ikinci yöntem daha kolay olmakla beraber çatlak ucunda plastik deformasyon oluşan yükleme durumlarında uygulanamaz (Topçu, b.t.).



Şekil 5.2 J-integral hesabında kullanılan eleman halkası.



## BÖLÜM ALTI

### ARA YÜZEY KRİTİK J-İNTEGRALİ ( $J_{IC}$ ) TAYİNİ

Bu çalışmada metal-seramik diş kaplamalarında kullanılan Ni-Cr ve opak malzemeleri birleşme ara yüzeyine ait kritik J-integrali ( $J_{IC}$ ) değeri elde edilmiştir.  $J_{IC}$  değeri kırılma mekaniğinde en önemli karşılaştırma parametresi olup kırılma anında çatlak açılması ile açığa çıkan mekanik enerjiyi ifade eder.  $J_{IC}$ , malzemelerin veya malzeme çiftlerinin boyutlarından bağımsız karakteristik bir özelliğidir. Herhangi bir çatlaklı geometride çatlak açılması ve kırılma olması için, çatlak civarında hesaplanan  $J_I$  değerinin malzemeye ait (ara yüzeyde ise malzeme çiftine ait)  $J_{IC}$  karakteristik değerini geçmesi gerekir. Bu çalışmada ele alınan malzeme çifti açısından geliştirilen yöntem bu konuda önem arz etmekte ve gelecekte yapılabilecek çalışmalara bir yol göstericilik niteliği taşımaktadır.

#### 6.1 Yöntemin Genel Hatları

İki malzeme ara yüzeyinde oluşan  $J_{IC}$  değeri deneysel ve sonlu elemanlar yöntemi birlikte kullanılarak tespit edilmiştir. Öncelikle iki malzemenin kullanıldığı ve ara yüzeye sahip çatlaklı numuneler tasarlanmış ve üretilmiştir. Daha sonra bu numuneler dört nokta eğme deneyine tabi tutulmuş ve kırılma anında oluşan yükler tespit edilmiştir. İkinci aşamada ise ABAQUS programında numunelerin sonlu elemanlar modelleri kurulmuş ve deneysel olarak bulunan kırılma anındaki yükler bu modellere uygulanarak J-integrali değerleri hesaplanmıştır. Bu J-integrali değerleri, kırılma anındaki kritik yük uygulanarak hesaplandığından dolayı kritik J-integrali ( $J_{IC}$ ) değerlerine karşılık gelmektedir. Kullandığımız yöntem, çatlak açılmasını deneysel olarak ölçmeye gerek bırakmadığından dolayı ara yüzey çatlakları için avantajlıdır. Fakat sonuçların doğruluğu için fazla sayıda deney yapmak gerekmektedir.

Numune üretiminde Ni-Cr, porselen ve ara yüzey opak malzemesi olmak üzere üç temel malzeme kullanılmıştır. Ni-Cr alaşımının kompozisyonu şöyledir; %65,2 Ni, %22.5 Cr, %9.5 Mo, <%2 Fe-Si-Mn-Nb. Ara yüzeyde tutuculuğu sağlayan opak

malzemesinin özellikleri de porselen ile aynı alınabilmektedir. Bu malzemelerin analizlerde kullanılan elastik özellikleri tablo 6.1’de gösterilmiştir.

Tablo 6.1 Kırılma mekaniği çalışmalarında kullanılan malzemelerin elastik özellikleri

	Bellabond Plus / Bego (Ni-Cr)	IPS-Inline/Ivoclar (Porselen)
Elastisite Modülü E (GPa)	200	70
Poisson Oranı $\nu$	0,27	0,2

## 6.2 Çalışmada Karşılaşılan Engeller

Bu konuda karşılaştığımız en büyük engeller dört nokta eğme deneyine tabi tutulan çatlaklı numunelerin hazırlanması ile ilgilidir. Bu engeller kısaca şu şekilde özetlenebilir:

- Numuneler hazırlanan kalıpla birlikte fırımlandığında kalıptan çıkarılamamıştır.
- Kalıbın çeperlerine sürülen ve yapışmayı engelleyeceği düşünülen maddelerin faydası olmamıştır.
- Fırınlamadan önce numunelerin kalıptan çıkarılması başarılı ve bu şekilde fırına sokulmuşlardır. Ancak ara yüzey çatlağı için kullanılan jiletlerin fırın içinde birbirlerinden ayrıldığı ve yüzeylerin kapandığı görülmüştür.
- Jilet yerine platin folyoların kullanımı uygun görülmüştür. Ancak bu malzeme çok pahalı ve nadir bulunduğu için çok kısıtlı oranda kullanılabilmiştir. Platin folyo yerine ince (~0,05mm) paslanmaz çelik folyoların kullanılmasına karar verilmiş ve bu şekilde bu sorun aşılmıştır.
- Standart pişirme sonucunda porselen kütledeki aşırı büzülme (boyutta küçülme ve şekildeki çarpıklıklar), istenen numune boyutlarının elde edilememesine sebep olmuştur. Bu durumda daha büyük kalıp hazırlatılarak çekme payları da bırakılmıştır. Ancak şekildeki çarpıklıklar devam etmiş,

bunu gidermek için sonradan yapılan traşlamalar numunelerde hasarlara sebep olmuştur.

- Porselen kısımdaki şekil çarpıklıklarını oluşumu, fırında kademeli ısıtma ve yavaş soğutma işlemleri ile aşılmıştır.

Tüm bu engeller aşılarak geliştirdiğimiz yöntemle istenen numunelerin hazırlanması sağlanmıştır. Numune üretimi, yapılan deneyler ve analizler aşağıda detaylı olarak anlatılmaktadır.

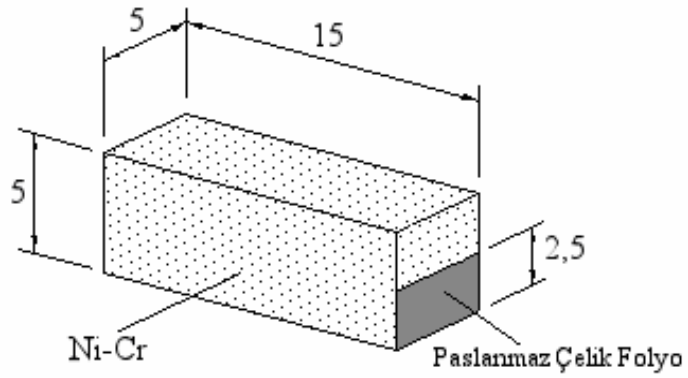
### **6.3 Deneysel Çalışma**

#### ***6.3.1 Dört Nokta Eğme Deneyi İçin Numune Üretimi***

Ara yüzey çatlaklı numunelerin 5x5x30mm boyutlarında olması tasarlanmıştır. Numunenin yarısı Ni-Cr malzemedен ve diğer yarısı porselen malzemedен oluşmakta ara yüzeyde ise çatlak bırakılmaktadır. Aşağıda numune üretimi adımları sırasıyla anlatılmıştır.

##### ***6.3.1.1 Ni-Cr Blokların Hazırlanması***

Numunenin yarısını oluşturan kare kesitli Ni-Cr bloğu (şekil 6.1), firmalar tarafından ekstrüzyon ile üretilen silindirik Ni-Cr çekirdeklerinin freze tezgahında işlenmesi suretiyle istenilen boyutlara (5x5x15 mm) getirilir. Uygulamada alt destek yapıları laboratuvarlarda bu çekirdeklerin dökülmesiyle elde edilir. Ni-Cr malzemenin döküm yöntemi yerine freze tezgahında talaşlı imalat yöntemiyle işlenmesinin sebebi ise dökümde oluşabilecek boşluk gibi malzeme hatalarının önüne geçmek ve daha sağlıklı bir iç yapı elde etmektir.

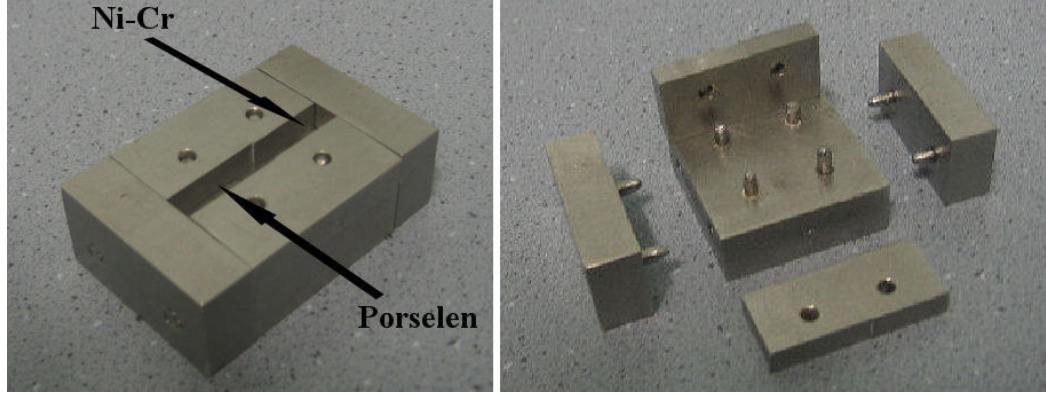


Şekil 6.1 Ni-Cr bloğu.

Hazırlanan bu kare kesitli Ni-Cr blokları uygulamalarda olduğu gibi opağa daha iyi tutunabilmesi için öncelikle kumlama işlemine ve sonra 600°C de 2 dakikalık bir ön tavlama işlemine tabi tutulur. Kesit yüzeylerinden birisinin yarısına (2.5x5 mm), japon yapıştırıcı ile mümkün olduğunca ince olan (~0.05mm) paslanmaz çelik folyo yapıştırılır. Kesitin diğer yarısına opak sürülür. Opağın folyo altına taşmaması için folyonun çok iyi yapıştırılmış olmasına dikkat edilir. Opağın bir miktar folyonun üstüne taşması ise önemli değildir. Bu haliyle hazırlanan Ni-Cr bloklar öncelikle opak pişirme programında, 930°C’de 2 dakika süreyle ve diğer kesit yüzeyi zemine oturacak şekilde yani dik vaziyette pişirilir. Böylece Ni-Cr bloğun kesitinin yarısında, opak katılmış halde kalır. Bu durumda folyoyu tutan Japon yapıştırıcısı 250°C’de buharlaşıp kaybolduğundan, folyo serbest kalır. Opak pişirme işleminden sonra aynı folyo, aynı yere japon yapıştırıcı ile tekrar yapıştırılır. Böylece Ni-Cr kesitinin yarısı folyolu yarısı ise opaklı halde üretilmiş olur.

### 6.3.1.2 Kalıp Hazırlanması

Numunenin diğer yarısında yer alacak porselen blok ancak kalıpta dökülmek suretiyle hazırlanabilir. Bunun için bir kısmına hazırlama şekli yukarıda anlatılan Ni-Cr bloğun, diğer kısmına ise porselen bloğun sığacağı şekilde metal veya başka bir malzemedeki bir kalıp hazırlanmalıdır. Kalıp fırına girmeyeceği için malzemesi önemli değildir. Bu kalıpta porselenin döküleceği kısım çekme paylarını göz önüne alarak bir miktar geniş tutulur. Numunenin rahat çıkması için kalıp parçalar halinde yapılır (şekil 6.2).



Şekil 6.2 Kırılma numuneleri için üretilmiş kalıp.

### 6.3.1.3 Fırınlama Öncesi Numune Hazırlanması

Kalıbın bir tarafına daha önceden hazırlanmış olan şekil 6.1’de gösterilen Ni-Cr blok yerleştirilir. Ni-Cr bloğun folyolu ve opaklı kesiti porselenle yapışacağı için kalıbın içine bakmalıdır. Porselen ve sıvısı dışarıda karıştırılarak hamur kıvamına getirilir, kalıbın diğer kısmına iyice doldurulur ve sıkıştırılır. Kenarlardaki taşmalar temizlenir. Özellikle Ni-Cr bloğunun kesitiyle yapışmanın iyi sağlanabilmesi için bu bölgede porselen hamurunun iyice doldurulmasına ve sıkıştırılmasına dikkat edilmelidir. Hamur içinde boşlukların kalmaması için kalıba ufak bir titreşim uygulanabilir. Porselen hamuru iyice doldurulurken fazla gelen su bir peçeteye veya süngere emdirilebilir. Sonunda ise kalıp içinde Ni-Cr ve porselen kısımlardan oluşan numunemiz ham ve soğuk haldedir. Bu halde iken kalıp parçaları ayrılarak, her iki kısmın alın yüzeylerinin birbiriyle teması korunacak şekilde ve bir bütün halinde numune kalıptan çıkarılır ve dikkatli bir şekilde fırına yerleştirilir.

### 6.3.1.4 Pişirme İşlemi ve Deney Numunelerinin Elde Edilmesi

Kalıptan bir bütün olarak çıkarılan ve fırına yerleştirilen numunemize asıl pişirme işlemi uygulanır. Pişirme işlemlerinin uygulandığı fırın şekil 6.4’te gösterilmiştir. Pişirme sırasında homojen bir sıcaklık dağılımı olması ve soğuma sırasında aşırı büzülme olmaması istenir. Bu amaçla kademeli ısıtma ve çok yavaş soğutma uygulanır (şekil 6.3).



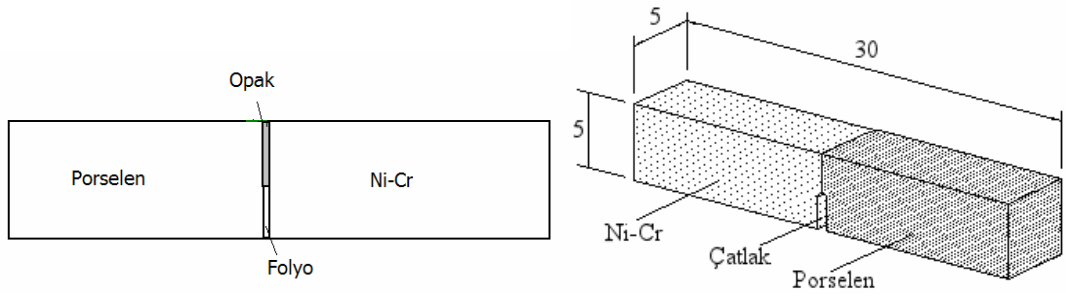
Şekil 6.3 Kademeli ısıtma programından bir görünüş.



Şekil 6.4 Kullanılan porselen fırını (Ivoclar Vivadent, Programat P300).

Fırın sıcaklığı dakikada  $30^{\circ}\text{C}$  olmak üzere  $690^{\circ}\text{C}$ 'ye çıkarılır, bu sıcaklıkta 15 dakikalık bir süreyle beklenir, sonra yine aynı ısıtma hızında  $910^{\circ}\text{C}$ 'ye çıkartılarak burada da 1 dakika beklenir. Standart pişirme programlarında soğutma işlemi bundan sonra kapağın yavaşça açılması ve numunenin kısa bir sürede ortam sıcaklığına ulaşmasıyla gerçekleştirilmektedir. Bizim kullandığımız fırın programında ise soğutma kapak açılmadan, fırın sıcaklığının dakikada  $5^{\circ}\text{C}$  düşürülmesiyle sağlanmıştır. Kapak, fırın sıcaklığı  $50^{\circ}\text{C}$ 'ye geldiğinde açılmaktadır.

Sıcaklığın artması ile birlikte japon yapıştırıcı kaybolacağından folyo ile Ni-Cr arasında yapışma bağlantısı kalmaz, sadece temas kalır. Bu durumda Ni-Cr alın yüzeyinden sadece opak ile porselen bloğa bağlı kalır. Folyo porcelene yapışmış olsa bile Ni-Cr bloğuna yapışmadığı için opak ile Ni-Cr arasında keskin çatlak meydana gelmiş olur (şekil 6.5).

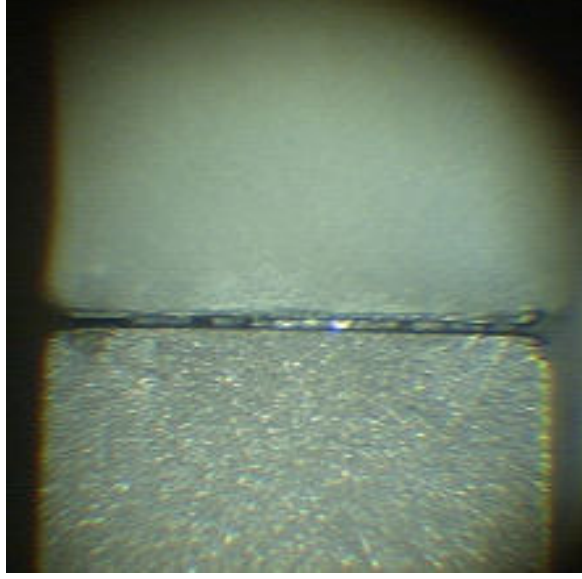


Şekil 6.5 Dört nokta eğme numunelerinin geometrisi.

Bu haliyle elde edilen numunelerde (şekil 6.6) Ni-Cr opak ile yapışık, folyo ile sadece temasta olduğundan ve ayrıca opağın özellikleri porselenle aynı alınabileceğinden folyonun bulunduğu kısım Ni-Cr ile porselen arasındaki süreksiz bölge yani çatlak bölgesi olarak değerlendirilmelidir. Ni-Cr ile porselen arasındaki çatlak bölgesinin mikroskop görüntüsü şekil 6.7’de görülmektedir.



Şekil 6.6 Hazırlanmış üç adet ara yüzey çatlaklı numune.



Şekil 6.7 Numunelerdeki çatlağın mikroskop görüntüsü.

Fırın içinde birden fazla numune aynı anda pişirilebilir. Ancak çok fazla numune olduğunda homojen bir sıcaklık dağılımı sağlanamayabilir. Bu nedenle en fazla 4 veya 5 numune aynı anda pişirilebilir. Numuneler yatay vaziyette pişirilebildiği gibi alın yüzeylerinin pişirme sırasında iyice kaynaması için belli bir eğimli yüzeyin üzerine koyularak da pişirilebilir.

### **6.3.2 Dört Nokta Eğme Deneyi**

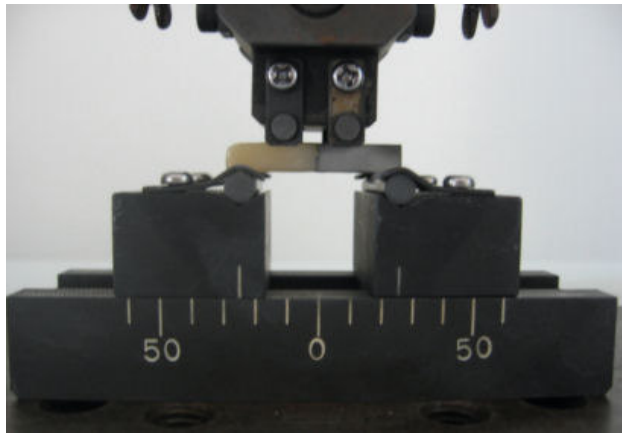
Üretilen 11 adet numuneye dört nokta eğme deneyi uygulanmış ve her bir numunenin kırılma yükü bulunmuştur. Deneyler Dokuz Eylül Üniversitesi Tıp Fakültesi Biyomekanik Laboratuvarında bulunan 10 kN kapasiteli ve bilgisayar ile kontrol edilen universal çeki-bası cihazı ile yapılmıştır (şekil 6.8).





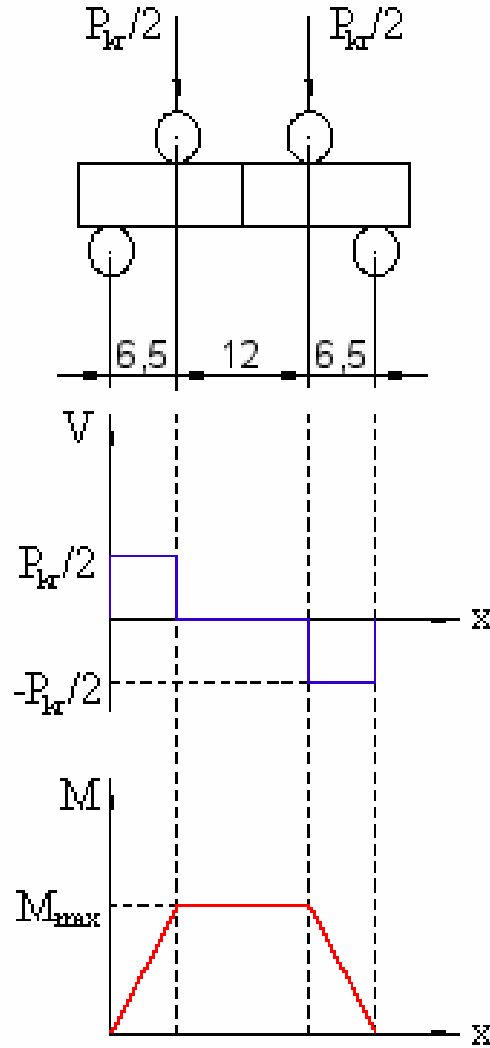
Şekil 6.8 Dört nokta eğme deneyinin yapıldığı universal çeki-bası cihazı.

Cihaza dört nokta eğme deneyi aparatı bağlanmış ve deneyler bu aparat kullanılarak yapılmıştır (şekil 6.9).



Şekil 6.9 Numune üzerinde dört nokta eğme deneyinin uygulanması.

Numune üzerine yük, eşit olarak, aralarındaki mesafe 12 mm olan iki noktadan uygulanmaktadır ve aralarındaki mesafe 25 mm olan iki nokta mesnet görevi görmektedir. Yük ve mesnetler şekil 6.9'da görüldüğü gibi aparattaki silindirik parçalar tarafından uygulanmaktadır. Cihazın üst kısmının ilerleme hızı 0.5 mm/dak'dır.



Şekil 6.10 Dört nokta eğme deneyinin teorik olarak ifadesi.

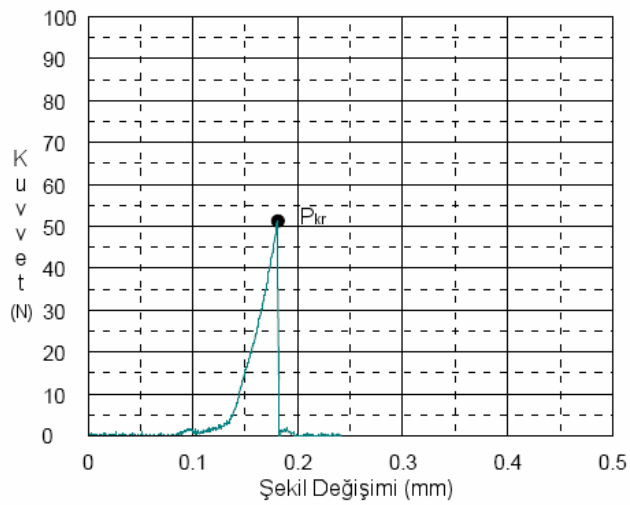
Şekil 6.10'da görüldüğü gibi dört nokta eğme deneyinde maksimum moment değeri belirli bir aralıkta sabit kalır. Böylece çatlak etrafındaki bölgede maksimum moment değeri kolayca elde edilmiş olur. Numunenin yerleştirilmesinden kaynaklanacak hatalar bu şekilde tolere edilmiş olur. Bu durum dört nokta eğme

deneyinin sağlamış olduğu avantajlardandır. Yapılan 11 adet deneyden elde edilen kırılma kuvvetleri aşağıdaki gibidir.

Tablo 6.2 Dört nokta eğme numunelerinin kırılma kuvvetleri

Numune Numarası	Kırılma Kuvveti ( $P_{kr}$ ) N
1	51,25
2	43,44
3	48,13
4	42,81
5	53,28
6	42,81
7	40,94
8	41,57
9	55,16
10	51,87
11	52,03

Numunelerin kırılma kuvvetleri dört nokta eğme deneylerinin kuvvet-şekil değişimi ( $P-\delta$ ) grafiklerinden elde edilmiştir. Örnek olarak şekil 6.11’de birinci numunenin kuvvet-şekil değişimi grafiği verilmiştir.



Şekil 6.11 Birinci numunenin kuvvet-şekil değişimi grafiği.

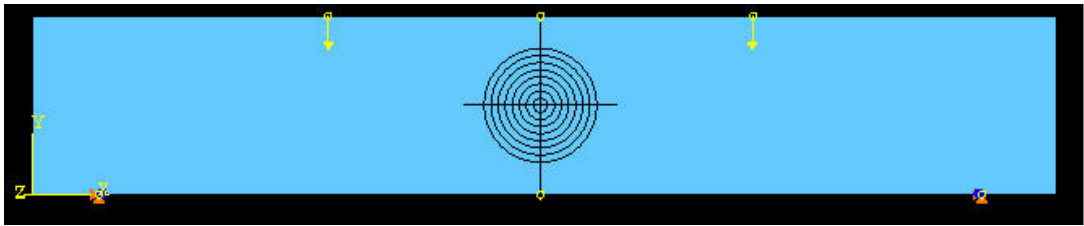
Bir numunenin kırıldıktan sonraki görünümü şekil 6.12’de görülmektedir. Bu şekilde çatlak kısmı üst taraftır ve folyo porselene yapışık durumdadır.



Şekil 6.12 Bir numunenin kırıldıktan sonraki hali.

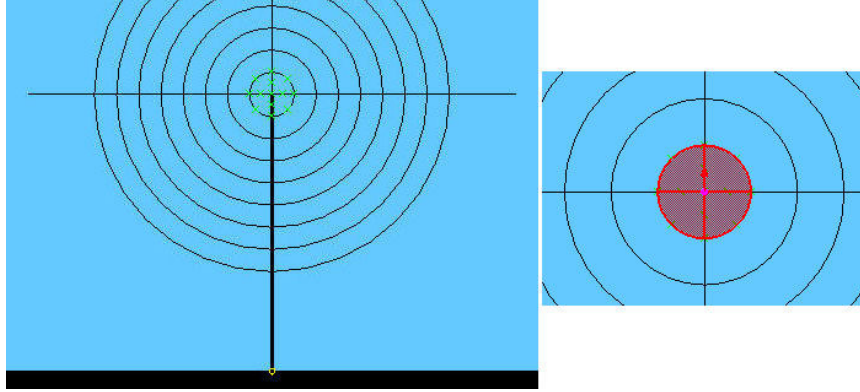
#### 6.4 Sonlu Elemanlar Analizi ile $J_{IC}$ Hesabı

Üretilen her bir numune sonlu elemanlar yazılımı ABAQUS 6.6-1 programında modellenerek, aynı sınır şartlarında kırılma kuvvetleri uygulanmış ve J-integrali değerleri hesaplanmıştır.



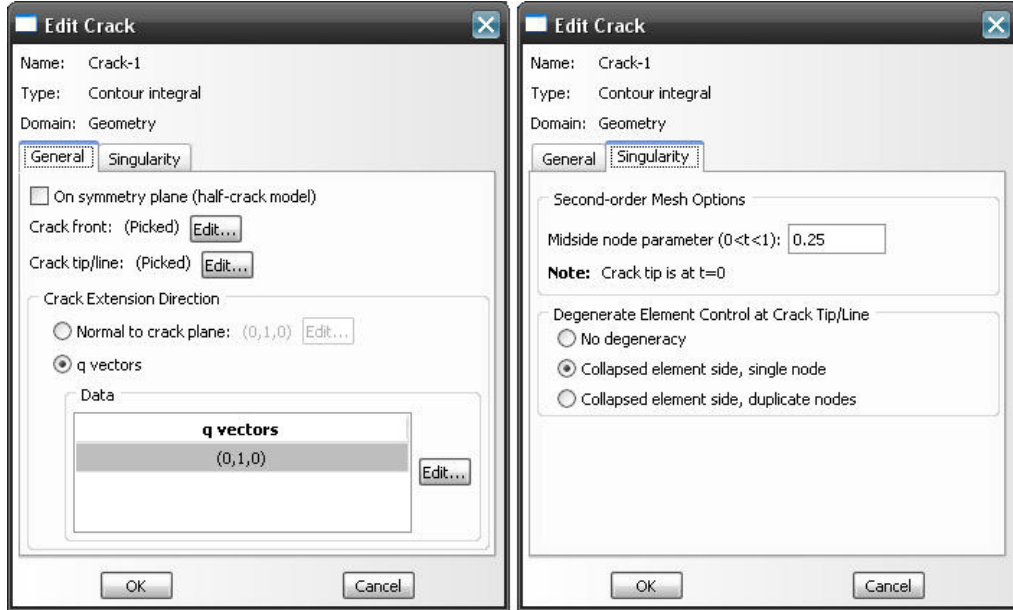
Şekil 6.13 Dört nokta eğme deneyi modeli ve sınır şartları.

Numuneler iki boyutlu olarak modellenmiştir. Çatlak ABAQUS programının gerektirdiği şekilde tanımlanmıştır. Şekil 6.14’teki dairelerin merkezi çatlakın uç kısmıdır. Şekildeki koyu siyah çizgi dikiştir (seam). Bu çizgi boyunca malzemenin iki yüzeyi arasında bağlantı yoktur. Çatlakın ilerleme yönü yukarı doğrudur.



Şekil 6.14 Modeldeki çatlak ve çatlağın ilerleme yönü.

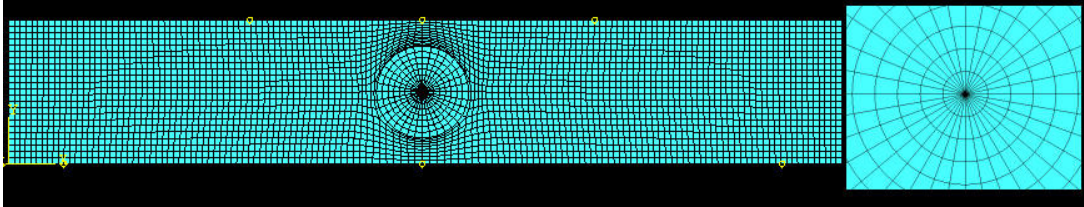
Çatlak oluşturulurken yapılan ayarlar şekil 6.15'te gösterilmektedir. Tekillik (singularity) özelliğinin kullanılma nedeni küçük şekil değiştirmeli bir analiz yapılması ve lineer olmayan bir geometri bulunmamasıdır. Elastik bir kırılma mekaniği analizi yapıldığı için tekillik sekmesinde gerekli ayarlar yapılmıştır.



Şekil 6.15 ABAQUS programında yapılan çatlak ayarları.

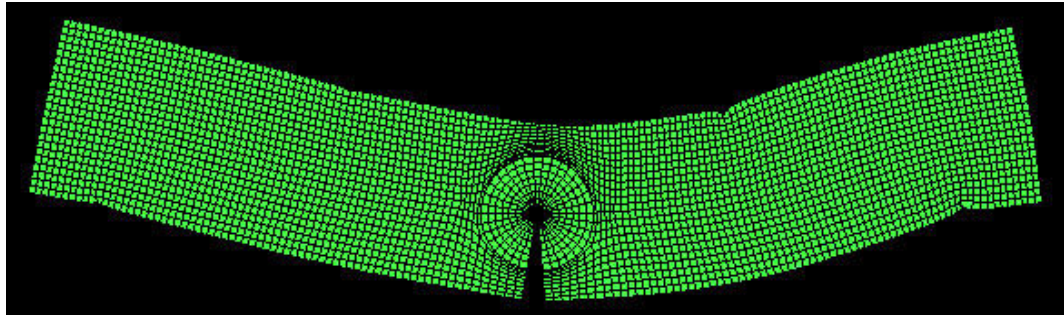
Çatlağın uç kısmı çevresinde dairelerin oluşturulma sebebi bu kısımlara modelin diğer kısımlardan farklı bir şekilde elemanlara ayırma işlemi uygulanacak olmasıdır. Dairesel bölgede kullanılan eleman şekilleri farklıdır. Sonlu elemanlar çözümlerinde J-integrali hesaplanırken iç dairedeki elemanlar üçgen şeklinde olmak zorundadır.

Programda dairelerin Mesh Controls özelliği (Quad-dominated, Sweep) olarak, diğer bölgeler için ise (Quad, Free, Medial Axis) olarak seçilmiştir. Numunenin tamamı düzlem deformasyon durumunu içeren bir eleman tipi (CPE8) kullanılarak ve kalınlık verilerek modellenmiştir.



Şekil 6.16 Elemanlara ayrılmış model.

Numunede sonuçların daha hassas elde edilebilmesi amacıyla mesh boyutu küçük tutulmuştur.



Şekil 6.17 Çözüm yapıldıktan sonra numunenin deforme olmuş hali (gösterim orantılı değildir).

J-integrali değerleri her numune için çatlak etrafındaki 10 yörüngede hesaplanmıştır. Kırılma mekaniği analizlerinden elde edilen sonuçlar ve değerlendirmeler yedinci bölümde yer almaktadır.

Sonuçlar bulunduktan sonra kontrol amaçlı olarak bir numune üç boyutlu olarak modellenerek çözümü yapılmış ve iki boyutlu çözüm ile sonuçların çok yakın olduğu gözlenmiştir.

## BÖLÜM YEDİ

### SONUÇLAR VE YORUMLAR

Her numune için J-integrali değerleri çatlak etrafındaki 10 yörüngede hesaplanmış ve bu yörüngelerden bulunan sonuçların birbirine çok yakın olduğu görülmüştür. Çözümler yapıldıktan sonra her numune için bulunan J-integrali değerleri tablo 7.1’de verilmiştir.

Tablo 7.1 Ni-Cr / porselen ara yüzeyi için  $J_{IC}$  değerleri

Numune Numarası	$J_{IC}$ ( $\times 10^{-6}$ N/mm)
1	72,04
2	79,17
3	74,31
4	69,96
5	85,57
6	71,68
7	74,29
8	76,06
9	101,16
10	101,96
11	96,48
<b>Ortalama</b>	<b>82,06</b>

Bu çalışmada bulunan sonuçlar itibariyle, ara yüzeyde ortaya çıkan  $J_{IC}$  değerlerinin oldukça düşük olması kırılma açısından en hassas bölgelerin bu kısımlar olduğunu göstermektedir. Zira tedavi sonrası uygulamalarda, çiğneme kuvvetlerinin etkisi ile iç yüzey çatlaklarına göre ara yüzey çatlaklarının zaman içerisinde ilerleyerek kırılmalara sebep olması çok daha muhtemeldir. Bu nedenle yapışmanın çok iyi sağlanması gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Opak malzemesi ile metal veya porselen arasındaki bağların yeterince kuvvetli olmasına sebep olabilecek katkı

malzemelerinin, bunun yanı sıra ısı veya mekanik işlemlerin geliştirilmesi ile yapışma dirençlerinde artışlar sağlanabilir.

Bu tip malzemeler için deneysel çalışmalarda en çok karşılaşılan güçlük porselenin standart soğuma işlemi sırasındaki aşırı büzülmesinden kaynaklanmaktadır. Bu problem ise kademeli ısıtma ve yavaş soğutma ile çözülmüştür. Özellikle porselenin camsı dönüşüm sıcaklığı ile yumuşama sıcaklığı arasındaki aşırı şekil değiştirmesi nedeniyle bu sıcaklıklar arasında yavaş soğuma işlemi önem kazanmaktadır. Bu işlem numunelerin düzgün çıkmasına sebep olmuştur. Ancak yavaş soğutma işlemi, malzemenin iç yapısını da değiştirebilecek bir sebeptir. Bu nedenle standart soğutma işlemleri ile elde edilen kaplamaların değil, kademeli soğutma ile elde edilen kaplamaların incelendiğinin belirtilmesi gerekir.

Standart soğuma işlemleri için aynı tip bir inceleme yapılabilmesinde büzülmelerin aşılıp düzgün numunelerin elde edilmesi oldukça güçtür. Bunun için numunelerin büzülen kısımlarına dolgu yapılarak tekrar fırınlanması gibi bazı çözümler geliştirilebilir. Ancak bu işlemlerin oldukça uzun ve hassas yapılması ve dolgu bölgelerinin farklı fırınlama sayıları dolayısıyla özelliklerin homojen olmaması ilk aşamada görülen dezavantajlardır.

Kaplamalar ağız içerisinde çiğneme kuvvetlerinden dolayı tekrarlı yüklere maruz kalmalarına rağmen, deneysel olarak bu durumun incelenmesi oldukça hassas ölçüm düzenekleri gerektirmektedir. Bu çalışmada tekrarlı yükler yerine statik yüklerin sonucunda oluşan hasar parametreleri elde edilmiştir.

Kullandığımız yöntemde, üretilen numunelerin dört nokta eğme deneyindeki kırılma kuvvetleri tespit edilerek, bu yükler kullanılan sonlu elemanlar yazılımında oluşturulan modele uygulanmış ve  $J_{IC}$  değerleri yazılıma hesaplatılmıştır. Bu yöntem, çatlak açılmasının deneysel olarak ölçülmesine gerek bırakmadığından dolayı ara yüzey çatlakları için oldukça avantajlıdır.



Bu çalışmada elde edilen sonuçların yanı sıra, numune üretiminde karşılaştığımız problemlere bulduğumuz çözümler, gelecekte yapılacak benzer çalışmalara yol gösterici niteliktedir.

**KAYNAKLAR**

Anderson, T.L. (1995). *Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications* (2nd Ed.). Florida: CRC Press LLC.

Broek, D. (1984). *Elementary Engineering Fracture Mechanics*. Hague Netherlands: Martinus Nijhoff Publishers.

Callister, W. D. (2007). *Materials Science and Engineering: An Introduction* (7th Ed.). New York: John Wiley & Sons, Inc.

*Crowns*, (b.t.). 2 Haziran 2008, <http://www.teethlover.com/ebpage.asp?page=crowns>

*Crown (dentistry)*, (b.t.). 1 Haziran 2008, [http://en.wikipedia.org/wiki/Crown\\_\(dentistry\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Crown_(dentistry))

de Groot, R., Van Elst, H.C. ve Peters, M.C.R.B. (1988). Fracture mechanics parameters for failure prediction of composite resins. *Journal of Dental Research*, 67, 919–924.

de Groot, R., Van Elst, H.C. ve Peters, M.C.R.B. (1990). Fracture-mechanics Parameters of the Composite-Enamel Bond. *Journal of Dental Research*, 69, 31-35.

*Dental Crowns*, (b.t.). 2 Haziran 2008, <http://www.drjohnconness.com/procedures.html>

*Dental Health: Dental Crowns*, (b.t.). 20 Mayıs 2008, <http://www.webmd.com/oral-health/dental-crowns>

Gdoutos, E.E. (2005). *Fracture Mechanics An Introduction* (2nd Ed.). Dordrecht: Springer.

- Goldstein, R. E. (1998). *Esthetics In Dentistry, Volume 1* (2nd Ed.). Hamilton: B.C. Decker Inc.
- Hirakata, H., Kitamura, T. ve Kusano, T. (2005). Pre-cracking technique for fracture mechanics experiments along interface between thin film and substrate. *Engineering Fracture Mechanics*, 72 (12), 1892-1904.
- Jiang, F., Zhao, K. ve Sun, J. (2003). Evaluation of interfacial crack growth in bimaterial metallic joints loaded by symmetric three-point bending. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 80 (2), 129-137.
- Kim, Y.J. (2002). Experimental J estimation equations for single-edge-cracked bars in four-point bend: homogeneous and bi-material specimens. *Engineering Fracture Mechanics*, 69 (7), 793-811.
- Kohnle, C., Mintchev, O., Brunner, D. ve Schmauder S. (2000). Fracture of metal/ceramic interfaces. *Computational Materials Science*, 19, 261-266.
- Korn, D., Elssner, G., Cannon, R. M. ve Rühle, M. (2002). Fracture properties of interfacially doped Nb-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> bicrystals: I, fracture characteristics. *Acta Materialia*, 50 (15), 3881-3901.
- Naylor, W. P. (1992). *Introduction to Metal Ceramic Technology*. IL: Quintessence Publishing Co, Inc.
- O'Brien, W. J. (Ed.). (2002). *Dental Materials And Their Selection* (3rd Ed.). IL: Quintessence Publishing Co, Inc.
- Patron, V.Z. (1992). *Fracture Mechanics from Theory to Practice*. Gordon and Breach Science Publishers.
- Perez, N. (2004). *Fracture Mechanics*. Boston: Kluwer Academic Publishers.

- Pidaparti, R.M.V., Boehmer, W. A. ve Beatty, M.W. (1993). Fracture analysis of dental composites. *Engineering Fracture Mechanics*, 45 (1), 51- 59.
- Rushforth, R. (2004). Palladium in Restorative Dentistry. *Platinum Metals Review*, 48 (1), 30-31.
- Schueller, R., (b.t.). *Dental Crown: How Products are Made*. 2 Haziran 2008, <http://www.enotes.com/how-products-encyclopedia/dental-crown>
- Shukla, A. (2005). *Practical Fracture Mechanics in Design* (2nd Ed.). New York: Marcel Dekker.
- Teeth and Mouth Photo Gallery*, (b.t.). 2 Haziran 2008, <http://dentistry.about.com/od/toothmouthconditions/ig/Dental-Photo-Gallery/Porcelain-Crown.htm>
- Toparlı 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*, 14 (4), 287-293.
- Topçu, M. *Sonlu Elemanlar Ders Notları*, (b.t.). 4 Haziran 2008, <http://mtopcu.pamukkale.edu.tr>
- Uğuz, A. (1996). *Kırılma Mekaniğine Giriş*. Uludağ: Uludağ Üniversitesi Basımevi
- What is a dental crown? Why do teeth require dental crowns?*, (b.t.). 20 Mayıs 2008, [http://www.animated-teeth.com/dental\\_crowns/t1\\_dental\\_crowns\\_what\\_are.htm](http://www.animated-teeth.com/dental_crowns/t1_dental_crowns_what_are.htm)
- van der Laag, N. J. (2002). *Environmental effects on the fracture of oxide ceramics*. (Proefschrift). Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven.
- Yayla, P. (2007). *Kırılma Mekaniği*. İstanbul: Çağlayan Kitabevi.

Zor, M. (1999). *Stress Analysis and Determination of Fracture Parameters of the Cemented Femoral Hip Prosthesis*. (Ph. D. Thesis). İzmir: Graduate School of Natural and Applied Sciences of Dokuz Eylül University.

Zor, M., Küçük, M. ve Aksoy, S. (2002). Residual stress effects on fracture energies of cement–bone and cement–implant interfaces. *Biomaterials*, 23 (7), 1595-1601.