

**T.C.  
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ARALDITE 2015 EPOKSİ YAPIŞTIRICI MOD I KIRILMA TOKLUK  
DEĞERİNİN DENEY VE SONLU ELEMANLAR METODU İLE  
BELİRLENMESİ**

**ENGİN ERBAYRAK**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI  
KONSTRÜKSİYON PROGRAMI**

**DANIŞMAN  
DOÇ. DR. HALİL ÖZER**

**İSTANBUL 2012**

**T.C.**  
**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ARALDITE 2015 EPOKSİ YAPIŞTIRICI MOD I KIRILMA TOKLUK  
DEĞERİNİN DENEY VE SONLU ELEMANLAR METODU İLE  
BELİRLENMESİ**

Engin ERBAYRAK tarafından hazırlanan tez çalışması 27.12.2012 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

**Tez Danışmanı**

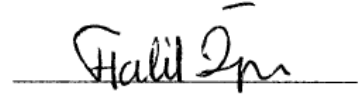
Doç. Dr. Halil ÖZER

Yıldız Teknik Üniversitesi

**Jüri Üyeleri**

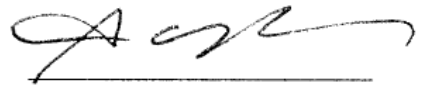
Doç. Dr. Halil ÖZER

Yıldız Teknik Üniversitesi



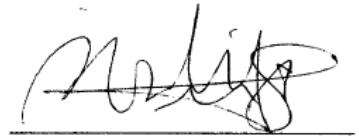
Prof. Dr. Adnan PARLAK

Yıldız Teknik Üniversitesi



Yrd. Doç. Dr. İbrahim EREN

Yıldız Teknik Üniversitesi



## ÖNSÖZ

---

Tez çalışmam boyunca yardımlarını hiç esirgemeyen danışman hocam, Yıldız Teknik Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Mekanik A.B.D öğretim üyelerinden Doç. Dr. Halil ÖZER' e teşekkür ederim. Deneysel çalışmalarım boyunca bilgi ve tecrübesi ile yardımlarını esirgemeyen Arş. Gör. Özkan ÖZ' e teşekkür ederim. Her anımda desteği ile yanımda olan ailem ve müstakbel eşim Seda DEMİRCEYLAN' a teşekkürlerimi sunarım.

Aralık, 2012

Engin ERBAYRAK

## İÇİNDEKİLER

|                                                        | Sayfa |
|--------------------------------------------------------|-------|
| SİMGE LİSTESİ.....                                     | vii   |
| KISALTMA LİSTESİ .....                                 | viii  |
| ŞEKİL LİSTESİ.....                                     | ix    |
| ÇİZELGE LİSTESİ .....                                  | x     |
| ÖZET .....                                             | xi    |
| ABSTRACT.....                                          | xii   |
| BÖLÜM 1                                                |       |
| GİRİŞ.....                                             | 1     |
| 1.1    Literatür Araştırması.....                      | 2     |
| 1.2    Tezin Amacı.....                                | 4     |
| 1.3    Orijinal Katkı .....                            | 5     |
| BÖLÜM 2                                                |       |
| YAPIŞTIRICILAR VE YAPIŞTIRMA BAĞLANTILARI.....         | 6     |
| 2.1    Yapıştırıcılar ve Yapıştırma Bağlantıları ..... | 6     |
| 2.2    Yapıştırıcılar .....                            | 6     |
| 2.2.1    Akrilik Yapıştırıcılar .....                  | 7     |
| 2.2.2    Epoksi Yapıştırıcılar .....                   | 7     |
| 2.2.3    Adezyon Kuvveti.....                          | 8     |
| 2.2.4    Kohezyon Kuvveti.....                         | 8     |
| 2.3    Formları Açısından Yapıştırıcılar .....         | 8     |
| 2.3.1    Macun Tip Yapıştırıcılar .....                | 8     |
| 2.3.2    Film Tip Yapıştırıcılar .....                 | 9     |
| 2.3.3    Düşük Viskositeli Yapıştırıcılar .....        | 9     |
| 2.3.4    Reçineler .....                               | 9     |
| 2.3.5    Düşük Yoğunluklu Yapıştırıcılar .....         | 9     |
| 2.3.6    Köpükler .....                                | 9     |

|                                                  |                                                                      |    |
|--------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|----|
| 2.4                                              | Yapıştırma Bağlantıları.....                                         | 9  |
| 2.4.1                                            | Tek Bindirmeli Yapıştırma Bağlantısı.....                            | 10 |
| 2.4.2                                            | Çift Bindirmeli Yapıştırma Bağlantısı.....                           | 10 |
| 2.4.3                                            | Basamaklı Bindirme Bağlantısı.....                                   | 11 |
| 2.4.4                                            | Eğimli Bindirme Bağlantısı.....                                      | 11 |
| 2.4.5                                            | Alın Bindirme Bağlantısı.....                                        | 11 |
| BÖLÜM 3                                          |                                                                      |    |
| KIRILMA MEKANİĞİ ve SONLU ELEMANLAR METODU ..... |                                                                      | 12 |
| 3.1                                              | Kırılma Mekanîği Temel Kavramları .....                              | 12 |
| 3.2                                              | Çatlak Ucunda Gerilme Dağılımı .....                                 | 14 |
| 3.3                                              | Sonlu Elemanlar Metodu .....                                         | 16 |
| 3.3.1                                            | 8 Düğümlü Dörtgen Eleman.....                                        | 16 |
| 3.3.1.1                                          | 8 Düğümlü Dörtgen İzoparametrik Elemanın Şekil Fonksiyonu ..         | 16 |
| 3.3.1.2                                          | Eleman Direngenlik Matrisi.....                                      | 21 |
| 3.3.2                                            | Genel Gerilme Şekil Değiştirme Bağlantıları .....                    | 23 |
| 3.3.2.1                                          | Düzlem Gerilme.....                                                  | 24 |
| 3.3.2.2                                          | Düzlem Şekil Değiştirme.....                                         | 25 |
| 3.3.3                                            | Eşdeğer Gerilmelerin Elde Edilmesi .....                             | 25 |
| 3.4                                              | J İntegrali Sonlu Eleman Formülasyonu.....                           | 26 |
| 3.5                                              | Sonlu Elemanlar Programı (Ansys) .....                               | 29 |
| BÖLÜM 4                                          |                                                                      |    |
| ÇİFT ANKASTRE KİRİŞ (ÇAK) DENEYİ.....            |                                                                      | 30 |
| 4.1                                              | Giriş .....                                                          | 30 |
| 4.2                                              | Çift Ankastre Kiriş Deneyi .....                                     | 30 |
| 4.2.1                                            | Çift Ankastre Kiriş Deneyinde Karşılaşılan Yapışma Hataları .....    | 36 |
| 4.2.2                                            | Mod I Enerji Serbest Kalma Oranı ve Kırılma Tokluğu .....            | 38 |
| 4.2.2.1                                          | Geliştirilmiş Kiriş Teorisi (Modified Beam Theory).....              | 38 |
| 4.2.2.2                                          | Komplians Kalibrasyon Metodu<br>(Compliance Calibration Method)..... | 40 |
| 4.2.2.3                                          | Alan Metodu .....                                                    | 42 |
| 4.2.3                                            | Sonlu Elemanlar Analizi .....                                        | 43 |
| BÖLÜM 5                                          |                                                                      |    |
| MİKRO YAPI ANALİZİ.....                          |                                                                      | 46 |
| 5.1                                              | Taramalı Elektron Mikroskop ile Mikro Yapı Analizi .....             | 46 |
| 5.2                                              | Yapıştırıcı Mikro Yapı Analizi .....                                 | 46 |
| BÖLÜM 6                                          |                                                                      |    |
| SONUÇ VE ÖNERİLER.....                           |                                                                      | 51 |
| KAYNAKLAR .....                                  |                                                                      | 53 |
| EK A .....                                       |                                                                      | 61 |

|                |    |
|----------------|----|
| ÖZGEÇMİŞ ..... | 64 |
|----------------|----|

## SİMGE LİSTESİ

---

|               |                                          |
|---------------|------------------------------------------|
| $a$           | Çatlak uzunluğu (mm)                     |
| $a_0$         | Başlangıç çatlak uzunluğu (mm)           |
| $b$           | Levha genişliği (mm)                     |
| $C$           | Komplians (mm/N)                         |
| $E$           | Elastisite Modülü (MPa)                  |
| $G_{Ic}$      | Mod I Enerji Serbest Kalma Oranı (N/mm)  |
| $h$           | Levha kalınlığı (mm)                     |
| $I$           | Atalet momenti (mm <sup>4</sup> )        |
| $K_{IC}$      | Mod I Kırılma Tokluğu (Mpa $\sqrt{mm}$ ) |
| $\nu$         | Poisson oranı                            |
| $\varepsilon$ | Birim şekil değiştirme                   |
| $\delta$      | Deplasman                                |

## KISALTMA LİSTESİ

---

|      |                                                                     |
|------|---------------------------------------------------------------------|
| ASTM | American Society for Testing and Material                           |
| CC   | Komplians Kalibrasyon Metodu (Compliance Calibration Method)        |
| ÇAK  | Çift Ankastre Kiriş (Double Cantilever Beam)                        |
| LEKM | Lineer Elastik Kırılma Mekaniği (Lineer Elastic Fracture Mechanics) |
| MBT  | Geliştirilmiş Kiriş Teorisi (Modified Beam Theory)                  |
| SEM  | Taramalı Elektron Mikroskop (Scanning Electron Microscope)          |

## ŞEKİL LİSTESİ

|                                                                                                    | Sayfa |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Şekil 2. 1 Tek bindirmeli yapıştırma bağlantısı .....                                              | 10    |
| Şekil 2. 2 Çift bindirmeli yapıştırma bağlantısı .....                                             | 11    |
| Şekil 2. 3 Basamaklı bindirme bağlantısı.....                                                      | 11    |
| Şekil 2. 4 Eğimli bindirme bağlantısı.....                                                         | 11    |
| Şekil 2. 5 Alın bindirme bağlantısı .....                                                          | 11    |
| Şekil 3. 1 Çatlak yüzeylerinin üç hareket şekli .....                                              | 13    |
| Şekil 3. 2 İki modun birlikte etkilemesi hali .....                                                | 13    |
| Şekil 3. 3 Çatlak ucu civarında oluşan gerilmeler.....                                             | 14    |
| Şekil 3. 4 8 Düğümlü dörtgen eleman.....                                                           | 16    |
| Şekil 3. 5 J integral hesabı için kullanılan tipik eğri .....                                      | 27    |
| Şekil 3. 6 J integral hesabında kullanılan eleman halkası .....                                    | 29    |
| Şekil 4. 1 Çift ankastre giriş deney (ÇAK) geometrik modeli .....                                  | 32    |
| Şekil 4. 2 Araldite 2015 yük- deplasman grafiği .....                                              | 33    |
| Şekil 4. 3 Araldite 2015 yük-deplasman grafiği .....                                               | 34    |
| Şekil 4. 4 Çift ankastre giriş çatlak ilerlemesi ölçümü.....                                       | 35    |
| Şekil 4. 5 a. Adesiv çatlak ilerlemesi , b. Yüzey sıyrılması, c. Koheziv açılma .....              | 37    |
| Şekil 4. 6 Yük –deplasman grafikleri: a. adesiv yüzey b. Yüzey sıyrılması<br>c. Kohesiv yüzey..... | 38    |
| Şekil 4. 7 Komplians-çatlak uzunluğu .....                                                         | 39    |
| Şekil 4. 8 MBT’ den elde edilen R eğrisi .....                                                     | 40    |
| Şekil 4. 9 Komplians-çatlak uzunluğu logaritmik grafiği .....                                      | 41    |
| Şekil 4. 10 CC’ den elde edilen R eğrisi .....                                                     | 42    |
| Şekil 4. 11 Çatlağın sonlu eleman ağ özellikleri.....                                              | 43    |
| Şekil 4. 12 Çift ankastre giriş sonlu elemanlar modeli .....                                       | 44    |
| Şekil 4. 13 Deforme olmuş bindirme modeli ve çatlak düğüm seçimi .....                             | 44    |
| Şekil 4. 14 Ansys sonlu elemanlar programı analiz sonuçları .....                                  | 45    |
| Şekil 5. 1 Çatlak ilerleme yolları.....                                                            | 47    |
| Şekil 5. 2 SEM görüntüleri : a. Literatür [26] b.2 Ton epoksi .....                                | 47    |
| Şekil 5. 3 Mikro yapı : a. 2 Ton epoksi b. Araldite 2015.....                                      | 48    |
| Şekil 5. 4 Çatlak yolu : a. Literatür [11] b. Araldite 2015 epoksi.....                            | 49    |
| Şekil 5. 5 Mikro yapı görüntüleri a. Araldite 2015 epoksi b. 2 Ton epoksi<br>c. Metakrilat .....   | 50    |

## ÇİZELGE LİSTESİ

---

|                                                                                                            | Sayfa |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Çizelge 2. 1 Yapıştırma bağlantı çeşitleri .....                                                           | 10    |
| Çizelge 4. 1 Araldite 2015 epoksi yapıştırıcı özellikleri .....                                            | 31    |
| Çizelge 4. 2 Çift ankastre kiriş deneyinde kullanılan program aşamaları.....                               | 33    |
| Çizelge 4. 3 Çift ankastre kiriş deneyinden elde edilen yük, deplasman,<br>çatlak uzunluğu değerleri ..... | 36    |
| Çizelge 6. 1 Çift ankastre kiriş için kırılma tokluk değerleri ve enerji serbest kalma<br>Oranı.....       | 52    |

## ÖZET

---

### ARALDITE 2015 EPOKSİ YAPIŞTIRICI MOD I KIRILMA TOKLUK DEĞERİNİN DENEY VE SONLU ELEMANLAR METODU İLE BELİRLENMESİ

Engin ERBAYRAK

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı  
Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Halil ÖZER

Bu çalışmada, Çift Ankastre Kiriş (ÇAK) deneyi ve sonlu elemanlar analizi ile yapıştırıcının Mod I Kırılma tokluk değeri ve Enerji serbest kalma oranı hesaplanmıştır. Deneyden, yük-deplasman ve çatlak uzunluk değerleri belirlenmiştir. Bu değerler kullanılarak Geliştirilmiş Kiriş Teorisi (Modified Beam Theory) ve Komplians Kalibrasyon yöntemi ile Mod I Enerji serbest kalma oranı hesaplanmıştır. Mod I Enerji serbest kalma oranı kullanılarak Araldite 2015 epoksi yapıştırıcı için kırılma tokluk değeri hesaplanmıştır. Ayrıca, deneyden elde edilen veriler kullanılarak, sonlu eleman analizi yapılmıştır.

Deney ve sonlu elemanlar analizinden elde edilen kırılma tokluk değerleri literatür değerleri ile karşılaştırılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Mod I Kırılma Tokluğu, Epoksi yapıştırıcı, Kırılma Mekaniği

---

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

## ABSTRACT

---

# DETERMINATION OF MODE I FRACTURE TOUGHNESS FOR ARALDITE 2015 EPOXY ADHESIVE BY EXPERIMENT AND FINITE ELEMENT METHOD

Engin ERBAYRAK

Department of Mechanical Engineering  
MSc. Thesis

Advisor: Assoc. Prof. Halil ÖZER

In this study; Double Cantilever Beam (DCB) experiment and finite element method were used to find mod I fracture toughness value and strain energy release rate of Araldite 2015 epoxy adhesive. Load-displacement values and crack lengths were determined from DCB experiment. Modified beam theory and compliance calibration method have been used to calculate Mod I strain energy release rate by using load-displacement values and crack lengths. In addition, Mod I fracture toughness value of Araldite 2015 epoxy adhesive has been obtained by using Mod I strain energy release rate. Additionally Finite element method has been done with DCB experimental values. As a result of this study, experimental and finite element method calculated results are also compared with literature result.

**Keywords:** Fracture Toughness, Epoxy Adhesive, Fracture mechanic

---

YILDIZ TECHNICAL UNIVERSITY  
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

## BÖLÜM 1

### GİRİŞ

Endüstride farklı yapıştırıcılar kullanılarak oluşturulan bindirme sistemlerinin önemi gün geçtikçe yaygınlaşmaya başlamıştır. Özellikle gemi, inşaat, otomotiv ve uçak sektörlerinde kullanım alanının arttığı gözlemlenmektedir.

Yapıştırıcı olarak kullanılan ilk malzemenin tarihçesi çok eskiye dayanmaktadır. Buna örnek olarak da ilkel kabilelerin kırılan çömlleklerini ağaç öz suyundan yaptıkları yapıştırıcı reçine ile birleştirmeleridir. 1700' lü yıllarda yapıştırıcılar yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Bu yıllarda hayvan derisinden yapıştırıcılar üretilmeye başlanmış ve ilk ticari fabrika Hollanda' da kurulmuştur. 1750 yılında İngiltere' de balıktan elde edilmiş hayvansal yapıştırıcının patenti alınmıştır. 1900' lerden itibaren hem bitkisel hem de hayvansal ürünlerden elde edilen yapıştırıcılar kullanılmaktadır [1].

Yapıştırıcıların kullanım alanlarının başında yapıştırma bağlantıları gelmektedir. Yapıştırma bağlantıları iki parçanın yapıştırma görevini yapan sentetik esaslı bir malzeme ile çözülmeyecek şekilde birleştirilmesiyle elde edilir. Parçalar arasında çok ince bir tabaka halinde bulunan yapıştırıcı çok defa kimyevi reaksiyonlar sonucu makro moleküllerin yardımı ile kürleşir [1].

Endüstride tek ve çift bindirmeli yapıştırma bağlantılı sistemler kullanılmaktadır. Yapıştırma bağlantılarının kalitesini; ortam şartları, kullanılacak olan yapıştırıcının mekanik özellikleri vb. etkilemektedir.

## 1.1 Literatür Araştırması

Baptiste vd. [2], bindirme yapıştırma bağlantısında kullanılan ECCOBOND45LV epoksi yapıştırıcının kırılma tokluk, kayma, soyulma gerilmeleri ve enerji serbest kalma oranını hesaplamışlardır.

Thrin vd. [3], tek ve çift bindirmeli yapıştırma bağlantısının gerilme ve şekil değiştirme analizlerini yapmışlardır.

Li ve Lee-Sullivan [4], tek bindirmeli yapıştırma bağlantısını sonlu elemanlar yöntemi ile iki boyutlu olarak incelemişlerdir. Tek bindirmeli bağlantıya birim şekil ölçerler (strain gauges) yerleştirilerek yapıştırıcının birim şekil değişimlerini incelemişlerdir. Sonlu elemanlar yöntemi sonucu ile deneysel elde ettikleri birim şekil değişimlerini karşılaştırmışlardır.

Ashcroftb vd. [5], yüksek kayma gerilmesi etkisi altındaki yapıştırma bağlantısının yorulma davranışını incelemişlerdir. Kayma gerilmesinin artması ile yorulma mukavemetinin azaldığını gözlemlemişlerdir.

Kim ve Seok Yoo [6], bindirmeli yapıştırma bağlantısının, optik mikroskop yardımı ile hasar anını tespit etmişlerdir. Sonuç olarak optik mikroskop görüntüleri değerlendirilerek, tek bindirmeli yapıştırma bağlantısının hasar dayanımını ve ömrünü hesaplamışlardır.

Da Silva vd. [7], Araldite 2015 epoksi yapıştırıcının mod I kırılma tokluk ( $K_{IC}$ ) değerini belirlemişlerdir. *Çift ankastre giriş* deneyi ile yapıştırıcının kırılma tokluk değeri ve enerji serbest kalma oranını hesaplamışlar ve sonuçları tablo halinde vermişlerdir.

Yana vd. [8], tek bindirmeli yapıştırma bağlantısında bulunan levhadaki deliğin yapıştırma bölgesine etkisini incelemişlerdir. Sonuç olarak çentik etkisinin mukavemet ve gerilmeyi olumsuz etkilediğini gözlemlemişlerdir.

Fernlund [9], çatlak içeren tek bindirmeli yapıştırma bağlantısı için gerilme şiddet faktörü analizleri yapmışlardır. Gerilme şiddet faktörünün; levha ve yapıştırıcının elastisite modüllerine, yapıştırıcı kalınlığına ve uygulanan nominal gerilmeye bağlı olduğunu belirlemişlerdir.

Karakaya ve Soykasap [10], eğrilik yarıçapı yaklaşımı ile tek bindirmeli yapıştırma bağlantısının gerilme analizini yapmışlardır. Üç nokta eğme deneyi kullanarak tek bindirmeli yapıştırma bağlantısında eğilme gerilmesinin hesaplanabileceği bir formül önermişlerdir.

Fersinive ve Pironi [11], 2024-T3 alüminyum alaşımlı bindirme yapıştırma bağlantısında çatlak yolunun belirlenmesi için deneysel çalışmalar yapmışlardır. Çalışmalarında taramalı elektron mikroskop ile sonlu eleman programı (FRANC 2D) kullanmışlardır. Sonuç olarak çatlak ucunda hem açılma hem de kayma modu olduğu gözlemlenmiş ve bunlara bağlı gerilme şiddet faktörü değerleri hesaplamışlardır.

Critchlow vd. [12], tek bindirmeli yapıştırma bağlantılarında çatlak oluşumunu ve ilerlemesini incelemişlerdir. Yapılan araştırma ve deneyler sonucunda; düşük yorulma yüklemelerinde (fatigue loading) çatlak ilerlemesi yavaş olurken, yüksek yorulma yüklemelerinde çatlak ilerlemesi daha hızlı olduğunu gözlemlemişlerdir.

Ghibirgiu [13], bindirme yapıştırma bağlantısında kullanılan yapıştırıcının mod II kırılma tokluk değerini ( $K_{IIC}$ ) belirlemişlerdir. Kırılma tokluk değerini belirlemede *çentikli eğme deneyi*ni kullanmışlardır. Epoksi yapıştırıcının enerji serbest kalma oranı ve kırılma tokluk ( $K_{IIC}$ ) değeri hesaplanarak tablo halinde vermişlerdir.

Fernandez-Saez vd. [14], epoksi yapıştırıcıda çatlak ilerlemesini *çentikli eğme deneyi* yaparak incelemişlerdir. Deneyde kamera sistemi kullanılarak çatlak ilerlemesi kaydedilmiştir. Yük-deplasman grafiği kullanılarak *enerji serbest kalma oranı* hesaplanmıştır.

Ming Jen ve Wei Ko [15], tek bindirmeli yapıştırma bağlantısının yorulma mukavemetini incelemişlerdir. Yaptıkları çalışmada, yüksek kayma gerilmesi altındaki yapıştırıcıların yorulma mukavemetinin düşük olduğunu gözlemlemişlerdir.

Benderdouche vd. [16], bindirme yapıştırma bağlantısında; levhaları alüminyum, yapıştırıcıyı boron epoksi seçmişlerdir. Sonlu elemanlar analizinden elde edilen soyulma ve kayma gerilmelerini literatür ile karşılaştırarak doğrulamışlardır.

Da Silva vd. [17], enerji hasar kriterlerini (energy failure criteria) kullanarak yapıştırıcıda çatlak ilerlemesini incelemişlerdir. Yapıştırıcının sünek ya da gevrek olmasının çatlak ilerlemesi davranışına etkisi olduğunu gözlemlemişlerdir. Sonuç olarak hem gevrek hem sünek yapıştırıcı için çatlak ilerlemesini öngöreceği yeni enerji hasar kriterleri önermişlerdir.

## 1.2 Tezin Amacı

Bu çalışmanın amacı, deney ve sonlu elemanlar analizi ile Araldite 2015 Epoksi yapıştırıcının  $K_{Ic}$  kırılma tokluk değerini belirlemektir. Bunun için ÇAK (Çift Ankastre Kiriş) deneyi yapılmıştır. Deneyden elde edilen veriler, Sonlu Elemanlar programı kullanılarak Mod I kırılma tokluk değeri ( $K_{Ic}$ ) ve enerji serbest kalma oranı hesaplanmıştır. Deneysel ve Sonlu Elemanlar analizi ile belirlenen değerler literatür sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Kırılma tokluk değerlerinin hesaplanmasında kırılma mekaniği prensipleri kullanılmıştır.

### **1.3 Orijinal Katkı**

Literatürde, yaygın olarak, çeşitli değişkenlerin yapıştırma bağlantısındaki gerilme dağılımına etkisi incelenmiştir. Ayrıca, yapıştırıcı üreticileri, ürettikleri yapıştırıcıların sınırlı sayıda mekanik özelliklerini rapor etmektedirler. Özellikle, bu çalışmada incelenen, kırılma tokluk değeri ve enerji serbest kalma oranı hiçbir yapıştırıcı üreticisi tarafından, ürün özellik tablosunda verilmemektedir.

Bu çalışmada, kırılma mekaniği ve hasar analizi çalışmalarında çok önemli bir malzeme özelliği olan, Araldite 2015 epoksinin Mod I kırılma tokluk değerinin ve enerji serbest kalma oranının belirlenmesi amaçlanmıştır. Böylece, Araldite 2015 epoksi yapıştırıcı mekanik özellikleri ile ilgili literatüre önemli bir verinin sunulması amaçlanmaktadır.

### YAPIŞTIRICILAR ve YAPIŞTIRMA BAĞLANTILARI

#### 2.1 Yapıştırıcılar ve Yapıştırma Bağlantıları

Yapıştırıcılar iki veya daha fazla malzemelerin birleştirilmesinde kullanılan; epoksi, polyimid, fenolik, akrilik, silikon gibi farklı mekanik özelliklere sahip kimyasal bileşiklerdir. Özellikle metallerin birleştirilmesi gibi işlemlerde, kaynak ve perçinleme gibi yöntemler yerine, yapıştırıcı kullanılarak birleştirme işlemleri daha yaygın kullanılmaktadır. Bunun temel sebebi, kaynak sırasında ortaya çıkan fazla ısıdan dolayı malzemelerde distorsiyon (çarpılma) görülmesi ve perçinleme yöntemi sırasında malzemeye açılan deliklerin çentik etkisi oluşturarak malzemenin mukavemetini olumsuz yönde etkilemeleridir.

Yapıştırıcılar, özellikle, kompozit ve plastiklerin birleştirilmesinde tercih edildiklerinden, kullanımı hızlı bir şekilde artmaktadır.

#### 2.2 Yapıştırıcılar

Metallerin yapıştırılmasında genellikle epoksi ve akrilik yapıştırıcılar kullanılmaktadır. Hem epoksi yapıştırıcı hem de akrilik yapıştırıcı yapısal yapıştırıcılardır. Yapısal yapıştırıcılar yük taşıyabilen, esnek ve en önemlisi yüksek kayma mukavemetine sahip yapıştırıcılardır. Günümüzde bu yapıştırıcılar otomotiv sektöründen inşaat sektörüne kadar birçok iş alanında yaygın olarak kullanılmaktadır.

### 2.2.1 Akrilik Yapıştırıcılar

Akrilik yapıştırıcılar oda sıcaklığında oksijensiz ortamda aktivatör ile kürleşir. Akrilik yapıştırıcıların oksijen ile temasını kesmek amacıyla, yapışma yüzeyinin en az 5 mm olması gerekir. Akrilik yapıştırıcılarda yapıştırılacak olan iki malzemeye yapıştırıcı uygulandıktan sonra bu iki malzemenin birbirleriyle temas etmesi ile yapıştırıcı kürleşmeye başlar.

Akrilik yapıştırıcılar bir yapısal yapıştırıcı olmasından dolayı kayma mukavemeti yüksektir. Ayrıca akrilik yapıştırıcıların soyulma mukavemetleri de yüksektir.  $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$  ve  $120\text{ }^{\circ}\text{C}$  aralığında elastik özelliklerini değiştirmeden korurlar. Bu yapıştırıcıların en önemli özelliklerinden biri de neme karşı dirençlerinin yüksek oluşudur. Rutubetli ortamlarda mukavemet kaybına uğramazlar. Ancak bütün yapıştırıcılar gibi yüksek sıcaklıklarda yapıları bozularak kullanılmaz duruma gelirler. Akrilik yapıştırıcıların raf ömrü 12 aydır.

### 2.2.2 Epoksi Yapıştırıcılar

Epoksi yapıştırıcılar, epoksi reçine ile sertleştiriciden oluşur ve bu yapıştırıcılar ile yüksek mukavemetli bağlantılar elde edilir. Tek bileşenli, iki bileşenli ve film olmak üzere üç farklı formdadırlar. Her iki bileşen birleştirildiğinde kovalent bağlar oluşur ve termoset polimer halini alır. Katalizör ilavesi ya da ısı, sertleşme zamanını hızlandırabilir. Yüksek sıcaklıklarda sertleşen epoksiler daha yoğun çapraz bağlar oluşturdıklarından dolayı yüksek mukavemetli bağlantılar elde edilir. Çok farklı tipteki malzemelerin yapıştırılmasında kullanılabilirler [18].

Epoksi reçineler, hemen hemen bütün uygulamalar için kullanılabilecek oldukça yüksek mukavemetli bir yapıştırıcıdır. Reçine ve katılaştırıcının kullanılmadan önce karıştırılması gerekir. Oda sıcaklığında kürleşme süresi, birkaç saatlik periyottan birkaç günlük periyoda kadar farklılık gösterebilmektedir. Tipik olarak minimum kürleşme sıcaklığı  $23\text{ }^{\circ}\text{C}$  dir.  $140\text{ }^{\circ}\text{C}$  yi aşan sıcaklıklarda yapıştırıcının kimyasal yapısı bozulur [18].

Kürleşme süresi kürleşme sıcaklığına bağlıdır ve kürleşme sıcaklığı yükseldikçe süre kısalmır. Normalde sertleştiriciyi harekete geçirmek ve polimerizasyonu başlatmak için gerekli bir minimum sıcaklık vardır. Yüksek mukavemetli ticari epoksilerin kürleşme sıcaklıkları  $200\text{ }^{\circ}\text{C}$  ye kadar çıkmaktadır. Kürleşen yapıştırıcı gevrek olup nemli ortamlara karşı hassastır. Kürleşme esnasında yapıştırıcıda bir miktar hacim küçülmesi oluşur ve bu da istenmeyen artık gerilmelerin oluşmasına neden olur.

Epoksinin metal ve plastik yüzeylere yapışması zayıftır ve bundan dolayı bağlantıda oluşan hasar, koheziv olmaktan çok adeziv, yani yapıştırıcı ile esas malzeme ara yüzeyinde oluşmaktadır. Bununla beraber, epoksi ile yapıştırılmış ahşap yapılarda hasar, bağlantı yerinden çok ahşap malzeme içerisinde meydana gelmektedir. Epoksiler avantajlarının çokluğu ve tüm elyaf malzemelerde kullanılabilmesi nedeniyle, havacılık sanayinde yaygın bir kullanım alanına sahiptirler. Genellikle karbon elyaflar ile birlikte kullanılırlar [18].

Epoksi yapıştırıcıların özellikleri açıklanırken kullanılan adezyon ve kohezyon kuvvet kavramları aşağıda açıklanmıştır.

### **2.2.3 Adezyon Kuvveti**

Yapıştırılan malzeme molekülleri ile yapıştırıcı molekülleri arasındaki çekim kuvvetine adezyon kuvveti denir.

### **2.2.4 Kohezyon Kuvveti**

Yapıştırıcı molekülleri arasındaki çekim kuvvetine kohezyon kuvveti denir.

## **2.3 Formları Açısından Yapıştırıcılar**

Yapıştırıcılar içerdikleri kimyasal bileşime göre sınıflandırılabilirdiği gibi kullanım formları açısından da sınıflandırılabilir. Formları açısından yapıştırıcılar aşağıda gösterildiği gibi sıralayabiliriz:

- |                                     |                            |
|-------------------------------------|----------------------------|
| 1. Macun tip yapıştırıcılar         | 4. Film tip yapıştırıcılar |
| 2. Düşük viskoziteli yapıştırıcılar | 5. Reçineler               |
| 3. Düşük yoğunluklu yapıştırıcılar  | 6. Köpükler                |

### **2.3.1 Macun Tip Yapıştırıcılar**

Bu yapıştırıcıların yüksek viskoziteye sahip olanları çok iyi yapışma sağlarlar. Sabit ısıtma gerektiğinde ısı yorgani kullanmak yeterlidir çünkü bu yapıştırıcılar 80 °C' nin altındaki sıcaklıkta sertleşirler. Metal yada kompozit malzemeleri birleştirmek için kullanılan, oda sıcaklığında

sertleşen yapıştırıcılardır. Yapıştırıcı kalınlığının 0.1 ve 0.2 mm arasında olması, yapışma için yeterlidir.

### **2.3.2 Film Tip Yapıştırıcılar**

Metalik yada kompozit malzemelerin yapıştırılması için kullanılan epoksi esaslı malzemelerdir.

### **2.3.3 Düşük Viskoziteli Yapıştırıcılar**

Oda sıcaklığında ya da yüksek (120-180 °C) sıcaklıklarda sertleşirler. Yapıştırıcı içindeki süreksizliklere rağmen daha yüksek kayma mukavemetine sahip olduklarından dolayı, yapısal bütünlüğü korurlar.

### **2.3.4 Reçineler**

Kürleşme işlemi tamamlanıp, sertleşme işlemi tamamen sona erdikten sonra elde edilebilir. Karışma oranı yanlış yapılırsa kullanım süresi azalır.

### **2.3.5 Düşük Yoğunluklu Yapıştırıcılar**

Oda sıcaklığında sertleşebilen, yapıştırıcılardır. Bu yapıştırıcılar; mükemmel yapışma istenen tabakaların yapıştırılmasında, göçük ya da dolgu tamiri veya kompozit kumaş tabakaların yapıştırılmasında kullanılırlar.

### **2.3.6 Köpükler**

Birleşmede boşlukları doldurarak, birleşen parçaların tümünü birbirlerine kuvvetlice yapıştırır.

## **2.4 Yapıştırma Bağlantıları**

Günümüzde, yapıştırıcı ile gerçekleştirilen bindirme bağlantılarının klasik bağlantı elemanları (somun, cıvata, perçin v.b.) yerine tercih edildiği bilinmektedir. Bunun temel sebepleri ise yapıştırılan bölge boyunca gerilmenin düzenli dağılması, yapıştırıcı bölgesinde yük transferinin başarılı bir şekilde sağlanması, yorulmaya karşı direncin yüksek olması, yüksek mukavemet/ağırlık oranı, yüksek sönüm kabiliyeti, yüksek hasar toleransı ve korozyona karşı

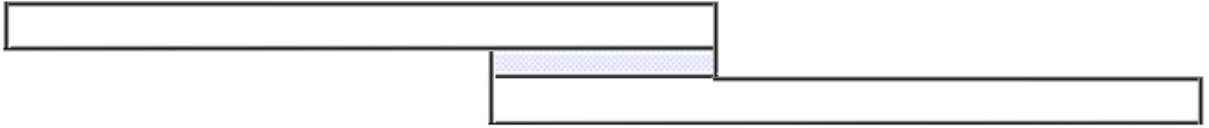
direncin yüksek olmasıdır. Ayrıca birbirinden farklı veya aynı elemanların birleştirilmesinde yapıştırıcı kullanılabilir [19].

Çizelge 2.1 Yapıştırma bağlantı çeşitleri

| Bağlantı tipleri                  |
|-----------------------------------|
| 1 ) Tek Bindirmeli Bağlantı       |
| 2 ) Çift Bindirmeli Bağlantı      |
| 3 ) Basamaklı Bindirme Bağlantısı |
| 4) Eğimli Bindirme Bağlantısı     |
| 5) Alın Bindirme Bağlantısı       |

#### 2.4.1 Tek Bindirmeli Yapıştırma Bağlantısı

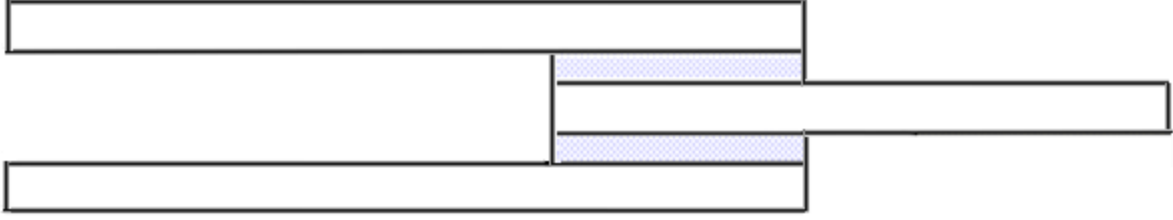
Bu bağlantı şeklinde bağlantı yapılacak elemanların, belirli bir kısmı üst üste gelecek şekilde, yapıştırma bağlantısının yapıldığı bağlantı şeklidir [20].



Şekil 2.1 Tek bindirmeli yapıştırma bağlantısı

#### 2.4.2 Çift Bindirmeli Yapıştırma Bağlantısı

Bindirme bağlantısında, hem alt kısma hem de üst kısma gelecek şekilde yerleştirilmiş iki destek elemanı bulunan bindirmeli bağlantı şeklidir [20].



Şekil 2.2 Çift bindirmeli yapıştırma bağlantısı

#### 2.4.3 Basamaklı Bindirme Bağlantısı

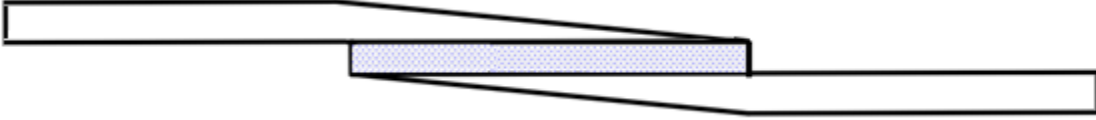
Bindirme işleminde yapıştırılacak elemanlar üzerine birbirlerine tam oturması için basamak şeklinde boşlukların açılmış olduğu bağlantı şeklidir [20].



Şekil 2.3 Basamaklı bindirme bağlantısı

#### 2.4.4 Eğimli Bindirme Bağlantısı

Bu bağlantı şeklinde, bağlantı yapılacak olan elemanların bindirme kısımlarının üst taraflarına eğim verilmiştir [20].



Şekil 2.4 Eğimli bindirme bağlantısı

#### 2.4.5 Alın Bindirme Bağlantısı

Bu bindirme bağlantısı, alın kaynak yöntemine benzerlik göstermektedir. Bu sistemde levhalar alın altına getirilip yapıştırıcı kullanılarak bindirme bağlantısı oluşturulmaktadır.



Şekil 2.5 Alın bindirme bağlantısı

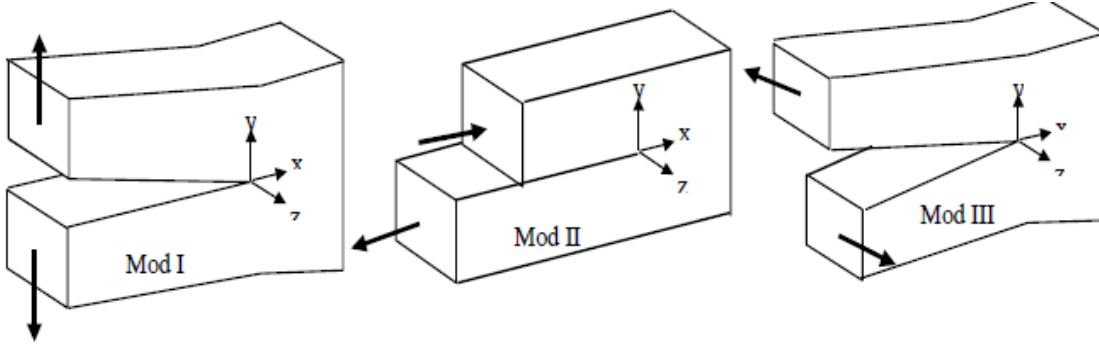
### KIRILMA MEKANİĞİ ve SONLU ELEMANLAR METODU

#### 3.1 Kırılma Mekaniği Temel Kavramları

Ortam sıcaklığı, malzeme tokluğu, tasarımdan kaynaklanan çeşitli hatalar, kaynak, artık gerilmeler ve yorulma gibi birçok faktör makine elemanlarında ve yapılarda gevrek kırılmaya neden olabilir. Bununla beraber herhangi bir elemanda gevrek kırılmaya neden olarak üç temel faktör belirlenmiştir. Bunlar; malzeme tokluğu, çatlak büyüklüğü ve gerilme seviyesidir. Kırılma mekaniğinin temel prensibi, keskin bir çatlak ucundaki gerilme alanının **Gerilme Şiddet Faktörü** olarak tanımlanan bir parametreyle karakterize edilmesine dayanmaktadır. Bu faktör, uygulanan gerilme ile çatlak boyutu arasında bir ilişki kurulmasına dayanmaktadır. Buna göre çatlak içeren herhangi bir eleman ya da deney numunesi, aynen çatlaksız malzemelerin çeşitli gerilme seviyelerine kadar yüklenebilmeleri gibi çeşitli K değerlerine kadar yüklenebilirler. Böylece gerilme şiddet faktörü malzemenin bir özelliği olur [21].

Kırılma mekaniği, lineer elastik ve elastik-plastik kırılma mekaniği şeklinde iki farklı yaklaşıma dayanmaktadır. Lineer elastik kırılma mekaniği, çatlak ucunda meydana gelen gerilme değerlerini, çatlak ilerlemesi esnasında ortaya çıkan enerji serbest kalma oranına ve kırılma tokluğuna dayandırılmaktadır.

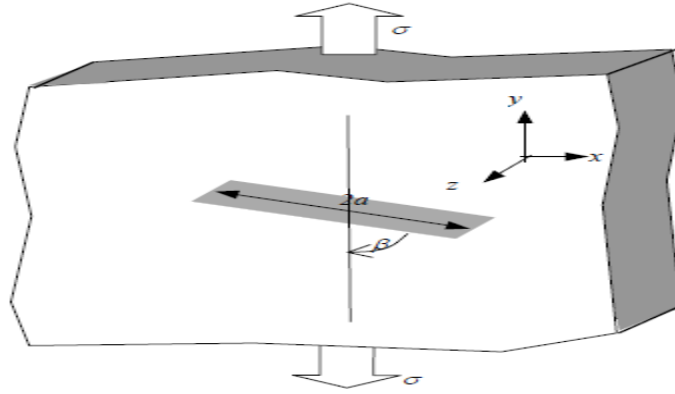
Lineer elastik kırılma mekaniği; mod I (açılma modu), mod II (kayma modu) ve mod III (düzlem dışı kayma modu) şeklinde üç mod tarif etmektedir (Şekil 3.1).



Şekil 3.1 Çatlak yüzeylerinin üç hareket şekli [21]

Mod I de deplasmanlar x-y ve x-z düzlemlerine göre simetrik olup açılma modu olarak adlandırılır. Çatlağın karşılıklı yüzeyleri birbirine ters yönde hareket ederler. Kayma modu olarak adlandırılan mod II ise deplasmanlar z-y düzleminde göre simetriktir. Yüzeyler ters yönde birbiri üzerinde kayarak hareket ederler. Mode III düzlem dışı kayma modu olup her iki düzleme göre simetriktir. Yüzeyler çatlak ucu çizgisine paralel olarak hareket ederler. Her çatlak modu farklı bir gerilme alanına karşılık gelmektedir. Çatlak modları, tek tek ya da bu modların bir kombinasyonu şeklinde bulunabilirler [21].

İki modun birlikte bulunma durumu şekil 3.2' de gözlemlenmektedir.



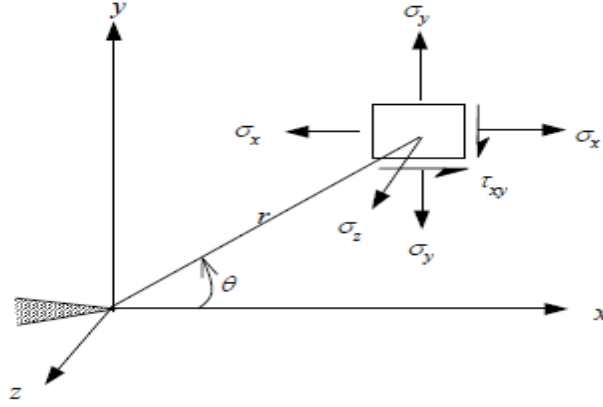
Şekil 3.2 İki modun birlikte etkilemesi hali [21]

Yukarıda verilen iki modun birlikte olma durumu, hem açılma hem de kayma modunun birlikte bulunma durumudur. Bu durum için gerilme şiddet faktörleri;

$$K_I = \sigma \sin^2 \beta \sqrt{\pi a} \quad K_{II} = \sigma \sin \beta \cos \beta \sqrt{\pi a} \quad (3.1)$$

şeklinde verilmektedir. Burada;  $K_I$  Açılma Modu,  $K_{II}$  Kayma Modu gerilme şiddet faktörleri,  $a$  çatlak uzunluğu,  $\sigma$  uygulanan gerilmedir.

### 3.2 Çatlak Ucunda Gerilme Dağılımı



Şekil 3.3 Çatlak ucu civarında oluşan gerilmeler [21]

Kırılma mekaniğinde çatlak civarında oluşan gerilmeler şu şekilde ifade edilmektedir [21].

$$\sigma_x = \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left( 1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \quad (3.2)$$

$$\sigma_y = \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left( 1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \quad (3.3)$$

$$\tau_{xy} = \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} \left( \cos \frac{\theta}{2} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \right) \quad (3.4)$$

Burada; K gerilme şiddet faktörünü, r çatlak ucu yarıçapı,  $\theta$  çatlak ucu açısını ifade etmektedir. z yönündeki gerilme değeri, düzlem gerilme ve düzlem şekil değiştirme için farklılık göstermektedir. Bunlar;

$$\sigma_z = 0 \quad \text{Düzlem gerilme} \quad (3.5)$$

$$\sigma_z = \nu(\sigma_x + \sigma_y) \quad \text{Düzlem şekil değiştirme} \quad (3.6)$$

şeklinde tarif edilmektedir.

Yukarıda verilen formüllerde görüldüğü gibi, çatlak ucu civarında ( $r \rightarrow 0$ ) gerilmeler büyük değerler almaktadır. Çatlak ucu yarıçapının sıfır olduğu çatlak ucunda plastik bölgenin oluştuğu bilinmektedir.

Çatlak içeren bir malzeme için kırılma mekaniği uygulamaları, enerji yaklaşımları ile Griffith tarafından yapılmıştır. Griffith lineer elastik kırılma mekaniği üzerine, özellikle de çatlak ilerlemesi esnasında ortaya çıkan **enerji serbest kalma oranı** ve ortaya çıkacak yeni yüzeylerin oluşması üzerine çalışmalar yapmıştır. Griffith teorisine göre çatlak ilerlemesinde depolanan enerji ile çatlak ilerlemesi sonucunda ortaya çıkacak olan yeni yüzey enerjileri arasında mutlaka bir ilişki kurulması gerektiğini belirtmiştir. Bu ilişki;

$$2\gamma_s = \frac{\pi\sigma^s a}{E} \quad (3.7)$$

şeklinde tarif edilmektedir. Burada;  $\gamma_s$  yeni yüzey enerjisi, E elastisite modülüdür. Bu ifade plastik deformasyonu göz önüne almadığı için daha sonra Orowan tarafından plastik deformasyon enerjisini de dikkate alacak şekilde [21];

$$2\gamma_s + \gamma_p = \frac{\pi\sigma^s a}{E} \quad (3.8)$$

olarak düzeltilmiştir. Burada;  $\gamma_p$  plastik deformasyon sonucunda oluşan yeni yüzey enerjisidir. Kırılma mekaniği üzerine çalışmalar yapan bir diğer bilim adamı Irwin, çatlak boyunun enerji ile değişimi olan enerji serbest kalma oranı kavramını tanımlamıştır.

Daha sonra Rice [21], tarafından elasto plastik bölge için J integralini tanımlamıştır. Bu tanımlamaya göre, bütün özellikleri aynı fakat çatlak boylarında küçük bir farklılık bulunan iki elemanın enerjileri arasındaki fark, çatlak büyümesi için bir karşılaştırma parametresi olarak kullanılmaktadır. J integrali;

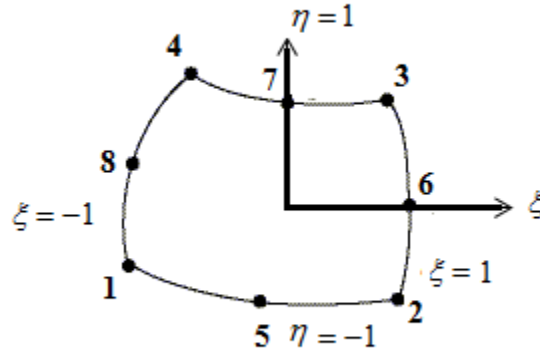
$$J = \frac{\partial(\frac{U}{b})}{\partial a} \quad (3.9)$$

şeklinde tanımlanmaktadır. Burada; U çatlakın neden olduğu enerji, b eleman kalınlığıdır. J integral değeri elastik bölgede, enerji serbest kalma oranı ile aynı sonucu verdiği gösterilmiştir [21].

### 3.3 Sonlu Elemanlar Metodu

Sonlu elemanlar modelinde kullandığımız 8 düğümlü dörtgen elemana ait şekil fonksiyonları, yer değiştirme bileşenleri, elastisite matrisi ve eleman direngenlik matrisi elde edilmiştir. Düzlem gerilme ve zorlanma haline ait bağıntılar elde edilmiştir [22].

#### 3.3.1 Sekiz Düğümlü Dörtgen Eleman



Şekil 3.4 Sekiz düğümlü dörtgen eleman

##### 3.3.1.1 8 Düğümlü Dörtgen İzoparametrik Elemanın Şekil Fonksiyonu

$$N_1 = -\frac{1}{4}(1-\xi)(1-\eta)(1+\xi+\eta) \quad (3.10)$$

$$N_2 = -\frac{1}{4}(1+\xi)(1-\eta)(1-\xi+\eta) \quad (3.11)$$

$$N_3 = -\frac{1}{4}(1+\xi)(1+\eta)(1-\xi-\eta) \quad (3.12)$$

$$N_4 = -\frac{1}{4}(1-\xi)(1+\eta)(1+\xi-\eta) \quad (3.13)$$

$$N_5 = \frac{1}{2}(1-\xi^2)(1-\eta) \quad (3.14)$$

$$N_6 = \frac{1}{2}(1+\xi)(1-\eta^2) \quad (3.15)$$

$$N_7 = \frac{1}{2}(1-\xi^2)(1+\eta) \quad (3.16)$$

$$N_8 = \frac{1}{2}(1-\xi)(1-\eta^2) \quad (3.17)$$

şeklinde verilmiştir. Bu ifade çarpma işlemi yapıldıktan sonra,

$$N_1 = -\frac{1}{4}[1-\eta\xi-\xi^2-\eta^2+\xi^2\eta+\xi\eta^2] \quad (3.18)$$

$$N_2 = -\frac{1}{4}[1-\xi^2+\xi\eta-\eta^2-\xi\eta^2+\xi^2\eta] \quad (3.19)$$

$$N_3 = -\frac{1}{4}[1-\xi^2-\eta\xi-\xi^2\eta-\eta^2-\xi\eta^2] \quad (3.20)$$

$$N_4 = -\frac{1}{4}[1-\xi^2-\xi^2\eta-\eta^2+\xi\eta+\xi\eta^2] \quad (3.21)$$

$$N_5 = \frac{1}{2}[1-\eta-\xi^2+\xi^2\eta] \quad (3.22)$$

$$N_6 = \frac{1}{2}[1-\eta^2+\xi-\xi\eta^2] \quad (3.23)$$

$$N_7 = \frac{1}{2}[1-\xi^2+\eta-\xi^2\eta] \quad (3.24)$$

$$N_8 = \frac{1}{2}[1-\xi-\eta^2+\xi\eta^2] \quad (3.25)$$

şeklinde yazılabilir.  $N_{[MD1]1}$ ,  $N_2$ ,  $N_3, \dots$ ,  $N_8$  şekil fonksiyonu olsun.

$$N=[N_1, N_2, N_3, \dots, N_8] \quad (3.26)$$

şeklinde bir  $(1 \times 8)$  vektörü olarak gösterilebilir. Şekil fonksiyonları vektörü  $N$  de değişken ve sabitler ayrılırsa,

$$N = \ell Q \quad (3.27)$$

şeklinde yazılabilir. Burada;

$$\ell = [\xi^{m_i} \cdot \eta^{n_i}] \quad (3.28)$$

şeklinde bir vektördür.  $(m_i, n_i)$  sırasıyla  $[(0,0), (1,0), (0,1), (2,0), (1,1), (0,2), (2,1), (1,2)]$  olup değişkenler vektörü açık olarak yazılırsa,

$$\ell = [1 \ \xi \ \eta \ \xi^2 \ \xi\eta \ \eta^2 \ \xi^2\eta \ \xi\eta^2] \quad (3.29)$$

dır. Sabitlerden oluşan Q kare matrisi  $(8 \times 8)$  boyutunda olup,

$$Q = \frac{1}{4} \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 & -1 & 2 & 2 & 2 & 2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 3 & 0 & -2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -2 & 0 & 2 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & -2 & 0 & -2 & 0 \\ 1 & -1 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & -2 & 0 & -2 \\ -1 & -1 & 1 & 1 & 2 & 0 & -2 & 0 \\ -1 & 1 & 1 & -1 & 0 & -2 & 0 & 2 \end{bmatrix} \quad (3.30)$$

şeklinde elde edilir.

Yer değiştirme bileşenleri  $(u,v)$  şekil fonksiyonları yardımıyla;

$$u = \sum_{i=1}^8 N_i u_i = NU \quad (3.31a)$$

$$v = \sum_{i=1}^8 N_i v_i = NV$$

şeklinde yazılabilir. Burada;

$$U = [u_1, u_2, u_3, \dots, u_8] \quad (3.31b)$$

$$V = [v_1, v_2, v_3, \dots, v_8]^T \quad (3.31c)$$

dir. İzoparametrik sonlu eleman formülasyonunda koordinatlarda benzer formda ifade edilebilir;

$$\chi = \sum_{i=1}^8 N_i \chi_i = NX \quad (3.32a)$$

$$y = \sum_{i=1}^8 N_i y_i = NY$$

şeklinde yazılabilir. Burada,

$$X = [x_1, x_2, x_3, \dots, x_8]^T \quad (3.32b)$$

$$Y = [y_1, y_2, y_3, \dots, y_8]^T \quad (3.32c)$$

Şekil fonksiyonları yerine (3.27)' deki ifade (3.31) ve (3.32)' de yazılırsa, yer değiştirme ve koordinatlar;

$$u = \ell QU \quad (3.33)$$

$$v = \ell QU \quad (3.34)$$

$$x = \ell QX \quad (3.35)$$

$$y = \ell QX \quad (3.36)$$

şeklinde yazılır.

Herhangi bir f fonksiyonunun  $\xi$  ve  $\eta$  ' ye göre türevleri,  $f=f(x,y)$ ,  $x=x(\xi, \eta)$  ve  $y=y(\xi, \eta)$  olduğu göz önüne alınarak, zincir hesabına göre,

$$\frac{\partial f}{\partial \xi} = \frac{\partial f}{\partial x} \times \frac{\partial x}{\partial \xi} + \frac{\partial f}{\partial y} \times \frac{\partial y}{\partial \xi} \quad (3.37)$$

$$\frac{\partial f}{\partial \eta} = \frac{\partial f}{\partial x} \times \frac{\partial x}{\partial \eta} + \frac{\partial f}{\partial y} \times \frac{\partial y}{\partial \eta} \quad (3.38)$$

şeklinde yazılabilir. (3.37) ve (3.38), matris formunda ifade edilirse,

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial \xi} \\ \frac{\partial f}{\partial \eta} \end{bmatrix} = J \begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial x} \\ \frac{\partial f}{\partial y} \end{bmatrix} \quad (3.39)$$

dir. Burada J jakobiyen operatörü olup,

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial \xi} & \frac{\partial y}{\partial \xi} \\ \frac{\partial x}{\partial \eta} & \frac{\partial y}{\partial \eta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} \\ J_{21} & J_{22} \end{bmatrix} \quad (3.40)$$

(3.45) ve (3.46)' da Jakobiyeen operatörü elemanları,  $x$  ve  $y$ ' nin  $\xi$  ve  $\eta$  ' ye göre türevlerinden oluşmaktadır.  $x$  ve  $y$  yerine (3.33), (3.34), (3.35) ve (3.36)' daki ifadeler yazılırsa,

$$J_{11} = \frac{\partial \ell}{\partial \xi} QX \quad (3.41)$$

$$J_{12} = \frac{\partial \ell}{\partial \eta} QY \quad (3.42)$$

$$J_{21} = \frac{\partial \ell}{\partial \xi} QX \quad (3.43)$$

$$J_{22} = \frac{\partial \ell}{\partial \eta} QY \quad (3.44)$$

olmaktadır.  $Q$  matrisi ve  $X, Y$  vektörleri  $\xi$  ve  $\eta$  'ya bağlı olmadığından jakobiyeen operatörünün elemanları (3.41), (3.42), (3.43) ve (3.44)' te görüldüğü gibi yalnız değişkenlerden oluşan  $\ell$  vektörünün türevlerini alarak  $Q$  matrisini  $X$  ve  $Y$  vektörleri ile çarpmak yeterli olacaktır. (3.29) göz önüne alındığında  $\ell$  ' nin  $\xi$  ve  $\eta$  ' ye göre türevleri;

$$\frac{\partial \ell}{\partial \xi} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 2\xi & \eta & 0 & 2\xi\eta & \eta^2 \end{bmatrix} \quad (3.45)$$

$$\frac{\partial \ell}{\partial \eta} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & \xi & \eta & \xi^2 & 2\xi\eta \end{bmatrix} \quad (3.46)$$

olur. (3.45) ve (3.46)' daki ifadeler (3.41), (3.42), (3.43) ve (3.44)' de yerine yazıldığında jakobiyeen operatörünün elemanları bulunmuş olur.

(3.40)' dan;

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial x} \\ \frac{\partial f}{\partial y} \end{bmatrix} = J^{-1} \begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial \xi} \\ \frac{\partial f}{\partial \eta} \end{bmatrix} \quad (3.47)$$

elde edilir. Jakobiyen operatörünün tersi (3.40)' dan

$$J^{-1} = \frac{1}{\det J} \begin{bmatrix} J_{22} & -J_{12} \\ -J_{21} & J_{11} \end{bmatrix} \quad (3.48)$$

olur. (3.47)' de jakobiyen tersi yerine (3.48)' deki ifade yazılır ve f fonksiyonu yerine yer değiştirme bileşenleri u ve v konursa,

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} \\ \frac{\partial u}{\partial y} \end{bmatrix} = \frac{1}{\det J} \begin{bmatrix} J_{22} & -J_{12} \\ -J_{21} & J_{11} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial u}{\partial \xi} \\ \frac{\partial u}{\partial \eta} \end{bmatrix} \quad (3.49)$$

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial v}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial y} \end{bmatrix} = \frac{1}{\det J} \begin{bmatrix} J_{22} & -J_{12} \\ -J_{21} & J_{11} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial v}{\partial \xi} \\ \frac{\partial v}{\partial \eta} \end{bmatrix} \quad (3.50)$$

elde edilir.

### 3.3.1.2 Eleman Direngenlik Matrisi

Zorlanma enerjisi ifadesi, düzlem eleman için;

$$u = \int_V \frac{1}{2} \sigma^T \varepsilon dV \quad (3.51)$$

veya

$$u = \sum_e t_e \int_e \frac{1}{2} \sigma^T \varepsilon dA \quad (3.52)$$

şeklinde verilmiştir. Burada  $t_e$ , elemanın kalınlığıdır.

Şekil değiştirme - yer değiştirme bağıntısı;

$$\underline{\varepsilon} = \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} \\ \frac{\partial u}{\partial y} \\ \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial u}{\partial x} \right) \end{bmatrix} \quad (3.53)$$

dır. (3.53)' de türev ifadesi yerine (3.49) ve (3.50)' deki elde edilen ifadeleri yazılırsa, şekil değiştirme vektörü

$$\varepsilon = \frac{1}{\text{Det}J} \begin{bmatrix} J_{22} \frac{\partial u}{\partial \xi} - J_{12} \frac{\partial u}{\partial \xi} \\ -J_{21} \frac{\partial v}{\partial \xi} + J_{11} \frac{\partial u}{\partial \eta} \\ -J_{21} \frac{\partial u}{\partial \xi} + J_{11} \frac{\partial u}{\partial \eta} + J_{22} \frac{\partial v}{\partial \xi} - J_{12} \frac{\partial v}{\partial \eta} \end{bmatrix} \quad (3.54)$$

elde edilir. (3.33), (3.34), (3.35) ve (3.36)' dan

$$\frac{\partial u}{\partial \xi} = \frac{\partial \ell}{\partial \xi} (Q u) \quad (3.55)$$

$$\frac{\partial u}{\partial \eta} = \frac{\partial \ell}{\partial \eta} (Q u) \quad (3.56)$$

$$\frac{\partial v}{\partial \xi} = \frac{\partial \ell}{\partial \xi} (Q v) \quad (3.57)$$

$$\frac{\partial v}{\partial \eta} = \frac{\partial \ell}{\partial \eta} (Q v) \quad (3.58)$$

yazılır.  $\frac{\partial \ell}{\partial \xi}$  ve  $\frac{\partial \ell}{\partial \eta}$  türevleri (3.45) ve (3.46)' da verilmiştir. (3.54)' de, (3.55), (3.56), (3.57),

(3.58) ve Jakobiyen operatörünün elemanlarının (3.41), (3.42), (3.43) ve (3.44)' de verilen ifadeleri yerine yazılıp gerekli düzenlemeler yapılsa zorlanma vektörü

$$\varepsilon = Bq \quad (3.59)$$

şeklinde yazılabilir. Burada yer alan değıştirmeleri zorlanmalara bağlayan B (3×16) matrisi, doğal koordinatlar  $\xi$  ve  $\eta$  değışkeni ile elemanın düğüm noktalarının global koordinatları olan ( $x_i, y_i$ ) sabitlerinden oluşmaktadır. Elemanın düğüm yer değıştirmeler vektörü;

$$q=[u_1, v_1, u_2, v_2, u_3, v_3, \dots, u_g, v_g] \quad (3.60)$$

olup (16×1) boyutundadır. Gerilme vektörü Hooke kanunundan veya;

$$\sigma = \mathbf{D}\varepsilon \quad (3.61)$$

$$\sigma = \mathbf{DB}q \quad (3.62)$$

şeklinde yazılabilir. Burada D, (3×3) boyutunda malzeme matrisidir. Eğer problem bir düzlem gerilme problemi ise D yerine düzlem gerilme için verilen elastisite matrisi; düzlem zorlanma problemi ise, düzlem zorlanma için verilen elastisite matrisi konacaktır. (3.52)' deki zorlanma enerjisi ifadesinde  $Da=dx dy=dcJd\xi d\eta$  ve (3.59) ve (3.62) yerine yazılırsa;

$$u = \sum_e \frac{1}{2} q^T \left[ t_e \int_{-1}^{-1} \int_{-1}^{-1} B^T DB \det J d\xi d\eta \right] q = \sum \frac{1}{2} q^T k^e q \quad (3.63)$$

burada;

$$k^e = t_e \int_{-1}^{-1} \int_{-1}^{-1} B^T DB \det J d\xi d\eta \quad (3.64)$$

elde edilir. Bununda eleman direngelik matrisi  $k^e$ , (16×16) boyutundadır. B ve det J büyüklükleri,  $\xi$  ve  $\eta$  'nün fonksiyonudurlar. İntegral işlemi numerik olarak gerçekleştirilerek  $k^e$  matrisi hesaplanır.

### 3.3.2 Genel Gerilme Şekil Değıştirme Bağıntıları

x, y ve z doğrultularındaki yer değıştirmeler u, v, w olmak üzere, genelleştirilmiş Hook Kanunu;

$$\varepsilon_x = \frac{\sigma_x}{E} - \nu \frac{\sigma_y}{E} - \nu \frac{\sigma_z}{E} \quad (3.65)$$

$$\varepsilon_y = -\nu \frac{\sigma_x}{E} + \frac{\sigma_y}{E} - \nu \frac{\sigma_z}{E} \quad (3.66)$$

$$\varepsilon_z = -\nu \frac{\sigma_x}{E} - \nu \frac{\sigma_y}{E} + \frac{\sigma_z}{E} \quad (3.67)$$

şeklinde yazılabilir.

$$\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z = \frac{1-2\nu}{E} (\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z) \quad (3.68)$$

bu ifadeden D elastisite matrisi olmak üzere gerilme

$$\sigma = D.\varepsilon \quad (3.69)$$

şeklinde ifade edilebilir. (3.65), (3.66) ve (3.67) nolu eşitliklerdeki  $\sigma$  ' ları  $\varepsilon$  cinsinden ifade ettiğimizde;

$$D = \frac{E}{(1+\nu) + (1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,5-\nu & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0,5-\nu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,5-\nu \end{bmatrix} \quad (3.70)$$

Elastisite matrisini elde etmiş oluruz.

### 3.3.2.1 Düzlem Gerilme

Düzlem gerilme halinde

$$\sigma_z = \tau_{zx} = \tau_{zy} = 0 \quad (3.71)$$

$$\varepsilon_x = \frac{\sigma_x}{E} - \nu \frac{\sigma_y}{E} \quad (3.72)$$

$$\varepsilon_y = -\nu \frac{\sigma_x}{E} + \frac{\sigma_y}{E} \quad (3.73)$$

$$\varepsilon_z = -\frac{\nu}{E} (\sigma_x + \sigma_y) \quad (3.74)$$

dir. Düzlem gerilmeyi matris formunda şu şekilde ifade edebiliriz:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \end{Bmatrix} = \frac{E}{1-\nu^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \end{Bmatrix} \quad (3.75)$$

### 3.3.2.2 Düzlem Şekil Değiştirme

Düzlem zorlanma halinde

$$\varepsilon_x = \gamma_{xz} = \gamma_{yz} = 0 \quad (3.76)$$

$$\gamma_{zx} = \frac{\tau_{zx}}{G} = 0 \quad (3.77)$$

olmaktadır. Bu sınır şartlarından

$$\sigma_z = \nu(\sigma_x + \sigma_y) \quad (3.78)$$

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E} \left\{ \sigma_x - \nu \left\{ \sigma_y + \left\{ \nu \sigma_x + \sigma_y \right\} \right\} \right\} \quad (3.79)$$

$$\varepsilon_y = \frac{1}{E} \left\{ \sigma_y - \nu \left\{ \sigma_x + \left\{ \nu \sigma_x + \sigma_y \right\} \right\} \right\} \quad (3.80)$$

eşitlikleri elde edilir. Düzlem zorlanmayı matris formunda şu şekilde ifade edebiliriz:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \end{Bmatrix} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & 0 \\ \nu & 1-\nu & 0 \\ 0 & 0 & 0,5-\nu \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \end{Bmatrix} \quad (3.81)$$

### 3.3.3 Eşdeğer Gerilmelerin Elde Edilmesi

Eşdeğer gerilme, basit çekmede akma başlangıcındaki distorsiyon enerjisinin, ele alınan gerilme durumundaki distorsiyon enerjisine eşitlenmesiyle elde edilir. Basit çekme için distorsiyon enerjisi ifadesinde akma gerilmesi yerine  $\sigma_E$  yazılıp, göz önüne alınan gerilme durumuna ait distorsiyon enerjisine eşitlendikten sonra elde edilen  $\sigma_E$  ifadesi eşdeğer gerilme olarak adlandırılır. Distorsiyon enerjisi;

$$U_{dist} = \frac{3}{4G} \tau_{oct}^2 \quad (3.82)$$

şeklinde ve burada:

$$\tau_{oct} = \frac{1}{3} \left[ (\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + G(\tau_{xy}^2 + \tau_{xz}^2 + \tau_{yz}^2) \right]^{1/2} \quad (3.83)$$

şeklinde verilmiştir. Basit çekmede akma noktasında distorsiyon enerjisi (3.82) ve (3.83)' den;

$$U_{dist} = \frac{1}{6G} \sigma_y^2 = \frac{1}{6G} \sigma_E^2 \quad (3.84)$$

$$U_{dist} = \frac{1}{12G} \left[ (\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6\tau_{xz}^2 \right]^{1/2} \quad (3.85)$$

Denklem (3.84) ve (3.85) eşitlenirse eşdeğer gerilme,

$$\sigma_E = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[ (\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6\tau_{xz}^2 \right]^{1/2} \quad (3.86)$$

olarak elde edilir.

### 3.4 J İntegrali Sonlu Eleman Formülasyonu

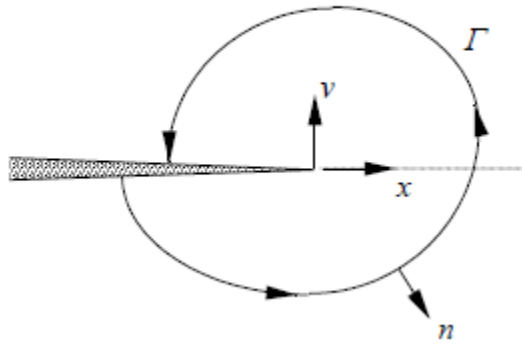
J integralinin elastik-plastik bir malzeme için iki boyutlu şekil değişimi ifadesi;

$$\int_{\Gamma}^0 W dy - n_i \sigma_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x} ds \quad (3.87)$$

şeklinde bir çizgisel integral olarak tanımlanmaktadır. Burada  $\Gamma$  çatlakın alt yüzeyinden başlayıp üst yüzeyinde tamamlanan herhangi bir eğriyi göstermektedir. Şekil 3.4' de görüldüğü gibi  $n$  bu eğrinin normalini,  $W$  şekil değiştirme enerjisini,  $u$  deplasmanları,  $ds$  ise eğri üzerindeki diferansiyel elemanı göstermektedir. İntegral, düz, yüzey gerilmesi olamayan ve malzeme ara yüzeylerinin çatlakla paralel olduğu durumlarda yoldan bağımsızdır. Yukarıda açıklanan şekil değiştirme enerjisini [21];

$$W = \int_0^{\varepsilon} \sigma_{ij} d\varepsilon_{ij} \quad (3.88)$$

şeklinde yazabiliriz. J integrali aynı sınır şartlarına ve yüklemeye sahip eş yapılarının artımlı çatlak boyuna sahip olmaları durumu için potansiyel enerji farkı olarak hesaplanmaktadır. Bu yaklaşım nümerik hesaplamalar ve sonlu eleman analizleri için uygun bir araç oluşturmaktadır. Bununla birlikte J integral ifadesinin gerilme şiddet değeri ile ilgili bağıntılar lineer elastik kırılma mekaniği içerisinde yer almaktadır. Sonlu elemanlar modeli kullanılarak oluşturulan bir geometrinin sonlu eleman analizi yapılırken model doğrulaması bu ilgili bağıntılar kullanılarak yapılabilmektedir [21].



Şekil 3.5 J integral hesabı için kullanılan tipik eğri [21]

Toplam potansiyel enerji;

$$\Pi = \frac{1}{2} \{q\}^T [K] \{q\} - \{q\}^T \{F\} \quad (3.89)$$

şeklinde tanımlanmaktadır. Burada q deplasman vektörünü, F yükleri, K ise rijitlik matrisini göstermektedir. Düğüm deplasman değerleri, minimum potansiyel enerji prensibinden;

$$\frac{\partial \Pi}{\partial \{q\}} = [K] \{q\} - \{F\} = 0 \quad (3.90)$$

elde edilir. Enerji serbest kalma oranı, toplam potansiyel enerji ifadesinin çatlak boyuna göre türevi olarak tanımlanır;

$$G = \frac{\partial \Pi}{\partial a} \quad (3.91)$$

Lineer elastik durum için  $G=J$  olduğundan, potansiyel enerjinin  $a'$  ya göre türevi alındığında;

$$J = \frac{\partial \Pi}{\partial a} = -\frac{1}{2} \{q\}^T \frac{\partial [K]}{\partial a} \{q\} + \{q\}^T \frac{\partial \{F\}}{\partial a} - \frac{\partial \{q\}^T}{\partial a} [K] \{q\} - \{F\} \quad (3.92)$$

J integrali elde edilir. (3.92)' de bulunan bu ifade (3.90)' da yerine yazılır ise;

$$J = -\frac{1}{2} \{q\}^T \frac{\partial [K]}{\partial a} \{q\} + \{q\}^T \frac{\partial \{F\}}{\partial a} \quad (3.93)$$

olur. Türev işlemleri yapıldıktan sonra;

$$\frac{\partial [K]}{\partial a} = \frac{1}{\Delta a} ([K]_{a+\Delta a} - [K]_a) \quad (3.94)$$

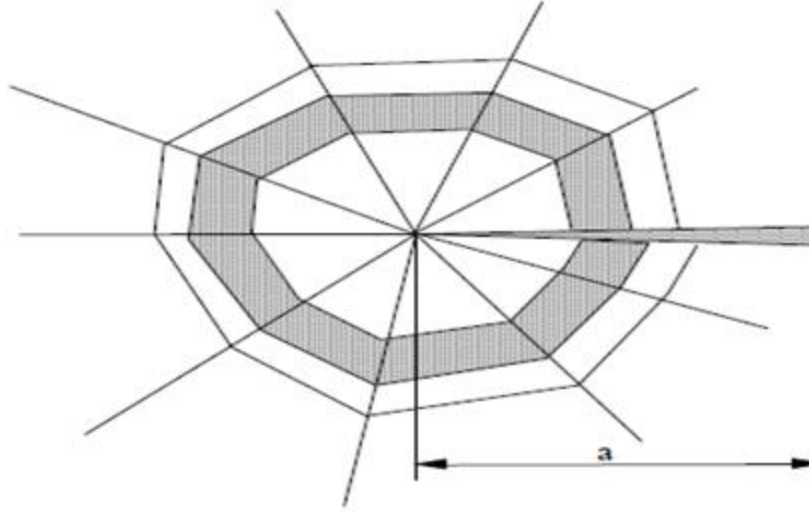
$$\frac{\partial \{F\}}{\partial a} = \frac{1}{\Delta a} (\{F\}_{a+\Delta a} - \{F\}_a) \quad (3.95)$$

elde edilir [21]. Burada  $\Delta a$  çatlak boyunda meydana gelen küçük bir artışı,  $[K]_a$  ve  $[K]_{a+\Delta a}$  ise sırasıyla a ve  $a+\Delta a$  boyutlarında çatlağa sahip olan çözüm bölgesi için genel rijitlik matrisini göstermektedir.

Genel olarak virtüel çatlak ilerlemesi olarak adlandırılan bu yöntem, sonlu elemanlar yöntemi ile J integrali hesabı için oldukça basit bir yol ortaya koymaktadır. Yöntem şu şekilde uygulanmaktadır. Öncelikle çatlaklı yapı deplasmanları hesaplanmakta, daha sonra çatlak boyuna küçük bir artırım verilerek yeni bir çözüm elde edilmektedir. İkinci çözüm için iki yöntem önerilmektedir. Bunların birinde çatlak ilerlemesi çatlak ucu civarındaki bir halkayı oluşturan elemanların rijit bir şekilde hareket ettirilmesi şeklinde yapılmaktadır. Buna göre yalnızca halkayı oluşturan elemanlar şekil değiştirmektedir. Bu durumda şekil değiştiren halka dışındaki bütün elemanlar aynı kalmakta ve ikinci hesap yalnızca bu halkayı oluşturan elemanlar için yapılmaktadır. Dışarıdaki elemanlar için;

$$\frac{\partial [K]}{\partial a} = 0 \quad (3.96)$$

şeklinde olmalıdır. Westergard, çatlak ucu plastik bölge yaklaşımı gibi diğer yöntemlerde ise, çatlak ucuna karşılık gelen düğüm koordinatları çatlak boyunda küçük artışa sebep olacak şekilde ilerletilmektedir. Bu durumda rijitliği değişen elemanlar yalnızca bu düğüme sahip olan elemanlar olmaktadır. Bu ikinci yöntem daha kolay olmakla beraber çatlak ucunda plastik deformasyon oluşan yükleme durumlarında uygulanamaz [21].



Şekil 3.6 J integral hesabında kullanılan eleman halkası [21]

### 3.5 Sonlu Elemanlar Programı (Ansys)

Kırılma mekaniği çalışmalarında sonlu elemanlar metodu oldukça önemli bir yer tutmaktadır. Günümüzde sonlu elemanlar programları kullanılarak, J integrali, gerilme şiddet faktörü, çatlak ilerleme açısı, çatlak ilerleme hızı ve yorulma ömrü gibi önemli parametreler hesaplanabilmektedir. Hesaplanan bu değerler, kesin çözümler ile kıyaslanabilmekte ve hata analizi yapılabilmektedir.

Bu çalışmada, ANSYS 12 sonlu elemanlar programını kullanarak gerilme şiddet faktörleri hesaplanmıştır. ANSYS sonlu elemanlar programı ile çatlak oluşturmak için çatlağın eleman boyu, eleman sayısı, çatlak ucu yarıçap değerinin programa girilmesi gerekmektedir. Çatlak oluşturulduktan sonra çatlak yolu üzerindeki düğüm noktası seçimi, çatlağın yarım çatlak modeli veya tam çatlak modeli olmasına göre değişiklikler göstermektedir. Yarım çatlak modeli için çatlak üzerinde 3 düğüm noktası seçilirken, tam çatlak modeli için 5 düğüm noktası seçilmektedir. Ansys 12 programı, kırılma tokluk değerinin ( $K_{IC}$ ) belirlenmesinde kullanılmıştır.

### ÇİFT ANKASTRE KİRİŞ (ÇAK) DENEYİ

#### 4.1 Giriş

Yapıştırıcının kırılma tokluk değeri olan  $K_{IC}$ ' nin belirlenmesi için ASTM D 3433-99 standardına uygun olarak Çift Ankastre Kiriş deneyi (ÇAK) yapılmıştır. Çift Ankastre Kiriş deneyinin (ÇAK) yapılmasında amaç; yapıştırıcı malzeme özelliği olan kırılma tokluğu  $K_{IC}$ ' nin belirlenmesidir.

#### 4.2 Çift Ankastre Kiriş Deneyi (ÇAK )

ÇAK deneyinde, levha malzemesi St37 çeliği olup, Elastisite modülü  $E = 210 \text{ GPa}$  ve Poisson oranı  $\nu = 0.3$ ' dür. Yapıştırıcı olarak HUNTSMAN firmasının ürettiği **Araldite 2015 epoksi** yapıştırıcı seçilmiştir. *Araldite 2015 epoksi* yapıştırıcıya ait bazı özellikler çizelge 4.1' de verilmiştir. *Araldite 2015 epoksi* yapıştırıcı olarak seçilmeden önce, BISCON firmasının ürettiği **metal epoksi** yapıştırıcı, DEVCON firmasının ürettiği **2 Ton Epoksi** yapıştırıcı ve SCIGRIP firmasının ürettiği **SG5000-03 metakrilat (methacrylate)** yapıştırıcı denenmiştir. Bu yapıştırıcılar kullanılarak elde edilen bindirme yapıların *Araldite 2015 epoksi* yapıştırıcısı kullanılarak elde edilen bindirme yapılarına göre yapışma mukavemetinin daha az olduğu gözlemlenmiştir. Bu nedenle yapıştırıcı olarak **Araldite 2015 epoksi** seçilmiştir.

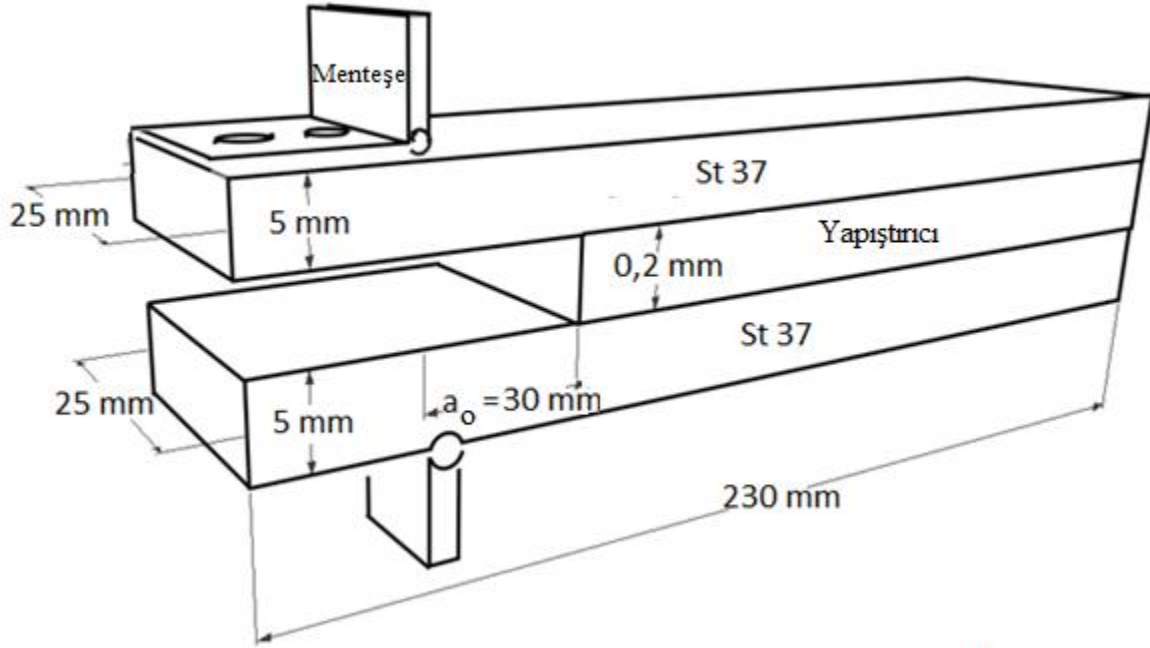
Çizelge 4.1 Araldite 2015 epoksi yapıştırıcı özellikleri [23]

|                                         |              |
|-----------------------------------------|--------------|
| Renk                                    | Krem         |
| Vizkozite                               | Tiksotropi   |
| Kürleşme Süresi 24°C @ >1MPa            | 4 saat       |
| Kayma Mukavemeti (ISO4587)              | 20 MPa       |
| Çekme Modülü                            | 2000 MPa     |
| Eğilme Mukavemeti                       | 42,7 MPa     |
| Kayma Modülü @ 23 °C (DIN 53445)        | 900 MPa      |
| Çekme Mukavemeti                        | 30 MPa       |
| Çalışma sıcaklık Aralığı (kuru ortamda) | 23°C ÷ 80 °C |
| Cam Geçiş Sıcaklığı (DIN 53445)         | 67 °C        |
| Poisson Oranı                           | 0.33         |
| Elastisite Modülü                       | 1850MPa      |

Deneyde, levhalara uygulanan yükün, deney boyunca eksenelliğinin bozulmadan kalabilmesi için menteşe kullanılmıştır. Menteşeler, levhanın üst yüzeyine yapıştırıcı sürülmeden önce kaynaklanmıştır. Kaynaklama işlemi yapılırken, destekler kullanarak alt ve üst menteşenin aynı hizada olmasına dikkat edilmiştir. Bu işlemden sonra, yapıştırıcı sürülecek levha yüzeyleri zımparalanmıştır. EGE firması tarafından üretilen zımparanın derecesi 220' dir. Zımparalama işleminden sonra yüzeylere epoksi yapıştırıcı uygulanmıştır. Literatürde [7] yer alan ÇAK deney modelinde epoksi yapıştırıcı kalınlığı 0.2 mm alınmıştır. Bu nedenle, deneylerde yapıştırıcı kalınlığı 0.2 mm kullanılmıştır. Epoksi yapıştırıcının kürleşmesi için 72 saat beklenmiştir.

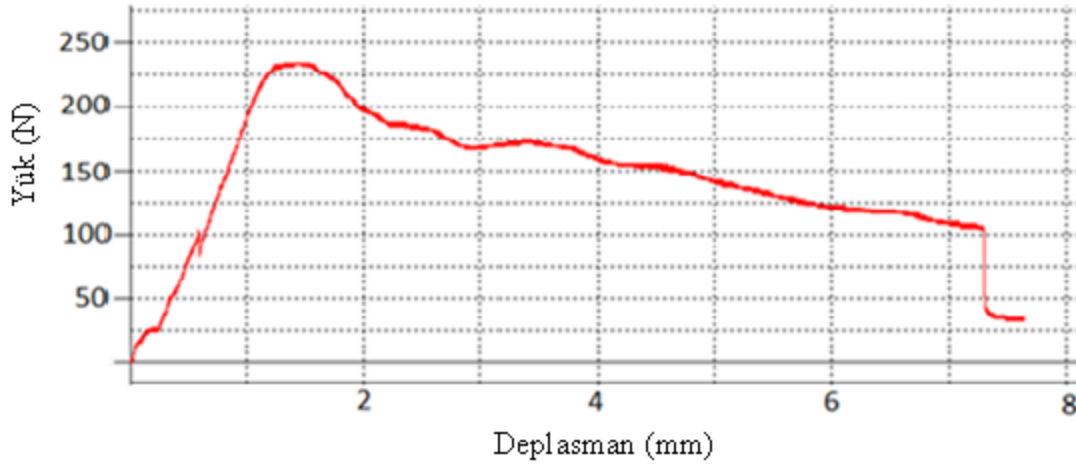
Kürleşme gerçekleştikten sonra numunenin yapıştırıcı kalınlığı daksil ile boyanmıştır. Daksil gevrek bir malzeme olmasından dolayı çatlak ilerlemesi net bir şekilde gözlemlenmiştir. Ayrıca numune üzerine milimetrik derecelendirilmiş ölçü kâğıdı konularak çatlak uzunluğu ölçülmüştür.

Çift Ankastre kiriş (ÇAK) deneyi için oluşturulan modelin şekli Şekil 4.1’ de verilmiştir.



Şekil 4.1 Çift ankastre kiriş deney (Ç.A.K) geometrik modeli

Numune hazırlandıktan sonra Çift Ankastre Kiriş deneyi (ÇAK) için **Mecmesin** çekme cihazına yerleştirilmiştir. Çekme cihazında ilk olarak çevrimsiz yükleme uygulanmıştır. Bu uygulama sonunda yapıştırıcıya uygulanacak maksimum yük miktarı ve deplasman değişimi elde edilmiştir. Şekil 4.2’ de bu deney sonunda elde edilen yük-deplasman grafiği verilmiştir.



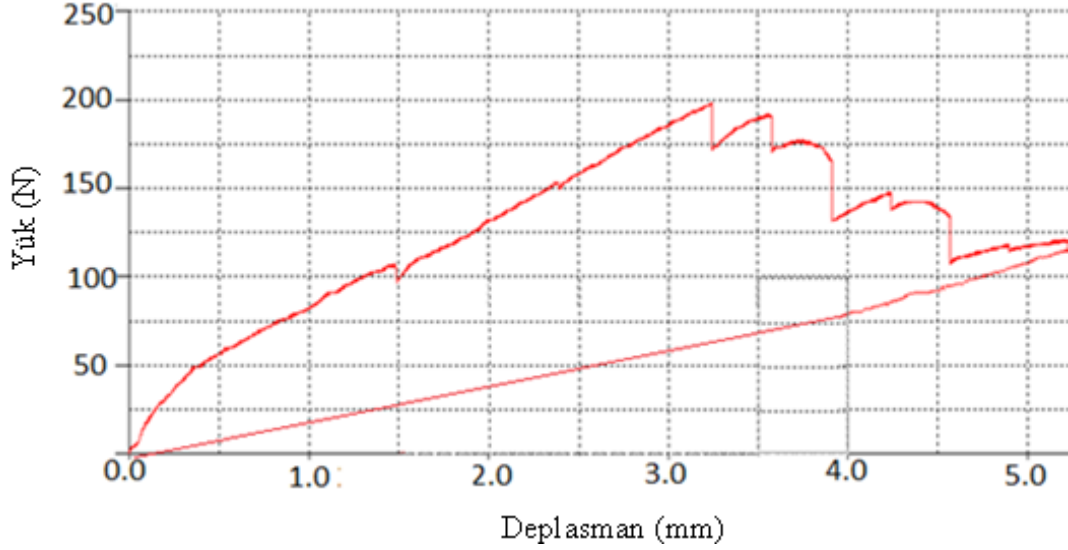
Şekil 4.2 Araldite 2015 epoksi yük- deplasman grafiği

Elde edilen yük-deplasman grafiğinden yararlanılarak çekme cihazı için çevrimli program hazırlanmıştır. Çekme cihazı, dökümü Çizelge 4.2’ de verilen adımlar için programlanmıştır. Ayrıca, çatlak uzunluğunu ölçmek için, her bir yüklemeden önce çekme cihazının 45 s ara vermesi sağlanmıştır.

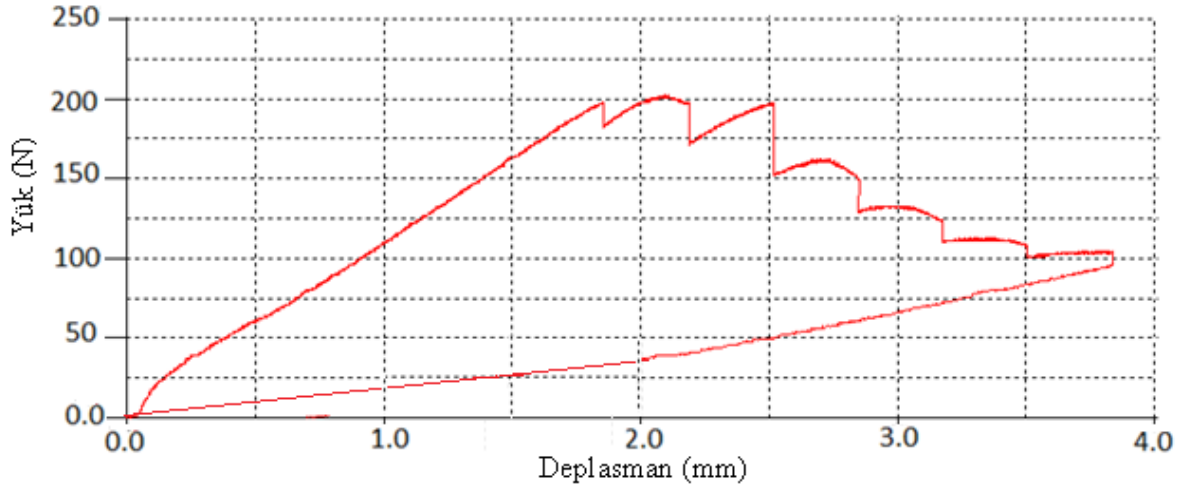
Çizelge 4.2 Çift Ankastre Kiriş deneyinde kullanılan program aşamaları

|                                     |           |
|-------------------------------------|-----------|
| Run 3mm/min-----200 N               | 1. Çevrim |
| Enter..... “Çatlak Uzunluğu”        |           |
| Run 2mm/min..... 10 sec             | 2. Çevrim |
| Enter..... “Çatlak Uzunluğu”        |           |
| Run 2mm/min..... 10 sec             | 3. Çevrim |
| Enter..... “Çatlak Uzunluğu”        |           |
| Run 2mm/min..... 10 sec             | 4. Çevrim |
| Enter..... “Çatlak Uzunluğu”        |           |
| Run 2mm/min..... 10 sec             | 5. Çevrim |
| Enter..... “Çatlak Uzunluğu”        |           |
| Run 2mm/min..... 10 sec             | 6. Çevrim |
| Enter..... “Çatlak Uzunluğu”        |           |
| Run 15 mm/min.....Displacement zero | 7. Çevrim |
| End                                 |           |

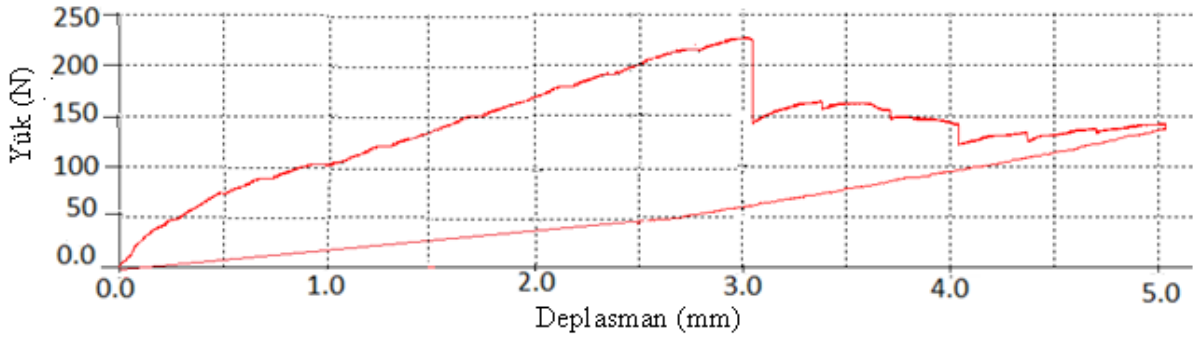
Program, 7 çevrimli olarak düzenlenmiştir. Bu çevrimli programlara karşılık gelen yük deplasman değerleri çekme cihazı programı tarafından kaydedilmektedir. Ön yük olarak 6N alınmıştır. Çevrimli olarak hazırlanmış program kullanılarak, 10 deney numunesi için Çift Ankastre Kiriş deneyi yapılmıştır. Yapılan bu deneyler sonucunda 3 deney numunesinde koheziv hasar yüzeyi elde edilmiştir (Ek-A). Bu üç yüzeye ait yük-deplasman grafikleri şekil 4. 3' de verilmiştir.



Şekil 4.3 a. Araldite 2015 yük- deplasman grafiği



Şekil 4.3 b. Araldite 2015 yük- deplasman grafiği

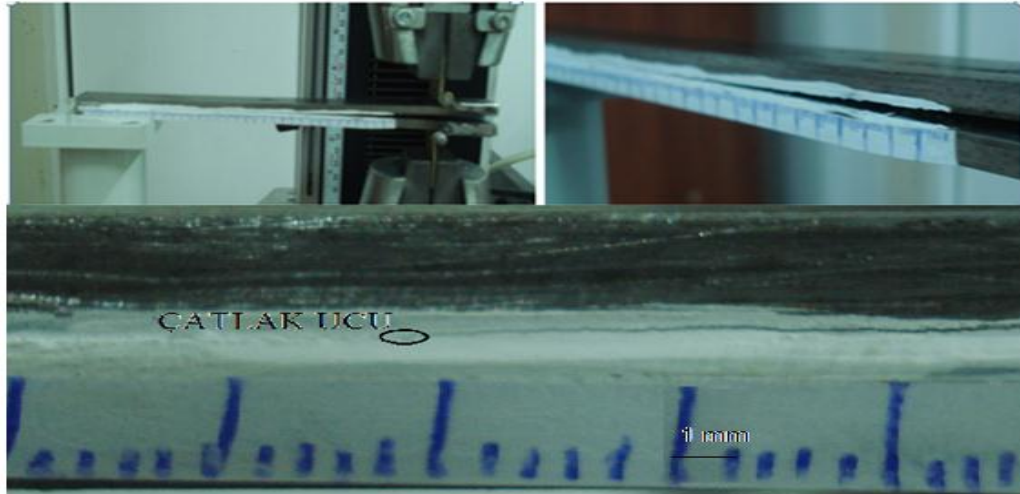


Şekil 4.3 c. Araldite 2015 yük- deplasman grafiği

Şekil 4.3' deki yük-deplasman grafiklerinde, çatlak ilerlemesinde ortaya çıkan yük düşmeleri ve deplasman değerleri incelenmiştir.

Şekil 4.3 a' da yükün 200 N' a kadar çıktıktan sonra, çatlak ilerlemesi boyunca yavaş yavaş azaldığı görülmüştür. Şekil 4.3 b' de yükün, 200 N' a kadar çıktığı, çatlak ilerlerken düşmelerinin gözlemlendiği, ancak tekrar 200 N' a kadar çıktığı görülmüştür. Çatlak ilerlerken yükün tekrar maksimum değerine gelmesi beklenmedik bir durumdur. Şekil 4.3 c' de yükün, 225 N' a kadar çıktığı, çatlak ilerlerken düşmelerinin gözlemlendiği, ancak bu düşmesinin fazla olduğu görülmüştür. Bu sebeplerden dolayı, şekil 4.3 a' da ki yük-deplasman grafiği seçilmiştir.

Deney sırasında, her bir yük düşmesinin gözlemlendiği noktaya karşılık gelen çatlak uzunlukları ölçülmüştür. Çatlak ilerlemesinin ölçümü şekil 4.4' de gösterilmiştir.



Şekil 4.4 Çift ankastre kiriş çatlak ilerlemesi ölçümü

Çift Ankastre Kiriş deneyinde çatlak ilerlerken yük değerlerinde değişimler gözlemlenmiş ve bu değerlere karşılık gelen deplasman değerleri kaydedilmiştir. Çizelge 4.3’ de deneyler sonucunda elde edilen; yük, deplasman ve çatlak uzunlukları verilmiştir.

Çizelge 4.3 Çift ankastre kiriş deneyinden elde edilen yük, deplasman, çatlak uzunluk değerleri

| Yük (P)<br><i>N</i> | Deplasman ( $\delta$ )<br><i>mm</i> | Çatlak uzunluğu (a)<br><i>mm</i> |
|---------------------|-------------------------------------|----------------------------------|
| 78                  | 0.502                               | 38                               |
| 116.5               | 1.46                                | 48                               |
| 201.4               | 3.25                                | 57                               |
| 176.3               | 3.32                                | 59                               |
| 173.5               | 3.62                                | 62                               |
| 171.4               | 3.92                                | 64                               |
| 151.3               | 4.15                                | 68                               |
| 146.5               | 4.23                                | 71                               |
| 142.6               | 4.42                                | 73                               |

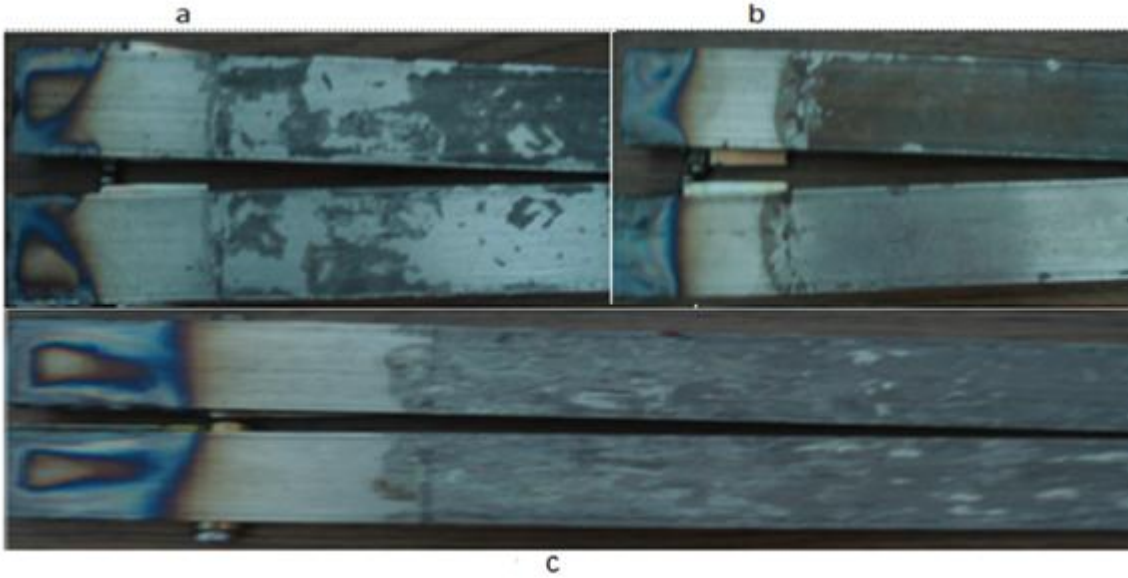
Çizelge 4.3’ de verilen değerler kullanılarak, Geliştirilmiş kiriş teorisi (Modified Beam Theory) ve Komplians kalibrasyon metodu (Compliance Calibration) ile Araldite 2015 epoksi yapıştırıcının Mod I enerji serbest kalma oranı ( $G_{IC}$ ) hesaplanmıştır.

#### 4.2.1 Çift Ankastre Kiriş Deneyinde Karşılaşılan Yapışma Hataları

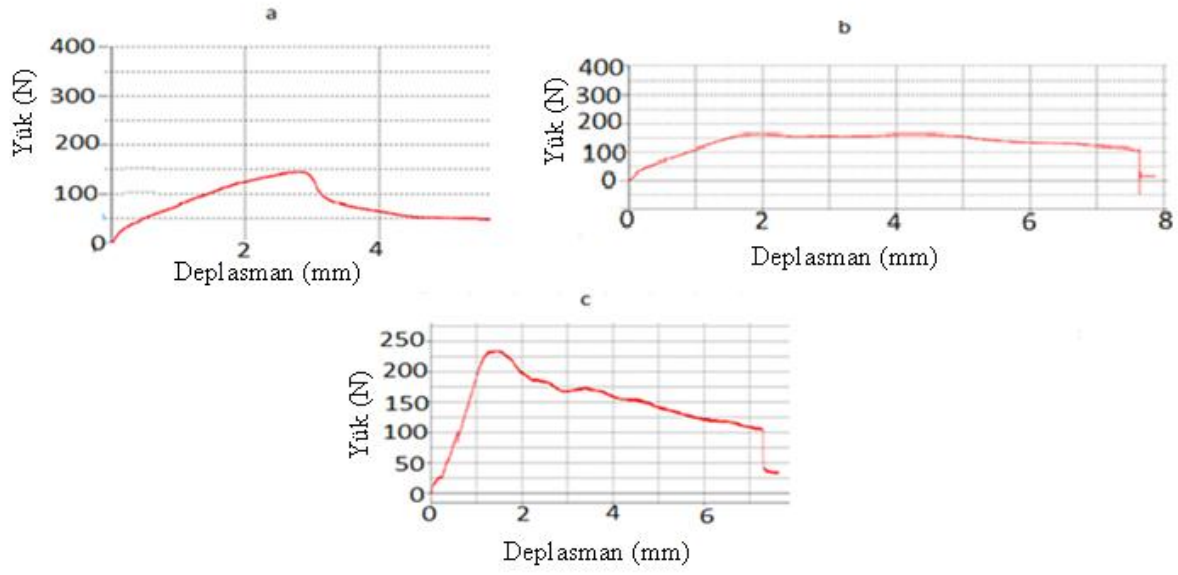
Araldite 2015 epoksi yapıştırıcının kırılma tokluk değerini hesaplamadan önce, deneylerde gözlemlenen yapışma hataları değerlendirilmiştir. Yapıştırıcı kullanılarak oluşturulan bindirme bağlantılarında çeşitli yapıştırma hataları gözlemlenmiştir. Özellikle Çift Ankastre Kiriş deneyi

yapılırken yükün tamamının yapıştırıcıya uygulanamaması nedeniyle yapıştırıcıda sıyrılma görülmüştür. Ayrıca levhalar yapıştırılırken, yapıştırıcı ile levha arasında hava boşluğunun kalmaması gerekmektedir. Ancak deneylerde, yapıştırıcı kalınlığının çok az olmasına rağmen hava boşluğundan kaynaklanan hatalar ile karşılaşmıştır.

Deneyde, yükün tamamen yapıştırıcıya iletilmesi sonucunda ortaya çıkan **koheziv açılma** ve yükün tamamen yapıştırıcıya iletilememesi sonucunda ortaya çıkan **adesiv açılma** görülmüştür. Şekil 4.5’ de deneyler sonrasında gözlemlenen kohesiv ve adesiv yapıştırma yüzeyleri gösterilmiştir. Şekil 4.6 ‘ da ise deneyler sonrasında gözlemlenen kohesiv ve adesiv yapıştırma yüzeylerine karşılık gelen yük-deplasman grafikleri gösterilmiştir.



Şekil 4.5 a. Adesiv çatlak ilerlemesi, b. Yüzey sıyrılması, c. Koheziv açılma



Şekil 4.6 Yük-deplasman grafikleri: a. Adesiv yüzey b. Yüzey sıyrılması c. Kohesiv yüzey,

Şekil 4.5 a ve b' deki yüzey hataları yükün maksimum seviyeye ulaşmasını engellemiştir. Yapıştırıcıya belli bir miktarda yük iletilmiş, ancak yapıştırıcıya maksimum yükün uygulanamadığı gözlemlenmiştir.

#### 4.2.2 Mod I Enerji Serbest Kalma Oranı ve Kırılma Tokluğu

Burada, ÇAK deneyinden elde edilen veriler kullanılarak, Geliştirilmiş kiriş teorisi (Modified Beam Theory), Komplians kalibrasyon metodu (Compliance Calibration) ve Alan metodu ile Araldite 2015 epoksi yapıştırıcının Mod I enerji serbest kalma oranı hesaplanmıştır.

##### 4.2.2.1 Geliştirilmiş Kiriş Teorisi (Modified Beam Theory)

Çift Ankastre Kiriş için *enerji serbest kalma oranı*, Geliştirilmiş Kiriş Teorisi ile hesaplanmıştır. Bu teori başlangıç olarak Irwin teoremini kabul etmiştir. Irwin teoremine göre Enerji serbest kalma oranı [24];

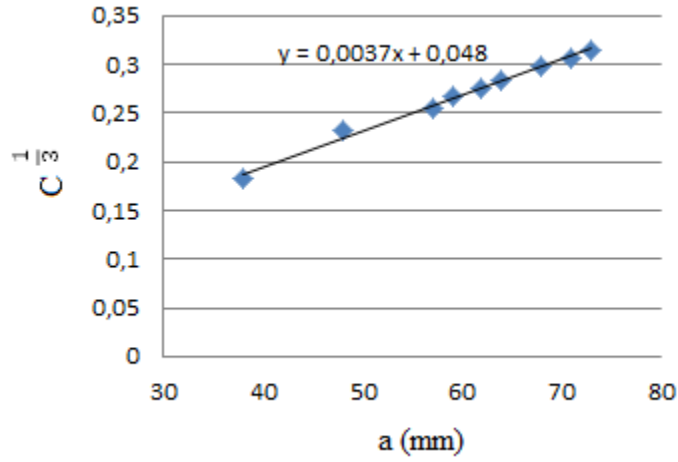
$$G_{IC} = \frac{1}{2b} P^2 \frac{dC}{da} \quad (4.1)$$

$$G_{IC} = \frac{3P\delta}{2ba^*} \quad (4.2)$$

Burada P uygulanan yükü, b levhanın genişliğini, C kompliansı,  $\delta$  deplasmanı,  $a^*$  ise toplam çatlak uzunluğunu göstermektedir. Toplam çatlak uzunluğu  $a^* = a + |\Delta|$  şeklinde hesaplanmaktadır.  $\Delta$  değeri, komplians-çatlak uzunluğu lineer eğrisinin x-eksenini kestiği nokta ile koordinat orijini arasındaki uzunluğun mutlak değerine ( $|\Delta|$ ) eşittir. Komplians

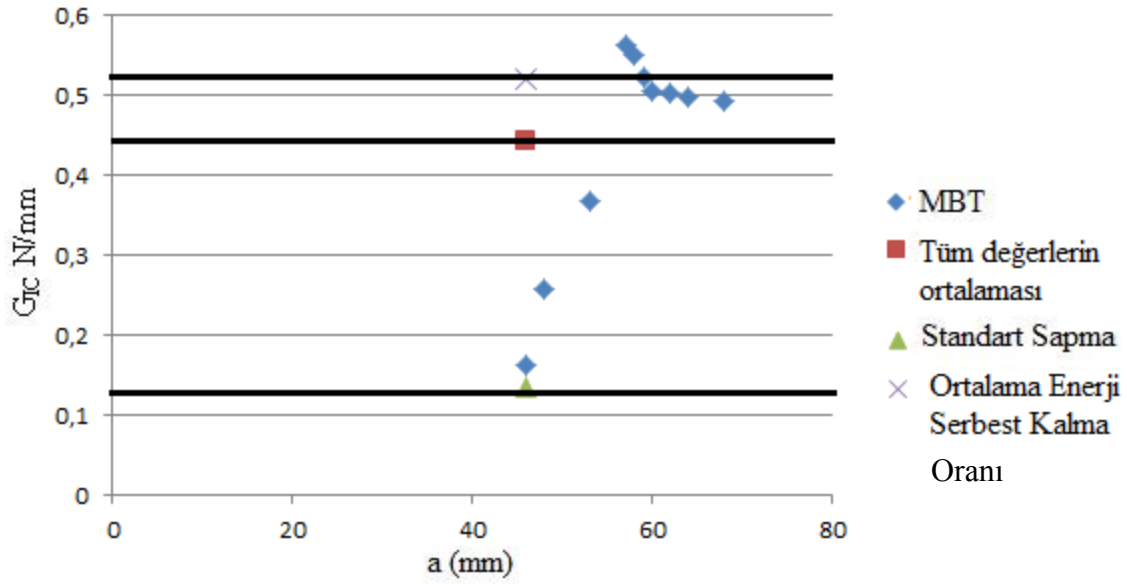
$$C = \frac{\delta}{P} \quad (4.3)$$

şeklinde tanımlanmaktadır. Komplians değerleri (4.3) kullanılarak hesaplanmıştır. Komplians değerlerine karşılık gelen çatlak uzunlukları kullanılarak şekil 4.7’ deki grafik elde edilmiştir. Bu grafiğin doğru denklemi kullanılarak  $|\Delta|$  değeri hesaplanmıştır.



Şekil 4.7 Komplians-Çatlak uzunluğu

Şekil 4.7’ den  $|\Delta|$  değeri 12.97 olarak hesaplanmıştır. (4.2)’ de yük, deplasman ve çatlak uzunluğu değerleri yerine çizelge 4.3’ de verilen değerler konulmuş ve  $\Delta$  değeri 12.97 alınarak **Enerji Serbest Kalma Oranı** hesaplanmıştır. Şekil 4.8’ de Enerji serbest kalma oranı-çatlak uzunluk grafiği istatistiki bir dağılım şeklinde gösterilmiştir.



Şekil 4.8 MBT’ den elde edilen R eğrisi

Şekil 4.8’ de tüm değerlerin ortalaması, 0.4427 N/mm, standart sapma, 0.1347 olarak hesaplanmıştır. Geliştirilmiş Kiriş teorisi kullanılarak *Araldite 2015* epoksi yapıştırıcının enerji serbest kalma oranı değerlerinin birbirine yakın oldukları noktaların ortalamaları 0,519571 N/mm olarak hesaplanmıştır. Bulunan bu sonuç literatürde [7] verilen değer ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca, Mod I kırılma tokluğu;

$$K_{Ic} = \sqrt{G_{Ic} \times E} \quad (4.4)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada  $K_{Ic}$  Mod I kırılma tokluğu, E yapıştırıcının elastisite modülüdür. Şekil 4.8’ den elde edilen ortalama enerji serbest kalma oranı  $G_{Ic}$  (4.4)’ de yerine yazıldığında, *Araldite 2015* epoksi yapıştırıcının kırılma tokluk değeri  $31.0033 \text{ MPa}\sqrt{\text{mm}}$  olarak hesaplanmıştır.

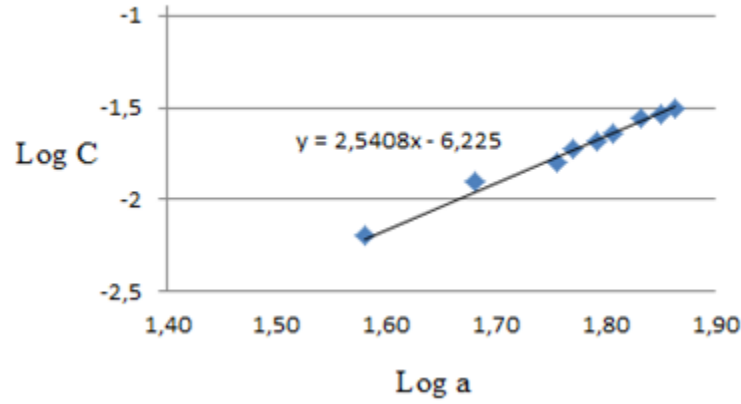
#### 4.2.2.2 Komplians Kalibrasyon Metodu

Enerji serbest kalma oranının ASTM D 3433-99’ de önerilen bir diğer hesaplama yöntemi de Komplians Kalibrasyon metodudur. Komplians Kalibration yöntemi başlangıç olarak Irwin yöntemini esas almaktadır.

Bu metot ile enerji serbest kalma oranı hesaplanırken, ilk olarak, ÇAK deneyi sonucunda elde edilen yük, deplasman ve çatlak uzunlukları belirlenmiştir.

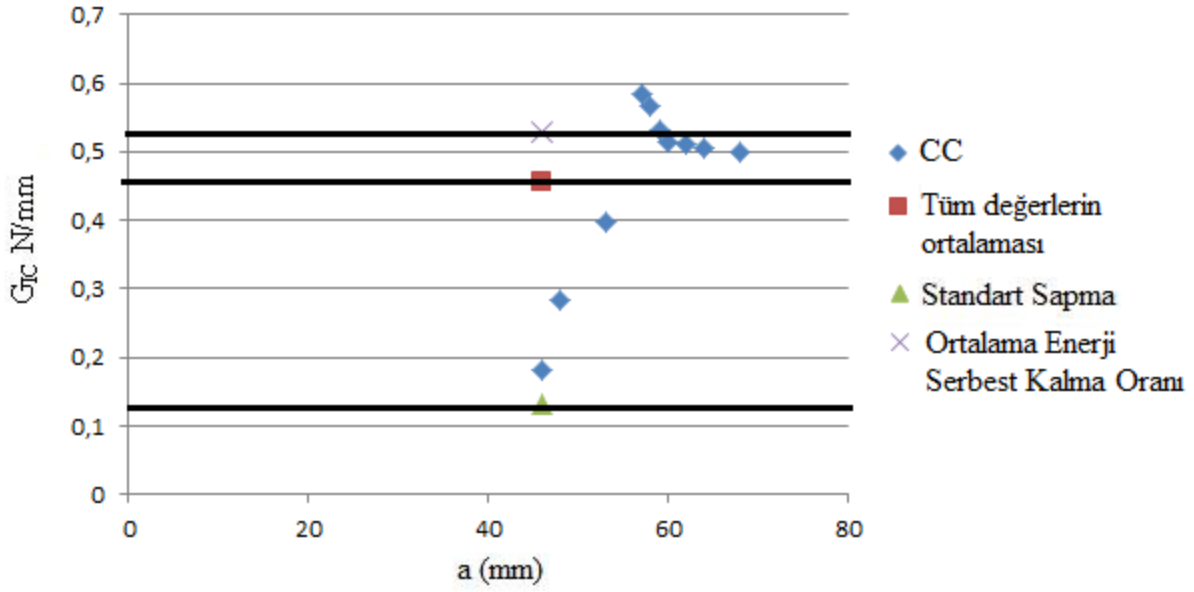
Daha sonra, deplasmanın yüke bölünmesiyle elde edilen komplians değerlerinin logaritmik değerleri ile çatlak uzunluğunun logaritmik değerleri kullanılarak şekil 4.9’ da verilen grafik elde edilmiştir. Bu doğrunun eğimi ‘n’ parametresini verecektir. Bu değer 2.5408 olarak belirlenmiştir.

$$G_{IC} = \frac{nP\delta}{2ba} \quad (4.5)$$



Şekil 4.9 Komplians-çatlak uzunluğu logaritmik grafiği

Çizelge 4.3’ de verilen yük, deplasman ve çatlak uzunluğu değerleri (4.5)’ de [25] yerine yazılarak Enerji serbest kalma oranları elde edilmiş ve sonuçlar istatistiki bir dağılım şeklinde şekil 4.10’ da verilmiştir.



Şekil 4.10 CC' den elde edilen R eğrisi

Şekil 4.10' da kompians kalibrasyon yönteminden elde edilen enerji serbest kalma oranı-çatlak uzunluk grafiği istatistiki bir dağılım şeklinde gösterilmiştir. Bu grafikte tüm değerlerin ortalaması, 0.4568 N/mm, standart sapma, 0.1309 olarak hesaplanmıştır. Kompians kalibrasyon teorisi kullanılarak Araldite 2015 epoksi yapıştırıcının enerji serbest kalma oranı değerlerinin birbirine yakın oldukları noktaların ortalamaları 0,5298 N/mm olarak hesaplanmıştır. Bulunan bu sonuç literatürde [7] verilen değer ile karşılaştırılmıştır.

(4.4) kullanılarak kompians kalibrasyon metoduna göre Araldite 2015 epoksi yapıştırıcının kırılma tokluk değeri  $31,307 \text{ MPa} \sqrt{\text{mm}}$  olarak hesaplanmıştır.

#### 4.2.2.3 Alan Metodu

Enerji serbest kalma oranının bir diğer hesaplama yöntemi de alan metodudur. Bu metoda göre, enerji serbest kalma oranı [24];

$$G_{IC} = \frac{1}{2b\Delta a} (P_1\delta_2 - P_2\delta_1) \quad (4.6)$$

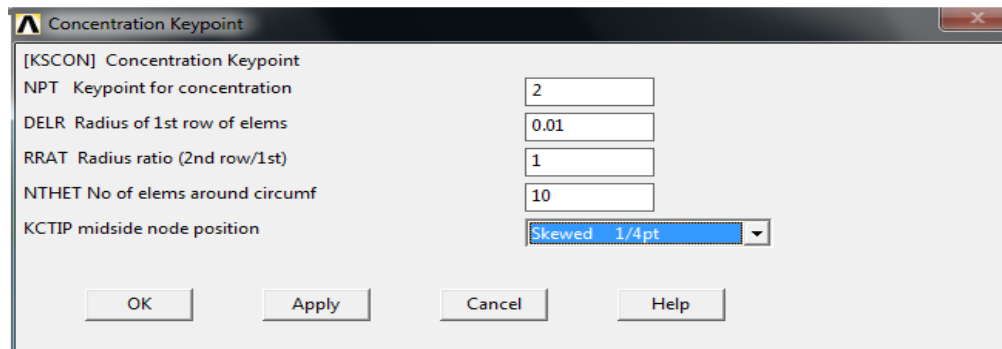
dır. Burada, P uygulanan yük,  $\delta$  bu yüklere karşılık gelen deplasman değeri, b levha genişliği,  $\Delta a$  çatlak boyundaki değişimdir.

Şekil 4.3 a' daki yük-deplasman grafiğinin alanı hesaplanırken;  $P_1$ ,  $\delta_1$ ,  $P_2$ ,  $\delta_2$ ,  $b$ ,  $\Delta a$  değerleri sırasıyla, 201.4, 3.25, 142.6, 4.42, 25 mm, 16 mm alınmıştır. Bu değerler denklem (4.6)' da yerine yazılırsa, enerji serbest kalma oranı  $G_{IC}$ , 0.5334 N/mm olarak hesaplanmıştır. Denklem (4.4) kullanılarak Mod I kırılma tokluk değeri  $31.4132 \text{ MPa}\sqrt{\text{mm}}$  olarak hesaplanmıştır.

#### 4.2.3 Sonlu Elemanlar Analizi

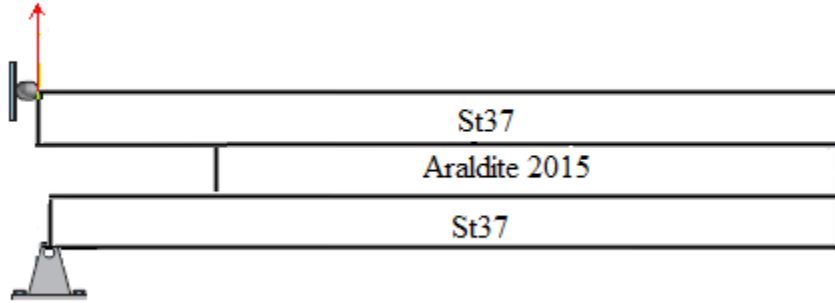
Çift Ankastre Kiriş deneyinin sonlu elemanlar modeli Ansys 12 programı kullanılarak oluşturulmuştur. Modelleme için önce, model geometrisinin *nokta değerleri* ('**Key Point**') programa girilmiştir. İlgili noktalar belirlendikten sonra, modelin alanları oluşturulmuştur. Üst ve alt levhalar ile epoksi yapıştırıcının malzeme özellikleri programa girilmiştir. Malzeme özellikleri olarak levhaların ve yapıştırıcının elastisite modülü ve poisson oranı sırasıyla, 210 GPa, 1850 MPa, 0.3, 0.33 olarak sonlu elemanlar programında kullanılmıştır. Levhalar için eleman olarak 8 düğümlü dörtgen eleman (Plane 82) kullanılmış, yapıştırıcı için 4 düğümlü dörtgen eleman (Plane 42) kullanılmıştır. Problem düzlem şekil değiştirme (plain strain) problemidir. Çift Ankastre kiriş için oluşturulan sonlu eleman modeli, literatürde [25] bulunan model dikkate alınarak oluşturulmuştur.

Daha sonra, modele deneyden elde edilen yük değeri uygulanmıştır. Başlangıç çatlak uzunluğu 30 mm olarak alınmıştır (şekil 4.1). Başlangıç çatlağının sonlu elemanlar *ağ* (**Mesh**) özellikleri belirlenmiştir. Bu özellikleri belirlemek amacıyla, sonlu elemanlar programının komut kısmına "KSCON, p" yazılmıştır. Çatlak ucu seçildikten sonra, çıkan menüye çatlak etrafında oluşturulacak eleman sayısı, eleman boyu ve eleman özelliği belirtilerek işleme devam edilmiştir. Şekil 4.11' de ön çatlağın sonlu elemanlar ağ özellikleri verilmiştir.



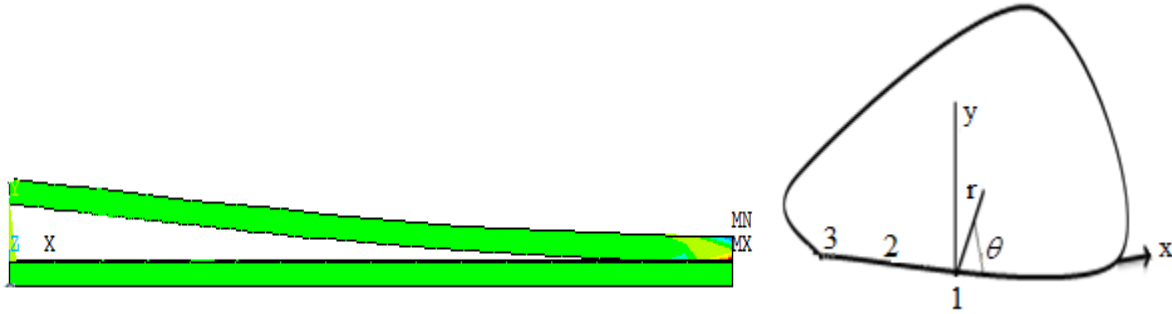
Şekil 4.11 Çatlağın sonlu elemanlar ağ özellikleri

Çift Ankastre kiriş deneyi için oluşturulan model ve sınır şartları şekil 4.12’ de verilmiştir [25].



Şekil 4.12 Çift ankastre kiriş sonlu elemanlar modeli

Yapıştırıcının kırılma tokluk değerinin hesaplanabilmesi için çatlak ucu düğüm noktalarının belirlenmesi gerekmektedir. Sonlu elemanlar modelinin deforme olmuş yapısı ile çatlak ucu düğüm seçimi şekil 4.13’ de gösterilmiştir.



Şekil 4.13 Deforme olmuş bindirme modeli ve çatlak düğüm seçimi

Mod I kırılma tokluk değerini hesaplayabilmek için, ilk olarak sonlu elemanlar programı içerisinde yer alan *tanımlanmış yol* (define path) komutu ile çatlak üzerindeki düğüm noktaları seçilmiştir. Bu düğüm noktaları kullanılarak, Ansys sonlu elemanlar programının komut kısmına ‘kcalc,p’ yazılarak *Araldite 2015 epoksi* yapıştırıcısının Mod I açılma moduna göre kırılma tokluk değeri hesaplanmıştır. Sonlu elemanlar analiz sonucu şekil 4.14’ de verilmiştir.

```

**** CALCULATE MIXED-MODE STRESS INTENSITY FACTORS ****
ASSUME PLANE STRAIN CONDITIONS
ASSUME A HALF-CRACK MODEL WITH SYMMETRY BOUNDARY CONDITIONS <USE 3 NODES>
EXTRAPOLATION PATH IS DEFINED BY NODES:      36      211      210
WITH NODE      36 AS THE CRACK-TIP NODE

USE MATERIAL PROPERTIES FOR MATERIAL NUMBER      2
EX =      1850.0      NUXY =      0.33000      AT TEMP =      0.0000

**** KI =      37.420      ,      KII =      0.0000      ,      KIII =      0.0000      ****

```

Şekil 4.14 Ansys sonlu elemanlar programı analiz sonuçları

Sonlu elemanlar programı kullanılarak Araldite 2015 epoksi yapıştırıcının kırılma tokluk değeri ( $K_{IC}$ ), 37.420 MPa  $\sqrt{mm}$  olarak elde edilmiştir.

## BÖLÜM 5

---

### MİKRO YAPI ANALİZİ

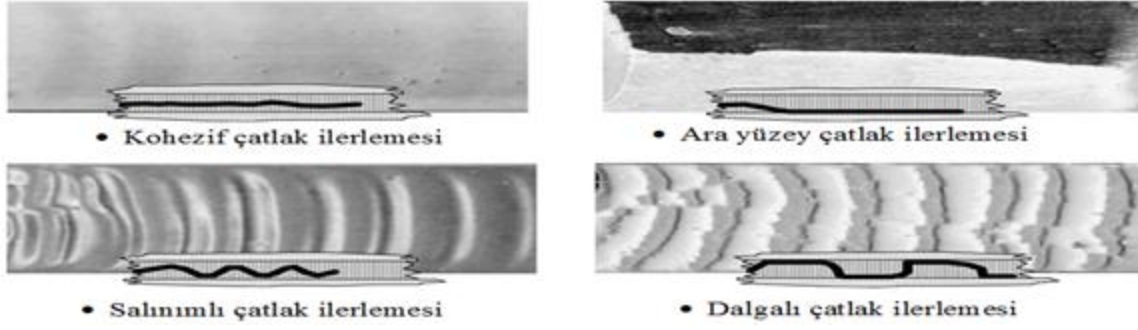
#### 5. 1 Taramalı Elektron Mikroskop (Scanning Electron Microscope) ile Mikro Yapı Analizi

Yapıştırma bağlantılarında çatlak mekanizmasının mikro yapıyı nasıl etkilediğini gözlemlemek amacıyla taramalı elektron mikroskop kullanılmaktadır. Ayrıca mikro yapı görüntüleri kullanılarak yapıştırıcının mukavemet analizi, içyapı hataları ve kırılma mekaniği analizleri yapılabilmektedir.

Bu çalışmada, yüzey analizlerini yapabilmek amacıyla taramalı elektron mikroskop kullanılmıştır. Literatürde yer alan çalışmaların çoğunda Çift Ankastre Kiriş Deneyi (ÇAK) sonrasında elde edilen yüzeylerin mikro yapı görüntüleri verilmiştir. Bu sebepten dolayı Çift Ankastre Kiriş deneyi mikro yapı analizi için seçilmiştir. Ayrıca Araldite 2015 epoksi, yapıştırıcı olarak seçilmeden önce denenen **2 Ton Epoksi** ve **SG5000-03 Metakrilat** görüntüleri de incelenmiş ve **Araldite 2015 epoksi** görüntüleri ile karşılaştırılmıştır.

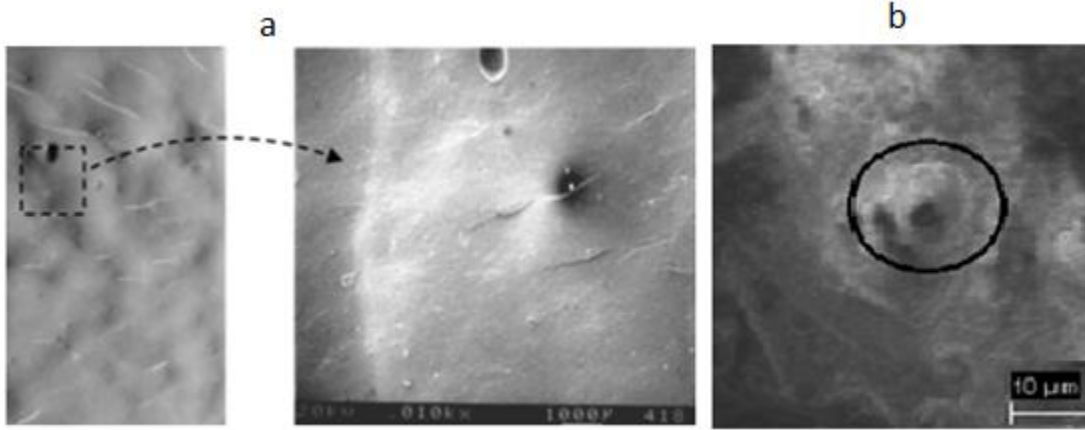
#### 5.2 Yapıştırıcı Mikro Yapı Analizi

Çift Ankastre Kiriş (ÇAK) deneyinde kullanılan *Araldite 2015* epoksi yapıştırıcının mikro yapı analizi yapılmıştır. Çatlağın ilerleme durumuna göre mikro yapıda farklılıklar gözlemlenmektedir. Mikro yapı farklılıklarına göre dört farklı çatlak ilerleme mekanizması ifade edilmektedir. Bunlar; koheziv çatlak ilerlemesi, ara yüzey çatlak ilerlemesi, salınlı çatlak ilerlemesi, dalgalı çatlak ilerlemesidir.



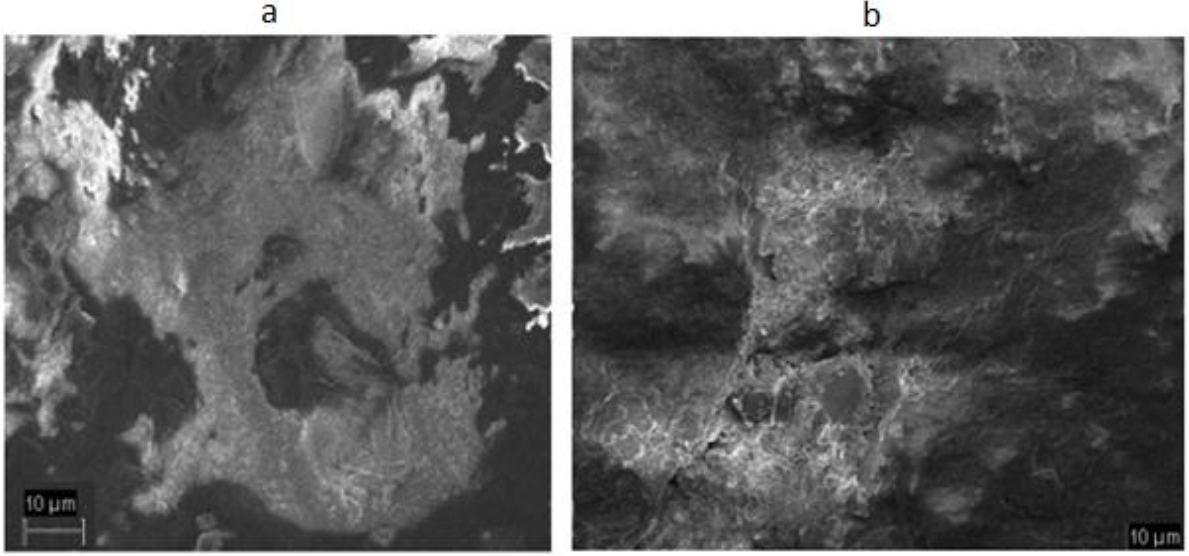
Şekil 5.1 Çatlak ilerleme yolları [26]

Ara yüzey çatlak ilerlemesi sırasında mikro yapıda boşluklar oluşmaktadır. Ara yüzey çatlak ilerlemesinin temel sebeplerinden biri kullanılan yapıştırıcının yapışma mukavemetinin zayıf olmasıdır. Çift Ankastre Kiriş deneyinde alternatif yapıştırıcı olarak kullanılan Devcon firmasına ait **2 Ton epoksi** yapıştırıcısında ara yüzey çatlak ilerlemesi gözlemlenmiştir. Ara yüzey çatlak ilerlemesi gözlemlenen **2 Ton epoksi** yapıştırıcıya ait mikro yapı görüntüleri ve literatürde rapor edilen görüntüler şekil 5.2’ de gösterilmiştir [26].



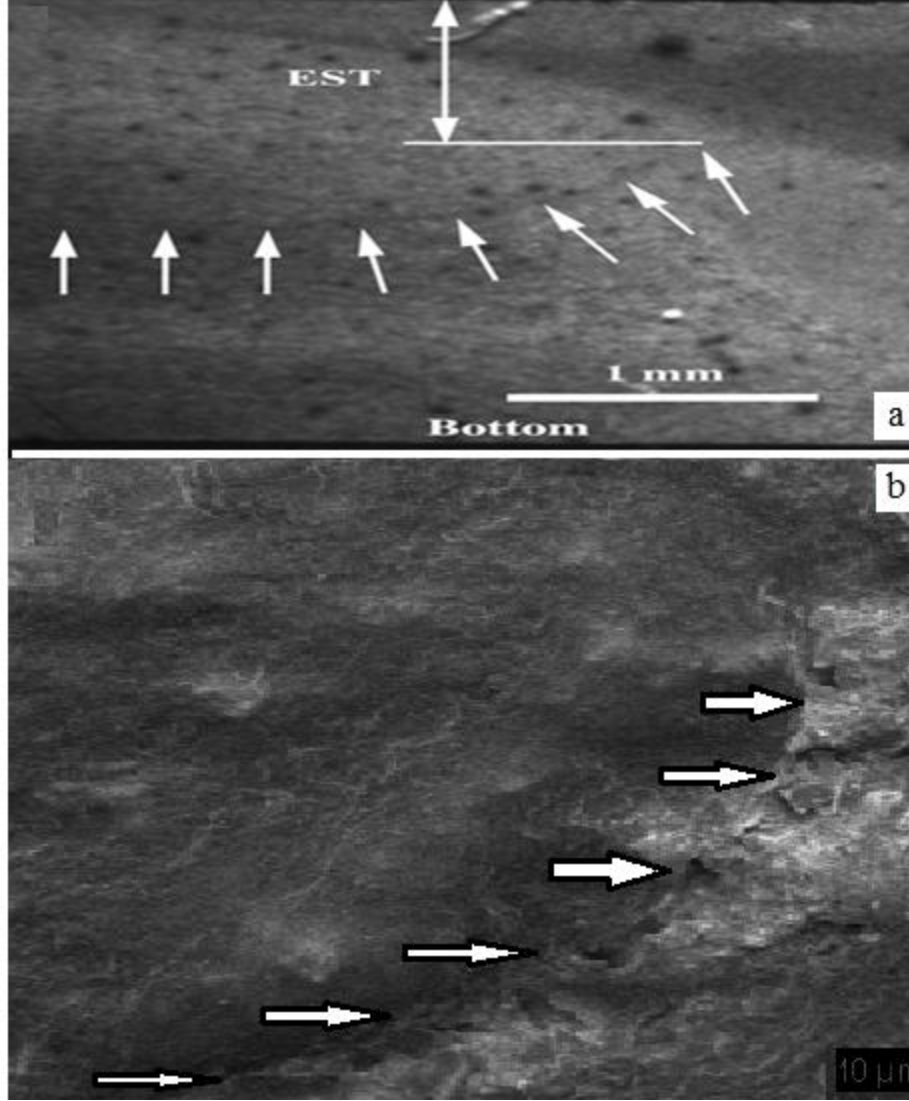
Şekil 5.2 SEM görüntüleri: a. Literatürde [26] b. 2 Ton epoksi SEM görüntüsü

Bu çalışmada kullanılan Araldite 2015 epoksi yapıştırıcısı ile 2 Ton epoksi yapıştırıcısının mikro yapı görüntüleri şekil 5.3’ de verilmiştir. Mikro yapılarından da görüldüğü gibi Araldite 2015 epoksi yapıştırıcısının taneleri birbirine yakın ve tane sınırları sıktır. Tane sınırlarının sık olması yapı içerisinde dislokasyon hareketlerini zorlaştıracığından yapışma mukavemetini arttıracaktır. 2 Ton epoksi yapıştırıcıda ise taneler birbirinden ayrı ve yapı içerisinde büyük boşluklar (voids) mevcuttur.



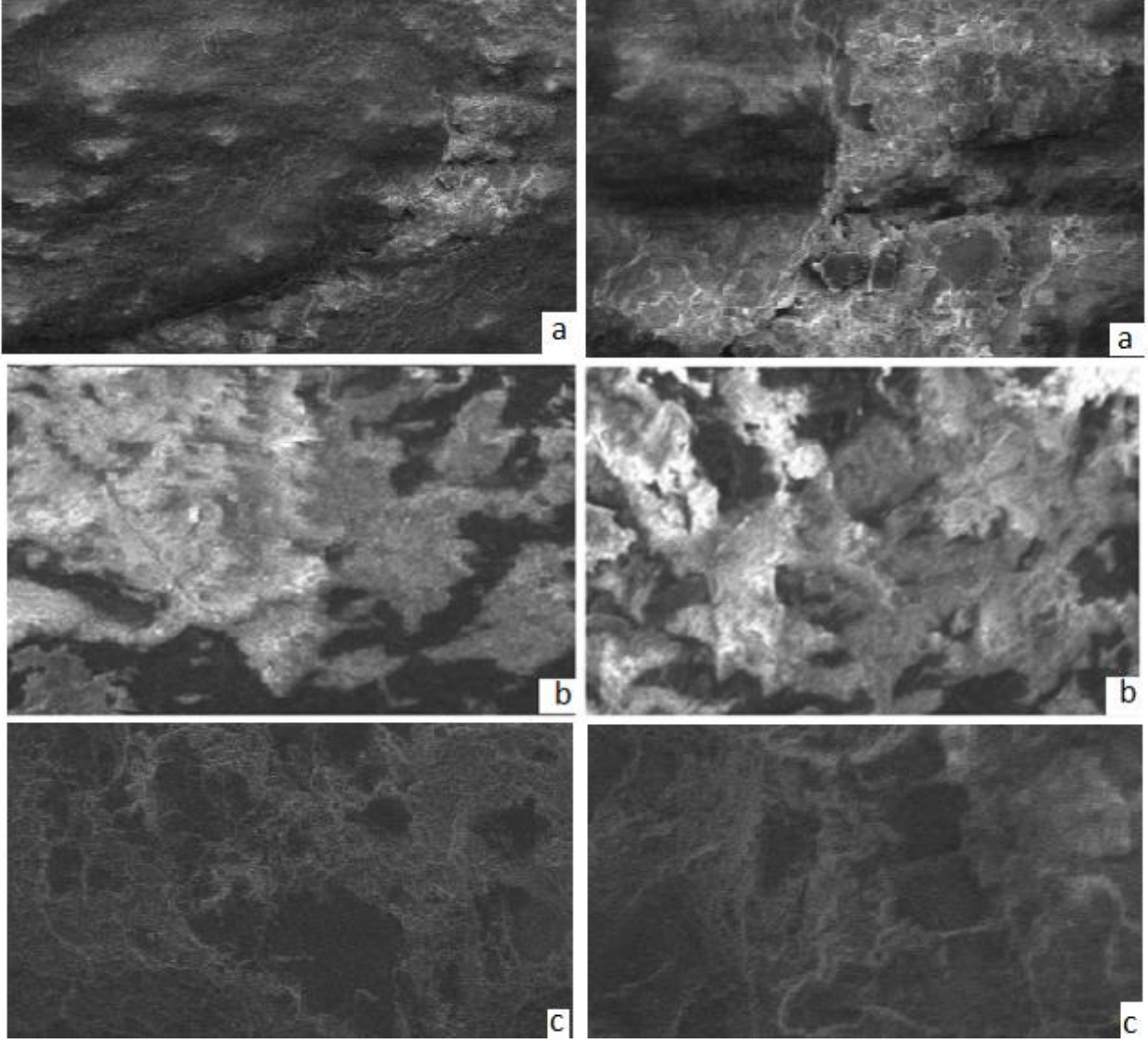
Şekil 5.3 Mikro yapı : a. 2 Ton epoksi b. Araldite 2015 Epoksi

Yapıştırıcı içerisinde ilerleyen çatlağın yolunu mikro yapıdaki görüntüsünden gözlemlemek mümkün olmaktadır. Literatür araştırmasında çatlak içeren bir modelin mikro yapı görüntüsü bulunarak incelenmiştir. Şekil 5.4 a' da literatürde bulunan çatlak görüntüsü verilmiştir [11]. Şekil 5.4 b' de ise deneylerde kullanılan Araldite 2015 epoksi yapıştırıcının mikro yapısında meydana gelen çatlak görüntüsü verilmiştir.



Şekil 5.4 Çatlak yolu: a. Literatür [11] b. Araldite 2015 Epoksi

Deneylerde Araldite 2015 epoksi yapıştırıcıya karar vermeden önce alternatif yapıştırıcılar denenmiştir. Bu alternatif yapıştırıcılar, 2 Ton epoksi ve SG5000-S03 metakrilat yapıştırıcısıdır. Bu üç yapıştırıcı içinden Araldite 2015 yapıştırıcısı seçilirken üç yapıştırıcının da mikro yapı görüntüleri incelenmiştir (şekil 5.5).



Şekil 5.5 Mikro yapı görüntüleri a. Araldite 2015 epoksi b. 2 Ton epoksi c. Metakrilat

Üç yapıştırıcıyı da mikro yapılarına göre değerlendirdiğimizde, Araldite 2015 epoksi yapıştırıcının tane sınırlarının sık, küçük ve çok sayıda olması mukavemetinin artmasına neden olmuştur. Ayrıca, Araldite 2015 epoksi yapıştırıcının mikro yapı görüntülerinde çatlak ilerleme yolu kullanılan diğer yapıştırıcıların mikro yapı görüntülerine göre daha net bir biçimde görülmüştür.

## BÖLÜM 6

---

### SONUÇ VE ÖNERİLER

HUNTSMAN firmasının ürettiği *Araldite 2015* epoksi yapıştırıcının Mod I kırılma tokluk ve enerji serbest kalma oranı değerleri Çift Ankastre Kiriş Deneyi (ÇAK) ve Sonlu elemanlar analizi ile belirlenmiştir.

Çift ankastre kiriş deneyinde, yük, deplasman ve çatlak uzunluğu değerleri belirlenmiştir (çizelge 4.3). Elde edilen bu değerler, *Komplians kalibrasyon metodu*, *Geliştirilmiş kiriş teorisi* ve *alan metodu*nda yerine yazılarak enerji serbest kalma oranları hesaplanmıştır.

Komplians kalibrasyon metodu, geliştirilmiş kiriş teorisi ve alan metodu kullanılarak hesaplanan enerji serbest kalma oranları (4.4)' de yerine konularak kırılma tokluk değerleri hesaplanmıştır. Hesaplanan kırılma tokluk değerleri ile literatürde [7] yer alan kırılma tokluk değeri çizelge 6.1' de verilmiştir.

Çizelge 6.1 Çift ankastre kiriş için kırılma tokluk değerleri ve enerji serbest kalma oranı

|                              | $G_{IC} \text{ ( N / mm )}$ | $K_{IC} \text{ ( MPa}\sqrt{\text{mm}} \text{ )}$ |
|------------------------------|-----------------------------|--------------------------------------------------|
| Geliştirilmiş Kiriş Teorisi  | 0.519571                    | 31.0033                                          |
| Komplians Kalibrasyon Metodu | 0.5298                      | 31.307                                           |
| Alan Metodu                  | 0.5334                      | 31.4132                                          |
| Sonlu Elemanlar Metodu       | 0.756                       | 37.420                                           |
| Literatür [7]                | 0.525                       | 31.160                                           |

Çizelge 6.1’ de görüldüğü gibi, bu çalışmadan elde edilen kırılma tokluk değerlerinin, literatürde verilen değere çok yakın olduğu görülmektedir.

Ayrıca, deneysel çalışmalardan daha doğru sonuçlar alabilmek için literatürde birçok yöntem önerilmektedir. Bunlar; levha yüzeylerinin pürüzsüz hale getirilmesi için *kum püskürtme tekniği* uygulanması, yapıştırıcıda oluşan hava kabarcıklarının giderilebilmesi için *vakumlama tekniği* kullanılmasıdır. İlave olarak, deneysel sonuçlar için *belirsizlik analizi* yapılması, nem ve korozyon gibi faktörlerin kırılma tokluk değeri üzerine etkisinin incelenmesi önerilebilir.

## KAYNAKLAR

---

- [1] Tın, S., Tek Bindirmeli Yapıştırma Bağlantılarının Tasarım ve Analizi, <http://www.belgeler.com/blg/lpf/tek-bindirmeli-yapistirma-baglantilarinin-tasarim-ve-analizi-design-and-analysis-of-single-lap-adhesive-bonding>, 1 Ağustos 2012
- [2] G.K.Hu, F.Schmit, D. François ve D. Baptiste., (1992). “Fracture mechanics analysis of adhesive lap joints”, *Anales de Mecanica de la Fractura*, 9:377-386
- [3] Li, G., Lee-Sullivan, P. ve Thring, R.W., (1999). “Nonlinear finite element analysis of stress and strain distributions across the adhesive thickness in composite single-lap joints”, *Composite Structures*, 46:395-403.
- [4] Li, G. ve Lee-Sullivan, P., (2001). “Finite element and experimental studies on single-lap balanced joints in tension”, *International Journal of Adhesion &Adhesives*, 21:211-220
- [5] Abdel Wahab, M.M., Ashcroft,I.A., Crocombe, A.D. ve Smith, P.A.,(2002). “Numerical prediction of fatigue crack propagation lifetime in adhesively bonded structures”, *International Journal of Fatigue*, 24: 705–709.
- [6] Kim, K.S., Yoo, J.S., Yi, Y.M. ve Kim, C.G., (2006). “Failure mode and strength of uni-directional composite single lap bonded joints with different bonding methods”, *Composite Structures*, 72 :477–485
- [7] Da Silva, L.F.M., Carbas, R,J,C., Critchlowb, G.W., Figueiredo, M.A.V. ve Brown, K.; (2009). “Effect of material, geometry, surface treatment and environment on the shear

- strength of single lap joints”, International Journal of Adhesion &Adhesives, 29:621-632.
- [8] Yana, Z.M., You, M., Yi, X.,S. ve Li, Z., (2007). “ A numerical study of parallel slot in adherend on the stress distribution in adhesively bonded aluminum single lap joint”, International Journal of Adhesion & Adhesives , 27:687-695
- [9] Fernlund, G., (2007). “Stress analysis of bonded lap joints using fracture mechanics and energy balance”, International Journal of Adhesion & Adhesives, 27 :584–592.
- [10] Karakaya, Ş. ve Soykasap, Ö., (2008). “ Yapıştırıcı ile birleştirilmiş tek bindirmeli dokumalı kompozit yapıların eğilme hasarı”, Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi, 2:43-52.
- [11] Fersini, D. ve Pirondi, A., (2008). “Analysis and modelling of fatigue failure of friction stir welded aluminum alloy single-lap joints”, Engineering Fracture Mechanics, 75: 790-803.
- [12] Shenoy, V., Ashcroft, I.A., Critchlowb, G.W., Crocombe, A.D.ve AbdelWahab,M.M., (2009). “An investigation into the crack initiation and propagation behavior of bonded single-lap joints using backface strain”, International Journal of Adhesion & Adhesives, 29: 361–371
- [13] Ghibirgiu, D., (2009). “ Determination of the toughness in mode II for different types of adhesive”, Master Thesis, University of Porto, Natural Science, Portugal
- [14] Loya, J.A., Villa, E.I. ve Fernandez-Saez, J., (2010). “Crack-front propagation during three-point-bending tests of polymethyl-methacrylate beams”, Polymer Testing, 29:113-118.
- [15] Ming Jen, Y. ve Chih-Wei K., (2010). “Evaluation of fatigue life of adhesively bonded aluminum single-lap joints using interfacial parameters”, International Journal of Fatigue, 32:330-340
- [16] Ouinas, D., Bachir Bouiadjra, B., Achour, T. ve Benderdouche, N., (2010). “Influence of disbond on notch crack behaviour in single bonded lap joints”, Materials & Design, 31:4356-4362

- [17] Chen, Z., Adams, R.D. ve Da Silva, L.F.M.,(2011). “Prediction of crack initiation and propagation of adhesive lap joints using an energy failure criterion”, Engineering Fracture Mechanics,78 : 990–1007.
- [18] S. Aydın, M.Y. Solmaz ve A. Turgut., (2011) “Epoksi ve Akrilik Bazlı Yapıştırıcıların Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi” 6 th International Advanced Technologies Symposium, 16-18 Mayıs 2011, Elazığ
- [19] Yıldırım, M., (2006). “Yapıştırıcı ile Birleştirilmiş Bindirme Bağlantılarının Modal Analizi ve Titreşim Kontrolü”, Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri
- [20] Çalık, A., (2008). “Yapıştırıcılar ve köşeleri yuvarlatılmış basamaklı bindirme yapıştırıcı bağlantılarında gerilme analizi”, Yüksek Lisans Tezi, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Zonguldak
- [21] Topçu, M. ve Taşgetiren, S., (1998). “Mühendisler için Sonlu Elemanlar Methodu”,7, PAÜ, Mühendislik Fakültesi Matbaası , Denizli
- [22] Özer, H., (1996). “Düz Dişli Çarkların Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Gerilme Analizi”, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya
- [23] Araldite2015, Technical Data Sheet, <http://www.intertronics.co.uk/data/ara2015.pdf>, 1 Temmuz 2012
- [24] Bardis, J. D. ve Kedward, K. T., (2002), “Surface Preparation Effects on Mode I Testing of Adhesively Bonded Composite Joints” , Journal of Composites Technology & Research, JCTRER, 24:30–37.
- [25] Banea, M.D., da Silva, L.F.M. ve Campilho, R.D.S.G., (2011), “Mode I fracture toughness of adhesively bonded joints as a function of temperature: Experimental and numerical study”, International Journal of Adhesion & Adhesives, 31:273-279.
- [26] Chen, B.ve Dillard, D.A.,(2001). “The effect of the *T*-stress on crack path selection in adhesively bonded joints”, International Journal of Adhesion & Adhesives, 21: 357-368.

- [27] Kessler. M.R ve White S.R., (2001).“ Self- activated healing of delamination damage in woven composites” , Composites Part A 32 :683-699
- [28] Xu, C., Siegmund, T. ve Ramani, K.,(2003). “Rate-dependent crack growth in adhesives II. Experiments and analysis” , International Journal of Adhesion & Adhesives,23:15-22.
- [29] Shiuh-Chuan, H., (1999). “Stress analysis of adhesively-bonded lap joints”, Composite Structures, 47: 673-678.
- [30] Yayla, P., (2007).“ Kırılma Mekaniği” , 1, ÇağlayanYayınevi, İstanbul.
- [31] Mustapha,F.,Sim, N.W. ve Shahrjerdi, A., (2011). “Finite element analysis (FEA) modeling on adhesive joint for composite fuselage model”, International Journal of the Physical Sciences, 6 (22) :5153-5165.
- [32] Banea,M.D. ,Silva, L.F.M. ve Campilho, R.D.S.G., (2011). “Mode I fracture toughness of adhesively bonded joints as a function of temperature: Experimental and numerical study” , International Journal of Adhesion & Adhesives , 31 : 273–279.
- [33] Ji, G., Ouyang, Z., Li ,G., Ibekwe, S. ve Seng Pang , S.,(2010). “ Effects of adhesive thickness on global and local Mode-I interfacial fracture of bonded joints”, International Journal of Solids and Structures, 47:2445–2458
- [34] Ameli , A. , Azari , S. , Papini , M. ve Spelt, J.K., (2011). “ Crack path selection in the fracture of fresh and degraded epoxy adhesive joints”, Engineering Fracture Mechanics, 78 : 1986–2003.
- [35] Tutluoglu, L. ve Keles, Ç., (2012). “Effects of geometric factors on mode I fracture toughness for modified ring tests”, International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 51 : 149–161.
- [36] Blackman, B.R.K., Kinloch, A.J. ve Paraschi, M., (2005). “The determination of the mode II adhesive fracture resistance, GIIC, of structural adhesive joints: an effective crack length approach”, Engineering Fracture Mechanics, 72 :877–897

- [37] Blackman, B.R.K. ,Kinloch, A.J., Rodriguez Sanchez, F.S. , Teo, W.S. ve Williams, J.G.,(2009). “The fracture behaviour of structural adhesives under high rates of testing”, Engineering Fracture Mechanics, 76 : 2868–2889.
- [38] Zhang,Y., Vassilopoulos, A.P. ve Keller, T.,(2010). “ Mode I and II fracture behavior of adhesively-bonded pultruded composite joints”, Engineering Fracture Mechanics, 77:128–143.
- [39] Yoshihara, H.,(2008). “ Mode II fracture mechanics properties of wood measured by the asymmetric four-point bending test using a single-edge-notched specimen”, Engineering Fracture Mechanics ,75:4727–4739
- [40] Blackman, B.R.K. ,Kinloch, A.J., Rodriguez Sanchez, F.S. ve Teo,W.S.,(2012).“The fracture behavior of adhesively-bonded composite joints: Effects of rate of test and mode of loading” , International Journal of Solids and Structures, 49 : 1434–1452
- [41] Da Silva , F.M.L., De Magalhães, F.A.C.R.G., Chaves, F. J. P.ve De Moura, M.F.S.F., (2010). “Mode II Fracture Toughness of a Brittle and a Ductile Adhesive as a Function of the Adhesive Thickness”, The Journal of Adhesion, 86(9): 891-905.
- [42] Engerer, J.D. ve Sancaktar, E.,(2011). “The effects of partial bonding in load carrying capacity of single lap joints”, International Journal of Adhesion & Adhesives, 31: 373–379.
- [43] Shahverdi, M., Vassilopoulos, A.P. ve Keller, T., (2011). “A phenomenological analysis of Mode I fracture of adhesively-bonded pultruded GFRP joints”, Engineering Fracture Mechanics, 78: 2161–2173.
- [44] Ameli, A.,Papini, M. ve Spelt, J.K.,(2011). “Evolution of crack path and fracture surface with degradation in rubber-toughened epoxy adhesive joints: Application to open-faced specimens”, International Journal of Adhesion & Adhesives, 31:530–540.
- [45] Reis, P.N.B., Ferreira, J.A.M. ve Antunes, F., (2011). “ Effect of adherend’s rigidity on the shear strength of single lap adhesive joints”, International Journal of Adhesion & Adhesives, 31: 193–201.
- [46] Ameli, A., Papini, M., Schroeder, J.A. ve Spelt, J.K.,(2010). “Fracture R-curve characterization of toughened epoxy adhesives”, Engineering Fracture Mechanics, 77 : 521–534

- [47] Yang, Q.D. ve Thouless, M.D.,(2001). “Mixed-mode fracture analyses of plastically-deforming adhesive joints”, *International Journal of Fracture*, 110: 175–187.
- [48] Chen, B. ve Dillard, D.A., (2001). “Numerical analysis of directionally unstable crack propagation in adhesively bonded joints”, *International Journal of Solids and Structures*, 38:6907-6924.
- [49] Cognard,J.Y.,Cre’ac’headec, R. ve Maurice,J.,(2011).“Numerical analysis of the stress distribution in single-lap shear tests under elastic assumption—Application to the optimisation of the mechanical behaviour”, *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 31 :715–724.
- [50] Banea, M.D. ve Da Silva, L.F.M.,(2009). “Adhesively bonded joints in composite materials: An overview”, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials Design and Applications*, 223: 1
- [51] Goglio, L. ve Rossetto, M.,(2010). “Stress intensity factor in bonded joints: Influence of the geometry”, *International Journal of Adhesion & Adhesives*,30(5):313–321.
- [52] Zhao,X., Adams, R.D. ve Da Silva,L.F.M. (2010). “A new method for the determination of bending moments in single lap joints”, *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 30 : 63–71
- [53] Da Costa Mattos, H.S., Sampaio, E.M. ve Monteiro, A.H., (2011). “Static failure analysis of adhesive single lap joints”, *International Journal of Adhesion &Adhesives* ,31:446–454
- [54] Her, S.C., (1999).“Stress analysis of adhesively-bonded lap joints”, *Composite Structures*, 47 :673-678.
- [55] Kayupov, M. ve Dzenis, Y.A., (2001). “Stress concentration caused by bond cracks in single-lap adhesive composite joints”, *Composite Structures*, 54:215-220.
- [56] Molleda, F., Mora, J., Molleda, F.J., Carrillo, E.J., Mora, E., Fonseca, M.P. ve Mellor, B.G.,(2006). “Stress distribution and fractography of soft soldered single and double lap joints”, *Materials Characterization*, 56 :102– 106.

- [57] Moreira, P.M.G.P., De Matos, P.F.P., Camanho,P.P., Pastrama,S.D. ve De Castro, P.M.S.T.,(2007). “Stress intensity factor and load transfer analysis of a cracked riveted lap joint”, *Materials and Design*, 28:1263–1270
- [58] Quaresimin, M. ve Ricotta, M.,(2006). “Stress intensity factors and strain energy release rates in single lap bonded joints in composite materials”, *Composites Science and Technology*, 66 : 647–656.
- [59] Kafkalidis, M.S. ve Thouless, M.D., (2002). “The effects of geometry and material properties on the fracture of single lap-shear joints”, *International Journal of Solids and Structures*, 39 :4367–4383.
- [60] Hadavinia, H., Kinloch, A.J., Little, M.S.G. ve Taylor, A.C., (2003). “The prediction of crackgrowth in bonded joints under cyclic-fatigue loading II. Analytical and finite element studies”, *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 23 :463–471.
- [61] Rizvi, M.J., Chan, Y.C., Bailey, C. ve Lu, H.,(2005). “Study of anisotropic conductive adhesive joint behavior under 3-point bending”, *Microelectronics Reliability*, 45 :589–596.
- [62] Taş, Z. ve Polat, A., (2007). “Boru çeliklerinin kırılma tokluğunun J-integral yöntemi ile belirlenmesi”, *C B Ü Soma Meslek Yüksekokulu Teknik Bilimler Dergisi*, 7 (1)
- [63] Solmaz,M.Y .ve Turgut, A., (2009). “Yapıştırıcıile Birleştirilmiş Basit Bindirme Bağlantılarında Serbest Uç Açısı ve Bindirme Mesafesinin Bağlantı Mukavemeti Üzerine Etkisinin Deneysel Olarak Araştırılması”, *FıratÜniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 21 (2):173-182,
- [64] Kendall, K., (1974).“Crack propagation in lap shear joints”, *Journal of Physics D:Applied Physics*,8.
- [65] Chadegani, A. ve Batra, R.C.,(2011). “Analysis of adhesive-bonded single-lap joint with an interfacial crack and a void”, *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 31:455–465.
- [66] Aktaş, A.,(2003). “Pimli bağlantılarda çatlak ilerleme yönünün sonlu elemanlar metodu ile buluşması”, *G.Ü. Fen BilimleriDergisi*, 16(4):751-757.

- [67] Chowdhury, S.R. ve Narasimhan, R., (2000). "A finite element analysis of stationary crack tip fields in a pressure sensitive constrained ductile layer", *International Journal of Solids and Structures*, 37: 3079-3100.
- [68] Zavattieri, P.D., Hector, L.G. ve Bower, A.F., (2008). "Cohesive zone simulations of crack growth along a rough interface between two elastic-plastic solids", *Engineering Fracture Mechanics*, 75:4309-4332.
- [69] Hwang, H.Y., Kim, B.J., Chin, W.S., Kim, H.S. ve Lee, D.G., (2005). "Prediction of crack length and crack growth rate of adhesive joints by a piezoelectric method", *J. Adhesion Sci. Technol.*, 19(12):1081-1111
- [70] Guild, F.J., Potter, K.D., Heinrich, J., Adams, R.D. ve Wisnom, M.R., (2001). "Understanding and control of adhesive crack propagation in bonded joints between carbon fibre composite adherends II. Finite element analysis", *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 21:445-453.
- [71] Pradhan, S.C., Iyengar, N.G.R. ve Kishore, N.N., (1995). "Finite element analysis of crack growth in adhesively bonded joints", *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 15:33-41.
- [72] Grant, L.D.R., Adams, R.D. ve Da Silva, L.F.M., (2009). "Experimental and numerical analysis of single-lap joints for the automotive industry", *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 29:405-413.
- [73] Mohammadreza Khoshravan, Farhad Asgari Mehrabadi., (2012). "Fracture analysis in adhesive composite material, aluminum joints under mode-I loading; experimental and numerical approaches", *International Journal of Adhesion & Adhesives* 39: 8-14
- [73] Chen, Z., Adams, R.D. ve Da Silva, L.F.M., (2011). "The use of the J-integral vector to analyze adhesive bonds with and without a crack", *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 31:48-55.
- [74] Liljedahl, C.D.M., Crocombe, A.D., Wahab, M.A. ve Ashcroft, I.A., (2006). "Damage modelling of adhesively bonded joints", *International Journal of Fract.*, 141:147-161.
- [75] Jen, Y.M. ve Ko, C.W., (2010). "Evaluation of fatigue life of adhesively bonded aluminum single-lap joints using interfacial parameters", *International Journal of Fatigue*, 32:330-340.

## ÇİFT ANKASTRE KİRİŞ DENEY NUMUNELERİ



Sem görüntüsü için  
kesilen parça



## ÖZGEÇMİŞ

### KİŞİSEL BİLGİLER

**Adı Soyadı** :Engin ERBAYRAK  
**Doğum Tarihi ve Yeri** : 04.11.1985, Seydişehir  
**Yabancı Dili** :İngilizce  
**E-posta** : erbayrak@yildiz.edu.tr

### ÖĞRENİM DURUMU

| Derece | Alan                | Okul/Üniversite           | Mezuniyet Yılı |
|--------|---------------------|---------------------------|----------------|
| Lisans | Makine Mühendisliği | Doğu Akdeniz Üniversitesi | 2009           |
| Lise   | Fen Bilimleri       | Antalya Anadolu Lisesi    | 2004           |

### İŞ TECRÜBESİ

| Yıl  | Firma/Kurum                | Görevi                   |
|------|----------------------------|--------------------------|
| 2011 | Bayburt Üniversitesi       | Araştırma Görevlisi(ÖYP) |
| 2012 | Yıldız Teknik Üniversitesi | Araştırma Görevlisi      |