

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

**FARKLI KONUMLARDA ÇATLAK  
İÇEREN CAM-EPOKSİ KOMPOZİTİN  
KIRILMA DAVRANIŞLARININ DENEYSEL  
VE NÜMERİK OLARAK İNCELENMESİ**

**Fuat GEZİCİ**

**Mart,2014**  
**İZMİR**

**FARKLI KONUMLARDA ÇATLAK  
İÇEREN CAM-EPOKSİ KOMPOZİTİN  
KIRILMA DAVRANIŞLARININ DENEYSEL  
VE NÜMERİK OLARAK İNCELENMESİ**

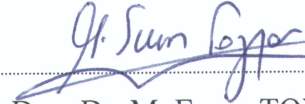
**Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü  
Yüksek Lisans Tezi  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Mekanik Programı**

**Fuat GEZİCİ**

**Mart,2014  
İZMİR**

## YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

FUAT GEZİCİ, tarafından DOÇ.DR. M. EVREN TOYGAR yönetiminde hazırlanan “FARKLI KONUMLARDA ÇATLAK İÇEREN CAM-EPOKSİ KOMPOZİTİN KIRILMA DAVRANIŞLARININ DENEYSEL VE NÜMERİK OLARAK İNCELENMESİ” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.



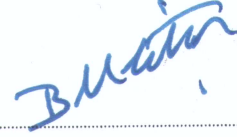
Doç. Dr. M. Evren TOYGAR

Yönetici



Prof. Dr. Mustafa TOPARLI

Jüri Üyesi



Doç. Dr. Bolent Murat İGTEN

Jüri Üyesi



Prof. Dr. Ayşe OKUR

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

## TEŐEKKÖR

Yüksek lisans tezimin yapımında ve tamamlanmasında bana her türlü desteği sağlayan, hiçbir yardımı esirgemeyen sayın danışmanım Doç. Dr. M. Evren TOYGAR' a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca, benim bu günlere gelmemde büyük emeği olan, beni sürekli destekleyen, maddi manevi desteğini esirgemeyen aileme teşekkürü bir borç bilirim.

Fuat GEZİCİ

# FARKLI KONUMLARDA ÇATLAK İÇEREN CAM- EPOKSİ KOMPOZİTİN KIRILMA DAVRANIŞLARININ DENEYSEL VE NÜMERİK OLARAK İNCELENMESİ

## ÖZ

Bu çalışmada, cam epoksi malzemenin kırılma tokluğu değerleri deneysel olarak kenar çatlaklı ve merkezi çatlaklı numuneler kullanılarak sabit bir yükleme hızında SHIMADZU marka test cihazı ile tespit edilmiştir. Bulunan değerler nümerik olarak ANSYS Paket programı kullanılarak modellenip kırılma tokluğu değeri bulunarak karşılaştırılmıştır. ANSYS paket programı ve deneysel yöntemler sonucunda bulunan değerlerin birbirine yakın olduğu tespit edilmiştir. Kırılma tokluğu tespitinde Lineer Elastik Kırılma Mekaniği (LEKM) yaklaşımı uygulanmıştır.

Bu çalışmada kullanılan kompozitplaka sekiz tabakalı olup cam- epoksi malzeme kullanılarak el yatırma yöntemiyle İZOREEL firmasında yaptırılmıştır.

Deneyler sırasında çatlak ilerlemesi ve kırılma tokluğu değerleri tespit edilmiş ve sonuçlar nümerik olarak ANSYS yazılımı kullanılarak bulunan sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Sonuçlar deneysel ve nümerik olarak tezin sonunda karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

**Anahtar Kelimeler:** Kompozit, kırılma tokluğu, sonlu elemanlar metodu

# **EXPERIMENTAL AND NUMERICAL INVESTIGATION OF FRACTURE BEHAVIOR OF GLASS-EPOXY COMPOSITE MATERIAL CONTAINING A CRACK AT DIFFERENT ORIENTATION**

## **ABSTRACT**

In this study, glass epoxy material, edge cracks and fracture toughness value were experimentally using a constant loading rate of centrally cracked specimens was determined by SHIMADZU brand tester. Modeled using ANSYS software in the numerical values of fracture toughness values were determined and compared. ANSYS software, and the values are close to each other as a result of experiment methods have been clearly identified. The determination of fracture toughness of Linear Elastic Fracture Mechanics (LEFM) approach is applied.

Eight-layer glass-epoxy composite samples used in this study is the material using hand lay-up method was built İZOREEL firm.

Crack propagation and fracture toughness values were determined during the experiments, and the results were compared with the results numerically using ANSYS software. At the end of the thesis is presented in comparison with experimental and numerical results.

**Keywords:** Composite, fracture toughness, finite element method

## İÇİNDEKİLER

	Sayfa
YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU .....	ii
TEŞEKKÜR .....	iii
ÖZ .....	iv
ABSTRACT .....	v
ŞEKİLLER LİSTESİ .....	ix
TABLolar LİSTESİ .....	xii

**BÖLÜM BİR- GİRİŞ**.....Hata! Yer işareti tanımlanmamış.

**BÖLÜM İKİ -KOMPOZİT MALZEMELER** .....Hata! Yer işareti tanımlanmamış.

2.1 Kompozit Malzemelerin Tanımı.....	<b>Hata! Yer işareti tanımlanmamış.</b>
2.2 Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması ...	<b>Hata! Yer işareti tanımlanmamış.</b>
2.2.1 Elyaf Takviyeli Kompozit Malzemeler ...	<b>Hata! Yer işareti tanımlanmamış.</b>
2.2.1.1 Elyaf lar .....	<b>Hata! Yer işareti tanımlanmamış.</b>
2.2.1.1.1 Cam Elyaf lar .....	<b>Hata! Yer işareti tanımlanmamış.</b>
2.2.2 Tabakalı Kompozitler .....	<b>Hata! Yer işareti tanımlanmamış.</b>
2.2.3 Tanecikli Kompozitler.....	<b>Hata! Yer işareti tanımlanmamış.</b>
2.3 Matris Malzemeleri .....	<b>Hata! Yer işareti tanımlanmamış.</b>
2.4 Kompozit Üretimi .....	<b>Hata! Yer işareti tanımlanmamış.</b>
2.4.1 Vakum İnfüzyon Yöntemi.....	<b>Hata! Yer işareti tanımlanmamış.</b>
2.4.2 El Yatırma Yöntemi .....	<b>Hata! Yer işareti tanımlanmamış.</b>

**BÖLÜM ÜÇ- KIRILMA MEKANİĞİ** .....Hata! Yer işareti tanımlanmamış.

3.1 Giriş .....	<b>Hata! Yer işareti tanımlanmamış.</b>
3.1.1 Lineer Elastik Kırılma Mekaniği(LEKM)	<b>Hata! Yer işareti tanımlanmamış.</b>
3.1.1.1 Griffith Teorisi.....	<b>Hata! Yer işareti tanımlanmamış.</b>
3.1.1.2 Irwin Teorisi .....	<b>Hata! Yer işareti tanımlanmamış.</b>
3.2 Kırılma Modelleri .....	<b>Hata! Yer işareti tanımlanmamış.</b>
3.1.2 Elasto Plastik Kırılma Mekaniği(LEKM)	<b>Hata! Yer işareti tanımlanmamış.</b>

## **BÖLÜM DÖRT -KIRILMA TOKLUGU DENEYLERİ**Hata! Yer işareti tanımlanmamış.

- 4.1 Kırılma Tokluğu Deney Çeşitleri .....**Hata! Yer işareti tanımlanmamış.**
  - 4.1.1 Tek Çentik Kenarlı Çekme Deneyi (SENT)**Hata! Yer işareti tanımlanmamış.**
    - 4.1.1.1 SENT Deneyi İçin Test Numunesi Üretimi**Hata! Yer işareti tanımlanmamış.**
    - 4.1.1.2 Tek Çentik Kenarlı Çekme Deneyi Yapılışı**Hata! Yer işareti tanımlanmamış.**
  - 4.1.2 Merkezi Çatlaklı Çekme Deneyi ve Deneyin yapılışı(middle tension-MT): 36

## **BÖLÜM BEŞ-MERKEZİ ÇATLAKLI NUMUNENİN ANSYS İLE KIRILMA TOKLUĞU ANALİZİ** .....Hata! Yer işareti tanımlanmamış.

- 5.1 Analiz Yönteminin Belirlenmesi .....**Hata! Yer işareti tanımlanmamış.**
- 5.2 Birim Atama .....**Hata! Yer işareti tanımlanmamış.**
- 5.3 Malzeme Özelliklerinin Atanması.....**Hata! Yer işareti tanımlanmamış.**3
- 5.4 Malzemeye Kalınlık Atanması .....**Hata! Yer işareti tanımlanmamış.**
- 5.5 Malzeme Davranışının Belirlenmesi .....**Hata! Yer işareti tanımlanmamış.**
- 5.6 Numune Geometri Oluşturma .....**Hata! Yer işareti tanımlanmamış.**6
  - 5.6.1 Anahtar Noktaların Girilmesi(Keypoints)**Hata! Yer işareti tanımlanmamış.**6
  - 5.6.2 Çizgilerin Oluşturulması (Lines) .....**Hata! Yer işareti tanımlanmamış.**
  - 5.6.3 Alanların Oluşturulması (Areas)..... 48
- 5.7 Elemanlara Ayırma (Meshing) ..... 49
- 5.8 Sınır Şartlarının Girilmesi ..... 51
- 5.9 Kuvvet Uygulanması .....**Hata! Yer işareti tanımlanmamış.**
- 5.10 Problemin Çözülmesi ..... 54
- 5.11 Sonuçların Okunması .....**Hata! Yer işareti tanımlanmamış.**
- 5.12 Kırılma Tokluğu Hesabı .....**Hata! Yer işareti tanımlanmamış.**

## **BÖLÜM ALTI-KENAR ÇATLAKLI NUMUNE ANSYS İLE KIRILMA TOKLUĞU ANALİZİ** ..... 57

## **BÖLÜM YEDİ-TARTIŞMA VE SONUÇLAR....**Hata! Yer işareti tanımlanmamış.

**KAYNAKLAR** .....Hata! Yer işareti tanımlanmamış.

## ŞEKİLLER LİSTESİ

	<b>Sayfa</b>
Şekil 2.1 Başlıca elyaf dokuma çeşitleri .....	7
Şekil 2.2 Cam elyaf kumaşları .....	8
Şekil 2.3 Tabakalı bir kompozit yapısı ( a ) İzotropik, (b) Ortotropik yapı.....	9
Şekil 2.4 Vakum İnfizyon yöntemi .....	11
Şekil 3.1Yüklemenin Üç modu a) çekme gerilmesi uygulaması MOD1 b) kayma gerilmesi uygulaması MODII , c) makaslama (yırtılma) uygulaması MODIII.....	18
Şekil 3.2Kompozit malzemelerde çatlak ucu gerilme dağılımı .....	19
Şekil 3.3 Kalınlığa bağlı kırılma tokluğu değişimi .....	21
Şekil 4.1SENT test numunesi, ASTM 1290-93 .....	25
Şekil 4.2Tabakalı kompozit üretiminin şematik gösterimi .....	25
Şekil 4.3Deney numunesinin çatlak açılmış görünümü.....	26
Şekil 4.4Ön çatlak açmada kullanılan aparat .....	26
Şekil 4.5 a) SHIMADZU test çekme cihazı ve b)Cihaza bağlanan numune .....	27
Şekil 4.6 Farklı çatlak boylarında kuvvet deplasman grafiği.....	29
Şekil 4.7 1. Numune için yük deplasman grafiği görüntüleri .....	29
Şekil 4.8 2. Numune için yük deplasman grafiği görüntüleri .....	30
Şekil 4.9 3. Numune için yük deplasman grafiği görüntüleri .....	31
Şekil 4.10 4. Numune için yük deplasman grafiği görüntüleri .....	31
Şekil 4.11 5. Numune için yük deplasman grafiği görüntüleri .....	32
Şekil 4.12 6. Numune için yük deplasman grafiği görüntüleri .....	33
Şekil 4.13 7. Numune için yük deplasman grafiği görüntüleri .....	33
Şekil 4.14 8. Numune için yük deplasman grafiği görüntüleri .....	34
Şekil 4.15 Numuneler için elde edilen kompiyasns değerlerine karşılık çatlak boyu	35
Şekil 4.16 Merkezi Çatlaklı deney numunesi .....	37
Şekil 4.17 SHIMADZU test cihazına bağlı merkez çatlaklı numune .....	37
Şekil 4.18 Merkezi çatlaklı numunenin kuvvet deplasman grafiği.....	38
Şekil 4.19 Merkezi çatlaklı numunenin kuvvet zaman grafiği .....	38
Şekil 4.20 Merkezi çatlaklı numune için tespit edilen 118'inci saniyedeki çatlak uzunluğu.....	39

Şekil 5.1 Merkezi çatlaklı çekme numunesi boyutlarının şematik göstermi .....	41
Şekil 5.2 Analiz yönteminin belirlenmesi .....	42
Şekil 5.3 Birim atama.....	42
Şekil 5.4 Malzeme özelliklerinin atanması .....	43
Şekil 5.5 Malzemeye kalınlık atanması .....	44
Şekil 5.6 Malzeme kalınlık değerinin girilmesi .....	44
Şekil 5.7 Malzeme davranışının belirlenmesi .....	45
Şekil 5.8Elastisite modülü ve poison oranı girilmesi.....	45
Şekil 5.9 Anahtar noktaların girilmesi .....	46
Şekil 5.10 Anahtar noktalar.....	46
Şekil 5.11Anahtar noktaların listelenmesi .....	47
Şekil 5.12 Çizgilerin oluşturulması.....	47
Şekil 5.13 Çizgilerin listelenmesi .....	48
Şekil 5.14 Üst alan oluşturulması .....	48
Şekil 5.15 Alt alan oluşturulması .....	49
Şekil 5.16 Bütün alan oluşmuş hali.....	49
Şekil 5.17 Mesh hassasiyeti girilmesi .....	50
Şekil 5.18 Çatlak bölgesi üçgen eleman tanımlama.....	50
Şekil 5.19 Numune mesh yapılmış hali.....	51
Şekil 5.20 Sınıf şartlarının girilmesi .....	51
Şekil 5.21 Numune alt bölüm sabitlemesi .....	52
Şekil 5.22Üst bölüme kuvvet uygulanması.....	52
Şekil 5.23 Kuvvet değerinin girilmesi .....	53
Şekil 5.24 Numune uygulanan kuvvet ve mesnet görünümü.....	53
Şekil 5.25 Problemin çözülmesi.....	54
Şekil 5.26 Çözüm işlemi tamamlanması.....	54
Şekil 5.27 Yük sonucu meydana gelen deformasyon .....	54
Şekil 5.28 Çatlak yüzey yolu tanımlanması .....	55
Şekil 5.29 Çatlak yüzey yolu isimlendirme .....	55
Şekil 5.30 Kırılma tokluğu hesabı.....	56
Şekil 5.31Kırılma tokluğu sonuçları .....	56
Şekil 6.1 Çekme numunesi boyutları .....	57

Şekil 6.2 Kenar çatlaklı numune boyutlandırılması .....	58
Şekil 6.3 Çizgilerin listelenmesi .....	58
Şekil 6.4 Kenar çatlaklı numune mesh yapılmış hali .....	59
Şekil 6.5 Basıç değerinin görülmesi.....	59
Şekil 6.6 Kenar çatlaklı numune mesnetleme ve kuvvet uygulanmış hali.....	60
Şekil 6.7 Kenar çatlaklı numune yük uygulanmış hali .....	60
Şekil 6.8 Kenar çatlaklı numune çatlak yüzey yolu tanımlanması .....	61
Şekil 6.9 Kenar çatlaklı numune kırılma tokluğu sonuçları.....	61

## TABLULAR LİSTESİ

	<b>Sayfa</b>
Tablo 2.1 A camı , C camı , E camı ve S camı elyaflarının özellikleri.....	9
Tablo 4.1 Numunelere açılan çatlak uzunlukları .....	26
Tablo 4.2 Çatlak miktarına karşılık gelen kompians değerleri .....	35
Tablo 7.1 Kırılma tokluğu sonuçları .....	62

## BÖLÜM BİR

### GİRİŞ

Malzemeler temelde üç gruba ayrılırlar bunlar, seramik malzemeler, plastik malzemeler ve metal malzemelerdir. İhtiyaçların karşılanmasına yönelik bu malzemelere ek olarak daha üstün özellikler elde etme için iki veya daha fazla malzemenin makroskobik boyutta birleşmesiyle oluşan kompozit malzemeler de eklenmiştir.

Kompozit malzeme üretimindeki amaç yapının yorulma dayanımı, korozyon dayanımı, rijitlik ısı iletkenlik, ısı dayanım, hafiflik ve aşınma dayanımı gibi özelliklerinin iyileştirilmesidir. Günümüzde kompozit malzemeler sıklıkla kullanılmaktadır.

Kompozit malzemelerin günümüzde kullanımının artması ile oluşan hasarların incelenmesi ve telafi yöntemleri araştırılması başlamıştır. Kompozit malzemelerde gerilme durumunda çatlakların ortaya çıktığı tespit edilmiş ve farklı malzemelerde çatlak oluşum ve ilerleme faktörleri araştırılmaya başlanmıştır. Çatlak boyları ve ilerleme durumu bilinmesi ile imalat esnasında gerekli önlemlerin alınması sağlanmıştır.

Mühendislik açısından önemli olan çatlak problemlerini çözebilmek için çok sayıda yöntem geliştirilmiştir. Mühendislik problemlerinde var olan formüller ile çözümün yüksek doğruluk oranında elde edilmesi imkansız olabilir. Karmaşık mühendislik problemlerinin çözümünde son yıllarda sayısal yöntem olan Sonlu Elamanlar Metodu en çok kullanılan yöntem olmuştur.

Malzeme üzerinde oluşan delik, çentik, çatlak gibi gerilmelerde süreksizlik gösteren bölgeler civarında gerilmelerin, yüklemenin tipine, şiddetine ve geometrisine bağlı olarak değiştiği ve çok küçük bölgelerde çok büyük değerlere ulaştığı bilinmektedir. Gerilme yığılması olarak tanımlanan bu yüksek gerilmeler, böyle süreksiz bölgeler içeren konstrüksiyonlarda tehlikeli durumlar meydana getirebilirler ve yapıyı tehlikeye sokabilirler.

Geometrik süreksizlik içeren bu tip yapılarda oluşan gerilmelerin ve gerilme yığılma katsayılarının mukavemet formülleri ile doğru ve sağlıklı olarak hesaplanması çok zor olmaktadır. Bu tip problemler analitik veya daha çok tercih edilen sayısal metotlarla daha kolay ve istenilen hassasiyette çözülebilir.

Aşağıda kırılma mekaniği ile ilgili olan daha önce yapılmış çalışma özetleri sunulmuştur. Bu çalışmalarda kırılma tokluğu tayininde farklı metotlar ve malzemeler kullanılarak çeşitli kırılma metotları oluşturulmuştur. Sonuç olarak malzemenin kırılma dayanımına etkisi araştırılmıştır.

Yüzey çatlaklı numunelerde gerilme şiddet faktörünü (GŞF) (Irwin 1957) hesaplamıştır. Yorulma çatlak ilerleme hızını (Paris ve Erdoğan, 1960) hesaplamış ve bunu gerilme şiddet faktörünün bir fonksiyonu olarak tanımlamışlardır.

Çatlağın ilerleme davranışlarını belirleyen iki özellik vardır. Bunlar uygulanan yük ve ortamın etkisidir. Malzemelerin, yorulma yükü altında gevrek olarak kırıldığı gözlemlenmiş, uygulanan tekrarlı ve değişken yüklerin etkisiyle malzemenin dayanım gücünün azaldığı ve yorulma sonucu hasara uğradığı görülmüştür (Rankine,1840).

Bir makine elemanındaki çatlağın ilerlemesine çatlağın geometrisi etki eder. Çatlak farklı geometrilerde farklı davranışlar gösterir. Dolayısıyla her biri için farklı model ve analiz gerekir. Kenar, yüzey ve boylamasına çatlak türlerinden en karmaşık olanı yüzey çatlağıdır. Çünkü yüzey çatlağında merkez açığa benzer bir açı yoktur. Yüzey çatlağında çatlak ilerlemesi uzunluğa, derinliğe, malzemenin kalınlığına, merkez açısına göre değişirken, diğerlerinde sadece çatlak uzunluğu ve malzemenin kalınlığı önemlidir(Lin,1999).

Avcı, Arıkan ve Akdemir (2003), yaptıkları çalışmada çelik fiber takviyeli polimer kompozitin kırılma davranışını incelemişlerdir. Yapılan çalışmada, çelik fiber takviyeli parçacık dolgulu polimer kompozit kırımlar ağırlıkça farklı çelik fiber oranlarında üretilmiş ve deney için başlangıç çatlağı açılmıştır. Hazırlanan numunelere üç nokta eğme testi uygulanmış ve Mod I' e göre kırılma davranışları incelenmiştir. Numunelerin gerilme şiddet faktörleri başlangıç çatlak derinliği,

komplians ve J-integral metotları gibi farklı metotlar kullanılarak hesaplanmış ve sonuçlar birbirleriyle karşılaştırılmıştır.

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

Avcı, Uyaner ve Şahin (2007), yaptıkları çalışmada merkezinde boydan boya çatlak açılmış cam-elyaf takviyeli termoplastikkompozit malzemenin sabit yük altında kırılma ve hasar davranışları incelenmiştir. Deneyler sırasında çatlak ilerlemesi, çatlak ucundaki gerilme şiddet faktörleri incelenmiştir. Çatlak ilerlemesi ve çatlak ağzı açılma miktarı, çatlak geometrisi ile ilgili hasar parametresi olarak kullanılmıştır. Sonuçlar gerilme şiddet faktörü (GŞF) ve J integral metodu ile kontrol edilmiş ve yayınlamışlardır.

## **BÖLÜM İKİ**

### **KOMPOZİT MALZEMELER**

#### **2.1 Kompozit Malzemelerin Tanımı**

Kompozit malzemeler kendini meydana getiren malzemelerin özelliklerinden (dayanım, iletkenlik, ısı özellikler, vb.) daha iyi özellik elde etmek amacıyla makro boyutlarda birleşmesiyle elde edilen yapıdır.

Kompozit malzeme üretiminde amaç, dirençlilik(rijitlik), ağırlık, mukavemet, yüksek sıcaklık performansı, sertlik, korozyon direnci ve elektrik-ısı iletkenliği gibi fiziksel ve mekanik özellikleri iyileştirmektir.

Kompozit malzemeler, meydana geldikleri malzemelerin en iyi özelliklerini gösterecek biçimde, matris adı verilen ana faz ve takviye fazlarından oluşur. Fazla ağırlık istenmeyen ve yüksek mukavemet gerektiren yerlerde kullanılır. Bu iki faz arasındaki ara yüzey, kuvvetin matristen takviye elemanına aktarıldığı bölgenin mekanik özellikleri kompozit malzemenin özelliklerini belirlemede en önemli faktördür.

Kompozit malzemeler günümüzde başta havacılık ve uzay sanayi olmak üzere farklı alanlarda da sıklıkla kullanılmaktadır. Üstün özelliklerinin yanında en büyük dezavantajları yeni malzemeler olduğu için bilinmeyen pek çok parametresinin olmasıdır. Bu nedenle araştırılması gereken bir alandır.(Jones,1998)

Kompozit malzemelerin bazı özellikleri şunlardır;

- Rijitlik, dayanım
- Kırılma tokluğu
- Elektrik iletkenliği
- Aşınma dayanımı
- Korozyona dayanım
- Hafiflik
- Ses yalıtımı

- Ağırlık
- Isıl direnç

## **2.2 Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması**

Kompozit malzemeler birçok özelliğe göre sınıflandırmak mümkündür. Örneğin matris malzemesine göre sınıflandırma yapılırsa;

- Metal matrislikompozit
- Polimer matrislikompozit
- Seramik matrislikompozittir.

Kompozit malzemeler bileşenleri açısından üç grupta sınıflandırılabilir bunlar;

1. Elyaf Takviyeli Kompozitler
2. Tabakalı Kompozitler
3. Tanecikli Kompozitler

### **2.2.1 Elyaf Takviyeli Kompozit Malzemeler**

Elyaf takviyeli kompozitlerde matrisin dayanım açısından bir önemi yoktur. Matris Lifleri bir arada tutar, dış ortam etkilerinden korur ve uygulanan yükün lifler arasında eşit dağıtılmasını sağlar. Yüksek mukavemetli elyaf lifleri takviye olarak kullanılır. Kuvvet tümüyle elyaf lifleri tarafından taşınır. Elyaf lar kompozit içerisinde birbirine paralel olarak yerleştirilirse elyaf doğrultusunda yüksek mukavemet sağlanır fakat dik doğrultuda mukavemet oldukça düşüktür. Kompozit malzemelerde izotropik özellik sağlamak için lifler her iki yönde yerleştirilerek farklı doğrultularda eşit mukavemet sağlanır.

Elyaf lı kompozitlerde yapının mukavemeti elyaf mukavemetine bağlıdır. Elyaf ların uzunluk-çap oranları değişimi matris tarafından elyaflara iletilen yükü değiştirmektedir. Elyaf yapısında var olan kusurlar kompozit yapının mukavemetini düşürmektedir.

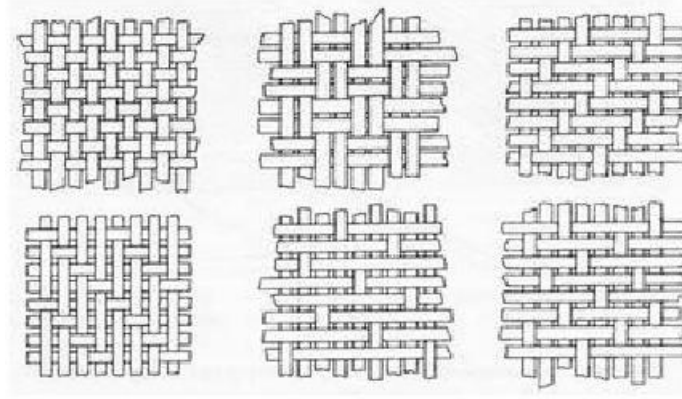
Mukavemeti etkileyen diğler önemli faktörde elyaf ile matris malzeme arasındaki bağlarda olan kusurlardır. Matris yapısında var olan boşluklar matris ve elyafın temas alanını azaltacaktır. Ayrıca ortamda bulunan nem de matris ve elyaf arasındaki bağın bozulmasına neden olacaktır.

Cam, karbon, kevlar ve bor elyaf çeşitlerine örnek olarak verilebilir. İstenilen kompozit malzemenin özelliklerine göre elyaf malzemesi seçilebilir. Cam lifleri dayanım olarak yüksek fakat elastisitemodülü düşüktür. Karbon kristal ve amorf biçimde bulunabilir. Kristal şeklinde bulunursa rijitlik yüksek fakat amorf yapıda olursa dayanım yüksektir. Kevlar yoğunluğu düşük ve karbona göre daha ucuz bir malzeme olduğu için tercih edilebilir. Kevlar sık kullanılan liflerdendir. Bor ise rijitliği yüksek bir takviye elemanı olup metal matrise uygun bir malzemedir.

Tezimizde elyaf olarak cam lifi kullanılacaktır. Kompozitlerde takviye malzemesi olarak en çok cam elyaf kullanılmaktadır. Kompozit yapılarda cam elyafın fazla kullanılması maliyetinin ucuz olması, dayanımın yüksek olması, hafif bir malzeme olması ve yüksek kimyasal dirence sahip olmasındandır.

### *2.2.1.1 Elyaf lar*

Cam elyafı epoksikompozitler arasında en çok kullanılan kombinasyondur. Elyaf ların fiziksel biçimleri oluşturdukları yeni kompozit malzemenin özelliklerini değiştiren önemli bir faktördür. Elyaf lar üç farklı biçimde var olmaktadır; parçacıklar, sürekli ve süreksiz biçimdedir. Bazı durumlarda malzemenin mukavemetini arttırmak ve tüm yönlerde eşit dayanım sağlamak için elyaf lar kumaş formunda kullanılır ve Şekil 21.1 de başlıca elyaf dokumaları verilmektedir. Dokuma kumaşlar sürekli liflerden oluşturulur ve farklı türleri mevcuttur.



Şekil 2.1 Başlıca elyaf dokuma çeşitleri

Günümüzde kompozit malzemelerde kullanılan en önemli takviye elamanı sürekli elyaflardır. Modern kompozitlerin oluşturulmasında bu elyaflar önemli yer tutar. Elyafların ince çaplı üretilmesi ile, büyük kütsel yapılara oranla hatalar minimize edilmiştir. Bu nedenle diğer malzemelere göre üstün mekanik özellikler gösterirler.

Elyafların yüksek performanslı mühendislik malzemeleri olma nedenleri aşağıda verilen özelliklere bağlıdır;

- 1.Üstün mikro yapısal özellikler, tane boyutlarının küçük olması ve küçük çapta üretilmeleri
- 2.Boy/çap oranı arttıkça matris malzeme tarafından elyaflara iletilen yük miktarının artması.
- 3.Elastisite modülünün yüksek olması.

*2.2.1.1.1 Cam Elyaflar.* Cam elyaf kompozit malzeme üretiminde en çok kullanılan takviye elanıdır. Cam elde etmek için silis kumunu katkı malzemeleri ile yaklaşık 1300 derece civarında ısıtılır ve soğuduktan sonra sert bir yapı elde edilir. Cam elyaflar son derece dayanıklı malzemelerdir. Cam elyaf aramid ve karbon elyaflarına göre daha yüksek mukavemet özelliklerine sahiptir. Elyaf kumaşları sürekli cam elyaflarının lifleri ile üretilmektedir (Şekil 2.2).



Şekil 2.2 Cam elyaf kumaşları

Cam elyafların kimyasal dirençleri yüksektir. Ortam sıcaklığının artması cam elyafların sürünme direncini ve rijitliğini azaltmaktadır. Cam elyaflar nem absorbe etmezler bu yüzden cam elyaf takviyeli kompozitlerde matris malzemesi ile cam elyaf arasında nem var olması kompozit yapının dayanımını düşürmektedir.

Cam elyaf imalinde kullanılan katkı malzemelerine göre farklı özellikler kazanırlar. Kimyasal bileşenlerine göre cam elyaflar dört farklı gruba ayrılırlar bunlar, E, C, A ve S camı olarak isimlendirilir. E camı bunlar arasında en çok kullanılan elyaf türüdür. E camı düşük alkali oranından dolayı elektriksel iletkenliği düşüktür. E camının suya karşı direnci yüksek ve nemli ortamlarda çalışan kompozit malzemeler için iyi bir takviye elamanıdır. S camının dayanımı E camına göre % 30 daha dayanıklı fakat maliyeti çok yüksektir. Ayrıca S camı yüksek sıcaklıklarda çok iyi yorulma direncine sahiptir. S camı uzay ve havacılık sanayinde yoğun şekilde kullanılmaktadır.

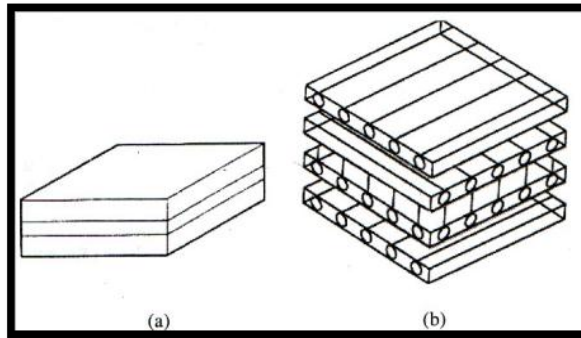
Tablo 2.1 A camı, C camı, E camı ve S camı elyaflarının özellikleri

Özellikler	Cam Tipi			
	A	C	E	S
Özgül ağırlık (gr/cm <sup>3</sup> )	2.50	2.49	2.54	2.48
Elastik modül (GPa)	-	69.0	72.4	85.5
Çekme mukavemeti(MPa)	3033.0	3033.0	3448.0	4585.0
Isıl genleşme katsayısı (m/m/°Cx10 <sup>6</sup> )	8.6	7.2	5.0	5.6
Yumuşama sıcaklığı (°C)	727.0	749.0	841.0	970.0

### 2.2.2 Tabakalı Kompozitler

Farklı malzemelerin tabakalar şeklinde üst üste dizilerek oluşturduğu kompozit malzemelere tabakalı kompozit malzeme denir (Şekil 2.3).

Tabakalı kompozitler en yaygın kullanılan yapılardır. Farklı elyaf dizilimlerine sahip tabakaların birleştirilmesi ile mukavemet yükseltilmiş olur, neme ve ısıya daha dayanıklı yapılar elde edilir. Metallere göre düşük ağırlıklı olması ve mukavemetli olması nedeniyle tercih edilmektedir. Ayrıca tabakalı kompozitler uçakların kanat ve kuyruk kısımlarında yüzey kaplama malzemesi olarak yoğun bir şekilde kullanılmaktadır.



Şekil 2.3 Tabakalı bir kompozit yapısı (a) izotropik, (b) Ortotropik yapı

### **2.2.3 Tanecikli Kompozitler**

Matris malzeme içinde başka bir takviye elemanının parçacıklar halinde bulunması ile elde edilir. Yapısal olarak izotropdur. Kompozitin mukavemeti kullanılan takviye parçacıklarının sertliğine bağlıdır.

## **2.2 Matris Malzemeleri**

Matrisin kompozit yapılarda elyafları bir arada tutmak, çevresel etkilerden korumak ve elyaflara yükü eşit dağıtmak gibi görevleri vardır. Kompozit malzeme üretiminde matris malzemesi başlangıçta düşük viskozitelidir takviye elemanı ile birleştirildikten sonra kimyasal tepkimelerle katı forma dönüştürülür.

Kompozit yapılarda matris yükü taşıyan elyaf takviyelerin fonksiyonlarını yerine getirmelerini sağlayan en önemli faktördür. Matris, malzeme kompozit malzeme içindeki elyaflara gelen yükün tüm elyaflara eşit dağılmasını sağlamaktadır. Kompozit yapılarda elyaf yönüne dik doğrultuda oluşan kuvvetlerde yapının mukavemeti matris malzemesinin dayanımı ve elyaf ile matris arasındaki bağ kuvvetlerine bağlıdır.

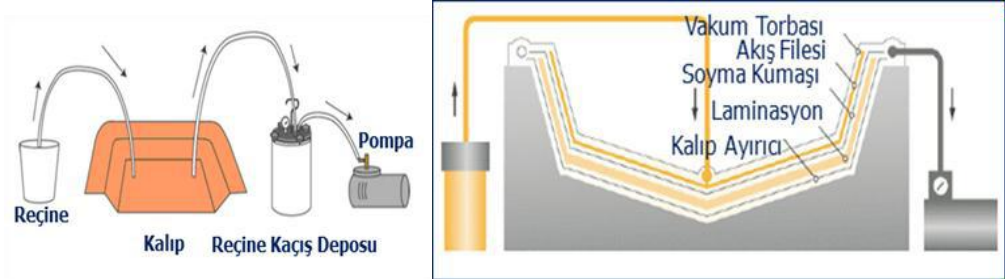
Seçilen matris özelliklerine bağlı olarak, kompozitlerin darbe direnci performans kriterleri ve sünekliği değişmektedir. Daha sünek bir matris kullanılarak kompozitin kırılma tokluğu artırılabilir. Kullanılan matrisin fiberle uyumluluğu, meydana gelen hasar mekanizmalarını etkilemektedir.

Epoksi reçineler elyaf takviyeli kompozit malzemelerde yaygın olarak kullanılan matris malzemesidir. Uzay ve havacılık sektöründe ağırlık ve dayanım önemli olduğu için epoksi reçine sıklıkla kullanılır.

## 2.4 Kompozit Üretimi

### 2.4.1 Vakum İnfüzyon Yöntemi

Bu yöntem de üretim için bir kalıp gerekmektedir. Kalıbın içerisine ayırıcı sürüldükten sonra elyaf katmanları istenilen oryantasyon açılarında kuru olarak yerleştirilir. Elyafın üzerine düzgün yüzey sağlamak için soyma kumaşı (peel-ply) ve akışkanlığı sağlamak için akış filesi yerleştirilir. Reçine ve hava akışını sağlamak için spiral hortumlar tabaka üzerine yerleştirilir. Kalıp kenarları kompozit levhada istenmeyen hava kabarcıkları oluşmaması için sızdırmaz bantlar ile vakum torbası kullanılarak hava geçirmez şekilde kapatılmalıdır. Emiş pompası kullanılarak kalıp içerisinde vakum yaratılarak kalıp içerisinde kalan hava emilmektedir. Vakumlama işlemi devam ederken reçine hattı da açılır ve kalıp içerisinde reçinenin her yere işlenmesi sağlanır. Şekil 2.4’de vakum infüzyon yöntemi şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 2.4 Vakum infüzyon yöntemi

### 2.4.2 El Yatırma Yöntemi

El yatırma yöntemi kullanılan en basit üretim tekniğidir. Dokuma veya keçe biçimli elyaf, hazırlanan bir kalıp içerisine yerleştirilir. Matris olarak kullanılacak reçine fırça ile elyaf malzeme üzerine sürülür. Kompozit malzemedeki kalınlık istenilen değere gelene kadar bu işlem devam ettirilir. Bu şekilde tabakalı kompozit malzeme üretilmiş olur. Bu yöntemde genelde polyester ve epoksi reçineler kullanılır.

Reçine malzemenin içine görünümü güzelleştirmek, hafiflik sağlamak için katkı malzemeleri eklenir. Reçine malzemenin kalıp ile yapışmasını önlemek için polivinil alkol(PVA), madeni yağları, silikon ve vaks gibi kalıp ayırıcılar kullanılır.

CTP nin yeterli sertliğe ulaşması için ısıtma işlemi uygulamak gereklidir. Bu nedenle oda sıcaklığında 24 saat veya 60 derecede 1 saat süreyle ön sertleştirme işlemi yapılır ve daha sonra 80 derecede 3-4 saat süreyle tam sertleşme sağlanmalıdır.

Uygulama sırasında kalıp yüzeyi silinerek ilk kalıp ayırıcı vaks sürülür daha sonra sünger ile ikinci ayırıcı PVA malzemesi sürülür. Fırça ile yüksek viskoziteli reçine sürülüp üzerine takviye elyafları yerleştirilir. Hazırlanan reçine keçe üzerine fırça ile emdirilir bu şekilde istenilen kalınlık elde edilinceye kadar devam edilir.

## **BÖLÜM ÜÇ**

### **KIRILMA MEKANIĞI**

#### **3.1 Giriş**

Kırılma mekaniği, yük altında çalışan mühendislik yapılarında mevcut çatlak, boşluk vb. kusurların neden olduğu hasar mekanizmalarını inceler. Kırılma yük altında çalışan malzemelerin iki veya daha fazla parçaya ayrılmasıdır. Kırılma olayı çatlak teşekkülü ve ilerlemesi aşamalarından gerçekleşir. Kırılmayla oluşan hasarlarda mevcut olan kusurlar makroskobik boyuttadır. Kırılma olaylarında yapısal olarak genel bir plastik deformasyon değil boşluk hata ve kaynak noktası civarında oluşan yerel gerilme ve hasar durumu söz konusudur.

Kırılma genellikle gevrek ve sünek olmak üzere iki grupta incelenir. Gevrek kırılmada çatlak hızlı bir şekilde ilerler ve kalıcı şekil değişimi göz ardı edilebilir. Sünek kırılmada ise çatlak teşekkülü ve ilerlemesinde önemli ölçüde kalıcı şekil değişimleri meydana gelir. Sünek kırılmada çatlak yavaş ilerler.

Kırılma mekaniği çalışmalarında amaç çatlak, çentik ve delik gibi gerilme yoğunluğunu arttıran hataları incelemek ve bu sorunlara çözüm bulmaktır.

Kırılma mekaniği çözümlerinde iki farklı yaklaşım kullanılmaktadır. Bunlardan birincisi Lineer Elastik Kırılma Mekaniği(LEKM) ikicisi ise Elastik Plastik Kırılma Mekaniği(EPKM) dir.

#### **3.2 Lineer Elastik Kırılma Mekaniği(LEKM)**

Günümüzde kusursuz malzeme üretmek çok zordur. Lineer Elastik Kırılma Mekaniği(LEKM) malzemelerde tüm davranışların elastik sınırlar içerisinde kalması prensibinden çıkan analitik ifadelerin tümüne denir. LEKM 'nin temel prensibi çatlak noktasında oluşan gerilmelerin parçaya uygulanan yüke, çatlağın yönüne ve

uzunluğuna bağlı olarak ifade edilmesidir. Buna gore; çatlakın ilerlemesi iki Şekilde hesaplanabilir:

- Yükleme sonucu parçaya depolanan enerji kritik sınırı aŐmıŐ ise,
- Çatlak ucundaki gerilmenin değeri kritik bir değere ulaŐmıŐ ise,

LEKM’de tüm malzemeler mikro düzeyde çatlak içerir. Yükleme durumu ve çatlak hali bilinen durumlarda gerilme Şiddet faktoru ( $K$ ) hesaplanabilmektedir. eğer malzemelerde gerilme Şiddet faktoru belli bir sınırı aŐarsa o malzemede hasar meydana gelmektedir.

Çatlak içeren bir sistemde  $F$  kuvveti etkisi altında enerji dengesi Şu Şekilde ifade edilir;

$$dQ + dW = dU_{el} + dU_k + dU_\gamma \quad (3.1)$$

Burada  $U$  sistemin toplam enerjisi,  $W$  dış kuvvetlerin yaptđı iŐ,  $Q$  atlak ilerlemesi için harcanan enerji,  $U_k$  kinetik enerjidir.

$$dQ = 0 \text{ statik durumda } dU_k = 0 \text{ ise;}$$

$$dU = -dW + dU_{el} + dU_\gamma = 0$$

$$d(-W + U_{el} + U_\gamma) = 0$$

$$U = -W + U_{el} + U_\gamma$$

Burada,  $U_{el}$  sistemde biriken enerji,  $U_\gamma$  yüzey enerjisidir.

Birim geniŐliđe sahip, kalınlđı  $B$  ve çatlak uzunluğu  $2a$  olan levhada çatlak ilerlemesi durumunda;

$$G = -\frac{1}{B} \frac{d(-W + U_{el})}{da} = \frac{dU}{da} \quad (3.2)$$

Yazılır. Burada,  $G$  sistemde enerji boşalma miktarı veya malzemenin tokluğu denir. Kırılma mekaniğinde  $G$  değeri çatlak birim alanı kadar ilerlemesi sonucu harcanan enerji olmak üzere  $G = 2\gamma$  yazılabilir. Ayrıca  $R = du/da$  değeri de çatlak ilerleme direnci olarak bilinir. Dolayısıyla kuvvet altında çatlak davranışı şu şekilde ifade edilir;

$G = R$  ise kararlı çatlak ilerlemesi var,

$G < R$  ise çatlak ilerlemesi yok,

$G > R$  ise kararsız çatlak ilerlemesi var.

Kırılma mekaniği, kırılma olaylarını incelemekte iki farklı yaklaşım öngörmektedir. Bunlardan ilki Griffith Enerji Dengesi Yaklaşımı(1920), Diğeri Irwin Teoremidir(1956).

### **3.2.1 Griffith Teorisi**

Kırılma mekaniği çalışmaları ilk olarak 1920 yılında Griffith tarafından camdaki çatlakların ilerleyişini izlemesi ile gerçekleştirmiştir. Griffith, sistemde var olan toplam enerjideki azalmayla çatlak ilerlemeye başlayacağını formüle etmiştir. Griffith basit bir enerji denklemiyle gerilme altında sistemdeki çatlak ilerlemesi ile elastik germe enerjisinde bir azalma olacağını göstermiştir. Bu enerji yeni çatlak oluşması için gerekli enerjidir.

Griffith araştırmalarında, cam çubuğun mukavemetinin cam uzunluğu arttıkça azaldığını görmüştür. Griffith mukavemetin azalmasını camdaki yüzey hatalarına bağlamış camın uzunluğunun artması ile yüzey hatalarının artacağını düşünmüştür. Griffith çatlak içeren gevrek bir malzemede, kırılma meydana gelmeden dayanabileceği gerilmeyi şu şekilde formüle etmiştir.

$$\sigma_f = \left( \frac{2\gamma\gamma}{\pi a} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.3)$$

Burada;  $\sigma_f$ : kırılma gerilmesi,  $\gamma$  yüzey enerjisi,  $E$  elastisite modülü,  $a$  ise çatlak yarı boyudur.

Griffith denkleminde göre, kırılmaya sebep olan gerilme miktarı  $\sigma_f$ , mevcut çatlak boyutu ile ters orantılıdır. Griffith denkleminde yüzey enerjisi terimi yerine, genellikle kırılma isini gösteren bir parametre  $G$  kullanılır. Bu durumda denklem;

$$\sigma_f = \left( \frac{EG_c}{\pi a} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.4)$$

şeklini alır. Burada  $G_c = 2\gamma$  olup, kırılma için gerekli olan açığa çıkan enerji miktarını gösterir.

$$K = \sigma \sqrt{\pi a} \quad (3.5)$$

Yukarıdaki 3.4 ve 3.5 denklemlerini kullanmak suretiyle  $K$  (gerilme şiddeti faktörü) ile  $G$  (açığa çıkan enerji miktarı) arasındaki ilişki, düzlem gerilme şartı için  $E^* = E$  olduğundan, Denklem (3.6) da verildiği gibi yazılabilir:

$$K^2 = E^* G \quad (3.6)$$

Düzlem deformasyonda  $E^* = E / (1 - \nu^2)$  yazılabileceğinden denklem aşağıdaki gibi yazılır:

$$K^2 = \frac{EG}{1 - \nu^2} \quad (3.7)$$

Griffith, analizinde deformasyon enerjisinin çatlak ilerlemesi sırasında, ara yüzey enerjisine dönüşümünü esas almıştır. Dolayısıyla  $G$ , aynı zamanda çatlak birim yüzeyde ilerlemesi için gerekli olan enerji miktarıdır, birimi N/m' dir. Kırılma,  $G$ ' nin kritik değeri olan  $G_c$ ' de meydana gelir.

### 3.2.2 Irwin Teorisi

Bu teoriye göre Irwin ve arkadaşları çalışmalarında çatlak ucu bölgesindeki gerilme durumunu esas almışlardır. Bu çalışmalarda çatlak ucu bölgesi için bir gerilme şiddet faktörü olan  $K$  parametresini geliştirilmiştir. Bu parametre uygulanan gerilme, çatlak boyu ve çatlak şeklinin bir fonksiyonudur.

$$\sigma_f \sqrt{\pi a} = \sqrt{EG_c} \quad (3.8)$$

Yukarıdaki 3.8 eşitliğindeki ilk değer in ikincisine ulaştığında çatlağın ilerleyeceği anlaşılmaktadır. İlk terimin çatlak ilerlemesi için gerekli kuvvet ölçüsü olduğu düşünülerek, bu terim gerilme şiddet faktörü ( $K$ ) olarak isimlendirilir. Gerilme şiddet faktörü  $K$  'nın kritik bir  $K_c$  değerinde kırılma olur. Bu durumda,

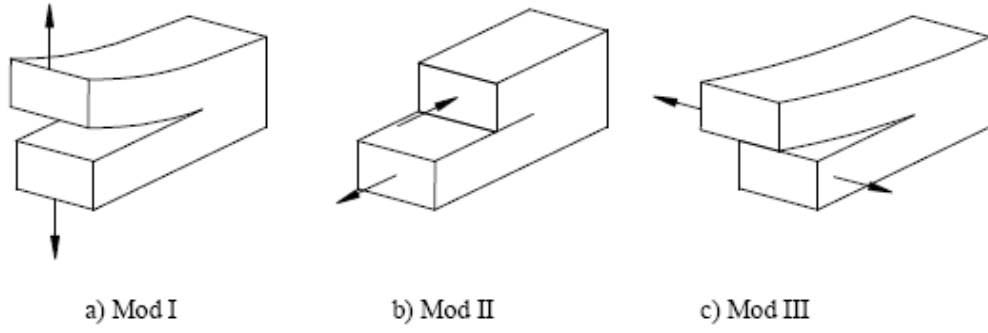
$$K_C = \sqrt{EG_C} \quad (3.9)$$

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

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

### 3.3 Kırılma Modelleri

Malzemelerde çatlak ilerlemesi üç tipe görülmektedir. Kırılmada üç davranışta aynı anda görülebilir. Şekil 3.1'de yüklemenin 3 modu verilmektedir..



Şekil 3.1 Yüklemenin 3 modu a) çekme gerilmesi uygulanması Mod I, b) kayma gerilmesi uygulanması Mod II, c) makaslama (yırtılma) uygulaması Mod III

Mod I, en çok görülen açılma tipidir ve diğerlerine göre daha kritiktir. Kırılma yüzeyleri birbirlerine zıt ve dik yönde ayrılırlar.

Mod II, çatlak yüzeyleri x ve z düzleminde ve zıt yönde hareket ederler.

Mod III, çatlak yüzeyleri x-y ve x-z düzlemlerine göre ters simetrik olarak ilerlerler.

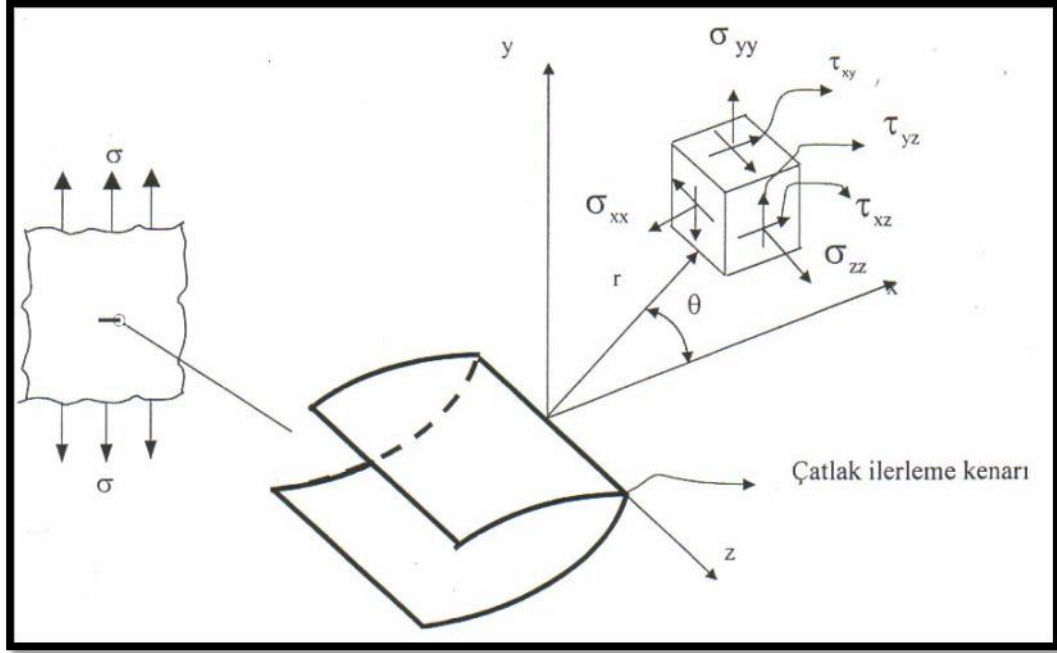
İzotropik malzemelerde çatlak ucu civarında oluşan gerilme deformasyonları Irwin tarafından bulunmuştur (Irwin 1957). Daha önce de anlatıldığı gibi K, elastik gerilme alanının büyüklüğünü gösteren bir sabittir ve GŞF olarak adlandırılır. Boyutsal analizler, K'nın gerilmeyle doğrusal olarak, karakteristik bir uzunluğun da kareköküyle ilişkili olduğunu göstermiştir. Bu karakteristik uzunluk, çatlak boyudur ve gerilme yoğunluk faktörü;

$$K = \sigma \sqrt{\pi a} f\left(\frac{a}{W}\right) \quad (3.10)$$

Şeklinde verilir. Burada  $f(a/W)$ , numunenin ve çatlağın geometrilerine bağlı boyutsuz bir parametredir. Çatlak ucundaki gerilme şiddet faktörü, sonsuz genişlikteki bir numunede, her üç Mod için aşağıdaki gibi verilmiştir.

$$K_I = \sigma_I \sqrt{\pi a} \quad K_{II} = \tau_{II} \sqrt{\pi a} \quad K_{III} = \tau_{III} \sqrt{\pi a} \quad (3.11)$$

Burada,  $K_I$ ,  $K_{II}$  ve  $K_{III}$  sırasıyla Mod I, Mod II ve Mod III' e göre gerilme şiddet faktörleridir. Mod I çatlak ucu gerilme bölgeleri dağılımı ve koordinat sistemi gösterimi Şekil 3.2' deki gibidir.



Şekil 3.2 Kompozit malzemelerde çatlak ucu gerilme dağılımı

Çatlak ucundaki gerilmeler denklem 3.12' deki gibidir;

$$\sigma_{xx} = \frac{K_I}{(2\pi r)^{1/2}} \cos \frac{\theta}{2} \left( 1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right)$$

$$\sigma_{yy} = \frac{K_I}{(2\pi r)^{1/2}} \cos \frac{\theta}{2} \left( 1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right)$$

$$\tau_{xy} = \frac{K_I}{(2\pi r)^{1/2}} \left( \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \sin \frac{\theta}{2} \right)$$

$$\sigma_{zz} = \frac{K_I}{(2\pi r)^{1/2}} \left( 2\nu^* \cos \frac{\theta}{2} \right)$$

$$\tau_{yz} = \tau_{zx} = 0 \quad (3.12)$$

Şekil 3.2' deki gibi açılan çatlakın,  $r$  mesafesindeki noktadaki şekil değiştirmeleri aşağıdaki gibidir. Burada  $\nu$ : Poisson oranı,  $\sigma_{xx}$ :  $x$  eksenindeki gerilme değeri,  $\sigma_{yy}$ :  $y$  eksenindeki gerilme değeri ve  $\sigma_{zz}$ :  $z$  eksenindeki gerilme değeridir.  $E$ : Elastisitemodülü ve  $\theta$  :  $r$ ' nin  $x$  eksenine ile yaptığı açıdır.  $u$ ,  $v$ ,  $w$  ise sırası ile  $x$ ,  $y$ ,  $z$  eksenlerindeki deplasmanlarıdır.

$$\begin{aligned}
u &= \frac{K_I}{E} \left( \frac{r}{2\pi} \right)^{1/2} (1+\nu) \left[ (2\kappa-1) \cos \frac{\theta}{2} - \cos \frac{3\theta}{2} \right] \\
v &= \frac{K_I}{E} \left( \frac{r}{2\pi} \right)^{1/2} (1+\nu) \left[ (2\kappa+1) \sin \frac{\theta}{2} - \sin \frac{3\theta}{2} \right] \\
w &= -\nu^* \frac{K_I}{E} \tag{3.13} \\
\nu^* &= \nu, \quad \kappa = \frac{(3-\nu)}{(1+\nu)} \text{ (Düzlem gerilme durumu)} \\
\nu^* &= 0, \quad \kappa = 3-4 \quad \text{(Düzlem şekil değiştirme durumu)}
\end{aligned}$$

Kayma modu için gerilmeler:

$$\begin{aligned}
\sigma_{xx} &= \frac{K_{II}}{(2\pi r)^{1/2}} \sin \frac{\theta}{2} \left( 2 + \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \right) \quad \sigma_{yy} = \frac{K_{II}}{(2\pi r)^{1/2}} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \\
\tau_{xy} &= \frac{K_{II}}{(2\pi r)^{1/2}} \cos \frac{\theta}{2} \left( 1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \\
\sigma_{zz} &= \nu(\sigma_{xx} + \sigma_{yy}) \\
\tau_{yz} &= \tau_{zx} = 0 \tag{3.14}
\end{aligned}$$

Deplasmanlar Denklem (3.15 'deki gibi bulunur.)

$$\begin{aligned}
u &= \frac{K_{II}}{E} \left( \frac{r}{2\pi} \right)^{1/2} \sin \frac{\theta}{2} \left[ 2 - 2\nu \cos^2 \frac{\theta}{2} \right] \\
v &= \frac{K_{II}}{E} \left( \frac{r}{2\pi} \right)^{1/2} \cos \frac{\theta}{2} \left[ -1 + 2\nu + \sin^2 \frac{\theta}{2} \right] \\
w &= 0 \tag{3.15}
\end{aligned}$$

Yırtılma modu için gerilmeler ve deplasmanlar;

$$\tau_{xz} = \frac{K_{III}}{(2\pi r)^{1/2}} \sin \frac{\theta}{2}$$

$$\sigma_{yz} = \frac{K_{III}}{(2\pi r)^{1/2}} \cos \frac{\theta}{2}$$

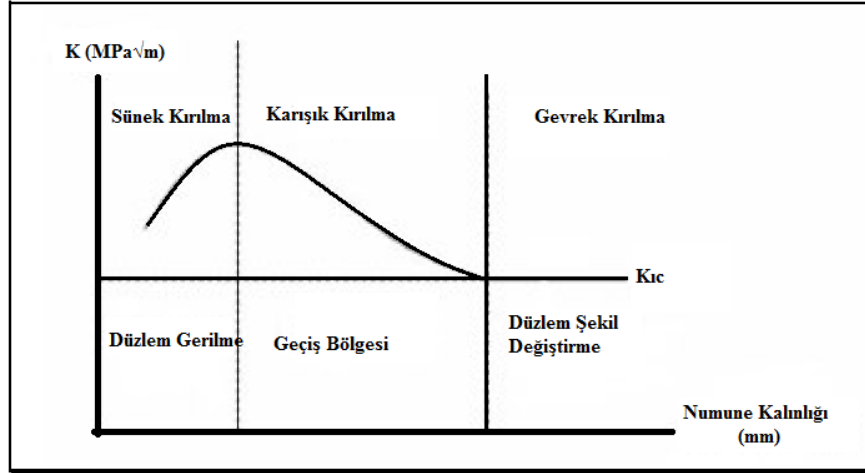
$$\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \sigma_{zz} = \tau_{xy} = 0$$

$$u = v = 0$$

$$w = \frac{K_{III}}{E} \left[ \frac{2r}{\pi} \right]^{1/2} \sin \frac{\theta}{2} \quad (3.16)$$

elde edilir.

Kırılma tokluğu değerinin malzeme boyutlarından bağımsız olduğunu göstermek için kalınlıkları farklı olan aynı çatlak boyuna sahip malzemedan numuneler hazırlanıp daha sonra bunlar çekme deneyine tabi tutulduğunda her birinin kırılma tokluğu değeri bulunur ve  $K - B$  diyagramı bağıntılar kullanılarak elde edilir. Diyagramda  $B$  kalınlığı arttıkça  $K$  değeri başlangıçta artmakta, daha sonra azalmakta ve malzeme kalınlığının bir değerinden sonra sabit kalmaktadır. Şekilde kırılma tokluğunun ( $K_c$ ) kalınlığa bağlı değişimi gösterilmektedir.



Şekil 3.3 Kalınlığa bağlı kırılma tokluğu değişimi

### 3.4 Elasto Plastik Kırılma Mekanîği(EPKM)

Lineer Elastik Kırılma Mekanîği yaklaşımı elastik koşullarda çatlak ilerlemesi ve kırılmayı belirlemek için geliştirilmiştir. Elastik koşullar daha çok gevrek malzemelerde geçerlidir. LEKM ile incelenemeyecek kadar büyük ölçüde çatlak ucu plastik deformasyona sahip malzemelerde kırılma mekanîği problemlerini çözmek için Elastik Plastik Kırılma Mekanîği(EPKM) geliştirilmiştir. EPKM yaklaşımında çatlak ilerlemesini karakterize etmek için  $J$  integrali, çatlak ucu açılması(COD) kavramları kullanılmaktadır.

$J$  integrali ve gerilme yoğunluk faktörü arasında,

$$J = \frac{K}{E^*} \quad (3.17)$$

ilişkisi vardır. Düzlem gerilme durumunda  $E^* = E$  ve düzlem germe durumunda ise;

$$E^* = \frac{E}{(1-\nu)} \quad (3.18)$$

olmaktadır. Burada  $\nu$  poisson oranını göstermektedir. Çatlak ucundaki yer değiştirme miktarının ölçüsü de plastik şekil değiştirme miktarı ile ilgili olduğundan bu kavram da elastik plastik kırılma mekanîğinde kırılma kriteri olarak kullanılmıştır.

## BÖLÜM DÖRT

### KIRILMA TOKLUĞU DENEYLERİ

Kırılma tokluğu deneylerinde ilk olarak numunelere başlangıç çatlakları açılması gerekmektedir. Başlangıç çatlakları keskin, düz ve numune yüzeyine dik olması gerekmektedir. Düzgün bir başlangıç çatlakları oluşturmak için en iyi yöntem yorulma ön çatlakları oluşturmaktır. Bu yöntemle numuneye bizim tarafımızdan açılan çentik yorulma çatlak ilerlemesiyle uzatılmaktadır bu sayede çatlak ucu yarıçapını sıfıra yaklaştırarak düz bir çatlak ucu elde edilebilmektedir.

Kırılma tokluğu deneyinde amaç malzemenin kırılmaya karşı olan direnç parametresi olan  $K_{Ic}$  değerini tespit etmektir.  $K_{Ic}$  değeri malzemenin kalınlığından ve geometrisinden bağımsız sabit bir değerdir. Bu değeri sağlamak için kullanılan numunenin standartça belirli bir kalınlığa ve ön çatlak boyuna sahip olması gerekmektedir. Bu değerler;

$$B \geq 2.5 \left( \frac{K_{II}}{\sigma_{ys}} \right)^2 \quad (4.1)$$

$$w \geq 5 \left( \frac{K_{IC}}{\sigma_{ys}} \right)^2 \quad (4.2)$$

$$a \geq 2.5 \left( \frac{K_{IC}}{\sigma_{ys}} \right)^2 \quad (4.3)$$

$$(w - a) \geq 2.5 \left( \frac{K_{IC}}{\sigma_{ys}} \right)^2 \quad (4.4)$$

$B$ : Numune Kalınlığı

$a$ : Çatlak Boyu

$w$ : Numune Yüksekliği

$\sigma_{ys}$  Akma Mukavemeti

## 4.1 Kırılma Tokluğu Deney Çeşitleri

Kırılma tokluğu ( $K_{Ic}$ ) değeri tespitinde doğruluk oranı gerilme şiddet faktörünün (GŞF) yorulma çatlak ucunda oluşan gerilme ve deformasyon değerlerini ne derecede karakterize ettiğine bağlıdır. Bu bölge kararsız çatlak ilerlemesinin ortaya çıktığı bölgedir.

Kırılma tokluğu ( $K_{Ic}$ ) testlerinde numune boyutları belirlenirken, boyutların çentiğin uç noktasında oluşan plastik bölgeden büyük olması gerekmektedir. Bu yüzden, plastik bölgenin gerilme şiddeti analizine etkisi ihmal edilebilir. Bu şekilde düzlem deformasyon hali oluşmaktadır. Çatlak boyu, numune genişliği ve çentik ucundaki kısım uzunluğu kırılma tokluğu deneyleri için önemli ölçülerdir.

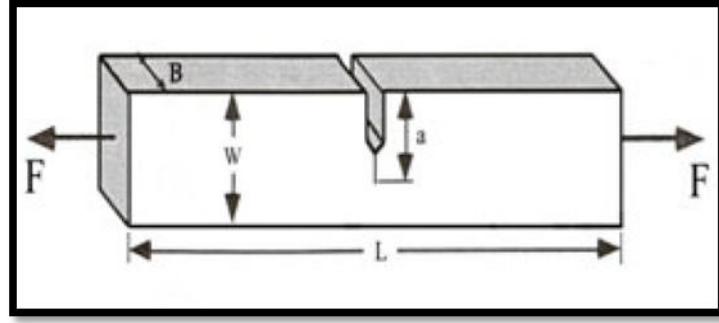
Bu çalışmamızda iki deney yöntemi kullanılarak kırılma tokluğu değeri hesaplanmıştır. Bunlar;

- 1) Tek çentik kenarlı çekme deneyi (Single edge notch tension - SENT)
- 2) Merkezi çatlaklı çekme deneyi (Middle tension - MT)

### 4.1.1 Tek Çentik Kenarlı Çekme Deneyi (SENT)

ASTM E1290-93 standartlarına göre Şekil 4.1 de gösterildiği gibi tek kenardan farklı  $a$  boylarında numuneye ön çatlaklar açılır, daha sonra hazırlanan numuneler sırayla çekme cihazında sabit bir hızda çekilerek kuvvet ve deplasman değerleri kaydedilir. Çekme işlemi kuvvet artışı sonuçlanana kadar devam edilir.

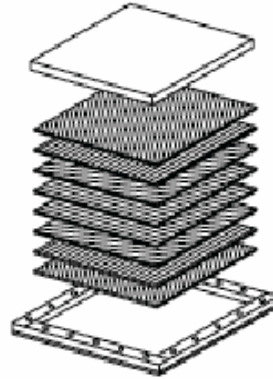
Test aşamasında numuneler cihaza bağlanması ve yükleme hızının belirlenmesinde dikkat edilmelidir. Test sırasında çekme kuvveti ( $F$ ) ve deplasman  $\delta$  (mm) olarak y eksenine kuvvet ( $F$ ) ve x eksenine deplasman  $\delta$  (mm) olarak grafik elde edilmiş olur.



Sekil 4.1 SENT test numunesi, ASTM E1290-93

#### 4.1.1.1 SENT Deneyi İçin Test Numunesi Üretimi

Sent numuneleri İzoreel firmasına yaptırılmıştır. Malzeme olarak cam-epoksi malzeme kullanılmıştır. Cam elyaflar dokuma (woven) tipte olup 0-90 derece yöneliminde ve 8 tabakalı olarak ve el yatırma yöntemi ile sabit sıcaklık ve basınç altında epoksi ile preslenerek kompozit tabaka imal edilmiştir. Şekil 4.2 da tabakalı kompozit yapısı gösterilmiştir.

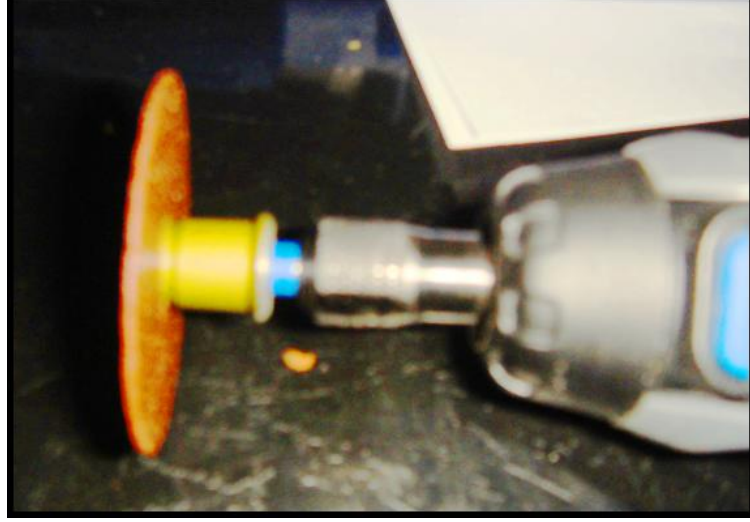


Sekil 4.2 Tabakalı kompozit üretiminin sematik gösterimi

2.3mm × 25mm × 100mm ölçülerinde standarda göre kesilen deney numunelerinde, ASTM E1290-93 standartında belirtildiği gibi farklı boylarda çatlaklar oluşturuldu, Şekil 4.3 de şematik olarak gösterilen çatlak açma işlemi dremel 300 marka 30000 dev / dk yüksek hızda 0.75mm mini kesme taşı ile yapıldı. Böylece tablo 4,1'de de gösterilen 8 farklı çatlak boyu numuneler üzerine açılmış oldu.



Şekil 4.3 Deney numunesinin çatlak açılmış görünümü



Şekil 4.4 Ön çatlak açmada kullanılan aparat

Tablo 4.1 Numunelere açılan çatlak uzunlukları

Numune Numarası	Çatlak Uzunluğu(mm)
1	5
2	6
3	7
4	8
5	9
6	10
7	11
8	12

#### 4.1.1.2 Tek Çentik Kenarlı Çekme Deneyi Yapılışı

ASTM E1290-93 standartça belirlenen ölçülerde ve belirli çatlak uzunluğunda hazırlanan 8 adet numune işlem deney hassasiyetini arttırmak için her numunede 5 er adet Şekil 4.5a'da gösterilen SHIMADZU marka test cihazına bağlanır. Numune Şekil 4.5b' de gösterildiği şekilde bağlanmıştır.



(a)

(b)

Şekil 4.5 a) SHIMADZU test çekme cihazı ve b) cihaza bağlanan SENTnumunesi

SENT deneylerinde aşağıdaki adımlar takip edilir;

1. Standartça belirlenen kriterlere göre açılmış farklı çatlak boylarındaki numuneler çekme cihazında test edilerek her bir numune için  $F- \Delta L$  (kuvvet-deplasman) grafiği çizilir.
2.  $F- \Delta L$  grafiğinde eğim komplians sayısını  $c$  'yi verir. Her numune için ayrı komplians sayısı bulunur.
3. Bulunan komplians sayısına karşılık gelen çatlak  $a$  grafiği çizilir.
4.  $c-a$  grafiğinin Excel programında  $c = f(2a)$  fonksiyonu ( $c=a(2a)+\beta(2a)^2+\beta(2a)^3$ ) elde edilir.

4. Bu fonksiyonun türevi alınır ve kritik çatlak değeri yerine yazılarak  $dc/d(2a)$  bulunmuş olur.

$$G_{IC} = \frac{F^2 c}{2B} \frac{dc}{d(2a)} \quad (4.5)$$

5. (4.5) formülünden çatlağın birim yüzeyde ilerlemesi için açığa çıkan enerji miktarı bulunur.

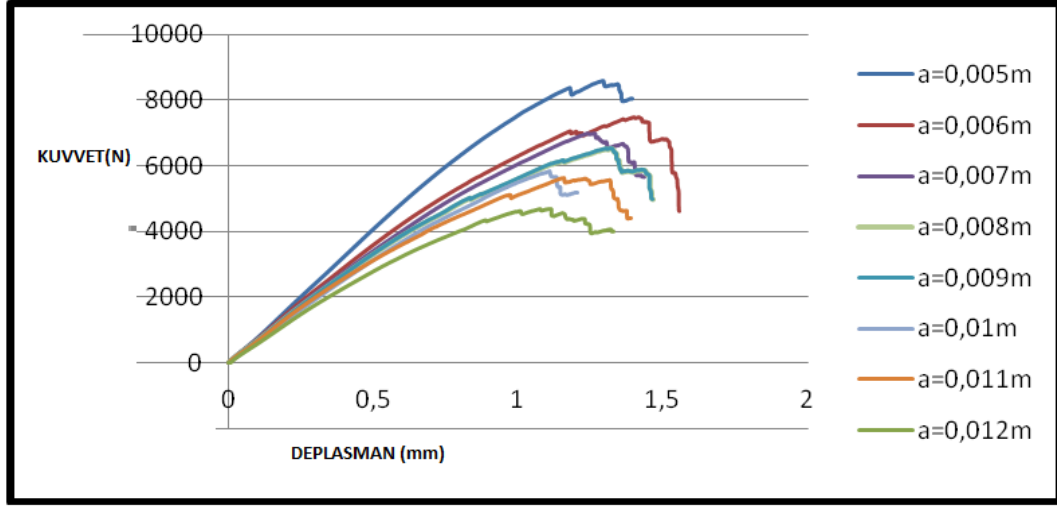
$$K_{IC} = \sqrt{\frac{EG_c}{1-\nu^2}} \quad (4.6)$$

6. (4.6) formülü kullanılarak kırılma tokluğu değeri tespit edilmiş olur.

Test cihazının bulunduğu ortam sıcaklığı 25°C dir. Numuneler Şekil 4.5'de görüldüğü gibi test cihazının aparatları arasına yerleştirilmiştir. Numunelere uygulanacak kuvvetin yükleme hızı 1mm/dak olarak bilgisayara kaydedilmiştir. Çekme deneyi başladığında aynı anda bilgisayar programında numunenin kuvvet deplasman değerleri ve grafiği kaydedilmiştir. Bilgisayardan kuvvet deplasman grafiği deney süresince izlenmiş kuvvet maksimum değerden düşüğe geçtiğinde deney sonlandırılmıştır.

Çekme cihazından alınan datalar ile Excel programında her numune için yük-deplasman ve yük- zaman grafikleri çizilmiş komplians değerlerinin bulunması için yük deplasman grafiklerinin denklemleri grafik üzerinde gösterilmiştir.

Şekil 4.6 da kullanılan bütün numunelerin yük altındaki deplasmanları aynı grafikte gösterilmiştir.



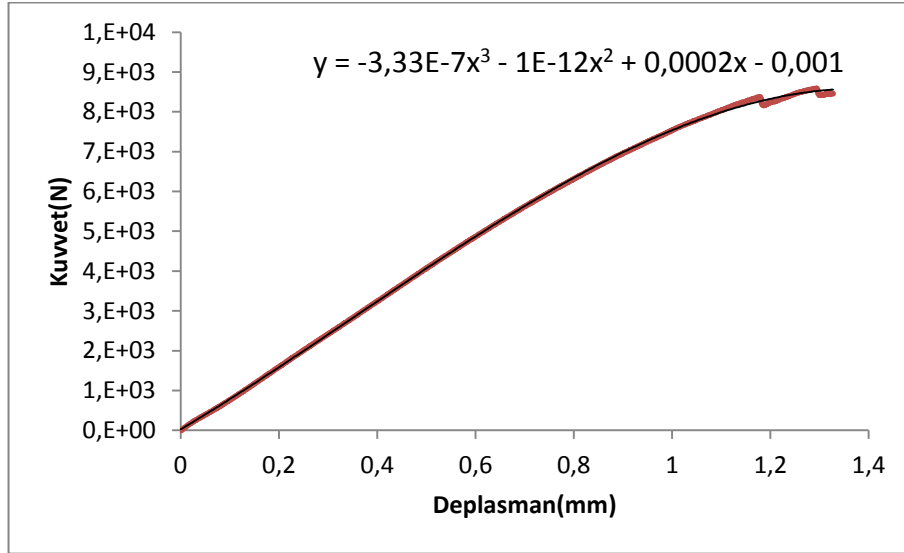
Şekil 4.6 Farklı çatlak boylarında kuvvet deplasman grafiği

Deney sonucunda her numune için yük- deplasman ve yük zaman grafiği aşağıda verilmiştir.

1 nolu numune yük deplasman grafiği;

Çatlak Boyu: 5mm

Maksimum yük: 8592N



Şekil 4.7 1.numune için elde edilen yük-deplasman grafiği görüntüleri

Bir numaralı numunenin yük-deplasman grafiği şekildeki gibidir. Buradaki eğimden kompians değeri

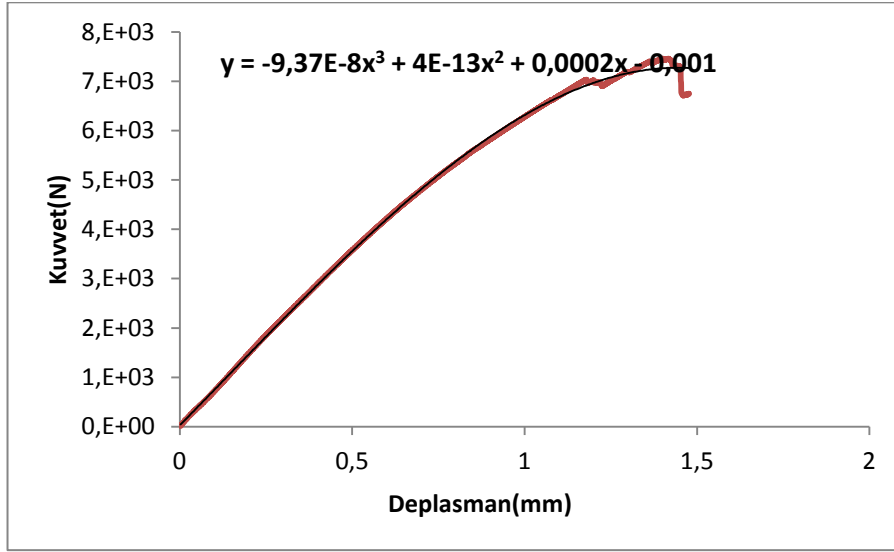
$$c = f(2a)$$

$dc / d(2a)$  bağıntısından

$$c_1 = 9,98 \times 10^{-5} \text{ elde edilir}$$

Çatlak Boyu: 6mm

Maksimum yük: 7461,33N



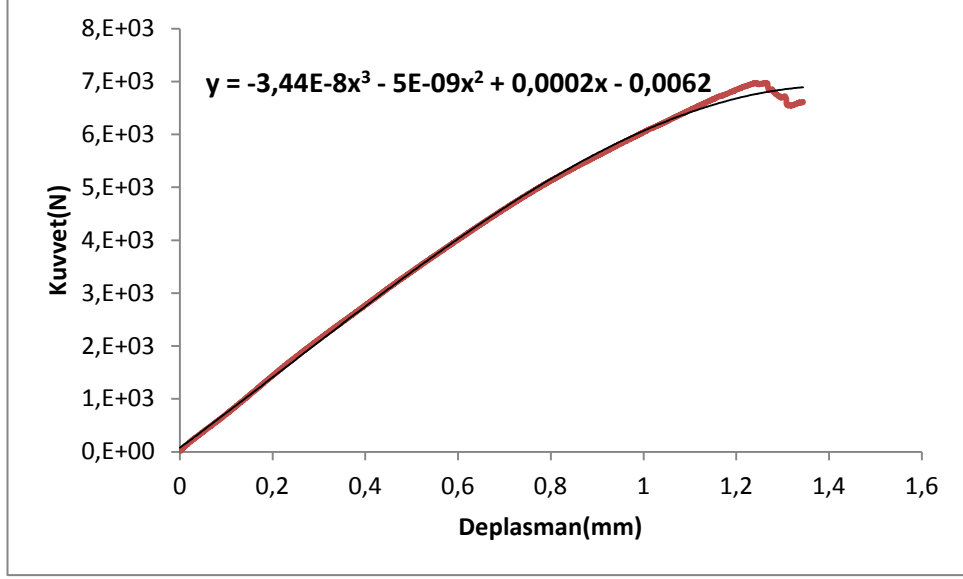
Şekil 4.8 2.numune için elde edilen yük-deplasman grafiği görüntüleri

$dc / d(2a)$  bağıntısından

$$c_2 = 1,595 \times 10^{-4} \text{ elde edilir}$$

Çatlak Boyu: 7mm

Maksimum yük: 6973 N



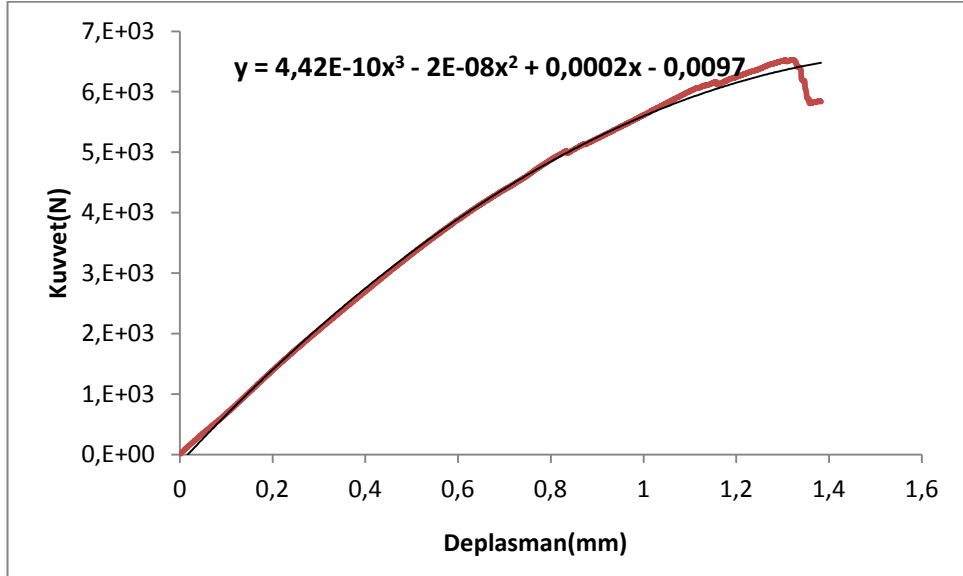
Şekil 4.93.numune için elde edilen yük-deplasman grafiği görüntüleri

$dc / d(2a)$  bağıntısından

$c_3 = 1,796 \times 10^{-4}$  elde edilir

Çatlak Boyu: 8mm

Maksimum yük: 6523 N



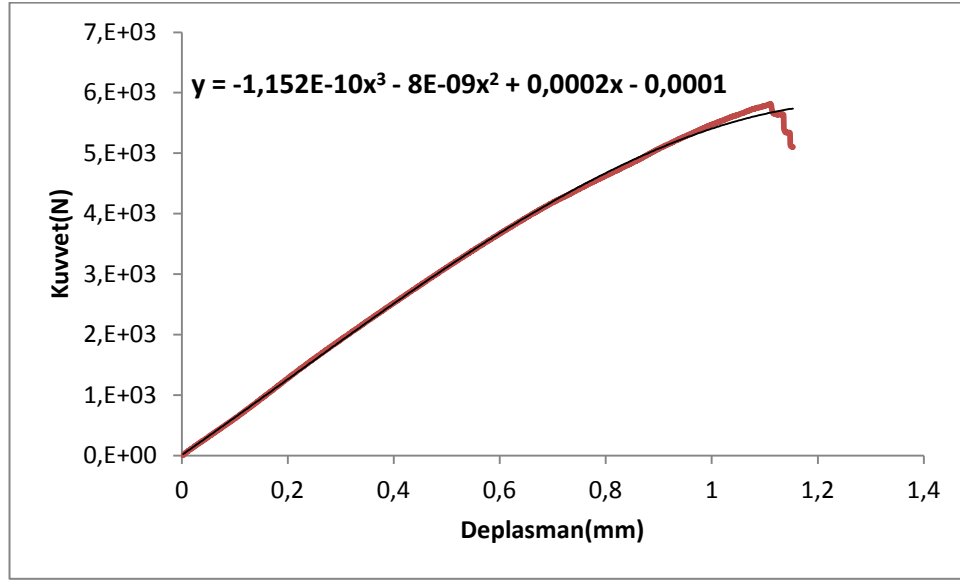
Şekil 4.10 4.numune için elde edilen yük-deplasman grafiği görüntüleri

$dc / d(2a)$  bağıntısından

$c_4 = 1,997 \times 10^{-4}$  elde edilir

Çatlak Boyu: 9mm

Maksimum yük: 5816N



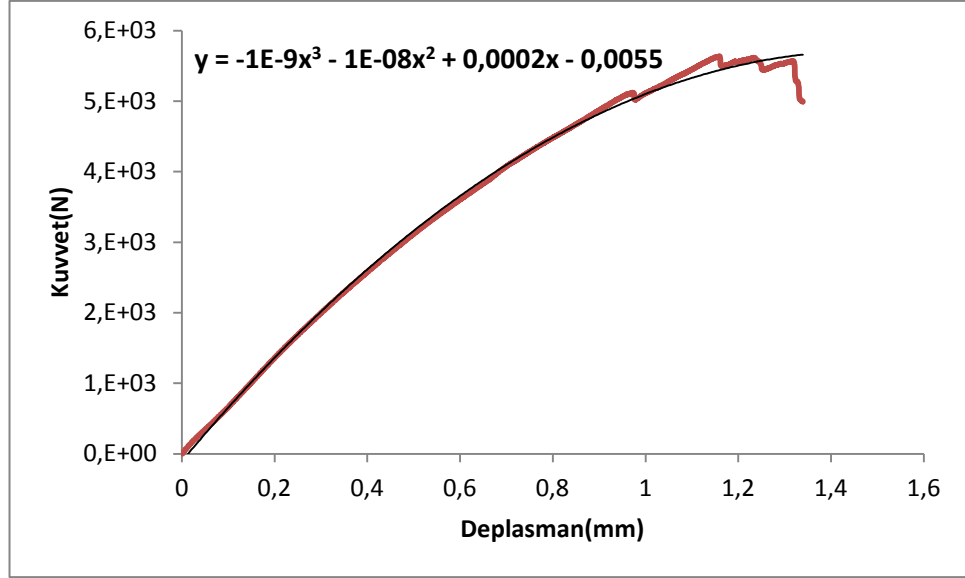
Şekil 4.115.numune için elde edilen yük-deplasman grafiği görüntüleri

$dc / d(2a)$  bağıntısından

$c_5 = 1,996 \times 10^{-4}$  elde edilir.

Çatlak Boyu: 10mm

Maksimum yük: 5634N



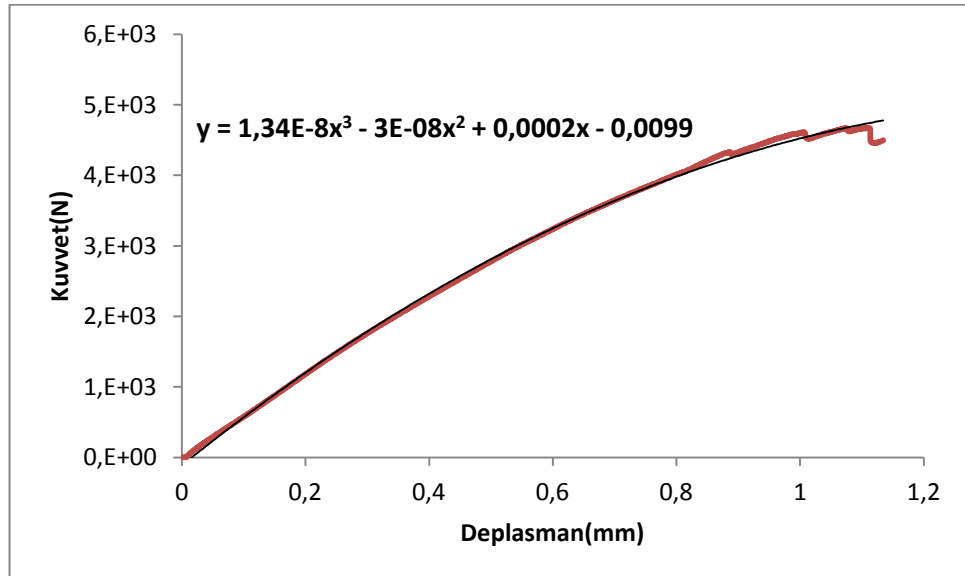
Şekil 4.12 6.numune için elde edilen yük-deplasman grafiği görüntüleri

$dc / d(2a)$  bağıntısından.

$c_6 = 1,984 \times 10^{-4}$  elde edilir

Çatlak Boyu: 11mm

Maksimum yük: 4674N



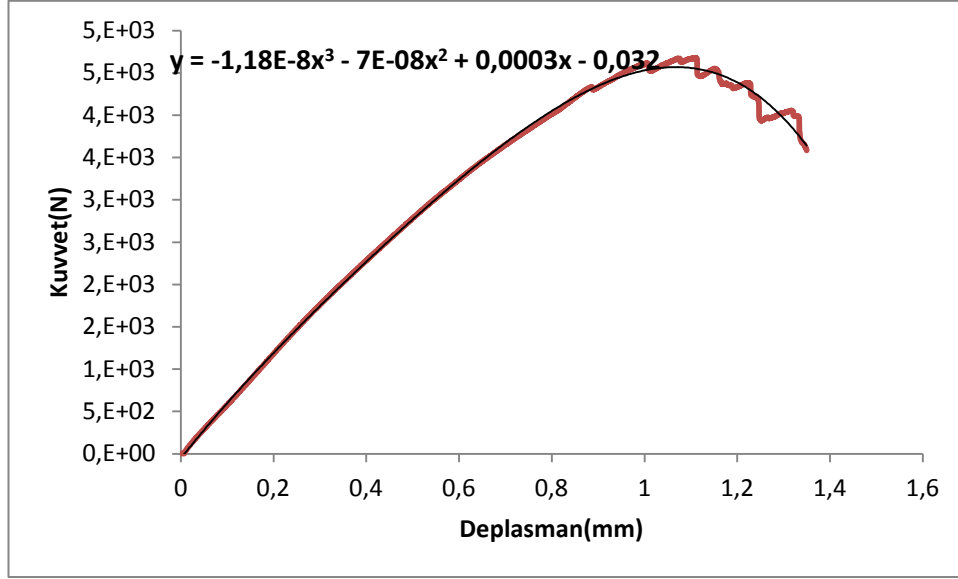
Şekil 4.13 7.numune için elde edilen yük-deplasman grafiği

$dc / d(2a)$  bağıntısından.

$c_7 = 2,182 \times 10^{-4}$  elde edilir

Çatlak Boyu: 12mm

Maksimum yük: 4598N



$dc / d(2a)$  bağıntısından

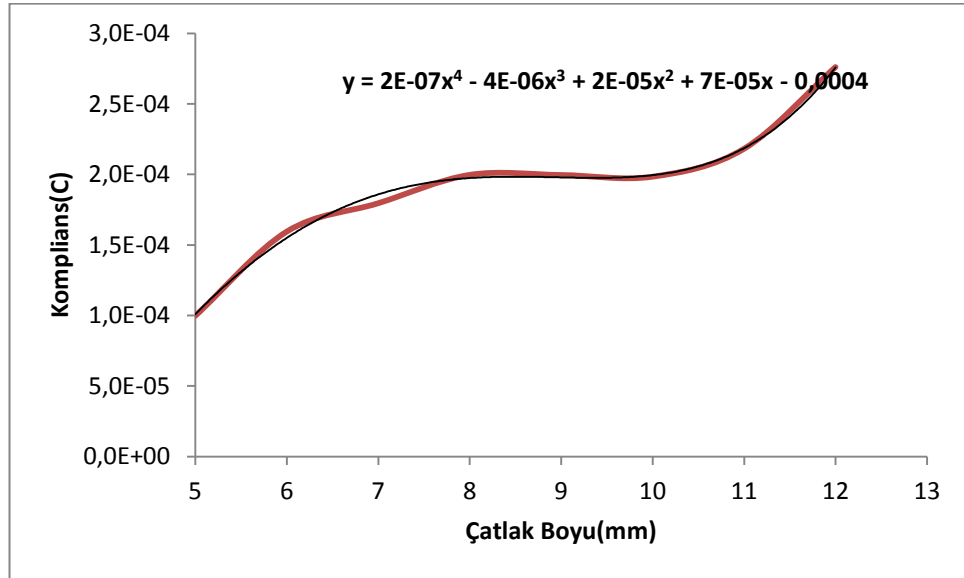
$c_8 = 2,761 \times 10^{-4}$  elde edilir

8 farklı çatlak boyuna sahip numunenin çekme testi sonucu bulunan complians-çatlak boyu grafiği tablo 4.2'de gösterilmiştir.

Tablo 4.2 Çatlak miktarına karşılık gelen complians değerleri

Çatlak boyu	Komplians
5	0,0000998
6	0,0001595
7	0,0001796
8	0,0001997
9	0,0001996
10	0,0001984
11	0,0002182
12	0,0002761

Bulunan bu değerler Excel programına atılarak aşağıdaki grafik elde edilmiştir.



Şekil 4.15 Numuneler için elde edilen komplians değerlerine karşılık çatlak boyu

$$y = 2E-07x^4 - 4E-06x^3 + 2E-05x^2 + 7E-05x - 0,0004 \quad (4.7)$$

8 nolu numune değerleri denklem (4.7) de yerine konularak ve aşağıdaki verilen değerler kullanılarak denklem (4.8) elde edilmektedir.

$$F = 4674 \text{ N}$$

$$a = 12 \text{ mm} = 0,012 \text{ m (x yerine yazılacak deger)}$$

$$B = 25 \text{ mm} = 0,025 \text{ m}$$

$$y' = 8E-7x^3 - 12E-06x^2 - 4E-05x + 7E-05 \quad (4.8)$$

x yerine kritik çatlak  $a=0,012m$  koyulur.

$$y'=c'=6,92E-05$$

Bulunan  $c'$  degeri, numuneye uygulanan kuvvet, numune kalınlığı, cam epoksinin elastisite modülü ve poisson oranı  $G_{ic}$  ve  $K_{ic}$  denklemlerinde yerine yazılarak çatlak ilerlemesi için gerekli enerji miktarı ve kırılma tokluğu hesaplanır.

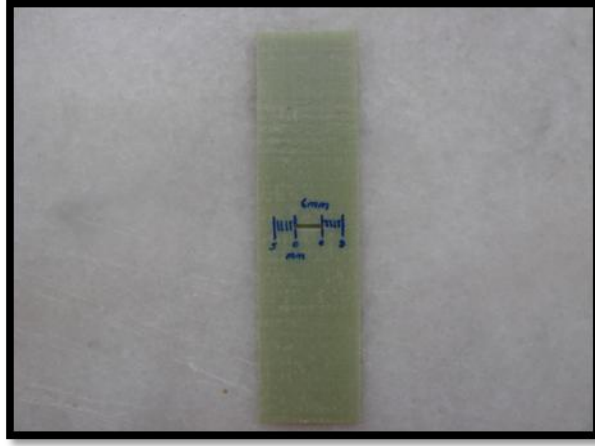
Cam epoksinin deneysel olarak elde edilen önceden elde edilen E ve  $\nu$  değerleri  $E = 37000 \text{ MPa}$ ,  $\nu = 0,23$  olup 4.6 denkleminde kullanılacaktır. Ayrıca Denklem (4.5)'i kullanmak suretiyle açığa çıkan enerji miktarı  $G_{ic}=305006.445 \text{ J/m}^2$  olarak Denklem (4.5) değerler yerine konulup aşağıdaki denklem elde edilerek hesaplanmıştır.

$$G_{ic} = \frac{4674,78^2}{2 \times 0.025} 6.92E - 05 \quad (4.9)$$

Bulunan  $G_{ic}$  değeri Denklem (4.6) yerine  $K_{ic}$  değeri,  $K_{ic} = 34.37 \text{ MPa}\sqrt{m}$  olarak hesaplanmıştır.

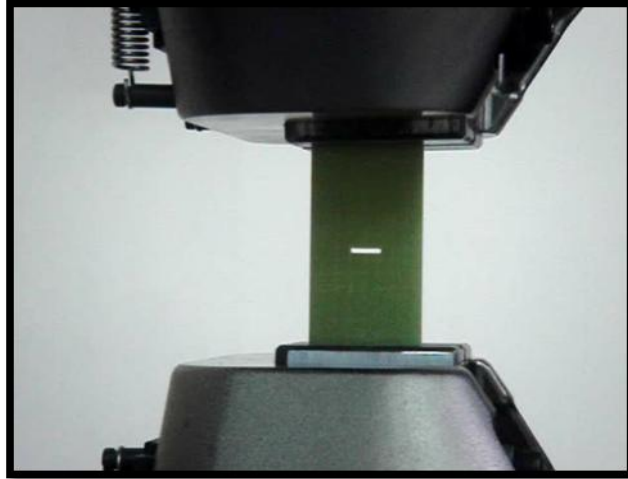
#### **4.1.2 Merkezi Çatlaklı Çekme Deneyi ve Deneyin Yapılışı (middle tension-MT)**

MT numunesinde kullanılacak kompozit plaka İZOREEL firmasında yaptırılmıştır. Malzeme olarak SENT numunesindeki cam-epoksi malzeme kullanılmıştır. Cam elyaflar örgülü tipte olup  $0-90^\circ$  yöneliminde 8 tabaka olarak el yatırma yöntemi ile sıcaklık ve basınç altında preslenerek üretilmiştir. Numune ASTM E647 standardına göre  $2.3 \text{ mm} \times 25 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$  boyutlarında Şekil 4.24' de gösterildiği gibi 5 adet imal edilmiştir. Numunelerin merkezindeki çatlak  $1 \text{ mm}$  çapında sinter karbür freze çakısı kullanılarak yüksek devirde  $6 \text{ mm}$  uzunluğunda freze ile çatlak oluşturulmuştur.



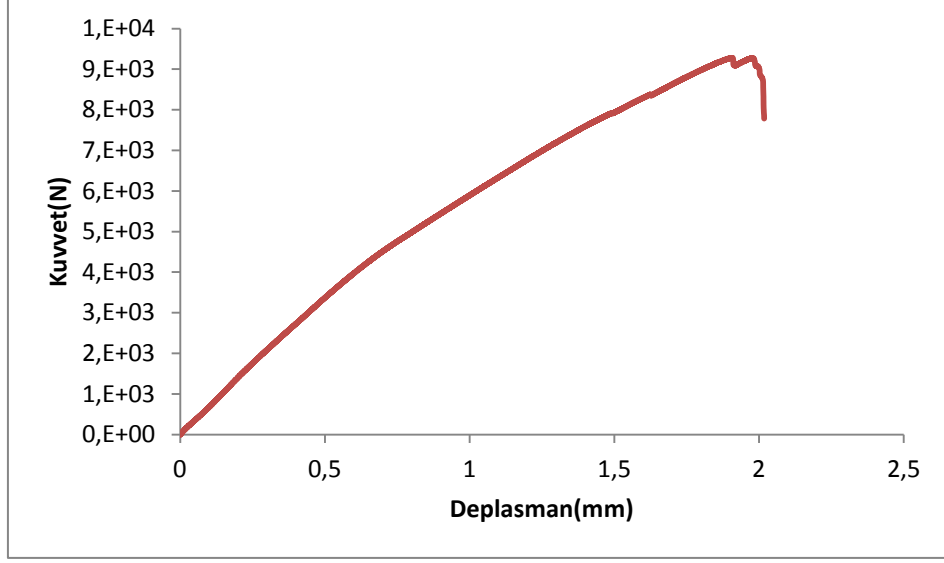
Şekil 4.16 Merkezi çatlaklı deney numunesi

Hazırlanan numune SHIMADZU marka test cihazına Şekil 4.17 deki gibi bağlanarak 1mm/dakika hızla çekme testine tabii tutulur.

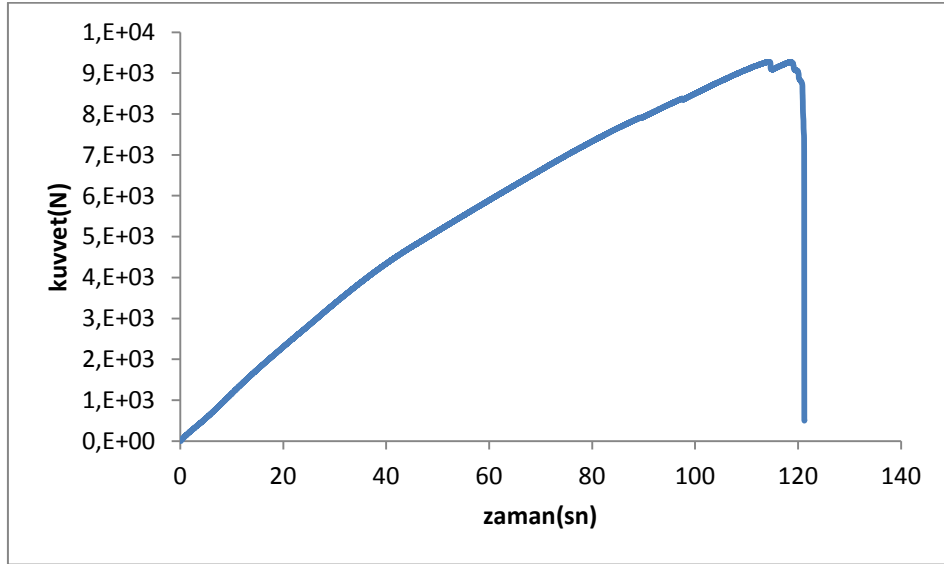


Şekil 4.17 SHIMADZU test cihazına bağlı merkez çatlaklı numune

Merkezinde çatlak bulunan numuneler 1mm/dk çekme hızda yüklemeye maruz bırakılmıştır. Bilgisayarda çekme işlemi başlatıldığında Sony DSC T50 dijital fotoğraf makinesi ile çatlak bölgesi videoya alınmış çatlak ilerlemesi kaydedilmiştir. Buradan kırılma esnasında maksimum yük 9576N da meydana gelmiş çatlak miktarı 0,98mm olarak ölçülmüştür. Bilgisayarda data kontrolü yapılarak maksimum yükün 118,62 inci saniyede olduğu görülmüştür. Şekil 4.18 da kuvvet-deplasman grafiği gösterilmiştir.

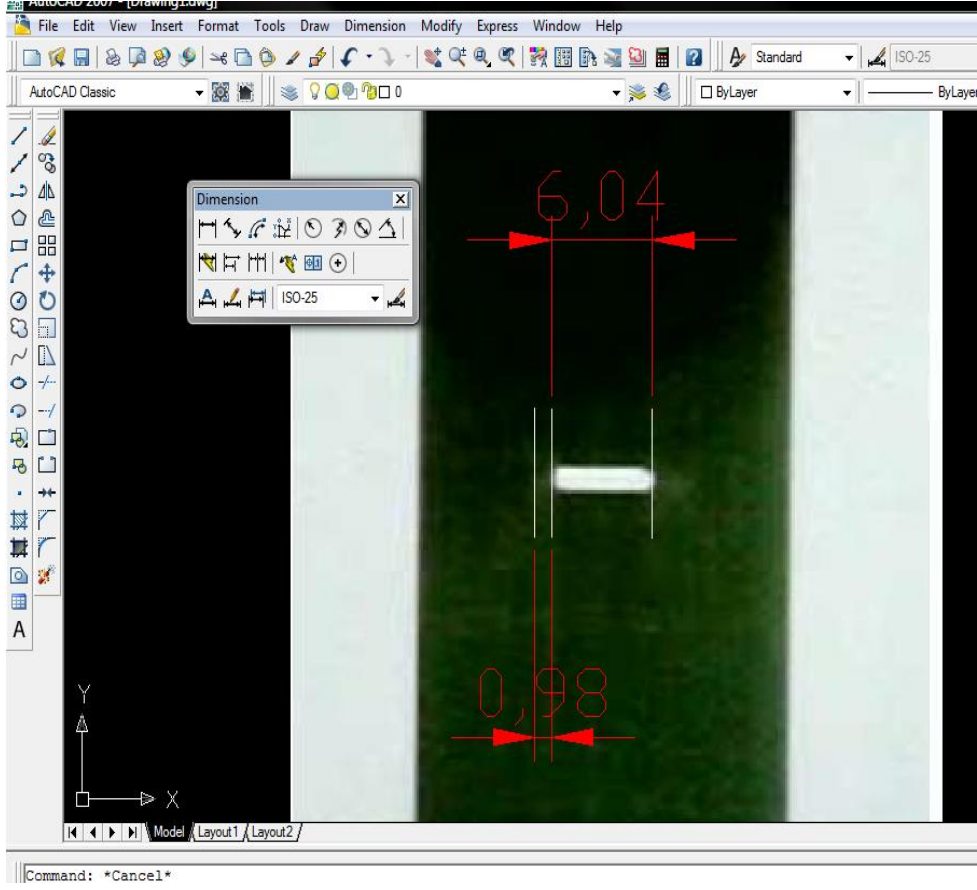


Şekil 4.18 Merkezi çatlaklı numunenin kuvvet deplasman grafiği



Şekil 4.19 Merkezi çatlaklı numunenin kuvvet -zaman grafiği

Çatlak açılma miktarını belirlemek için maksimum yükün meydana geldiği zaman bilgisayardan 118 inci saniye olarak bulunmuştur. Çekim sırasında kaydettiğimiz görüntüde aynı zamanı bulundu ve görüntü jpeg formatında kaydedilmiştir. Kaydedilen resim autocad programında açılarak çatlak uzunluğu gerçek uzunluk olan 6mm olarak scale komutu kullanılarak tanımlanmış daha sonra çatlak sonu işaretlenip bu ölçü 0,98mm olarak bulunmuştur. Şekil 4.19 de bu ölçüler gösterilmektedir.



Şekil 4.20 Merkezi çatlaklı numune için tespit edilen 118 inci saniyedeki çatlak uzunluğu

Gerilme şiddet faktörü bulunurken ASTM E 647 standardı kullanılmıştır. Buna göre ortasında çatlak bulunan numuneler için aşağıdaki formüller kullanılmıştır.

$$\alpha = 2a / w \quad (4.10)$$

$$2a / w < 0.95 \quad (4.11)$$

Şartıyla aşağıdaki denklem (4.12) kullanılmak suretiyle kırılma tokluğu parametresi hesaplanmış olur.

$$K_{IC} = \left( \frac{P}{B} \right) \left( \sqrt{\left( \frac{\pi a}{2w} \right) \sec\left( \frac{\pi a}{2} \right)} \right) \quad (4.12)$$

Burada,  $P$  uygulanan kuvvet,  $B$  malzeme kalınlığı,  $w$  malzeme genişliği ve  $2a$  çatlak boyu ile ilgili parametrelerdir ve aşağıdaki değerler Denklem (4.12) de kullanılarak kırılma tokluğu  $31,74 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  olarak hesaplanmıştır.

$$P = 9276 \text{ N}$$

$$B = 2,3\text{mm}$$

$$\alpha = 0,98\text{mm}$$

$$w = 25\text{mm}$$

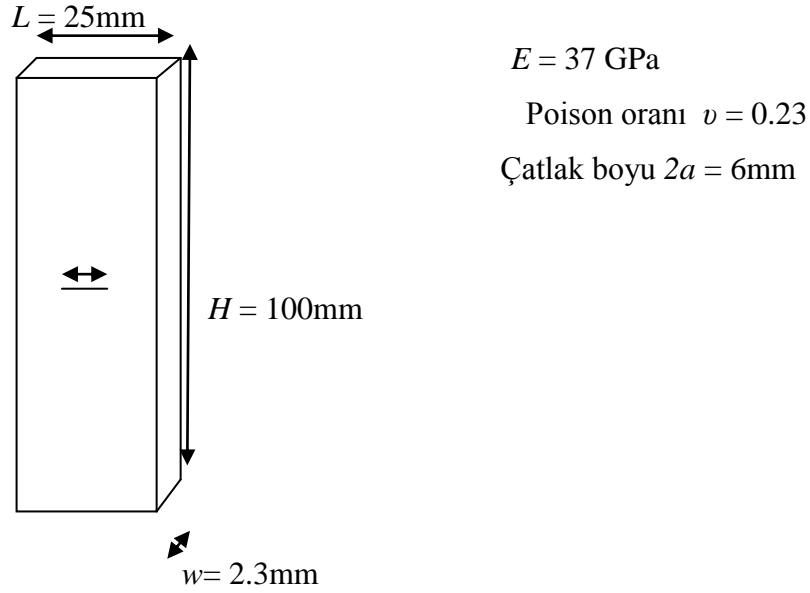
$$K_{Ic} = 31,74 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$$

## BÖLÜM BEŞ

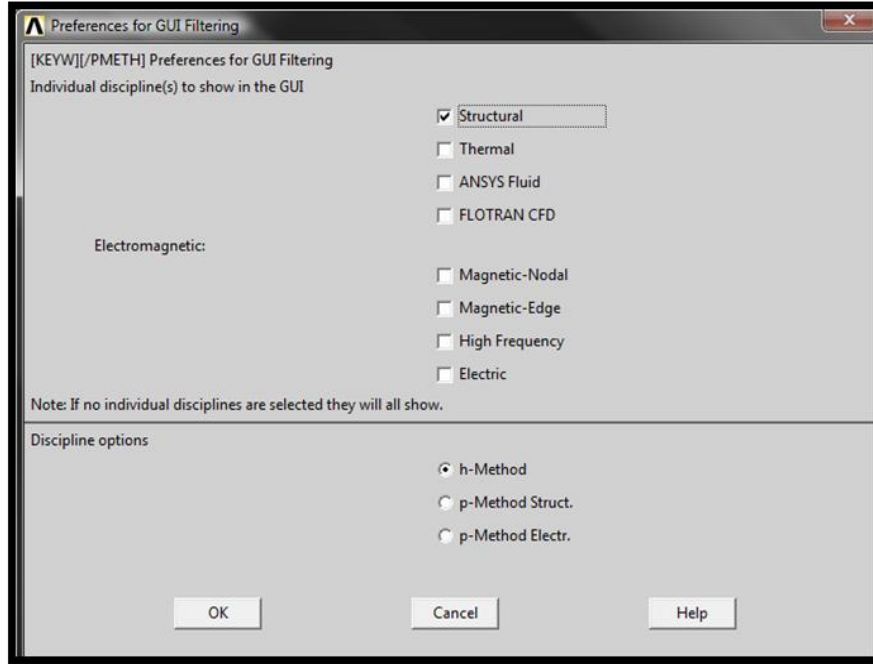
### MERKEZİ ÇATLAKLI NUMUNENİN ANSYS İLE KIRILMA TOKLUĞU ANALİZİ

#### 5.1 Analiz Yönteminin Belirlenmesi

Main Menu- Prefences- Structural komutlarını takip ederek yapacağımız analiz sadece gerilmelerle ilgili olduğundan Structuralactif hale getirilir ve “Ok” tıklanarak pencere kapatılır.



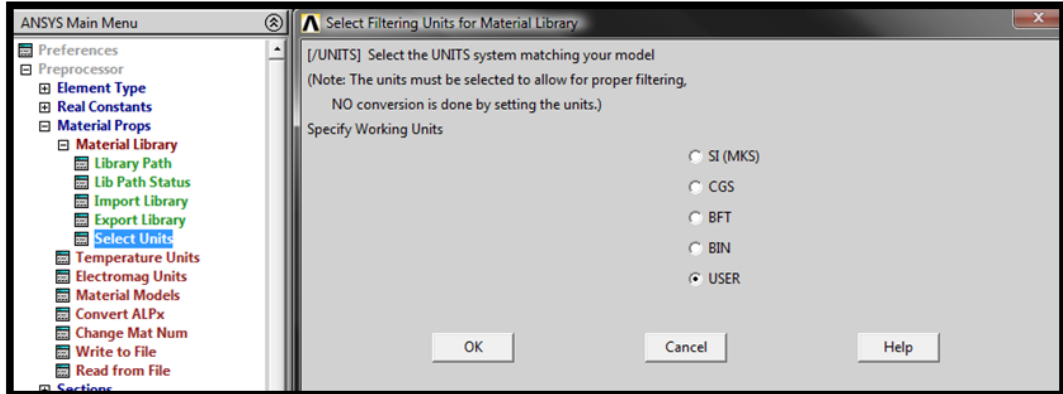
Şekil 5.1 Merkezi çatlaklı çekme numunesi boyutlarının şematik gösterimi



Şekil 5.2 Analiz yöntemi belirlenmesi

## 5.2 Birim Atama

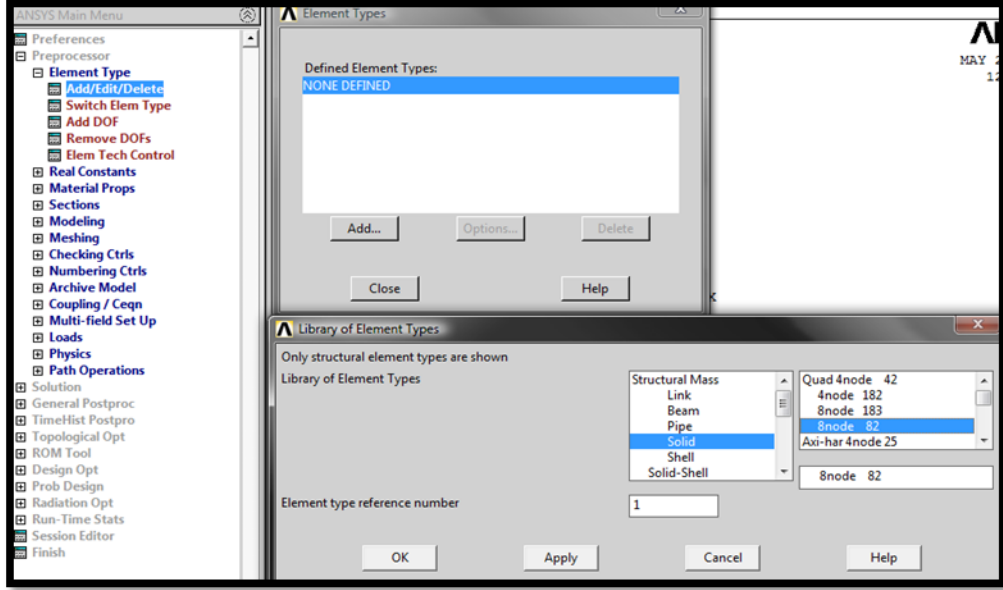
Main Menu- Preprocessor-Material Props-Material Library-Select Units- User-Ok



Şekil 5.3 Birim atama

### 5.3 Malzeme Özelliklerinin Atanması

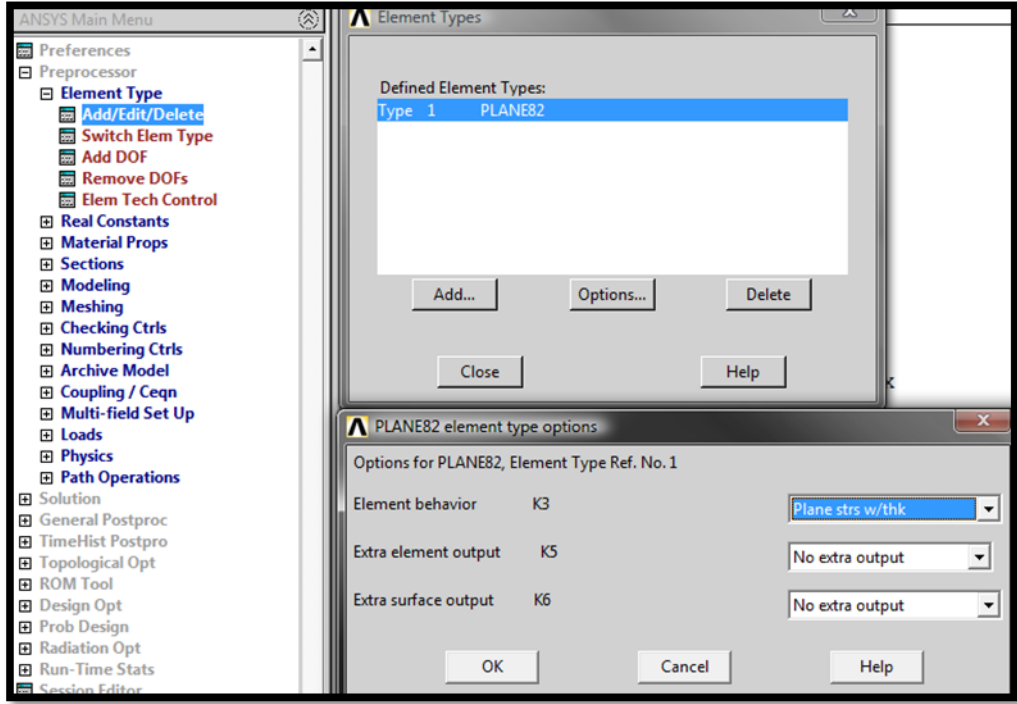
Main Menu- Preprocessor-Element Type-Add- Solid 8 node 82-Ok



Şekil 5.4 Malzeme özelliklerinin atanması

## 5.4 Malzemeye Kalınlık Atanması

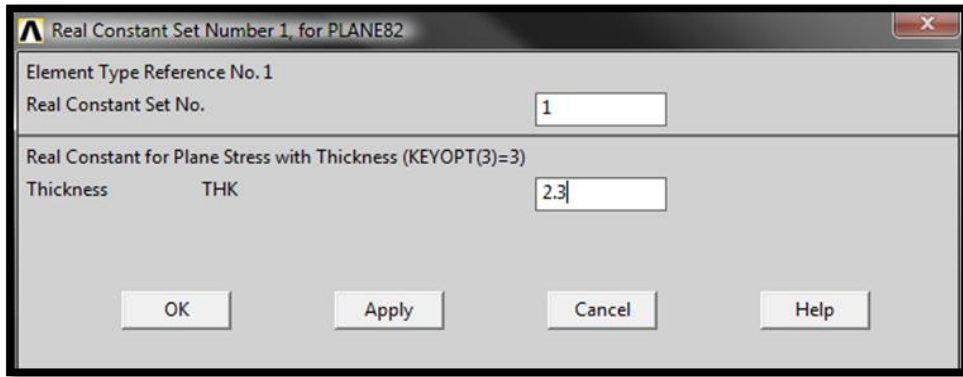
Main Menu- Preprocessor-Element Type- Options- Planests w/thk- Ok



Şekil 5.5 Malzemeye kalınlık atanması

Malzemeye kalınlık girmek için;

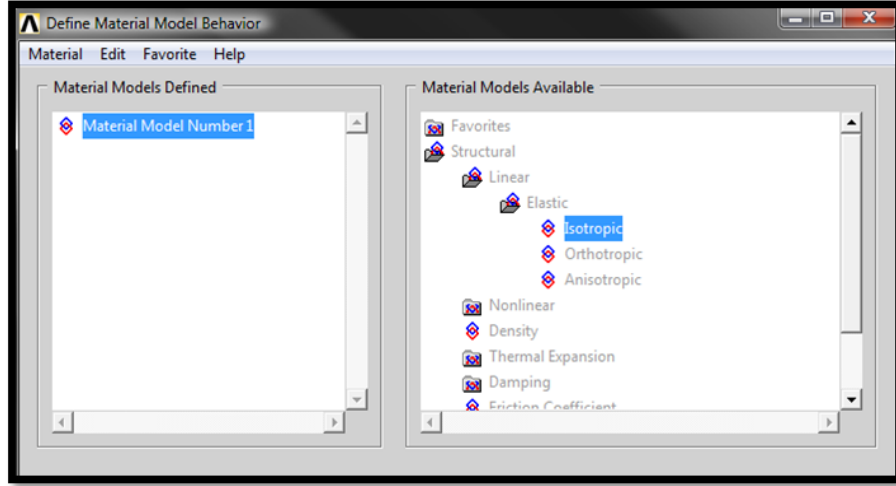
Main Menu- Preprocessor- Real Constants- Add- Ok-2.3 girilir.



Şekil 5.6 Malzeme kalınlık değerinin girilmesi

## 5.5 Malzeme Davranışının Belirlenmesi

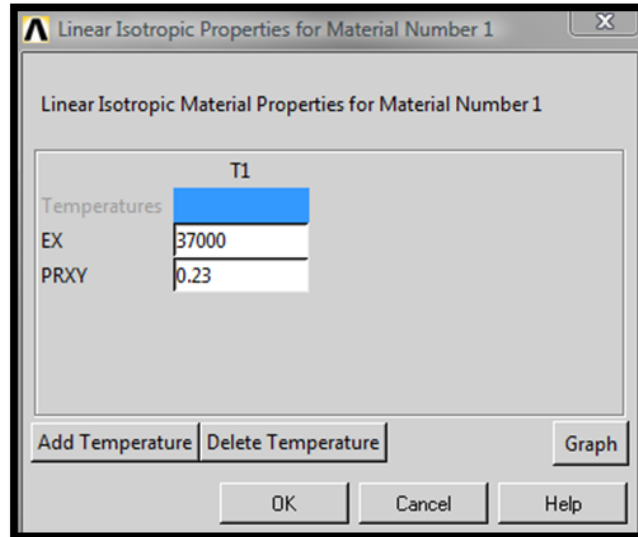
Main Menu- Preprocessor- Material Props- Structural- Linear- Elastic- Isotropic



Şekil 5.7 Malzeme davranışının belirlenmesi

Açılan ekranda elastisitemodülü ve poisson oranı girilir.

Numune davranışı izotropik olarak kabul edilmiştir.

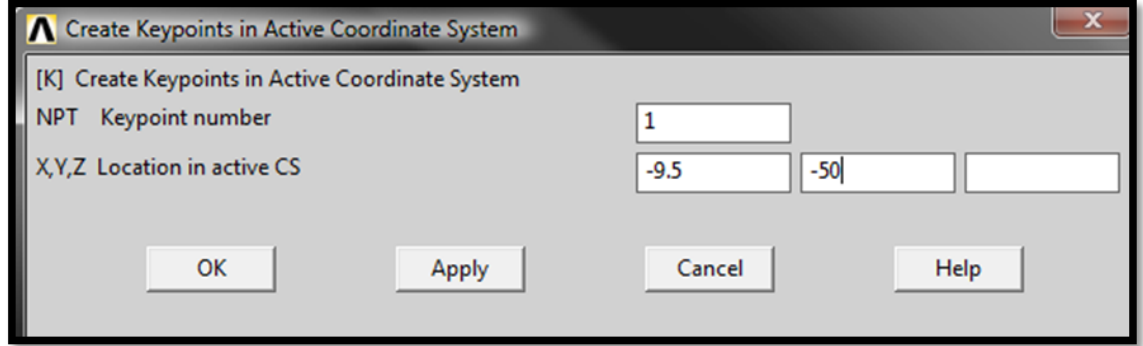


Şekil 5.8Elastisite modülü ve poisson oranı girilmesi

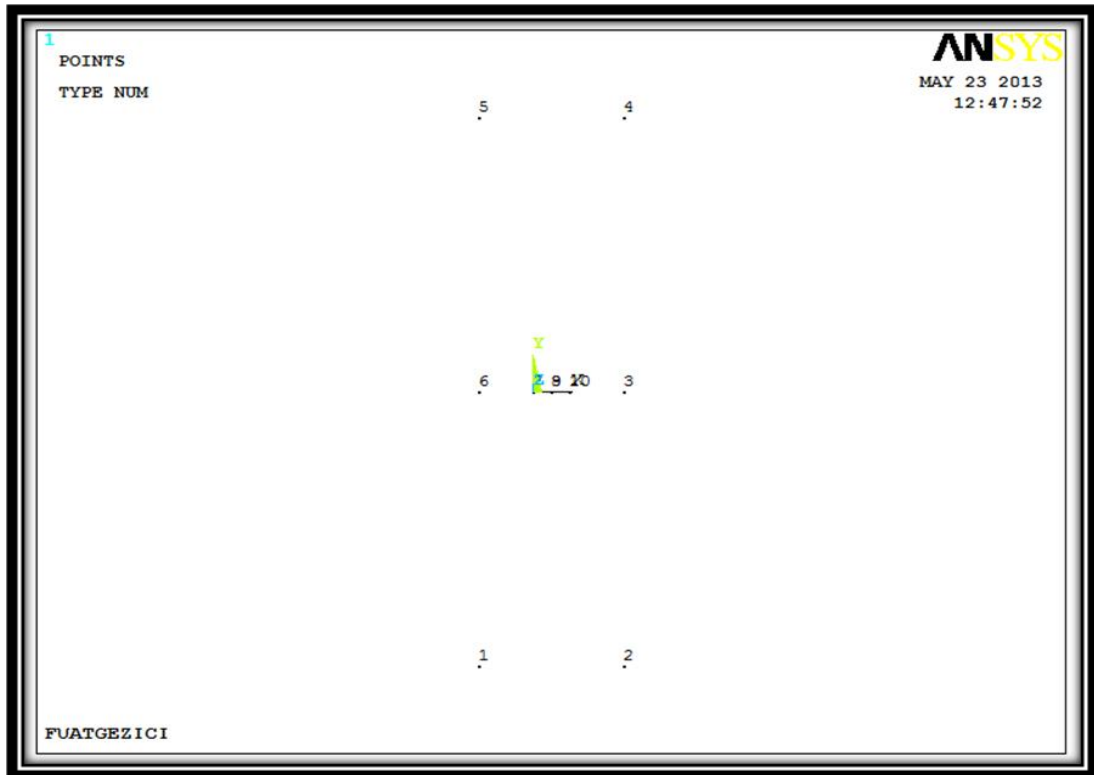
## 5.6 Numune Geometrisi Oluşturma

### 5.6.1 Anahtar Noktaların Girilmesi(Keypoints)

Main Menu- Preprocessor- Modeling- Create- Keypoints- On Active Cs



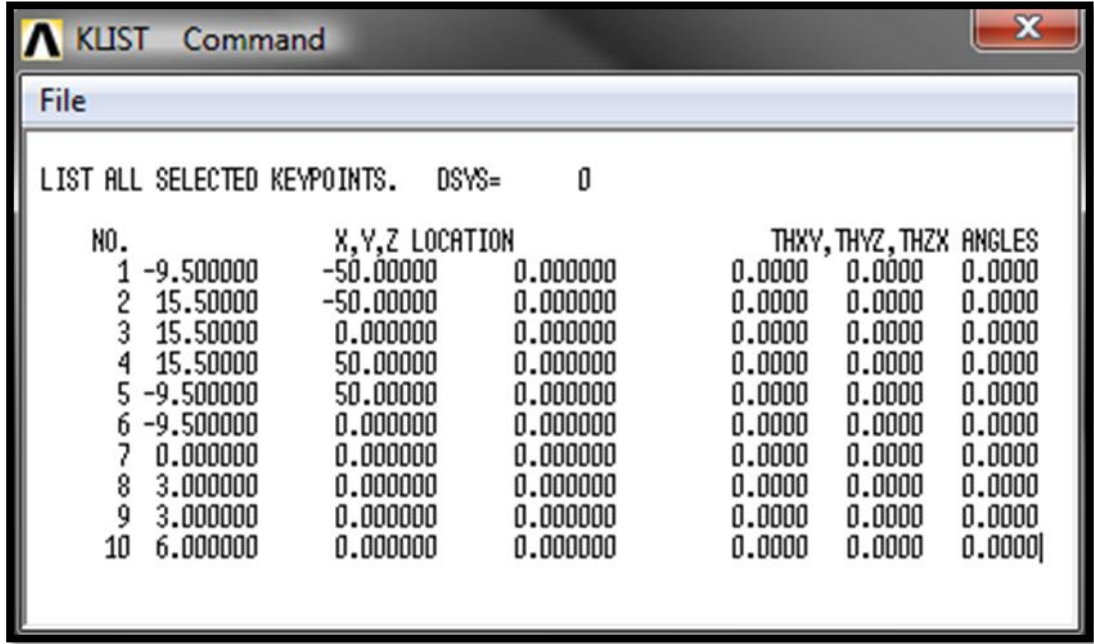
Şekil 5.9 Anahtar noktaların girilmesi



Şekil 5.10 Anahtar noktalar

Anahtar noktalar tanımlandıktan sonra kontrol etmek için listeliyoruz.

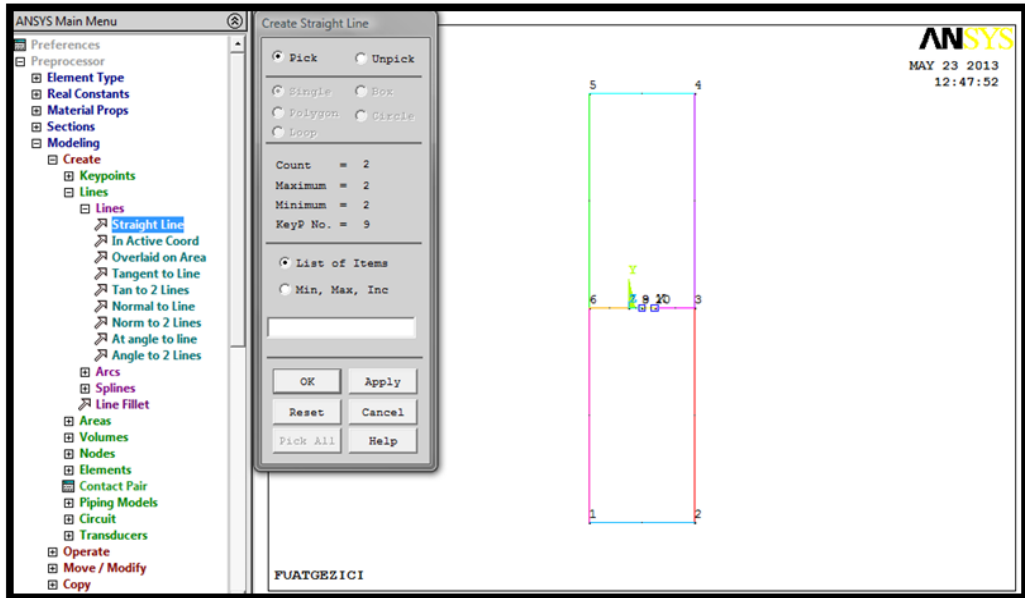
List-keypoints-coordinatesonly



Şekil 5.11 Anahtar noktaların listelenmesi

### 5.6.2 Çizgilerin Oluşturulması (Lines)

Main Menu- Preprocessor- Modeling- Create- Lines- StraightLine



Şekil 5.12 Çizgilerin oluşturulması

Oluşturulan çizgilerin listelenmesi;

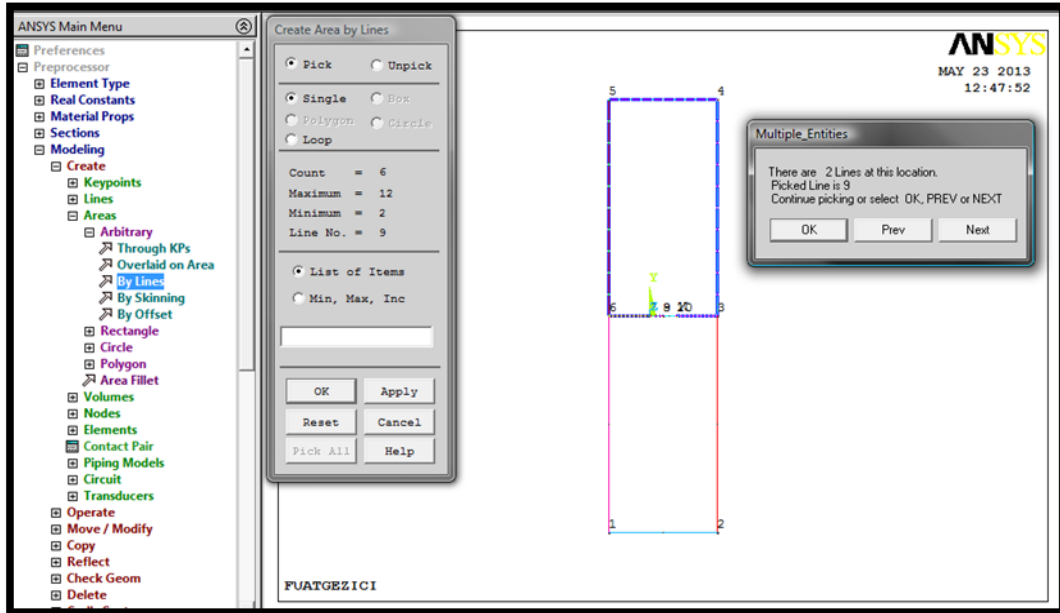
List- lines- attribute format

NUMBER	KEYPOINTS	LENGTH	(NDIV)(SPACE)	KYND	NDIV	SPACE	#NODE	#ELEM	MAT	REAL	TYP	ESYS
1	5	4	25.00	0	1.000	0	0	0	0	0	0	0
2	4	3	50.00	0	1.000	0	0	0	0	0	0	0
3	3	2	50.00	0	1.000	0	0	0	0	0	0	0
4	2	1	25.00	0	1.000	0	0	0	0	0	0	0
5	1	6	50.00	0	1.000	0	0	0	0	0	0	0
6	6	5	50.00	0	1.000	0	0	0	0	0	0	0
7	6	7	9.500	0	1.000	0	0	0	0	0	0	0
8	3	10	9.500	0	1.000	0	0	0	0	0	0	0
9	7	8	3.000	0	1.000	0	0	0	0	0	0	0
10	10	8	3.000	0	1.000	0	0	0	0	0	0	0
11	7	9	3.000	0	1.000	0	0	0	0	0	0	0
12	10	9	3.000	0	1.000	0	0	0	0	0	0	0

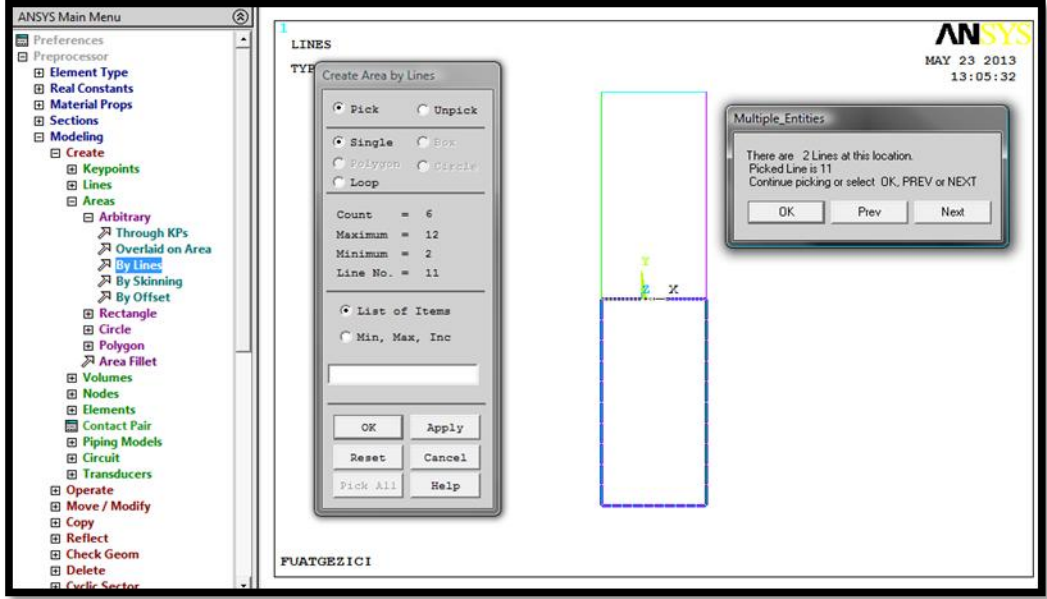
Şekil 5.13 Çizgilerin listelenmesi

### 5.6.3 Alanların Oluşturulması (Areas)

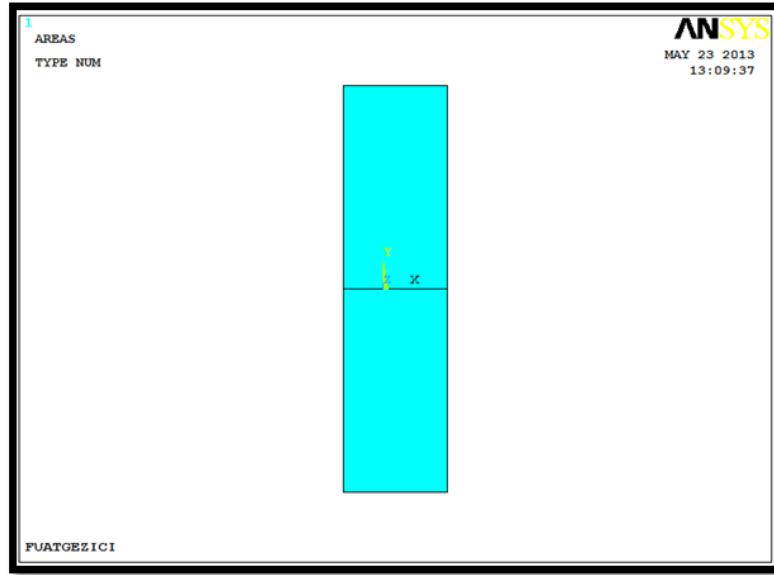
Main Menu- Preprocessor- Modeling- Create- Arbitrary- ByLines



Şekil 5.14 Üst alan oluşturulması



Şekil 5.15 Alt alan oluşturulması



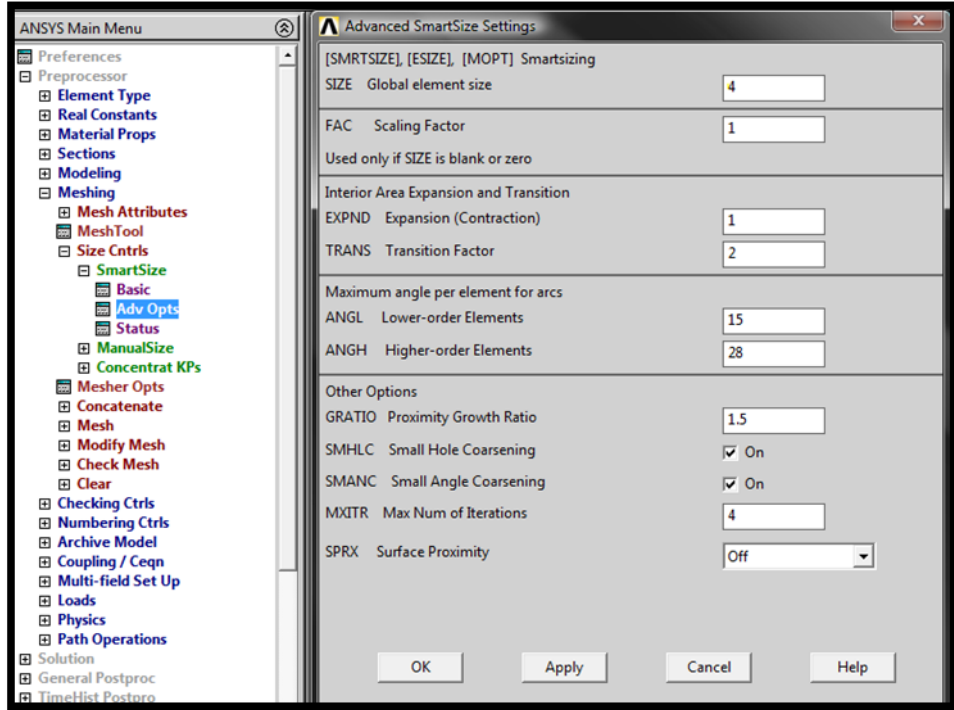
Şekil 5.16 Bütün alan oluşmuş hali

## 5.7 Elemanlara Ayırma (Meshing)

Bu bölümde ilk olarak kullanılacak mesh ölçülerini belirliyoruz.

Main Menu- Preprocessor- Modeling- Meshing- Size Controls- Smart Size- Adv.Opst

Global element size bölümünde 1 den 6 ya kadar olan bölümde hassasiyeti 4 olarak giriyoruz.

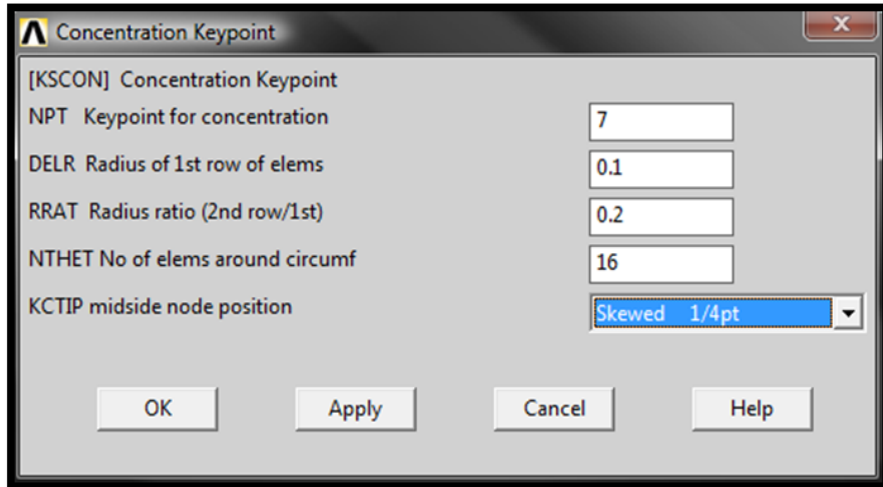


Şekil 5.17 Mesh hassasiyeti girilmesi

Çatlak bölgesinde gerilme şiddet faktörünü bulmak için üçgen eleman tanımlanması gerekiyor.

Main Menu- Preprocessor- Modeling- Meshing- Size Cntrl- ConcenratsKPs

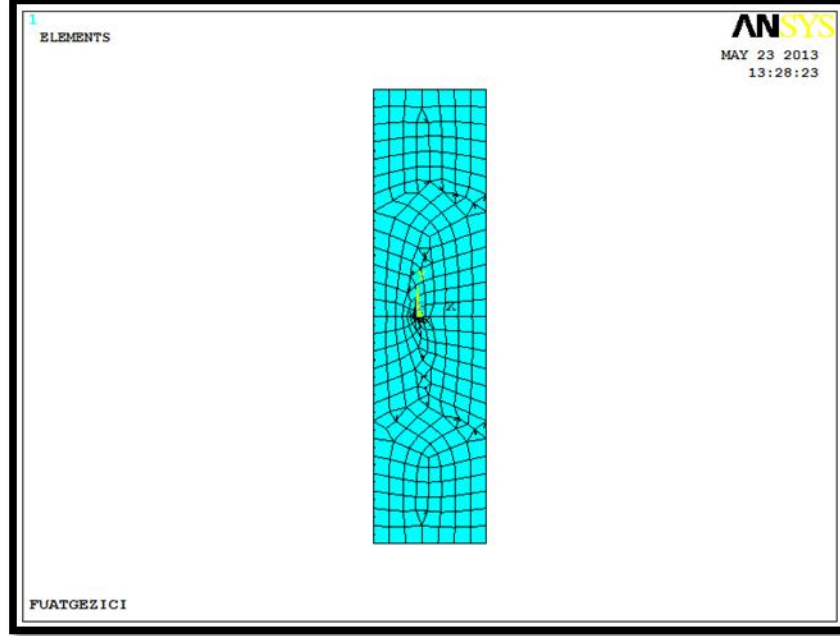
7 nolukeypoint seçilerek mesh oranları ve eleman sayıları girilir.



Şekil 5.18 Çatlak bölgesi üçgen eleman tanımlama

Çatlak bölgesinde üçgen eleman tanımladıktan sonra numuneyi mesh işlemi yapıyoruz.

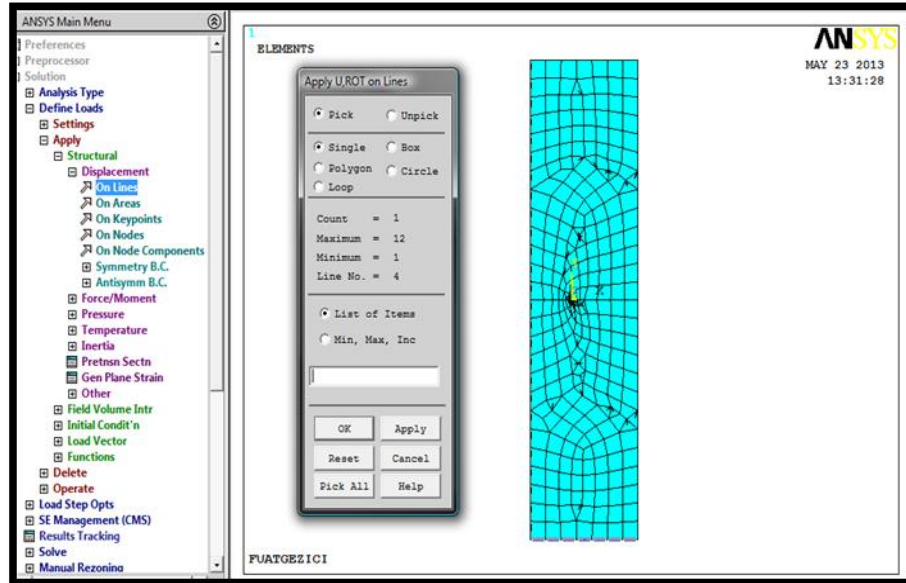
Main Menu- Preprocessor- Modeling- Meshing- Mesh - Areas - Free - PickAll



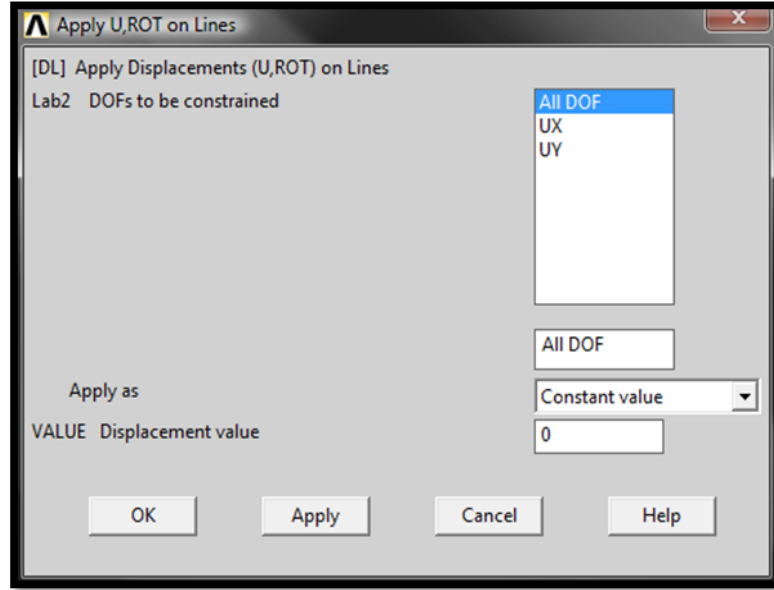
Şekil 5.19 Numune mesh yapılmış hali

## 5.8 Sınır Şartlarının Girilmesi

Main Menu- Solution- Define Loads- Apply- Structural- Displacement- On Lines



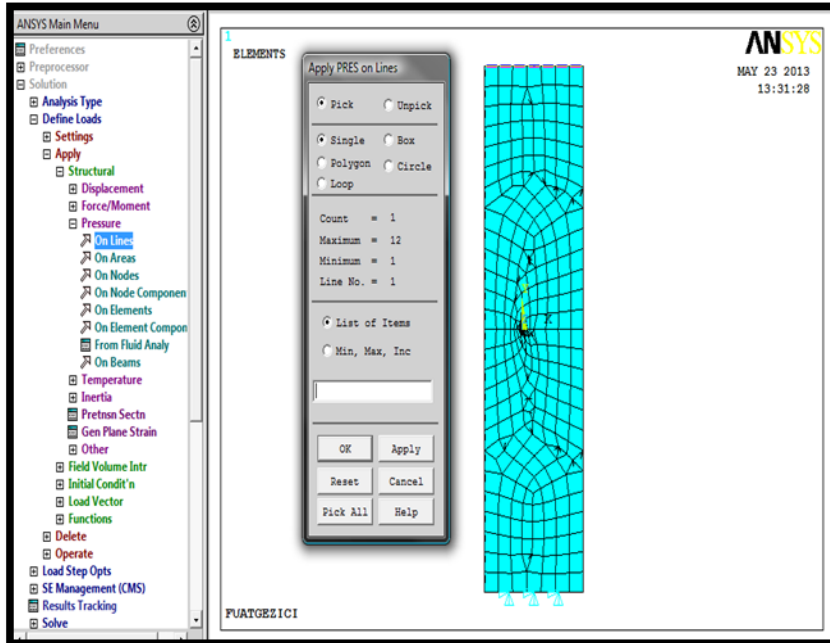
Şekil 5.20 Sınır şartlarının girilmesi



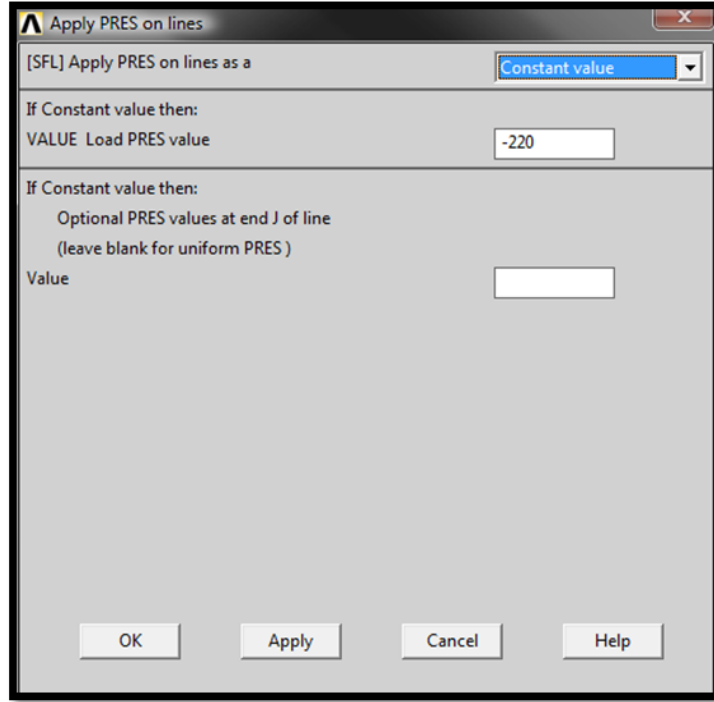
Şekil 5.21 Numune alt bölüm sabitlemesi

## 5.9 Kuvvet Uygulanması

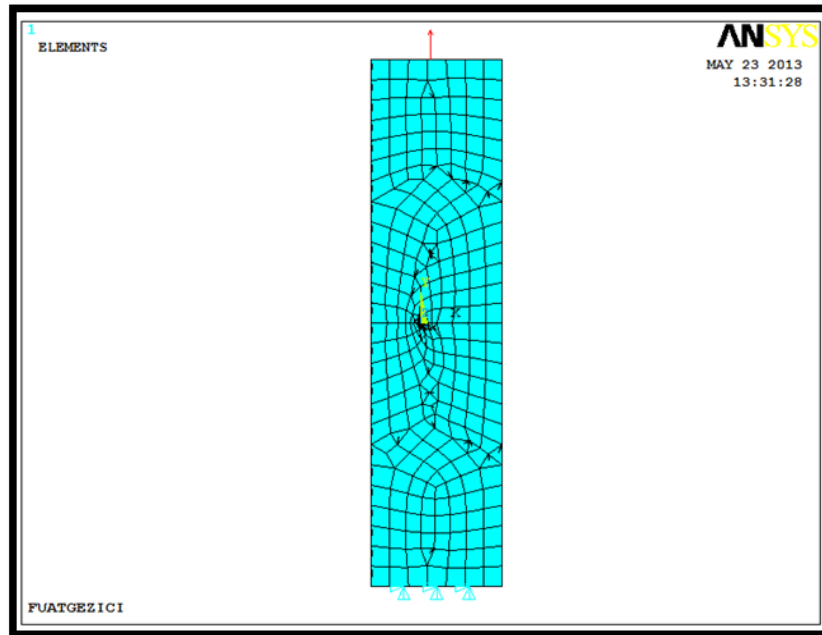
Main Menu- Solution- Define Loads- Apply- Structural- Pressure- On Lines



Şekil 5.22 Üst bölüme kuvvet uygulanması



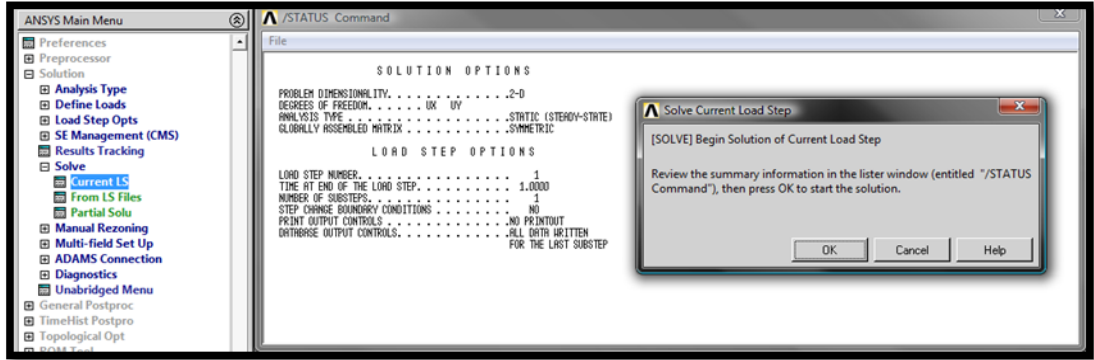
Şekil 5.23 Kuvvet değerinin girilmesi



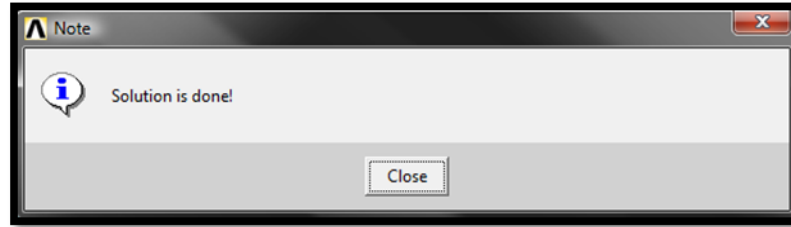
Şekil 5.24 Numuneye uygulanan kuvvet ve mesnet görünümü

## 5.10 Problemin Çözülmesi

Main Menu- Solution- Solve- Currentls



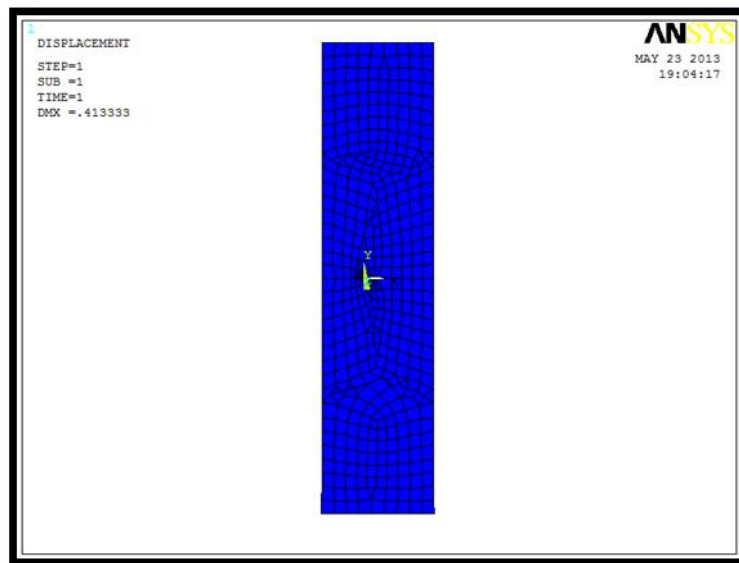
Şekil 5.25 Problemin çözülmesi



Şekil 5.26 Çözüm işlemi tamamlanması

## 5.11 Sonuçların Okunması

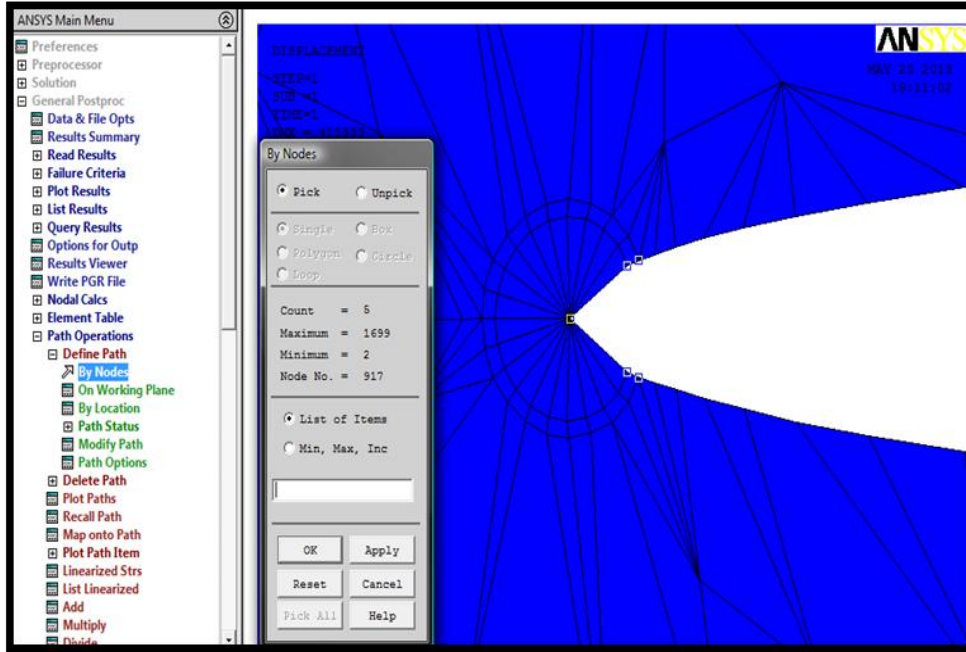
Main Menu- General Postproc- Plotresults- DeformedShape



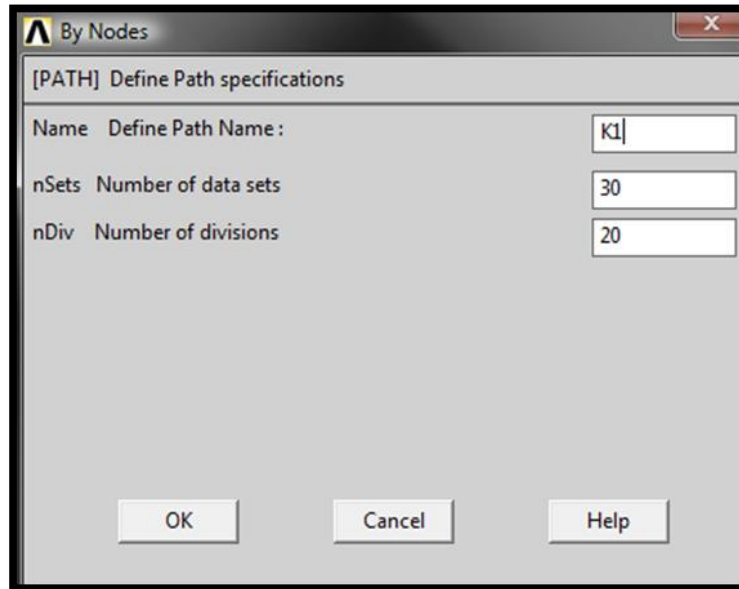
Şekil 5.27 Yük sonucu meydana gelen deformasyon

## 5.12 $K_{Ic}$ Kırılma Tokluğu Hesabı

Main Menu- General Postproc- PathOperation - Define Path- ByNodes



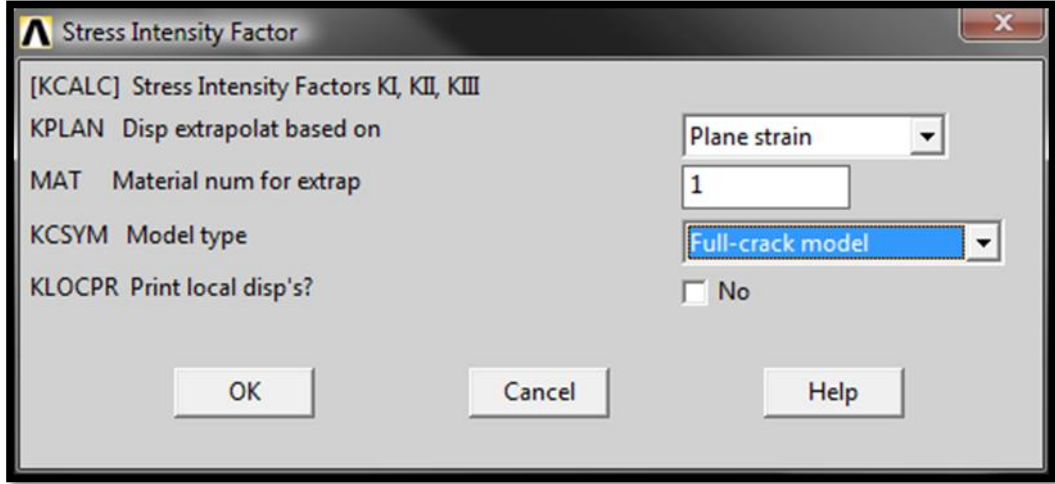
Şekil 5.28 Çatlak yüzey yolu tanımlanması



Şekil 5.29 Çatlak yüzey yolu isimlendirme

Gerilme şiddet faktörü hesabı için;

Main Menu - General Postproc - NodalCalcs - StressIntFactr



Şekil 5.30 Kırılma tokluğu hesabı

```
***** CALCULATE MIXED-MODE STRESS INTENSITY FACTORS *****
ASSUME PLANE STRAIN CONDITIONS
ASSUME A FULL-CRACK MODEL (USE 5 NODES)
EXTRAPOLATION PATH IS DEFINED BY NODES:   64   66   68
915   917
WITH NODE   64 AS THE CRACK-TIP NODE
USE MATERIAL PROPERTIES FOR MATERIAL NUMBER   1
EX =  40000.   NUXY =  0.23000   AT TEMP =  0.0000
***** KI =  850.93   , KII =  6.3426   , KIII =  0.0000   ***** MPa $\sqrt{\text{mm}}$ 
```

Şekil 5.31 Kırılma tokluğu sonuçları

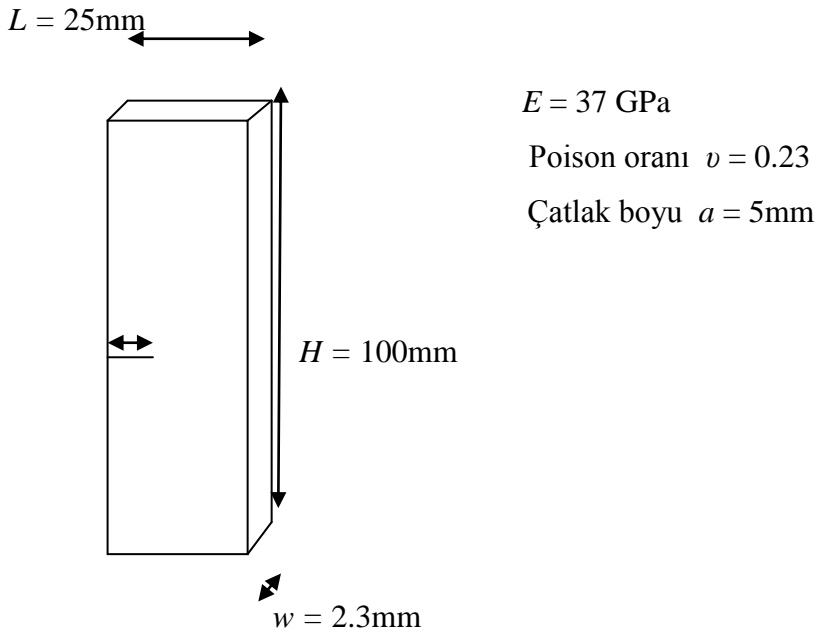
$$K_{Ic} = 26.87 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$$

## BÖLÜM ALTI

### KENAR ÇATLAKLI NUMUNE ANSYS İLE KIRILMA TOKLUĞU ANALİZİ

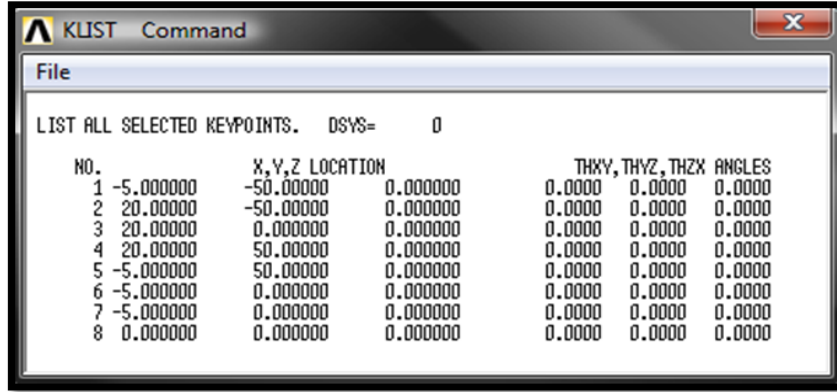
#### 6.1 Analiz Yönteminin Belirlenmesi

Nümerik analizler için kullanılacak kenar çatlaklı numune boyutları şekil 6.1 de verilmiştir.



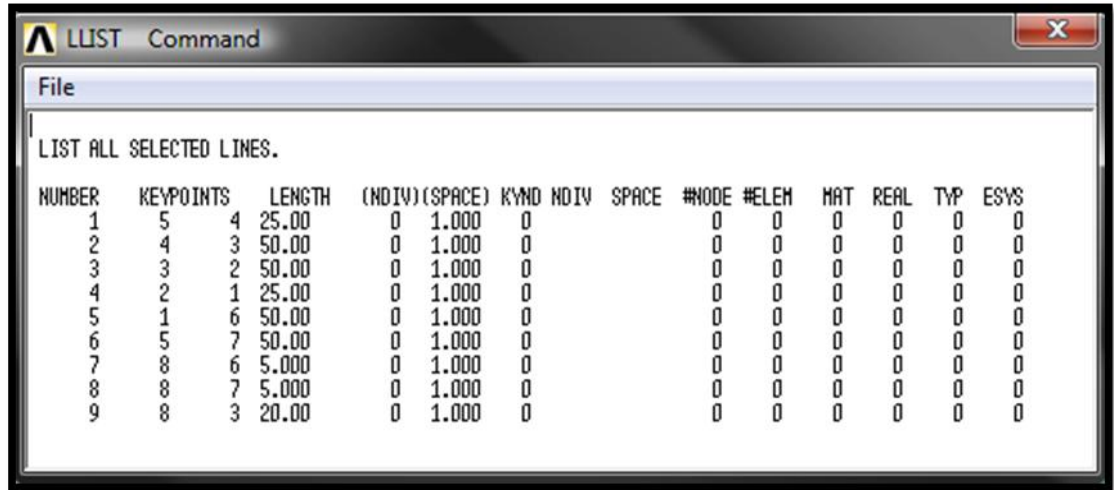
Şekil 6.1 Çekme numunesi boyutları

Kenar çatlaklı numune analizinde de malzeme özelliklerinin atanması merkezi çatlaklı numune de anlatıldığı gibi yapılmıştır. Elastisitemodülü, poisson oranı ve numune boyutları diğer modelle aynıdır. Bu analizde sadece çatlak konumu değiştirilmiştir. Şekil 6.2 de numune oluşturmak için gerekli keypoint listesi gösterilmektedir. Burada dikkat edilmesi gereken çatlak bölgesi modellenirken çakışık iki noktanın koordinatları doğru girilmelidir. Bu modelde 6 ve 7 nolukeypointler çakışık haldedir.



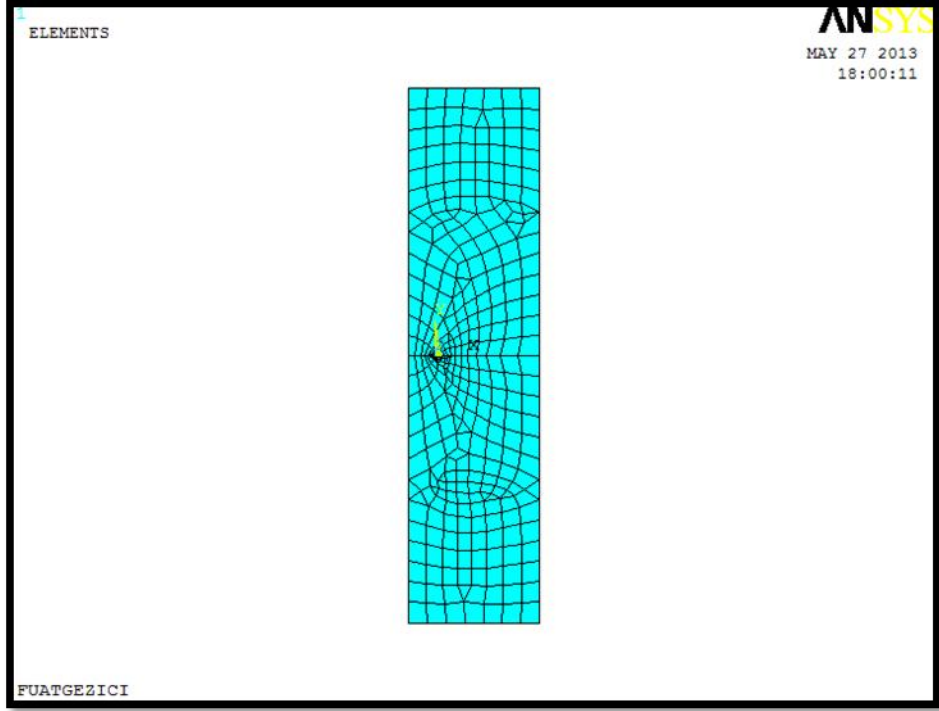
Şekil 6.2 Kenar çatlaklı numune boyutlandırılması

Şekil 6.3de oluşturulan 9 adet çizgi (lines) gösterilmektedir. Burada 7 ve 8 nolu çizgiler çakışık haldedir.



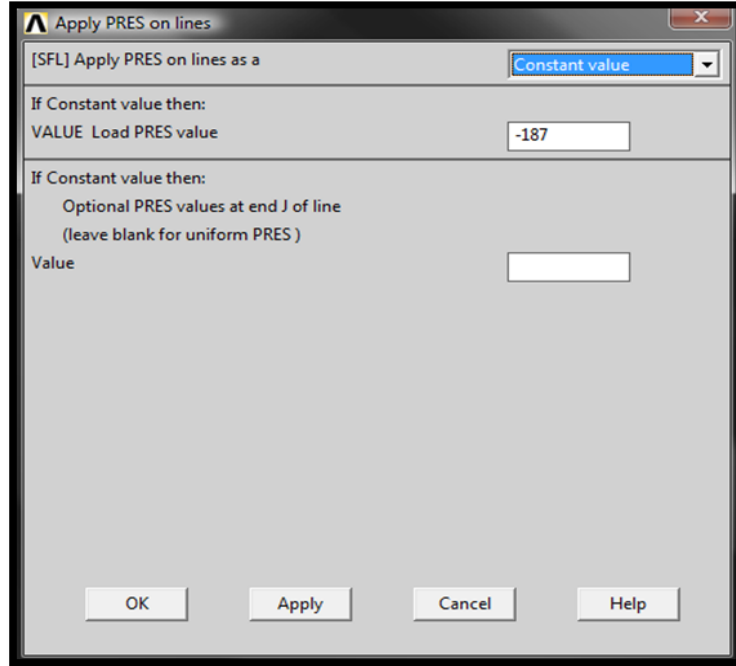
Şekil 6.3 Çizgilerin listelenmesi

Numune boyutlandırması yapıldıktan sonra mesh işlemi ve çatlak ucu üçgen eleman tanımlaması ve yoğunlaştırması yapılmıştır. Şekil 2.1 de mesh yapılmış numune görülmektedir.

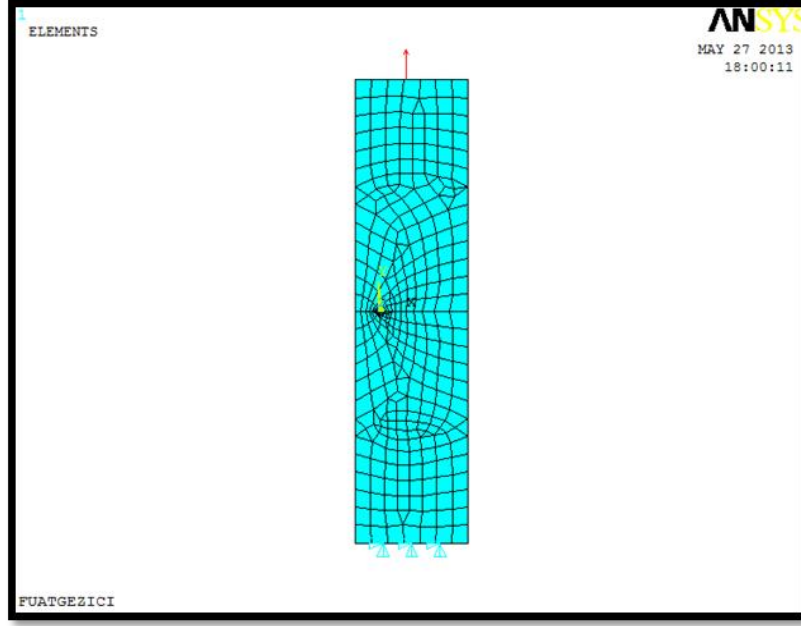


Şekil 6.4 Kenar çatlaklı numune mesh yapılmış hali

Mesh işlemi yapıldıktan sonra malzemeye deneysel olarak bulunan basınç derini üst noktadan uyguluyoruz.

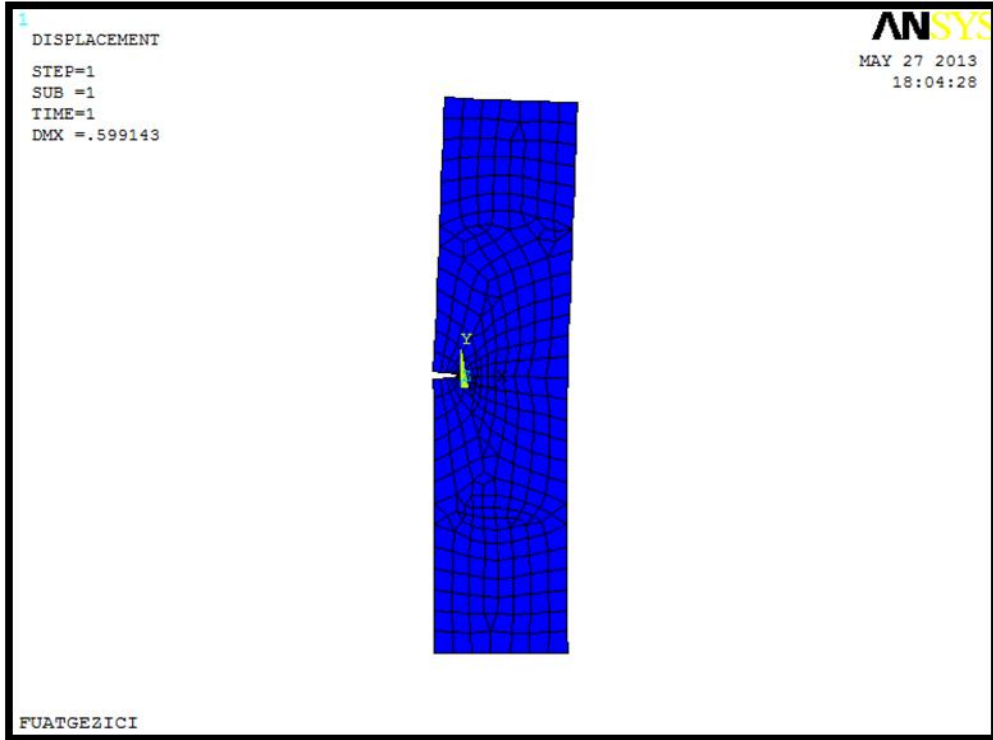


Şekil 6.5 Basınç değerinin girilmesi



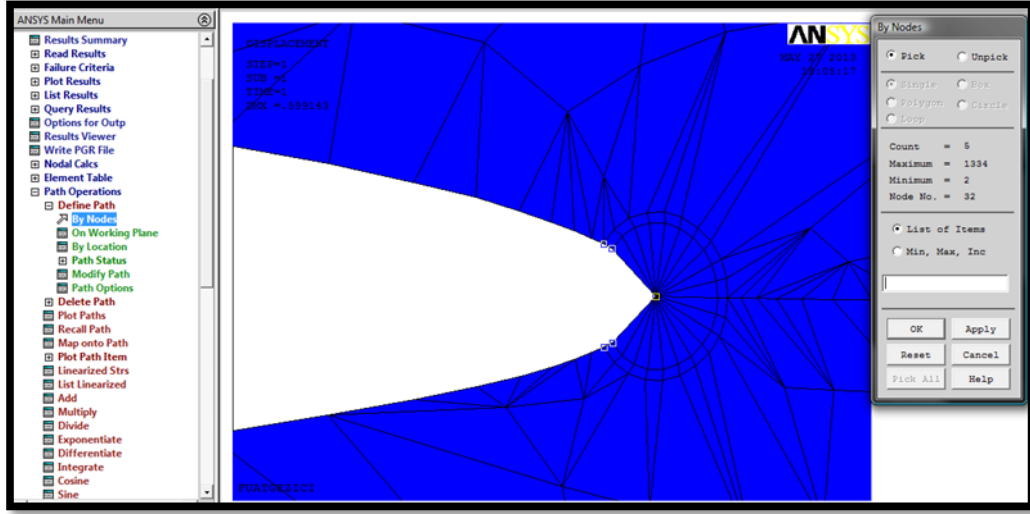
Şekil 6.6 Kenar çatlaklı numune mesnetleme ve kuvvet uygulanmış hali

Gerekli bütün işlemler yapıldıktan sonra çözüm yapılmış ve yükleme sonucunda meydana gelen deformasyon Şekil 6.7 de gösterilmiştir.



Şekil 6.7 Kenar çatlaklı numune yük uygulanmış hali

Son olarak kırılma tokluğu hesabı yapabilmek için çatlak yüzey yolu tanımlıyoruz.



Şekil 6.8 Kenar çatlaklı numune çatlak yüzey yolu tanımlanması

```
**** CALCULATE MIXED-MODE STRESS INTENSITY FACTORS ****  
  
ASSUME PLANE STRAIN CONDITIONS  
  
ASSUME A FULL-CRACK MODEL (USE 5 NODES)  
  
EXTRAPOLATION PATH IS DEFINED BY NODES: 28 744 746 30 32  
  
WITH NODE 28 AS THE CRACK-TIP NODE  
  
USE MATERIAL PROPERTIES FOR MATERIAL NUMBER 1  
EX = 40000. NUXY = 0.23000 AT TEMP = 0.0000  
  
**** KIc= 1067.4 , KII = 11.632 , KIII = 0.0000 ****MPa√mm
```

Şekil 6.9 Kenar çatlaklı numune kırılma tokluğu sonuçları

$$K_{Ic} = 33,74 \text{MPa}\sqrt{m}$$

## BÖLÜM YEDİ

### TARTIŞMA VE SONUÇLAR

Bu çalışmada cam elyaf takviyeli epoxykompozit malzemenin önce mekanik özellikleri belirlenmiş sonra çekme yükü altındaki kırılma davranışları SENT ve MT numuneleri kullanılarak ASTM E1290 ve E647-00 standartları ile deneysel olarak ve ANSYS yazılımı ile nümerik olarak belirlenmiş ve aşağıdaki tablodaki gibi çıkan sonuçlar gösterilmiştir.

Kenar çatlaklı numune (SENT) için kompiyanskalibrasyon yöntemi kullanıldı. Kırılma tokluğu değeri deneysel olarak ASTM E1290-93 standart kullanılarak  $K_{Ic}=34.37 \text{ MPa}\sqrt{m}$  ve nümerik olarak ANSYS ile modelleme yapılarak  $K_{Ic}$  değeri  $33.74 \text{ MPa}\sqrt{m}$  bulunmuş buradan deneysel ve nümerik çözümlerin doğruluğunun %98 olduğu bulunmuştur.

Merkezi Çatlaklı numune (MT) için numune ASTM E647 standart' a göre yükleme durumunda çatlak ilerleme miktarı ve uygulanan kuvvet kamera ile anlık kaydedilerek maksimum yüke karşılık gelen çatlak açılma miktarı belirlenmiştir. Buradan standart formülleri kullanılarak kırılma tokluğu değeri  $K_{Ic}=31.64 \text{ MPa}\sqrt{m}$  ANSYS ile modelleme yapılarak  $K_{Ic}$  değeri  $26.8 \text{ MPa}\sqrt{m}$  bulunmuş burada deneysel ve nümerik çözümlerin doğruluğu % 84 olduğu bulunmuştur.

Tablo 7.1 Kırılma tokluğu sonuçları

<b>KIRILMA TOKLUĞU SONUÇLARI KARŞILAŞTIRMA</b>		
	<b>KENAR ÇATLAKLI NUMUNE</b>	<b>MERKEZİ ÇATLAKLI NUMUNE</b>
<b>DENEYSEL SONUÇLAR</b>	$34,37 \text{ MPa}\sqrt{m}$	$31,64 \text{ MPa}\sqrt{m}$
<b>ANSYS SONUÇLARI</b>	$33,74 \text{ MPa}\sqrt{m}$ (%98 doğruluk)	$26.8 \text{ MPa}\sqrt{m}$ (%84 doğruluk)

Tablodaki değerlere baktığımızda farklı konumlarda çatlak içeren aynı malzemede kırılma tokluğu deneylerinin yaklaşık aynı sonuçlar verdiğini ve bu sonuçlarında ANSYS modellemesi ile kontrol edildiğinde deneylerin başarısı açıkca gözükmeğtedir.

Numunelerde uygulanan yük çatlğa dik doğrultuda olduğu için sadece açılma modundan dolayı hasar oluşmuştur.

Gelişen teknoloji sayesinde nümerik olarak bilgisayar yazılımları kullanarak yapılan analizler gerçeğe çok yakın sonuçlar elde edilmektedir. Bu çalışmamızda nümerik olarak ANSYS 11 yazılımı kullanılmış ve deneysel sonuçlarla bulunan kırılma tokluğu değerleriyle karşılaştırması yapılmıştır. Bu karşılaştırma ile bilgisayar destekli yapılan analiz sonuçlarının deneylerden elde edilen verilere yakın olduğu gösterilmiştir. Nümerik olarak ANSYS modellemesi kullanılarak deneysel karmaşıklık ve uzun zaman alan deney süreçleri ortadan kaldırılmıştır.

## KAYNAKLAR

Akdemir, A., Tarakçıoğlu, N. ve Avcı, A. (2001). Stress corrosion crack growth in glass/polyester composites with surface crack. *Composites Part B*, 32, 123–129.

Aksoy, T. (1984). *Kırılma mekaniği*. İzmir: Mühendislik - Mimarlık Fakültesi Basım Ünitesi.

Arıkan, H. (2002). *Çelik tel takviyeli polimer kompozitlerin kırılma davranışı*. Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bil. Ens., Konya.

ASTM Standard E6-81. (1981). *Standard definitions of terms relating to methods of mechanical testing*, In: Annual Book of ASTM Standards. Philadelphia, PA: ASTM, 187–196.

ASTM Standard E 399-83 (1984). *Standard test method for plane strain fracture toughness of metallic materials*. Annual Book of ASTM Standards, 592-622, Philadelphia.

ASTM E 647. (2000). *The middle tension specimens*, 616-619.

Avcı, A., Mürsel, E. ve Erkendirici, Ö. F. (2007). Cam kumaş takviyeli termoplastik kompozitlerde kırılma davranışlarının incelenmesi. 8. *Uluslararası Kırılma Konferansı Bildiriler Kitabı*.

Broutman, J. ve Krock, R. H. (1967). *Modern composite materials*, Lawrence Addison-Wesley Publishing Company, 121-148.

Doruk, M., Avcı, A., Akdemir, A. ve Önal, G. (Ed.). (2003). Seramik malzemelerin kırılma tokluğu değerlerinin üç boyutlu sonlu elemanlar yöntemi ile belirlenmesi. 6. *Uluslararası Kırılma Konferansı Bildiriler Kitabı*. Konya: Selçuk Üniversitesi.

- Irwin, G.R.(1957).Analysis of StressandStrainsNeartheEnd of a CrackTraversing a Plate, *Journal of AppliedMechanics*, 24, 651-654.
- Jones, M.R.(1998).*Mechanicsof compositematerials*, Virginia PolytechnicInstitute, Virginia.
- Lin, X. B. ve Smith, R.A.(1999).Finite element modelling of fatiguecrackgrowth of surfacecrackedplatespartIII, *EngineeringFracture Mechanics*,.63, 541-556.
- Newman, J.C. ve Raju, I.S.(1979).*Analysis of surfacecracks in finiteplatesundertensionorbendingloads*, NASA TP 1578.
- Özdemir, A. (2006). *Seramik malzemelerin kırılma tokluğu değerlerinin üç boyutlu sonlu elemanlar yöntemi ile teorik olarak belirlenmesi*. Yüksek Lisans Tezi,İzmir: Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimler i Enstitüsü.
- Paris, P.C. ve Sih, G.C.M.(1965).*Stress Analysis of cracks*,symposium onfracturetoughnessanditsapplications, ASTM STP 381, 30-83.
- Schwartz, M. M. (1984). *CompositeMaterialsHandbook*,McGraw-HillInc.
- Seng C. (1991). A progressivefailure model forcompositelaminatescontainingopenings, *Journal of CompositeMaterials*, 25, 556-577.
- Wang, H. S.,Hung, C. L. ve Chang, F. K. (1996). Bearingfailure of boltedcompositejoints part 1: Experimentalcharacterization, *Journal of CompositeMaterials*, 30, 1284-313