**T.C.**
**SELÇUK ÜNİVERSİTESİ**
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

# YÜZEY ÇATLAKLI TEK YÖNDE TAKVİYELİ CAM EPOKSİ KOMPOZİT MALZEMELERDE KIRILMA DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

**Cumali DİNCER**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Ocak, 2013**
**KONYA**
**Her Hakkı Saklıdır**

**TEZ KABUL VE ONAYI**

Cumali DİNCER tarafından hazırlanan "YÜZEY ÇATLAKLI TEK YÖNDE TAKVİYELİ CAM EPOKSİ KOMPOZİT MALZEMELERDE KIRILMA DAVRANIŞININ İNCELENMESİ" adlı tez çalışması 27/12/2012 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı'nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

| **Jüri Üyeleri** | **İmza** |
|---|---|
| **Başkan**<br>Prof. Dr. Ahmet AVCI | ..... |
| **Danışman**<br>Doç. Dr. Ömer Sinan ŞAHİN | ..... |
| **Üye**<br>Yrd. Doç. Dr. İlhan ASİLTÜRK | ..... |

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Aşır GENÇ
FBE Müdürü

## TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

## DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.



İmza

Cumali DİNCER

Tarih: 24.01.2013

# ÖZET

## YÜKSEK LİSANS/ DOKTORA TEZİ

## YÜZEY ÇATLAKLI TEK YÖNDE TAKVİYELİ CAM EPOKSİ KOMPOZİT MALZEMELERDE KIRILMA DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

**Cumali DİNCER**

**Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**
**Makina Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Danışman: Doç. Dr. Ömer Sinan ŞAHİN**

**2012, 107 Sayfa**

**Jüri**
**Danışman: Doç. Dr. Ömer Sinan ŞAHİN**
**Prof. Dr. Ahmet AVCI**
**Yrd. Doç. Dr. İlhan ASİLTÜRK**

Bu çalışmada, üzerinde yüzey çatlağı bulunan kompozit malzemelerin çekme yükü altında kırılma davranışı incelenmiştir. Kompozit levhalar sekiz tabakalı olup, el yatırması yöntemiyle imal edilmiştir. ASTM E740 standardına uygun olarak hazırlanan numuneler üzerine yarı eliptik yüzey çatlakları açılmış ve çekme testine tabi tutulmuştur. Çatlak ilerleme davranışı tespit edilmiş ve sonuçlar grafikler halinde sunulmuştur.

**Anahtar Kelimeler:** Cam/epoksi kompozit, yüzey çatlağı, çekme deneyi, kırılma davranışı, delaminasyon

## ABSTRACT

### MS/Ph.D THESIS

### FRACTURE BEHAVIOR INVESTIGATION OF UNIDIRECTIONAL REINFORCED GLASS FIBER EPOXY RESIN COMPOSITE MATERIAL WITH SURFACE CRACK

**Cumali DİNCER**

**GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES**

**DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING**

**Advisor: Assoc. Dr. Ömer Sinan ŞAHİN**

**2012, 107 Pages**

**Jury**
**Advisor Assoc. Dr. Ömer Sinan ŞAHİN**
**Prof. Dr. Ahmet AVCI**
**Assi. Dr. İlhan ASİLTÜRK**

In this study, the fracture of glass / epoxy composite materials with surface cracks were investigated under tension load. The composite plates consisting of eight layers and were produced by hand lay up method. The tensile specimens were prepared in accordance with ASTM E740 standard and semi elliptical surface cracks with different depth-to-lenght parameter were cut on the tensile specimen. The crack growht behavior of the plates was determined by tensile tests. The obtained results are presented in tabular and graphical form.



**Key Words:** Glass/epoxy composites,surface crack, tensile test, fracture bahavior,delamination

## TEŞEKKÜR

Bu tezi tamamlamamda başta danışmanım Doç. Dr. Ömer Sinan Şahin olmak üzere Prof. Dr. Ahmet Avcı, Prof. Dr. Ahmet Akdemir ile deneylerimde yanımda bulunan arkadaşlarım Araş. Gör. Yusuf Şahin'e ve Araş. Gör. Dr. Volkan Eskizeybek'e teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca hayatımın her zamanında bana güvenen ve desteklerini esirgemeyen tüm aile fertlerime de şükranlarımı sunarım.

Deney malzemesinin temininde İzoreel Kompozit Malzemeler Sanayi ve Limited Şirketine, deneyler konusunda Tümosan- Alçelik Motor Fabrikasına teşekkür ederim.

**Cumali DİNCER**

**KONYA-2013**

# İÇİNDEKİLER

TEZ KABUL VE ONAYI ..... ii
TEZ BİLDİRİMİ ..... iii
ÖZET ..... iv
ABSTRACT ..... v
TEŞEKKÜR ..... vi
İÇİNDEKİLER ..... vii
SİMGELER VE KISALTMALAR ..... ix
ŞEKİLLER LİSTESİ ..... x

**1. GİRİŞ ..... 1**
**2. KAYNAK ARAŞTIRMASI ..... 3**
**3. MATERYAL VE YÖNTEM ..... 8**
3.1 Elyaf Takviyeli Kompozitler ..... 8
3.2 Elyafların Özellikleri ..... 8
3.3 Matris Malzemeleri ..... 9
3.4. Islak Kalıplama (El Yatırma Yöntemi) ..... 11
3.5. Kırılma Mekaniği ..... 14
3.5.1. Lineer elastik kırılma mekaniği ..... 15
3.5.1.1 Gerilme hali ..... 19
3.5.2 Şekil değiştirme enerji boşalma miktarı ($G$) ..... 20
3.6. Deney Numunelerinin Hazırlanması ..... 23
3.7. Çekme Deneyi ..... 25
3.8. Yakma Deneyi ..... 26
3.9. Deney Setinin Hazırlanması ..... 27
3.10. Deneylerin Yapılışı ..... 28

**4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA.....29**
4.1. Çatlak İlerleme Mekanizması .....29
4.2. a/t: 0,30 Boyutlarındaki Numunelerde Kırılma Davranışları ve Hasar Analizi...31
4.2.1. a/t: 0,30 Boyutlarındaki numunelerde çatlaklı çekme deney sonuçları.....31
4.2.2. a/t: 0,30 Boyutlarındaki numunelerde hasar analizi.....41
4.3. a/t: 0,45 Boyutlarındaki Numunelerde Kırılma Davranışları ve Hasar Analizi...43
4.3.1. a/t: 0,45 Boyutlarındaki numunelerde çatlaklı çekme deney sonuçları.....43
4.3.2. a/t: 0,45 Boyutlarındaki numunelerde hasar analizi.....54
4.4. a/t: 0,60 Boyutlarındaki Numunelerde Kırılma Davranışları ve Hasar Analizi...56
4.4.1. a/t: 0,60 Boyutlarındaki numunelerde çatlaklı çekme deney sonuçları.....56
4.4.2. a/t: 0,60 Boyutlarındaki numunelerde hasar analizi.....66
4.5. a/t: 0,75 Boyutlarındaki Numunelerde Kırılma Davranışları ve Hasar Analizi...68
4.5.1. a/t: 0,75 Boyutlarındaki numunelerde çatlaklı çekme deney sonuçları.....68
4.5.2. a/t: 0,75 Boyutlarındaki numunelerde hasar analizi.....78
**5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....80**
**6. KAYNAKLAR.....82**
**7. EKLER .....84**
ÖZGEÇMİŞ .....94

## SİMGELER VE KISALTMALAR

**A** : Kesit alanı
**B** : Malzeme kalınlığı
**BÇDM** : Başlangıç çatlak derinliği metodu
**C** : Kompliyans
**COD** : Çatlak açılma miktarı (crack opening displacement)
**CTOD** : Çatlak ucu açılma miktarı (crack tip opening displacement)
**E** : Elastisite modülü
**EPKM** : Elastik-plastik kırılma mekaniği
**GSF** : Gerilme şiddet faktörü
**G** : Sekil değiştirme enerjisi boşalma miktarı
$\mathbf{G_c}$ : Kritik sekil değiştirme enerjisi boşalma miktarı
$\mathbf{G_I}$ : Mod I sekil değiştirme enerjisi boşalma miktarı
$\mathbf{G_{Ic}}$ : Mod I kritik sekil değiştirme enerjisi boşalma miktarı
$\mathbf{G_{II}}$ : Mod II sekil değiştirme enerjisi boşalma miktarı
$\mathbf{G_{IIc}}$ : Mod II kritik sekil değiştirme enerjisi boşalma miktarı
**KM** : Kompliyans metot
$\mathbf{K_{eş}}$ : Eşdeğer gerilme şiddet faktörü
$\mathbf{K_c}$ : Kritik gerilme şiddet faktörü
$\mathbf{K_{Ceş}}$ : Kritik eşdeğer gerilme şiddet faktörü
$\mathbf{K_I}$ : Mod I gerilme şiddet faktörü
$\mathbf{K_{Ieş}}$ : Mod I eşdeğer gerilme şiddet faktörü
$\mathbf{K_{Ic}}$ : Mod I kritik gerilme şiddet faktörü
$\mathbf{K_{Iceş}}$ : Mod I kritik eşdeğer gerilme şiddet faktörü
$\mathbf{K_{II}}$ : Mod II gerilme şiddet faktörü
$\mathbf{K_{IIeş}}$ : Mod II eşdeğer gerilme şiddet faktörü
$\mathbf{K_{IIc}}$ : Mod II kritik gerilme şiddet faktörü
$\mathbf{K_{IIceş}}$ : Mod II kritik eşdeğer gerilme şiddet faktörü
$\mathbf{K_{III}}$ : Mod III gerilme şiddet faktörü
**LEKM** : Lineer elastik kırılma mekaniği
**W** : Malzeme genişliği
**2a** : Başlangıç çatlak boyu
**Δa** : Çatlak ilerlemesi
**P** : Uygulanan yük
**2L** : Malzeme boyu
$\rho$ : Yoğunluk
$\nu$ : Poisson oranı
$\varepsilon$ : Şekil değiştirme

# ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 3.1. El yatırmanın aşamaları ....13
Şekil 3.2: Çatlak ilerleme modları: (I): Açılma modu, (II): Kayma modu,....16
Şekil 3.3: Kalınlık boyunca çatlak için teorik gerilme dağılımı ....18
Şekil 3.4: Sabit yük altında deplasman artışı (*P-u*) grafiği....21
Şekil 3.5: Yarı Eliptik Yüzey Çatlağına Sahip Numunelerde Şekil Değiştirme Enerji Boşalma Miktarı Hesaplaması Yaklaşımı ....22
Şekil 3.6: Deney numunesi ....24
Şekil 3.7: Dişçi separeleri ....24
Şekil 3.8: Çekme deney cihazı....27
Şekil 4.1: İzotropik malzemelerde yüzey çatlağının ilerlemesi....29
Şekil 4.2: Cam/epoksi kompozitlerde yüzey çatlağının yüzeydeki ilerlemesi ....29
Şekil 4.3: Yüzey çatlağında hasar gelişimi....30
Şekil 4.4: a/t: 0,30 sabit a/c: 0.20, 0.30, 0.40, 0.50, 0.60 oranlarına sahip kompozit malzemelerin kuvvet uzama miktarları değişimi grafiği....31
Şekil 4.5:.a. a/t: 0,30 a/c: 0.20 oranlarına sahip kompozit malzemenin kuvvet çatlak ağzı açılma miktarı değişimi grafiği....33
Şekil 4.5b: a/t: 0,30 a/c: 0.30 oranlarına sahip kompozit malzemenin kuvvet çatlak ağzı açılma miktarı değişimi grafiği....33
Şekil 4.5.c: a/t: 0,30 a/c: 0.40 oranlarına sahip kompozit malzemenin kuvvet çatlak ağzı açılma miktarı değişimi grafiği....33
Şekil 4.5.d: a/t: 0,30 a/c: 0.50 oranlarına sahip kompozit malzemenin kuvvet çatlak ağzı açılma miktarı değişimi grafiği....34
Şekil 4.5.e: a/t: 0,30 a/c: 0.60 oranlarına sahip kompozit malzemenin kuvvet çatlak ağzı açılma miktarı değişimi grafiği....34
Şekil 4.6.a: a/t: 0,30 a/c: 0.20 oranlarına sahip kompozit malzemenin kuvvet delaminasyon alanı miktarı değişimi grafiği ....35
Şekil 4.6.b: a/t: 0,30 a/c: 0.30 oranlarına sahip kompozit malzemenin kuvvet delaminasyon alanı miktarı değişimi grafiği ....35
Şekil 4.6.c: a/t: 0,30 a/c: 0.40 oranlarına sahip kompozit malzemenin kuvvet delaminasyon alanı miktarı değişimi grafiği ....36
Şekil 4.6.d: a/t: 0,30 a/c: 0.50 oranlarına sahip kompozit malzemenin kuvvet delaminasyon alanı miktarı değişimi grafiği ....36
Şekil 4.6.e: a/t: 0,30 a/c: 0.60 oranlarına sahip kompozit malzemenin kuvvet delaminasyon alanı miktarı değişimi grafiği ....36
Şekil 4.7.a: a/t: 0,30 a/c: 0.20 oranlarına sahip kompozit malzemenin kompliyans delaminasyon alanı miktarı değişimi grafiği ....37
Şekil 4.7.b: a/t: 0,30 a/c: 0.30 oranlarına sahip kompozit malzemenin kompliyans delaminasyon alanı miktarı değişimi grafiği ....37
Şekil 4.7.d: a/t: 0,30 a/c: 0.50 oranlarına sahip kompozit malzemenin kompliyans delaminasyon alanı miktarı değişimi grafiği ....38
Şekil 4.7.e: a/t: 0,30 a/c: 0.60 oranlarına sahip kompozit malzemenin kompliyans delaminasyon alanı miktarı değişimi grafiği ....39
Şekil 4.8.a: a/t: 0,30 a/c: 0,20 oranlarına sahip kompozit malzemenin şekil değiştirme enerji boşalma miktarı delaminasyon alanı miktarı değişim grafiği.....40
Şekil 4.8.b: a/t: 0,30 a/c: 0,30 oranlarına sahip kompozit malzemenin şekil değiştirme enerji boşalma miktarı delaminasyon alanı miktarı değişim grafiği.....40

Şekil 4.8.c: a/t: 0,30 a/c: 0,40 oranlarına sahip kompozit malzemenin şekil değiştirme enerji boşalma miktarı delaminasyon alanı miktarı değişim grafiği.....40
Şekil 4.8.e: a/t: 0,30 a/c: 0,60 oranlarına sahip kompozit malzemenin şekil değiştirme enerji boşalma miktarı delaminasyon alanı miktarı değişim grafiği.....41
Şekil 4.9.a: a/t: 0,30 a/c: 0,20 oranına sahip kompozit malzemenin hasar mekanizması42
Şekil 4.9.b: a/t: 0,30 a/c: 0,30 oranına sahip kompozit malzemenin hasar mekanizması.....42
Şekil 4.9.c: a/t: 0,30 a/c: 0,40 oranına sahip kompozit malzemenin hasar mekanizması42
Şekil 4.9.d: a/t: 0,30 a/c: 0,50 oranına sahip kompozit malzemenin hasar mekanizması.....43
Şekil 4.9.e: a/t: 0,30 a/c: 0,60 oranına sahip kompozit malzemenin hasar mekanizması43
Şekil 4.10: a/t: 0,45 sabit a/c: 0.20, 0.30, 0.40, 0.50, 0.60 oranlarına sahip kompozit malzemelerin kuvvet uzama miktarları değişimi grafiği.....44
Şekil 4.11.a: a/t: 0,45 a/c: 0,20 oranlarına sahip kompozit malzemenin kuvvet çatlak ağzı açılma miktarı değişimi grafiği.....45
Şekil 4.11.b: a/t: 0,45 a/c: 0,30 oranlarına sahip kompozit malzemenin kuvvet çatlak ağzı açılma miktarı değişimi grafiği.....45
Şekil 4.11.c: a/t: 0,45 a/c: 0,40 oranlarına sahip kompozit malzemenin kuvvet çatlak ağzı açılma miktarı değişimi grafiği.....46
Şekil 4.11.d: a/t: 0,45 a/c: 0,50 oranlarına sahip kompozit malzemenin kuvvet çatlak ağzı açılma miktarı değişimi grafiği.....46
Şekil 4.11.e: a/t: 0,45 a/c: 0,60 oranlarına sahip kompozit malzemenin kuvvet çatlak ağzı açılma miktarı değişimi grafiği.....46
Şekil 4.12.a: a/t: 0,45 a/c: 0,20 oranlarına sahip kompozit malzemenin kuvvet delaminsayon alanı miktarı değişimi grafiği .....47
Şekil 4.12.c: a/t: 0,45 a/c: 0,40 oranlarına sahip kompozit malzemenin kuvvet delaminsayon alanı miktarı değişimi grafiği .....48
Şekil 4.12.d: a/t: 0,45 a/c: 0,50 oranlarına sahip kompozit malzemenin kuvvet delaminsayon alanı miktarı değişimi grafiği .....48
Şekil 4.12.e: a/t: 0,45 a/c: 0,60 oranlarına sahip kompozit malzemenin kuvvet delaminsayon alanı miktarı değişimi grafiği .....49
Şekil 4.13.a: a/t: 0,45 a/c: 0.20 oranlarına sahip kompozit malzemenin kompliyans delaminasyon alanı miktarı değişimi grafiği .....49
Şekil 4.13.c: a/t: 0,45 a/c: 0.40 oranlarına sahip kompozit malzemenin kompliyans delaminasyon alanı miktarı değişimi grafiği .....50
Şekil 4.13.d: a/t: 0,45 a/c: 0.50 oranlarına sahip kompozit malzemenin kompliyans delaminasyon alanı miktarı değişimi grafiği .....51
Şekil 4.13.e: a/t: 0,45 a/c: 0.60 oranlarına sahip kompozit malzemenin kompliyans delaminasyon alanı miktarı değişimi grafiği .....51
Şekil 4.14.a: a/t: 0,45 a/c: 0,20 oranlarına sahip kompozit malzemenin şekil değiştirme enerji boşalma miktarı delaminasyon alanı miktarı değişim grafiği.....52
Şekil 4.14.b: a/t: 0,45 a/c: 0,30 oranlarına sahip kompozit malzemenin şekil değiştirme enerji boşalma miktarı delaminasyon alanı miktarı değişim grafiği.....52
Şekil 4.14.c: a/t: 0,45 a/c: 0,40 oranlarına sahip kompozit malzemenin şekil değiştirme enerji boşalma miktarı delaminasyon alanı miktarı değişim grafiği.....53
Şekil 4.14.d: a/t: 0,45 a/c: 0,50 oranlarına sahip kompozit malzemenin şekil değiştirme enerji boşalma miktarı delaminasyon alanı miktarı değişim grafiği.....53
Şekil 4.14.e: a/t: 0,45 a/c: 0,60 oranlarına sahip kompozit malzemenin şekil değiştirme enerji boşalma miktarı delaminasyon alanı miktarı değişim grafiği.....53
Şekil 4.15.a: a/t: 0,45 a/c: 0,20 oranına sahip kompozit malzemenin hasar mekanizması.....54
Şekil 4.15.b: a/t: 0,45 a/c: 0,30 oranına sahip kompozit malzemenin hasar mekanizması.....54
Şekil 4.15.c: a/t: 0,45 a/c: 0,40 oranına sahip kompozit malzemenin hasar mekanizması.....55

Şekil 4.15.d: a/t: 0,45 a/c: 0,50 oranına sahip kompozit malzemenin hasar mekanizması.....55
Şekil 4.15.e: a/t: 0,45 a/c: 0,60 oranına sahip kompozit malzemenin hasar mekanizması.....55
Şekil 4.16: a/t: 0,60 sabit a/c: 0.20, 0.30, 0.40, 0.50, 0.60 oranlarına sahip kompozit malzemelerin kuvvet uzama miktarları değişimi grafiği.....56
Şekil 4.17.a: a/t: 0,60 a/c: 0,20 oranlarına sahip kompozit malzemenin kuvvet çatlak ağzı açılma miktarı değişimi grafiği.....57
Şekil 4.17.b: a/t: 0,60 a/c: 0,30 oranlarına sahip kompozit malzemenin kuvvet çatlak ağzı açılma miktarı değişimi grafiği.....57
Şekil 4.17.c. a/t: 0,60 a/c: 0,40 oranlarına sahip kompozit malzemenin kuvvet çatlak ağzı açılma miktarı değişimi grafiği.....58
Şekil 4.17.d: a/t: 0,60 a/c: 0,50 oranlarına sahip kompozit malzemenin kuvvet çatlak ağzı açılma miktarı değişimi grafiği.....58
Şekil 4.17.e: a/t: 0,60 a/c: 0,60 oranlarına sahip kompozit malzemenin kuvvet çatlak ağzı açılma miktarı değişimi grafiği.....58
Şekil 4.18.b: a/t: 0,60 a/c: 0,30 oranlarına sahip kompozit malzemenin kuvvet delaminasyon alanı miktarı değişimi grafiği .....59
Şekil 4.18.c: a/t: 0,60 a/c: 0,40 oranlarına sahip kompozit malzemenin kuvvet delaminasyon alanı miktarı değişimi grafiği .....60
Şekil 4.18.d. a/t: 0,60 a/c: 0,50 oranlarına sahip kompozit malzemenin kuvvet delaminasyon alanı miktarı değişimi grafiği .....60
Şekil 4.18.e: a/t: 0,60 a/c: 0,60 oranlarına sahip kompozit malzemenin kuvvet delaminasyon alanı miktarı değişimi grafiği .....60
Şekil 4.19.a: a/t: 0,60 a/c: 0.20 oranlarına sahip kompozit malzemenin kompliyans delaminasyon alanı miktarı değişimi grafiği .....61
Şekil 4.19.b: a/t: 0,60 a/c: 0.30 oranlarına sahip kompozit malzemenin kompliyans delaminasyon alanı miktarı değişimi grafiği .....61
Şekil 4.19.c. a/t: 0,60 a/c: 0.40 oranlarına sahip kompozit malzemenin kompliyans delaminasyon alanı miktarı değişimi grafiği .....62
Şekil 4.19.d: a/t: 0,60 a/c: 0.50 oranlarına sahip kompozit malzemenin kompliyans delaminasyon alanı miktarı değişimi grafiği .....62
Şekil 4.19.e: a/t:0,60 a/c: 0.60 oranlarına sahip kompozit malzemenin kompliyans delaminasyon alanı miktarı değişimi grafiği .....62
Şekil 4.20.a: a/t: 0,60 a/c: 0,20 oranlarına sahip kompozit malzemenin şekil değiştirme enerji boşalma miktarı delaminasyon alanı miktarı değişim grafiği.....63
Şekil 4.20.b: a/t: 0,60 a/c: 0,30 oranlarına sahip kompozit malzemenin şekil değiştirme enerji boşalma miktarı delaminasyon alanı miktarı değişim grafiği.....64
Şekil 4.20.c: a/t: 0,60 a/c: 0,40 oranlarına sahip kompozit malzemenin şekil değiştirme enerji boşalma miktarı delaminasyon alanı miktarı değişim grafiği.....64
Şekil 4.20.d: a/t: 0,60 a/c: 0,50 oranlarına sahip kompozit malzemenin şekil değiştirme enerji boşalma miktarı delaminasyon alanı miktarı değişim grafiği.....65
Şekil 4.20.e: a/t: 0,60 a/c: 0,60 oranlarına sahip kompozit malzemenin şekil değiştirme enerji boşalma miktarı delaminasyon alanı miktarı değişim grafiği.....65
Şekil 4.21.a: a/t:0,60 a/c: 0,20 oranına sahip kompozit malzemenin hasar mekanizması .....66
Şekil 4.21.b: a/t:0,60 a/c: 0,30 oranına sahip kompozit malzemenin hasar mekanizması .....66
Şekil 4.21.c: a/t:0,60 a/c: 0,40 oranına sahip kompozit malzemenin hasar mekanizması.....67
Şekil 4.21.d: a/t:0,60 a/c: 0,50 oranına sahip kompozit malzemenin hasar mekanizması.....67
Şekil 4.21.e: a/t:0,60 a/c: 0,60 oranına sahip kompozit malzemenin hasar mekanizması.....67
Şekil 4.22: a/t: 0,75 sabit a/c: 0.20, 0.30, 0.40, 0.50, 0.60 oranlarına sahip kompozit malzemelerin kuvvet uzama miktarları değişimi grafiği.....68

Şekil 4.23.a: a/t: 0,75 a/c: 0,20 oranlarına sahip kompozit malzemenin kuvvet çatlak ağzı açılma miktarı değişimi grafiği.....69
Şekil 4.23.b: a/t: 0,75 a/c: 0,30 oranlarına sahip kompozit malzemenin kuvvet çatlak ağzı açılma miktarı değişimi grafiği.....69
Şekil 4.23.c. a/t: 0,75 a/c: 0,40 oranlarına sahip kompozit malzemenin kuvvet çatlak ağzı açılma miktarı değişimi grafiği.....70
Şekil 4.23.d: a/t: 0,75 a/c: 0,50 oranlarına sahip kompozit malzemenin kuvvet çatlak ağzı açılma miktarı değişimi grafiği.....70
Şekil 4.23.e: a/t: 0,75 a/c: 0,60 oranlarına sahip kompozit malzemenin kuvvet çatlak ağzı açılma miktarı değişimi grafiği.....70
Şekil 4.24.a: a/t: 0,75 a/c: 0,20 oranlarına sahip kompozit malzemenin kuvvet delaminasyon alanı miktarı değişimi grafiği .....71
Şekil 4.24.b: a/t: 0,75 a/c: 0,30 oranlarına sahip kompozit malzemenin kuvvet delaminasyon alanı miktarı değişimi grafiği .....72
Şekil 4.24.c: a/t: 0,75 a/c: 0,40 oranlarına sahip kompozit malzemenin kuvvet delaminasyon alanı miktarı değişimi grafiği .....72
Şekil 4.24.d: a/t: 0,75 a/c: 0,50 oranlarına sahip kompozit malzemenin kuvvet delaminasyon alanı miktarı değişimi grafiği .....73
Şekil 4.24.e: a/t: 0,75 a/c: 0,60 oranlarına sahip kompozit malzemenin kuvvet delaminasyon alanı miktarı değişimi grafiği .....73
Şekil 4.25.a: a/t: 0,75 a/c: 0.20 oranlarına sahip kompozit malzemenin kompliyans delaminasyon alanı miktarı değişimi grafiği .....74
Şekil 4.25.b: a/t:0,75 a/c: 0.30 oranlarına sahip kompozit malzemenin kompliyans delaminasyon alanı miktarı değişimi grafiği .....74
Şekil 4.25.c: a/t: 0,75 a/c: 0.40 oranlarına sahip kompozit malzemenin kompliyans delaminasyon alanı miktarı değişimi grafiği .....74
Şekil 4.25.d: a/t: 0,75 a/c: 0.50 oranlarına sahip kompozit malzemenin kompliyans delaminasyon alanı miktarı değişimi grafiği .....75
Şekil 4.25.e: a/t: 0,75 a/c: 0.60 oranlarına sahip kompozit malzemenin kompliyans delaminasyon alanı miktarı değişimi grafiği .....75
Şekil 4.26.a: a/t: 0,75 a/c: 0,20 oranlarına sahip kompozit malzemenin şekil değiştirme enerji boşalma miktarı delaminasyon alanı miktarı değişim grafiği.....76
Şekil 4.26.b: a/t: 0,75 a/c: 0,30 oranlarına sahip kompozit malzemenin şekil değiştirme enerji boşalma miktarı delaminasyon alanı miktarı değişim grafiği.....76
Şekil 4.26.c: a/t: 0,75 a/c: 0,40 oranlarına sahip kompozit malzemenin şekil değiştirme enerji boşalma miktarı delaminasyon alanı miktarı değişim grafiği.....77
Şekil 4.26.d: a/t: 0,75 a/c: 0,50 oranlarına sahip kompozit malzemenin şekil değiştirme enerji boşalma miktarı delaminasyon alanı miktarı değişim grafiği.....77
Şekil 4.26.e: a/t: 0,75 a/c: 0,60 oranlarına sahip kompozit malzemenin şekil değiştirme enerji boşalma miktarı delaminasyon alanı miktarı değişim grafiği.....77
Şekil 4.27.a: a/t: 0,75 a/c: 0,20 oranına sahip kompozit malzemenin hasar mekanizması.....78
Şekil 4.27.b: a/t: 0,75 a/c: 0,30 oranına sahip kompozit malzemenin hasar mekanizması .....78
Şekil 4.27.c: a/t: 0,75 a/c: 0,40 oranına sahip kompozit malzemenin hasar mekanizması .....79
Şekil 4.27.d: a/t: 0,75 a/c: 0,50 oranına sahip kompozit malzemenin hasar mekanizması.....79
Şekil 4.27.e: a/t: 0,75 a/c: 0,60 oranına sahip kompozit malzemenin hasar mekanizması.....79

# 1. GİRİŞ

Malzemeler metaller, seramikler ve plastik malzemeler olmak üzere üç gruba ayrılırlar. Bu üç grubun yanında, aynı ya da farklı gruplardan iki veya daha fazla malzemenin uygun özelliklerini tek bir malzemede toplamak ya da yeni bir özellik ortaya çıkarmak amacıyla makro düzeyde birleştirilmesi ile oluşturulan malzemeler karma malzemeler (kompozit malzemeler)'dir.

Kompozit malzeme üretimindeki asıl amaç kompozit malzemeyi oluşturacak olan bileşenlerin en iyi özelliklerini bir araya getirerek yorulma dayanımı, aşınma dayanımı, korozyon dayanımı, rijitlik, hafiflik, ısıl iletkenlik, elektrik iletkenliği, yüksek sıcaklık özellikleri, maliyet gibi özelliklerin sağlanmasıdır.

Modern kompozit malzemelerin geliştirilme tarihi 1940'lı yıllardan önceyi bulur. Kompozit malzemelerin ilk olarak ele alınması ise, 1940'lı yıllarda cam takviyeli plastiklerin kullanılmaya başlamasıyla olmuştur. Cam takviyeli plastiklerin ilk uygulaması mekanik özellikleri, atmosfer koşullarına dayanıklılığı, elektromanyetik geçirgenliği, hafifliği gibi özellikleri sebebiyle radar kubbelerinde olmuştur. Bir radar anteni gibi uçak antenleri projelendirilmiştir. Daha önceleri cam polyester radar antenleri yerine kontraplak ve çözünebilir kristal nitrojenli ($CO(NH)_2$) çadırbezli kubbeler kullanılırdı. Bu tip fiber kompozitlerin yük taşıma kapasitesinin, sıcaklığa dayanıklılığının ve havalandırmayı ayarlama özelliklerinin iyi olduğu deneylerle ispat edilmiştir. Her şeyden önce en güzel yanları, elektronik cihazların fiber kompozitten yapılmış kutularının, elektromanyetik dalgayı geçirebilir olmasıdır. Cam fiberle takviye edilmiş plastikten yapılmış radar antenleri gemilerde yaygın olarak kullanılmaktadır. İlk defa cam fiberden kayık 1942'de kalıplanmış, yine aynı yıl cam fiber tabakaları ile polyester reçineler üretilmiştir. 1946 yılında Birleşmiş Milletler ilk Flament-Winding (ince tel sarma) prosesi için patent almışlardır. Uçakların tek yorgunluk karakteristiklerine karşın takviyeli plastikler, 1950 yılları civarında pervane kanatlarında uygulanmıştır. Aynı zamanda bu tarih, havacılık ve uzay endüstrisinde, fiber takviyeli kompozitlerin uygulanmasındaki hızlı gelişim çağının başlangıcını belirlemiştir.

Kırılma Mekaniği, çatlak veya boşluk içerebilen mühendislik yapılarının emniyetli bir şekilde çalışmalarını sağlayan bir bilim dalıdır. İnsan hayatını güvence altına almanın yanı sıra finansal kazanımları da beraberinde getirir. Kırılma kontrolü,

çatlak değerlendirilmesi, kontrol, bakım ve onarım stratejilerini de içeren mevcut en iyi yöntemler uygulandığında, kırılmanın insanoğlu için istenmeyen zararları azaltılabilir.

Bu çalışmada el yatırma metodu ile üretilen değişik a/c ve a/t oranlarına sahip yüzey çatlaklı cam/epoksi kompozit malzemelerin kırılma davranışı incelenmiştir. Deneyler sabit hızda eksenel çekme yükü altında hidrolik kontrollü deney cihazında yapılmıştır. Deneyler boyunca çatlak ilerleme davranışı gözlenerek her numune için şekil değiştirme enerji boşalma miktarları tespit edilmiştir.

# 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Bu bölümde, konu ile ilgili olarak daha önce araştırmacılar tarafından yapılan çalışmalara yer verilmiştir. Mevcut çalışma, tabakalı kompozit malzemelerin hasar davranışları, kırılma tokluğu, yorulma hasarı, yüzey çatlaklı hasar davranışı ve korozyon hasarı konularının kesişimi mahiyetindedir. Araştırmacılar tarafından yapılan çalışmalar da bu sıra ile sunulmuştur.

1960'lı yıllarda Paris ve Erdoğan yorulma çatlak ilerleme hızını, gerilme şiddet faktörünün bir fonksiyonu olarak tanımlamıştır.

Uzunluğu 2c, derinliği a olan yarı eliptik yüzey çatlağı bulunan bir levhaya tekrarlı çekme yükünün uygulanmasıyla çatlak çevresinde meydana gelen Mod I gerilme şiddet faktörünü Kobayashi ve Moss (1968) elde etmiştir.

Yüzey çatlağı, yapılar üzerinde en çok bulunan ve oluşumu en kolay olan çatlak türüdür. Yüzey çatlağı ile ilgili çalışmalar, 1962 yılında Irwin'in gerilme şiddet faktörünün yaklaşık çözümünü düzlem şekil değiştirme hali için bulmasıyla başlar (Irwin 1962). Irwin'in yaklaşık metodunu bazı araştırmacılar (Paris ve ark. 1965, Irwin 1962, Anderson ve ark. 1970) devam ettirmişlerdir. Bunları alternatif metotlarla diğer araştırmacılar takip etmiştir (Smith ve ark.1967, Corn 1971, Rice ve ark.1972). Little ve Bunting (1972), uçak gövde ve kanatlarındaki yüzey çatlaklarının yorulma davranışlarını incelemişlerdir. Levhalarda derin yüzey çatlakları için gerilme şiddet magnifikasyon faktörlerini Anderson ve ark (1970) bulmuştur. Smith (1972), yüzey çatlağı problemlerine değişik bir metotla yaklaşarak arka yüzey magnifikasyon faktörünü eklemiştir. Rice (1972), yüzey çatlağı problemlerini yay modeli ile çözmüştür. Yüzey çatlağı problemlerinde daha sağlıklı sonuç almak üzere sonlu elemanlar metodu uygulanmıştır (Raju ve ark.1979, Bine ve ark.1989). Silindirik basınçlı kaplarda, yarı eliptik yüzey çatlağının gerilme şiddet faktörlerini ağırlık fonksiyonu yaklaşımı ile Xu ve Wu (1989) incelemişlerdir.

Cam takviyeli kompozit malzemelerin hasar ve deformasyon davranışları Bax (1970) tarafından incelenmiştir. Bax, bu çalışmada filaman sarım kısa boylu iç basınca maruz tüplerin yorulma deneyleri ile deformasyon davranışlarını araştırmıştır. Cam takviyeli plastiklerin dayanım ve kırılma tokluğu üzerine Cherry ve Harrison (1971) bir çalışma yaparak tekrarlı yükleme durumunda çatlak ilerlemesine etki eden faktörleri incelemişlerdir.

Eliptik yüzey çatlağı bulunan sonlu kalınlık ve genişlikteki bir numunede yüzey çatlağının ilerleme davranışı Newman ve Raju (1976) tarafından incelenmiştir.

Tabakalar arası kırılma tokluğu Smiley ve Pipes (1987) tarafından, açılı katlı kompozitlerdeki kırılma tokluğu ise Peters (1983) tarafından incelenmiştir. Ochiai ve Perets (1982), grafit epoksi malzemesinden üretilmiş tabakalı levhalarda elyaf açılarının kırılma tokluğuna etkisini tespit etmişlerdir.

Farley (1985), grafit takviyeli kompozit boruların enerji absorbsiyon kapasitelerine elyaf ve matrisin şekil değiştirmelerinin etkisini incelemiştir. Mieras (1973), cam takviyeli epoksi ve polyester boruların uzun süreli sürünme davranışlarını inceleyerek patlama basıncının çok altında hasara uğradıklarının tespit etmiştir.

Cam takviyeli plastiklerin çeşitli takviye geometrileri için çatlak ilerlemesi ve gerilme şiddet faktörlerinin bulunması için pek çok çalışma yapılmıştır. Sanford ve Stoneisifer (1971), eş yönlü CTP'lerde kırılma tokluğunu Paris ve Sih (1965)'in izotropik malzemeler için geliştirdikleri deney metodunu kullanarak elde etmişlerdir.

Jones ve ark (1983), yaptığı çalışmada aynı normalitedeki farklı mineral asitlerin kompozit yapıyı aynı sürede hasara uğrattığını rapor etmiştir.

Eldeniz (1992) ise, cam/polyester kompozit malzemelerde değişik a/c ve a/t oranlarına sahip yüzey çatlaklarının ilerleme davranışını Mod I yönünde incelemiştir.

Zheng ve ark (1997), tarafından, alüminyum malzemelerde değişken genlikli alternatife yükleme durumunda, yorulma korozyon çatlağı başlangıcı ve ilerleme ömrü incelenmiştir. Deneyler sonucunda aşırı yüklemenin çatlak oluşumunu geciktirdiği görülmüştür. Ayrıca korozif şartlarda değişken genlikli yükleme durumunda (Kim ve ark. 1983, Buch 1989) ve sabit genlik durumunda (Khan ve ark. 1996) yorulma çatlağı oluşum ve ilerlemesi başka araştırmacılar tarafından da incelenmiştir.

Ferry ve ark (1998), yaptıkları çalışmada açılı katlı kompozit malzemelerin hasar davranışlarının belirlenmesi için yeni bir model ortaya atmışlardır. Deneyler iki eksenli çekme ve iç basınç durumları için uygulanmıştır. Deneyler göstermiştir ki +55˚/-55˚ sarım açılı numuneler, gerilme oranına göre (eksenel/teğetsel) değişik hasar davranışları göstermektedir.

Gaffney ve Botsis (1999) yaptıkları çalışmada, cam/epoksi kompozit malzemelerde fiber aralıklarının kırılma özelliklerine ve mekanik davranışa etkilerini incelemiştir.

Potti ve ark (2000), bu çalışmada yüzey çatlağı içeren grafit epoksi kompozit malzemeyi eksenel çekme testine tabi tutmuşlardır. Gerilme şiddet faktörleri ile kırılma

gerilmesi arasındaki ilişkiyi hem ampirik olarak hem de grafikler halinde göstermişlerdir.

Vernel McDonall (2000) , 7075-T6 alüminyum alaşımlarında yarı eliptik yüzey çatlağının sabit ve değişken durumlarında çatlağın ilerleme davranışını incelemiştir.

Murtaza ve ark (2000), yaptığı çalışmada çatlak ilerleme davranışlarını incelemiş ve ampirik formüller bulunmuştur. Ayrıca havada ve sulu ortamlarda gerçekleşen yorulmalı korozyon davranışları arasındaki ilişkiyi ampirik formüllerle ifade etmiştir.

Zalamea ve ark (2000) yaptıkları çalışmada, tek yönde takviyeli kompozit malzemelerin analizinde iki metodoloji kullanmıştır. İlkinde çok fazlı malzemenin analizinde anizotropik yapılarda elastoplastik şekil değiştirmeleri gözlemiştir. Bu durumda kompozit malzemelerde fiber kırılmasının ortotropik iken matrisin davranışının izotropik olduğu söylemiştir. İkinci metodolojide ise homojen teori kullanılmış, bu durumda da malzeme; makroskopik ve mikroskobik olarak incelenmiştir.

Bringenthi (2000), değişik gerilme dağılımlarına maruz, üzerinde yüzey çatlağı bulunan bir kabukta, gerilme şiddet faktörlerini sonlu elemanlar metodunu kullanarak hesaplamıştır.

Fett (2000), yüzey çatlaklarının gerilme şiddet faktörlerinin bulunması için değişik bir yaklaşımda bulunmuş ve ağırlık fonksiyonları kullanarak gerilme şiddet faktörü formülünü bulmuştur. Benzer şekilde Zheng ve ark.'da (1997), ağırlık fonksiyonları kullanılarak gerilme şiddet faktörü için bir yaklaşım bulmuş ve bu formülü SEM ile kıyaslamıştır.

Pachard ve ark (2001) cam epoksi kompozit malzemenin nemli ortamlardaki dayanıklılığını ölçmüşlerdir. Gerilmeli korozyona maruz bırakılan kompozitlerde malzemenin en temel özelliğinin rijitlik olduğu ortaya konulmuştur.

Akdemir ve ark (2001), yaptıkları çalışmada 0.6N HCl asit çözeltisi altında yüzey çatlaklı cam polyester kompozitlerin farklı çatlak geometrilerinde gerilmeli korozyon çatlak ilerleme davranışları incelenmiş, gerilmeli korozyonda $\frac{da}{dt} = A(K_1)^n$ ifadesinin geçerliliğini araştırmışlardır.

Rebiere ve ark.'nın (2001) yaptıkları çalışmada, bir kompozit yapıdaki enine ve boyuna çatlakların gerilme bölgesine etkisi, rijitlikteki düşüş ve Poisson oranındaki düşüş incelenmiştir. Deneyler statik ve alternatif yükler altında yapılmıştır. Bir çok

araştırmacı kompozit malzemelerin üzerinde oluşan boyuna çatlakların statik yük değeri ve çevrim sayısı arttıkça arttığını göstermişlerdir (Henaff ve ark.1990, Boniface ve ark.1989).

Paepegem ve ark (2001), yorulma sonucu tabaka ayrılması olayını incelemiş ve bu olayı sonlu elemanlar analizi ile doğrulamışlardır.

Philippidis ve ark (2002), yaptıkları çalışmada takviye açısı, gerilme oranı, ortalama gerilme ve gerilme genliklerini kullanarak, sabit ömür zarfları elde etmişlerdir.

Önal (2002) 5086 Al-Mg alaşımında değişik a/c ve a/t oranlarına sahip yüzey çatlaklarının ilerleme davranışını inceleyerek, bu çatlakların farklı parametrik açılardaki ilerleme hızları ile gerilme şiddet faktörlerini belirlemiştir.

Günaydın (2004) yaptığı çalışmada cam/polyester kompozit malzemelerin üzerine farklı a/c ve a/t oranlarında yarı eliptik yüzey çatlakları açarak eksenel yorulma testine tabi tutmuştur.

Chen ve Lambert (2004) X-70 çeliğinden üretilen bir borunun üzerine yarı eliptik yüzey çatlakları açmışlardır. Deney sonuçlarının tespitinde Gurson-Tuergard (G-T) izotropik modeli kullanılmıştır. Yüke karşılık gelen çatlak ağzı açılma miktarları grafikler halinde verilmiştir. Hasar analizinin üç farklı yüzey çatlağı konfigürasyonunda olduğu gözlenmiştir. Bunlar; çatlak başlangıcı, kararlı çatlak ilerlemesi ve kırılmadır. Sonlu elemanlar metodu kullanılarak gerilme dağılımları da gösterilmiştir.

Abdel Magid ve ark (2005), cam epoksi kompozit malzemeyi nemli bir ortamda yüklemeye maruz bırakmışlardır. Malzemenin mukavemetinde ve şekil değiştirmesindeki farklılıkları gözlemişlerdir. Kısa süreli bir durumda oda sıcaklığında malzemenin dayanıklılığında çok az bir değişme olduğu yani kırılma ve şekil değiştirmenin çok az etkilendiği tespit edilmiştir. 3000 saat sürede yapılan testlerde ise mukavemet değerlerinin çok azaldığı görülmüştür. Testler 65 C° de 500, 1000 ve 3000 saatte yapılmıştır. Numunelerin kırılma fotoğrafları, gerilme ve şekil değiştirme eğrileri karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Pereira ve ark (2005) , çok yönlü cam takviyeli epoksi kompozit malzemelerde Mode-1 yönünde tabakalar arası kırılma tokluğunu incelemişlerdir.

Hasseini ve ark (2005), bu çalışmada üzerinde cam/epoksi yama bulunan alüminyum panelleri eksenel yorulma testine tabi tutmuştur. Farklı kalınlıklara sahip yamalar gene farklı kalınlıktaki alüminyum panellere yamalanmıştır. Yama tabakası sayının mekanik davranışlara etkisi ve yamalar üzerine açılan çatlağın ilerlemesi incelenmiştir. Deneyler 4, 8 ve 16 tabakalı yamalar kullanılarak yapılmıştır. 4 tabakalı

yamada ömrün yüzde 21-35 oranında, 16 tabakada ise yüzde 236 oranında uzadığı gözlenmiştir. Farklı tabaka sayısına sahip numuneler için çatlak ilerlemesi grafikler halinde verilmiştir.

Sorucu (2007) cam/epoksi kompozit malzemelere üç nokta eğme deneyi ve tek çentik kenarlı çekme deneyi yapmıştır. Kompliyans yöntemi kullanarak kırılma tokluğu değerlerini hesaplamış, sonuçları grafikler halinde vermiştir.

Gülakman (2008), çift ankastre kiriş test tekniği (DCB) kullanarak cam/epoksi kompozit malzemenin kırılma tokluğu değerlerini hesaplamıştır.

# 3. MATERYAL VE YÖNTEM

Kompozit malzemeler, birden çok metalik, organik veya inorganik bileşenden oluşabilir. Bu bileşim neredeyse sınırsızdır. Yani, elde etmek istediğimiz sonuç yapının özelliklerine göre, aşağı yukarı istediğimiz her malzemeden bir kompozit elde edebiliriz. Ancak, yapı içerisinde bulunacak olan destek malzemeler için bazı sınırlar vardır. Bir kompozit içerisinde destekleyici yapılar olarak elyaf, parçacık, pulcuk, tabaka yada dolgu bulunabilir. Genel olarak kompozitler, bir matris içerisinde bulunan destek yapılardan ibarettir.

Ara yüzey ve ara fazlar, kompozitten istenen özeliklerin elde edilmesi için önemlidir. Ara yüzeyler, kuvvetin matristen takviyeye aktarıldığı bölgedir. Dolayısıyla, bu bölgenin mekanik özellikleri, kompozitin mekanik özelliklerini belirlemede çok etkilidir. Ara yüzeyde güçlü bir birleşme, yapıyı katı fakat gevrek yapar. Zayıf ara yüzey ise, yapıyı esnekleştirir, ancak bu yapı tok bir yapı olur. Eğer ara yüzey matris yapıdan daha zayıf olursa, kırılma ve tabaka ayrılması meydana gelir. Çünkü taşınan yük direk olarak ara yüzey üzerinden ara faza aktarılır, dolayısıyla takviye elemanı matristen ayrılmış olur.

## 3.1 Elyaf Takviyeli Kompozitler

Kompozit malzemeyi meydana getiren elemanlardan biri değişik malzemelerden meydana gelmiş olan elyaflardır. Metalik, organik, seramik elyaf gibi çeşitleri mevcuttur. En yaygın ve çok kullanılanı elyaf türü cam elyaflarıdır.

## 3.2 Elyafların Özellikleri

Elyafları meydana getiren malzemelerin özellikleri, büyük boyutlu formlarından daha farklıdır. Bir elyaf sadece uzunluğunun çapa göre çok büyük olması ile değil aynı zamanda kristallerin çap yönünde dizilmesi ile de ayırt edilir. Kompozit malzemelerdeki elyafların en önemli fonksiyonu yükü taşımaktır. Elyaflar, kompozit malzemeye dayanım sağlarken rijitlikte sağlar. Kompozit malzemedeki sürekli elyaflara filaman, metalik filamanlara ise tel adı verilir. Eğer elyafların şekli dikdörtgen prizması şeklinde ise yani kesit alanı dikdörtgense ve dikdörtgen kenarlarından biri diğerinin 4 katından fazla olursa bu tür elyaflara şerit adı verilir.

Cam elyaflar, kompozitlerde takviye malzemesi olarak en çok kullanılan ve en ucuz olanıdır. Cam elyafların genellikle dayanım/ağırlık oranı yüksektir. Alüminyum

alaşımlara göre elastik modülü büyük olurken, grafit ve aramid elyaflara göre daha düşüktür. Cam elyafların içyapıları amorf değildir.

Cam elyafla kuvvetlendirilmiş plastiklerin rijitlik/yoğunluk oranları, metallerin rijitlik/yoğunluk oranına göre daha düşüktür. Cam elyaflar çok yüksek kimyasal dirence sahiptirler. Su absorbe etmezler. Fakat çekme dayanımları nemli ortamda azalır.

Cam elyafların sürünmeye karşı direnci ve rijitliği sıcaklık arttıkça azalır. Bununla birlikte faydalı kullanım sıcaklık aralığı oldukça büyüktür. Cam 500°C'ye kadar yumuşamaz.

Kompozit malzemelerde kullanılan cam elyaflar sürekli elyaflar şeklinde üretilirler. İlk önce ham cam fırında eritilir, daha sonra fiberler yüksek hızla bu eriyikten çekilir. Elyaf yüzeyi koruyucu ve bağlayıcı bir maddeyle kaplandıktan sonra desteler halinde bir araya getirilir, bunlara demet denir.

Kimyasal bileşimlerine göre cam elyaflar, E, C, D ve S camı olarak adlandırılırlar. Bunlardan S camı, yüksek dayanımlı olduğu için önceleri askeri sahalarda kullanılmıştır. Elastisite modülü E camına göre % 20 daha büyüktür ve 1/3 katı daha dayanıklıdır. Tablo 3.1'de E camı ile S ve D cam elyaflarının özellikleri gösterilmektedir.

Tablo 3.1: E camı S camı ve D Camı elyaflarının özellikleri (Cam Elyaf San.A.Ş.1984)

| Özellikler | E camı | S camı | D camı |
|---|---|---|---|
| Yoğunluk, ρ ($g/cm^3$) | 2.60 | 2.50 | 2.16 |
| Elastik modülü E (GPa) | 72 | 87 | 51.7 |
| Çekme dayanımı σ (GPa) | 3.45 | 4.54 | 2.41 |
| Çekme uzaması (%) | 4 | 2.9 | ____ |
| Spesifik modül E/ ρ ((MN/m) | 27.7 | 34.8 | 23.9 |
| Spesifik dayanım σ/ρ (MN/m/kg) | 1.37 | 1.81 | 1.16 |
| Boyuna termal genleşme katsayısı α ($\mu m/C^o x10^{-5}$) | 5 | 5.6 | 3.06 |

Cam elyaflar reçine ile birleşerek uygun bir malzeme ortaya çıkar. Elyaflar ile matris malzeme arasında yetersiz bağlar iç yüzey hatalarını oluşturabilir. Bir grup elyaf, şerit yapı oluşturmak için bir araya gelirse ve silindirik bir makaraya sarılırsa buna bobin denir.

### 3.3 Matris Malzemeleri

Matris, elyaf takviyeli karma malzemelerin önemli iki bileşeninden biri olup, elyaf takviyelerinin öngörülen zorlamaları taşıması, matrisin uygun olarak seçilmesine bağlıdır. Matrisin başlıca görevleri;

– Kuvvetleri elyafa iletmek

– Lifleri ortam etkisinden korumak

– Elyafların uygun pozisyonda (oryantasyonda) yerleşmelerini ve durmalarını sağlamak, olarak sıralanabilir.

Termoset plastikler, küçük monomer moleküllerini uzun ve aralarında kuvvetli bağlar bulunan polimer molekülleri haline getiren kimyasal reaksiyonlar sonucunda oluşur. Bu reaksiyonların gerçekleşmesi için genellikle bir sertleştirici ve hızlandırıcı katılması ve bazen enerji verilmesi (ısı, mikrodalga vb.) gereklidir. Sıvı reçine önce jelleşir, daha sonra sertleşir. Kovalent üç boyutlu bağların oluşması nedeniyle termosetler oldukça rijittirler. Polimerizasyon reaksiyonu tersinir olmadığından tekrar ısıtılarak yumuşatılamazlar. Yüksek sıcaklıklarda ise kovalent bağlar kopar ve malzeme giderek kömürleşir. Polyester, epoksi reçine, fenolik reçine ve silikon gibi termoset polimerler, elyaf takviyeli kompozit malzemelerde yaygın olarak kullanılan matris malzemelerdir.

Uzay ve havacılık gibi ağırlığın kritik olduğu ve yüksek dayanım istenen yerlerde klasik olarak epoksi reçine tercih edilir. Polyester gibi daha ucuz olan bir reçineye tercih edilme sebepleri, daha iyi mekanik özellikler, yorulma dayanımı, ısıl dayanım, takviye malzemesine iyi yapışma ve sertleşme esnasında düşük çekme oranı şeklinde sayılabilir.

Epoksi reçine, epoksit grubunun polimerizasyonu ile elde edilir. Farklı formüller kullanılarak özelliklerini büyük ölçüde değiştirmek mümkündür. Çok değişik epoksiler geliştirilmiştir ve uygun bir seçim yapmak çok önemlidir. Kullanılan sertleştiricinin türü, ortaya çıkan karma malzemenin özelliklerini büyük ölçüde etkiler. Reçinenin homojen olarak sertleşmemesi, özellikle gerilmeli korozyon olayında reçinenin çok faklı tepkiler vermesine sebep olur. Sertleşme 1 saat dolayında olup 127 °C ve 177 °C sıcaklıklarda ve genellikle basınç altında gerçekleştirilir. Ayrıca epoksilerin 250 °C 'ye kadar ısıl kararlı türleri de geliştirilmiştir. Sertleşme sırasında kendini çekme sorunu yoktur. Dayanımları yüksektir, birçok elyaf ile iyi bir bağ oluşturur ve ayrıca kimyasal dayanımları da yüksektir.

Epoksi reçineler, Bisfenol-A bazlı reçineler, glisidil esterler, glisidil aminler, novolaklar, bromlu reçineler, sikloalifatikler ve diğer reçineler olmak üzere altı sınıfa ayrılır.

### 3.4. Islak Kalıplama (El Yatırma Yöntemi)

Jelkot sürülmüş kalıp üzerine önce 300 gr/$m^2$'lik cam keçe ile uygulama yapılır (450-600 gr/$m^2$'lik de olabilir.) CTP ürün yüzeyinin çok düzgün olması veya ürünün kimyasal maddelerle teması istenirse, jelkot üzerine cam keçeden önce yüzey tülü kaplanması gerekir. Cam elyafının polyester ile ıslatılması için yeterli miktarda (2/1-2.5/1) polyester fırça veya yün rulo ile cam elyafına yedirilir. Cam elyafı kalıp şeklini aldığı zaman, yatırma amacıyla yatay dişli rulolarla hava kabarcığı giderme amacı ile de dikey dişli rulolarla elde edilen laminatın preslenmesi gereklidir.

Cam elyafının yan yana yatırılması gereken büyük kalıplarda her iki şerit birbirine en az 5cm bindirilmelidir. Diğer katlarda bu bindirme noktalarının yer değiştirmesine dikkat edilmelidir. Bindirmelerin hep aynı yerde olması, aşırı bir kalınlık meydana getirir. El yatırmanın aşamaları Şekil 3.1'de görülmektedir.

İstenildiği takdirde polyester reçinenin renklendirilme olanağı vardır. Renklendirme renk pastaları ile sağlanabilir. Ancak polyesterin renkli olması halinde, hava kabarcıklarının giderilip, giderilemediğini saptamak olası değildir.

Kalıplama sırasında zorlukla karşılaşmamak ve malzeme zayiatını önlemek amacıyla cam elyafının belli bir şablon ile önceden kalıba en uygun biçimde kesilmesi tavsiye edilir.

İlk kat keçe uygulamasından sonra diğer keçe ve dokuma tabakaları aynı yöntem ile yatırılır. Dokuma kullanıldığında her dokuma tabakasının iki keçe tabakası arasında yerleştirilmesine dikkat edilmelidir.

Bütün tabakalar birbiri ardından işlenebilir. Ancak dört kattan daha kalın ürünlerde, egzotermik reaksiyondan ötürü oluşan ısının dışarı atılabilmesi için belli bir süre beklenip, diğer katların bu beklemeden sonra işlenmesine dikkat edilmelidir.

CTP bünyesine gömülecek takviye elemanlarının herhangi bir deformasyona neden olmaması için, ürün kısmen sertleştikten sonra yerleştirilmesi gerekir. Tam sertleşme beklendiği takdirde sonradan eklenen parçaların bünyeye tam intibakı sağlanamaz.

Kalıp üretiminde balmumu, kil, tahta, metal, kağıt ve plastik gibi değişik malzemeler; kalıptan ayrılmayı sağlamak için ise polivinil alkol, silikon ve madeni yağlar gibi maddeler kullanılır. El yatırma yönteminde araç ve gereç için yapılan yatırım düşüktür ve genellikle az sayıda parça üretimi (model, prototip vs.) için kullanılır. Bu yöntemle elde edilebilecek en yüksek elyaf hacim oranı ($v_e$) % 30' dur.

Deney malzemesi olarak İzoreel Kompozit İzole Malzemeler Sanayi ve Ticaret Limited Şirketinden temin edilen 3 mm kalınlığında, 8 tabakalı Cam/Epoksi levhalar kullanıldı. Bu çalışmada cam / epoksi kompozit malzemenin tek yüzünün düzgün olması yeterli olduğu için ve üretim miktarı çok fazla olmadığı için el yatırma yöntemi tercih edilmiştir. Tek yönde takviyeli kompozit malzemelerin üretimi için 17 μm çapında Vetrotex E-glass fiber (Tex 1200) takviye elemanı olarak kullanıldı. Matris malzemesi olarak da Ciba Geigy Bisphenol-A epoksi CY225 reçine kullanıldı. Deneyler bölümünde bahsi geçecek olan yakma deneyi sonuçlarına göre fiberin ağırlığı bulunmuş ve elyaf hacim oranı % 80 olarak hesaplanmıştır.

Daha yüksek elyaf hacim oranları ise, prepreg kullanılarak elde edilebilir. Bunlar yarı sertleşmiş reçine içine düzenlenerek gömülmüş liflerdir. İstenilen geometrilerde üst üste yerleştirildikten sonra ısıl ve mekanik etkilerle reçinenin tam sertleşmesi sağlanır. Bant yada dokuma şeklindedirler. Bor elyaf, sadece tek yönlü prepreg olarak üretilir. Dokumaların yatırılması daha kolay olmasına rağmen dayanımları düşüktür. Prepreglerin geliştirilmesi ile 1970'lerden sonra otomatik yerleştirme makinaları kullanılmaya başlanmıştır. Prepregler uçak ve uzay sanayii gibi malzeme özelliklerinin belirli sınırlar içinde kalmasının çok önemli olduğu durumlarda tercih edilir, ancak maliyetleri oldukça yüksektir.

Prepreglerin başlıca avantajları şunlardır:

a) Reçine, elyafa en uygun şekilde seçilmiştir.

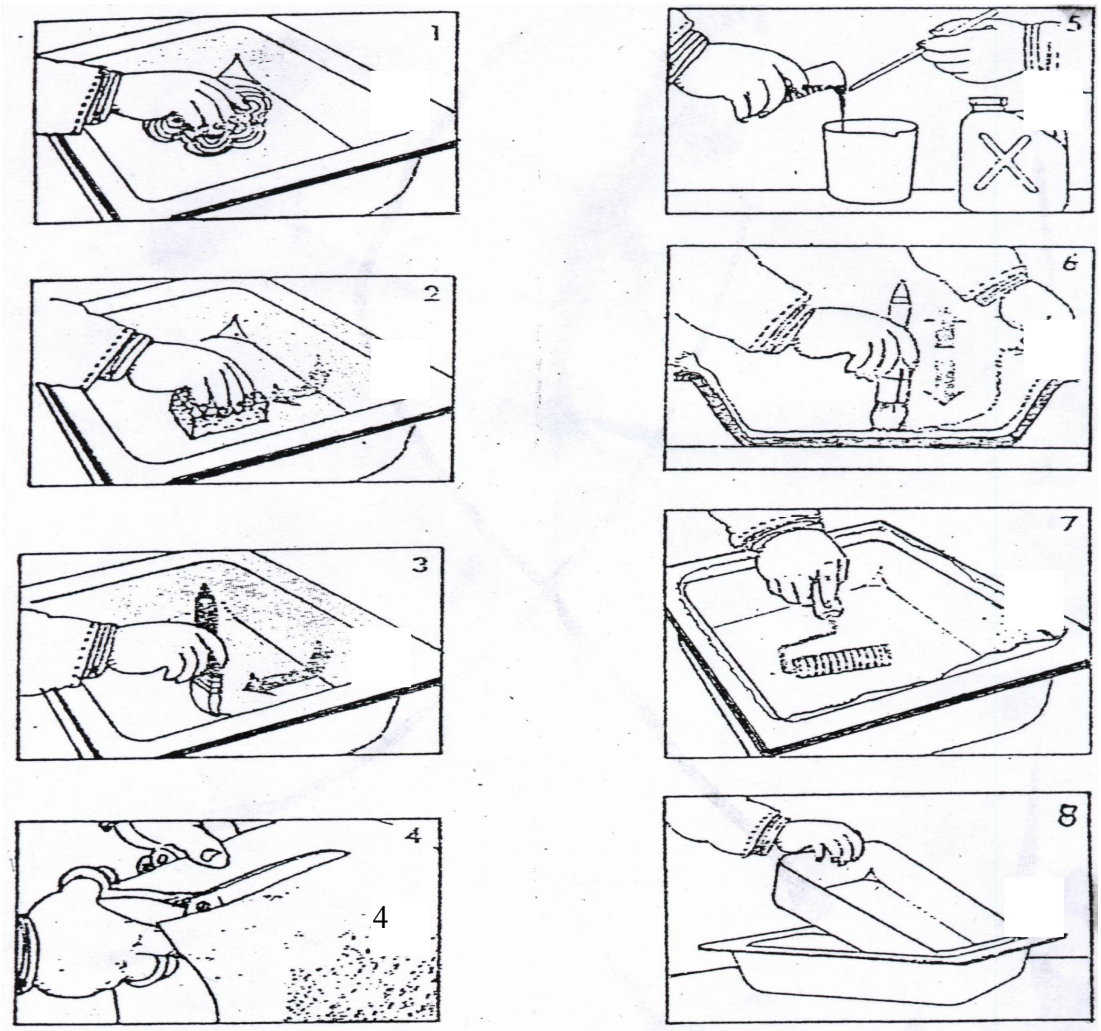
b) Parça üretilen atölyede değişik reçine ve sertleştiricilerin stoklanmasına gerek yoktur.

c) Karmaşık biçimlerin elde edilmesi kolaydır.

d) Otomatik makinalarla yerleştirme yapılabilir.

e) Mamül özelliklerindeki sapmalar çok azdır.

CTP ürünün tam sertliğe ulaşması için bir ısıtma işlemi daha gereklidir. Oda sıcaklığında 24 saat veya 60˚C'de 1 saat süreyle ön sertleşmesi bitirilen ürün 80˚C'de 3 saat süreyle bekletilirse tam sertleşmeye ulaşır.




Şekil 3.1. El yatırmanın aşamaları

1. Kalıp silindikten sonra birinci kalıp ayırıcı olarak vaks sürülür,

2. Sünger ile ikinci ayırıcı polivinil alkol uygulanır,

3. Fırça ile viskozitesi yüksek reçine (jelkot) sürülür,

4. Takviye olarak kullanılacak elyaf hazırlanır,

5. Reçine hazırlanarak katkıları karıştırılır,

6. Jelkot üstüne reçine sürüldükten sonra keçe yerleştirilir ve fırça darbeleri ile reçine keçeye emdirilir,

7. Rulolanarak hava kabarcıkları giderilir,

8. İşlem istenilen kalınlığa kadar devam ettirilerek, sertleşme beklenir ve ürün kalıptan çıkarılır.

### 3.5. Kırılma Mekaniği

Kırılma, gerilme altında bir maddenin iki veya daha fazla parçaya ayrılması veya parçalanmasıdır. Kırılma olayı, bir çatlağın başlaması ve ilerlemesi olarak iki kısımda incelenir.

Yük taşıyan yapılarda hasar, en genel anlamda akma veya kırılmayla olur. Bir malzemenin yapısındaki hatalar iki tip hasar için de çok önemlidir fakat aralarında önemli farklar vardır.

Akmayla oluşan hasarda önemli olan hatalar, kristal kafesi düzlemlerinin sürekliliğini bozan ve dislokasyon hareketini engelleyen hatalardır. Bu da metallerdeki mukavemet artışı için gerekli bir olaydır.

Kırılmayla oluşan hasarda önemli olan hatalar ise makroskobik boyuttadır, çünkü genel bir plastik deformasyon değil, hatalarla bağıntılı olan yerel gerilme-şekil değiştirme alanları söz konusudur. Örneğin malzeme yapısındaki boşluklar, kaynak hataları ve yorulma çatlakları gibi.

Kırılma genel anlamda iki şekilde oluşur; sünek kırılma ve gevrek kırılma. Sünek kırılma, çatlak ilerlemesi öncesinde ve sırasında önemli ölçüde plastik deformasyonla karakterize edilir. Kırılma yüzeylerinde de bu plastik deformasyon gözlenir. Gevrek kırılma, hızlı bir çatlak ilerlemesi ve mikro-deformasyonla karakterize edilir. Gevrek kırılmaya eğilim, azalan sıcaklık hızı, artan deformasyon hızı ve genellikle bir çentiğin yol açtığı üç eksenli gerilme durumlarında artar. Gevrek kırılma önceden uyarmadan oluştuğundan ve genellikle büyük felaketlerle sonuçlandığından istenmeyen ve mutlaka önlenmesi gereken bir kırılma türüdür.

İdeal kusursuz bir kristalin bağ mukavemeti, teorik olarak onun kırılma mukavemetine eşittir. Kırılma mekaniğinin amacı ise, çatlaklar, çentikler ve delikler gibi gerilme yoğunluğunu artıran hataları inceleyerek gerçek problemlere çözüm aramaktır.

Kırılma mekaniği hemen hemen tümüyle kırılmayla belirlenen hasarları inceler. Kırılmayla ilgili bir problemin ilk analizi Griffith tarafından camlardaki gevrek çatlakların ilerleyişinin izlenmesiyle gerçekleştirilmiştir. Griffith basit bir enerji dengesi öngörmüştür, gerilme altındaki bir sistemde çatlak ilerledikçe elastik germe enerjisinde bir azalma olur ki bu enerji de yeni çatlak yüzeylerinin oluşması için gerekli olan enerjidir.

Daha sonra Irwin G diye bir malzeme özelliği tanımlamıştır. G birim kalınlık başına çatlak uzunluğundaki birim artış için absorblanan toplam enerjidir. G, şekil

değiştirme enerji boşalma miktarı olarak adlandırılır. Ayrıca çatlak ucunda şekil değiştirme enerji boşalma miktarı dağılımı kritik bir değere ulaştığında kırılma oluşur. Buna da kritik şekil değiştirme enerji boşalma miktarı $G_c$ denir.

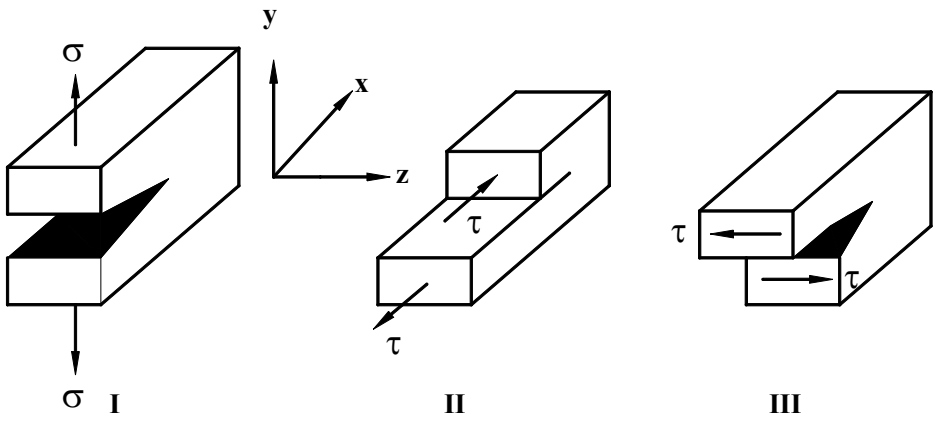
Yine Irwin sonraki çalışmalarında kırılma mekaniğinde çığır açmış, enerji yaklaşımının gerilme yoğunluğu ile eşdeğer olduğunu bulmuştur. Buradan gerilme şiddet faktörü (GŞF) diye tanımlanan K diye yeni bir malzeme özelliği tanımlamıştır. Gerilme şiddet faktörü K, çatlak civarında gerilme alanını belirleyen bir parametre olup, bu faktör malzemenin geometrik hali, yükleme şekli, çatlağın yeri ve oryantasyonuna bağlıdır. Buna göre çatlak ucunda gerilme dağılımı kritik bir değere ulaştığında kırılma oluşur. Böylece kritik gerilme şiddet faktörü veya yoğunluğu, $K_c$ ortaya çıkmıştır.

G ve K'nin eşdeğerliliği Lineer Elastik Kırılma Mekaniğine (LEKM) temel oluşturmuştur. Çünkü tüm malzemeler için, bir çatlak ucunun etrafındaki ve yakınındaki gerilme dağılımı durumu her zaman aynıdır. Dolayısıyla $K_c$'nin bilinmesiyle gerçek yapılarda ve belirli şartlar altında malzemede hangi hatalara izin verilebileceği saptanabilir. Ayrıca bu yaklaşımla yapılan deneyler sonucunda malzemelerin yorulma çatlak ilerleyişi veya gerilmeli korozyon çatlaması gibi hassasiyetleri de bir dereceye kadar tahmin edilebilir.

LEKM, çatlak ucunda sınırlı plastik deformasyonun olduğu durumlarda geçerli olduğundan, çatlak ucunda önemli ölçüde plastik deformasyon söz konusu olduğunda Elastik Plastik Kırılma Mekaniği (EPKM) devreye girer. EPKM de, Wells'in çatlak açılması (COD) üzerine yaptığı çalışmalarla başlar (Oğuz 1996)

### 3.5.1. Lineer elastik kırılma mekaniği

Elastik cisimlerde çatlağın gerilme analizini yapabilmek için çatlak yüzeyinin bağıl hareketinin bilinmesi gerekir. Çatlak ilerleme davranışı üç tipte görülür. Bu üç tipten birini, ikisini veya üçünü de içerebilir. Şekil 3.2'de üç tip davranış görülmektedir.




Şekil 3.2: Çatlak ilerleme modları: (I): Açılma modu, (II): Kayma modu, (III): Yırtılma modu

Bu çalışmada, eksenel çekme testine tabi tutulan numuneler açılma modunda hasara uğramışlardır. Kompozit malzemeyi oluşturan bileşenler plastik deformasyon göstermezler. Bu bakımdan kompozit malzemenin plastik deformasyon göstermesi söz konusu değildir. Bundan dolayı problem Lineer Elastik Kırılma Mekaniği problemi olarak ele alınmıştır.

Tip I, en çok görülen ve diğerlerine göre daha kritik olan açılma modudur. İki kırılma yüzeyi birbirine zıt yönde ve birbirine dik olarak ayrılır. II. tip kayma modunda, çatlak yüzeyleri x-z düzlemi üzerinde zıt yönde hareket ederler. III. Tip yırtılma modunda ise çatlak x-y ve x-z düzlemlerine göre ters simetrik olarak ilerler. İki kırılma yüzeyi birbirine göre çatlak önündeki bir doğru ile paralel yönde kayarlar.

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;

$$K = \sigma\sqrt{\pi a}\, f(a/W) \tag{3.1}$$

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

$$K_I = \sigma_I \sqrt{\pi a}\,,$$

$$K_{II} = \tau_{II} \sqrt{\pi a}\,,$$

$$K_{III} = \tau_{III} \sqrt{\pi a} \tag{3.2}$$

Burada, $K_I$, $K_{II}$ ve $K_{III}$ sırasıyla Mod I, Mod II ve Mod III' e göre GŞF dir. Mod I çatlak ucu gerilme bölgeleri dağılımı ve koordinat sistemi gösterimi Şekil 3.3 ' deki gibidir.

Çatlak ucundaki gerilmeler denklem 3.3' deki gibidir;

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

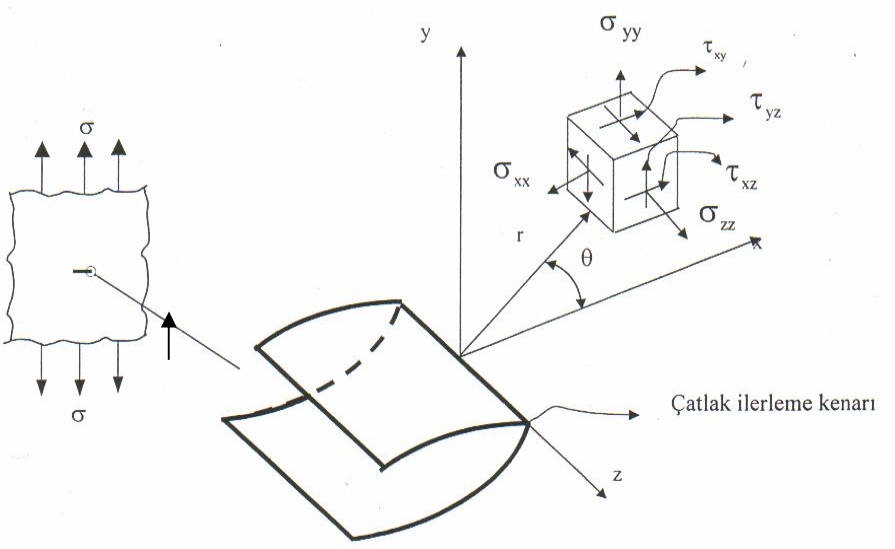
$$\sigma_{yy} = \frac{K_I}{(2\pi r)^{1/2}} Cos\frac{\theta}{2}\left(1 + Sin\frac{\theta}{2} Sin\frac{3\theta}{2}\right)$$

$$\tau_{xy} = \frac{K_I}{(2\pi r)^{1/2}}\left(Cos\frac{\theta}{2} Cos\frac{3\theta}{2} Sin\frac{\theta}{2}\right) \tag{3.3}$$

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

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

Şekil 3.3'deki gibi açılan çatlağın, $r$ 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. $K_I$: Mod I için gerilme şiddet faktörü, $E$: Elastisite modülü ve $\theta$: $r$'nin $x$ ekseni ile yaptığı açıdır. $u$, $v$, $w$ ise sırası ile $x$, $y$, $z$ eksenlerindeki deplasmanlarıdır.




Şekil 3.3: Kalınlık boyunca çatlak için teorik gerilme dağılımı

$$u = \frac{K_I}{E}\left(\frac{r}{2\pi}\right)^{1/2}(1+\nu)\left[(2\kappa-1)Cos\frac{\theta}{2} - Cos\frac{3\theta}{2}\right]$$

$$v = \frac{K_I}{E}\left(\frac{r}{2\pi}\right)^{1/2}(1+\nu)\left[(2\kappa+1)Sin\frac{\theta}{2} - Sin\frac{3\theta}{2}\right]$$

$$w = -\nu^* \frac{K_I}{E} \tag{3.4}$$

$\nu^* = \nu$ , $\kappa = \dfrac{(3-\nu)}{(1+\nu)}$ (Düzlem gerilme hali için)

$\nu^* = 0$ , $\kappa = 3-4\nu$ (Düzlem şekil değiştirme hali için)

Mod II durumu için gerilmeler;

$$\sigma_{xx} = \frac{K_{II}}{(2\pi r)^{1/2}} Sin\frac{\theta}{2}\left(2 + Cos\frac{\theta}{2}Cos\frac{3\theta}{2}\right)$$

$$\sigma_{yy} = \frac{K_{II}}{(2\pi r)^{1/2}} Sin\frac{\theta}{2}Cos\frac{\theta}{2}Cos\frac{3\theta}{2} \tag{3.5}$$

$$\tau_{xy} = \frac{K_{II}}{(2\pi r)^{1/2}} Cos\frac{\theta}{2}\left[1 - Sin\frac{\theta}{2}Sin\frac{3\theta}{2}\right]$$

$$\sigma_{zz} = \nu(\sigma_{xx} + \sigma_{yy})$$

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

Deplasmanlar denklem 3.6'da ki gibi bulunur;

$$u = \frac{K_{II}}{E}\left(\frac{r}{2\pi}\right)^{1/2} Sin\frac{\theta}{2}\left[2 - 2\nu Cos^2\frac{\theta}{2}\right]$$

$$v = \frac{K_{II}}{E}\left(\frac{r}{2\pi}\right)^{1/2} Cos\frac{\theta}{2}\left[-1 + 2\nu + Sin^2\frac{\theta}{2}\right] \qquad (3.6)$$

$$w = 0$$

Mod III durumu için gerilmeler ve deplasmanlar;

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

$$\sigma_{yz} = \frac{K_{III}}{(2\pi r)^{1/2}} Cos\frac{\theta}{2} \qquad (3.7)$$

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

$$u = v = 0$$

$w = \frac{K_{III}}{E}\left[\frac{2r}{\pi}\right]^{1/2} Sin\frac{\theta}{2}$ bulunur.

### 3.5.1.1 Gerilme hali

Çatlak içeren bir numune gerilmeye maruz kaldığında çatlak geometrisi nedeniyle üç eksenli gerilmeler oluşur. Ancak çok ince bir numunede (1evha şeklinde) x ve y yönlerinde gerilmeler mevcutken z, yani kalınlık yönünde gerilme yoktur ($\sigma_z = 0$) çünkü bu yön serbesttir. Böyle bir geometride gerilmeler iki eksenli (düzlemsel) olduğundan düzlem gerilme hali söz konusudur.

Kalın numunelerde ise, düzlemsel gerilme uygulansa dahi kalınlık boyunca şekil değişimi kısıtlanmış olabilir. Bunun da nedeni, numune içine ilerledikçe malzeme, z ekseni boyunca kendini çevreleyen malzeme tarafından tutulmasıdır. Bu durumda kalınlık doğrultusunda (z yönünde) deformasyonu engellenmiş olur ($\varepsilon_z = 0$). Bu yükleme haline düzlem şekil değiştirme hali adı verilir.

Bu çalışmada üzerinde yüzey çatlağı bulunan düzlemsel bir levha tek eksenli çekme yüküne maruz bırakılmıştır. Yüzey çatlağının geometrisinden dolayı her üç eksende de gerilmelerin doğması söz konusudur. Bu durumda yükleme hali düzlem gerilme ve düzlem şekil değiştirme hallerine uymaz. Bundan dolayı belirtilen yükleme

halinin genel yükleme hali olduğu kabul edilmiştir. Çatlak civarında ise kayma modu oluşturduğu çatlak ilerlemesinin Mod II olduğu kabul edilmiştir.

### 3.5.2 Şekil değiştirme enerji boşalma miktarı (*G*)

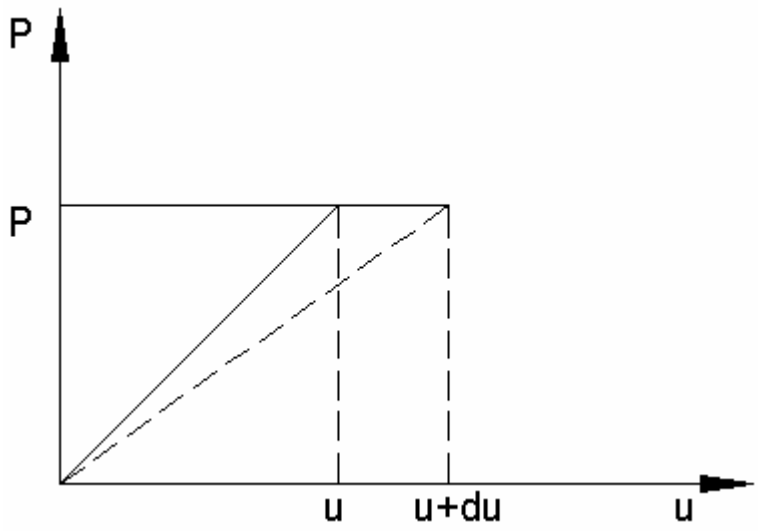
Kırılma mekaniğinde, çatlak ucunda meydana gelen gerilme alanını tarif etmek için kullanılan, gerilme şiddet faktörü *K,* metaller ve seramikler gibi izotrop malzemeler için uygun bir parametredir. Yine kırılma mekaniğindeki yaklaşımlarda çatlak ilerlemesinin ilk başlangıcının tahmini için bir enerji kriteri olan şekil değiştirme enerjisi boşalma hızı, *G* veya gerilme şiddet faktörü *K*'nın bilinmesi gereklidir. Çalışmada çatlak şeklini koruyamadığı için G parametrelerinin kullanılması gerekir. Metaller ve seramikler gibi homojen malzemeler için her iki yaklaşımdan benzer sonuçlar elde edilse bile gerilme şiddet faktörü yaklaşımı yorulmalı çatlak ilerlemesi bulunan kompozitlerde sınırlı uygulamalarda kalmaktadır (Devranjsinh 1997).

Enerji yaklaşımı ilk önce Griffith (1921) tarafından gevrek malzemeler için, birim çatlak boyu ilerlemesi yada birim çatlak alanı oluşturmak için gerekli olan enerji olarak tarif edilmiştir. Kararsız çatlak ilerlemesi için aşağıdaki şart sağlanmalıdır.

$$\frac{dW}{da} - \frac{dU}{da} > \frac{dU'}{da} + \gamma \tag{3.8}$$

$$G > G_c \tag{3.9}$$

Eşitlik (3.8)'ün sol tarafı; cisme dışarıdan uygulanan *W* işi ile elastik şekil değiştirme enerjisi *U*' nun farkının, eşitliğin sağ tarafındaki, kalıcı şekil değişimi $U'$ ile yeni çatlak yüzeyi oluşturmak için gerekli enerji $\gamma$'nin toplamından büyük olmalıdır. Eşitlik 3.9'da ki şekil değiştirme enerjisi boşalma miktarı *G,* gerilme şartlarına ve çatlak geometrisine bağlıdır. $G_c$ ise *G*'nin kritik değeri olup bir malzeme özelliğidir. Bu durumda *G,* kritik $G_c$ değerini aştığı zaman kararsız çatlak ilerlemesi başlayacaktır. $G_c$ değeri lineer olmayan çatlak ilerlemesinde ve hasar bölgesi boyutlarının numune boyutlarına göre çok küçük olduğu durumlarda geçerli ve faydalı bir parametredir.




Şekil 3.4: Sabit yük altında deplasman artışı (*P-u*) grafiği

Başlangıç çatlak boyu *a* olan lineer elastik bir malzemede, uygulanan yük neticesinde çatlak boyunun *a*+d*a* olduğunu varsayalım. Bu durumda *G:*

$$G = \frac{1}{W}\frac{dU}{da} \tag{3.10}$$

Burada; $U$ numune üzerinde depolanan toplam enerji ve $W$ ise numune genişliğidir. Sabit yük şartlarında, Şekil 3.4'de görülen üçgenlerin alanları farkına eşittir. Buradan;

$$\delta U = \frac{1}{2}(u+\delta u)P - \frac{1}{2}Pu = \frac{1}{2}P\delta u \tag{3.11}$$

$$= \frac{1}{2}P(u+\delta u) - \frac{1}{2}Pu$$

$$= \frac{1}{2}P\delta u$$

burada $P$, uygulanan yük ve $u$ ise bu yük altındaki deplasmandır. Yine grafikte *P-u* eğrisinin eğiminin tersi yada *u/P*, *kompliyans* olarak tanımlanır ve $C$ ile gösterilir.

$$C = \frac{u}{P} \tag{3.12}$$

Buradan, sabit yük yada sabit deplasman şartlarında $G$ aşağıdaki şekilde yazılabilir;

$$G = \frac{P^2}{2W}\frac{dC}{da} \tag{3.13}$$

Bunun yanı sıra G değerleri ayrıca ortotropik malzemeler için aşağıdaki formüllerden de hesaplanabilir (Beaumont P. ve ark. 1990)

Mod I için G nin değeri aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$G_I = K_I^{\,2} \{((a_{22}\, a_{11})/2)^{1/2} [(a_{22}/a_{11})^{1/2} + ((a_{66} + 2a_{21})/2\, a_{22})]^{1/2}\} \qquad (3.14)$$

Burada $a_{11} = 1/E_1$.

$a_{22} = 1/E_2$.

$a_{21} = a_{12} = -\nu_{12} / E_1 = -\nu_{21} / E_2$.

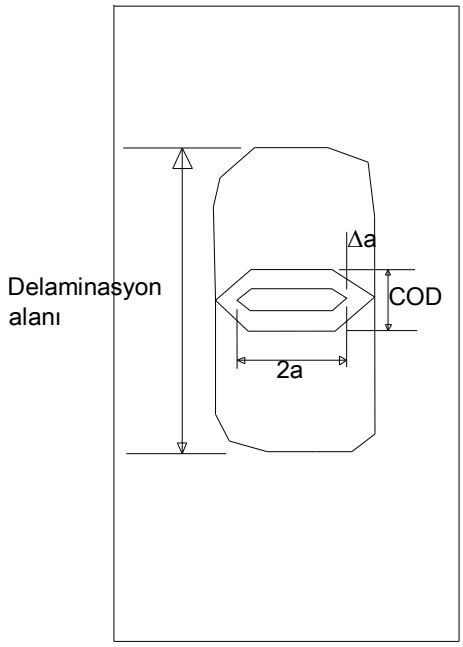
$a_{66} = 1/G_{12}$

Mod II için ise G nin değeri aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$G_{II} = K_{II}^{\,2} \{(a_{11}/\sqrt{2})[(a_{22}/a_{11})^{1/2} + ((a_{66} + 2\, a_{12})/a_{11}]^{1/2}\} \qquad (3.15)$$

Burada $E_1$ ve $E_2$: x ve y yönlerindeki elastiklik modülü, $\nu_{12}$ ve $\nu_{21}$: x ve y yönlerindeki poisson oranları, $G_{12}$: x yönündeki kayma modülüdür.

Çatlak geometrisinin kompleks olması ve çatlak ilerlemesinin çatlağın şeklini değiştirmesi sebebiyle K yaklaşımı ile problemin çözümü gerçekçi olmaz. Bundan dolayı kırılmayı karakterize edebilmek için G (Şekil Değiştirme Enerji Boşalma Oranı) terimi kullanılmıştır. Bu terim enerji yaklaşımı olduğu için toplam şekil değiştirme aşağıdaki bağıntıdan hesaplanabilir.




Şekil 3.5: Yarı Eliptik Yüzey Çatlağına Sahip Numunelerde Şekil Değiştirme Enerji Boşalma Miktarı Hesaplaması Yaklaşımı

Toplam G değerleri de aşağıdaki formülden hesaplanabilir.

$G = G_I + G_{II}$ $\quad G_I$ ihmal edilebilir. $G = G_{II}$ (3.16)

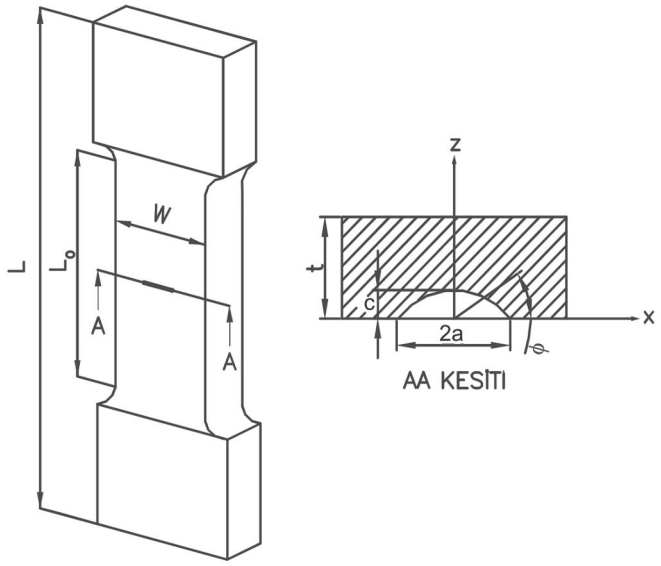
### 3.6. Deney Numunelerinin Hazırlanması

Eksenel çekme deneyinde el yatırma yöntemi ile üretilen cam/epoksi kompozit malzemeler kullanılmıştır. Bu çalışmada cam/epoksi kompozit malzemenin tek yüzünün düzgün olması yeterli olduğu için ve üretim miktarı çok fazla olmadığı için el yatırma yöntemi tercih edilmiştir.

Deney malzemesi olarak İZOREEL Kompozit İzole Malzemeler Sanayi ve Ticaret Limited Şirketinden temin edilen 3 mm kalınlığında, 8 tabakalı Cam / Epoksi levhalar kullanıldı. Bu çalışmada, cam/epoksi malzemenin tek yüzünün düzgün olması yeterli olduğundan ve üretim miktarı az olduğundan el yatırma yöntemi tercih edilmiştir. Tek yönde takviyeli kompozit malzemelerin üretimi için 17µm çapında Vetrotex E- glass fiber (Tex 1200) takviye elemanı olarak kullanıldı. Matris malzemesi olarak da Ciba Geigy Bisphenol- A epoksi CY225 reçine kullanıldı.

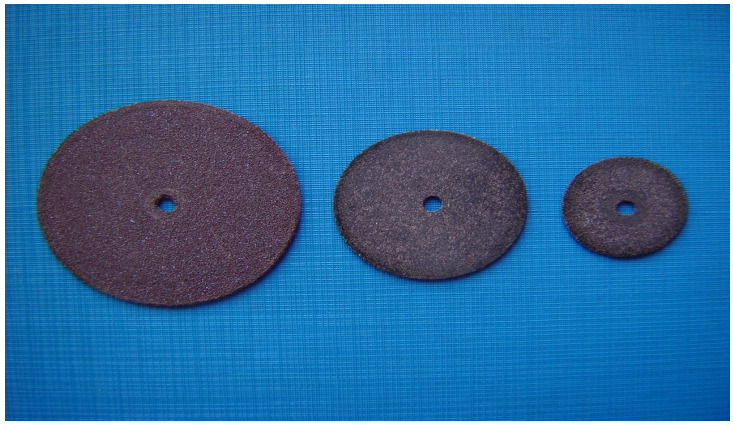
El yatırma yönteminde kalıplama 21$^{o}$C'de oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Uygun kalıplar ayarlanıp silinmiş, temizlenen yüzeye kalıp ayırıcı sürülmüştür. Kalıba uygun ve hadde yönü dikkate alınarak kırpılmış elyafın preslenmesinden oluşan malzemelerden 660 g/m$^{2}$' lik cam elyaflar kesilip hazırlanmıştır. Reçine içine sertleştirici Metil-Etil-Keton (MEK) ve hızlandırıcı (Kobalt-naftanat) uygun oranlarda katılarak jelkot hazırlanmıştır. Jelkot 100 g reçine+2 cc MEK peroksit+0.2 cc Co'dan hazırlanmıştır. Hazırlanan jelkot rulo fırça ile kalıp yüzeyine sürülmüştür. Sürülen yüzey üzerine cam elyaf yatırılıp cam elyafın yüzeyine de aynı şekilde jelkot sürülerek elyafa yedirilmiştir. İçindeki havayı almak için yatay dişli ruloyla elde edilen laminant rulolanmıştır. Bu işlem sekiz kat cam elyaf oluncaya kadar devam etmiş ve sekiz kat cam/epoksi yapı tamamlanınca diğer kalıp üst yüzeye yerleştirilip üzerine eşit aralıklarda ağırlıklar konulmuştur. İki gün sonra ağırlıklar alınarak kompozit malzeme kalıptan alınmış ve yüksek devirde mermer kesme cihazında ASTM E-740-80 (Standard Practice for Fracture Testing With Surface Crack Tension Specimens) standardına uygun boyutlarda numuneler kesilmiştir. Kesilen bu numuneler fırında 80$^{o}$C'de üç saat bekletilmiştir. .

Deney numuneleri Şekil 3.6'de gösterildiği üzere ASTM E 740 standartlarına uygun boyutlarda ($L_o$>2W, W>5(2c)) hazırlanmıştır.




Şekil 3.6: Deney numunesi

Çekme deney numunelerine Tablo 5.1'de verilen a/c ve a/t oranlarına sahip yüzey çatlakları Şekil 3.7'de gösterilen 1mm kalınlığındaki karbon dişçi separeleri ile mikro motor kullanılarak açılmıştır. Ve bu separelerin çapları istenilen yüzey çatlaklarının çapları oranında küçültülmüştür.



Şekil 3.7: Dişçi separeleri

Tablo 3.2: Değişik a/c ve a/t oranlarına sahip yüzey çatlaklarının, numunelerin boyutları

| Numune numarası | W | T | 2c | a | a/c | a/t |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 45 | 3 | 9 | 0,9 | 0,20 | 0,30 |
| 2 | 30 | 3 | 6 | 0,9 | 0,30 | 0,30 |
| 3 | 22,5 | 3 | 4,5 | 0,9 | 0,40 | 0,30 |
| 4 | 18 | 3 | 3,6 | 0,9 | 0,50 | 0,30 |
| 5 | 15 | 3 | 3 | 0,9 | 0,60 | 0,30 |
| 6 | 67,5 | 3 | 13,5 | 1,35 | 0,20 | 0,45 |
| 7 | 45 | 3 | 9 | 1,35 | 0,30 | 0,45 |
| 8 | 33,75 | 3 | 6,75 | 1,35 | 0,40 | 0,45 |
| 9 | 27 | 3 | 5,4 | 1,35 | 0,50 | 0,45 |
| 10 | 22,5 | 3 | 4,5 | 1,35 | 0,60 | 0,45 |
| 11 | 90 | 3 | 18 | 1,8 | 0,20 | 0,60 |
| 12 | 60 | 3 | 12 | 1,8 | 0,30 | 0,60 |
| 13 | 45 | 3 | 9 | 1,8 | 0,40 | 0,60 |
| 14 | 36 | 3 | 7,2 | 1,8 | 0,50 | 0,60 |
| 15 | 30 | 3 | 6 | 1,8 | 0,60 | 0,60 |
| 16 | 112,5 | 3 | 22,5 | 2,25 | 0,20 | 0,75 |
| 17 | 75 | 3 | 15 | 2,25 | 0,30 | 0,75 |
| 18 | 56,25 | 3 | 11,25 | 2,25 | 0,40 | 0,75 |
| 19 | 45 | 3 | 9 | 2,25 | 0,50 | 0,75 |
| 20 | 37,5 | 3 | 7,5 | 2,25 | 0,60 | 0,75 |

### 3.7. Çekme Deneyi

ASTM A-370 standartlarına uygun numunelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesi için çekme deneyi yapılmıştır. Bu deney için Tümosan-Alçelik Fabrikası Fizik Laboratuarında bulunan 40 tonluk Üniversal Çekme Deney Cihazı kullanılmıştır. Deneyler oda sıcaklığında ve 0,25 mm/dk ilerleme hızında yapılmıştır. Numuneler çekme işlemine tabi tutulurken Canon F820 marka 8.0 megapiksel dijital fotoğraf makinesi ile film çekimi yapıldı. Film çekimi esnasında yük değerleri ve uzama miktarları tespit edildi. Bilgisayar ortamına aktarılan resimlerde çatlak ağzı açılma miktarları ve çatlak ilerleme miktarları Autocad ortamında ölçümleri yapıldı. Bu deney sonucunda Elyaf doğrultusundaki çekme mukavemeti 1040 MPa, elyafa dik doğrultudaki çekme mukavemeti 201 MPa, Poisson oranı da $\nu_{12} = 0,32$ bulunmuştur. Bu deney sonucunda elde edilen değerler Tablo 3.3'de verilmiştir.

Tablo 3.3: Çekme deney sonuçları

| Mekanik özellikler | Elde edilen değerler |
|---|---|
| Elyaf Yönünde Çekme Mukavemeti (MPa) | 1040 |
| En Yönünde Çekme Mukavemeti (MPa) | 201 |
| Poisson Oranı | 0.32 |
| Elyaf Hacim Oranı | 0.80 |
| Takviye Malzemesi Elastisite Modülü (MPa) | 80 |
| Matris Malzemesi Elastisite Modülü (MPa) | 5,35 |
| Takviye Malzemesi Yoğunluk ($kg/m^3$) | 2560 |
| Matris Malzemesi Yoğunluk ($kg/m^3$) | 1250 |
| Takviye Malzemesi Poisson Oranı | 0,22 |
| Matris Malzemesi Poisson Oranı | 0,34 |
| Kompozitin Elyaf Yönünde Elastisite Modülü (MPa) | 77040 |
| Kompozitin Elyafa Dik Yönünde Elastisite Modülü (MPa) | 25125 |

### 3.8. Yakma Deneyi

Fiber takviyeli kompozitlerin fiber ve reçine oranlarının belirlenmesi için iki yöntem kullanılmaktadır. Bunlar kompozitin yoğunluğunun ölçülmesi ve yakma metodudur.

Polimer kompozitlerde gaz boşlukları %1'den daha az olduğu için malzeme boşluksuz kabul edilir ve aşağıdaki formül kullanılır.

$$V_f=(\rho_c/\rho_m)/(\rho_f/\rho_m) \quad (3.17)$$

Burada $\rho_c$ kompozitin, $\rho_m$ matrisin ve $\rho_f$ fiberin yoğunluğudur.

Diğer bir yöntem ise cam/epoksi kompozitin $600^oC$'de fırın içerisinde yakılarak reçinenin uzaklaştırılması olan yakmadır. Yakma deneyi ASTM- D2584 standardında yapılmıştır. Düşük sıcaklıklarda epoksi matrisin yakılması ile cam elyaf fiziksel olarak bir değişime uğramamaktadır. Yakma deneyinde numuneler hassas olarak tartıldıktan sonra fırın içerisinde yakılmaktadır. Yakma işlemi ile reçine tamamen yanarak kalan cam elyaf tartılmakta ve cam fiberin hacim oranının belirlenmesi için aşağıdaki formül kullanılmaktadır.

20x45 mm boyutlarında kompozit malzeme numunesi Selçuk Üni. Kimya Mühendisliği Bölümü Labaratuarında bulunan 0,01 mg hassasiyetinde terazide tartıldıktan sonra, 480 $^oC$ sıcaklıkta reçine tamamen buharlaşıncaya kadar yakıldı.

Yakma işlemi ile reçine tamamen yanarak kalan cam elyaf tartıldı ve cam fiberin hacim oranının belirlenmesi için aşağıdaki formül kullanıldı. Cam elyafın yoğunluğu ρ= 2,6 g/cm$^3$ ve kompozit malzemenin yoğunluğu da ρ= 1,2 g/cm$^3$ olduğu bilindiğinde, kompozit malzemenin elyaf hacimsel oranı aşağıdaki bağıntıdan bulundu. Tabakanın elyaf hacimsel oranı $v_e$ =%80 olarak belirlenmiştir.

$$V_f=(W_f/\rho_f)/(W_c/\rho_c) \quad (3.18)$$

Burada $W_f$ elyafın, $W_c$ kompozitin ağırlıklarıdır.

Kompozitin yoğunluğu havada ve suda tartma sonucu aşağıdaki formülden belirlenir.

$$\rho_c=W_{ch}/W_{ch}-W_{cs} \quad (3.19)$$

Burada $W_{ch}$ kompozitin havadaki, $W_{cs}$ ise sudaki ağırlığıdır.

### 3.9. Deney Setinin Hazırlanması

Deneyler sabit hızlı eksenel çekme yükü altında Şekil 3.8'de gösterilen çekme deney cihazında yapılmıştır. Bu deney cihazında çekme deney numuneleri sabit olan alt çene ile hareketli üst çene arasına bağlanarak değişken eksenel çekme yüküne maruz bırakılmıştır. Cam/epoksi kompozit malzemelere sabit şekil değiştirme hızında kuvvet uygulanmıştır. Deney için, cihazın gösterge panosundaki maksimum yük aralığı olan 0-400 kN luk skala kullanılmıştır.



Şekil 3.8: Çekme deney cihazı

### 3.10. Deneylerin Yapılışı

Cam / epoksi kompozit malzemeler el yatırma metodu ile üretilmiş ve ASTM E 740 standartlarına uygun bir şekilde hazırlanmıştır. Numunelerin nominal kalınlıkları 3 mm'dir. Yüzey çatlaklarının a/c oranı 0.20, 0.30, 0.40, 0.50, 0.60 ve a/t oranı 0.30, 0.45, 0.60, 0.75 olacak şekilde her numuneden ikişer adet deneye tabi tutulmuştur.

Schenck Trebel (UPM 400) marka üniversal çekme deney cihazında 0 ila 400 kN arasında sabit hızda ilerleyen yük uygulanmıştır. Bütün numuneler için hidrolik kontrollü cihazda sabit ilerleme hızı ayarlanmıştır.

Üzerinde yüzey çatlağı bulunmayan bir numuneyi çekme testine tabi tutmak suretiyle testlerin hangi skala aralığında yapılacağı tespit edilmiştir. Deney numunelerinin çekme deney cihazının alt ve üst çenelerinden çekme esnasında sıyrılmaması için alüminyum plakalardan tab-endler hazırlanmıştır. Tab-endler ve numunelerin yapışacak yüzeyleri selülozik tiner ile iyice temizlenmiştir. Daha sonra epoksi reçine ihtiva eden 404 epoxy adhesive plastik çelik yapıştırıcıları kullanılarak plakalar numunelerin uçlarına yapıştırılmıştır. Yapışmanın sağlıklı olabilmesi için numuneler oda sıcaklığında en az üç gün bekletilmiştir. Numuneler çekme cihazının alt ve üst çenelerine bağlandıktan sonra sabit hızda çekme yükü uygulanmıştır. Çekme esnasında çatlakların ilerlemesini tespit etmek için saniyede bir fotoğraf çekilmiştir. Deney süresinin tespit edilmesi için başlangıçtan kopma anına kadar kronometre ile süre ölçülmüştür. Yüke karşılık gelen çatlak ağzı açılma miktarı, çatlak ilerleme miktarı ile delaminasyon alanları bu fotoğrafların Autocad yazılımına aktarılması ve bu yazılım yardımıyla ölçülmesiyle belirlenmiştir. Delaminasyon alanı ve yükün bilinmesi ile Kompliyans (C) değerleri denklem 3.12 yardımıyla hesaplanmıştır. Kompliyans değerlerinin A ile değişimini gösteren grafikler çizilmiş ve eğri uydurma yöntemiyle C= f(A) formunda eşitlikler elde edilmiştir. Buradan elde edilen değerleri 3.13'deki eşitlikte yerine koyarak G değerleri hesaplanmıştır.

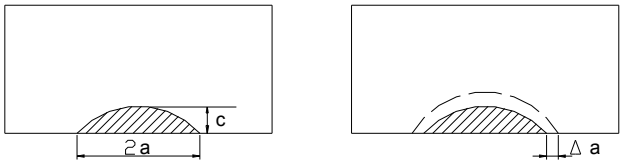
Çatlak ilerlemesi sırasında tabakaların birbirinden ayrılması (Delaminasyon) şeklinde bir hasar gelişimine neden olmaktadır. Bu durum çatlağın kayma modunda (Mod-II) ilerlediğini göstermektedir.

Yüzey çatlağındaki ilerleme numune kırılıncaya kadar devam etmiştir. Bu ölçümler çatlak derinlik parametrelerine (a/c) ve derinlik parametrelerine (a/t) bağlı olarak değişim göstermiştir. Çatlak uzunluğu ve derinliği az olan numunelerde deney uzun süre almış, buna karşın çatlak uzunluğu ve derinliği daha büyük olan numunelerde bu süre kısalmıştır.

# 4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

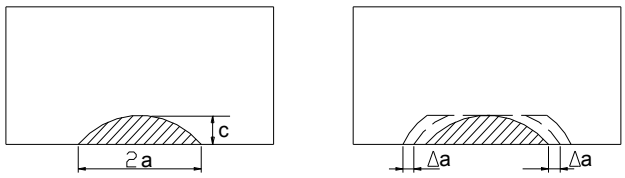
## 4.1. Çatlak İlerleme Mekanizması

Üzerinde yüzey çatlağı bulunan izotropik malzemelere eksenel çekme yorulma yükü uygulandığı zaman yüzey çatlağı başlangıçtaki şeklini koruyacak tarzda Şekil 4.1'de görüldüğü üzere ilerler.




Şekil 4.1: İzotropik malzemelerde yüzey çatlağının ilerlemesi

Tabakalı kompozit malzemelerde ise çatlak ilerlemesi izotropik kompozit malzemelerden farklıdır. Tabakalı kompozit malzemelerde çatlak ilerlemesi tabaka ayrılmasına sebep olur. Şekil 4.2'de gösterildiği gibi cam/epoksi kompozit malzemelerde yüzey çatlağı, başlangıç çatlağının kenarından yüzeye doğru ilerler ve yüzeye ulaştıktan sonra tabaka ayrılan kısma kadarlık bir derinlikte kenarlara doğru tabaka ayrılmasıyla çatlak ilerlemesi devam eder. Çatlak ilerlemesi çatlağın olmadığı arka tabakalarda meydana gelmez.

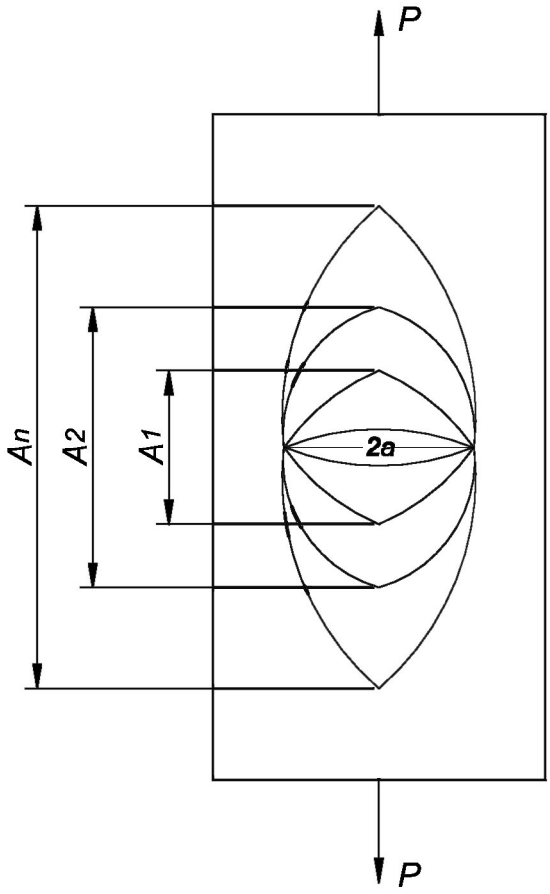



Şekil 4.2: Cam/epoksi kompozitlerde yüzey çatlağının yüzeydeki ilerlemesi

Yüzey çatlaklı cam/epoksi kompozit malzemelerin kırılma davranışlarının ve çatlak ilerleme davranışlarının belirlenmesi için çatlak ilerleme mekanizması ve kırılma tokluğu değerleri her bir numune için hesaplanmıştır.

Cam / epoksi kompozit malzemede hasar gelişimi elyaflar arası tabaka ayrılması (delaminasyon) olarak gözlendiği için yüzey çatlağının yüzeydeki ilerlemesi ihmal edilebilecek seviyededir.

Çatlaksız bir numunenin gerilme şekil değiştirme eğrisi Ek-3'de verilmiştir.




Şekil 4.3: Yüzey çatlağında hasar gelişimi

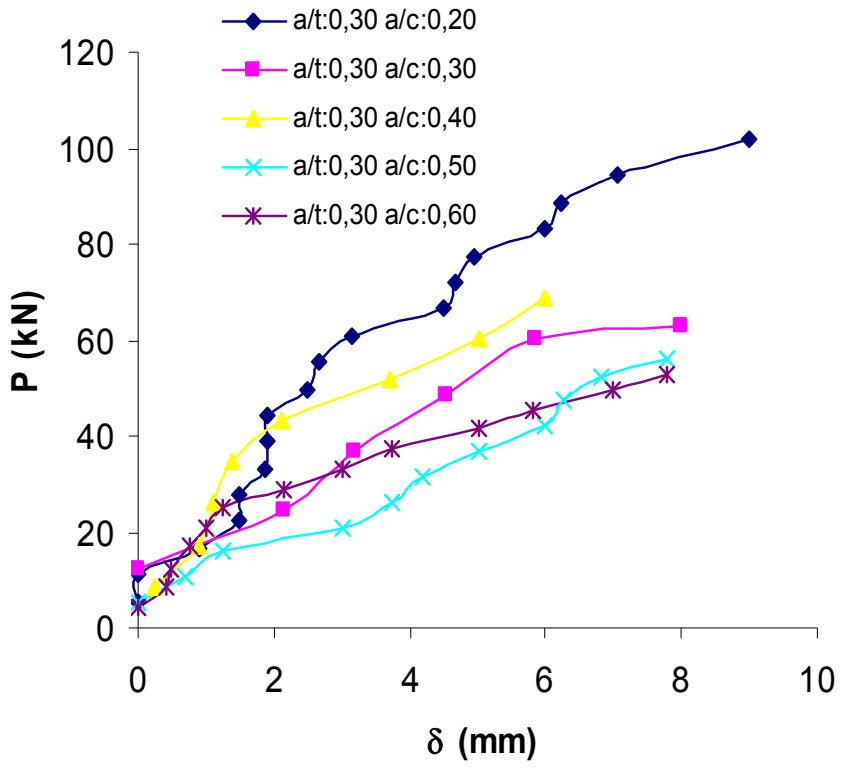
Çekme deneyi boyunca çatlak üzerindeki delaminasyon alanının tespiti için deney boyunca fotoğraflar çekilmiştir. Böylece uygulanan yüke karşılık gelen delaminasyon alanı bulunmuştur. Ayrıca yüke karşılık gelen uzama miktarı cihazın verdiği grafik üzerinden bulunmuştur.

Eliptik yüzey çatlağına sahip numunelerde çatlak ilerleme mekanizması Mod II yönünde meydana geldiğinden hesaplamalar bu yönde yapılmıştır. Şekil değiştirme enerji boşalma miktarının hesaplanması için kompliyans metodu kullanılmıştır. Her çatlak ölçüsü için C-A grafikleri çizilmiştir. Çizilen grafikler üzerinden ikinci üçüncü ve dördüncü dereceden denklemleri elde edilmiştir. Bundan sonra şekil değiştirme enerji boşalma miktarının (G) hesaplanması için eşitlik 3.13 kullanılmıştır. Elde edilen tüm değerler EK-1'de verilmiştir.

## 4.2. a/t: 0,30 Boyutlarındaki Numunelerde Kırılma Davranışları ve Hasar Analizi

### 4.2.1. a/t: 0,30 Boyutlarındaki numunelerde çatlaklı çekme deney sonuçları

a/c: 0,30 a/t:0.20, 0.30, 0.40, 0.50, 0.60 oranlarına sahip deney numunelerine ait yüke karşılık gelen birim uzama miktarları Şekil 4.4'de verilmiştir**.** δ değerlerinin uygulanan yükle hemen hemen lineer değiştiği görülmektedir. a/t: 0,30 a/c: 0,20 oranına sahip numune de 102000N yükte 9 mm, a/t: 0,30 a/c: 0,30 oranına sahip numune de 63000N yükte 8 mm, a/t: 0,30 a/c: 0,40 oranına sahip numune de 69000 N yükte 6 mm, a/t: 0,30 a/c: 0,50 oranına sahip numune de 56000 N yükte 7,5 mm ve a/t: 0,30 a/c: 0,60 oranına sahip numune de 53000 N yükte 7,8 mm uzama miktarları tespit edilmiştir. Kırılma değerlerinin genişlikle doğru orantılı olduğu gözlenmiştir.



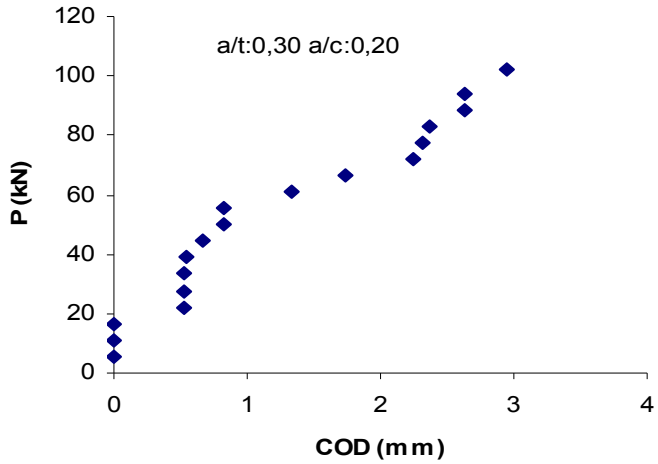

Şekil 4.4: a/t: 0,30 sabit a/c: 0.20, 0.30, 0.40, 0.50, 0.60 oranlarına sahip kompozit malzemelerin kuvvet uzama miktarları değişimi grafiği

Eliptik yüzey çatlağına sahip numuneler bir önceki bölümde anlatılan şartlarda çekme deneyine tabi tutulmuştur. Deneyler esnasında numunelerde uzama tespit edilmiştir. Bu uzama miktarları çekme deney cihazına bağlı grafik kaydedicide yüke karşılık gelen uzama miktarı olarak verilmektedir. Deney numunesinde çatlak ağzı açılma miktarı ve tabakalar arası ayrılmanın net olarak görülebilmesi için deney

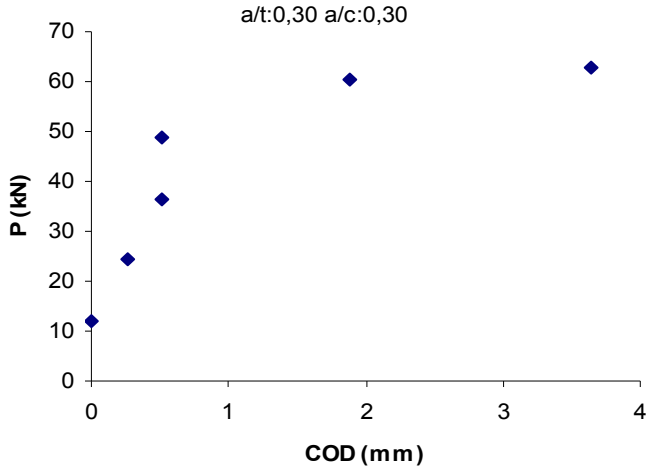
esnasında arka tarafından parlak ışık verilmiştir. Deney esnasında saniye de bir fotoğraf çekebilen fotoğraf makinası kullanılmıştır.

Numuneye uygulanan eksenel yüke karşılık, çatlak ağzı açılma miktarının (COD) grafikleri Şekil 4.5'de verilmiştir. Şekil 4.5.a'da a/t: 0,30 a/c: 0,20 oranına sahip numune, Şekil 4.5.b'de a/t:0,30 a/c: 0,30 oranına sahip numune, Şekil 4.5.c'de a/t: 0,30 a/c: 0,40 oranına sahip numune Şekil 4.5.d'de a/t: 0,30 a/c: 0,50 oranına sahip numune, Şekil 4.5.e'de a/t:0,30 a/c: 0,60 oranına sahip numune için P-COD grafikleri görülmektedir.

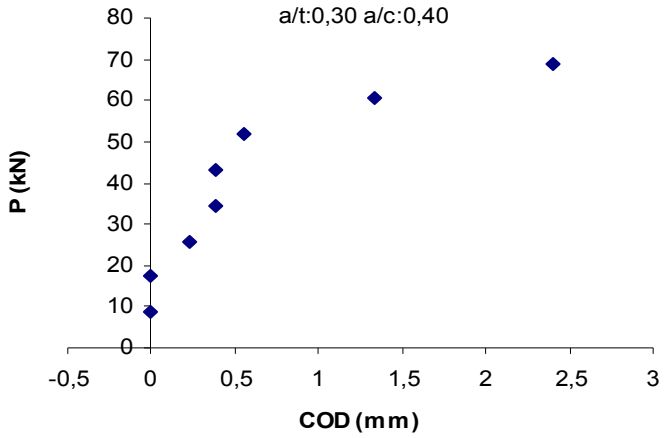
Numune de hasar öncelikle matris kırığı olarak kendini göstermektedir. Bir süre sonra elyaf/matris ara yüzeyinde ayrılma (debonding) formunda hasar gelişimi devam etmiştir. Bunu takiben çatlağın ulaştığı en derin noktada bulunan tabakalar arası bölgede delaminasyon oluşmuş ve deneyin sonuna kadar bu gelişim devam etmiştir. Bu durum test edilen bütün numunelerde ayni şekilde gözlemlenmiştir. a/t: 0,30 a/c:0,20 oranlı numune de yüke karşılık gelen çatlak ağzı açılma miktarı kararlı bir şekilde ilerlemiştir.102000 N yükte çatlak ağzı açılma miktarı 2,94 mm olarak gerçekleşmiştir. a/t: 0,30 a/c: 0,30 oranlı numune de çekme yüküne altında zayıflama olduktan sonra çatlak ağzı açılma miktarı bir anda artış göstermiştir. 63000 N yükte 3,645 mm COD değeri gösterdikten sonra kırılmıştır. a/t: 0,30 a/c: 0,40 oranlı numune lineere yakın bir artış göstermiştir. 69000 N yükte 2,4 mm COD değeri göstermiştir. a/t: 0,30 a/c: 0,50 oranlı numune 2a= 3,6 mm çatlak uzunluğuna sahip olduğu için ilk önce uzama göstermiştir. 56000 N yükte 0,98 mm COD değeri gösterdikten sonra kırılmıştır. a/t: 0,30 a/c: 0,60 oranlı numune 37260 N yüke kadar çatlaksız bir numune gibi davranış göstermiştir. Bu yüke kadar uzama miktarı 3,75 mm olmasına rağmen COD değeri değişmemiştir. 41400 N yükte 0,617 mm COD değeri veren numune 53000 N yükte 1,01 mm COD değeri verdikten sonra kırılmıştır.



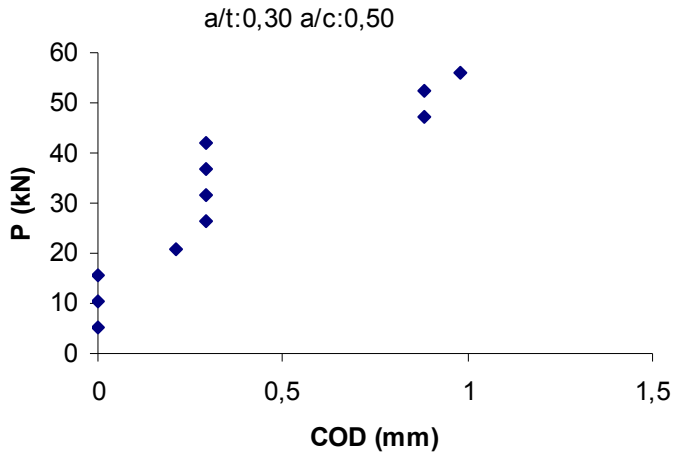

Şekil 4.5:.a. a/t: 0,30 a/c: 0.20 oranlarına sahip kompozit malzemenin kuvvet çatlak ağzı açılma miktarı değişimi grafiği



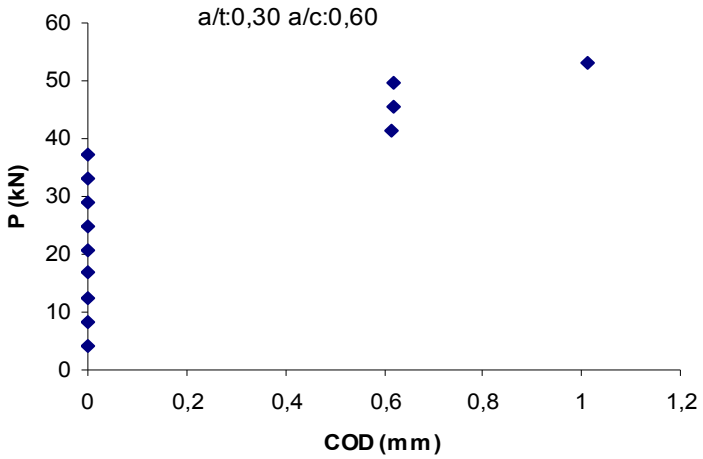

Şekil 4.5b: a/t: 0,30 a/c: 0.30 oranlarına sahip kompozit malzemenin kuvvet çatlak ağzı açılma miktarı değişimi grafiği




Şekil 4.5.c: a/t: 0,30 a/c: 0.40 oranlarına sahip kompozit malzemenin kuvvet çatlak ağzı açılma miktarı değişimi grafiği




Şekil 4.5.d: a/t: 0,30 a/c: 0.50 oranlarına sahip kompozit malzemenin kuvvet çatlak ağzı açılma miktarı değişimi grafiği

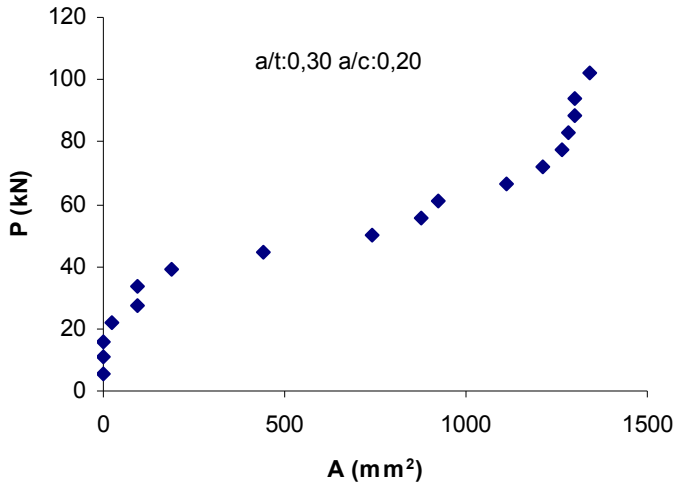



Şekil 4.5.e: a/t: 0,30 a/c: 0.60 oranlarına sahip kompozit malzemenin kuvvet çatlak ağzı açılma miktarı değişimi grafiği

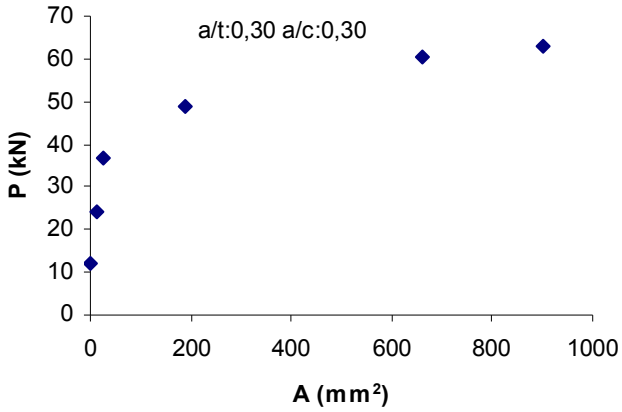
Numuneye uygulanan eksenel yüke karşılık delaminasyon alanı miktarlarının grafikleri Şekil 4.6'da verilmiştir. Numunede hasar basamaklar halinde meydana gelmiştir. Hasar başlangıcına kadar kuvvette artış gözlenmiştir. Hasar gelişimi, malzeme direncinde ani düşüşlere sebep olmuştur. Elyafların sıyrılması ve elyaf/matris ara yüzeyindeki sürtünmenin etkisiyle bu durum kendisini grafik üzerinde adımlar halinde göstermektedir.

a/t: 0,30 a/c: 0,20 oranlı numune, a/t: 0,30 a/t: 0,30 oranlı numune, a/t: 0,30 a/c: 0,40 oranlı numune ve a/t: 0,30 a/c: 0,50 oranlı numunede yüke karşılık delaminasyon miktarları kararlı bir şekilde ilerlemiş kopmaya kadar artış devam etmiştir. a/t: 0,30 a/c: 0,60 oranlı numune de 37260 N yüke kadar herhangi bir delaminasyon alanı değişimi görülmemiştir. a/t: 0,30 a/c: 0,20 oranlı numune 102000 N yükte 1340 $mm^2$ delaminasyon alanı, a/t: 0,30 a/c: 0,30 oranlı numune 63000 N yükte 900 $mm^2$

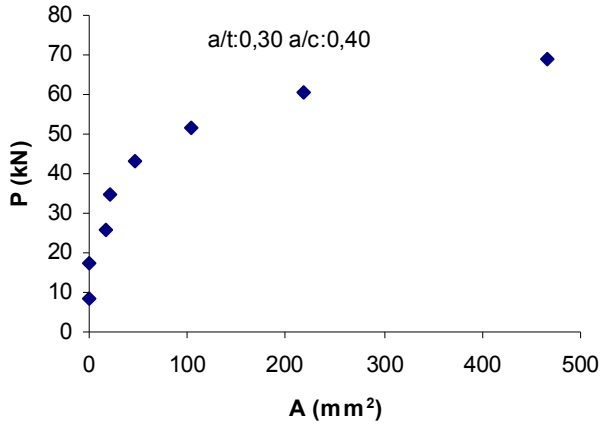
delaminasyon alanı, a/t: 0,30 a/c: 0,40 oranlı numune 69000 N yükte 467 $mm^2$ delaminasyon alanı, a/t: 0,30 a/c: 0,50 oranlı numune 56000 N yükte 173 $mm^2$ delaminasyon alanı, a/t: 0,30 a/c: 0,60 oranlı numune 53000 N yükte 189 $mm^2$ delaminasyon alanı göstermiştir.



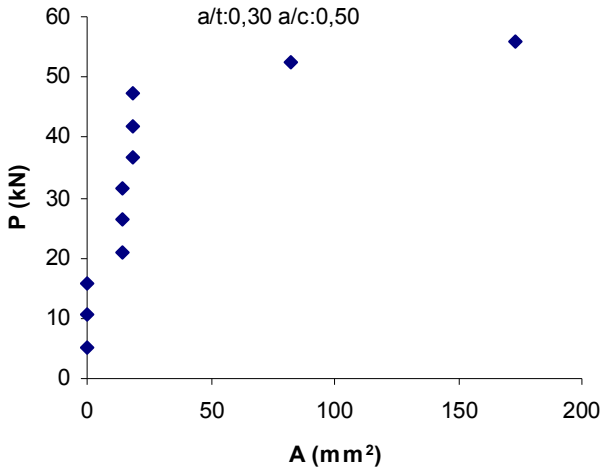

Şekil 4.6.a: a/t: 0,30 a/c: 0.20 oranlarına sahip kompozit malzemenin kuvvet delaminasyon alanı miktarı değişimi grafiği



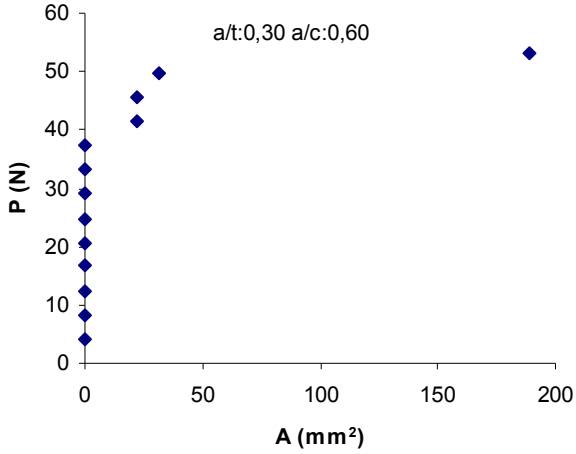

Şekil 4.6.b: a/t: 0,30 a/c: 0.30 oranlarına sahip kompozit malzemenin kuvvet delaminasyon alanı miktarı değişimi grafiği




Şekil 4.6.c: a/t: 0,30 a/c: 0.40 oranlarına sahip kompozit malzemenin kuvvet delaminasyon alanı miktarı değişimi grafiği

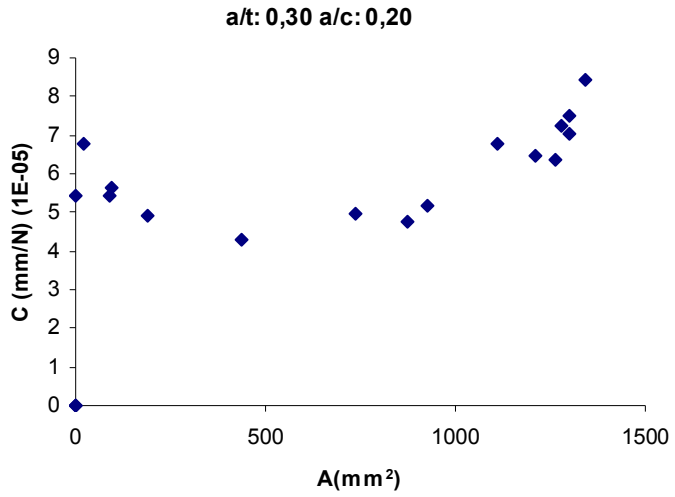



Şekil 4.6.d: a/t: 0,30 a/c: 0.50 oranlarına sahip kompozit malzemenin kuvvet delaminasyon alanı miktarı değişimi grafiği

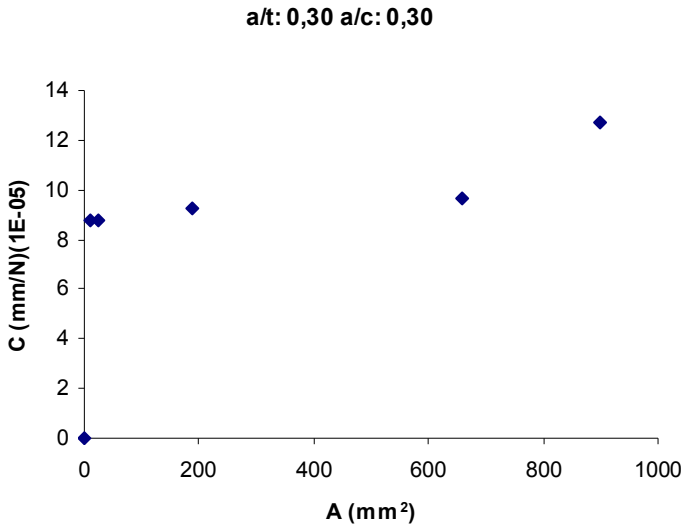



Şekil 4.6.e: a/t: 0,30 a/c: 0.60 oranlarına sahip kompozit malzemenin kuvvet delaminasyon alanı miktarı değişimi grafiği

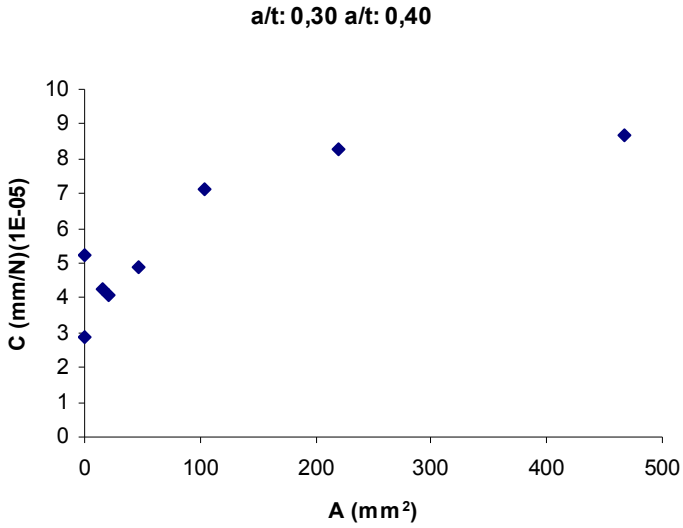
Şekil değiştirme enerji boşalma miktarının (G) hesaplanabilmesi için öncelikle kompliyans değerlerinin bulunması gerekir. Şekil 4.7'de değişimleri elde edilmiş ve eğri uydurma yöntemiyle değişim temsil edilmeye çalışılmıştır. Bunun için polinomlar elde edilmiş görülen C-A grafikleri çizilerek eğriler uydurulmuş, denklemleri elde edilmiştir.



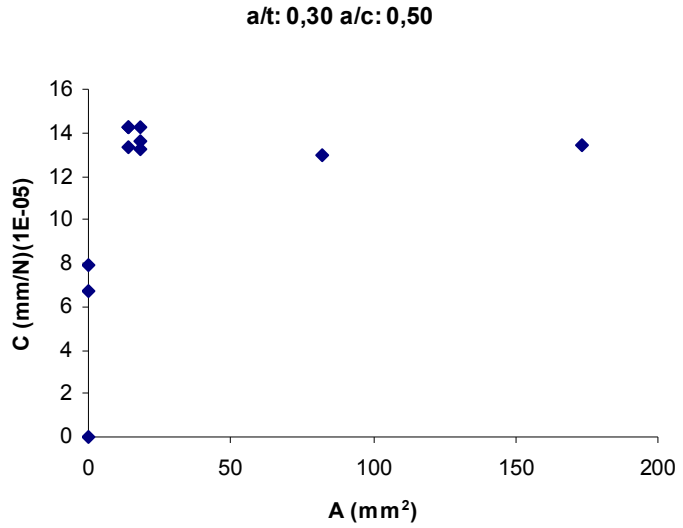

Şekil 4.7.a: a/t: 0,30 a/c: 0.20 oranlarına sahip kompozit malzemenin kompliyans delaminasyon alanı miktarı değişimi grafiği



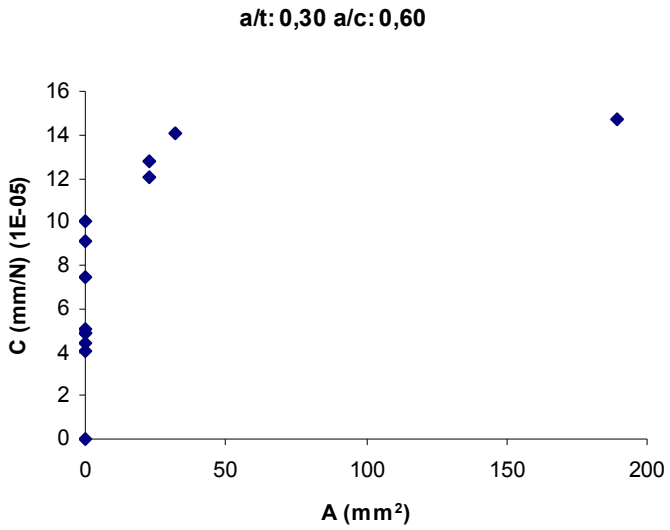

Şekil 4.7.b: a/t: 0,30 a/c: 0.30 oranlarına sahip kompozit malzemenin kompliyans delaminasyon alanı miktarı değişimi grafiği




Şekil 4.7.c: a/t: 0,30 a/c: 0.40 oranlarına sahip kompozit malzemenin kompliyans delaminasyon alanı miktarı değişimi grafiği

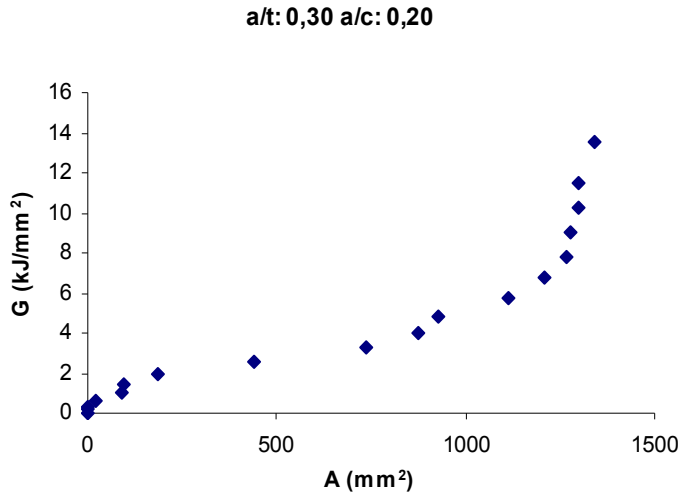



Şekil 4.7.d: a/t: 0,30 a/c: 0.50 oranlarına sahip kompozit malzemenin kompliyans delaminasyon alanı miktarı değişimi grafiği

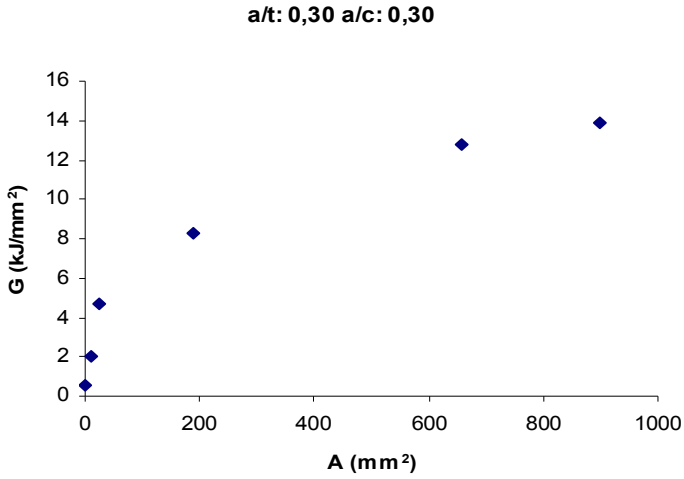



Şekil 4.7.e: a/t: 0,30 a/c: 0.60 oranlarına sahip kompozit malzemenin kompliyans delaminasyon alanı miktarı değişimi grafiği

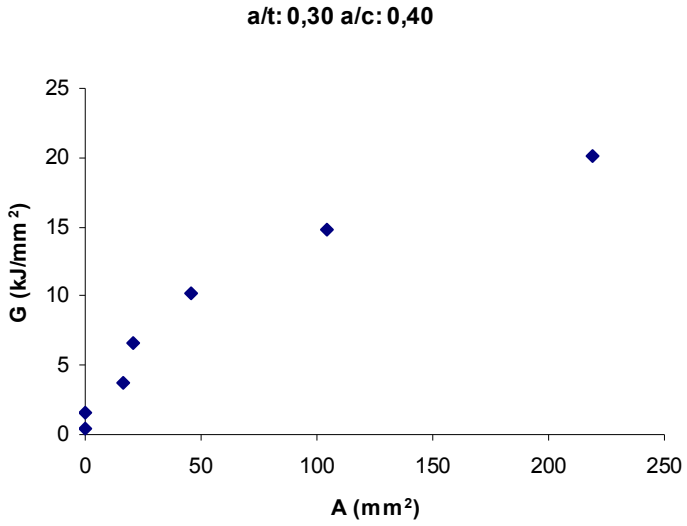
Kompliyans metodu ile hesaplanan G değerleriyle, delaminasyon alanı miktarları arasındaki ilişkiyi gösteren grafikler Şekil 4.8'de verilmiştir. a/t: 0,30 a/c: 0,20 oranlı numune de G değerlerinde lineer artış görülmüştür. Kırılma anında G değeri 0,039 kJ/mm$^2$ olarak hesaplanmıştır. a/t: 0,30 a/c: 0,30 oranlı numune de 1340 mm$^2$ delaminasyon alanına karşılık G değeri 13,891 kJ/mm$^2$ hesaplanmıştır. a/t: 0,30 a/c: 0,40 oranlı numune de delaminasyon alanı çok ilerlememesine karşılık G değerleri hızlı bir artış göstermiştir. 467 mm$^2$ delaminasyon alanı miktarında kırılma esnasında kırılma değeri 26,185 kJ/mm$^2$ olarak hesaplanmıştır. a/t: 0,30 a/c: 0,50 oranlı numune de G değerleri lineer olmayan bir doğrultu izlemiştir. 36750 N yükte 18 mm$^2$ delaminasyon alanı miktarına karşılık ölçülen 18,84 kJ/mm$^2$ değeri numunenin yük altında zayıflamasından sonra 56000 N yükte 173 mm$^2$ delaminasyon alanı miktarına karşılık G değeri 43,75 kJ/mm$^2$ olarak ölçülmüştür. a/t: 0,30 a/c: 0,60 oranlı numune de 189 mm$^2$ delaminasyon alanı miktarına karşılık G değeri 72,89 kJ/mm$^2$olarak ölçülmüştür.



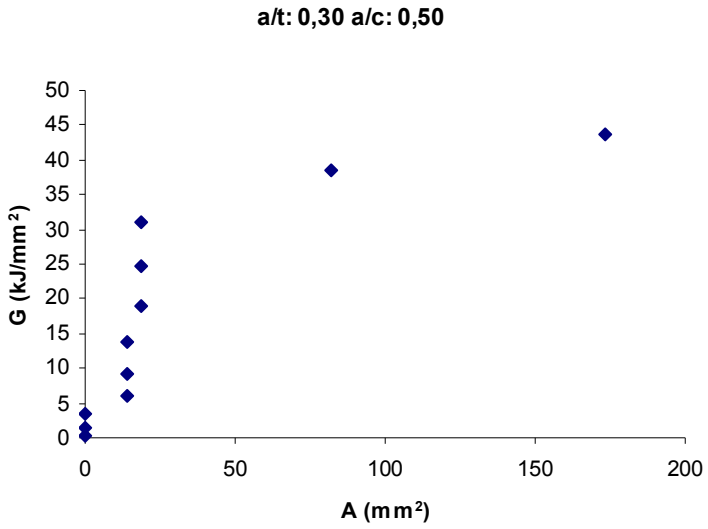

Şekil 4.8.a: a/t: 0,30 a/c: 0,20 oranlarına sahip kompozit malzemenin şekil değiştirme enerji boşalma miktarı delaminasyon alanı miktarı değişim grafiği



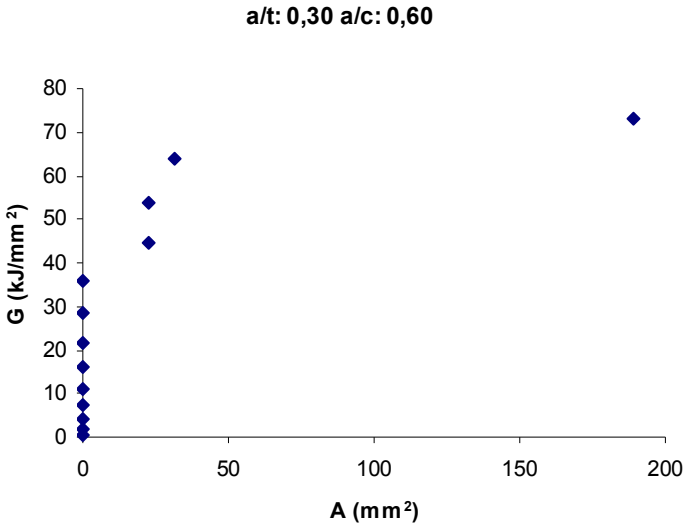

Şekil 4.8.b: a/t: 0,30 a/c: 0,30 oranlarına sahip kompozit malzemenin şekil değiştirme enerji boşalma miktarı delaminasyon alanı miktarı değişim grafiği




Şekil 4.8.c: a/t: 0,30 a/c: 0,40 oranlarına sahip kompozit malzemenin şekil değiştirme enerji boşalma miktarı delaminasyon alanı miktarı değişim grafiği




Şekil 4.8.d: a/t: 0,30 a/c: 0,50 oranlarına sahip kompozit malzemenin şekil değiştirme enerji boşalma miktarı delaminasyon alanı miktarı değişim grafiği



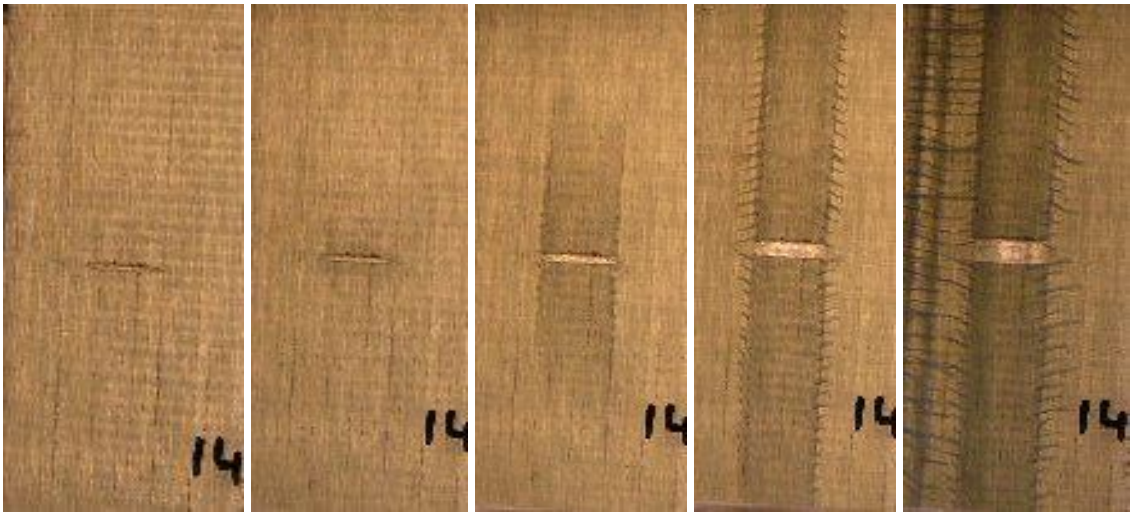

Şekil 4.8.e: a/t: 0,30 a/c: 0,60 oranlarına sahip kompozit malzemenin şekil değiştirme enerji boşalma miktarı delaminasyon alanı miktarı değişim grafiği

### 4.2.2. a/t: 0,30 Boyutlarındaki numunelerde hasar analizi

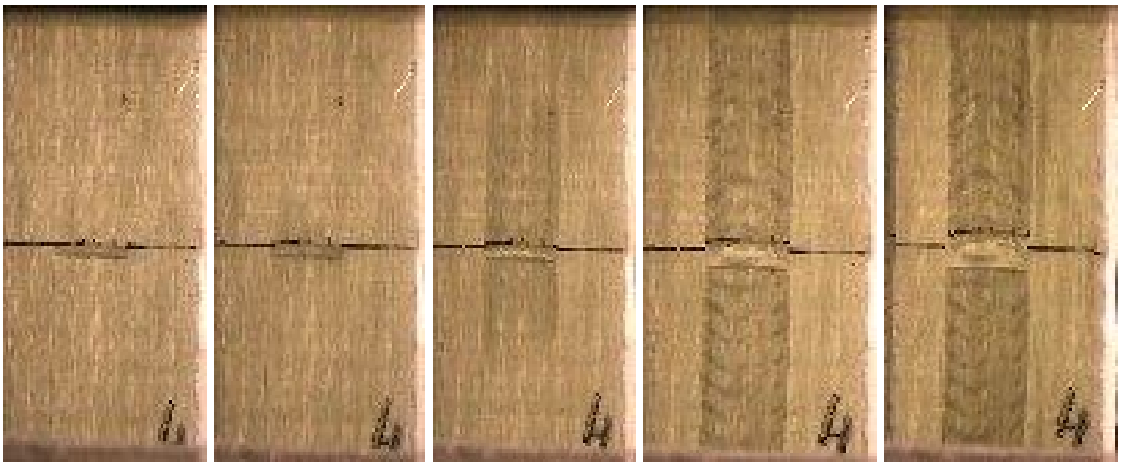
Eliptik yüzey çatlağına uygulanan yük dik olduğundan çatlak ilerlemesi ve hasar oluşmaya hızlı başlamıştır. İlerleyen yüklerde fiber matris ayrılması Şekil 4.9'da gösterilmiştir. Parlak olan kısımlar fiber matris ayrışmasından sonra kararmaya başlamıştır. Bu kararan bölge deformasyon alanıdır. Mod II'de oluşan hasar çatlak düzlemi boyunca ve kopuncaya kadar devam etmiştir. Herhangi bir yöne doğru çatlak ilerlemesi gözlenmemiştir. Ayrıca epoksinin malzeme üretimi sırasında cam elyafa iyi nüfus ettiği de görülmüştür.



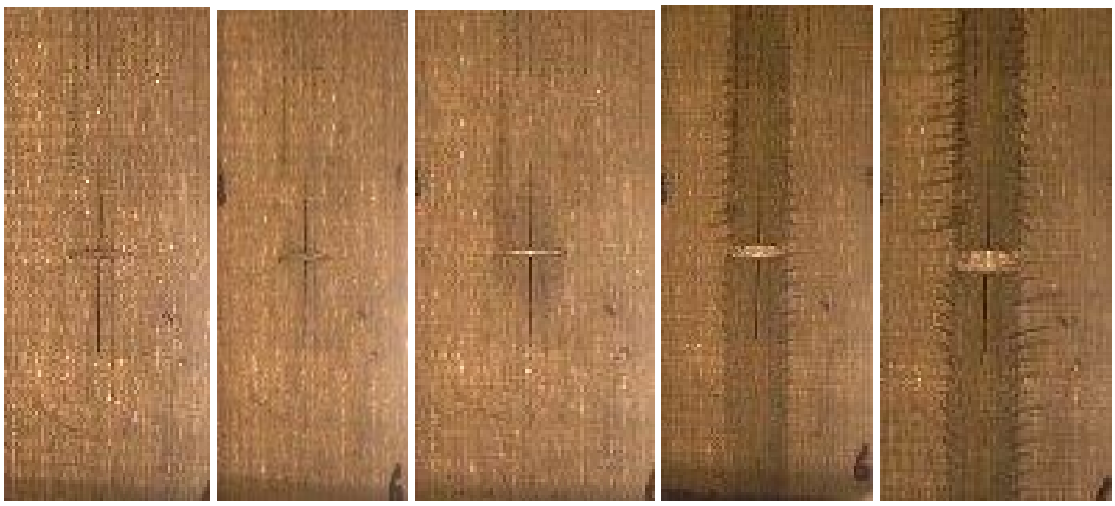
Şekil 4.9.a: a/t: 0,30 a/c: 0,20 oranına sahip kompozit malzemenin hasar mekanizması



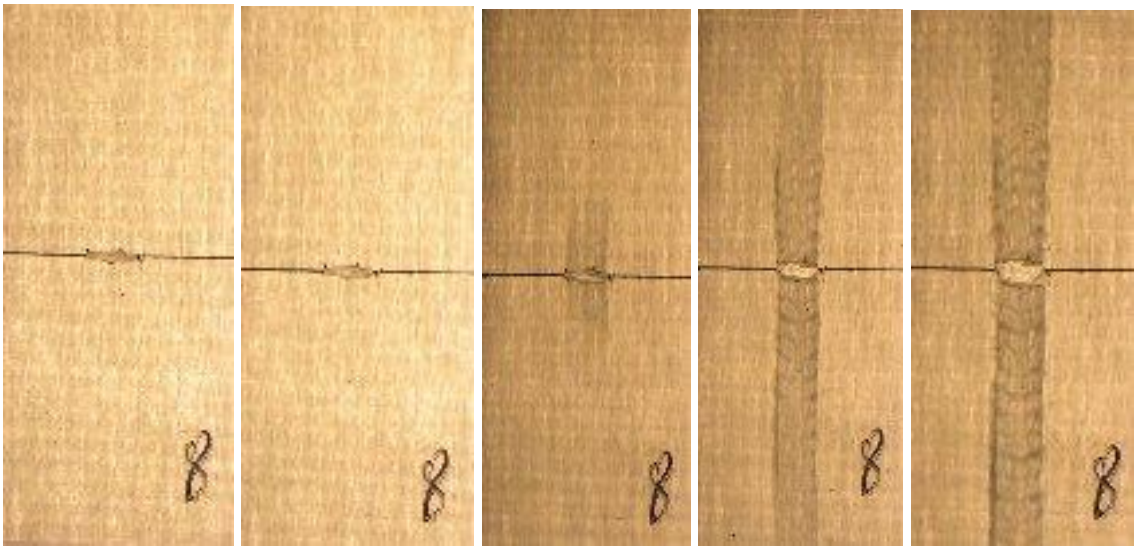
Şekil 4.9.b: a/t: 0,30 a/c: 0,30 oranına sahip kompozit malzemenin hasar mekanizması



Şekil 4.9.c: a/t: 0,30 a/c: 0,40 oranına sahip kompozit malzemenin hasar mekanizması



Şekil 4.9.d: a/t: 0,30 a/c: 0,50 oranına sahip kompozit malzemenin hasar mekanizması

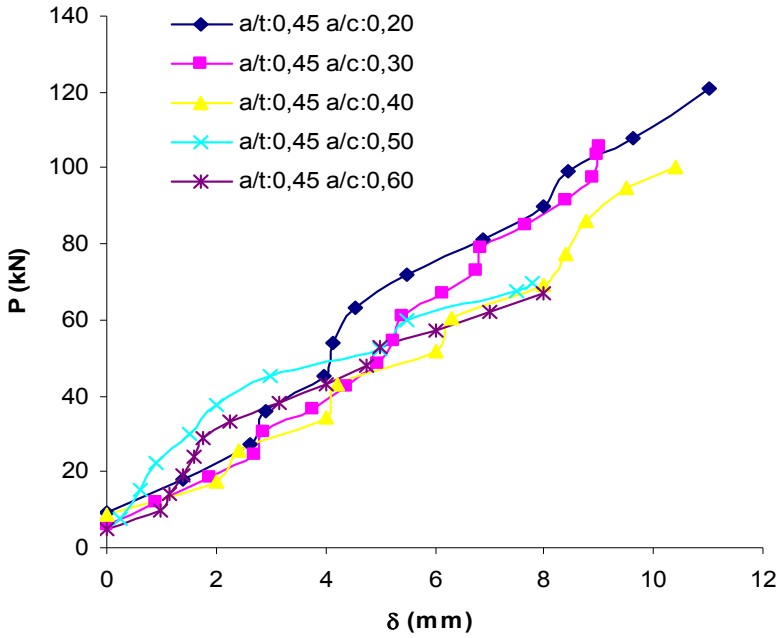


Şekil 4.9.e: a/t: 0,30 a/c: 0,60 oranına sahip kompozit malzemenin hasar mekanizması

### 4.3. a/t: 0,45 Boyutlarındaki Numunelerde Kırılma Davranışları ve Hasar Analizi

#### 4.3.1. a/t: 0,45 Boyutlarındaki numunelerde çatlaklı çekme deney sonuçları

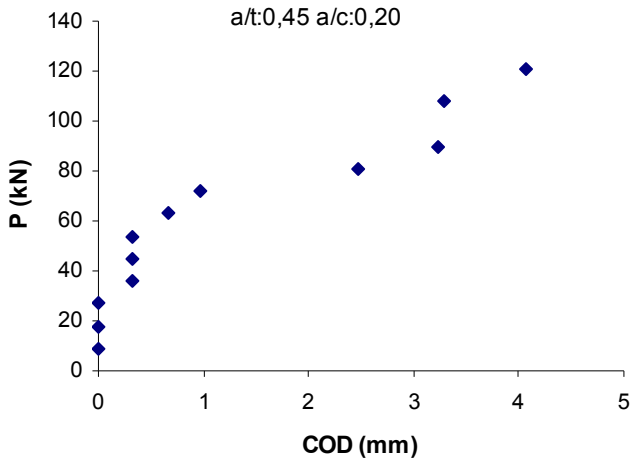
Numuneye uygulanan eksenel yüke karşılık, uzama miktarları grafiği Şekil 4.10'de verilmiştir. Beş numunede de çekme yüküne karşılık uzama miktarlarının lineer bir şekilde değiştiği gözlenmiştir. Kırılma gerilmelerini; a/c oranlarına göre çatlak genişliğinin doğrudan etkilediği tespit edilmiştir. a/t: 0,45 a/c: 0,20 oranlı numune de 121000 N yükte 11 mm uzama meydana gelmiştir. a/t: 0,45 a/c: 0,30 oranlı numune de 103470 N yükte 8,95 mm, a/t: 0,45 a/c: 0,40 oranlı numune de 100000 N yükte 10,4 mm, a/t: 0,45 a/c: 0,50 oranlı numune de 70000N yükte 7,8 mm ve a/t: 0,45 a/c: 0,60 oranlı numune de 67000 N yükte 8 mm uzama olduğu görülmüştür.



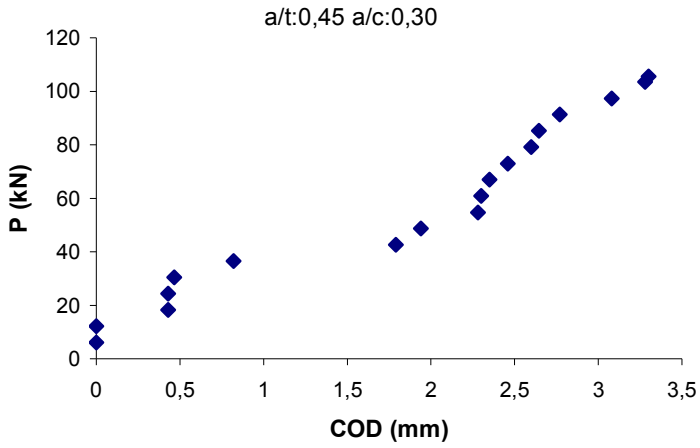

Şekil 4.10: a/t: 0,45 sabit a/c: 0.20, 0.30, 0.40, 0.50, 0.60 oranlarına sahip kompozit malzemelerin kuvvet uzama miktarları değişimi grafiği

Numuneye uygulanan eksenel yüke karşılık, çatlak ağzı açılma miktarının (COD) grafikleri Şekil 4.11'de verilmiştir. İlk etapta ciddi bir çatlak ağzı açılması gözlenmemesine rağmen, deneyin ilerleyen aşamalarında ölçülen COD değerleri büyümüş ve grafiklerde görüldüğü gibi yatay bir seyre ulaşmaktadır. Bu durum çatlak ilerlemesine karşı gösterilen direncin sabit hale geldiğini göstermektedir. Şekil 4.11.a'da a/t: 0,45 a/c: 0,20 oranlı numuneye ait P-COD grafiği verilmiştir. 72000 N yüke kadar kararlı bir COD değeri veren numune kırılma yükü olan 121000 N yükte 4,064 mm COD değeri vermiştir. Şekil 4.11.b'de a/t: 0,45 a/c: 0,30 oranlı numuneye ait P-COD grafiği verilmiştir. İlk yüklemeden itibaren lineer bir artış gösteren numune 103470 N yükte 3,28 mm COD değeri vermiştir. Şekil 4.11.c'de a/t: 0,45 a/c: 0,40 oranlı numuneye ait P-COD grafiği verilmiştir. 100000 N yükte 3,1 mm uzama göstermiştir. Şekil 4.11.d'de a/t: 0,45 a/c: 0,50 oranlı numuneye ait P-COD grafiği verilmiştir. 30000 N yüke kadar uzama gösteren numune çatlak ağzı açılması olmamıştır. Yükün artmasıyla birlikte elyaf matris ayrılması gözlenmiş ve numune hızlı bir şekilde kırılmıştır. 70000 N yükte 5 mm COD değeri vermiştir. Şekil 4.11.e'de a/t: 0,45 a/c: 0,60 oranlı numuneye ait P-COD grafiği verilmiştir. 23920 N yüke kadar uzama gösteren numune COD değeri vermemiştir. Bu yükten sonra kararlı bir şekilde zayıflayan numune 67000 N yükte 1,4 mm COD değeri vermiştir. a/c değerleri 0,50 ve

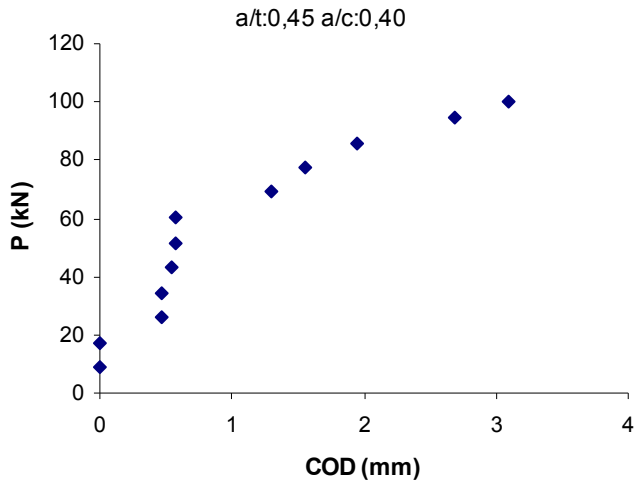
0,60 olan numunelerin genişlikleri düşük olduğu için ilk yüklemeden itibaren numuneler uzama göstermiştir. Elyaf matris ayrışması bu evreden sonra oluşmaya başlamıştır. Numuneler gevrek olarak kırılmıştır.



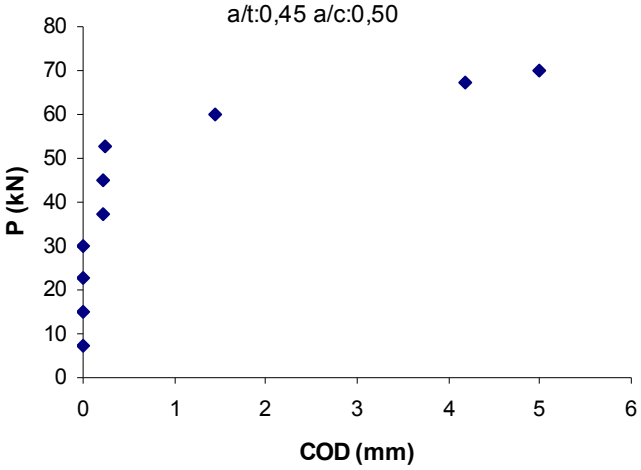

Şekil 4.11.a: a/t: 0,45 a/c: 0,20 oranlarına sahip kompozit malzemenin kuvvet çatlak ağzı açılma miktarı değişimi grafiği



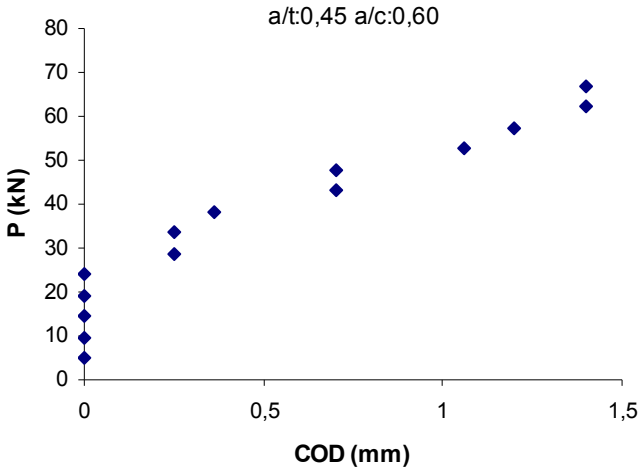

Şekil 4.11.b: a/t: 0,45 a/c: 0,30 oranlarına sahip kompozit malzemenin kuvvet çatlak ağzı açılma miktarı değişimi grafiği




Şekil 4.11.c: a/t: 0,45 a/c: 0,40 oranlarına sahip kompozit malzemenin kuvvet çatlak ağzı açılma miktarı değişimi grafiği

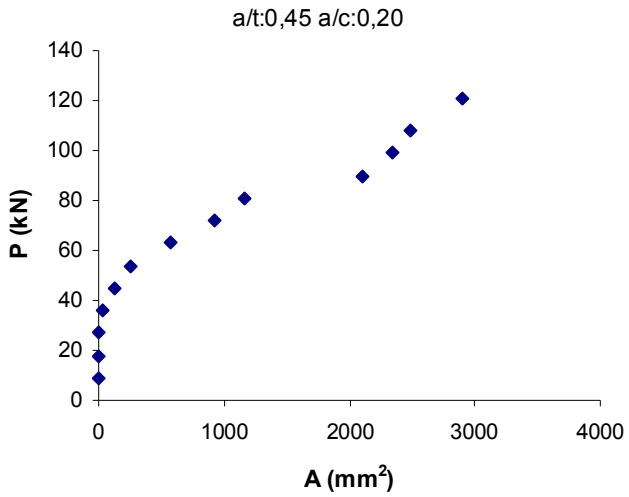



Şekil 4.11.d: a/t: 0,45 a/c: 0,50 oranlarına sahip kompozit malzemenin kuvvet çatlak ağzı açılma miktarı değişimi grafiği

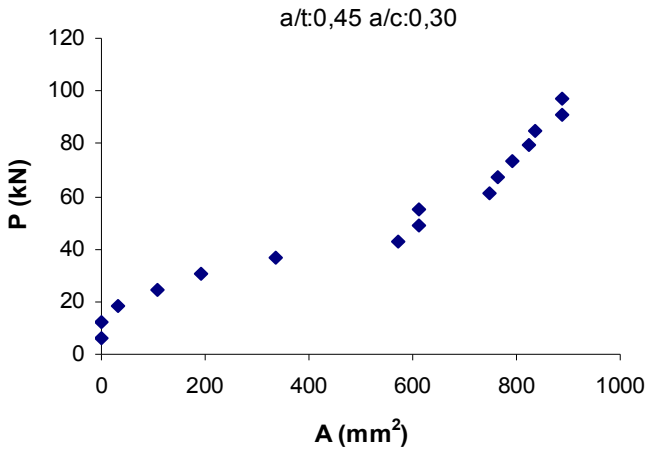



Şekil 4.11.e: a/t: 0,45 a/c: 0,60 oranlarına sahip kompozit malzemenin kuvvet çatlak ağzı açılma miktarı değişimi grafiği

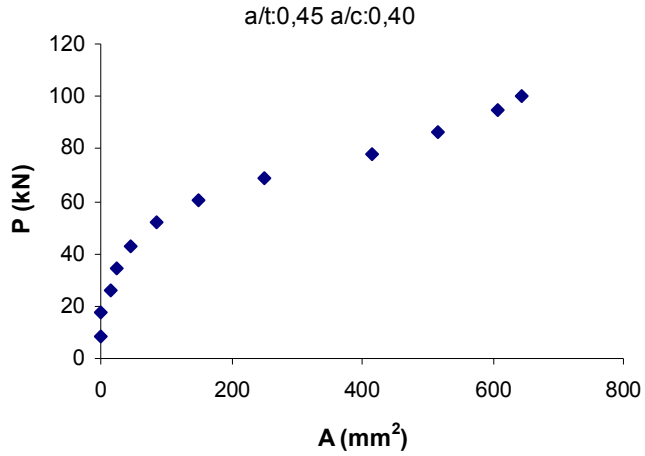
Numuneye uygulanan eksenel yüke karşılık, çatlak ilerleme miktarının değişimi grafikleri Şekil 4.12'de verilmiştir. Beş grafikte de yükleme başladıktan sonra delaminasyon alanı olmamış numune bir süre eksenel yönde uzamıştır. Belli bir yükten sonra delaminasyon alanı veren numuneler ilerleyen yüklerde hızlı bir tabaka ayrılması göstermiştir. Şekilde görüldüğü gibi tabakalar arası ayrılma da belirli aralarla dirençte ani boşalmalar gözlenmiştir. Bu durumun elyaf/matris ara yüzeyinde gerçekleşen sıyrılmalardan kaynaklandığı düşünülmektedir. Sürtünme etkisiyle bu hareket zaman içerisinde birkaç defa başlamakta ve durmaktadır. a/t: 0,45 a/c. 0,20 oranlı numune 121000 N yükte 2903 $mm^2$ delaminasyon alanı miktarı göstermiştir. a/t: 0,45 a/c: 0,30 oranlı numune 103470 N yükte 890 $mm^2$ delaminasyon alanı miktarı, a/t: 0,45 a/c: 0,40 oranlı numune 100000 N yükte 645 $mm^2$ delaminasyon alan miktarı, a/t: 0,45 a/c: 0,50 oranlı numune 70000 N yükte 1161 $mm^2$ delaminasyon alanı miktarı, a/t: 0,45 a/c: 0,60 oranlı numune 67000 N yükte 202 $mm^2$ delaminasyon alanı miktarı göstermiştir.



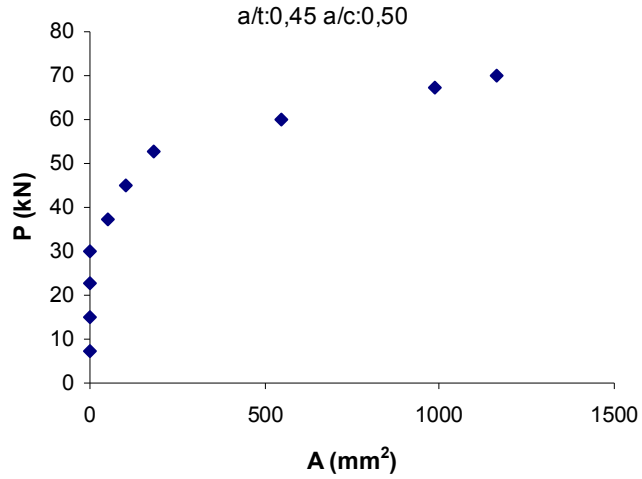

Şekil 4.12.a: a/t: 0,45 a/c: 0,20 oranlarına sahip kompozit malzemenin kuvvet delaminsayon alanı miktarı değişimi grafiği



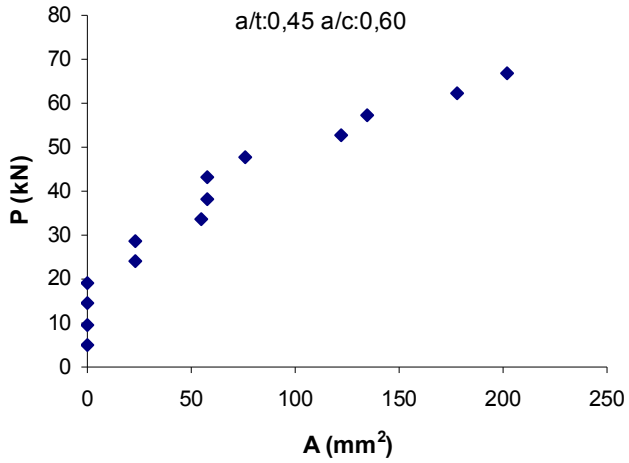

Şekil 4.12.b: a/t: 0,45 a/c: 0,30 oranlarına sahip kompozit malzemenin kuvvet delaminsayon alanı miktarı değişimi grafiği




Şekil 4.12.c: a/t: 0,45 a/c: 0,40 oranlarına sahip kompozit malzemenin kuvvet delaminsayon alanı miktarı değişimi grafiği

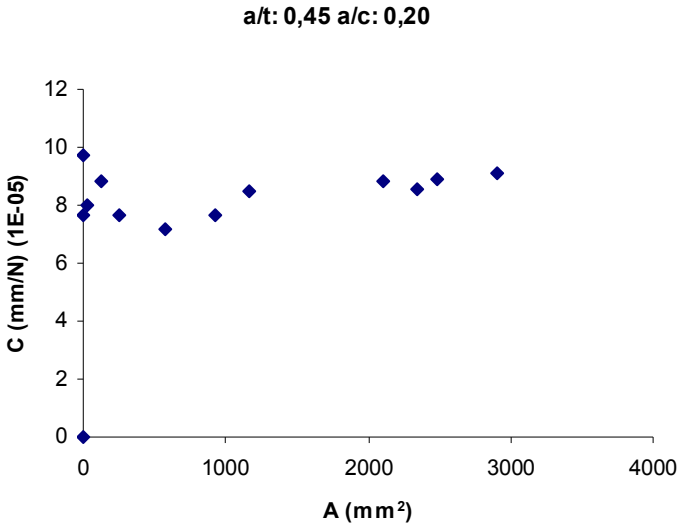



Şekil 4.12.d: a/t: 0,45 a/c: 0,50 oranlarına sahip kompozit malzemenin kuvvet delaminsayon alanı miktarı değişimi grafiği

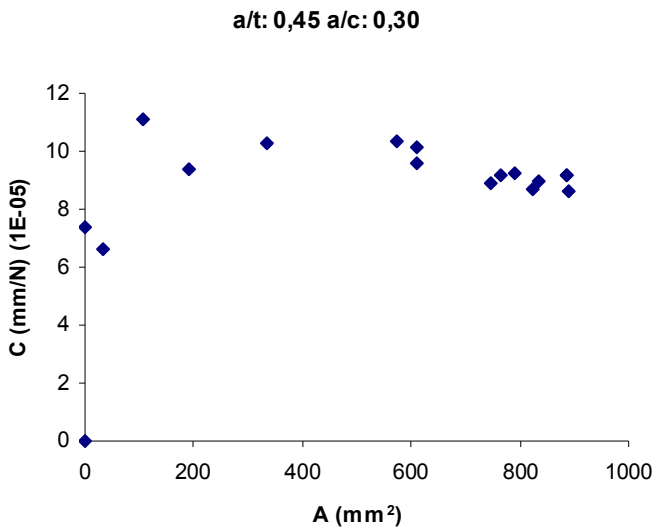



Şekil 4.12.e: a/t: 0,45 a/c: 0,60 oranlarına sahip kompozit malzemenin kuvvet delaminsayon alanı miktarı değişimi grafiği

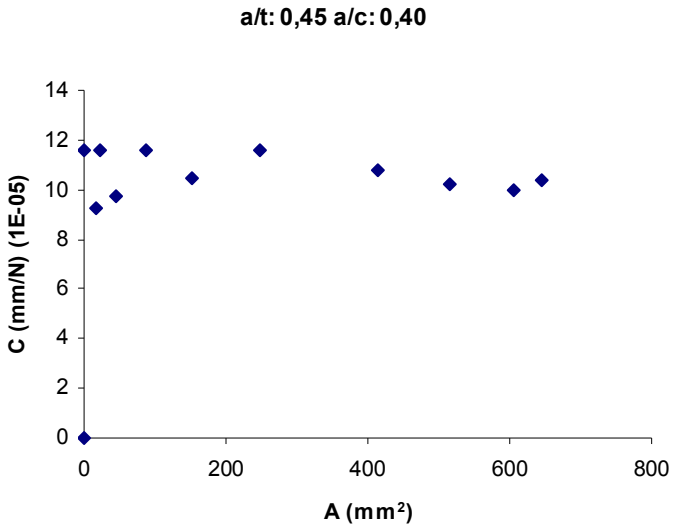
Şekil değiştirme enerji boşalma miktarının (G) hesaplanabilmesi için öncelikle Şekil 4.13'de görülen C-A grafikleri çizilerek polinom denklemleri elde edilmiştir.



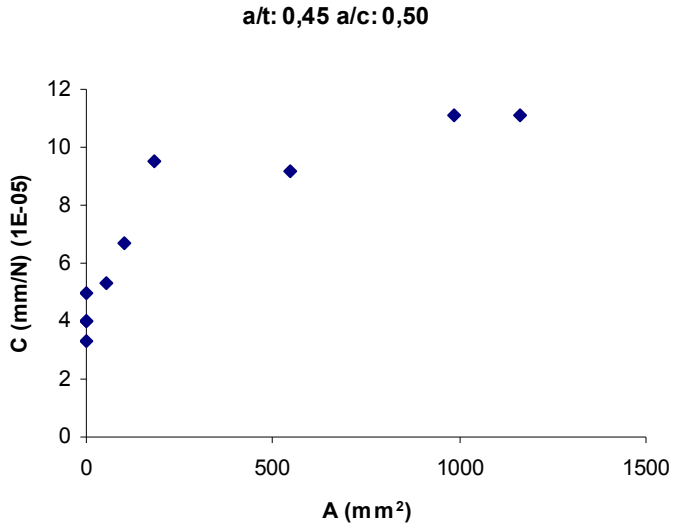

Şekil 4.13.a: a/t: 0,45 a/c: 0.20 oranlarına sahip kompozit malzemenin kompliyans delaminasyon alanı miktarı değişimi grafiği



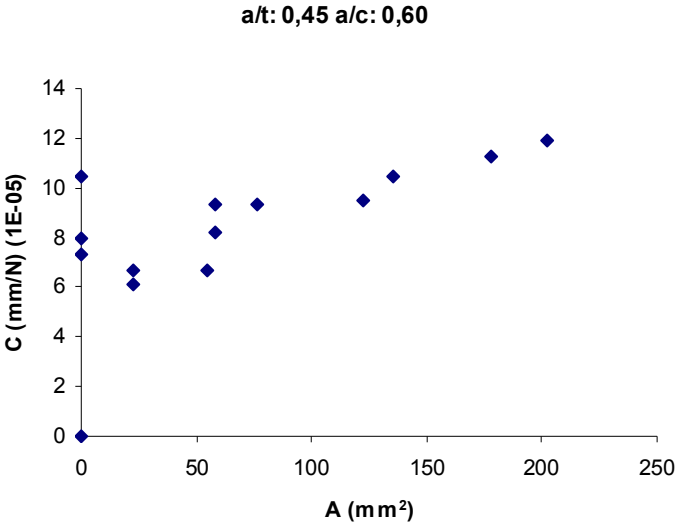

Şekil 4.13.b: a/t: 0,45 a/c: 0.30 oranlarına sahip kompozit malzemenin kompliyans delaminasyon alanı miktarı değişimi grafiği




Şekil 4.13.c: a/t: 0,45 a/c: 0.40 oranlarına sahip kompozit malzemenin kompliyans delaminasyon alanı miktarı değişimi grafiği



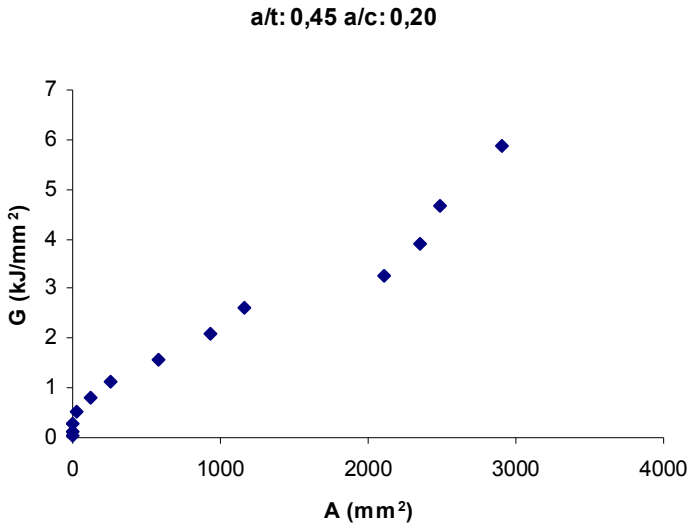

Şekil 4.13.d: a/t: 0,45 a/c: 0.50 oranlarına sahip kompozit malzemenin kompliyans delaminasyon alanı miktarı değişimi grafiği



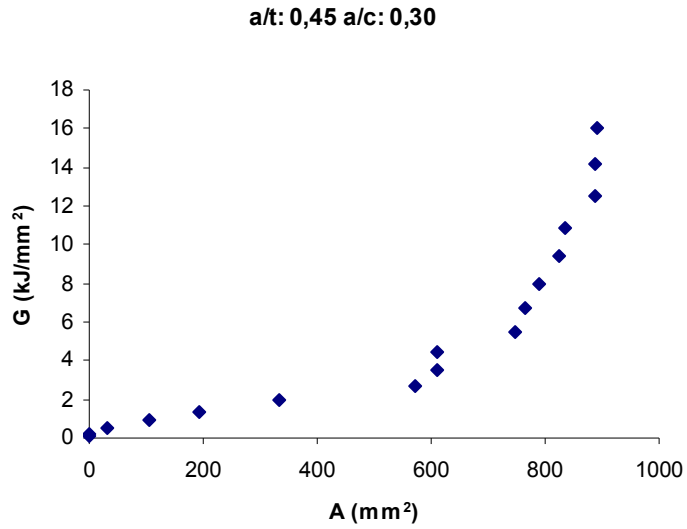

Şekil 4.13.e: a/t: 0,45 a/c: 0.60 oranlarına sahip kompozit malzemenin kompliyans delaminasyon alanı miktarı değişimi grafiği

Kompliyans metodu ile hesaplanan G değerleriyle, delaminasyon alanı miktarları arasındaki ilişkiyi gösteren grafikler Şekil 4.14'da verilmiştir. Şekil 4.14.a'da a/t: 0,45 a/c: 0,20 oranlı numuneye ait G-A grafiği verilmiştir. Grafikten de anlaşılacağı üzere şekil değiştirme enerji boşalma miktarı lineer olarak artış göstermiştir. Şekil 4.14.b'de a/t: 0,45 a/c: 0,30 oranlı numuneye ait G-A grafiği verilmiştir. 79120 N yüke kadar kararlı bir artış gösteren numune 9,39 kJ/mm$^2$ G değeri vermiş sonra 103470 N yükte 16,06 kJ/mm$^2$ G değeri vererek kırılmıştır. Şekil 4.14.c'de a/t: 0,45 a/c: 0,40

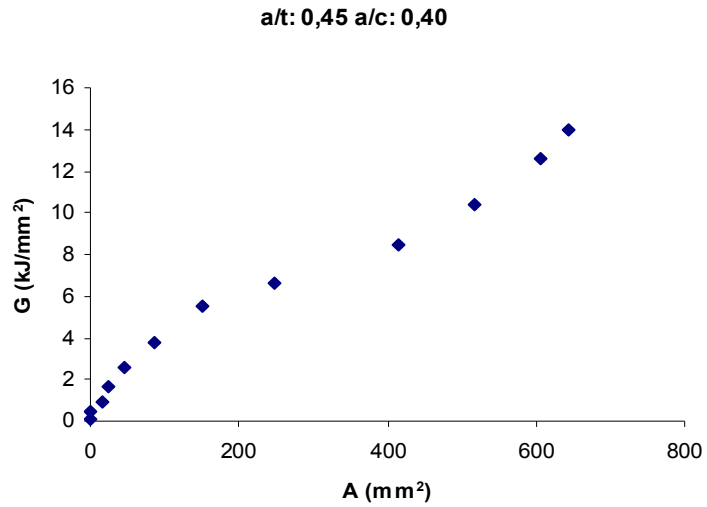
oranlı numuneye ait G-A grafiği verilmiştir. Lineer bir artış sergileyen numune 100000 N yükte 14 kJ/mm$^2$ G değeri vermiştir. Şekil 4.14.d'de a/t: 0,45 a/c: 0,50 oranlı numuneye ait G-A grafiği verilmiştir. 70000 N yükte 14,945 kJ/mm$^2$ G değeri vermiştir. Şekil 4.14.e'de a/t:0,45 a/c: 0,60 oranlı numuneye ait G-A grafiği verilmiştir. 63,743 kJ/mm$^2$ G değeri vermiştir.



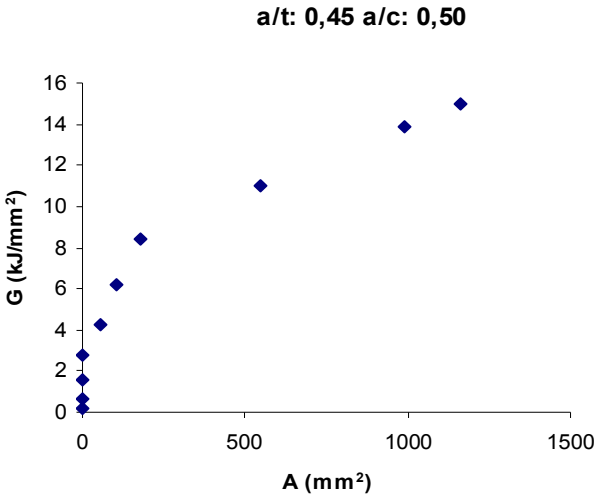

Şekil 4.14.a: a/t: 0,45 a/c: 0,20 oranlarına sahip kompozit malzemenin şekil değiştirme enerji boşalma miktarı delaminasyon alanı miktarı değişim grafiği



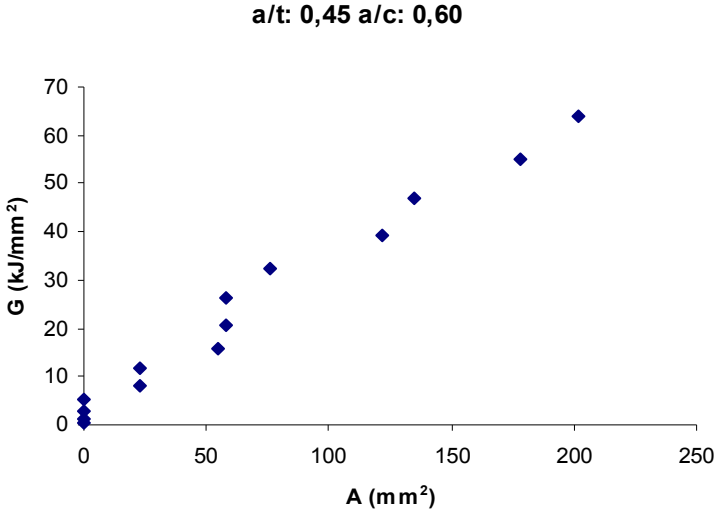

Şekil 4.14.b: a/t: 0,45 a/c: 0,30 oranlarına sahip kompozit malzemenin şekil değiştirme enerji boşalma miktarı delaminasyon alanı miktarı değişim grafiği




Şekil 4.14.c: a/t: 0,45 a/c: 0,40 oranlarına sahip kompozit malzemenin şekil değiştirme enerji boşalma miktarı delaminasyon alanı miktarı değişim grafiği




Şekil 4.14.d: a/t: 0,45 a/c: 0,50 oranlarına sahip kompozit malzemenin şekil değiştirme enerji boşalma miktarı delaminasyon alanı miktarı değişim grafiği



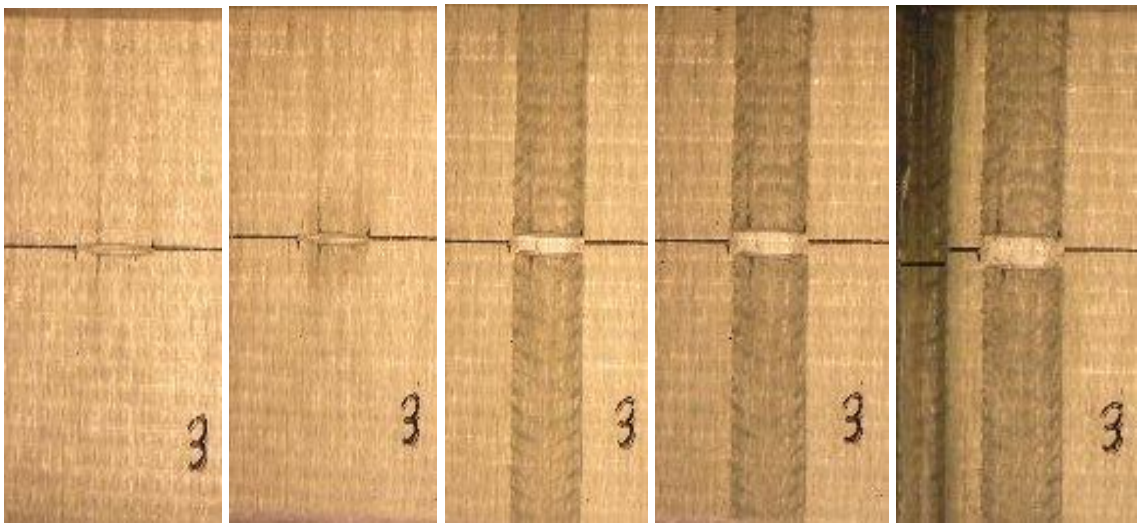

Şekil 4.14.e: a/t: 0,45 a/c: 0,60 oranlarına sahip kompozit malzemenin şekil değiştirme enerji boşalma miktarı delaminasyon alanı miktarı değişim grafiği

### 4.3.2. a/t: 0,45 Boyutlarındaki numunelerde hasar analizi

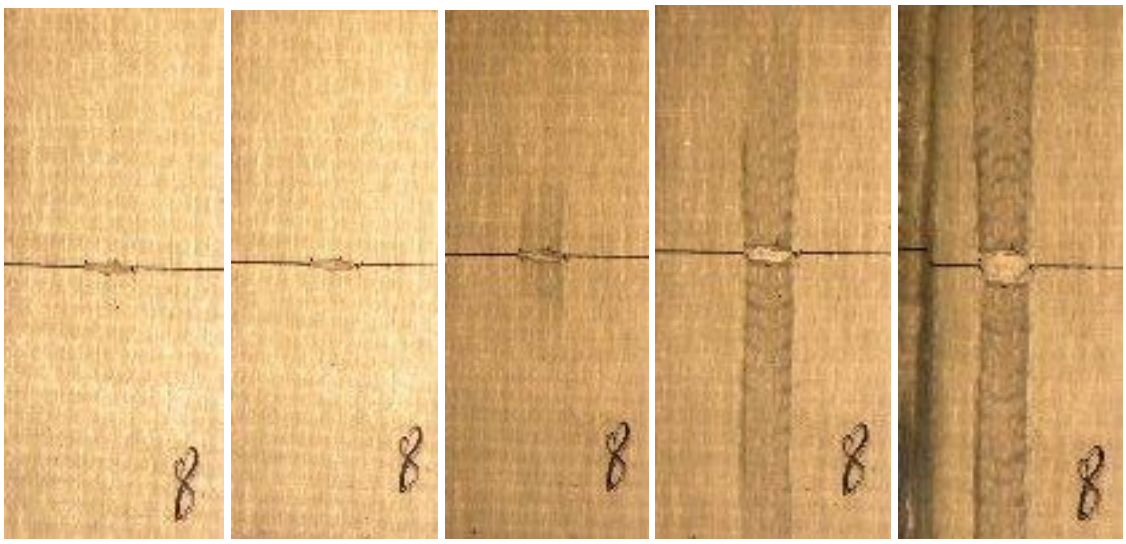
Eliptik yüzey çatlağına uygulanan yük dik olduğundan çatlak ilerlemesi ve hasar oluşmaya hızlı başlamıştır. İlerleyen yüklerde fiber matris ayrılması Şekil 4.15'de gösterilmiştir. Parlak olan kısımlar fiber matris ayrışmasından sonra kararmaya başlamıştır. Bu kararan bölge deformasyon alanıdır. Mod II'de oluşan hasar çatlak düzlemi boyunca ve kopuncaya kadar devam etmiştir. Herhangi bir yöne doğru çatlak ilerlemesi gözlenmemiştir. Ayrıca epoksinin malzeme üretimi sırasında cam elyafa iyi nüfus ettiği de görülmüştür.



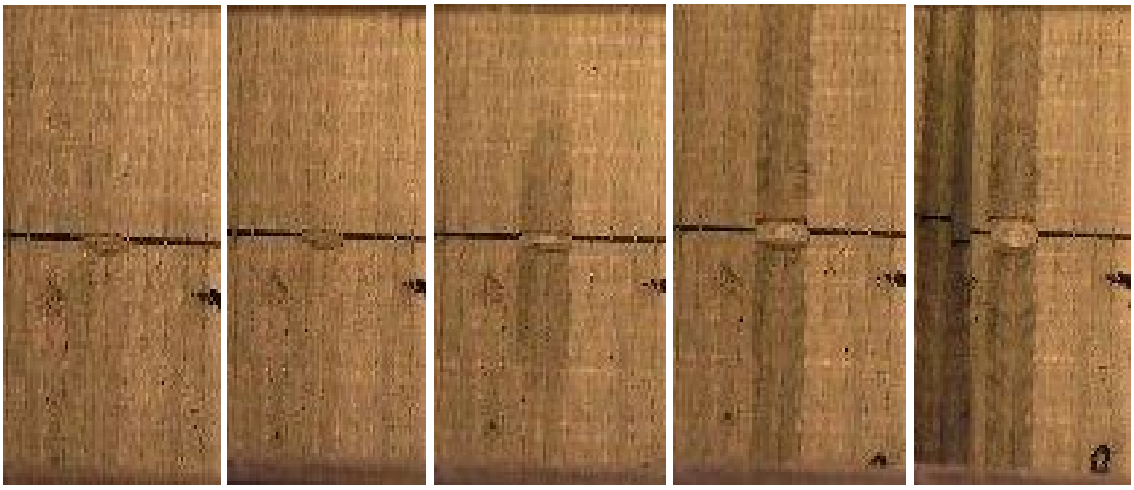
Şekil 4.15.a: a/t: 0,45 a/c: 0,20 oranına sahip kompozit malzemenin hasar mekanizması



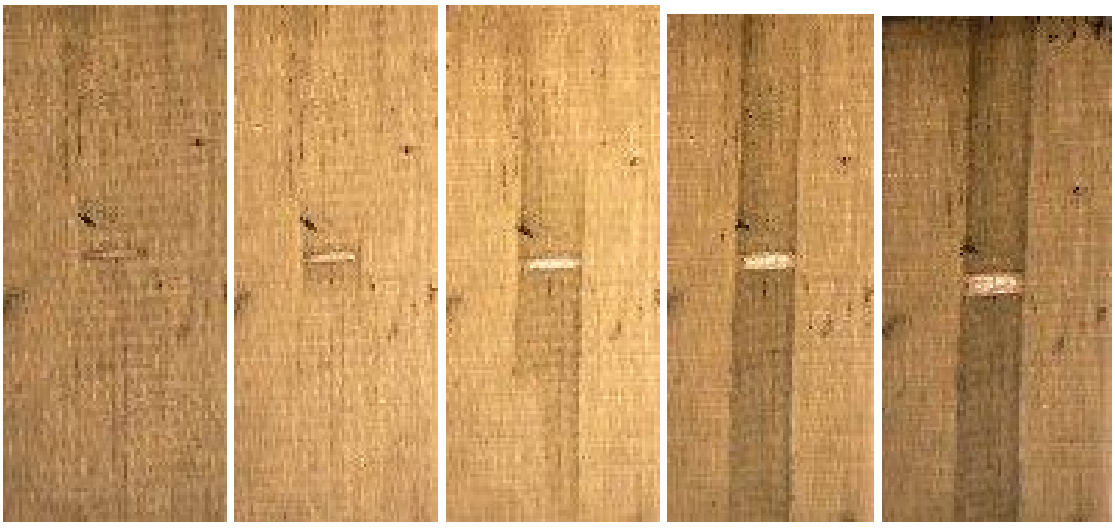
Şekil 4.15.b: a/t: 0,45 a/c: 0,30 oranına sahip kompozit malzemenin hasar mekanizması



Şekil 4.15.c: a/t: 0,45 a/c: 0,40 oranına sahip kompozit malzemenin hasar mekanizması



Şekil 4.15.d: a/t: 0,45 a/c: 0,50 oranına sahip kompozit malzemenin hasar mekanizması

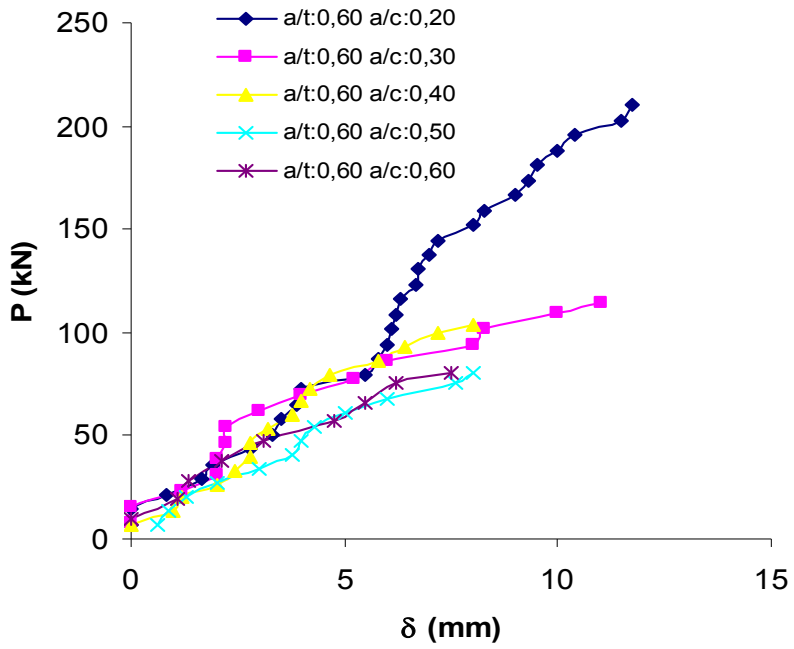


Şekil 4.15.e: a/t: 0,45 a/c: 0,60 oranına sahip kompozit malzemenin hasar mekanizması

### 4.4. a/t: 0,60 Boyutlarındaki Numunelerde Kırılma Davranışları ve Hasar Analizi

#### 4.4.1. a/t: 0,60 Boyutlarındaki numunelerde çatlaklı çekme deney sonuçları

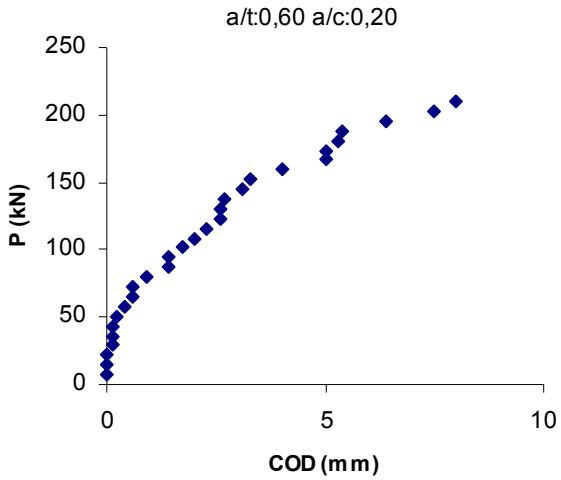
a/c: 0,60 a/t:0.20, 0.30, 0.40, 0.50, 0.60 oranlarına sahip deney numunelerine ait yüke karşılık gelen birim uzama miktarları Şekil 4.18'de verilmiştir**.** δ değerlerinin uygulanan yükle hemen hemen lineer değiştiği görülmektedir. a/t: 0,60 a/c: 0,20 oranına sahip numune de 210000 N yükte 11,75 mm, a/t: 0,60 a/c: 0,30 oranına sahip numune de 114500 N yükte 11 mm, a/t: 0,60 a/c: 0,40 oranına sahip numune de 104000 N yükte 8 mm, a/t: 0,60 a/c: 0,50 oranına sahip numune de 80000 N yükte 8 mm ve a/t: 0,60 a/c: 0,60 oranına sahip numune de 80000 N yükte 7,5 mm uzama miktarları tespit edilmiştir. Kırılma değerlerinin genişlikle doğru orantılı olduğu gözlenmiştir.



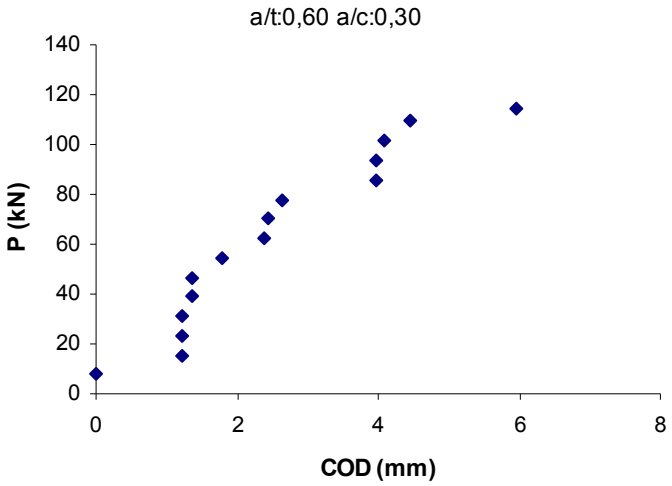

Şekil 4.16: a/t: 0,60 sabit a/c: 0.20, 0.30, 0.40, 0.50, 0.60 oranlarına sahip kompozit malzemelerin kuvvet uzama miktarları değişimi grafiği

Numuneye uygulanan eksenel yüke karşılık, çatlak ağzı açılma miktarının (COD) grafikleri Şekil 4.17'de verilmiştir. Şekil 4.17.a' da a/t: 0,60 a/c: 0,20 oranlı numuneye ait P-COD grafiği verilmiştir. 50680 N yüke kadar kararlı bir COD değeri veren numune kırılma yükü olan 210000 N yükte 8 mm COD değeri vermiştir. Şekil 4.17.b' de a/t: 0,60 a/c: 0,30 oranlı numuneye ait P-COD grafiği verilmiştir. Numune 114500 N yükte 5,96 mm COD değeri vermiştir. Şekil 4.17.c 'de a/t: 0,60 a/c: 0,40 oranlı numuneye ait P-COD grafiği verilmiştir. 104000 N yükte 2,95 mm uzama

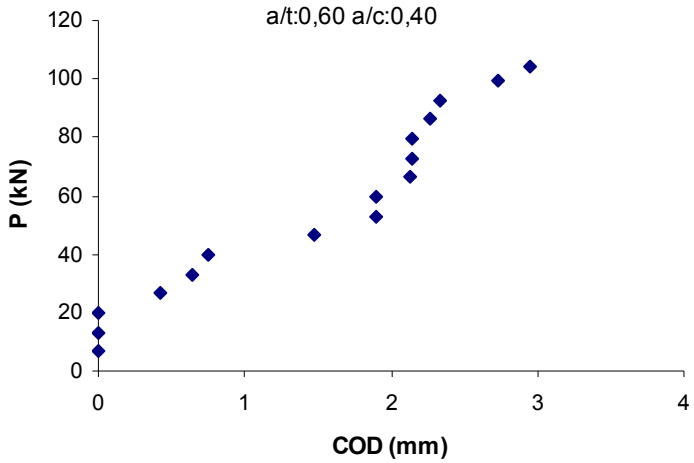
göstermiştir. Şekil 4.17.d'de a/t: 0,60 a/c: 0,50 oranlı numuneye ait P-COD grafiği verilmiştir. 80000 N yükte 3,32 mm COD değeri vermiştir. Şekil 4.17.e'de a/t: 0,60 a/c: 0,60 oranlı numuneye ait P-COD grafiği verilmiştir. Numune 80000 N yükte 4,42 mm COD değeri vermiştir.



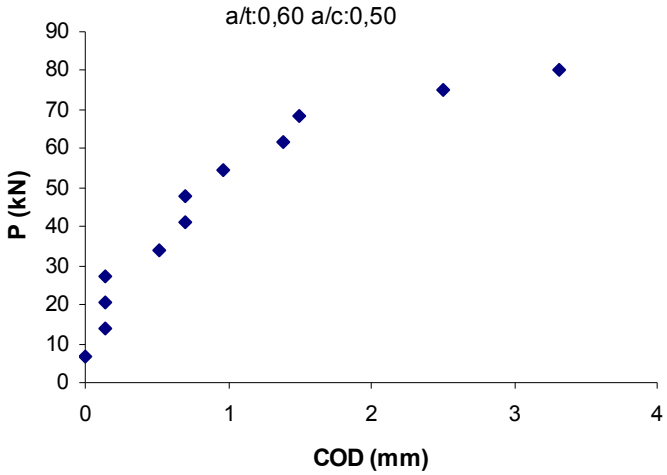

Şekil 4.17.a: a/t: 0,60 a/c: 0,20 oranlarına sahip kompozit malzemenin kuvvet çatlak ağzı açılma miktarı değişimi grafiği



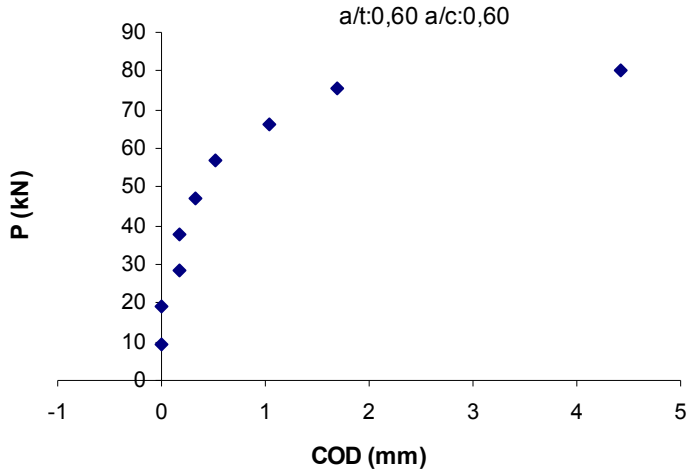

Şekil 4.17.b: a/t: 0,60 a/c: 0,30 oranlarına sahip kompozit malzemenin kuvvet çatlak ağzı açılma miktarı değişimi grafiği




Şekil 4.17.c. a/t: 0,60 a/c: 0,40 oranlarına sahip kompozit malzemenin kuvvet çatlak ağzı açılma miktarı değişimi grafiği

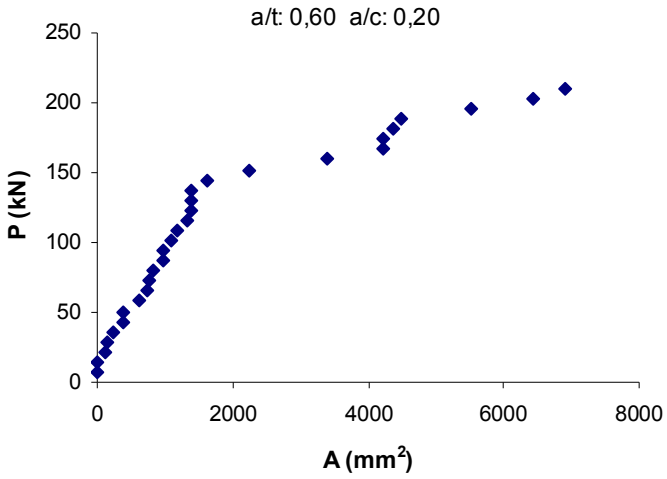



Şekil 4.17.d: a/t: 0,60 a/c: 0,50 oranlarına sahip kompozit malzemenin kuvvet çatlak ağzı açılma miktarı değişimi grafiği

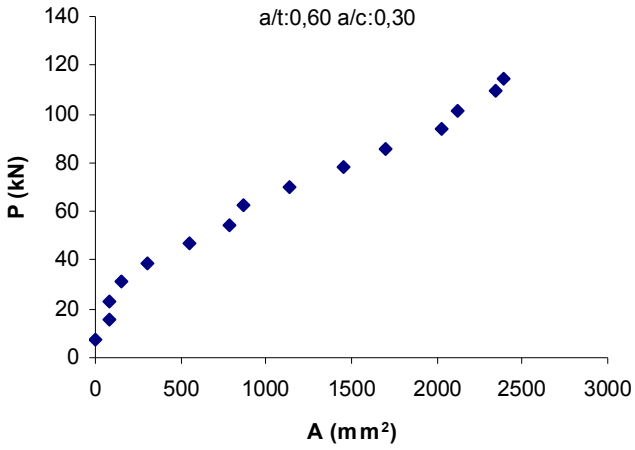



Şekil 4.17.e: a/t: 0,60 a/c: 0,60 oranlarına sahip kompozit malzemenin kuvvet çatlak ağzı açılma miktarı değişimi grafiği

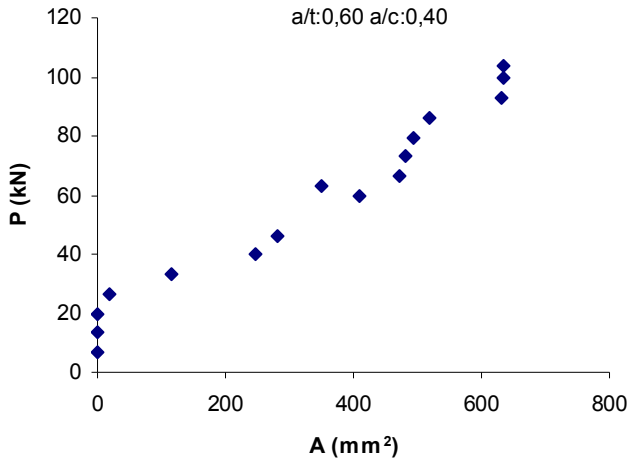
Numuneye uygulanan eksenel yüke karşılık, delaminasyon alanı miktarının grafikleri Şekil 4.18'de verilmiştir. Beş grafikte de başlangıçtan itibaren tabaka ayrılması kararlı bir şekilde devam ederken kopmanın gerçekleştiği yüke yakın değerlerde ilerlemenin hızlandığı gözlenmiştir. Belli bir yükten sonra çatlak ilerlemesi veren numuneler ilerleyen yüklerde hızlı bir çatlak ilerlemesi göstermiştir. Çekme yüküne karşılık gelen direnç sabitlenmiş ve kopma anına kadar kararlı bir şekilde ilerlemiştir. a/t: 0,60 a/c. 0,20 oranlı numune 210000 N yükte 6909 $mm^2$ delaminasyon alanı miktarı göstermiştir. a/t: 0,60 a/c: 0,30 oranlı numune 114500 N yükte 2390 $mm^2$ delaminasyon alanı miktarı, a/t: 0,60 a/c: 0,40oranlı numune 104000 N yükte 635 $mm^2$ delaminasyon alanı miktarı, a/t: 0,60 a/c: 0,50 oranlı numune 80000 N yükte 895 $mm^2$ delaminasyon alanı miktarı, a/t: 0,60 a/c: 0,60 oranlı numune 80000 N yükte 911 $mm^2$ delaminasyon alanı miktarı göstermiştir.



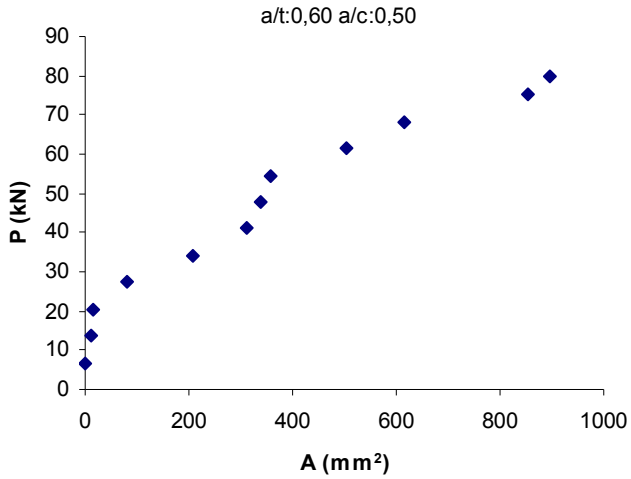

Şekil 4.18.a: a/t: 0,60 a/c: 0,20 oranlarına sahip kompozit malzemenin kuvvet delaminasyon alanı miktarı değişimi grafiği



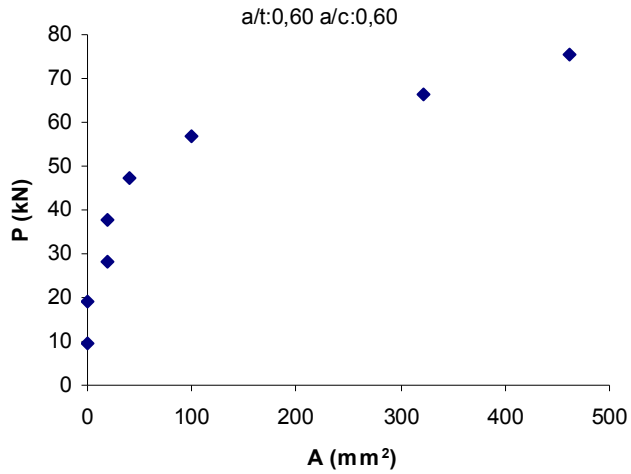

Şekil 4.18.b: a/t: 0,60 a/c: 0,30 oranlarına sahip kompozit malzemenin kuvvet delaminasyon alanı miktarı değişimi grafiği




Şekil 4.18.c: a/t: 0,60 a/c: 0,40 oranlarına sahip kompozit malzemenin kuvvet delaminasyon alanı miktarı değişimi grafiği

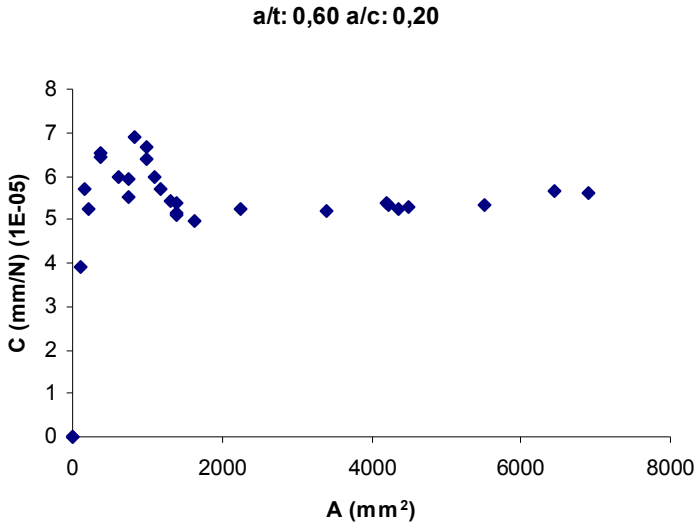



Şekil 4.18.d. a/t: 0,60 a/c: 0,50 oranlarına sahip kompozit malzemenin kuvvet delaminasyon alanı miktarı değişimi grafiği

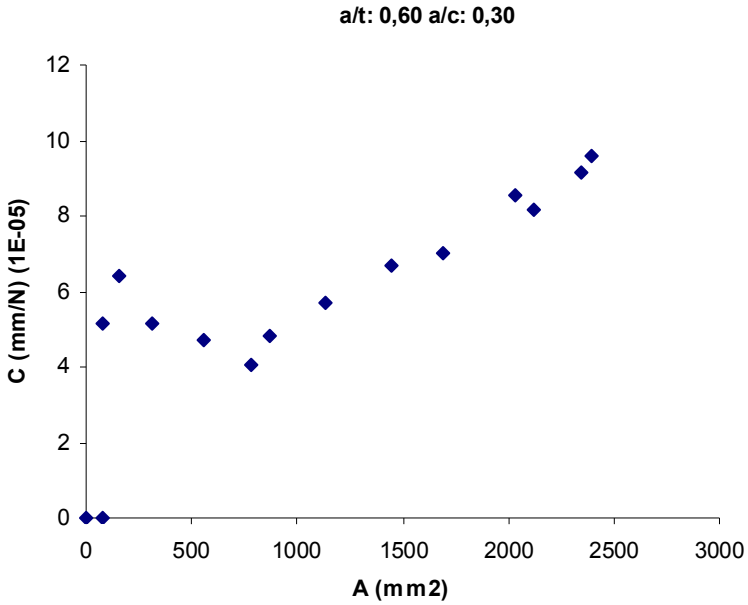



Şekil 4.18.e: a/t: 0,60 a/c: 0,60 oranlarına sahip kompozit malzemenin kuvvet delaminasyon alanı miktarı değişimi grafiği

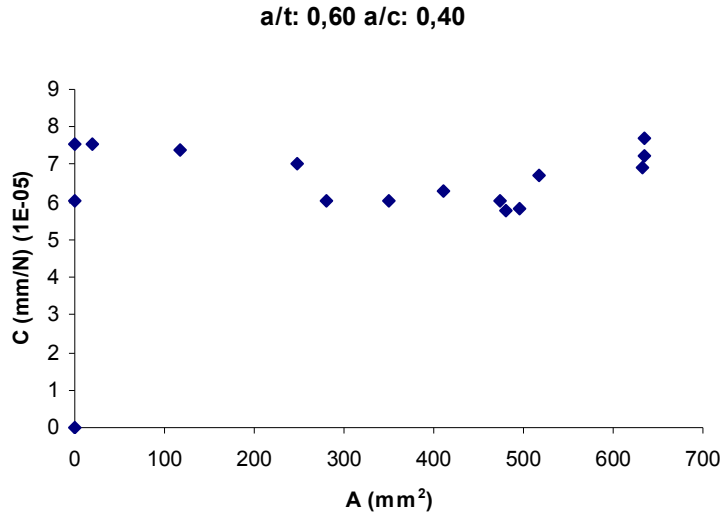
Şekil değiştirme enerji boşalma miktarının (G) hesaplanabilmesi için öncelikle Şekil 4.19'de görülen C-A grafikleri çizilerek eğri uydurma yöntemi ile denklemleri elde edilmiştir.



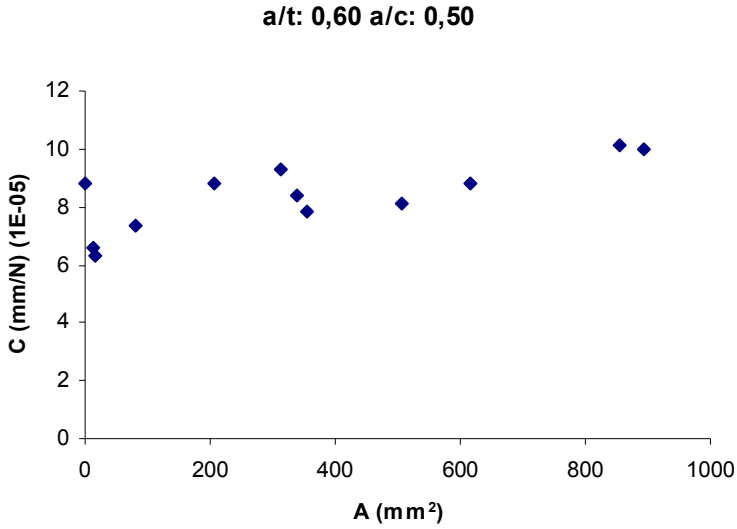

Şekil 4.19.a: a/t: 0,60 a/c: 0.20 oranlarına sahip kompozit malzemenin kompliyans delaminasyon alanı miktarı değişimi grafiği



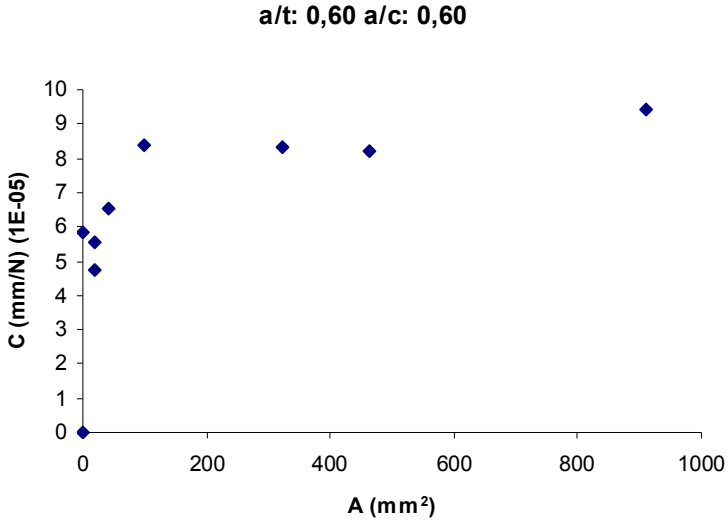

Şekil 4.19.b: a/t: 0,60 a/c: 0.30 oranlarına sahip kompozit malzemenin kompliyans delaminasyon alanı miktarı değişimi grafiği




Şekil 4.19.c. a/t: 0,60 a/c: 0.40 oranlarına sahip kompozit malzemenin kompliyans delaminasyon alanı miktarı değişimi grafiği

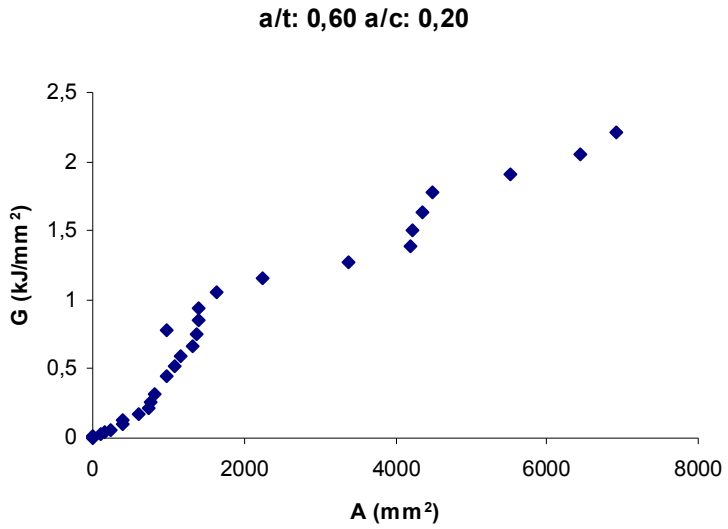



Şekil 4.19.d: a/t: 0,60 a/c: 0.50 oranlarına sahip kompozit malzemenin kompliyans delaminasyon alanı miktarı değişimi grafiği

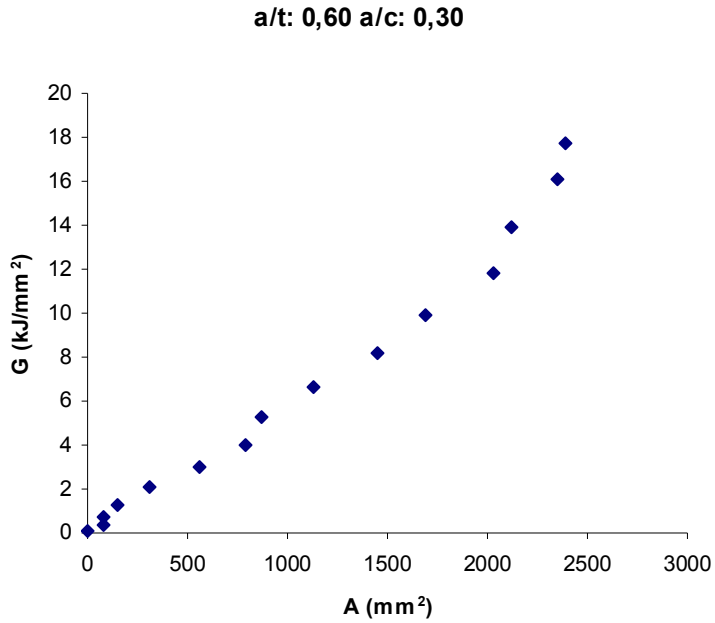



Şekil 4.19.e: a/t:0,60 a/c: 0.60 oranlarına sahip kompozit malzemenin kompliyans delaminasyon alanı miktarı değişimi grafiği

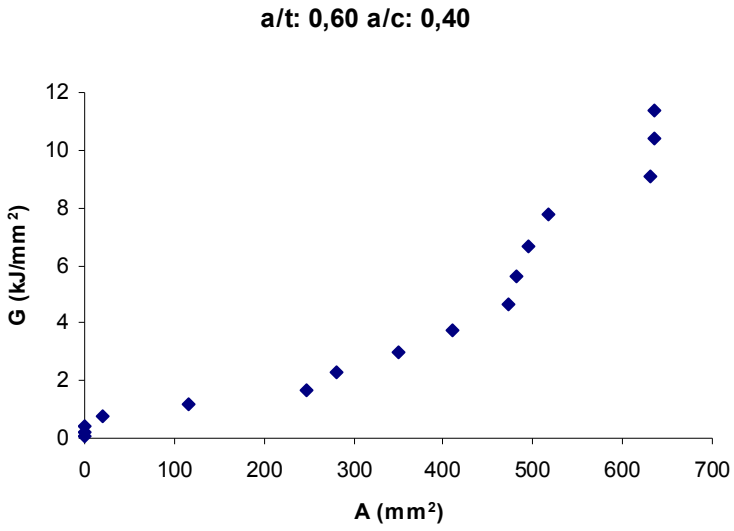
Kompliyans metodu ile hesaplanan G değerleriyle, çatlak ilerleme miktarları arasındaki ilişkiyi gösteren grafikler Şekil 4.20'de verilmiştir. Grafiklerden de görüldüğü gibi a/c: 0,30 ve a/c: 0,40 oranlarında şekil değiştirme enerji boşalma miktarlarında ani bir düşüş gözlenmiş ve kopma anına kadar tekrar G artmaya devam etmiştir. Şekil 4.20.a'da a/t: 0,60 a/c: 0,20 oranlı numuneye ait G-A grafiği verilmiştir. Grafikten de anlaşılacağı üzere şekil değiştirme enerji boşalma miktarı lineer olarak artış göstermiştir. Şekil 4.20.b'de a/t: 0,60 a/c: 0,30 oranlı numuneye ait G-A grafiği verilmiştir. 78000 N yüke kadar kararlı bir artış gösteren numune 8,213 kJ/mm$^2$ G değeri vermiş sonra 114500 N yükte 17,699 kJ/mm$^2$ G değeri vererek kırılmıştır. Şekil 4.20.c'de a/t: 0,60 a/c: 0,40 oranlı numuneye ait G-A grafiği verilmiştir. Numune 104000 N yükte 11,357 kJ/mm$^2$ G değeri vermiştir. Şekil 4.20.d'de a/t: 0,60 a/c: 0,50 oranlı numuneye ait G-A grafiği verilmiştir. 80000 N yükte 9,28 kJ/mm$^2$ G değeri vermiştir. Şekil 4.20.e'de a/t:0,60 a/c: 0,60 oranlı numuneye ait G-A grafiği verilmiştir. 80000 N yükte 18,56 kJ/mm$^2$ G değeri vermiştir.



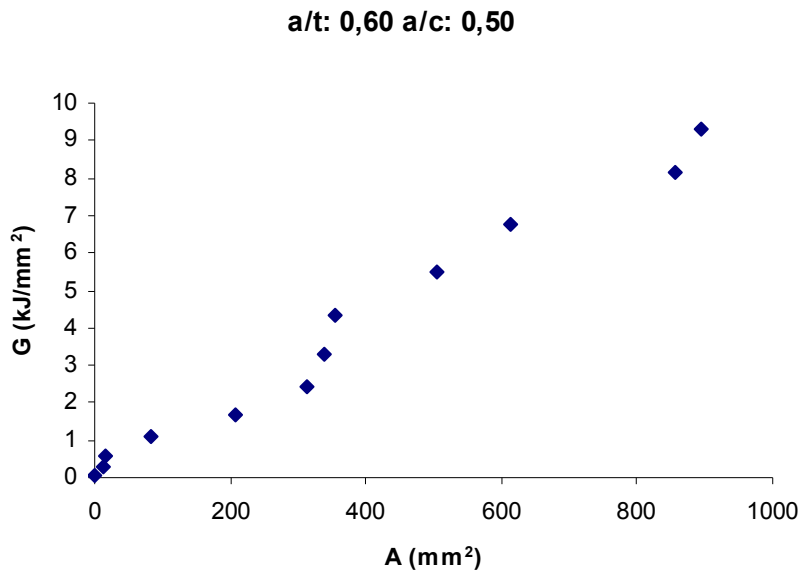

Şekil 4.20.a: a/t: 0,60 a/c: 0,20 oranlarına sahip kompozit malzemenin şekil değiştirme enerji boşalma miktarı delaminasyon alanı miktarı değişim grafiği



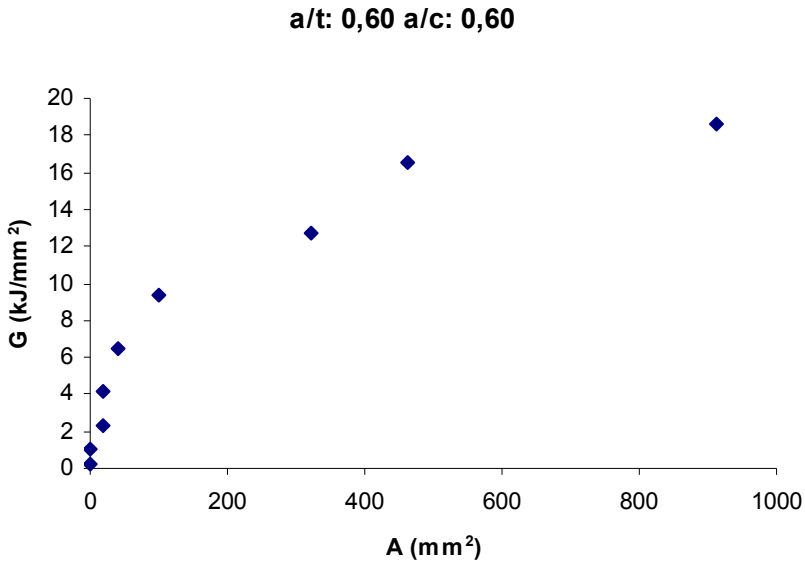

Şekil 4.20.b: a/t: 0,60 a/c: 0,30 oranlarına sahip kompozit malzemenin şekil değiştirme enerji boşalma miktarı delaminasyon alanı miktarı değişim grafiği




Şekil 4.20.c: a/t: 0,60 a/c: 0,40 oranlarına sahip kompozit malzemenin şekil değiştirme enerji boşalma miktarı delaminasyon alanı miktarı değişim grafiği




Şekil 4.20.d: a/t: 0,60 a/c: 0,50 oranlarına sahip kompozit malzemenin şekil değiştirme enerji boşalma miktarı delaminasyon alanı miktarı değişim grafiği



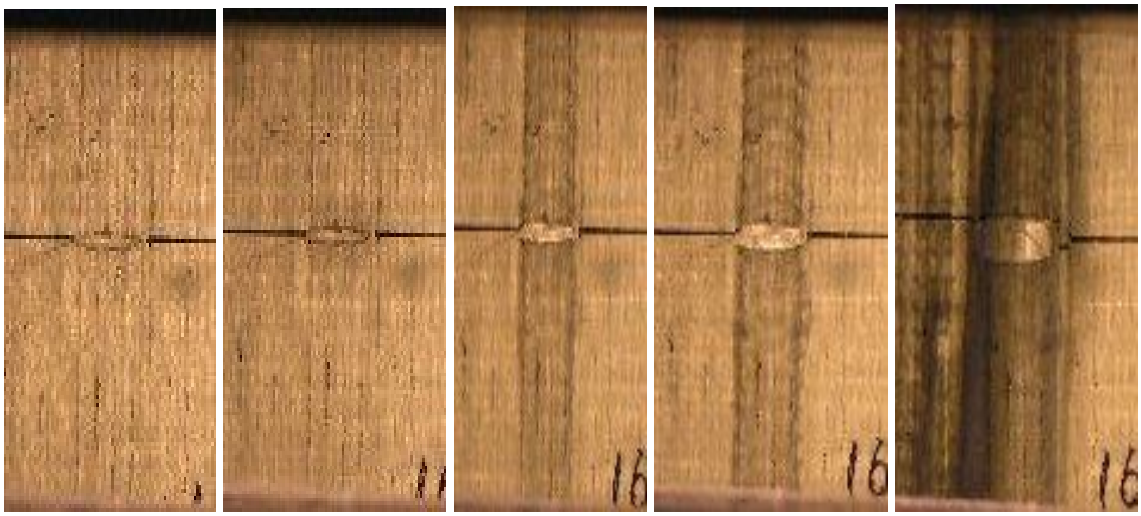

Şekil 4.20.e: a/t: 0,60 a/c: 0,60 oranlarına sahip kompozit malzemenin şekil değiştirme enerji boşalma miktarı delaminasyon alanı miktarı değişim grafiği

### 4.4.2. a/t: 0,60 Boyutlarındaki numunelerde hasar analizi

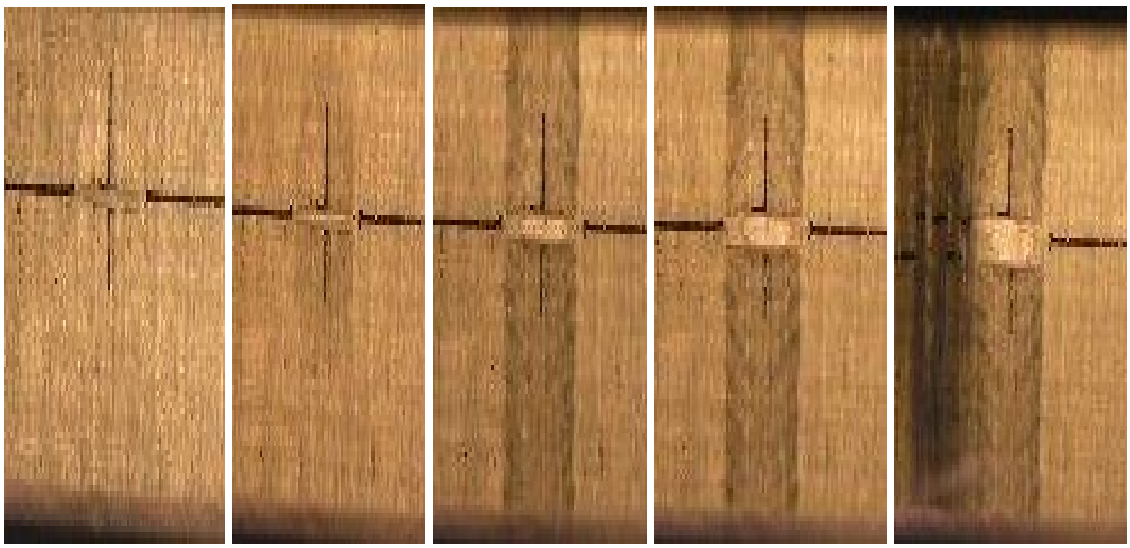
Eliptik yüzey çatlağına uygulanan yük dik olduğundan çatlak ilerlemesi ve hasar oluşmaya hızlı başlamıştır. İlerleyen yüklerde fiber matris ayrılması Şekil 4.21'de gösterilmiştir. Parlak olan kısımlar fiber matris ayrışmasından sonra kararmaya başlamıştır. Bu kararan bölge deformasyon alanıdır. Mod II'de oluşan hasar çatlak düzlemi boyunca ve kopuncaya kadar devam etmiştir. Herhangi bir yöne doğru çatlak ilerlemesi gözlenmemiştir. Ayrıca epoksinin malzeme üretimi sırasında cam elyafa iyi nüfus ettiği de görülmüştür.



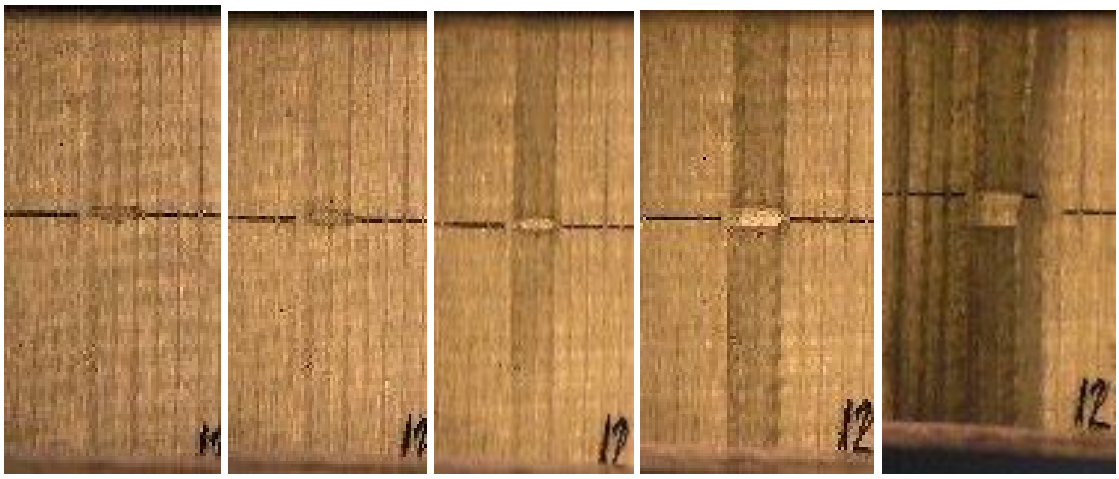
Şekil 4.21.a: a/t:0,60 a/c: 0,20 oranına sahip kompozit malzemenin hasar mekanizması



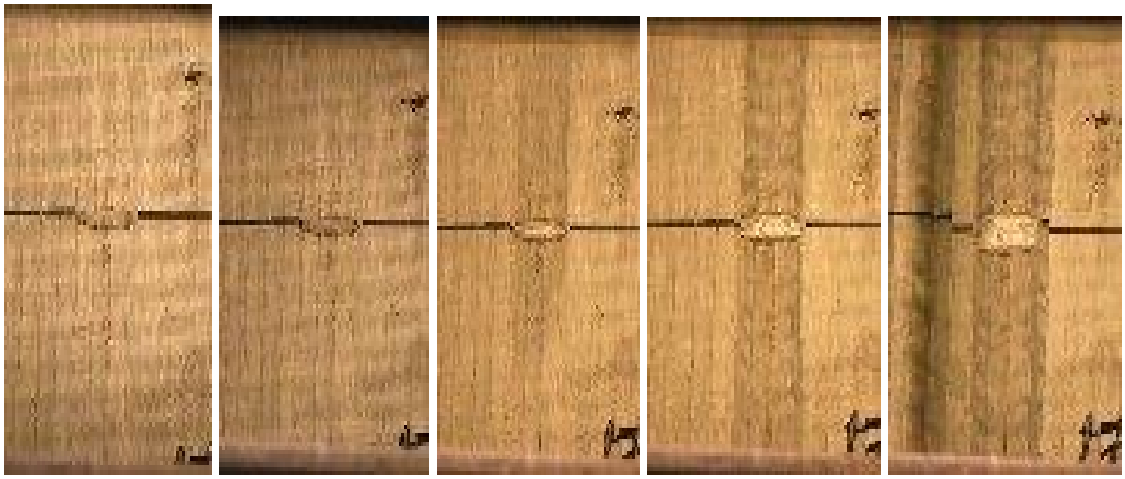
Şekil 4.21.b: a/t:0,60 a/c: 0,30 oranına sahip kompozit malzemenin hasar mekanizması



Şekil 4.21.c: a/t:0,60 a/c: 0,40 oranına sahip kompozit malzemenin hasar mekanizması



Şekil 4.21.d: a/t:0,60 a/c: 0,50 oranına sahip kompozit malzemenin hasar mekanizması

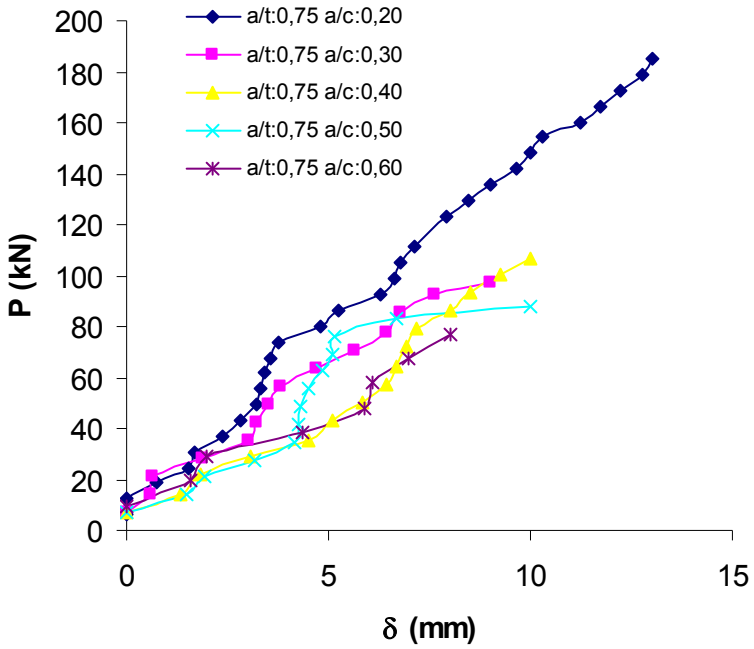


Şekil 4.21.e: a/t:0,60 a/c: 0,60 oranına sahip kompozit malzemenin hasar mekanizması

### 4.5. a/t: 0,75 Boyutlarındaki Numunelerde Kırılma Davranışları ve Hasar Analizi

#### 4.5.1. a/t: 0,75 Boyutlarındaki numunelerde çatlaklı çekme deney sonuçları

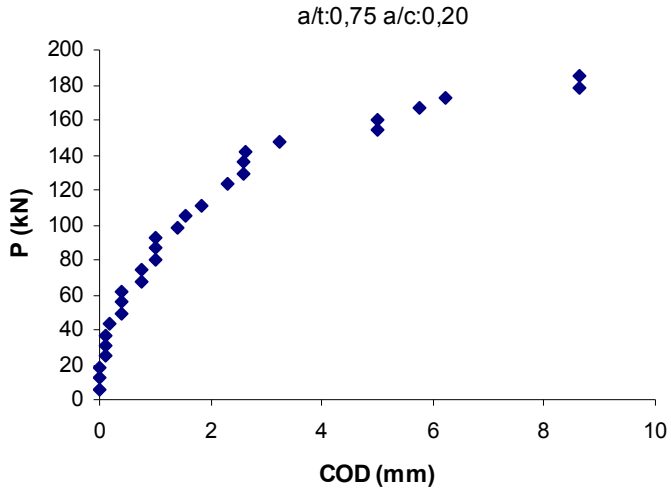
a/c: 0,75 a/t:0.20, 0.30, 0.40, 0.50, 0.60 oranlarına sahip deney numunelerine ait yüke karşılık gelen birim uzama miktarları Şekil 4.22'de verilmiştir**.** δ değerlerinin uygulanan yükle hemen hemen lineer değiştiği görülmektedir. a/t: 0,75 a/c: 0,20 oranına sahip numune de 185000 N yükte 13mm a/t: 0,75 a/c: 0,30 oranına sahip numune de 97000 N yükte 9 mm, a/t: 0,75 a/c: 0,40 oranına sahip numune de 107000 N yükte 10 mm, a/t: 0,75 a/c: 0,50 oranına sahip numune de 88000 N yükte 10 mm ve a/t: 0,75 a/c: 0,60 oranına sahip numune de 77000 N yükte 8 mm uzama miktarları tespit edilmiştir. Kırılma değerlerinin genişlikle doğru orantılı olduğu gözlenmiştir.



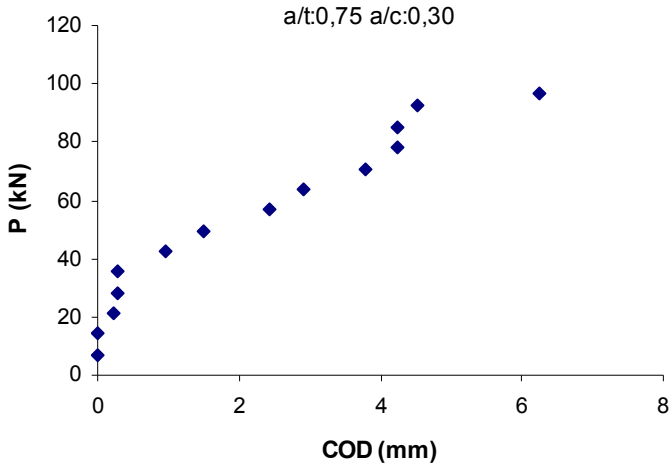

Şekil 4.22: a/t: 0,75 sabit a/c: 0.20, 0.30, 0.40, 0.50, 0.60 oranlarına sahip kompozit malzemelerin kuvvet uzama miktarları değişimi grafiği

Numuneye uygulanan eksenel yüke karşılık, çatlak ağzı açılma miktarının (COD) grafikleri Şekil 4.23'de verilmiştir. Çatlak ilerlemesi delaminasyon çatlak ilerlemesi şeklinde gözlenmiştir. Yükleme anından itibaren lineer bir çatlak ağzı açılması gözlenmiştir. Şekil 4.23.a'da a/t: 0,75 a/c: 0,20 oranlı numuneye ait P-COD grafiği verilmiştir. 92500 N yüke kadar kararlı bir COD değeri veren numune, bu yükten sonra hızlı bir şekilde COD değeri vererek kırılma yükü olan 185000 N yükte 8,65 mm COD değeri vermiştir. Şekil 4.23.b'de a/t: 0,75 a/c: 0,30 oranlı numuneye ait

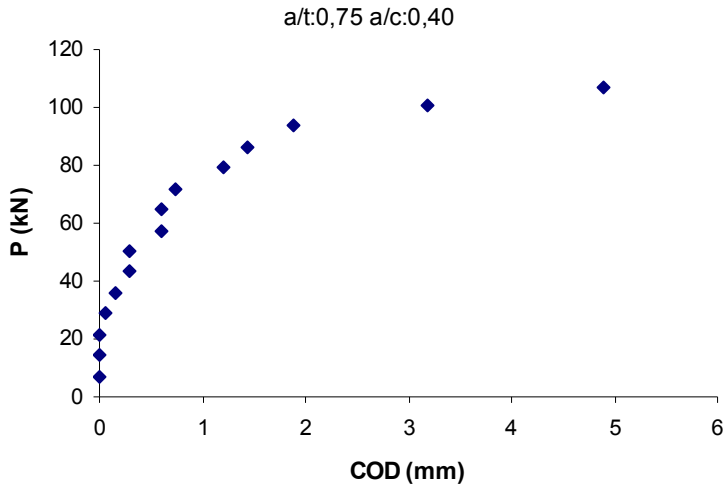
P-COD grafiği verilmiştir. Numune 97000 N yükte 6,236 mm COD değeri vermiştir. Şekil 4.23.c'de a/t: 0,75 a/c: 0,40 oranlı numuneye ait P-COD grafiği verilmiştir. 107000 N yükte 4,9 mm COD değeri göstermiştir. Şekil 4.23.d'de a/t: 0,75 a/c: 0,50 oranlı numuneye ait P-COD grafiği verilmiştir. 88000 N yükte 4,63 mm COD değeri vermiştir. Şekil 4.23.e'de a/t: 0,75 a/c: 0,60 oranlı numuneye ait P-COD grafiği verilmiştir. Numune 77000 N yükte 2,29 mm COD değeri vermiştir.



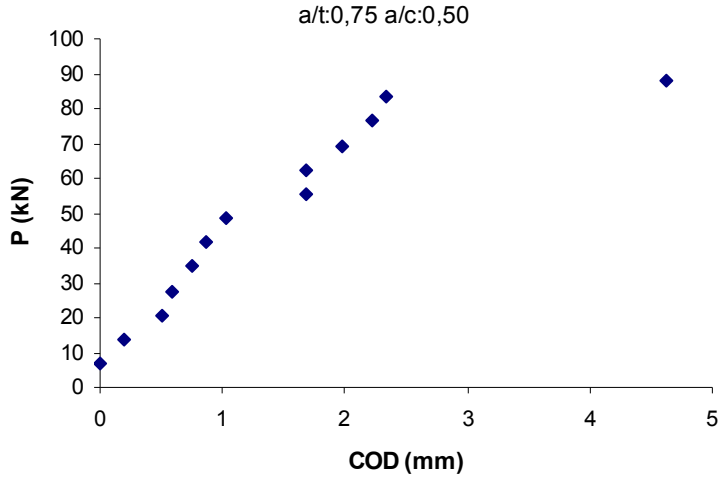

Şekil 4.23.a: a/t: 0,75 a/c: 0,20 oranlarına sahip kompozit malzemenin kuvvet çatlak ağzı açılma miktarı değişimi grafiği



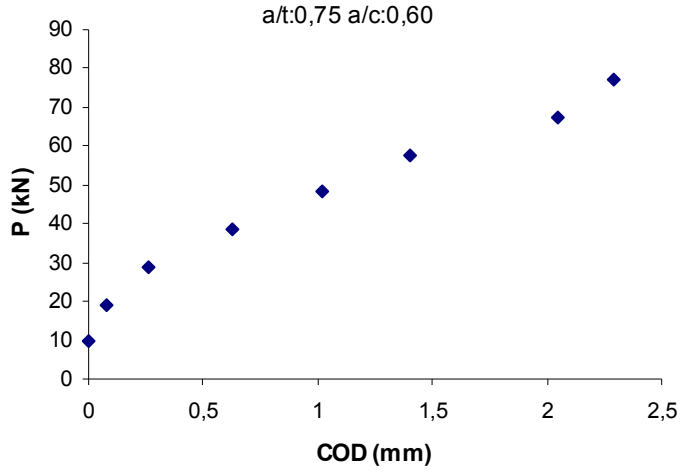

Şekil 4.23.b: a/t: 0,75 a/c: 0,30 oranlarına sahip kompozit malzemenin kuvvet çatlak ağzı açılma miktarı değişimi grafiği




Şekil 4.23.c. a/t: 0,75 a/c: 0,40 oranlarına sahip kompozit malzemenin kuvvet çatlak ağzı açılma miktarı değişimi grafiği

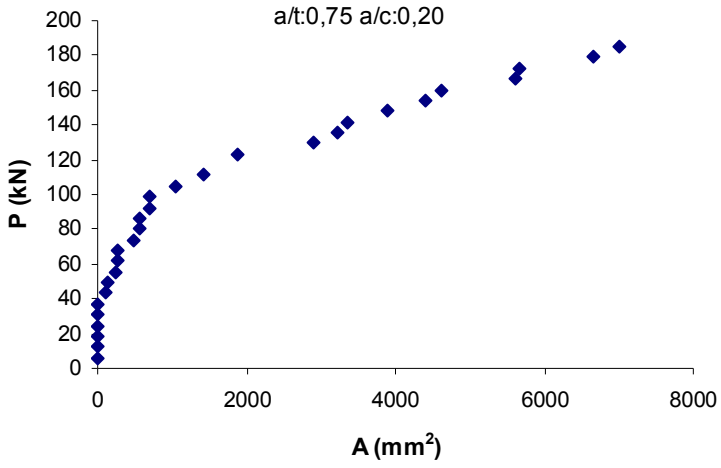



Şekil 4.23.d: a/t: 0,75 a/c: 0,50 oranlarına sahip kompozit malzemenin kuvvet çatlak ağzı açılma miktarı değişimi grafiği

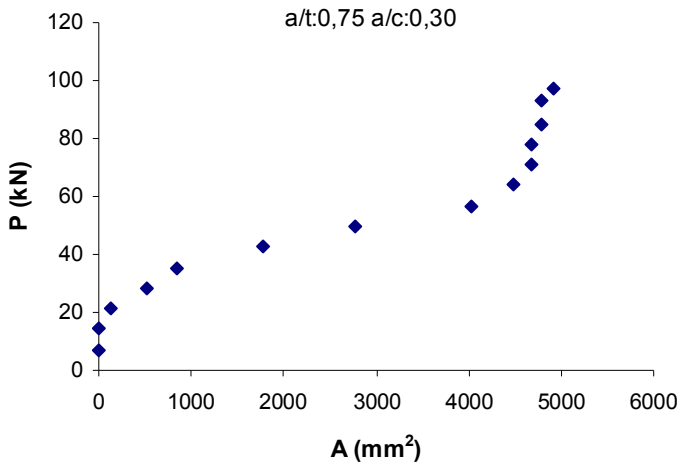



Şekil 4.23.e: a/t: 0,75 a/c: 0,60 oranlarına sahip kompozit malzemenin kuvvet çatlak ağzı açılma miktarı değişimi grafiği

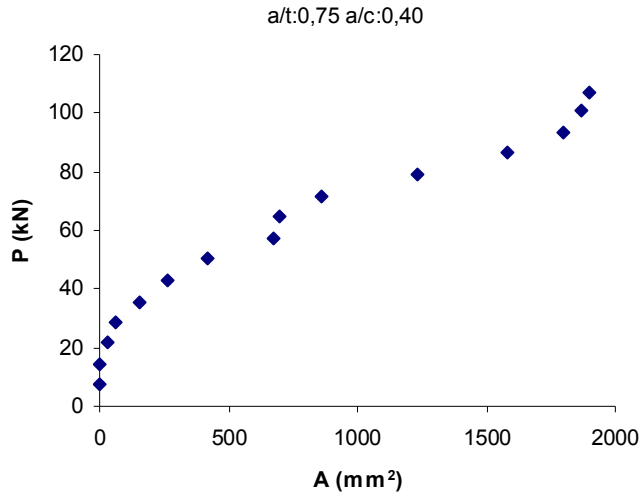
Numuneye uygulanan eksenel yüke karşılık, delaminasyon alanı miktarının grafikleri Şekil 4.24'de verilmiştir. Yükün artmasına karşılık çatlak ilerleme miktarında bir süre ilerleme gözlenmemiştir. Bunun nedeni matris bağlarının kuvvetidir. Elyaflar arası bağ zayıfladıkça ve direnç sabitlenince çatlak ilerlemesi kararlı bir artış göstermiştir. Başlangıç çatlak parametreleri dikkate alındığında başlangıç çatlak boyu azaldıkça kopma yükü de azalmıştır. Beş grafikte de başlangıçtan itibaren tabaka ayrılması kararlı bir şekilde devam ederken kopmanın gerçekleştiği yüke yakın değerlerde ilerlemenin hızlandığı gözlenmiştir. Belli bir yükten sonra çatlak ilerlemesi veren numuneler ilerleyen yüklerde hızlı bir çatlak ilerlemesi göstermiştir. a/t: 0,75 a/c. 0,20 oranlı numune 185000 N yükte 6995 $mm^2$ delaminasyon miktarı göstermiştir. a/t: 0,75 a/c: 0,30 oranlı numune 97000 N yükte 4915 $mm^2$ delaminasyon alanı miktarı, a/t: 0,75 a/c: 0,40 oranlı numune 107000 N yükte 1900 $mm^2$ delaminasyon miktarı, a/t: 0,75 a/c: 0,50 oranlı numune 88000 N yükte 765 $mm^2$ delaminasyon miktarı, a/t: 0,75 a/c: 0,60 oranlı numune 77000 N yükte 444 mm delaminasyon alanı miktarı göstermiştir.



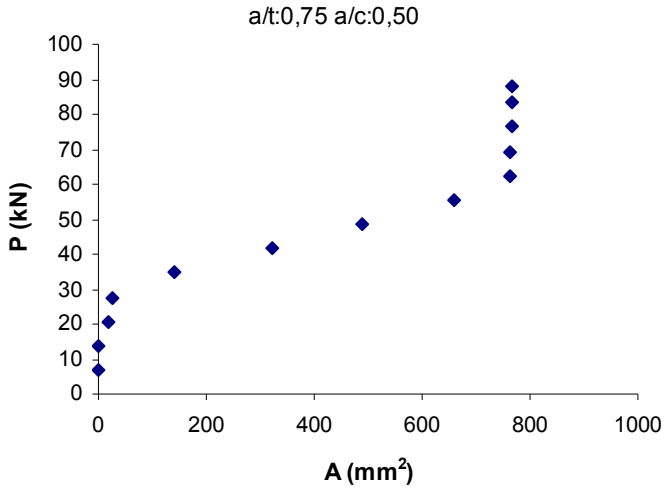

Şekil 4.24.a: a/t: 0,75 a/c: 0,20 oranlarına sahip kompozit malzemenin kuvvet delaminasyon alanı miktarı değişimi grafiği



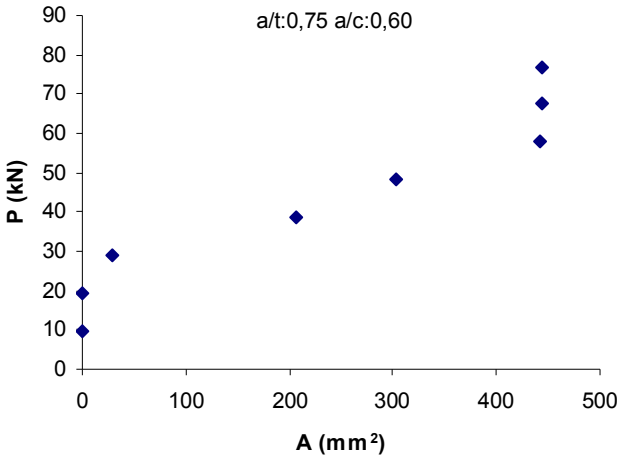

Şekil 4.24.b: a/t: 0,75 a/c: 0,30 oranlarına sahip kompozit malzemenin kuvvet delaminasyon alanı miktarı değişimi grafiği




Şekil 4.24.c: a/t: 0,75 a/c: 0,40 oranlarına sahip kompozit malzemenin kuvvet delaminasyon alanı miktarı değişimi grafiği

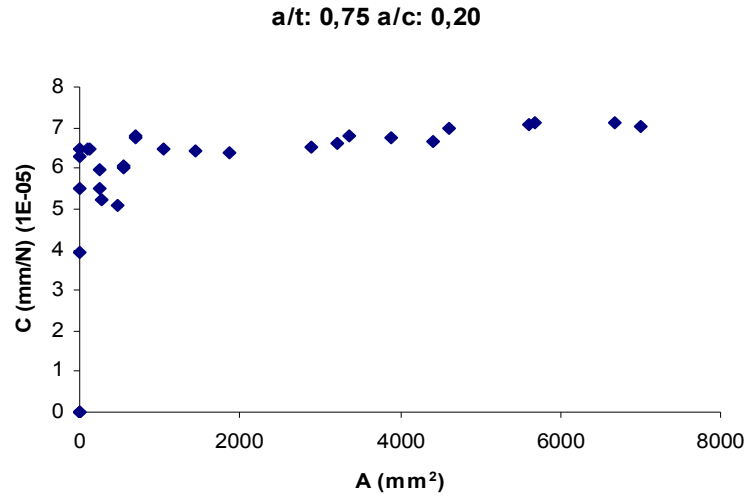



Şekil 4.24.d: a/t: 0,75 a/c: 0,50 oranlarına sahip kompozit malzemenin kuvvet delaminasyon alanı miktarı değişimi grafiği

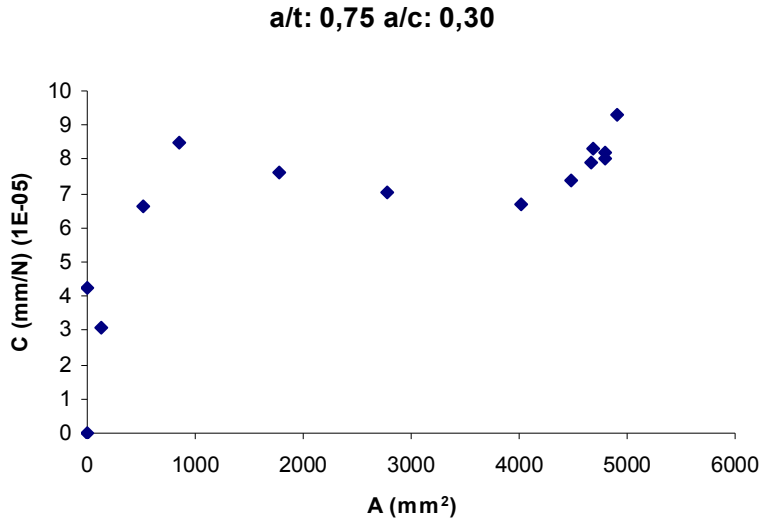



Şekil 4.24.e: a/t: 0,75 a/c: 0,60 oranlarına sahip kompozit malzemenin kuvvet delaminasyon alanı miktarı değişimi grafiği

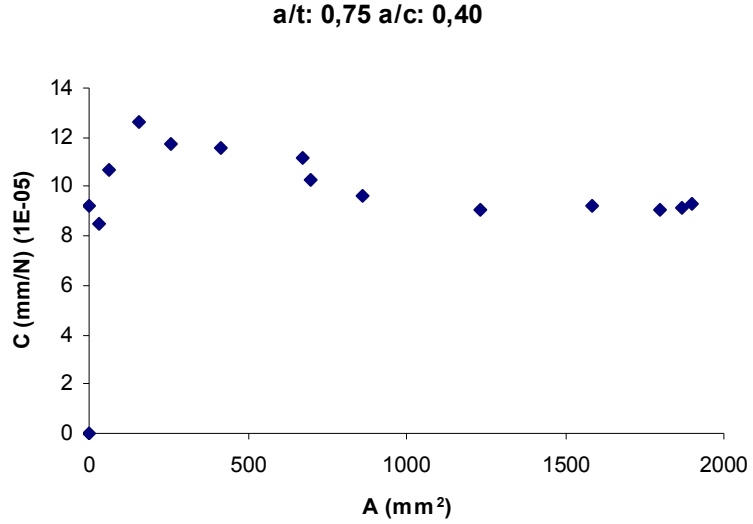
Şekil değiştirme enerji boşalma miktarının (G) hesaplanabilmesi için öncelikle Şekil 4.25'de görülen C-A grafikleri çizilerek polinom denklemleri elde edilmiştir.



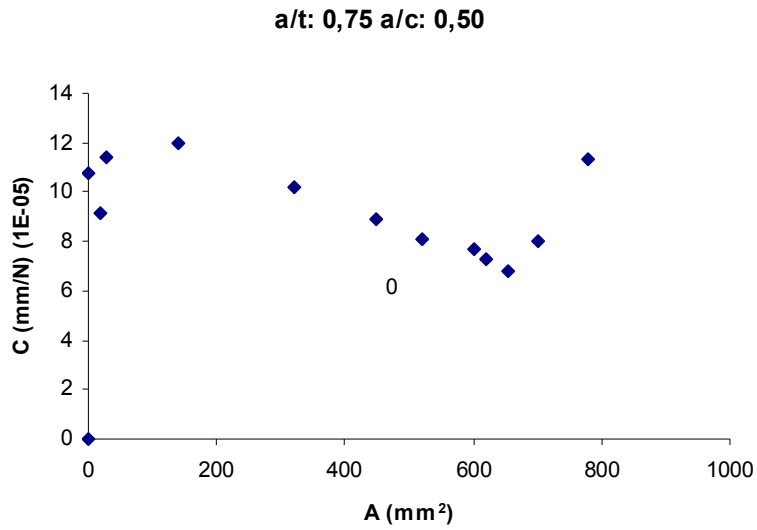

Şekil 4.25.a: a/t: 0,75 a/c: 0.20 oranlarına sahip kompozit malzemenin kompliyans delaminasyon alanı miktarı değişimi grafiği



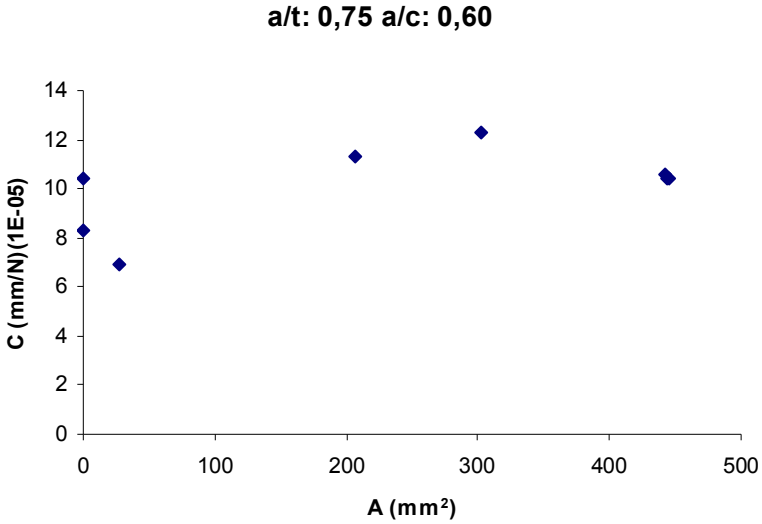

Şekil 4.25.b: a/t:0,75 a/c: 0.30 oranlarına sahip kompozit malzemenin kompliyans delaminasyon alanı miktarı değişimi grafiği




Şekil 4.25.c: a/t: 0,75 a/c: 0.40 oranlarına sahip kompozit malzemenin kompliyans delaminasyon alanı miktarı değişimi grafiği



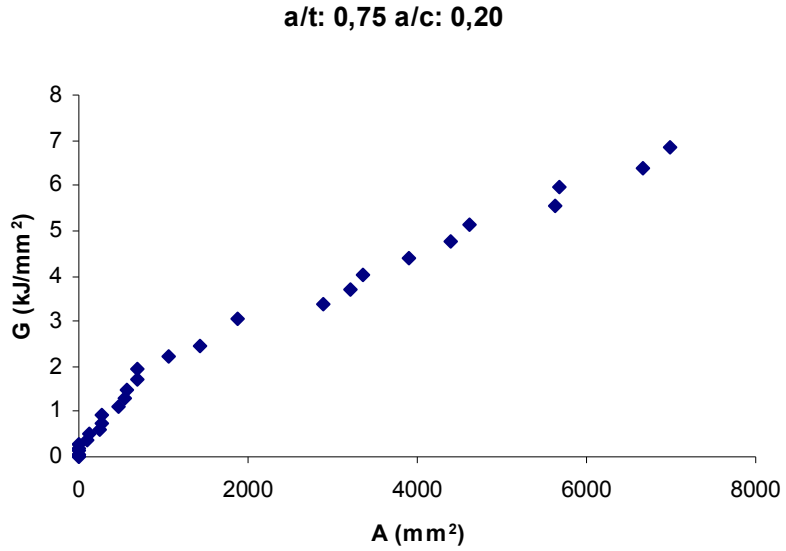

Şekil 4.25.d: a/t: 0,75 a/c: 0.50 oranlarına sahip kompozit malzemenin kompliyans delaminasyon alanı miktarı değişimi grafiği



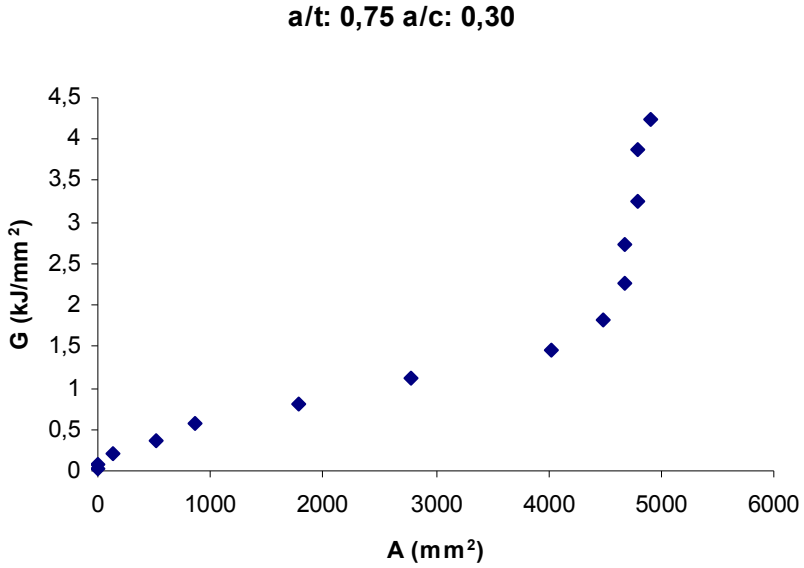

Şekil 4.25.e: a/t: 0,75 a/c: 0.60 oranlarına sahip kompozit malzemenin kompliyans delaminasyon alanı miktarı değişimi grafiği

Kompliyans metodu ile hesaplanan G değerleriyle, çatlak ilerleme miktarları arasındaki ilişkiyi gösteren grafikler Şekil 4.26'da verilmiştir. Başlangıç çatlak parametreleri dikkate alındığında çatlak derinliği en yüksek olan bu numunelerde şekil değiştirme enerji boşalma miktarları diğer deneylere göre daha düşük çıkmıştır. Bunun nedeni çatlağın bulunduğu elyafların çekme yükü altında bağlarının çabuk kopması ve delaminasyon ilerlemesinin hızlı olmasıdır. Şekil 4.26.a'da a/t: 0,75 a/c: 0,20 oranlı numuneye ait G-A grafiği verilmiştir. Grafikten de anlaşılacağı üzere şekil değiştirme

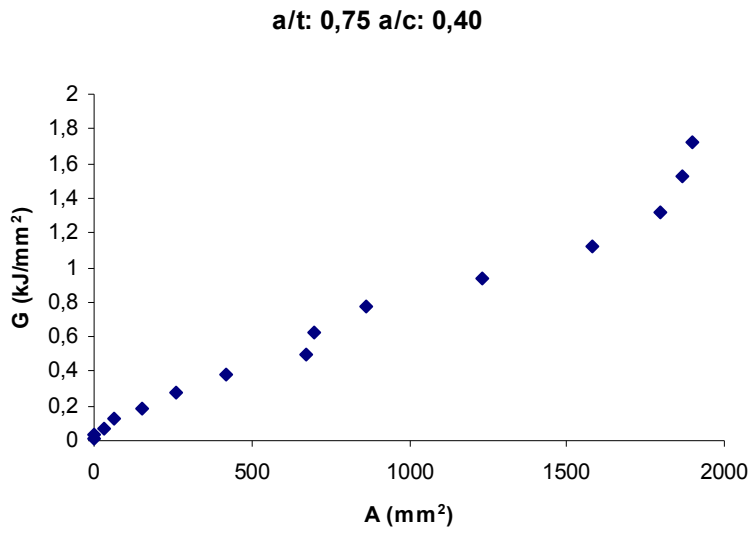
enerji boşalma miktarı lineer olarak artış göstermiştir. 185000 N yükte 6,845 kJ/mm$^2$ G değeri vermiştir. Şekil 4.26.b'de a/t: 0,75 a/c: 0,30 oranlı numuneye ait G-A grafiği verilmiştir. 85100 N yüke kadar kararlı bir artış gösteren numune 3,259 kJ/mm$^2$ G değeri vermiş sonra 97000 N yükte 4,234 kJ/mm$^2$ G değeri vererek kırılmıştır. Şekil 4.26.c'de a/t: 0,75 a/c: 0,40 oranlı numuneye ait G-A grafiği verilmiştir. Numune 107000 N yükte 1,717 kJ/mm$^2$ G değeri vermiştir. Şekil 4.26.d'de a/t: 0,75 a/c: 0,50 oranlı numuneye ait G-A grafiği verilmiştir. 88000 N yükte 0,774 kJ/mm$^2$ G değeri vermiştir. Şekil 4.26.e'de a/t:0,75 a/c: 0,60 oranlı numuneye ait G-A grafiği verilmiştir. 77000 N yükte 13,636 kJ/mm$^2$ G değeri vermiştir.



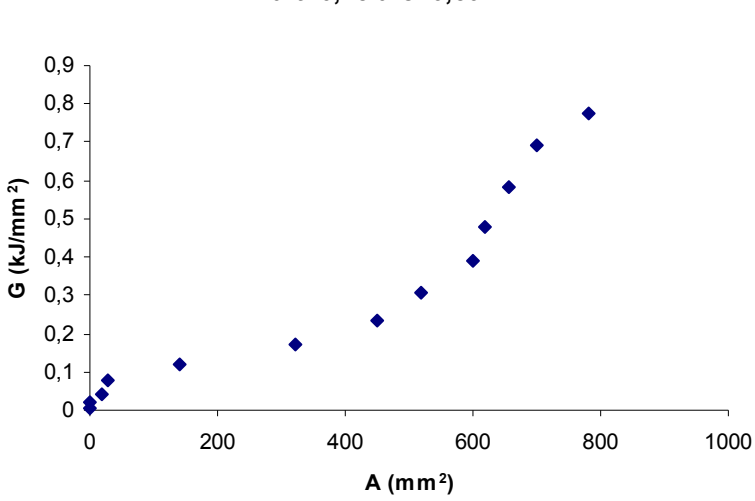

Şekil 4.26.a: a/t: 0,75 a/c: 0,20 oranlarına sahip kompozit malzemenin şekil değiştirme enerji boşalma miktarı delaminasyon alanı miktarı değişim grafiği



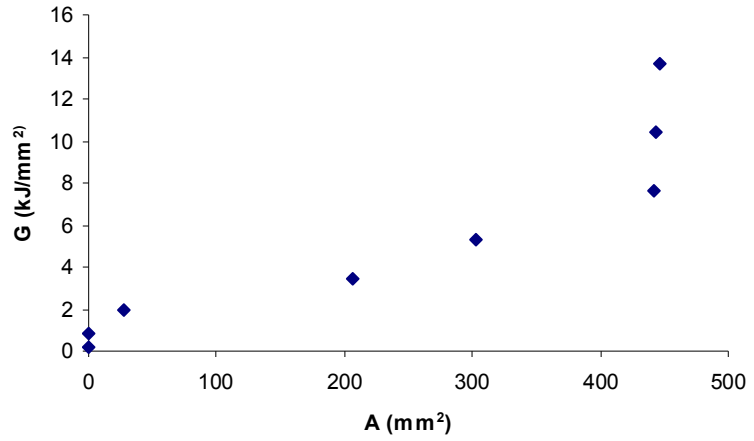

Şekil 4.26.b: a/t: 0,75 a/c: 0,30 oranlarına sahip kompozit malzemenin şekil değiştirme enerji boşalma miktarı delaminasyon alanı miktarı değişim grafiği




Şekil 4.26.c: a/t: 0,75 a/c: 0,40 oranlarına sahip kompozit malzemenin şekil değiştirme enerji boşalma miktarı delaminasyon alanı miktarı değişim grafiği




Şekil 4.26.d: a/t: 0,75 a/c: 0,50 oranlarına sahip kompozit malzemenin şekil değiştirme enerji boşalma miktarı delaminasyon alanı miktarı değişim grafiği



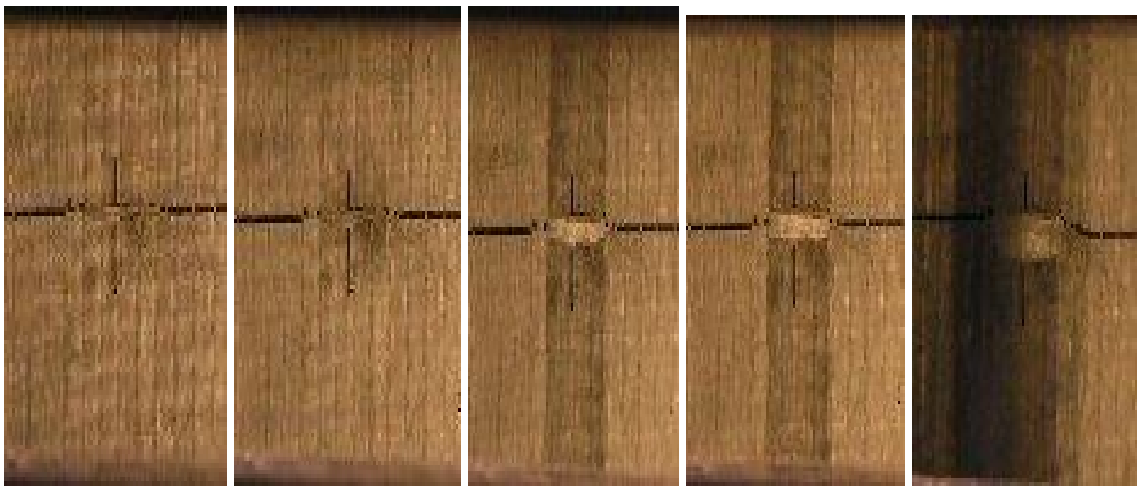

Şekil 4.26.e: a/t: 0,75 a/c: 0,60 oranlarına sahip kompozit malzemenin şekil değiştirme enerji boşalma miktarı delaminasyon alanı miktarı değişim grafiği

### 4.5.2. a/t: 0,75 Boyutlarındaki numunelerde hasar analizi

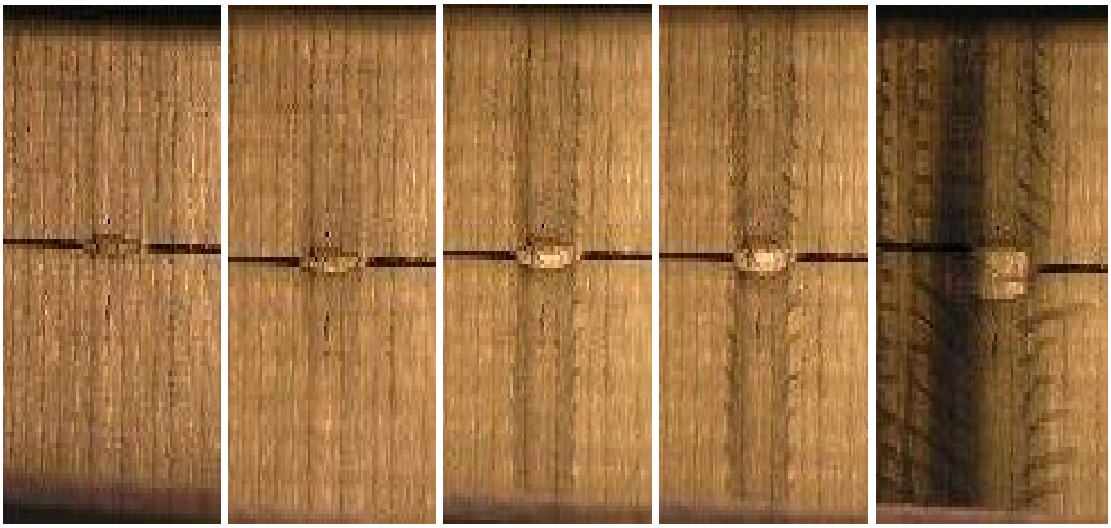
Eliptik yüzey çatlağına uygulanan yük dik olduğundan çatlak ilerlemesi ve hasar oluşmaya hızlı başlamıştır. İlerleyen yüklerde fiber matris ayrılması Şekil 4.27'de gösterilmiştir. Parlak olan kısımlar fiber matris ayrışmasından sonra kararmaya başlamıştır. Bu kararan bölge deformasyon alanıdır. Mod II'de oluşan hasar çatlak düzlemi boyunca ve kopuncaya kadar devam etmiştir. Herhangi bir yöne doğru çatlak ilerlemesi gözlenmemiştir. Ayrıca epoksinin malzeme üretimi sırasında cam elyafa iyi nüfus ettiği de görülmüştür.



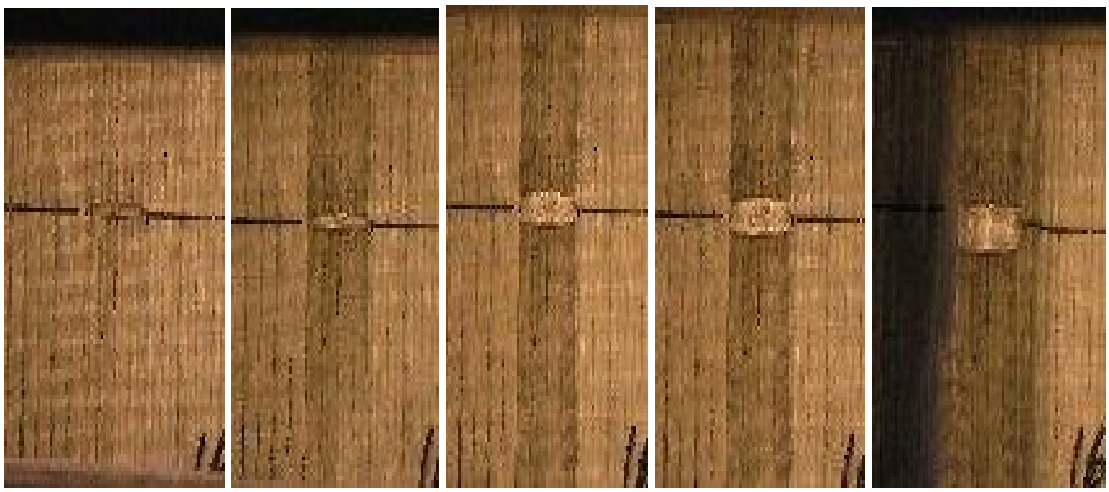
Şekil 4.27.a: a/t: 0,75 a/c: 0,20 oranına sahip kompozit malzemenin hasar mekanizması



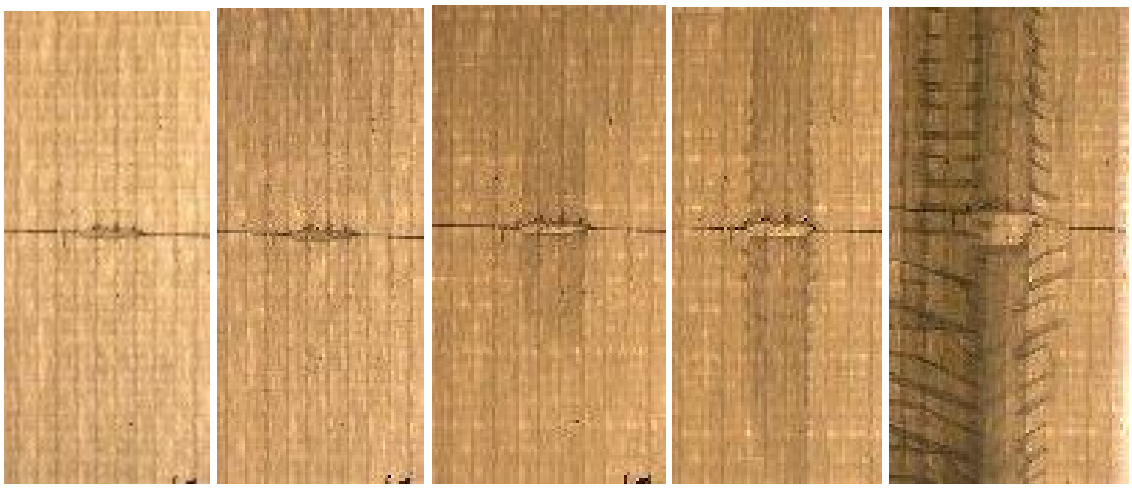
Şekil 4.27.b: a/t: 0,75 a/c: 0,30 oranına sahip kompozit malzemenin hasar mekanizması



Şekil 4.27.c: a/t: 0,75 a/c: 0,40 oranına sahip kompozit malzemenin hasar mekanizması



Şekil 4.27.d: a/t: 0,75 a/c: 0,50 oranına sahip kompozit malzemenin hasar mekanizması



Şekil 4.27.e: a/t: 0,75 a/c: 0,60 oranına sahip kompozit malzemenin hasar mekanizması

# 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, tek yönde takviyeli epoksi kompozit malzemenin eksenel yükleme altında kırılma davranışları incelenmiştir. İlk olarak malzemenin mekanik özellikleri belirlenmiştir. Hazırlanan deney numunelerine farklı a/c (0.20, 0.30, 0.40, 0.50, 0.60) ve farklı a/t (0.30, 0.45, 0.60, 0.75) oranlarında eliptik yüzey çatlakları açılmıştır. Hazırlanan tüm numuneler eksenel yüklemeye tabi tutularak kırılma davranışları incelenmiştir. Hazırlanan numuneler ve çekme deneyleri ASTM standartlarına uygun olarak yapılmıştır. Deneyler maksimum 400 kN' luk yüke ayarlanmış çekme test cihazında sabit ilerleme hızında yapılmıştır. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıya çıkarılmıştır.

**1.** Kırılma anındaki eksenel yük, a/t oranı sabit a/c: 0.20, 0.30, 0.40, 0.50, 0.60 oranlı numunelerde, aynı sırayla giderek azalmıştır. Beklenildiği gibi en düşük eksenel yük a/c: 0,60 oranlı numunede olurken, en yüksek eksenel yük a/c: 0,20 oranlı numune de olmuştur.

**2.** a/t oranının sabit kalması ve a/c oranının artması ile çatlak boyutu genişlik yönünde azalmıştır. Böylece a/c oranı düşük olan numune de delaminasyon alanı ve yüzeydeki çatlak ilerlemesi a/c oranı büyük olan numuneye göre daha fazla olmuştur.

**3**. a/t oranı arttıkça tabakalar arası ayrılma ve delaminasyon alanı miktarı da artmıştır.

**4.** ASTM standartlarına göre hazırlanan numunelerde farklı a/t ve a/c oranlarına sahip olmasına rağmen standart gereği aynı numune genişliğine sahip olan numunelerde kırılma anındaki yüklerin eşit sayılabileceği, delaminasyon alanlarının ise a/t: 0,30 'dan a/t:0,75' e kadar azalarak gittiği gözlenmiştir.

**5.** Derin çatlaklı numuneler kalınlık doğrultusunda ilerleme gösterdiği için, derin çatlaklı numunelerde delaminasyon sığ çatlaklı numunelere göre daha az meydana gelmiştir.

**6.** Numuneye uygulanan çekme yükü x-eksenine dikey konumda olan cam elyaf lifler, çatlak ilerleme miktarına ve matris ayrılmasına bağlı olarak kopmuştur. Kırılma anında stabil olmayan çatlak ilerlemesi oluştuğu için cam elyaflar kopmuş, matris ayrılması gerçekleşerek kırılma olmuştur.

**7.** Cam / epoksi kompozit malzeme kırılgan ve gevrek bir yapıya sahip olduğu için Şekil Değiştirme Enerji Boşalma Miktarı hesapları Lineer Elastik Kırılma Mekaniği kriterlerine göre yapılmıştır. Değişik a/t oranlarına sahip numuneler için karşılaştırmalı tablo aşağıdaki gibidir.

| | | **a/t: 0,30** | **a/t:0,45** | **a/t:0,60** | **a/t: 0,75** |
|---|---|---|---|---|---|
| G ($kJ/mm^2$) | **a/c: 0,20** | 13,525 | 5,856 | 2,205 | 6,845 |
| | **a/c: 0,30** | 13,891 | 16,06 | 17,699 | 4,234 |
| | **a/c: 0,40** | 26,185 | 14 | 11,357 | 1,717 |
| | **a/c: 0,50** | 43,747 | 14,945 | 9,28 | 0,774 |
| | **a/c: 0,60** | 72,893 | 63,743 | 18,56 | 13,636 |

**8.** Numunenin şekil değiştirme enerji boşalma miktarı sıra dışı değerler ihmal edilip hesaplandığında 14,776 $kJ/mm^2$ olduğu görülmüştür. Standart sapması yaklaşık 9' dur.

**9.** Şekil değiştirme enerji boşalma miktarı G, tüm a/c ve a/t oranlarında hesaplanmış ve G-Δa grafikleri çizilmiştir. Kompliyans metoduna göre hesaplanan G değerleri genelde kararlı bir artış göstermiştir. En yüksek G değeri a/t: 0,30 a/c: 0,60 oranlı numune de meydana gelmiştir ve değeri 72,893 $kJ/mm^2$'dir.

**10.** Eksenel yüke karşılık gelen uzama miktarları en yüksek değerlerini a/c'nin en düşük değeri olan 0,20'de almıştır. a/c değerleri arttıkça numunenin eksenel yönde uzaması azalmıştır.

**11.** Numunelerde açılan ön çatlakların boyu arttıkça malzeme daha kolay kırılır hale gelmiş ve kaldırabileceği yük miktarı giderek azalmıştır. Malzemedeki en kritik bölge çatlak ağzı bölgesi olmuş ve o bölgede artan gerilmeler malzemenin kırılmasına sebep olmuştur.

**12.** Elyaf hacim oranı 0,80 ve deney şartları dikkate alındığında hesaplanan G değerleri diğer çalışmalar dikkate alındığında kabul edilebilir durumdadır.

## 6. KAYNAKLAR


Akdemir, A., 1992, Yüzey Çatlaklı Cam Takviyeli Plastiklerde Gerilmeli Korozyon, *Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya*.

Akdemir, A., Tarakcıoğlu, N., Avcı, A., 2001, *Stress Corrosion Crack Growth in Glass Polyester Composites with Surface Crack, Composites: Part B*, Vol.32, pp-123-129.

Anderson, T.L., 1991, Fracture Mechanics Fundamentals and Applications.

Arıkan, H., 1990, Fiber Takviyeli Kompozit Malzemelerin Mühendislik Sabitlerinin Bulunması ve İmalatı, *Yüksek Lisans Semineri, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya*.

Arıkan, H., 2002, Çelik Tel Takviyeli Polimer Kompozitlerin Kırılma Davranışı, *Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya*.

Ataberk, N., 1997, Kırılma Mekaniği, *Doktora Semineri 1, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya*

Bao, G., Fan, B., Evans, A.G., 1992, *Mixed Mode Delamination Cracking in Brittle Matrix Composites, Mechanics of Materials*, Vol.13, pp-59-66.

Candan, C., 1998, Ultra Yoğun Moleküler Yapılı Kompozit Başlığın İmalatı, Balistik Özelliklerinin İncelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya*.

Çep, H., Zeytin, S., Alper, S., 2002, *Fatigue at Elevated Temperature*, Metal Dünyası, Vol.109, pp-72.

Eldeniz, İ., 1992, Yüzey Çatlaklı Kompozit Malzemelerde Yorulma Çatlak

Büyümesi ve Tabaka Ayrılması, *Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya*.

Ferreira, J.A.M., Costa, J.D.M., Reis, P.N.B., Richardson, M.O.W., 1999,*Analysis of Fatigue and Damage in Glass Fibre Reinforced Polypropylene Composite Materials, Composites Science and Technology*, Vol.59, pp-1461-1467.

Fett, T., 2000, *Estimation of Stress Intensity Factors for Semi Elliptical Surface Cracks, Engineering Fracture Mechanics*, Vol.66, pp-349-356.

Gavgalı, M., 1990, Sabit Genlik Dalgalı Gerilme Altında Yorulma Çatlağı İlerlemesi, *Doktora 1 Semineri, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.*

Güldü, İ., 1995, Cam Takviyeli Plastik Malzemelerde Takviye Açısının Kırılma Davranışına Etkisi*, Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya*.

Gülakman, A., 2008, Cam/Epoksi Malzemesinin Üretimi, Mekanik Özelliklerinin Tespiti ve Ara Yüzey Kırılma Tokluğunun Hesaplanması, *Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.*

He, M.Y., Hutchinson, J.W., 2000, *Surface Crack Subject to Mixed Mode Loading, Engineering Fracture Mechanics*, Vol.65, pp-1-14.

Hertzberg, R.W., 1996, Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials, John Wiley&Sons.

Hull, D., 1981, An Introduction of Composite Materials.

Irwin, G.R., 1957, *Analysis of Stresses and Strains Near The End of Crack Traversing a Plate, Transactions ASME*, J. Appl. Mech., pp.24.

Jones, R.M., 1975, Mechanics of Composite Materials.

Nalla, R.K., Campbell, J.P., Ritchie, R.O., 2002, *International Journal of Fatigue*, Vol.24, pp-1047-1062.

Newman, J.C. Jr., Raju, I.S., 1979, *Analysis of Surface Cracks in Finite Plates Under Tension or Bending Loads*, NASA TP 1578.

O'Brien, T.K., Characterization, Analysis and Prediction of Delamination in Composites Using Fracture Mechanics.

Önal, G., 2002, Yüzey Çatlaklı 5086 Al-Mg Alaşımının Yorulma Davranışları, *Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.*

Paris, C.P., Sih, G.C., 1965, Stress Analysis of Cracks, Fracture Toughness Testing and It's Aplications, ASTM STP No.381, *American Society for Testing and Marerials*, Philadelphia.

Philippidis, T.P., Vassilopoulos, A.P., 1999, Fatigue of Composite Laminates Under off-axis Loading, *International Journal of Fatigue*, Vol.21,pp-253-262.

Song, P.S., Sheu, B.C., Shieh, Y.L., 2002, Prediction of Semi Elliptical Surface Crack Growth in 2024-T4 Aluminium Alloy, International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol.79, pp-273-278.

Suo, Z., Hutchinson, J.W., 1989, Steady State Cracking in Brittle SubstratesBeneath Adherent Films, J.Solids Structures, Vol.25, pp-1337- 1353.

Sorucu, A., 2007, Orthotropic Malzemelerde Çatlak İlerlemesi ve Kırılma Tokluğu Tayini, *Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir*

Tong, J., 2002, Characteristics of Fatigue Crack Growth in GFRP Laminates, *International Journal of Fatigue*, Vol.24, pp-291-297.

Yngvesson, M., Nilsson, F., 1999, Fatigue Crack Growth of Surface Cracks Under Non-Symmetric Loading, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol.63, pp-375-393.

Zahavi, E., Torbilo, V., 1996, *Fatigue Design Life Expectancy of Machine Parts.*

# 7. EKLER

## EK 1 a) a/t: 0,30 a/c: 0,20 oranlı numuneye ait deney sonuçları

| P (N) | δ (mm) | COD (mm) | A ($mm^2$) | C:COD/P mm/N (1E-05) | G $kJ/mm^2$ |
|---|---|---|---|---|---|
| 5540 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,039 |
| 11080 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,16 |
| 16600 | 0,9 | 0 | 0 | 5,42 | 0,358 |
| 22170 | 1,5 | 0,52 | 21 | 6,76 | 0,638 |
| 27700 | 1,5 | 0,52 | 92 | 5,42 | 0,997 |
| 33260 | 1,875 | 0,52 | 96 | 5,64 | 1,438 |
| 38800 | 1,9 | 0,55 | 187 | 4,9 | 1,957 |
| 44340 | 1,9 | 0,66 | 439 | 4,29 | 2,555 |
| 49860 | 2,475 | 0,83 | 739 | 4,96 | 3,231 |
| 55400 | 2,65 | 0,83 | 875 | 4,78 | 3,989 |
| 60940 | 3,15 | 1,33 | 925 | 5,17 | 4,827 |
| 66480 | 4,5 | 1,73 | 1112 | 6,77 | 5,745 |
| 72020 | 4,66 | 2,25 | 1210 | 6,47 | 6,723 |
| 77560 | 4,95 | 2,315 | 1265 | 6,38 | 7,82 |
| 83100 | 6 | 2,36 | 1280 | 7,22 | 8,997 |
| 88640 | 6,225 | 2,63 | 1300 | 7,03 | 10,214 |
| 94180 | 7,05 | 2,63 | 1300 | 7,49 | 11,53 |
| 102000 | 9 | 2,94 | 1340 | 8,42 | 13,525 |

## EK 1 b) a/t: 0,30 a/c: 0,30 oranlı numuneye ait deney sonuçları

| P (N) | δ (mm) | COD (mm) | A ($mm^2$) | C:COD/P mm/N (1E-05) | G $kJ/mm^2$ |
|---|---|---|---|---|---|
| 12100 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,512 |
| 24300 | 2,13 | 0,27 | 11,55 | 8,76 | 2,066 |
| 36560 | 3,2 | 0,51 | 23,87 | 8,75 | 4,66 |
| 48750 | 4,53 | 0,51 | 188,86 | 9,29 | 8,317 |
| 60500 | 5,86 | 1,88 | 659 | 9,69 | 12,81 |
| 63000 | 8 | 3,645 | 900 | 12,7 | 13,891 |

## EK 1 c) a/t: 0,30 a/c: 0,40 oranlı numuneye ait deney sonuçları

| P (N) | δ (mm) | COD (mm) | A ($mm^2$) | C:COD/P mm/N (1E-05) | G $kJ/mm^2$ |
|---|---|---|---|---|---|
| 86300 | 0,25 | 0 | 0 | 2,89 | 0,409 |
| 17250 | 0,9 | 0 | 0 | 5,22 | 1,636 |
| 25880 | 1,1 | 0,23 | 16 | 4,25 | 3,683 |
| 34500 | 1,4 | 0,38 | 21 | 4,06 | 6,546 |
| 43130 | 2,1 | 0,38 | 46 | 4,87 | 10,23 |
| 51750 | 3,7 | 0,55 | 103,5 | 7,15 | 14,729 |
| 60380 | 5 | 1,34 | 219 | 8,28 | 20,051 |
| 69000 | 6 | 2,4 | 467 | 8,69 | 26,185 |

**EK 1 d) a/t: 0,30 a/c: 0,50 oranlı numuneye ait deney sonuçları**

| P (N) | δ (mm) | COD (mm) | A ($mm^2$) | C:COD/P mm/N (1E-05) | G $kJ/mm^2$ |
|---|---|---|---|---|---|
| 5250 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,385 |
| 10500 | 0,7 | 0 | 0 | 6,67 | 1,538 |
| 15750 | 1,25 | 0 | 0 | 7,94 | 3,46 |
| 21000 | 3 | 0,21 | 14 | 14,28 | 6,152 |
| 26250 | 3,75 | 0,29 | 14 | 14,28 | 9,612 |
| 31500 | 4,2 | 0,29 | 14 | 13,33 | 13,842 |
| 36750 | 5 | 0,29 | 18,45 | 13,61 | 18,84 |
| 42000 | 6 | 0,29 | 18,45 | 14,28 | 24,608 |
| 47250 | 6,25 | 0,88 | 18,45 | 13,23 | 31,144 |
| 52500 | 6,8 | 0,88 | 82,28 | 12,95 | 38,45 |
| 56000 | 7,5 | 0,98 | 173 | 13,39 | 43,747 |

**EK 1 e) a/t: 0,30 a/c:0,60 oranlı numuneye ait deney sonuçları**

| P (N) | δ (mm) | COD (mm) | A ($mm^2$) | C:COD/P mm/N (1E-05) | G $kJ/mm^2$ |
|---|---|---|---|---|---|
| 4140 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,444 |
| 8280 | 0,4 | 0 | 0 | 4,83 | 1,779 |
| 12420 | 0,5 | 0 | 0 | 4,03 | 4 |
| 16960 | 0,75 | 0 | 0 | 4,42 | 7,464 |
| 20700 | 1 | 0 | 0 | 4,83 | 11,119 |
| 24840 | 1,25 | 0 | 0 | 5,03 | 16,012 |
| 28980 | 2,15 | 0 | 0 | 7,42 | 21,793 |
| 33130 | 3 | 0 | 0 | 9,06 | 28,483 |
| 37260 | 3,75 | 0 | 0 | 10,06 | 36,027 |
| 41400 | 5 | 0,617 | 22,53 | 12,08 | 44,447 |
| 45500 | 5,8 | 0,62 | 22,53 | 12,75 | 53,723 |
| 49680 | 7 | 0,62 | 31,83 | 14,1 | 64,047 |
| 53000 | 7,8 | 1,01 | 189 | 14,72 | 72,893 |

**EK 1 f) a/t: 0,45 a/c: 0,20 oranlı numuneye ait deney sonuçları**

| P (N) | δ (mm) | COD (mm) | A ($mm^2$) | C:COD/P mm/N (1E-05) | G $kJ/mm^2$ |
|---|---|---|---|---|---|
| 9000 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,0324 |
| 18000 | 1,375 | 0 | 0 | 7,64 | 0,13 |
| 27000 | 2,612 | 0 | 0 | 9,69 | 0,291 |
| 36000 | 2,887 | 0,33 | 24 | 8,02 | 0,518 |
| 45000 | 3,987 | 0,33 | 127 | 8,86 | 0,81 |
| 54000 | 4,125 | 0,33 | 253 | 7,64 | 1,116 |
| 63000 | 4,537 | 0,656 | 579 | 7,20 | 1,588 |
| 72000 | 5,5 | 0,97 | 929 | 7,64 | 2,074 |
| 81000 | 6,875 | 0,97 | 1168 | 8,49 | 2,624 |
| 90000 | 7,975 | 2,48 | 2102 | 8,86 | 3,24 |
| 99000 | 8,45 | 3,223 | 2345 | 8,54 | 3,92 |
| 108000 | 9,625 | 3,287 | 2483 | 8,91 | 4,665 |
| 121000 | 11 | 4,064 | 2903 | 9,1 | 5,856 |

**EK 1 g) a/t: 0,45 a/c: 0,30 oranlı numuneye ait deney sonuçları**

| P (N) | δ (mm) | COD (mm) | A ($mm^2$) | C:COD/P mm/N (1E-05) | G $kJ/mm^2$ |
|---|---|---|---|---|---|
| 6070 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,055 |
| 12170 | 0,9 | 0 | 0 | 7,4 | 0,222 |
| 28250 | 1,875 | 0,43 | 31,5 | 6,64 | 0,499 |
| 24340 | 2,7 | 0,43 | 107 | 11,1 | 0,888 |
| 30340 | 2,85 | 0,465 | 192 | 9,39 | 1,38 |
| 36500 | 3,75 | 0,82 | 335 | 10,27 | 1,998 |
| 42600 | 4,4 | 1,79 | 573 | 10,34 | 2,722 |
| 48700 | 4,95 | 1,94 | 610 | 10,16 | 3,557 |
| 54700 | 5,25 | 2,28 | 610 | 9,6 | 4,488 |
| 60860 | 5,4 | 2,3 | 746 | 8,87 | 5,523 |
| 66950 | 6,15 | 2,35 | 765 | 9,2 | 6,723 |
| 73000 | 6,75 | 2,46 | 791 | 9,25 | 7,998 |
| 79120 | 6,85 | 2,6 | 823 | 8,66 | 9,39 |
| 85200 | 7,65 | 2,645 | 835 | 8,97 | 10,888 |
| 91300 | 8,4 | 2,77 | 887 | 9,2 | 12,5 |
| 97300 | 8,9 | 3,08 | 887 | 9,15 | 14,2 |
| 103470 | 8,95 | 3,28 | 890 | 8,65 | 16,06 |

**EK 1 h) a/t: 0,45 a/c: 0,40 oranlı numuneye ait deney sonuçları**

| P (N) | δ (mm) | COD (mm) | A ($mm^2$) | C:COD/P mm/N (1E-05) | G $kJ/mm^2$ |
|---|---|---|---|---|---|
| 8600 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,104 |
| 17240 | 2 | 0 | 0 | 11,6 | 0,416 |
| 25860 | 2,4 | 0,47 | 16 | 9,28 | 0,93 |
| 34480 | 4 | 0,47 | 23 | 11,6 | 1,664 |
| 43100 | 4,2 | 0,54 | 45 | 9,74 | 2,6 |
| 51700 | 6 | 0,58 | 87 | 11,6 | 3,742 |
| 60300 | 6,3 | 0,58 | 151 | 10,44 | 5,556 |
| 68960 | 8 | 1,30 | 249 | 11,6 | 6,658 |
| 77580 | 8,4 | 1,55 | 414 | 10,8 | 8,426 |
| 86000 | 8,75 | 1,95 | 516 | 10,2 | 10,354 |
| 94800 | 9,5 | 2,69 | 607 | 10 | 12,582 |
| 100000 | 10,4 | 3,1 | 645 | 10,4 | 14 |

**EK 1 ı) a/t: 0,45 a/c: 0,50 oranlı numuneye ait deney sonuçları**

| P (N) | δ (mm) | COD (mm) | A ($mm^2$) | C:COD/P mm/N (1E-05) | G $kJ/mm^2$ |
|---|---|---|---|---|---|
| 7500 | 0,25 | 0 | 0 | 3,33 | 0,172 |
| 15000 | 0,6 | 0 | 0 | 4 | 0,686 |
| 22500 | 0,9 | 0 | 0 | 4 | 1,544 |
| 30000 | 1,5 | 0 | 0 | 5 | 2,745 |
| 37500 | 2 | 0,22 | 54 | 5,33 | 4,289 |
| 45000 | 3 | 0,22 | 101,25 | 6,66 | 6,176 |
| 52500 | 5 | 0,24 | 180 | 9,52 | 8,406 |
| 60000 | 5,5 | 1,45 | 547 | 9,17 | 10,98 |
| 67500 | 7,5 | 4,19 | 987 | 11,11 | 13,896 |
| 70000 | 7,8 | 5 | 1161 | 11,11 | 14,945 |

**EK 1 i) a/t: 0,45 a/c: 0,60 oranlı numuneye ait deney sonuçları**

| P (N) | δ (mm) | COD (mm) | A ($mm^2$) | C:COD/P mm/N (1E-05) | G $kJ/mm^2$ |
|---|---|---|---|---|---|
| 4780 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,325 |
| 9570 | 1 | 0 | 0 | 10,44 | 1,3 |
| 14350 | 1,15 | 0 | 0 | 8 | 2,924 |
| 19140 | 1,4 | 0 | 0 | 7,3 | 5,202 |
| 23920 | 1,6 | 0 | 23 | 6,7 | 8,125 |
| 28700 | 1,75 | 0,25 | 23 | 6,1 | 11,696 |
| 33500 | 2,25 | 0,25 | 55 | 6,71 | 15,936 |
| 38280 | 3,15 | 0,36 | 58 | 8,23 | 20,808 |
| 43000 | 4 | 0,7 | 58 | 9,3 | 26,256 |
| 47800 | 4,75 | 0,7 | 76 | 9,3 | 32,444 |
| 52600 | 5 | 1,06 | 122 | 9,5 | 39,287 |
| 57400 | 6 | 1,2 | 135 | 10,45 | 46,785 |
| 62200 | 7 | 1,4 | 178 | 11,25 | 54,937 |
| 67000 | 8 | 1,4 | 202 | 11,94 | 63,743 |

**EK 1 j) a/t: 0,60 a/c: 0,20 oranlı numuneye ait deney sonuçları**

| P (N) | δ (mm) | COD (mm) | A ($mm^2$) | C:COD/P mm/N (1E-05) | G $kJ/mm^2$ |
|---|---|---|---|---|---|
| 7240 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,0026 |
| 14480 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,01 |
| 21720 | 0,85 | 0 | 111 | 3,9 | 0,024 |
| 28960 | 1,65 | 0,15 | 157 | 5,7 | 0,042 |
| 36200 | 1,9 | 0,15 | 225 | 5,25 | 0,065 |
| 43440 | 2,8 | 0,15 | 386 | 6,44 | 0,094 |
| 50680 | 3,3 | 0,21 | 387 | 6,51 | 0,128 |
| 57930 | 3,5 | 0,40 | 611 | 6 | 0,168 |
| 65170 | 3,88 | 0,61 | 743 | 5,95 | 0,212 |
| 72410 | 4 | 0,61 | 758 | 5,52 | 0,262 |
| 79650 | 5,5 | 0,90 | 822 | 6,9 | 0,317 |
| 86890 | 5,8 | 1,1 | 979 | 6,67 | 0,378 |
| 94130 | 6 | 1,4 | 985 | 6,37 | 0,443 |
| 101380 | 6,1 | 1,75 | 1085 | 6 | 0,514 |
| 108620 | 6,2 | 2 | 1171 | 5,7 | 0,59 |
| 115800 | 6,3 | 2,3 | 1322 | 5,44 | 0,67 |
| 123100 | 6,65 | 2,6 | 1382 | 5,4 | 0,758 |
| 130340 | 6,7 | 2,6 | 1395 | 5,14 | 0,849 |
| 137580 | 7 | 2,7 | 1398 | 5,09 | 0,946 |
| 144820 | 7,2 | 3,1 | 1625 | 4,97 | 1,046 |
| 152000 | 8 | 3,3 | 2250 | 5,26 | 1,155 |
| 159300 | 8,3 | 4 | 3391 | 5,21 | 1,269 |
| 166500 | 9 | 5 | 4210 | 5,4 | 1,386 |
| 173780 | 9,3 | 5 | 4225 | 5,35 | 1,51 |
| 181025 | 9,5 | 5,3 | 4366 | 5,25 | 1,638 |
| 188266 | 10 | 5,4 | 4484 | 5,31 | 1,773 |
| 195500 | 10,4 | 6,4 | 5522 | 5,32 | 1,911 |
| 202748 | 11,5 | 7,5 | 6446 | 5,67 | 2,055 |
| 210000 | 11,75 | 8 | 6909 | 5,59 | 2,205 |

**EK 1 k) a/t: 0,60 a/c: 0,30 oranlı numuneye ait deney sonuçları**

| P (N) | δ (mm) | COD (mm) | A ($mm^2$) | C:COD/P mm/N (1E-05) | G $kJ/mm^2$ |
|---|---|---|---|---|---|
| 7800 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,082 |
| 15600 | 0 | 0,58 | 78,46 | 0 | 0,328 |
| 23400 | 1,2 | 1,23 | 78,46 | 5,13 | 0,739 |
| 31200 | 2 | 1,23 | 152 | 6,41 | 1,314 |
| 39000 | 2 | 1,368 | 308 | 5,13 | 2,054 |
| 46800 | 2,2 | 1,368 | 556 | 4,7 | 2,957 |
| 54600 | 2,2 | 1,8 | 785 | 4,03 | 4,025 |
| 62450 | 3 | 2,386 | 872 | 4,8 | 5,265 |
| 70200 | 4 | 2,44 | 1132 | 5,7 | 6,653 |
| 78000 | 5,2 | 2,633 | 1449 | 6,67 | 8,213 |
| 85800 | 6 | 3,98 | 1694 | 7 | 9,938 |
| 93700 | 8 | 3,98 | 2028 | 8,54 | 11,853 |
| 101400 | 8,25 | 4,075 | 2120 | 8,14 | 13,88 |
| 109300 | 10 | 4,46 | 2347 | 9,15 | 16,128 |
| 114500 | 11 | 5,96 | 2390 | 9,6 | 17,699 |

**EK 1 l) a/t: 0,60 a/c: 0,40 oranlı numuneye ait deney sonuçları**

| P (N) | δ (mm) | COD (mm) | A ($mm^2$) | C:COD/P mm/N (1E-05) | G $kJ/mm^2$ |
|---|---|---|---|---|---|
| 6600 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,046 |
| 13270 | 1 | 0 | 0 | 7,53 | 0,183 |
| 19900 | 1,2 | 0 | 0 | 6,03 | 0,416 |
| 26500 | 2 | 0,42 | 20 | 7,55 | 0,737 |
| 33190 | 2,45 | 0,64 | 117 | 7,38 | 1,156 |
| 39800 | 2,8 | 0,75 | 247 | 7,04 | 1,663 |
| 46400 | 2,8 | 1,47 | 281 | 6,03 | 2,26 |
| 53100 | 3,2 | 1,90 | 351 | 6,03 | 2,96 |
| 59700 | 3,75 | 1,90 | 410 | 6,28 | 3,723 |
| 66380 | 4 | 2,13 | 473 | 6,03 | 4,627 |
| 73000 | 4,2 | 2,15 | 481 | 5,75 | 5,595 |
| 79600 | 4,65 | 2,15 | 495 | 5,84 | 6,653 |
| 86200 | 5,8 | 2,26 | 518 | 6,73 | 7,8 |
| 92900 | 6,4 | 2,33 | 632 | 6,9 | 9,062 |
| 99570 | 7,2 | 2,73 | 635 | 7,23 | 10,41 |
| 104000 | 8 | 2,95 | 635 | 7,69 | 11,357 |

**EK 1 m) a/t: 0,60 a/c: 0,50 oranlı numuneye ait deney sonuçları**

| P (N) | δ (mm) | COD (mm) | A ($mm^2$) | C:COD/P mm/N (1E-05) | G $kJ/mm^2$ |
|---|---|---|---|---|---|
| 6830 | 0,6 | 0 | 0 | 8,78 | 0,068 |
| 13660 | 0,9 | 0,14 | 12,06 | 6,59 | 0,27 |
| 20490 | 1,3 | 0,14 | 16 | 6,34 | 0,566 |
| 27300 | 2 | 0,14 | 82 | 7,33 | 1,08 |
| 34150 | 3 | 0,52 | 207 | 8,78 | 1,691 |
| 40980 | 3,8 | 0,70 | 312 | 9,27 | 2,435 |
| 47800 | 4 | 0,70 | 339 | 8,37 | 3,313 |
| 54600 | 4,3 | 0,97 | 356 | 7,87 | 4,323 |
| 61470 | 5 | 1,38 | 505 | 8,13 | 5,479 |
| 68300 | 6 | 1,49 | 615 | 8,78 | 6,764 |
| 75100 | 7,6 | 2,5 | 855 | 10,11 | 8,178 |
| 80000 | 8 | 3,32 | 895 | 10 | 9,28 |

**EK 1 n) a/t: 0,60 a/c: 0,60 oranlı numuneye ait deney sonuçları**

| P (N) | δ (mm) | COD (mm) | A ($mm^2$) | C:COD/P mm/N (1E-05) | G $kJ/mm^2$ |
|---|---|---|---|---|---|
| 9440 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,258 |
| 18900 | 1,1 | 0 | 0 | 5,82 | 1,036 |
| 28340 | 1,35 | 0,17 | 20 | 4,76 | 2,329 |
| 37800 | 2,1 | 0,17 | 20 | 5,55 | 4,144 |
| 47240 | 3,1 | 0,33 | 40 | 6,56 | 6,472 |
| 56700 | 4,75 | 0,52 | 99 | 8,38 | 9,323 |
| 66140 | 5,5 | 1,03 | 322 | 8,32 | 12,686 |
| 75600 | 6,2 | 1,7 | 462 | 8,2 | 16,574 |
| 80000 | 7,5 | 4,42 | 911 | 9,4 | 18,56 |

**EK 1 o) a/t: 0,75 a/c: 0,20 oranlı numuneye ait deney sonuçları**

| P (N) | δ (mm) | COD (mm) | A ($mm^2$) | C:COD/P mm/N (1E-05) | G $kJ/mm^2$ |
|---|---|---|---|---|---|
| 6160 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,008 |
| 12330 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,03 |
| 18500 | 0,73 | 0 | 0 | 3,95 | 0,068 |
| 24660 | 1,55 | 0,11 | 0 | 6,28 | 0,121 |
| 30830 | 1,7 | 0,11 | 0 | 5,5 | 0,19 |
| 37000 | 2,4 | 0,11 | 0 | 6,48 | 0,274 |
| 43160 | 2,8 | 0,17 | 109 | 6,48 | 0,373 |
| 49330 | 3,2 | 0,39 | 132 | 6,49 | 0,487 |
| 55500 | 3,3 | 0,39 | 239 | 5,95 | 0,616 |
| 61660 | 3,4 | 0,39 | 261 | 5,51 | 0,759 |
| 67800 | 3,55 | 0,74 | 274 | 5,24 | 0,919 |
| 74000 | 3,75 | 0,74 | 480 | 5,08 | 1,095 |
| 80160 | 4,8 | 1 | 553 | 5,99 | 1,285 |
| 86330 | 5,25 | 1 | 560 | 6,08 | 1,491 |
| 92500 | 6,3 | 1 | 691 | 6,81 | 1,711 |
| 98660 | 6,65 | 1,42 | 700 | 6,74 | 1,947 |
| 104830 | 6,8 | 1,56 | 1057 | 6,49 | 2,198 |
| 111000 | 7,15 | 1,85 | 1435 | 6,44 | 2,464 |
| 123300 | 7,9 | 2,3 | 1875 | 6,4 | 3,040 |
| 129500 | 8,45 | 2,6 | 2891 | 6,52 | 3,354 |
| 135600 | 9 | 2,6 | 3216 | 6,63 | 3,677 |
| 141800 | 9,65 | 2,62 | 3355 | 6,8 | 4,022 |
| 148000 | 10 | 3,22 | 3894 | 6,76 | 4,38 |
| 154160 | 10,3 | 5 | 4402 | 6,68 | 4,753 |
| 160330 | 11,25 | 5 | 4609 | 7 | 5,141 |
| 166500 | 11,75 | 5,74 | 5619 | 7,06 | 5,544 |
| 172660 | 12,25 | 6,23 | 5675 | 7,1 | 5,951 |
| 178830 | 12,75 | 8,65 | 6671 | 7,13 | 6,396 |
| 185000 | 13 | 8,65 | 6995 | 7,03 | 6,845 |

**EK 1 p) a/t: 0,75 a/c: 0,30 oranlı numuneye ait deney sonuçları**

| P (N) | δ (mm) | COD (mm) | A ($mm^2$) | C:COD/P mm/N (1E-05) | G $kJ/mm^2$ |
|---|---|---|---|---|---|
| 7100 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,023 |
| 14200 | 0,6 | 0 | 0 | 4,22 | 0,09 |
| 21290 | 0,66 | 0,22 | 138 | 3,1 | 0,204 |
| 28300 | 1,875 | 0,286 | 523 | 6,63 | 0,36 |
| 35480 | 3 | 0,286 | 855 | 8,47 | 0,566 |
| 42580 | 3,225 | 0,949 | 1784 | 7,59 | 0,818 |
| 49600 | 3,5 | 1,495 | 2777 | 7,06 | 1,107 |
| 56800 | 3,8 | 2,445 | 4020 | 6,7 | 1,452 |
| 63800 | 4,725 | 2,9 | 4480 | 7,4 | 1,832 |
| 70970 | 5,625 | 3,79 | 4675 | 7,93 | 2,266 |
| 78000 | 6,45 | 4,25 | 4680 | 8,3 | 2,738 |
| 85100 | 6,8 | 4,25 | 4793 | 8 | 3,259 |
| 92900 | 7,6 | 4,52 | 4795 | 8,18 | 3,884 |
| 97000 | 9 | 6,236 | 4915 | 9,28 | 4,234 |

**EK 1 r) a/t: 0,75 a/c: 0,40 oranlı numuneye ait deney sonuçları**

| P (N) | δ (mm) | COD (mm) | A ($mm^2$) | C:COD/P Mm/N (1E-05) | G $kJ/mm^2$ |
|---|---|---|---|---|---|
| 7200 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,008 |
| 14400 | 1,33 | 0 | 0 | 9,24 | 0,031 |
| 21590 | 1,83 | 0 | 31 | 8,47 | 0,072 |
| 28780 | 3,083 | 0,05 | 64 | 10,7 | 0,124 |
| 35600 | 4,5 | 0,16 | 155 | 12,64 | 0,19 |
| 43200 | 5,083 | 0,30 | 260 | 11,76 | 0,28 |
| 50380 | 5,83 | 0,30 | 417 | 11,57 | 0,38 |
| 57500 | 6,416 | 0,60 | 675 | 11,16 | 0,496 |
| 64700 | 6,66 | 0,60 | 697 | 10,29 | 0,628 |
| 71900 | 6,916 | 0,73 | 864 | 9,62 | 0,775 |
| 79170 | 7,166 | 1,2 | 1230 | 9,05 | 0,94 |
| 86360 | 8 | 1,44 | 1584 | 9,26 | 1,118 |
| 93560 | 8,5 | 1,88 | 1798 | 9,08 | 1,313 |
| 100700 | 9,25 | 3,18 | 1868 | 9,18 | 1,521 |
| 107000 | 10 | 4,9 | 1900 | 9,34 | 1,717 |

**EK 1 s) a/t: 0,75 a/c: 0,50 oranlı numuneye ait deney sonuçları**

| P (N) | δ (mm) | COD (mm) | A ($mm^2$) | C:COD/P Mm/N (1E-05) | G $kJ/mm^2$ |
|---|---|---|---|---|---|
| 6940 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,0048 |
| 13890 | 1,5 | 0,2 | 0 | 10,8 | 0,019 |
| 20840 | 1,91 | 0,5 | 20 | 9,16 | 0,043 |
| 27700 | 3,16 | 0,586 | 26,5 | 11,4 | 0,076 |
| 34700 | 4,16 | 0,75 | 141 | 12 | 0,12 |
| 41680 | 4,25 | 0,87 | 322 | 10,2 | 0,173 |
| 48600 | 4,33 | 1,03 | 489 | 8,9 | 0,236 |
| 55570 | 4,5 | 1,69 | 661 | 8,09 | 0,309 |
| 62520 | 4,83 | 1,69 | 764 | 7,72 | 0,39 |
| 69400 | 5,08 | 1,97 | 764 | 7,32 | 0,481 |
| 76400 | 5,17 | 2,23 | 765 | 6,76 | 0,584 |
| 83300 | 6,66 | 2,33 | 765 | 8 | 0,693 |
| 88000 | 10 | 4,63 | 765 | 11,36 | 0,774 |

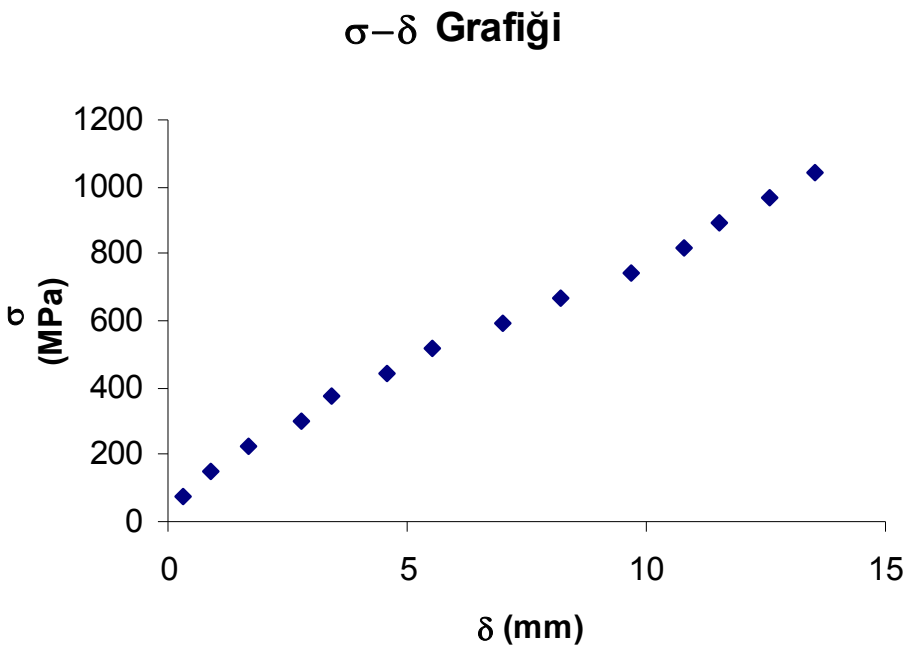
**EK 1 t) a/t: 0,75 a/c: 0,60 oranlı numuneye ait deney sonuçları**

| P (N) | δ (mm) | COD (mm) | A ($mm^2$) | C:COD/P Mm/N (1E-05) | G $kJ/mm^2$ |
|---|---|---|---|---|---|
| 9620 | 1 | 0 | 0 | 10,4 | 0,213 |
| 19250 | 1,6 | 0,08 | 0 | 8,31 | 0,852 |
| 28880 | 2 | 0,26 | 28 | 6,93 | 1,907 |
| 38500 | 4,35 | 0,63 | 207 | 11,3 | 3,409 |
| 48130 | 5,9 | 1,02 | 303 | 12,26 | 5,328 |
| 57750 | 6,1 | 1,4 | 442 | 10,56 | 7,67 |
| 67380 | 7 | 2,05 | 444 | 10,39 | 10,44 |
| 77000 | 8 | 2,29 | 444 | 10,4 | 13,636 |

**EK 2) C-A grafiklerinden eğri uydurma ile elde edilen denklemler**

| Parametre | Eğri uydurma ile elde edilen denklem |
|---|---|
| a/t: 0,30 a/c: 0,20 | y= 0,0026x+ 3,6392 |
| a/t: 0,30 a/c: 0,30 | y= 0,007x+6,1155 |
| a/t: 0,30 a/c: 0,40 | y= 0,011x+4,4708 |
| a/t: 0,30 a/c: 0,50 | y= 0,0279x+10,375 |
| a/t: 0,30 a/c: 0,60 | y=0,0519x+6,887 |
| a/t: 0,45 a/c: 0,20 | y= 0,0008x+6,926 |
| a/t: 0,45 a/c: 0,30 | y= 0,003x+7,0187 |
| a/t: 0,45 a/c: 0,40 | y= 0,0028x+9,1231 |
| a/t: 0,45 a/c: 0,50 | y= 0,0061x+5,0892 |
| a/t: 0,45 a/c: 0,60 | y= 0,0284x+6,3416 |
| a/t: 0,60 a/c: 0,20 | y= 0,0001x+4,953 |
| a/t: 0,60 a/c: 0,30 | y= 0,0027x+2,7901 |
| a/t: 0,60 a/c: 0,40 | y= 0,0021x+5,5421 |
| a/t: 0,60 a/c: 0,50 | y= 0,0029x+7,3486 |
| a/t: 0,60 a/c: 0,60 | y= 0,0058x+5,124 |
| a/t: 0,75 a/c: 0,20 | y= 0,0004x+5,1862 |
| a/t: 0,75 a/c: 0,30 | y= 0,0009x+4,2752 |
| a/t: 0,75 a/c: 0,40 | y= 0,0003x+9,2123 |
| a/t: 0,75 a/c: 0,50 | y= 0,0002x+8,5269 |
| a/t: 0,75 a/c: 0,60 | y= 0,0046x+8,989 |

**EK 3) Çatlaksız numuneye ait Gerilme-Şekil Değiştirme Grafiği**



# ÖZGEÇMİŞ

## KİŞİSEL BİLGİLER


| | | |
|---|---|---|
| **Adı Soyadı** | **:** | Cumali DİNCER |
| **Uyruğu** | **:** | T.C. |
| **Doğum Yeri ve Tarihi** | **:** | Şarkikaraağaç / 1982 |
| **Telefon** | **:** | 0530 543 25 84 |
| **Faks** | **:** | |
| **e-mail** | **:** | cumalidincer@hotmail.com |


## EĞİTİM

| **Derece** | | **Adı, İlçe, İl** | **Bitirme Yılı** |
|---|---|---|---|
| **Lise** | **:** | Şarkikaraağaç Lisesi | 1999 |
| **Üniversite** | **:** | Selçuk Üniversitesi | 2003 |
| **Yüksek Lisans** | **:** | Selçuk Üniversitesi | Devam |
| **Doktora** | **:** | | |

## İŞ DENEYİMLERİ

| **Yıl** | **Kurum** | **Görevi** |
|---|---|---|
| 2005-2006 | Ünpaş Doğalgaz | Mühendis |
| 2006- | T.Ş.F.A.Ş. Erzincan Şeker Fabrikası | Mühendis |

**UZMANLIK ALANI**
Doğalgaz Tesisatı, Mekanik, Makine İmalat
**YABANCI DİLLER**
İngilizce

## BELİRTMEK İSTEĞİNİZ DİĞER ÖZELLİKLER

## YAYINLAR


1) Crack Growth in Glass/Epoxy Composites with Surface Crack, 7th International Fracture Conference, 19-21 October 2005, İzmit, TURKEY.