

**EKSENEL YÜK ALTINDAKİ ORTASINDA DELİK BULUNAN  
KOMPOZİT LEVHADA DEĞİŞİK SICAKLIKLARDA OLUŞAN  
GERİLMELERİN DENEYSEL VE SONLU ELEMANLAR ANALİZİ  
İLE İNCELENMESİ**

**Özkan YAVUZYILMAZ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**TEMMUZ 2007**

**ANKARA**

Özkan YAVUZYILMAZ tarafından hazırlanan EKSENEL YÜK ALTINDAKİ ORTASINDA DELİK BULUNAN KOMPOZİT LEVHADA DEĞİŞİK SICAKLIKLARDA OLUŞAN GERİLMELERİN DENEYSEL VE SONLU ELEMENLAR ANALİZİ İLE İNCELENMESİ adlı bu tezin yüksek lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Bedri TUÇ

Tez Yöneticisi

Bu çalışma, jürimiz tarafından oybirliği ile Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan: : Prof. Dr. Bedri TUÇ

Üye : Prof. Dr. Muammer NALBANT

Üye : Y. Doç. Dr. Selim TÜRKBAŞ

Tarih : 23.07.2007

Bu tez, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygundur.

## **TEZ BİLDİRİMİ**

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada orijinal olmayan her türlü kaynağa eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Özkan YAVUZYILMAZ

**EKSENEL YÜK ALTINDAKİ ORTASINDA DELİK BULUNAN KOMPOZİT  
LEVHADA DEĞİŞİK SICAKLIKLARDA OLUŞAN GERİLMELERİN  
DENEYSEL VE SONLU ELEMANLAR ANALİZİ İLE İNCELENMESİ  
(Yüksek Lisans Tezi)**

**Özkan YAVUZYILMAZ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
Temmuz 2007**

**ÖZET**

Çalışmada düzlemsel yüklenmiş üzerinde dairesel delik bulunan AS4 karbon fiber takviyeli kompozit malzemenin elasto-plastik analizi oda sıcaklığında ve oda sıcaklığından yüksek sıcaklıklarda deneysel ve sonlu elemanlar metodu ile gerçekleştirilmiştir. Malzeme ortotropik ve açılı simetrik olarak kabul edilmiştir. Elasto-plastik analizde Tsai-Hill akma kriteri kullanılmıştır. Her iki yöntemle elde edilen veriler karşılaştırılmıştır. Kompozit malzemenin dayanımının sıcaklıkla değiştiği ve ANSYS sonlu elemanlar yöntemi ile deney sonuçlarının birbiri ile uyumlu olduğu görülmüştür. Kompozit malzemenin mukavemetinin sıcaklıkla değiştiği ve maksimum gerilmelerin numunenin delik kenarlarında oluştuğu gözlemlenmiştir.

**Bilim Kodu :914.1.093**  
**Anahtar Kelimeler :Elasto-plastik gerilme, ortotropik, kompozit, termal, sonlu elemanlar**  
**Sayfa Adedi :142**  
**Tez Yöneticisi : Prof. Dr. Bedri TUÇ**

**STRESS ANALYSIS OF COMPOSITE PLATES WHICH HAVE A HOLE  
SUBJECTED TO IN-PLANE LOAD AT DIFFERFENT TEMPERATURES  
WITH EXPERIMENTAL AND FINITE ELEMENT MODEL  
(M.Sc. Thesis)**

**Özkan YAVUZYILMAZ**

**GAZI UNIVERSITY  
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY  
July 2007**

**ABSTRACT**

**In this study elasto-plastic analysis on in-plane loaded AS4 carbon fiber reinforced composite plates with circular hole at room temperature and room elevated temperatures by finite element method and experimental method. Structure of the composite taken as ortotrophic and angle ply symmetric. Tsai-Hill yield criteria used for elasto-plastic analysis. Both experimental and finite analysis data discussed. As a result it seems that composite material strength changes with the temperature change and both ANSYS finite element data and experimental data is similar. The strength of the composite material seems to be changing by temperature, and maximum stress is found at the hole edges.**

**Science Code : 914.1.093**

**Key Words : Elasto-plastic stress, orthotropic, composite, thermal, finite element model**

**Page Number:142**

**Adviser : Prof. Dr. Bedri Tuç**

## TEŞEKKÜR

Öncelikle çalışmalarımnda değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren hocam Sayın Prof. Dr. Mahmut ÖZBAY' a, Sayın Prof. Dr. Bedri TUÇ' a, Y. Doç. Dr. Selim TÜRKBAS' a ve destekleriyle beni yalnız bırakmayan aileme, deney malzemesini sağlayan TUSAŞ HAVACILIK A.Ş.'ye ve deney yapmamıza olanak tanıyan BARIŞ ELEKTRİK ENDÜSTRİSİ A.Ş.'ye teşekkürü bir borç bilirim.

## İÇİNDEKİLER

|                                                                        | <b>Sayfa</b> |
|------------------------------------------------------------------------|--------------|
| ÖZET .....                                                             | iv           |
| ABSTRACT .....                                                         | v            |
| TEŞEKKÜR .....                                                         | vi           |
| İÇİNDEKİLER .....                                                      | vii          |
| ÇİZELGELERİN LİSTESİ .....                                             | xi           |
| ŞEKİLLERİN LİSTESİ .....                                               | xii          |
| RESİMLERİN LİSTESİ .....                                               | xv           |
| SİMGELER VE KISALTMALAR .....                                          | xvi          |
| 1. GİRİŞ .....                                                         | 1            |
| 2. KOMPOZİT MALZEMELERİN TANITIMI .....                                | 6            |
| 2.1. Kompozit Malzemelerin Tanımı .....                                | 6            |
| 2.2. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması .....                     | 7            |
| 2.2.1. Yapılarını oluşturan malzemelere göre kompozit malzemeler ..... | 8            |
| 2.2.2. Bileşenlerinin şekillerine göre kompozit malzemeler .....       | 12           |
| 2.3. Karbon Fiber Kompozitler .....                                    | 14           |
| 2.3.1. Karbon fiber .....                                              | 14           |
| 2.3.2. Karbon fiber üretimi .....                                      | 14           |
| 3. KOMPOZİT MALZEMELERDE ELASTİK GERİLME ANALİZİ .....                 | 16           |
| 3.1. Kompozit Malzemelerin Tasarımı .....                              | 16           |
| 3.2. Anizotropik Malzemelerde Gerilme-Gerinim Bağlılıkları .....       | 17           |

**Sayfa**

|                                                                              |    |
|------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.3. Ortotropik Malzemelerde Mühendislik Sabitleri.....                      | 21 |
| 3.4. Ortotropik Malzemelerde Düzlemsel Gerilme Durumu .....                  | 22 |
| 3.5. Keyfi Düzenlenmiş Bir Tabakanın Gerilme-Şekil Değiştirme İlişkisi ..... | 24 |
| 3.6. Tabakalı Kompozit Malzemelerde Gerilme Analizi.....                     | 29 |
| 3.7. Tabaka Bileşke Kuvvetleri ve Momentleri .....                           | 33 |
| 3.8. Tabaka Rijitlik Matrislerinin Özel Durumları.....                       | 39 |
| 3.8.1. İzotropik tek tabaka .....                                            | 39 |
| 3.8.2. Özel ortotropik tek tabaka .....                                      | 40 |
| 3.8.3. Genellikle ortotropik tek tabaka .....                                | 41 |
| 3.8.4 Anizotropik tek tabaka.....                                            | 41 |
| 3.9. Simetrik Tabakalar .....                                                | 42 |
| 3.9.1. Çoklu izotropik yüzeye sahip simetrik tabakalar .....                 | 43 |
| 3.9.2. Çoklu özel ortotropik yüzeye sahip simetrik tabakalar .....           | 44 |
| 3.9.2. Açık katlı simetrik genel ortotropik tabakalar .....                  | 45 |
| 3.10. Simetrik Olmayan Tabakalar .....                                       | 46 |
| 3.10.1. Antisimetrik tabakalar.....                                          | 46 |
| 3.10.2 Antisimetrik çapraz tabakalar.....                                    | 47 |
| 3.10.3 Antisimetrik açık katlı tabakalar.....                                | 48 |
| 4. TABAKALI PLAKALARDA ELASTİK TERMAL GERİLME ANALİZİ .....                  | 49 |
| 4.1. Termal Şekil Değiştirme.....                                            | 49 |
| 4.2 Termal Gerilme Şekil Değiştirme Bağıntıları.....                         | 51 |
| 4.3 Termal Kuvvet, Moment Şekil Değiştirme Bağıntıları.....                  | 52 |

**Sayfa**

|                                                                                          |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 5. TABAKALARDAKİ HASAR TEORİLERİ VE ELASTOPLASTİK GERİLMELER.....                        | 54  |
| 5.1. Tabakalardaki Hasar Teorileri .....                                                 | 54  |
| 5.2. Maksimum Gerilme Teorisi .....                                                      | 55  |
| 5.3. Maksimum Şekil Değiştirme Teorisi .....                                             | 56  |
| 5.4. Tsai-Hill Hasar Teorisi.....                                                        | 56  |
| 5.5. Hoffman hasar kriteri .....                                                         | 57  |
| 5.6. Tsai-Wu hasar teorisi .....                                                         | 58  |
| 5.7. Hashin Hasar Teorisi.....                                                           | 58  |
| 5.8. Elasto-Plastik Gerilmeler .....                                                     | 60  |
| 6. TABAKALI MALZEMELERDE TERMAL ELASTO-PLASTİK GERİLME ANALİZİ .....                     | 62  |
| 6.1 Plastik Gerilme analizi.....                                                         | 62  |
| 6.2 Artık Gerilmeler .....                                                               | 65  |
| 7. ÇEKME DENEYİ.....                                                                     | 68  |
| 7.1 İncelenen Malzemenin Tanıtımı .....                                                  | 68  |
| 7.2. Deneyin Yapılışı .....                                                              | 69  |
| 7.3. Deney Sonuçları.....                                                                | 73  |
| 8. ANSYS İLE ELASTO-PLASTİK GERİLME ANALİZİ .....                                        | 80  |
| 8.1 Sonlu Elemanlar Analizi .....                                                        | 80  |
| 8.2. ANSYS İle Modelleme .....                                                           | 85  |
| 8.3. Deneysel Veriler İle ANSYS Elasto-Plastik Analiz Verilerinin Karşılaştırılması..... | 100 |
| 9. SONUÇ .....                                                                           | 107 |

**Sayfa**

|                                                                         |     |
|-------------------------------------------------------------------------|-----|
| KAYNAKLAR.....                                                          | 109 |
| EKLER.....                                                              | 112 |
| EK-1 Çekme cihazından alınan gerilme-şekil değiştirme verileri.....     | 113 |
| EK-2 Strain-gageler’ den alınan gerilme-şekil değiştirme verileri ..... | 117 |
| ÖZGEÇMİŞ.....                                                           | 142 |

## ÇİZELGELERİN LİSTESİ

| Çizelge                                                                                   | Sayfa |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Çizelge 3.1. Gerilme şekil değiştirme notasyonlarının kısaltılması. ....                  | 19    |
| Çizelge 7.1. Malzeme özellikleri.....                                                     | 68    |
| Çizelge 7.2 Numune çekme sıcaklığı, çeneler arası uzunluk, strain gage<br>konumları ..... | 72    |
| Çizelge 7.3 . Deney sonuçları.....                                                        | 74    |
| Çizelge 7.4 . Verilerin ortalaması. ....                                                  | 74    |
| Çizelge 8.1. Maksimum yük altında şekil değişimlerinin karşılaştırılması. ....            | 106   |

## ŞEKİLLERİN LİSTESİ

| Şekil                                                                                                                                      | Sayfa |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Şekil 2.1. Tabakalı fiber kompozit malzemelerin tasarımı .....                                                                             | 11    |
| Şekil 2.2. Yapılarına göre kompozit türleri.....                                                                                           | 13    |
| Şekil 2.3. Karbon fiber üretim aşamaları .....                                                                                             | 14    |
| Şekil 2.4. Karbon fiber kesiti.....                                                                                                        | 15    |
| Şekil 2.5. Karbon epoksi tabakaların oda sıcaklığındaki çekme modülü .....                                                                 | 15    |
| Şekil 3.1. Metalik malzemede ve polimerlerde gerilme-şekil değiştirme.....                                                                 | 17    |
| Şekil 3.2. Üç boyutlu gerilme hali.....                                                                                                    | 18    |
| Şekil 3.3. Tek yönlü fiber takviyeli tabaka .....                                                                                          | 22    |
| Şekil 3.4. Eksenler arasındaki ilişki.....                                                                                                 | 25    |
| Şekil 3.5. Tabakaların deformasyonu .....                                                                                                  | 30    |
| Şekil 3.6. x yönünde tek yönlü gerilme altında 4 plakadan oluşan tabakadaki şekil<br>değiştirme, elastisite modülü, gerilim değişimi ..... | 33    |
| Şekil 3.7. Tabakaya etkiyen bileşke kuvvetler .....                                                                                        | 35    |
| Şekil 3.8. Düz tabakada momentler .....                                                                                                    | 35    |
| Şekil 3.9. N katmanlı plaka .....                                                                                                          | 36    |
| Şekil 3.10. Kompozit malzemelerde 4 ayrı özel durum.....                                                                                   | 39    |
| Şekil 3.11. 3'lü isotropik yüzeye sahip simetrik tabakanın ayrılmış görüntüsü.....                                                         | 43    |
| Şekil 3.12. 3'lü özel ortotropik yüzeye sahip simetrik tabakalar .....                                                                     | 44    |
| Şekil 3.13. 3'lü açı katlı simetrik genel ortotropik tabaka .....                                                                          | 45    |
| Şekil 3.14. 2'li antisimetrik çapraz tabaka .....                                                                                          | 47    |
| Şekil 3.15. 2'li antisimetrik açı katlı tabaka.....                                                                                        | 48    |
| Şekil 7.1. Strain gagelerin yapıştırılma biçimleri numune yatay konumda iken.....                                                          | 71    |

| <b>Şekil</b>                                                                                           | <b>Sayfa</b> |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| Şekil 7.2. Bilgisayardan alınan strain gage verilerinin görünüşü .....                                 | 73           |
| Şekil 7.3. Bilgisayardan alınan çekme cihazı verileri.....                                             | 73           |
| Şekil 7.4. Sıcaklıkla şekil değişimi miktarının değişimi.....                                          | 75           |
| Şekil 7.5. Sıcaklıkla uygulanan maksimum yükün değişimi .....                                          | 75           |
| Şekil 7.6. Oda sıcaklığında yük-şekil değişimi grafiği.....                                            | 76           |
| Şekil 7.7. 50 <sup>0</sup> sıcaklığında yük-şekil değişimi grafiği. ....                               | 76           |
| Şekil 7.8. 100 <sup>0</sup> C sıcaklığında yük-şekil değişimi grafiği.....                             | 77           |
| Şekil 7.9. Oda sıcaklığında strain gage –yük değişimi grafiği.....                                     | 78           |
| Şekil 7.10. 50 <sup>0</sup> C sıcaklığında strain gage –yük değişimi grafiği.....                      | 78           |
| Şekil 7.11. 100 <sup>0</sup> C sıcaklığında strain gage –yük değişimi grafiği.....                     | 79           |
| Şekil 8.1 Solid 46 nın görünümü .....                                                                  | 81           |
| Şekil 8.2. Solid 46 eleman tipinin seçilmesi .....                                                     | 86           |
| Şekil 8.3. Hill Plastisite çözümünün seçilmesi.....                                                    | 86           |
| Şekil 8.4. Isıl genleşme katsayılarının girilmesi.....                                                 | 87           |
| Şekil 8.5. Solid 46' ya göre tabaka sayısı, tabaka kalınlığı ve oryantasyon açılarının girilmesi ..... | 87           |
| Şekil 8.6. Malzemenin mekanik özelliklerinin girilmesi .....                                           | 88           |
| Şekil 8.7. Hill sabitlerinin girilmesi.....                                                            | 88           |
| Şekil 8.8. Bilinear isotropik değerlerinin girilmesi .....                                             | 89           |
| Şekil 8.9. Oryantasyon açıları ve tabakaların dizilimi.....                                            | 89           |
| Şekil 8.10. Sınır Şartları. ....                                                                       | 90           |
| Şekil 8.11. Modelin elemanlara ayrılması.....                                                          | 90           |

| <b>Şekil</b>                                                                                                                                  | <b>Sayfa</b> |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| Şekil 8.12. 25°C’da 27170 N yük altında deformasyonu ve yük uygulanmadan önceki halinin karşılaştırılması.....                                | 91           |
| Şekil 8.13. 25°C’ da x yönündeki şekil değişimi.....                                                                                          | 91           |
| Şekil 8.14 . 25°C’ da 27170 N yük altında y yönündeki şekil değişimi .....                                                                    | 92           |
| Şekil 8.15. 25°C’ da 27170 N yük altında x yönündeki gerilim dağılımı.....                                                                    | 92           |
| Şekil 8.16. Delik kenarındaki 25°C’ da x yönündeki oluşan maksimum gerilmenin gösterilişi .....                                               | 93           |
| Şekil 8.17. 27170 N yük, 25°C’ da y yönündeki gerilmeler .....                                                                                | 93           |
| Şekil 8.18. 25°C’ da xy kayma gerilmesi .....                                                                                                 | 94           |
| Şekil 8.19. 50°C’da 30883 N yük altında malzemenin deformasyonu .....                                                                         | 94           |
| Şekil 8.20. 50°C’da 30883 N yük altında malzemenin x yönündeki şekil değişimi .....                                                           | 95           |
| Şekil 8.21. 50°C’da 30883 N yük altında malzemenin y yönündeki şekil değişimi.....                                                            | 95           |
| Şekil 8.22. 50°C’da 30883 N yük altında malzemenin x yönündeki gerilmeler .....                                                               | 96           |
| Şekil 8.23. 50°C’da 30883 N yük altında malzemenin y yönündeki gerilmeler .....                                                               | 96           |
| Şekil 8.24. 50°C’da 30883 N yük altında malzemenin xy yönündeki kayma gerilmesi<br>100°C’da 29400 N yük altında malzemenin deformasyonu ..... | 97           |
| Şekil 8.25. 100°C’da 29400 N yük altında malzemenin deformasyonu .....                                                                        | 97           |
| Şekil 8.26. 100°C’da 29400 N yük altında x yönündeki şekil değişimleri .....                                                                  | 98           |
| Şekil 8.27. 100°C’da 29400 N yük altında y yönündeki şekil değişimleri .....                                                                  | 98           |
| Şekil 8.28. 100°C’da 29400 N yük altında x yönündeki gerilmeler .....                                                                         | 99           |
| Şekil 8.29. 100°C’da 29400 N yük altında y yönündeki gerilmeler .....                                                                         | 99           |
| Şekil 8.30. 100°C’da 29400 N yük altında xy yönündeki kayma gerilmeleri.....                                                                  | 100          |
| Şekil 8.31. Oda sıcaklığında yük-şekil değişimi grafiği .....                                                                                 | 101          |

| <b>Şekil</b>                                                                                                           | <b>Sayfa</b> |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| Şekil 8.32. Oda sıcaklığında strain gage –yük değişimi grafiği.....                                                    | 101          |
| Şekil 8.33. 50 <sup>0</sup> C sıcaklığında yük- şekil değişimi grafiği.....                                            | 102          |
| Şekil 8.34. 50 <sup>0</sup> C sıcaklığında strain gage –yük değişimi grafiği.....                                      | 102          |
| Şekil 8.35. 100 <sup>0</sup> C sıcaklığında yük- şekil değişimi grafiği.....                                           | 103          |
| Şekil 8.36. 100 <sup>0</sup> C sıcaklığında strain gage –yük değişimi grafiği.....                                     | 103          |
| Şekil 8.37. Oda sıcaklığında çenelerden kaynaklanan kayma çıkarılmış yük-şekil<br>değişimi grafiği .....               | 104          |
| Şekil 8.38. 50 <sup>0</sup> C sıcaklığında çenelerden kaynaklanan kayma çıkarılmış yük-şekil<br>değişimi grafiği ..... | 105          |
| Şekil 8.39. 100 <sup>0</sup> C sıcaklığında çenelerden kaynaklanan kayma çıkarılmış yük-şekil<br>değişimi grafiği..... | 105          |

## RESİMLERİN LİSTESİ

| Resim                                                                                                                                       | Sayfa |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Resim 2.1. Amerika Birleşik Devletleri Hava Kuvveti B-2 gelişmiş hayalet bombardıman uçağında kullanılan kompozit malzemeler .....          | 7     |
| Resim 2.2. Grafit epoksi karbonfiber teyp .....                                                                                             | 15    |
| Resim 7.1. Simetrik tabakaların görünümü.....                                                                                               | 69    |
| Resim 7.2 . Sol; numunelerin sıralanışı, sağ; mm cinsinden numune boyutları .....                                                           | 69    |
| Resim 7.3. Sol; Instron çekme cihazının fırını , sağ; strain gage ve gerilme şekil değiştirme datalarının toplandığı bilgisayarlar .....    | 70    |
| Resim 7.4 . Çenelere tutturulmuş numune, strain gage ve ona bağlı kablolar.....                                                             | 70    |
| Resim 7.5. Kullanılan çok yönlü strain gage.....                                                                                            | 71    |
| Resim 7.6. Strain gage'in yapıştırılması .....                                                                                              | 71    |
| Resim 7.8. Tek yönlü strain gage .....                                                                                                      | 72    |
| Resim 8.1. ANSYS ile modelleme de maksimum yük altında oluşan maksimum şekil değişimi (üst) , çekme deneyi sonucunda kopmuş numune (alt) .. | 106   |

## SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

| Simgeler      | Açıklama                           |
|---------------|------------------------------------|
| $E$           | Elastisite modülü                  |
| $G$           | Kayma modülü                       |
| $\sigma$      | Gerilme                            |
| $u_0, v_0, w$ | x, y ve z yönündeki şekil değişimi |
| $\mathcal{E}$ | Şekil değişimi                     |
| $\nu$         | Poisson oranı                      |
| $\gamma$      | Kayma şekil değişimi               |
| $\tau$        | Kayma gerilmesi                    |
| $F$           | Kuvvet                             |
| $M$           | Moment                             |
| $N$           | Tabaka bileşke kuvveti             |
| $\Pi$         | Toplam potansiyel enerji           |
| $X$           | Boyuna akma dayanımı               |
| $Y$           | Enine akma dayanımı                |
| $S$           | Kayma dayanımı                     |
| $\theta$      | Oryantasyon açısı                  |
| $\alpha$      | Isıl genleşme katsayısı            |
| $T$           | Sıcaklık                           |
| $\Delta T$    | Sıcaklık değişimi                  |

## 1. GİRİŞ

Kompozit malzemelerin mühendislikte kullanım alanı her geçen gün artmaktadır. Bununla birlikte kompozit malzemelerin mekanik özelliklerinin tasarım aşamasında, kullanılacakları yere göre uygun olup olmadığı hakkındaki sorunların giderilmesi bir zorunluluk haline gelmiştir. Bu nedenle karmaşık mukavemet özelliklerine sahip kompozit malzemelerin, mukavemet özellikleri üzerinde çalışmalar yapılmaktadır.

Bu çalışmada ortasında içi boş dairesel delik bulunan, tek yönlü karbon fiber takviyeli, karbon epoksi, teyp kompozit plakanın tek yönlü düzlemsel gerilme altındaki oda sıcaklığında ve oda sıcaklığından yüksek sıcaklıktaki gerilme-şekil değiştirme analizi, çekme deneyi yapılarak ve ANSYS sonlu elemanlar paket programı yardımı ile incelenmiş ve bu iki analiz sonuçları, veriler grafiklere aktararak karşılaştırılmıştır.

Bu konuda yapılan benzer çalışmalardan bazılarını özetleyecek olursak;

Odegard G. ,Kumosa M. (2000) tarafından tek yönlü karbon/PMR15 kompozit malzemenin oda sıcaklığında ve 316° C sıcaklığa kadar olan oda sıcaklığının üstündeki sıcaklıklarda eksensel çekme kuvveti sonucunda, malzemenin elastik ve plastik özelliklerinin sıcaklıkla nasıl değiştiğini, sıcaklığın fonksiyonu olarak tespit edilmesi üzerinde çalışmışlardır. Çalışma sonucunda polimer matrisin yumuşadığı ve kompozit malzemenin katılık değerlerinin düştüğü özellikle matrise bağlı sabitlerin düştüğü gözlemlenmiştir. Bunun yanında malzemeyi su jetiyle ve kobalt bant testere olmak üzere iki farklı yöntemle işleyerek deney numunesi hazırlamışlardır. Sonuç olarak kompozit malzemedeki sıcaklık yükseldikçe mühendislik sabitleri değerlerinin azaldıkları ve de su jetiyle işlenmiş malzemelerin daha iyi mukavemet değerlerine sahip oldukları tespit edilmiştir [6].

Eason T. G. ve Ochoa O. O. (2001) devamlı olmayan gelişigüzel dağılımlıcam fiber kompozitlerde termomekanik yük altında hasar başlangıcını ve hasar gelişimini temsili hacim elemanları yöntemiyle incelemişlerdir. Üretim sırasında uygulanan

ısının çekme dayanımına etkileri araştırılmıştır. Modellemede ABAQUS sonlu elemanlar programı kullanılmıştır. Sonuçta bu tür kompozitlerin meydana getirildikleri sıcaklıklar ve kullanıldıkları yerlerdeki sıcaklıklara göre çekme dayanımlarında önemli değişiklikler gösterdiği, bununla reçine ve matris oranındaki değişim ile ilişkisi grafiklerle gösterilmiştir. Tasarım aşaması sırasında bu özelliklere dikkat edilmesi gerektiği vurgulanmıştır [7].

Pettermann H. E., Plankensteiner A. F., Böhm H. J., Rammerstrofer F. G. (1999) içine sıralı termo-elastik takviye yerleştirilmiş matrisin termo-elasto-plastik mekanik davranışını artan Mori-Tanaka alan yaklaşımı metodu ile incelemişlerdir. Matris fazı davranışı, plastisite ve matrisin izotropisinin akma sırasındaki kırılması takip edilerek incelenmiştir. Oluşturdukları metot, kompozit malzemenin sonlu elemanlar yönteminde modellenip, sıcaklığa bağlı malzeme özelliklerinin bu model ile birlikte değerlendirilmesi yöntemine dayanmaktadır. Modellemede ABAQUS programı kullanılmıştır. Enine karbon fiber takviyeli magnezyum alaşım kompozit malzeme modellenmiş ve artan Mori-Tanaka metodu, sonlu elemanlar birim hücre metodu ve dönüşüm alan metoduyla malzemenin yük altındaki davranışları incelenmiş ve bu üç metodun sonuçları karşılaştırılmıştır [8].

You L. H. (2002) iç içe geçmiş silindir modeline dayanarak, simetrik eksenli termomekanik yüke maruz kalan enine izotropik, dairesel ortotropik ve radyal ortotropik etrafı plastik ve elastik matris ile çevrili fiberlerin, yükleme sonucunda oluşan deformasyon ve gerilmeler analitik olarak incelenmiştir. Matrisin, plastisitenin, hacim oranının fiziksel ve mekanik özelliklerinin, malzemenin termomekanik yüklere verdiği tepkiyi nasıl değiştirdiği araştırılmıştır.

Matris fazı plastisitesinin, eksenel basma nedeniyle büyük miktarda düştüğü, bununla birlikte fiberdeki basma gerilmesini büyük miktarda arttırdığı gözlemlenmiştir. İncelenen kompozitlerde hacim oranının, ısı genleşme katsayısının ve young modülünün azalması sonucu, malzemenin mukavemet değerlerinin ve sertliğinin arttığı bunun sonucunda da fiberin maksimum eşdeğer geriliminin düştüğü ve matrisin eşdeğer geriliminin arttığı gözlemlenmiştir [9].

Rui Miranda Guedes, Mario A. Vaz, (2001) R teyp tipi ve dokuma tipi karbon fiber kompozit malzemelerin bükülme ve bükülme altında şekil değiştirme dirençleri incelemiş, bu iki tür malzeme üzerinde yapılan deneylerin sonuçlarını karşılaştırmışlardır. İncelemelerinde malzemelerin kullanılan yerde uzun dönem şekil değiştirmeden kalmalarını istenmektedir. Bu nedenle kompozit malzemelerin uzun dönem dayanım karakteristikleri de incelenmiştir. Sonuç olarak teyp tipi kompozit plakaların dokuma tipi plakalara göre daha dirençli olduğu ortaya çıkmıştır [10].

Xu Jincheng, Zhao Liang, Deng Xiaoyan, Yu Hui (2006) çalışmalarında, deneylerde karşılaştırma yapılmak üzere karbon fiber takviyeli nikel bazlı kompozit toz metalurjisi yöntemi ile üretilmiş malzemeleri hazırlanmıştır. Bu iki malzemenin yüksek sıcaklıktaki mekanik özellikleri karşılaştırılmıştır. Sonuçta yüksek sıcaklıkta %5 karbon fiber oranına sahip kompozit malzemenin 20CrNi alaşımından daha iyi mekanik özelliklere sahip olduğu gözlemlenmiştir [11].

Rupnowski P., Gentz M., Kumosa M. çalışmalarında T650-35 grafit fiberlerden oluşan tek yönlü PMR-15 reçineli kompozit malzemenin mekanik özelliklerinin analitik ve numerik yöntemlerle sıcaklığın fonksiyonu olarak hesaplanmış ve bu özellikler deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. Sonuçta bu malzemenin oda sıcaklığında ve 315° C da birbirine yakın akma dayanımı değerleri verdiği gözlenmiştir [12].

Çiçek Özes, Mine Demirsoy (2005), çalışmalarında dokuma cam fiber takviyeli epoksi matris, tabakalı zincir taşıyıcı pin bağlantı noktasındaki gerilmeyi, uygulanan çeşitli yükler ile, deneysel ve nümerik olarak ANSYS paket programıyla incelemişlerdir. Her iki yöntemde elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonucunda deneysel ve nümerik çözüm arasında fazla bir farkın olmadığı görülmüş ve taşıyıcı parçanın tasarımında yardımcı olabilecek gerilme değerleri elde edilmiştir [13].

Nurettin Arslan, Mehmet Çelik, Nuray Arslan (2002), ortasındaki kare matrisli, simetrik ve antisimetrik dokuma fiber takviyeli polietilen termoplastik matrisli

kompozit malzemenin elastik-plastik gerilme analizini incelemişlerdir. Gerilme analizi sonlu elemanlar metodu ve birinci dereceden kesme deformasyon teorisi yöntemleriyle incelenmiştir. Sonuçta kare deliğin kenarlarında gerilmelerin en yüksek seviyeye çıktığı gözlemlenmiştir [14].

Ramazan Karakuzu, Züleyha Aslan, Buket Okutan (2004) yaptıkları çalışmada örgü çelik fiber takviyeli termoplastik matrisli laminarlı kompozit plakalarda düzgün dağılmış enine yük altındaki elasto-plastik gerilme analizini ve artık gerilmeleri sayısal metod ile incelemişlerdir. Sonlu elemanlar analizinde ANSYS sonlu elemanlar analiz programı kullanılmış ve sekiz düğümlü tabakalı kabuk elemanlar çözümlemede kullanılmıştır. Simetrik ve antisimetrik tabakalı plakalar için basit desteklenmiş sınır koşulları ile akma dayanımları ve gerilme yığılmaları grafiklerle gösterilmiştir [15].

Arriaga A., Lazkano, J.M., Pagaldai, R., Zaldua M.A., Hernandez, R., Atxurra, R., Chrysostomou, A., (2007) çalışmalarında iki farklı termoplastik malzemenin sehîm incelemesini deneysel ve ANSYS sonlu elemanlar yöntemi ile araştırmışlar ve bu iki yöntemi karşılaştırmışlardır [16].

Prasad, E. N., Loidl, D., Vijayakumar, M., Krommp, K (2004) çalışmalarında devamlı fiber takviyeli seramik matrisli kompozit malzemenin oda sıcaklığında ve yüksek sıcaklıklarda, malzemenin yüksek frekanstaki titreşimlere verdiği tepkileri inceleyerek malzemenin elastik katsayısını bulmuşlar ve bulunan özellikleri değerlendirmişlerdir [17].

Song, G., Eang, Y. , Zhou, Y. (2002), araştırmalarında tungsten matrisli %30 hacim oranlı zirkonium parçacık içeren kompozit malzemenin imalatını gerçekleştirmişler ve bu malzemenin oda sıcaklığında ve oda sıcaklığının üstündeki sıcaklıklarda termofiziksel ve mekanik özelliklerinin bulunması konusunda çalışmışlardır [18].

Hasan Çallıoğlu, Onur Sayman, Necati Ataberk (2005) çalışmalarında, çelik fiber takviyeli simetrik termoplastik , tabakalı levhada termal elasto-plastik gerilmeleri

incelemişlerdir. Malzemenin gerilme sertleşmesine sahip olduğu varsayılmıştır. Değişik oryantasyon açılarında Tsai-Hill hasar teorisi kriteri çözümlemede kullanılmıştır. Yukarıdaki ve aşağıdaki yüzeylere göre  $+T_0$  ve  $-T_0$  , sıcaklık dağılımı olarak seçilmiştir [19].

Numan B. Bektaş, Onur Sayman (2001) çalışmalarında termal yük altındaki simetrik çapraz-kat ve simetrik açılı-kat termoplastik tabakalı levhalarda elasto-plastik gerilme analizini incelemişlerdir. Tabakalı kompozit levhalar basit desteklenmiş ve kalınlık boyunca sabit sıcaklık değişimine tabii tutulmuştur. Termo elasto-plastik gerilme-şekil değiştirme bağıntısı ve sınır koşulları küçük plastik deformasyonlar için analitik çözümde kullanılmıştır. Akma kriteri için Tsai-Hill hasar teoremi kullanılmıştır [20].

Yang, Q., Qin, Q. (2003) öbeksiz fiberlerden oluşan tek yönlü kompozit malzemelerde öbek içindeki fiber sayısının enine yük altında ve akma durumunda malzemedeki elasto-plastik gerilmelere etkileri, mikro mekanik analizle sonlu elemanlar yöntemiyle araştırmışlardır [21].

Bülent Murat İçten, Ramazan Karakuzu (2002) pin bağlantılı karbon epoksi kompozit levhalarda rastgele seçilmiş oryantasyon açılarında hasar mukavemeti ve hasar durumunun modellenmesi ve gerilme analizi incelenmiştir [22].

F. Şen (2006) açılı oryantasyona sahip simetrik ve anti simetrik , çelik fiberler ile takviye edilmiş, tabakalı ve ortasında dairesel delik bulunan termoplastik kompozit plaklarda uniform sıcaklık etkisiyle meydana gelen gerilmeler ANSYS sonlu elemanlar yöntemi programı yardımıyla incelenmiştir [23].

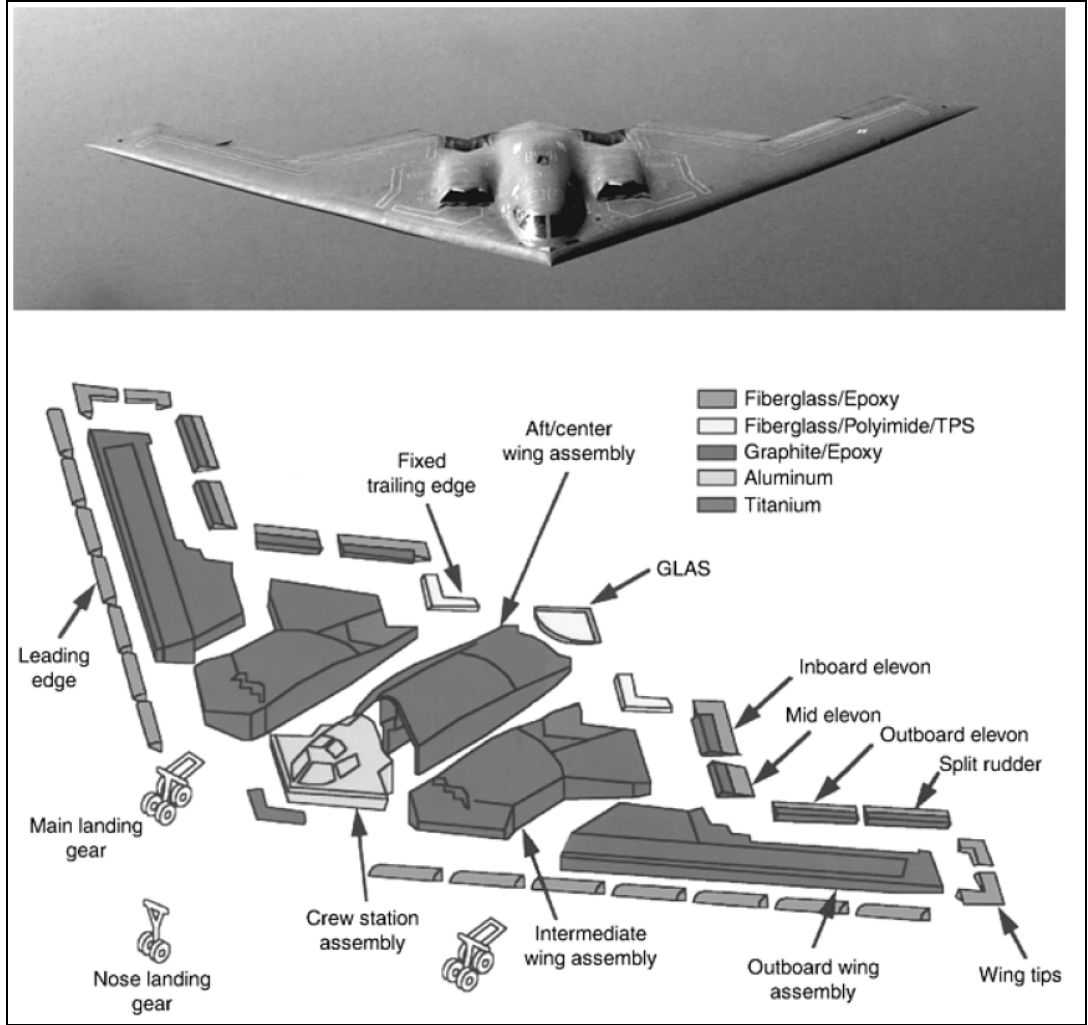
## **2. KOMPOZİT MALZEMELERİN TANITIMI**

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

Teknolojinin gelişimi ve artan ihtiyaçlar doğrultusunda kullanılmakta olan klasik malzemelerden, daha dayanıklı ve daha hafif malzemelerin kullanılmasının ihtiyaç duyulması sonucunda, kompozit malzemeler günümüzde büyük önem kazanmıştır.

Genel bir tanım yapacak olursak; kompozit malzeme, kimyasal bileşenleri farklı birbiri içerisinde pratik olarak çözünmeyen iki veya daha fazla malzemenin kullanım yerindeki aranan özellikleri verebilecek daha uygun malzeme oluşumu için makro seviyede birleştirilmesi sonucu meydana gelen malzemelerdir. Makroskobik muayene ile yapı bileşenlerinin ayırt edilmesi mümkündür. Yapılarında birden fazla sayıda fazın yer aldığı klasik alaşımlar ise makro ölçüde homojen olmalarına karşılık mikroskobik muayene ile mikro ölçüde heterojen olduğu görülür. Kompozit malzemelerde yapı bileşenlerinin makro boyutta oldukları kabul edildiğinden bu kavram karışıklığı, bazı kural dışı durumlar olmakla beraber ortadan kalkmaktadır.

Kompozit malzemelerin kullanılmasındaki bir diğer önemli noktada ekonomikliktir. Kimya endüstrisinde çeşitli reaktif veya çözeltilerin depolanmasında, taşınmasında çözeltilere karşı inert davranan, reaksiyon vermeyen malzemelerin seçilmesi gerekir. Bu iş için en uygun malzemeler paslanmaz çelikler ve plastiklerdir. Tamamen plastik bir malzeme mukavemetsiz, tamamen paslanmaz çelikten yapı ise çok pahalıdır. Paslanmaz çeliğe göre çok daha ucuz olan düşük karbonlu çeliğin kimyasal maddeyle temas yüzeyinin plastik malzeme ile kaplanması hem yüksek mukavemetli hem de ucuz bir çözüm olacaktır [27,28].



Resim 2.1. Amerika Birleşik Devletleri Hava Kuvveti B-2 gelişmiş hayalet bombardıman uçağında kullanılan kompozit malzemeler. (Üstte soldan-sağa: düzeltilmiş firar kenarı, gövde kanat montaj parçası, cam, giriş elevon, orta elevon, çıkış elevon, yarık aşı boyası/ Altta soldan-sağa: temel kenar, ana iniş takımı, burun iniş takımı, mürettebat kabini, orta kanat montaj parçası, dış kanat montaj parçası, kanat ucu [27]

## 2.2. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Genelde kompozit malzemelerde çekirdek olarak kullanılan bir fiber malzeme bulunmakta, bu malzemenin çevresinde hacimsel olarak çoğunluğu oluşturan bir matris malzeme bulunmaktadır. Bu iki malzeme grubundan, fiber malzeme kompozit malzemenin mukavemet ve yük taşıma özelliğini, matris malzeme ise plastik deformasyon sırasında oluşabilecek çatlak ilerlemelerini önleyici rol oynamakta ve

malzemenin kopmasını geciktirmektedir. Matris olarak kullanılan malzemenin bir amacı da fiber malzemeleri yük altında tutabilmek ve yükü lifler arasında homojen olarak dağıtmaktır. Böylece malzeme genelinde mukavemet artar.

Kompozit malzemeleri, yapılarını oluşturan malzemeler ve yapı bileşenlerinin şekillerine göre iki şekilde sınıflandırmak mümkündür. Matris malzemesinin türüne göre plastik kompozitler, metalik kompozitler, seramik kompozitler, vb. bir gruplandırma yapılabildiği gibi yapı bileşenlerinin şekillerine göre de partikül esaslı kompozitler, lamel esaslı kompozitler, fiber esaslı kompozitler, dolgulu (kafes) kompozitler, tabakalı kompozitler şeklinde sınıflandırılabilir.

### **2.2.1. Yapılarını oluşturan malzemelere göre kompozit malzemeler**

#### Plastik-plastik kompozitler

Fiber olarak kullanılan plastik, yük taşıyıcı bir özelliğe sahip iken, matris olarak kullanılan plastik, esneklik verici darbe emici veya istenilen amaca göre kullanılan plastiğin özelliğine sahip olmaktadır. Kullanılabilecek plastiğin türleri de üç ayrı sınıfta incelenebilir.

#### *Elastomerler*

Üç boyutlu Şebeke yapısı oluşturarak yüksek esneklik gösteren polimerlerden meydana gelirler.

#### *Termoplastikler*

Termoplastikler, oda sıcaklığında katı malzeme olarak adlandırılır. Bunlarda çizgisel molekül zincirleri birbirine zayıf metaller arasında Van der Waals bağları ile bağlanır. Rijit bir yapıya sahip değildir. Isıtılırsa yumuşar, sıcaklık arttıkça viskozitesi düşer. Bu özellik bunlardan yapılan ürünleri daha ekonomik yapar ve kolaylıkla şekillenmesini sağlar. Bu tekrar soğutulduğunda yeniden sertleşir. Sıvı

halde bulunduğu sıcaklıklarda vizkozite hali yüksektir. Bu nedenle ara yüzey bağı termosete göre daha zordur. Ancak şekillendirme kapasitesi iyi olduğundan bunların kullanımı yaygınlaşmaktadır. Bu polimerler kristalin veya şekilsiz (amorf) olabilir. Kristal şekilli olanlarda moleküller büyük uzaklıklarda oldukça düzenli şekil oluştururlar. Amorf polimerler de ise uzun zincirler birçok noktada birbirine dolaşmıştır. Bunlar polimeri daha büyük sıcaklıklarda rijit yapar. Kısa elyafı küçük hacim ortamında hamur veya levha kalıplama yöntemi ile kullanılmaktadır. Kimyasal etkilere karşı keza hassastırlar. Ancak poliamid veya PEEK/karbon elyafı kompozit 95<sup>0</sup> C'de suya karşı koyma dayanımında azalma olmamaktadır. Tutuşma direnci keza daha iyidir.

#### *Termoset Plastikler*

Bu tip plastiklerde ise ısıtılıp şekillendirildikten sonra soğutulduklarında artık mikroyapıda oluşan değişim nedeniyle eski yapıya dönüşüm mümkün olmamaktadır.

Plastik malzemeler genellikle reçineler olarak adlandırılır. Kompozit malzeme imalinde ise en çok kullanılan reçineler ise termosetlerdir. Gelişmiş mekanik özelliklere sahip olması istenen parçalar termoset plastikler kullanılarak kolaylıkla yapılabilir.

Günümüzde deniz araçları yapımında, otomotiv sanayinde, inşaat sektöründe, depo, tank, mobilya yapımında ekonomik olduğundan ve aranan özellikleri sağladığından büyük ölçüde kullanılmaktadır. Termosetler içerisinde en çok polyesterler, fenolik reçineler, epoksi reçineler ve silikonlar kullanılmaktadır. Epoksi reçineler yüksek mukavemet istenen yerlerde kullanılır.

#### Plastik-cam elyaf kompozitler

İsteğe göre termoplastikler veya oluşan matriks ve cam liflerin uygun kompozisyonundan üretilmektedir. Mekanik ve fiziksel özellikleri nedeniyle cam lifler birçok durumda metal, asbes, sentetik elyaf pamuk ipliği gibi liflere tercih

edilebilirler. Ancak cam elyaf kompozitler, büyük kuvvetleri iletmelerine rağmen camın kırılğan olması nedeniyle çok düşük dirençlidirler.

Bu tür malzemelerin fiziksel ve kimyasal özellikleri, kullanılan plastik reçineler uygun seçilerek arzu edilen şekle sokulabilir. Plastik reçineler de termoplastik ve termoset türünde olmaktadır. Termoset plastikler, fiberlerde düzgün oryantasyonu ile yüksek mukavemete ulaşabilirler. Cam elyaf takviyeleri ile en çok kullanılan plastik reçineler, polyesterlerdir. Polyesterlerde bu amaçlarla kullanılan birçok tür mevcuttur.

#### Plastik-metal fiber kompozitler

Endüstride çok kullanılan metal fiber takviyeli plastikten oluşan kompozitler oldukça hafif ve mukavemeti yüksek bir ürün olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu kompozitler, metal fiberlerin (bakır, bronz, çelik v.s.) poli-etilen ve poli-propilen plastiklerini takviyelendirmesi amacı ile elde edilmekte ve kullanılmaktadır. Özellikle deformasyon yönünde takviyelerde yaygın olarak kullanılmakta ve iyi verim alınmaktadır.

#### Plastik-köpük kompozitler

Bu tür kompozitlerde plastik, fiber olarak görev yapmakta; köpük ise matris, reçine konumunda olmaktadır. Köpükler, hücreli yapıya sahip, düşük yoğunlukta, gözenekli ve doğal halde bulunduğu gibi, büyük kısmı sentetik olarak imal edilmiş hafif maddedir. Köpük malzemeler hücre yapısına göre sert, kırılğan, yumuşak yada elastik olabilmektedir. Matris olarak kullanılan köpük türleri, kullanılan plastiğin çeşitlenebilmesiyle değişik özellikte kompozitlerin oluşumunu sağlar.

#### Metal matrisli kompozitler

Metallerin ve metal alaşımlarının bir çoğu yüksek sıcaklıklarda bazı özellikleri sağlamalarına rağmen kırılğan olmaktadır. Fakat metalik fiberlerle takviye edilmiş

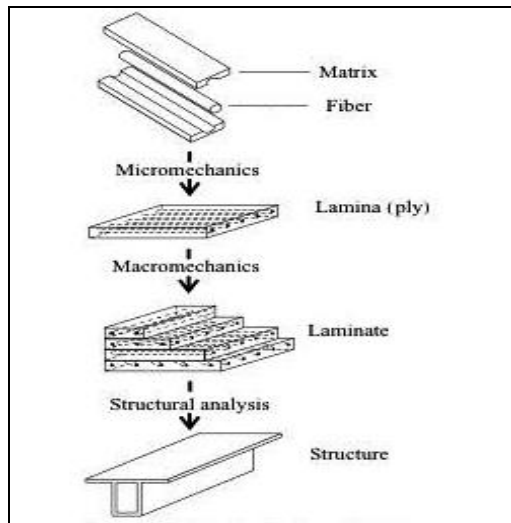
metal matrisli kompozitler her iki fazın uyumlu çalışması ile yüksek sıcaklıklarda da yüksek mukavemet özelliklerini vermektedirler.

Bakır ve alüminyum matrisli, wolfram ve molibden fiberli kompozitler ve Al-Cu kompoziti bize bu kompozisyonu veren en iyi örneklerdir. Bu tip kompozitler, matrisin özelliklerini iyileştirdiği gibi bu özelliklere daha ekonomik olarak ulaşılmasını sağlar.

Fiberlerin malzemeyi kuvvetlendirme derecesi, yüzeysel boşlukların olmayışına bağlıdır. Böylece teorik duruma yaklaşılabılır. Fiberlerin çaplarına ve matrisle olan adezyon niteliğine bağlı olarak belli bir kritik uzunluktan daha kısa olmalıdır. Bu kompozitlerde metal matris içine gömülen ikinci faz, sürekli lifler şeklinde olabildiği gibi gelişmiş güzel olarak dağıtılmış, küçük parçalar halinde de olabilmektedir.

### Seramik kompozitler

Metal veya metal olmayan malzemelerin birleşimiyle oluşan seramik kompozitler, yüksek sıcaklıklara karşı çok iyi dayanım göstermekle birlikte rijit ve gevrek bir yapıya sahiptirler. Ayrıca iyi elektrik yalıtıkcıdır.



Şekil 2.1. Tabakalı fiber kompozit malzemelerin tasarımı [27]

### **2.2.2. Bileşenlerinin şekillerine göre kompozit malzemeler**

#### Partikül esaslı kompozitler

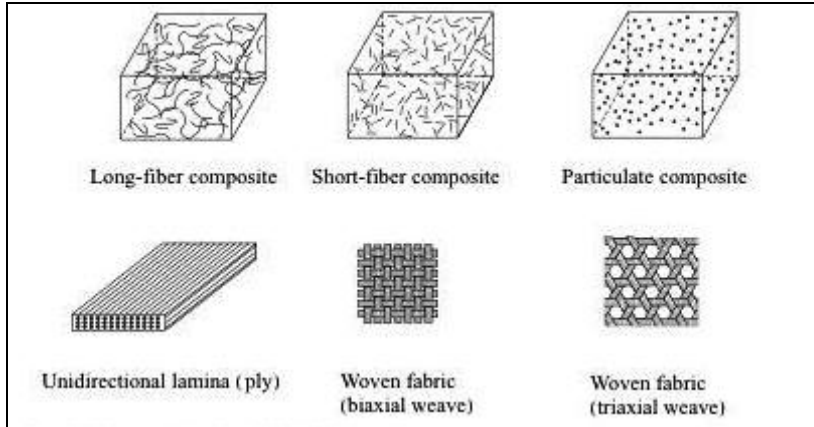
Rijitlik ve mukavemete artış sağlayan küçük granül dolgu maddesi ilavesiyle şekillendirilerek üretilir. Bir veya iki boyutlu makroskobik partiküllerin veya sıfır boyutlu olarak kabul edilen çok küçük mikroskobik partiküllerin matris fazı ile oluşturdukları malzemelerdir. Makroskobik veya mikroskobik boyutlu partiküller kompozit malzeme özelliklerini farklı şekilde etkilerler.

#### Lamel esaslı kompozitler

Yüksek yük taşıma kabiliyeti olan büyük uzunluk/çap oranında dolgu maddesi ilave edilerek üretilir. Matris içinde yer alan pulların konsantrasyonu düşük olabileceği gibi birbiri ile temas etmelerini sağlayacak derecede yüksek değerlerde olabilir. Düzlemsel yapıya sahip pullarla sıkı bir paketleme elde edilebilir. Pul esaslı sistemin maliyeti biraz daha fazla, ancak mukavemet özellikleri iyidir.

#### Fiber esaslı kompozitler

Mühendislikte kullanılan malzemelerin pek çoğu fiber şeklinde üretildiklerinde mukavemet ve rijitlikleri kütle hallerindeki değerlerinden çok üstünde olabilmektedir. Birçok özelliklerde artışı sağlayan, yüksek etkinliği olan liflerin ilavesiyle elde edilir. Karbon fiberlerin çekme mukavemeti kütle halindeki grafitten 50 kat, rijitliği 3 kat daha yüksektir.



Şekil 2.2. Yapılarına göre kompozit türleri (Üst; uzun-fiber kompozit, kısa-fiber kompozit, partiküllü kompozit/ Alt; tekyönlü tabaka, örülmüş iki eksenli, örülmüş üç eksenli [27])

### Dolgu kompozitleri

Üç boyutlu sürekli bir matris malzemesinin yine 3 boyutlu dolgu maddesi ile doldurulması veya emprenye edilmesi ile oluşan malzemelerdir. Düzgün petekler, hücreler veya süngere benzeyen gözenekli yapılar arasında metalik, organik veya seramik esaslı dolgu maddeleri yer alabilir. Optimum özelliklere sahip olabilmesi için birbiri içinde çözünmeyen, kimyasal reaksiyon vermeyen bileşenlerin seçilmesi gerekir. Bu tür kompozitler sandviç kompozitleri olarak da bilinir.

### Tabaka yapılı kompozitler

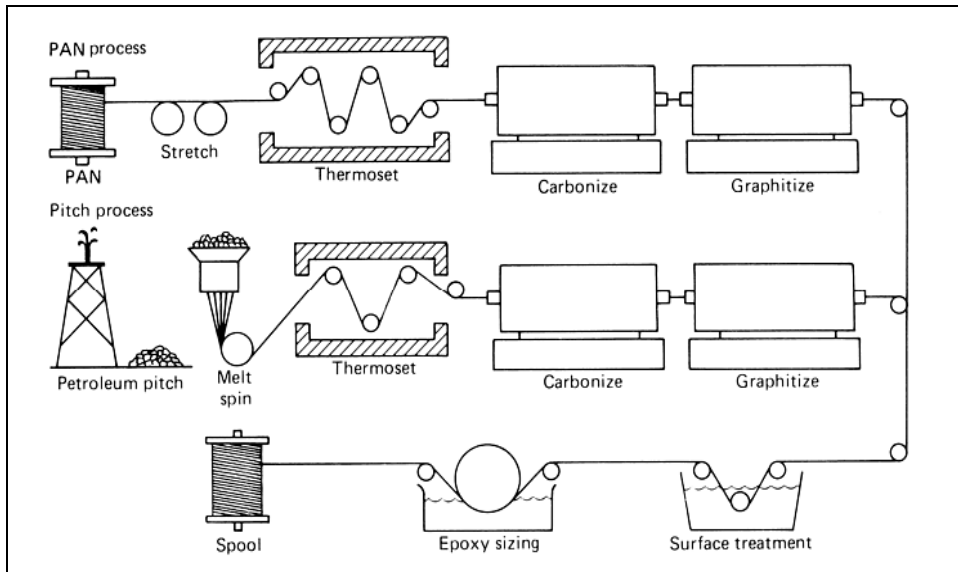
Çok değişik kombinasyonlarla tabakalanmış kompozitlerin üretimi mümkündür. Farklı özelliklere sahip en az iki tabakanın kombinasyonundan oluşur. Korozyon direnci zayıf metaller üzerine, daha yüksek dirençli metallerin veya plastiklerin kaplanmasıyla korozyon özelliğinin, yumuşak metallerin sert malzemelerle birleştirilmesiyle sertlik ve aşınma direncinin, farklı fiber yönlenmesine sahip tek tabakaların birleştirilmesiyle çok yönlü yük taşıma özelliğinin geliştirilmesi mümkün olmaktadır [27,28].

## 2.3. Karbon Fiber Kompozitler

### 2.3.1. Karbon fiber

Karbon fiber (lif) ile takviye edilmiş kompozit malzemeler, mukavemetlerinin ve rijitliklerinin cam lifleri ile imal edilen kompozitlere oranla çok fazla olması, yoğunluğunun az olması ve yorulma mukavemetinin fazla olması nedeniyle günümüzdeki kullanımları gittikçe artmaktadır. Uçak yapımında, roket lülelerinin imalinde, türbin kanatlarının yapımında kullanılmaktadır. Ayrıca disk, fren, yüksek basınç altında çalışan kaplar ve yatak malzemelerinin yapımında kullanılabilmektedir.

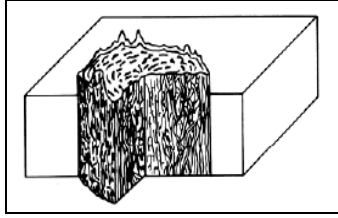
### 2.3.2. Karbon fiber üretimi



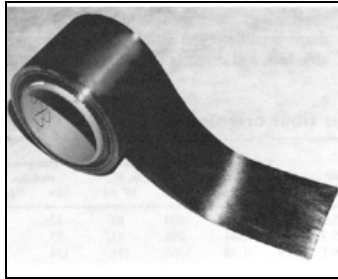
Şekil 2.3. Karbon fiber üretim aşamaları [27]

Karbon fiberler, germe ve termoset işlemleriyle üretilmektedir. Üretimde iki farklı karbon hammadde olarak kullanılmaktadır; bunlar Polyacrylonitrile (PAN) ve zifttir. PAN önceden üretilmiş makaralara sarılmış durumdadır. Zift ise bir petrol türevidir. Zift ise bir dizi işlemle geçirilerek fiber haline getirilir. Yapım aşamaları şunlardır:

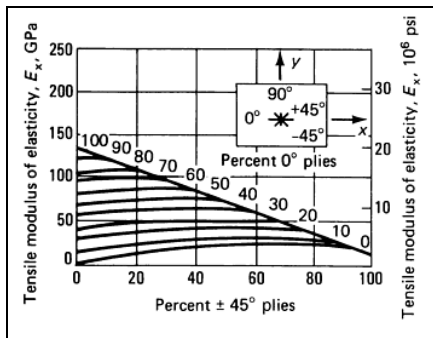
- Isıl işlem aşamasında fiberlere gerilim uygulanıp  $400^{\circ}\text{C}$  yi aşmayacak şekilde ısıtılır. Bu işlem karbon zincirlerinin birbirleriyle kesişmesini sağlayarak daha sonra ısıtılarda erimesini önler.
- Karbonizasyon aşamasında fiberler ortamda  $800^{\circ}\text{C}$  a kadar ısıtılır. Bu işlem karbon olmayan empürileri ortadan kaldırır.
- Garfitizasyon aşamasında fiberler %50 ila %100 uzayacak şekilde gerilmeye maruz bırakılırlar ve  $1100^{\circ}\text{C}$  ila  $3000^{\circ}\text{C}$  arasında ısıtılır. Gerilme, istenilen kristal oryantasyonu sağlayarak istenilen young modülü değerinin (300-600 Gpa) elde edilmesini sağlar.



Şekil 2.4. Karbon fiber kesiti [27]



Resim 2.2. Grafit epoksi karbonfiber teyp [27]



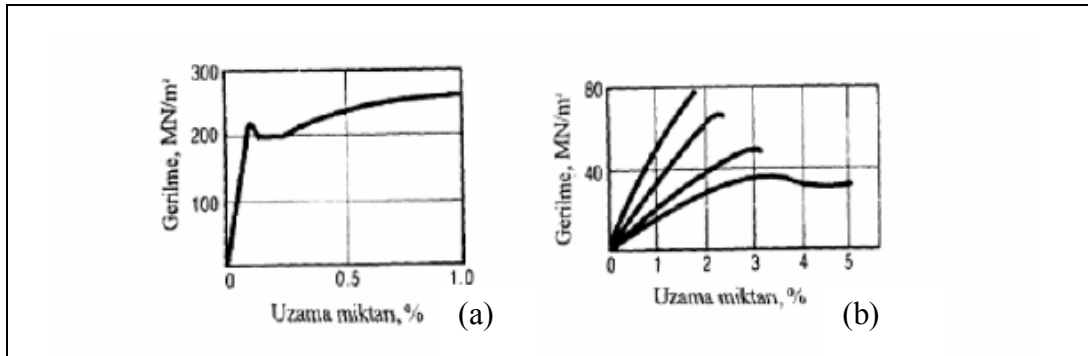
Şekil 2.5. Karbon epoksi tabakaların oda sıcaklığındaki çekme modülü [27]

### 3. KOMPOZİT MALZEMELERDE ELASTİK GERİLME ANALİZİ

#### 3.1. Kompozit Malzemelerin Tasarımı

Kompozit malzemelerden yapılan tanklar, sütunlar, basınçlı kaplar ve tüp gibi yapı elemanları ve bunların tasarımı; öncelikle kompozit için uygun üretim metodu, elyaf doğrultusu ve en uygun malzemelerin seçimini gerektirir. Bunlardan her birinin, malzemenin mekanik özellikleri ve son ürünün dayanımı ve elastikliği üzerine belirli etkisi vardır. Belirli uygulamalar için metal ve plastik esaslı kompozitlerin tasarımı arasındaki fark kompozit parçayı meydana getiren bileşenlerin fabrikasyon zamanında olmasıdır. Bu nedenle, tasarım aşaması üretim tekniğinin seçimiyle birlikte düşünülmelidir. İlk önce kompozitin tasarım işlemleri için elyaf ve matriks malzemeleri seçimi yapılır. Ancak bu seçimler doğru olmayabilir ve yeni kompozit teorisi kullanılabilir. Bu noktada polimer malzemeler ve sünek malzemeler arasında farkı belirtmekte fayda vardır. Sünek bir malzemede tipik bir gerilme/uzama eğrisi Şekil 3.1.a da gösterilmiştir. Bu şekilde görüldüğü gibi % 0,2'den daha küçük uzamalarda elastik davranış adı verilir ve bunu akma ve plastik akma takip eder. Metallerin tasarımı malzeme elastik bölgede olduğundan gerilme-şekil değiştirme doğrusal kabul edilip (elastik olarak kabul edilip) küçük elastik uzamalar parçanın içinde gerilme ve uzama dağılımları hesaplandığında izotropik özellik gösterir. Eğilme, rijitlik ve yer değiştirme parametreleri malzemenin elastik sabitlerine, örneğin, elastik modülü, kayma modülü ve poisson's oranı'na bağlıdır. Bu malzemeler genellikle izotropik özellik sergiler. Fakat zamana, sıcaklığa ve yükleme miktarına bağlı değildir. Kırılma mekanizması muhtemelen akma ile meydana gelir. Standartlar metalik malzemelerin yapısının homojen ve sünekliği nedeniyle mekanik özellikleri arasında farkların az olduğunu göstermiştir. Bu da gerilme yığılmalarının etkisini azaltır. Genellikle metallerin elastik modülleri yüksek bunun sonucunda uzamalar, deformasyonlar küçük ve tasarımlar da akma gerilmesi sınırına bağlıdır. Buna ilaveten, bir metal parçanın sınırlanmış bölgesi içinde gerilme yığınları (artık gerilmeler) malzemelerde oluşan bölgesel akma ile giderilebilir .

Polimer malzemelerin özellikleri çok farklıdır. Çünkü bunların mekanik davranışları visko-elastiktir. Bunun sonucu olarak da rijitlik ve dayanım özellikleri, frekans ve yükleme miktarı bunların hepsi zamana bağlıdır. Kompozit malzeme içindeki elyaf bileşeninin mekanik özellikler üzerine etkisi mevcut ancak yine zamana bağlıdır. Fakat bu bağımlılık; elyaf hacim oranı ve elyaf doğrultusuna göre değişir. Üç Tip polimerin tipik gerilme/uzama eğrisi Şekil 3.1 b) de gösterilmiştir. Bu grafikten de, kırılma gerilmelerinin metallerden çok değişik olduğu gözlenmektedir. Bununla beraber, polimerlerin davranışları anizotropiktir. Bu anizotropiklik malzemenin üretimi sırasında polimer molekülleri yönlendiği zaman ortaya çıkmaktadır. Kompozit malzemede elyaf düzenlenmesi rasgele değilse elyaflar düzenli yönlenmişse malzeme anizotropik özellikler verecektir [28].



Şekil 3.1. Metalik malzemelerde ve polimerlerde gerilme-%uzama grafiği  
a) Metalik malzemede gerilme-% uzama grafiği, b) polimerlerde gerilme-% uzama grafiği [28].

### 3.2. Anizotropik Malzemelerde Gerilme-Gerinim Bağlılıkları

Malzemenin mekanik özellikleri genel olarak bütün doğrultularda birbirinden farklıdır. Bu tür malzemeler anizotropik malzemeler olarak adlandırılır. Anizotropik malzemelerde, kütle kuvvetleri ihmal edildiğinde ve gerilme-şekil değiştirme tensörlerinin simetrik olduğu göz önüne alındığında 36 bağımsız elemana indirgenmiş, genelleştirilmiş Hooke Kanunu gerilme-şekil değiştirme ilişkisi,

$$\sigma_i = C_{ij} \epsilon_j \quad i, j = 1, \dots, 6 \quad (3.1)$$

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{51} & C_{52} & C_{53} & C_{54} & C_{55} & C_{56} \\ C_{61} & C_{62} & C_{63} & C_{64} & C_{65} & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

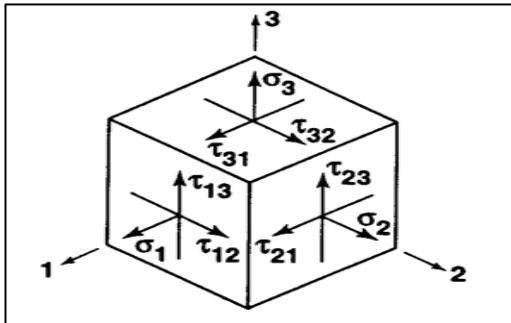
şeklinde yazılır.  $C_{ij}$  elastiklik katsayılarıdır.

Burada  $\sigma_i$  üç boyutlu küpteki gerilme bileşenlerini göstermektedir. Birim uzama için şekil değiştirme  $\varepsilon$ , birim kayma şekil değişimi için ise  $\gamma$  harfi kullanılır. Üç boyutlu zorlanma şekil değiştirme ifadeleri birim hacim için,

$$\varepsilon_1 = \frac{\partial u}{\partial x} \quad \varepsilon_2 = \frac{\partial v}{\partial y} \quad \varepsilon_3 = \frac{\partial w}{\partial z} \quad (3.3)$$

$$\gamma_{12} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \quad \gamma_{23} = \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \quad \gamma_{31} = \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z}$$

Burada u,v,w sırasıyla x,y,z veya 1,2,3 yönlerindeki uzamaları göstermektedir.



Şekil 3.2. Üç boyutlu gerilme hali

Gerilme zorlanma notasyonunun kısaltılmış hali çizelge 3.1 de gösterilmiştir.

Çizelge 3.1. Gerilme şekil değiştirme notasyonlarının kısaltılması.

| Gerilme                                 |                      | Şekil Değiştirme                              |                      |
|-----------------------------------------|----------------------|-----------------------------------------------|----------------------|
| Tensör Notasyonu                        | Kısaltılmış Notasyon | Tensör Notasyonu                              | Kısaltılmış Notasyon |
| $\sigma_{11} (\sigma_1)$                | $\sigma_1$           | $\epsilon_{11}$                               | $\epsilon_1$         |
| $\sigma_{22} (\sigma_2)$                | $\sigma_2$           | $\epsilon_{22}$                               | $\epsilon_2$         |
| $\sigma_{33} (\sigma_3)$                | $\sigma_3$           | $\epsilon_{33}$                               | $\epsilon_3$         |
| $\tau_{23} = \sigma_{23} = \sigma_{32}$ | $\sigma_4$           | $\gamma_{23} = \gamma_{32} = 2 \epsilon_{23}$ | $\epsilon_4$         |
| $\tau_{31} = \sigma_{31} = \sigma_{13}$ | $\sigma_5$           | $\gamma_{13} = \gamma_{31} = 2 \epsilon_{13}$ | $\epsilon_5$         |
| $\tau_{12} = \sigma_{12} = \sigma_{21}$ | $\sigma_6$           | $\gamma_{12} = \gamma_{21} = 2 \epsilon_{12}$ | $\epsilon_6$         |

Bir elastik malzemeye etkiyen  $\sigma_i$  gibi bir gerilmenin, bu malzemede  $d\epsilon_i$  kadar şekil değişimi meydana getirdiği kabul edilirse, bu şekil değişimi elastik malzemenin birim hacimde  $dW$  kadar zorlanma enerjisi meydana getirir.  $dW$  ile tanımlanan enerji,

$$dW = \sigma_i d\epsilon_i \quad (3.4)$$

şeklinde ifade edilir. Eşitlik 3.1’de belirtilen gerilme denklemi, eşitlik 3.4’de yerine konulduğunda birim hacim elemanı için genel şekil değiştirme ifadesi,

$$W = \frac{1}{2} C_{ij} \epsilon_i \epsilon_j \quad (3.5)$$

şeklinde elde edilir. Zorlanma enerjisinin  $\epsilon_i$  ve  $\epsilon_j$ ’ye göre kısmi türevleri alınırsa,

$$\frac{\partial^2 W}{\partial \epsilon_i \partial \epsilon_j} = C_{ij} \quad (3.6)$$

eşitliği sağlanır.  $W$  büyüklüğü diferansiyel matematiksel bir ifade olduğundan kısmi türev almada sıranın önemi yoktur. Böylece

$$C_{ij} = C_{ji} \quad i, j = 1, \dots, 6 \quad (3.7)$$

Böylelikle Hooke Kanunu gerilme-şekil değiştirme ilişkisi,

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{14} & C_{24} & C_{34} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{15} & C_{25} & C_{35} & C_{45} & C_{55} & C_{56} \\ C_{16} & C_{26} & C_{36} & C_{46} & C_{56} & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

şeklini alır.

Eğer malzeme tek bir simetri düzlemine sahipse gerilme-şekil değiştirme ilişkisi,

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & C_{16} \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & C_{26} \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & 0 & 0 & C_{36} \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & C_{45} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{45} & C_{55} & 0 \\ C_{16} & C_{26} & C_{36} & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

Belirtilen ilişki anizotropik malzemeler için geçerlidir ve Hooke kanununun en genel halidir. Tek yönlü elyaf takviyeli kompozit tabakalarda tüm elyaflerin birbirine paralel olduğu kabul edilirse, bu tür malzemelerin ortotropik malzeme olduğu söylenebilir. Ortotropik malzemelerde birbirlerine dik doğrultuda üç eksenle simetrik malzeme özelliği mevcuttur. Bu malzemeler için gerilme-şekil değiştirme ilişkisi şu şekilde ifade edilmektedir.

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

Yukarıdaki ilişkide  $[C]$  katılık matrisini ifade etmektedir. Gerilme-Şekil değiştirme ilişkisi bir başka şekilde şekil değiştirme-gerilme biçiminde, aşağıdaki gibi de ifade edilebilir,

$$\varepsilon_{ij} = S_{ij} \sigma_j \quad (3.11)$$

Böylelikle ortotropik malzemelerde şekil değiştirme-gerilim ilişkisi,

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{22} & S_{23} & 0 & 0 & 0 \\ S_{13} & S_{23} & S_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

şeklinde yazılır [26,25].

### 3.3. Ortotropik Malzemelerde Mühendislik Sabitleri

Ortotropik malzeme için uygunluk matrisi mühendislik sabitleri cinsinden,

$$[S_{ij}] = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{21}}{E_2} & -\frac{\nu_{31}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & -\frac{\nu_{32}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{13}}{E_1} & -\frac{\nu_{23}}{E_2} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{31}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

şekliyle ifade edilir. Burada,

$E_i$  : i ekseninde elastisite modülü

$G_{ij}$  : ij düzlemindeki kayma modülü

$\nu_{ij}$  : Poisson oranı, j doğrultusundaki zorlanmanın i doğrultusundaki zorlanmaya oranıdır  $(-\frac{\varepsilon_j}{\varepsilon_i})$ .

Buna göre katılık matrisi  $C_{ij}$  şu şekilde tanımlanır,

$$c_{11} = \frac{1 - \nu_{23}\nu_{32}}{\Delta E_2 E_3} \quad c_{12} = \frac{\nu_{21} + \nu_{31}\nu_{23}}{\Delta E_2 E_3} = \frac{\nu_{12} + \nu_{32}\nu_{13}}{\Delta E_1 E_2}$$

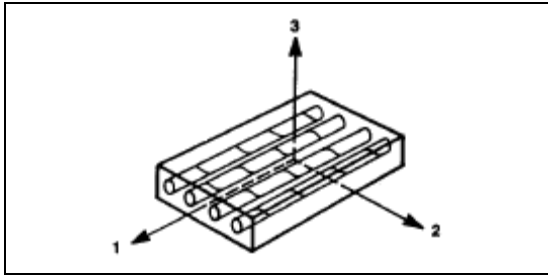
$$c_{13} = \frac{\nu_{31} + \nu_{21}\nu_{32}}{\Delta E_2 E_3} = \frac{\nu_{13} + \nu_{12}\nu_{23}}{\Delta E_1 E_2} \quad c_{22} = \frac{1 - \nu_{13}\nu_{31}}{\Delta E_1 E_3}$$

$$c_{13} = \frac{\nu_{32} + \nu_{12}\nu_{31}}{\Delta E_1 E_2} = \frac{\nu_{23} + \nu_{21}\nu_{13}}{\Delta E_1 E_2} \quad c_{33} = \frac{1 - \nu_{12}\nu_{21}}{\Delta E_1 E_2}$$

$$C_{44} = G_{23} \quad C_{55} = G_{13} \quad C_{66} = G_{12} \quad (3.14)$$

$$\Delta = \frac{1 - \nu_{12}\nu_{21} - \nu_{23}\nu_{32} - 2\nu_{21}\nu_{32}\nu_{13}}{E_1 E_2 E_3} \quad [26,25]$$

### 3.4. Ortotropik Malzemelerde Düzlemsel Gerilme Durumu



Şekil 3.3. Tek yönlü fiber takviyeli tabaka (1,2 ve 3 eksenlerinin gösterilişi)

Düzlemsel gerilme durumunda 3 eksenindeki gerilmelerin 0 olduğu kabul edilir (Şekil 3.3).

$$\begin{aligned} \sigma_3 &= 0 & \tau_{23} &= 0 & \tau_{31} &= 0 \\ \sigma_1 &\neq 0 & \sigma_2 &\neq 0 & \tau_{12} &\neq 0 \end{aligned} \quad (3.15)$$

Ortotropik malzemede, düzlemsel gerilme durumu için uygun matris elemanları,

$$\begin{aligned} \varepsilon_{13} &= S_{13}\sigma_1 + S_{23}\sigma_2 & \gamma_{23} &= 0 & \gamma_{31} &= 0 \\ S_{13} &= -\frac{\nu_{13}}{E_1} = -\frac{\nu_{31}}{E_3} & S_{23} &= -\frac{\nu_{23}}{E_2} = -\frac{\nu_{32}}{E_3} \end{aligned} \quad (3.16)$$

şeklinde yazılır. Böylece ortotropik malzemelerde, düzlemsel gerilme hali için şekil değiştirme-gerilme bağıntısı,

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & 0 \\ S_{12} & S_{22} & 0 \\ 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

şeklinde yazılabilir. Eşitlik 3.17’deki uygunluk matrisinin elemanları,

$$\begin{aligned} S_{11} &= \frac{1}{E_1} \\ S_{12} &= -\frac{\nu_{21}}{E_1} = -\frac{\nu_{12}}{E_1} \\ S_{22} &= \frac{1}{E_2} \\ S_{66} &= \frac{1}{G_{12}} \end{aligned} \quad (3.18)$$

şeklindedir. Eşitlik 3.17' de belirtilen şekil değiştirme-gerilme bağıntısı, gerilme-şekil değiştirme bağıntısı olarak yazıldığında,

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

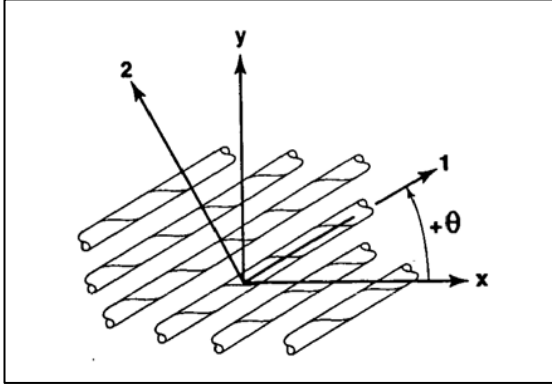
elde edilir. Eşitlik (3.19)' daki  $Q_{ij}$  matrisi indirgenmiş elastisite matrisi olarak tanımlanır ve bu matrisin elemanları,

$$Q_{11} = \frac{E_1}{1 - \nu_{21}\nu_{12}} \quad Q_{22} = \frac{E_2}{1 - \nu_{21}\nu_{12}} \quad Q_{21} = \frac{\nu_{12}E_2}{1 - \nu_{21}\nu_{12}} \quad Q_{66} = G_{12} \quad (3.20)$$

şeklinde ifade edilir [26,25].

### 3.5. Keyfi Düzenlenmiş Bir Tabakanın Gerilme-Şekil Değiştirme İlişkisi

Laminatlar genellikle farklı açılı tabakalardan meydana gelir. Bunun sebebi farklı yönlerde de yüksek mekanik özellikler elde etmektir. Tabakalarda kullanılan koordinat sistemi 1-2 olarak isimlendirilir. 1 nolu yön takviye elemanının (elyaf) yönünü belirtir. 2 nolu yön ise takviye elemanına dik olan yönü gösterir. x-y koordinat sistemi ile 1-2 koordinat sistemi açılı laminalarda çakışmaz. Bu durumda x-y koordinat sistemi ile 1-2 koordinat sistemi arasındaki bağıntı dönüşüm matrisi ile aşağıda belirtildiği gibi sağlanır.



Şekil 3.4. Eksenler arasındaki ilişki

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = [T] \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12}/2 \end{bmatrix} = [T] \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy}/2 \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

şeklinde yazılır. T matrisi dönüşüm matrisi olarak adlandırılır,

$$[T] = \begin{bmatrix} \cos^2 \theta & \sin^2 \theta & 2 \sin \theta \cos \theta \\ \sin^2 \theta & \cos^2 \theta & -2 \sin \theta \cos \theta \\ -\sin \theta \cos \theta & \sin \theta \cos \theta & \cos^2 \theta - \sin^2 \theta \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

ile ifade edilir. [T] matrisinin tersi  $[T]^{-1}$  olarak tanımlanırsa,

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = [T]^{-1} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

Elde edilir. Benzer olarak şekil değiştirme ifadesi;

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy}/2 \end{bmatrix} = [T]^{-1} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12}/2 \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

$$[T]^{-1} = \begin{bmatrix} \cos^2 \theta & \sin^2 \theta & -2 \sin \theta \cos \theta \\ \sin^2 \theta & \cos^2 \theta & 2 \sin \theta \cos \theta \\ \sin \theta \cos \theta & -\sin \theta \cos \theta & \cos^2 \theta - \sin^2 \theta \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

$$[R] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 2 \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

Burada  $[R]$  router matrisidir ve bu matris işleme sokulduğunda şekil değişimi bileşenleri vektörü daha basit bir hale dönüşür. Bu durumda  $\gamma_{xy}$  büyüklüğünde  $\frac{1}{2}$  çarpanı ortadan kalkar.

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = [R] \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12}/2 \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

1,2 ve x,y eksenlerinin birbiri ile çakışık olması durumunda, gerilme-şekil değiştirme bağıntısı

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = [Q] \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} \quad (3.29)$$

yazılır. 1,2 ve x,y eksenlerinin birbirleri ile çakışmama durumunda ise genel ifade aşağıdaki işlem basamakları ile bulunur.

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = [Q] \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} \quad (3.30)$$

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = [T]^{-1} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = [T]^{-1} [Q] \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} \quad (3.31)$$

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = [T]^{-1} [Q] [R] \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} / 2 \end{bmatrix} = [T]^{-1} [Q] [R] [T] \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} / 2 \end{bmatrix} \quad (3.32)$$

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = [T]^{-1} [Q] [R] [T] [R]^{-1} \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} \quad (3.33)$$

Bu işlemlerde  $[R][T][R]^{-1}$  ifadesi T matrisinin transpozesidir

$$[T]^T = [R][T][R]^{-1} \quad (3.34)$$

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = [T]^{-1} [Q] [T]^T \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} \quad (3.35)$$

$$[\bar{Q}] = [T]^{-1} [Q] [T]^T \quad (3.36)$$

$\theta$  açısı x eksen ile 1 eksen arasındaki açı olarak ele alınırsa xy koordinatlarına göre gerilme-şekil değiştirme ifadesi,

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = [\bar{Q}] \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} \quad (3.37)$$

Burada  $\bar{Q}_{ij}$ ; indirgenmiş rijitlik matrisini göstermektedir eşitlik (2.36) çözülürse,

$$\begin{aligned} \bar{Q}_{11} &= Q_{11} \cos^4 \theta + 2(Q_{12} + 2Q_{66}) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + Q_{22} \sin^4 \theta \\ \bar{Q}_{12} &= (Q_{11} + Q_{22} - 4Q_{66}) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + Q_{12} (\sin^4 \theta + \cos^4 \theta) \\ \bar{Q}_{22} &= Q_{11} \sin^4 \theta + 2(Q_{12} + 2Q_{66}) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + Q_{22} \cos^4 \theta \\ \bar{Q}_{16} &= (Q_{11} - Q_{12} - 2Q_{66}) \sin \theta \cos^3 \theta + (Q_{12} - Q_{22} - 2Q_{66}) \sin^3 \theta \cos \theta \\ \bar{Q}_{26} &= (Q_{11} - Q_{12} - 2Q_{66}) \sin^3 \theta \cos \theta + (Q_{12} - Q_{22} - 2Q_{66}) \sin \theta \cos^3 \theta \\ \bar{Q}_{66} &= (Q_{11} + Q_{22} - 2Q_{12} - 2Q_{66}) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + Q_{66} (\sin^4 \theta + \cos^4 \theta) \end{aligned} \quad (3.38)$$

ifadeleri bulunur.

Şekil değiştirme-gerilme bağıntısının oluşturulabilmesi için benzer şekilde indirgenmiş uygunluk matrisinin ( $\bar{S}_{ij}$ ) tanımlanması gerekir.

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & 0 \\ S_{12} & S_{22} & 0 \\ 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} \quad (3.39)$$

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = [T]^T [Q] [T] \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} \quad (3.40)$$

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{S}_{11} & \bar{S}_{12} & \bar{S}_{16} \\ \bar{S}_{12} & \bar{S}_{22} & \bar{S}_{26} \\ \bar{S}_{16} & \bar{S}_{26} & \bar{S}_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} \quad (3.41)$$

$$[T]^T = [R][T]^{-1}[R]^{-1} \quad (3.42)$$

$$[\bar{S}] = [T]^T [S][T] \quad (3.43)$$

yukarıdaki denklemler çözüldüğünde,

$$\bar{S}_{11} = S_{11} \cos^4 \theta + (2S_{12} + S_{66}) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + S_{22} \sin^4 \theta \quad (3.44)$$

$$\bar{S}_{12} = (S_{11} + S_{12} - S_{66}) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + S_{12} (\sin^4 \theta + \cos^4 \theta)$$

$$\bar{S}_{22} = S_{11} \sin^4 \theta + (2S_{12} + S_{66}) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + S_{22} \cos^4 \theta$$

$$\bar{S}_{16} = (2S_{11} - 2S_{12} - S_{66}) \sin \theta \cos^3 \theta - (-2S_{12} + 2S_{22} - S_{66}) \sin^3 \theta \cos \theta$$

$$\bar{S}_{26} = (2S_{11} - 2S_{12} - S_{66}) \sin^3 \theta \cos \theta - (-2S_{12} + 2S_{22} - S_{66}) \sin \theta \cos^3 \theta$$

$$\bar{S}_{66} = 2(2S_{11} + 2S_{22} - 4S_{12} - S_{66}) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + S_{66} (\sin^4 \theta + \cos^4 \theta)$$

ifadeleri elde edilir [26,25].

### 3.6. Tabakalı Kompozit Malzemelerde Gerilme Analizi

İzotropik malzemeden imal edilmiş prizmatik bir kirişi ele alalım. Çekme kuvvetine maruz kalan kiriş için herhangi bir kesitteki normal gerilme-şekil değişimi aşağıdaki gibi belirlenir.

$$\varepsilon_x = \frac{P}{AE} \quad (3.45)$$

Burada E; elastik modülü, P; uygulanan kuvveti, A; kesit alanını ifade etmektedir. Eğer kiriş sadece eğilme momentine maruz kalırsa bu durumda, yukarıdaki denklem aşağıdaki şekli alır, bu da tabakalı malzemeler için geçerlidir.

$$\varepsilon_x = \frac{z}{\rho} \quad (3.46)$$

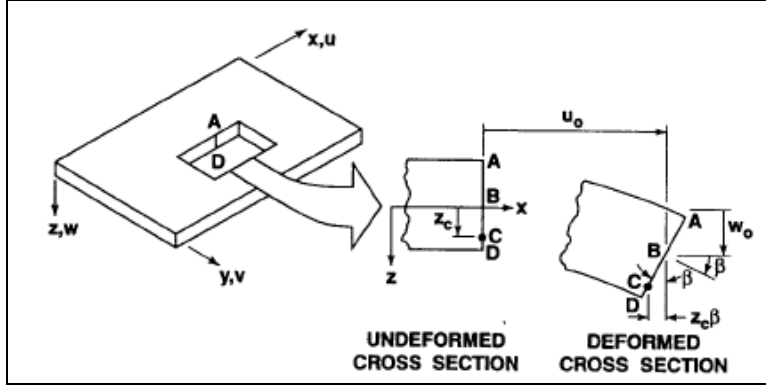
Burada şekil 3.5 de görüldüğü üzere  $z$ ; merkezden (B noktasından) olan uzaklık,  $\rho$ ; kirisin eğilme yarıçapıdır.

Kirişteki gerilmeler,

$$\sigma_x = \frac{Ez}{\rho}$$

$$\sigma_x = \frac{Mz}{I} \quad (3.47)$$

Burada  $M$ ; moment ve  $I = \int_A z^2 dA$  olup alan eylemsizlik momentidir.



Şekil 3.5. Tabakaların deformasyonu, B noktası orta nokta (merkez) ,  $\beta$  eğilme açısı.

Yukarıdaki şekle göre tabakanın  $x$  yönündeki yer değiştirmesi ;  $u_0$ ,  $y$  yönündeki yer değiştirmesi;  $v_0$  ve  $z$  yönündeki yer değiştirmesi ise  $w_0$  olup yalnız  $x$  ve  $y$  nin fonksiyonudurlar.

$$u_0 = u_0(x, y)$$

$$v_0 = v_0(x, y)$$

$$w_0 = f(x, y)$$

(3.48)

$x$  ve  $y$  eksenlerindeki dönme;

$$\beta_x = \frac{\partial w}{\partial x}$$

$$\beta_y = \frac{\partial w}{\partial y} \quad (3.49)$$

Şekil 3.5’de gösterilen B noktasının yer değişimi;

$$\begin{aligned} u_b &= u_0 - \beta_x z_b \\ v_b &= v_0 - \beta_y z_b \end{aligned} \quad (3.50)$$

Eş. 3.49 Eş. 3.50’ de yerine konursa;

$$\begin{aligned} u &= u_0 - z \frac{\partial w}{\partial x} \\ v &= v_0 - z \frac{\partial w}{\partial y} \end{aligned} \quad (3.51)$$

elde edilir. Tabakanın yer değişimi;

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial u_0}{\partial x} - z \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \\ \varepsilon_y &= \frac{\partial v}{\partial y} = \frac{\partial v_0}{\partial y} - z \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \\ \gamma_{xy} &= \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} = \frac{\partial u_0}{\partial y} + z \frac{\partial v_0}{\partial x} - 2z \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \\ \varepsilon_z &= \gamma_{xz} = \gamma_{yz} = 0 \end{aligned} \quad (3.52)$$

ifadesi ile, referans düzlemindeki şekil değiştirme;

$$\begin{aligned}
\varepsilon_x^0 &= \frac{\partial u_0}{\partial x} \\
\varepsilon_y^0 &= \frac{\partial v_0}{\partial y} \\
\gamma_{xy}^0 &= \frac{\partial u_0}{\partial y} + \frac{\partial v_0}{\partial x}
\end{aligned} \tag{3.53}$$

Tabakalardaki şekil değiştirme, matris şeklinde K ile tanımlanabilir, K matrisi elemanları;

$$\begin{aligned}
K_x &= -\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \\
K_y &= -\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \\
K_{xy} &= -\frac{2\partial^2 w}{\partial x \partial y}
\end{aligned} \tag{3.54}$$

ile tanımlanır. Tabakanın herhangi bir noktasındaki şekil değişimi, orta yüzeyin şekil değişimi ve çarpılması ile ilişkilendirilir.

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{bmatrix} + z \begin{bmatrix} K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{bmatrix} \tag{3.55}$$

Gerilme-şekil değiştirme arasındaki bağıntı ise şu şekilde tanımlanabilir,

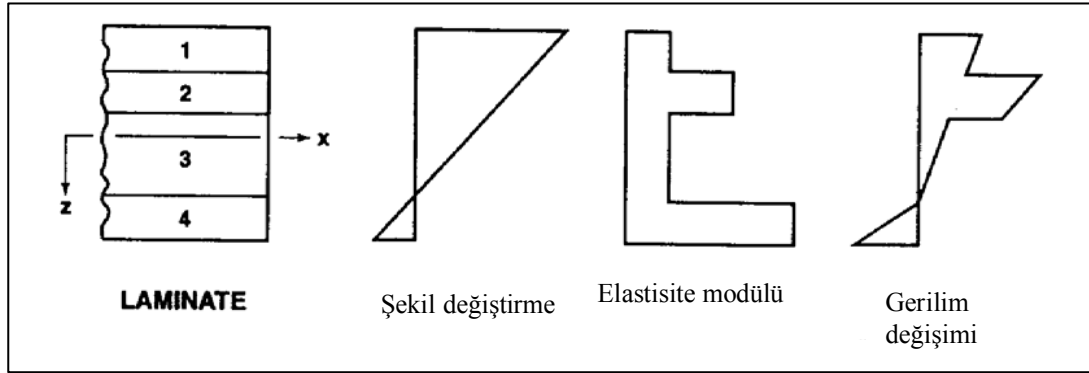
$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix}_k = \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix}_k \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix}_k \tag{3.56}$$

Burada k tabakanın kaçınıcı tabaka olduğunu göstermektedir. 3.55 denklemi yerine konulduğunda;

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix}_k = \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix}_k \begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{bmatrix}_k + z \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{bmatrix} \quad (3.57)$$

ifadesi elde edilir.

Eş. 3.56 ve 3.58' de görüldüğü gibi şekil değişiminin kalınlık boyunca lineer değiştiği, gerilmenin ise lineer olarak değişmediği anlaşılır. Tabakanın her katında  $\bar{Q}_{ij}$  farklı olacağından şekil değişimi, tabaka kalınlığı boyunca lineer olmasına rağmen gerilme değişimi lineer olmaz. Bu değişim Şekil 3.6'da x yönündeki tek yönlü gerilme altında 4 plakadan oluşan tabakada gösterilmiştir. Her plakadaki ortalama gerilme; referans düzlemin zorlanması ( $\varepsilon_0$ ), tabakanın kıvrıklığı  $K_{xy}$ , plakanın orta düzleme olan uzaklığı ( $z$ ) ve dönüştürülmüş rijitlik matrisi  $\bar{Q}_{ij}$  yardımı ile hesaplanır [26,25].



Şekil 3.6. x yönünde tek yönlü gerilme altında 4 plakadan oluşan tabakadaki şekil değişime, elastisite modülü, gerilim değişimi

### 3.7. Tabaka Bileşke Kuvvetleri ve Momentleri

N tabakadan oluşan bir kompozit şekil 3.9 daki gibi levha ele alınsın. Her bir tabaka kalınlığı  $t_k$  olsun. Levhanın toplam kalınlığı  $h$  ile ifade edilsin. Bu durumda levha kalınlığı şu şekilde de ifade edilebilir:

$$h = \sum_{k=1}^n t_k \quad (3.58)$$

birinci tabakanın z-eksenindeki konumu;

$$h_0 = -\frac{h}{2} \text{ (üst yüzey)}$$

$$h_1 = -\frac{h}{2} + t_1 \text{ (alt yüzey)} \quad (3.59)$$

tabaka k (k=2,3,.....,n-2,n-1) için:

$$h_{k-1} = -\frac{h}{2} + \sum_{n=1}^{k-1} t_n \text{ (üst yüzey)}$$

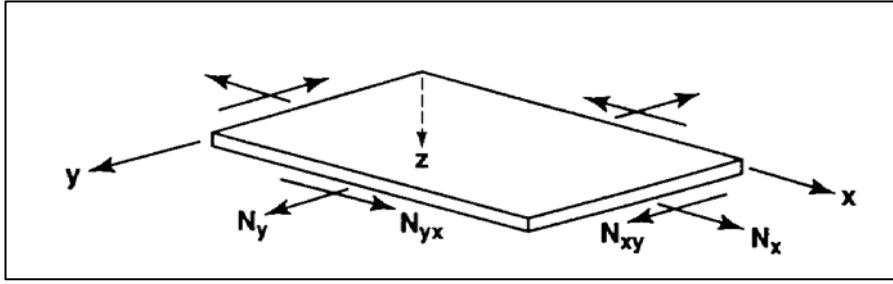
$$h_k = -\frac{h}{2} + \sum_{n=1}^k t_n \text{ (alt yüzey)} \quad (3.60)$$

tabaka n için:

$$h_{n-1} = \frac{h}{2} - t_n \text{ (üst yüzey)}$$

$$h_n = \frac{h}{2} \text{ (alt yüzey)} \quad (3.61)$$

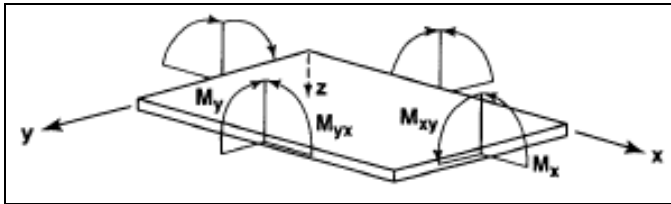
Her bir tabaka için global gerilmelerin integrali alındığında, x-y düzleminde, birim uzunlukta bileşke kuvvet şu şekilde ifade edilebilir:



Şekil 3.7. Tabakaya etkiyen bileşke kuvvetler, ve koordinat düzlemi

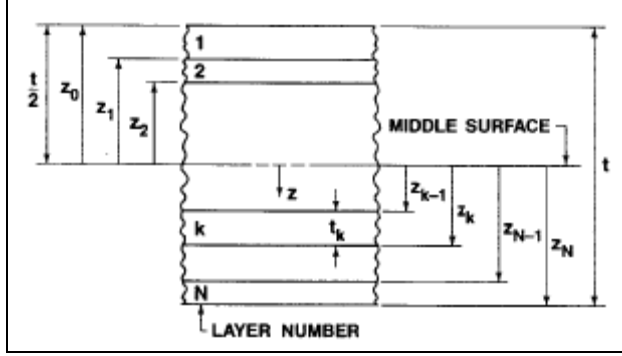
$$\begin{aligned}
 N_x &= \int_{-t/2}^{t/2} \sigma_x dz \\
 N_y &= \int_{-t/2}^{t/2} \sigma_y dz \\
 N_{xy} &= \int_{-t/2}^{t/2} \tau_{xy} dz
 \end{aligned}
 \tag{3.62}$$

Benzer şekilde, her bir tabaka için global gerilmelerin integrali alındığında, x-y düzleminde, birim uzunlukta bileşke moment şu şekilde ifade edilebilir:



Şekil 3.8. düz tabakada momentlerin gösterilişi

$$\begin{aligned}
 M_x &= \int_{-t/2}^{t/2} \sigma_x z dz \\
 M_y &= \int_{-t/2}^{t/2} \sigma_y z dz \\
 M_{xy} &= \int_{-t/2}^{t/2} \tau_{xy} z dz
 \end{aligned}
 \tag{3.63}$$



Şekil 3.9. N katmanlı plaka

Bileşke kuvvetler ve momentler matrisi cinsinden yazılırsa:

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{bmatrix} = \int_{-t/2}^{t/2} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} dz = \sum_{k=1}^N \int_{z_{k-1}}^{z_k} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} dz \quad (3.64)$$

$$\begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \int_{-t/2}^{t/2} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} z dz = \sum_{k=1}^N \int_{z_{k-1}}^{z_k} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} z dz$$

Eş 3.65'deki plaka gerilmeleri Eş. 3.58' de yerine konulduğunda;

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{bmatrix} = \sum_{k=1}^N \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix}_k \begin{bmatrix} \int_{z_{k-1}}^{z_k} \begin{bmatrix} \epsilon_x^0 \\ \epsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{bmatrix} dz \\ + \int_{z_{k-1}}^{z_k} \begin{bmatrix} K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{bmatrix} z dz \end{bmatrix} \quad (3.65)$$

$$\begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \sum_{k=1}^N \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix}_k \begin{bmatrix} \int_{z_{k-1}}^{z_k} \begin{bmatrix} \epsilon_x^0 \\ \epsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{bmatrix} z dz \\ + \int_{z_{k-1}}^{z_k} \begin{bmatrix} K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{bmatrix} z^2 dz \end{bmatrix} \quad (3.66)$$

$[\epsilon^0]$  ve  $[K]$  matrislerinin  $z$  den bağımsız olduğu varsayılp, integral dışına alınırlarsa, bileşke kuvvet şekil değiştirme ilişkisi:

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{bmatrix} \quad (3.67)$$

ve moment şekil değiştirme ilişkisi;

$$\begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{bmatrix} \quad (3.68)$$

ile ifade edilir. Burada ;

$$\begin{aligned} A_{ij} &= \sum_{k=1}^N (\bar{Q}_{ij})_k (z_k - z_{k-1}) \\ B_{ij} &= \frac{1}{2} \sum_{k=1}^N (\bar{Q}_{ij})_k (z_k^2 - z_{k-1}^2) \\ D_{ij} &= \frac{1}{3} \sum_{k=1}^N (\bar{Q}_{ij})_k (z_k^3 - z_{k-1}^3) \end{aligned} \quad (3.69)$$

eşitliklerini sağlamaktadır.

Klasik tabaka (laminat) teorisi, kompozit tabakaların iç gerilme halini, rijitliklerini ve boyut oranının hesaplanmasında kullanılmaktadır. Tabaka üstündeki farklı tip yük ve momentlerin etkisi Eş. 3.67 ve Eş. 3.68 kullanılarak, ABD matrisinin oluşturulmasıyla hesaplanabilir.

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \\ M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} & B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} & B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} & B_{16} & B_{26} & B_{66} \\ B_{11} & B_{12} & B_{16} & D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} & D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} & D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \varepsilon_{xy}^0 \\ K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{bmatrix} \quad (3.70)$$

Bu matris kısaca;

$$\begin{bmatrix} N \\ M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ B & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon^0 \\ K \end{bmatrix} \quad (3.71)$$

şeklinde ifade edilebilir.

Bir tabakada, plakadan plakaya gerilme değişimi süreksiz olduğundan hesaplamalarda gerilme yerine kalınlık boyunca sürekliliğini koruyan şekil değişimi kullanılması tercih edilir. Bu nedenle kuvvet-şekil değişimi matrisinin tersi alınıp şekil değişimi-kuvvet bağıntısı bulunur.

$$\begin{bmatrix} \varepsilon^0 \\ K \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A' & B' \\ C' & D' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} N \\ M \end{bmatrix} \quad (3.72)$$

ifadesi verilir. Burada A', B', ve D', C' ifadeleri;

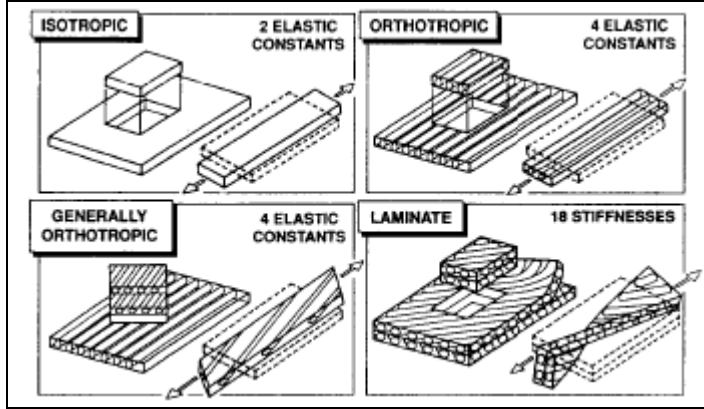
$$\begin{aligned} [A'] &= [A]^{-1} - \{[B^*][D^{*-1}]\}[C^*] \\ [B'] &= [B^*][D^{*-1}] \\ [C'] &= -[D^{*-1}][C^*] \\ [D'] &= [D^{*-1}] \end{aligned} \quad (3.73)$$

ifadelerine eşittir, burada da;

$$\begin{aligned} [B^*] &= -[A]^{-1}[B] \\ [C^*] &= [B][A]^{-1} \\ [D^*] &= [D] - \{[A]^{-1}[B]\}[B] \end{aligned} \quad (3.74)$$

ifadelerine eşit olur.

### 3.8 Tabaka Rijitlik Matrislerinin Özel Durumları



Şekil 3.10. Kompozit malzemelerde 4 ayrı özel durum[26,25]

#### 3.8.1. İzotropik tek tabaka

Malzeme özellikleri  $E$ ,  $\nu$  kalınlığı  $t$  olan izotropik plakanın rijitliği denklem (3.69) çözülerek aşağıdaki hali alır.

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & \nu A & 0 \\ \nu A & A & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} A \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_x^0 \\ \epsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{bmatrix} \quad (3.75)$$

$$\begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D & \nu D & 0 \\ \nu D & D & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{bmatrix} \quad (3.76)$$

Burada;

$$A = \frac{Et}{1-\nu^2}$$

$$D = \frac{Et^3}{12(1-\nu^2)} \quad (3.77)$$

eşitlikleri vardır. Kuvvet, yalnız tabaka orta yüzeyinin zorlanmasına, moment ise yalnız orta yüzeyin zorlanmasına bağlıdır.

### 3.8.2. Özel ortotropik tek tabaka

t kalınlığındaki özel ortotropik plakanın katılık matrisi,

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & 0 \\ A_{12} & A_{22} & 0 \\ 0 & 0 & A_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{bmatrix} \quad (3.78)$$

$$\begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & 0 \\ D_{12} & D_{22} & 0 \\ 0 & 0 & D_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{bmatrix} \quad (3.79)$$

Burada;

$$\begin{aligned} A_{11} &= Q_{11}t & D_{11} &= \frac{Q_{11}t^3}{12} \\ A_{12} &= Q_{12}t & D_{12} &= \frac{Q_{12}t^3}{12} \\ A_{22} &= Q_{22}t & D_{22} &= \frac{Q_{22}t^3}{12} \\ A_{66} &= Q_{66}t & D_{66} &= \frac{Q_{66}t^3}{12} \end{aligned} \quad (3.80)$$

şeklinde ifade edilir.

### 3.8.3. Genellikle ortotropik tek tabaka

Genellikle ortotropik tek tabakada,  $t$  kalınlığında eğme ve çekme arasında bir çift olmadığından kuvvet ve momentler;

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{bmatrix} \quad (3.81)$$

$$\begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{bmatrix} \quad (3.82)$$

ile ifade edilir. Bu bağıntıdaki elemanlar ise,

$$\begin{aligned} A_{ij} &= \bar{Q}_{ij} t \\ D_{ij} &= \frac{\bar{Q}_{ij} t^3}{12} \end{aligned} \quad (3.83)$$

şeklinde ifade edilir.

### 3.8.4. Anizotropik tek tabaka

Genellikle tek ortotropik tabaka ile anizotropik tabaka arasındaki fark rijitlik matrisleridir.

Kuvvet ve Momentler;

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{bmatrix} \quad (3.84)$$

$$\begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{bmatrix} \quad (3.85)$$

Buradaki rijitlik matrisinin elemanları;

$$A_{ij} = Q_{ij}t$$

$$D_{ij} = \frac{Q_{ij}t^3}{12} \quad (3.86)$$

ile ifade edilir.

### 3.9. Simetrik Tabakalar

Orta yüzeyin her iki tarafında bulunan plakalar; referans düzleme eşit uzaklıkta, eşit kalınlıkta, eşit oryantasyon açısına ve aynı özelliklerine sahip ise bu plakaların oluşturdukları tabakalara simetrik tabaka denir. Tabaka, geometrik ve malzeme özelliği bakımından simetriktir.

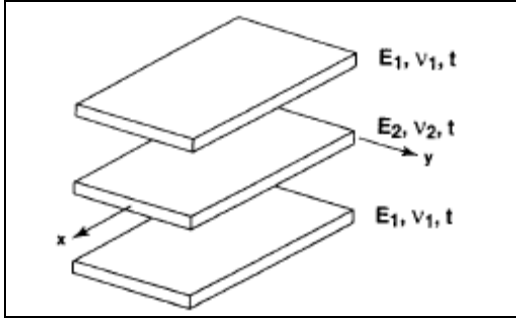
Düzlemsel yükleme ve düzlem dışı şekil değiştirme arasında ve eğme, burulma momentleri ile düzlemsel şekil değiştirme arasında ilişki yoktur. Eğilme ve uzama arasındaki çift eliminasyonun iki önemi vardır. Birincisi; tabaka analizlerinin daha kolay olması ikincisi ise simetrik tabakaların, pişirme prosesini takip eden soğuma işlemi sırasında meydana gelen termal kısalmalardan kaynaklanan burulma eğiliminin olmamasıdır. Sonuç olarak; özel durumlar dışında, genellikle simetrik tabakalar kullanılır. Simetrik tabakanın kuvvet ve moment denklemleri,

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{bmatrix} \quad (3.87)$$

$$\begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{bmatrix}$$

ile ifade edilir.

### 3.9.1. Çoklu izotropik yüzeye sahip simetrik tabakalar



Şekil 3.11. 3'lü izotropik yüzeye sahip simetrik tabakanın ayrılmış görüntüsü

Yüzeyler aynı malzemeye sahip olması gerekmeksizin izotropik olarak ve simetrik olarak k sıra numarası olmak üzere  $\bar{Q}_{ij}$ ; indirgenmiş rijitlik matrisinin elemanları;

$$\begin{aligned} (\bar{Q}_{11})_k &= (\bar{Q}_{22})_k = \frac{E_k}{1-\nu_k^2} \\ (\bar{Q}_{16})_k &= (\bar{Q}_{26})_k = 0 \\ (\bar{Q}_{11})_k &= \frac{\nu^2 E_k}{1-\nu_k^2} \\ (\bar{Q}_{16})_k &= \frac{E_k}{2(1-\nu_k)} \end{aligned} \quad (3.88)$$

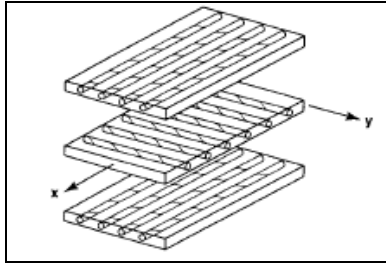
ifadeleri ile tanımlanır. Değişik kalınlıktaki tabakalar, referans düzlem etrafında geometrik ve malzeme özelliği bakımından simetrik olarak düzenlenmişse elde edilen tabakada eğilme ve uzama arasında çift oluşmaz. Kuvvet moment ilişkisi de aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & 0 \\ A_{12} & A_{22} & 0 \\ 0 & 0 & A_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{bmatrix} \quad (3.89)$$

$$\begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & 0 \\ D_{12} & D_{22} & 0 \\ 0 & 0 & D_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{bmatrix}$$

### 3.9.2. Çoklu özel ortotropik yüzeye sahip simetrik tabakalar

Çoklu özel ortotropik yüzeye sahip simetrik tabakalarda; plakların ana malzeme yönleri ile tabaka eksenleri üst üste gelir (örnek; 0/90/90/90/0). Simetriden dolayı düzlemde yükleme ve düzlem dışı şekil değiştirme arasında çift oluşmadığından uzama-eğme rijitliği sıfırdır. Tabakadaki k sıralı plakaya göre bağıntılardaki matris elemanları şu şekilde belirlenir.



Şekil 3.12. 3'lü özel ortotropik yüzeye sahip simetrik tabakalar

$$(\overline{Q}_{11})_k = \frac{E_1^k}{1 - \nu_{12}^k \nu_{21}^k} \quad (\overline{Q}_{12})_k = \frac{\nu_{12}^k E_1^k}{1 - \nu_{12}^k \nu_{21}^k}$$

$$(\bar{Q}_{12})_k = \frac{E_2^k}{1 - \nu_{12}^k \nu_{21}^k} \quad (\bar{Q}_{16})_k = 0 \quad (3.90)$$

$$(\bar{Q}_{26})_k = 0 \quad (\bar{Q}_{66})_k = G_{12}^k$$

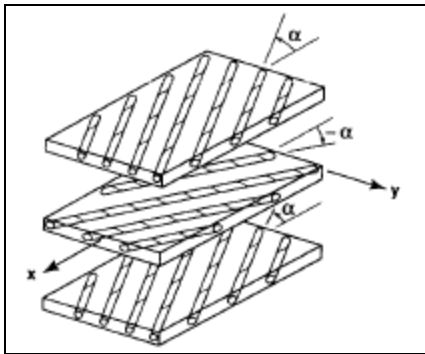
Buradan da kuvvet ve moment ilişkisi;

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & 0 \\ A_{12} & A_{22} & 0 \\ 0 & 0 & A_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{bmatrix} \quad (3.91)$$

$$\begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & 0 \\ D_{12} & D_{22} & 0 \\ 0 & 0 & D_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{bmatrix}$$

şeklinde bulunur.

### 3.9.2. Açı katlı simetrik genel ortotropik tabakalar



Şekil 3.13. 3'lü açı katlı simetrik genel ortotropik tabaka

$+\alpha$  ve  $-\alpha$  açılarıyla oryantasyonu sağlanır. But tür yapılı malzemelerde kesme dayanımı diğerlerine göre daha fazla olur. Onun dışında eşitlikler Çoklu özel ortotropik yüzeye sahip simetrik tabakalarda ki ile aynıdır.

### 3.10. Simetrik Olmayan Tabakalar

#### 3.10.1. Antisimetrik tabakalar

Merkeze göre simetriklik bulunmaz (Örnek;  $+\alpha / -\alpha / +\alpha / -\alpha$ ), bu tür tabakalarda kuvvet ve moment eşitlikleri;

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & 0 \\ A_{12} & A_{22} & 0 \\ 0 & 0 & A_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{bmatrix} \quad (3.92)$$

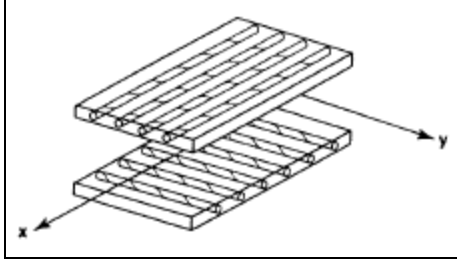
$$\begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & 0 \\ D_{12} & D_{22} & 0 \\ 0 & 0 & D_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{bmatrix}$$

şeklinde ifade edilir. Bu eşitlikler ana matris de yerine yazılırsa kuvvet-moment şekil değiştirme ifadesi

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \\ M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & 0 & B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ A_{12} & A_{22} & 0 & B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ 0 & 0 & A_{66} & B_{16} & B_{26} & B_{66} \\ B_{11} & B_{12} & B_{16} & D_{11} & D_{12} & 0 \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} & D_{12} & D_{22} & 0 \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} & 0 & 0 & D_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \varepsilon_{xy}^0 \\ K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{bmatrix} \quad (3.93)$$

şeklinde elde edilir [19,21,22].

### 3.10.2. Antisimetrik çapraz tabakalar



Şekil 3.14. 2'li antisimetrik çapraz tabaka

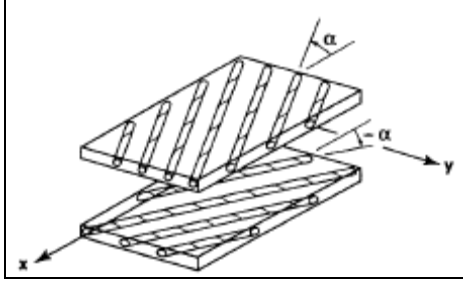
Antisimetrik çapraz kat tabakada ; ana malzeme yönlerine  $0^0$  ve  $90^0$  açı yapan plakalardan oluşur. Aynı malzeme özelliklerinde ve eşit kalınlıktaki plakalardan  $0^0$  açı yapan plaka orta yüzeye  $z$  uzaklıkta,  $90^0$  açı yapan plaka ise orta yüzeye  $-z$  uzaklıkta bulunmaktadır. Bu tanımlamada bulunan tabakalar çift sayılı plakaya sahiptirler. Antisimetrik çapraz kat tabakalar için kuvvet ve moment şekil değiştirme ifadesi;

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & 0 \\ A_{12} & A_{22} & 0 \\ 0 & 0 & A_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{11} & 0 & 0 \\ 0 & -B_{11} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{bmatrix} \quad (3.94)$$

$$\begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{11} & 0 & 0 \\ 0 & -B_{11} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & 0 \\ D_{12} & D_{22} & 0 \\ 0 & 0 & D_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{bmatrix}$$

şeklinde ifade edilir [19,21,22].

### 3.10.3. Antisimetrik açılı katlı tabakalar



Şekil 3.15. 2'li antisimetrik açılı katlı tabaka

Bir antisimetrik açılı katlı tabakada, orta yüzeyin bir tarafında koordinat eksenine  $+\alpha$  açılı ile yerleştirilmiş diğer tarafında ise eşit kalınlıkta  $-\alpha$  açılı ile yerleştirilmiş aynı özelliklere sahip plakalardan oluşur. Antisimetrik açılı katlı tabakalarda kuvvet ve moment şekil değiştirme ifadeleri;

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & 0 \\ A_{12} & A_{22} & 0 \\ 0 & 0 & A_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & B_{16} \\ 0 & 0 & B_{26} \\ B_{16} & B_{26} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{bmatrix} \quad (3.95)$$

$$\begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & B_{16} \\ 0 & 0 & B_{26} \\ B_{16} & B_{26} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & 0 \\ D_{12} & D_{22} & 0 \\ 0 & 0 & D_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{bmatrix}$$

şeklinde ifade edilirler.

## 4. TABAKALI PLAKALARDA ELASTİK TERMAL GERİLME ANALİZİ

### 4.1. Termal Şekil Değiştirme

Eğer  $\Delta T$  sıcaklık değişimi tabakalı plakalarda meydana gelirse şekil değişimi;

$$\begin{aligned}\varepsilon_x &= \varepsilon_x^M + \varepsilon_x^T = \varepsilon_x^0 + zK_x \\ \varepsilon_y &= \varepsilon_y^M + \varepsilon_y^T = \varepsilon_y^0 + zK_y \\ \gamma_{xy} &= \gamma_{xy}^M + \gamma_{xy}^T = \gamma_{xy}^0 + zK_{xy}\end{aligned}\tag{4.1}$$

eşitlikleriyle gösterilir. Burada  $\varepsilon^M$  ve  $\varepsilon^T$  sırasıyla mekanik ve termal şekil değişimini göstermektedir.

Buradan kuvvet ve momentleri termal etkiler ile birlikte yazarsak;

$$\begin{bmatrix} N_x^T \\ N_y^T \\ N_{xy}^T \end{bmatrix} = [A] \begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{bmatrix} + [B] \begin{bmatrix} K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{bmatrix} - [T^*] \Delta T\tag{4.2}$$

ve

$$\begin{bmatrix} M_x^T \\ M_y^T \\ M_{xy}^T \end{bmatrix} = [B] \begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{bmatrix} + [D] \begin{bmatrix} K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{bmatrix} - [T^{**}] \Delta T\tag{4.3}$$

şeklinde ifade edilirler, burada T sıcaklık  $\Delta T$  sıcaklık değişimini göstermektedir,

$$[T^*] = \begin{bmatrix} \sum_{k=1}^N [(\bar{Q}_{11})_k (\alpha_x)_k + (\bar{Q}_{12})_k (\alpha_y)_k + (\bar{Q}_{16})_k (\alpha_{xy})_k] (z_k - z_{k-1}) \\ \sum_{k=1}^N [(\bar{Q}_{12})_k (\alpha_x)_k + (\bar{Q}_{22})_k (\alpha_y)_k + (\bar{Q}_{26})_k (\alpha_{xy})_k] (z_k - z_{k-1}) \\ \sum_{k=1}^N [(\bar{Q}_{16})_k (\alpha_x)_k + (\bar{Q}_{26})_k (\alpha_y)_k + (\bar{Q}_{66})_k (\alpha_{xy})_k] (z_k - z_{k-1}) \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

$$[T^{**}] = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \sum_{k=1}^N [(\bar{Q}_{11})_k (\alpha_x)_k + (\bar{Q}_{12})_k (\alpha_y)_k + (\bar{Q}_{16})_k (\alpha_{xy})_k] (z_k^2 - z_{k-1}^2) \\ \sum_{k=1}^N [(\bar{Q}_{12})_k (\alpha_x)_k + (\bar{Q}_{22})_k (\alpha_y)_k + (\bar{Q}_{26})_k (\alpha_{xy})_k] (z_k^2 - z_{k-1}^2) \\ \sum_{k=1}^N [(\bar{Q}_{16})_k (\alpha_x)_k + (\bar{Q}_{26})_k (\alpha_y)_k + (\bar{Q}_{66})_k (\alpha_{xy})_k] (z_k^2 - z_{k-1}^2) \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

şekilde ifade edilir. Burada  $\alpha$  ısı genleşme katsayısıdır. Dengeli simetrik tabakalarda  $[T^{**}]$  matrisi 0 olur.

1 yönündeki Isıl genleşme katsayısı  $\alpha$  ;

$$\alpha_1 = \frac{E_f \alpha_f V_f + E_m \alpha_m V_m}{E_f V_f + E_m V_m} = \frac{(E\alpha)_1}{E_1} \quad (4.6)$$

burada;

$E_f, E_m$  : Fiber ve matris elastisite modülü

$\alpha_f, \alpha_m$  : Fiber ve matris ısı genleşme katsayıları

$V_f, V_m$  : Fiber ve matris hacim oranları

$E_1$  : Boyuna kompozit elastisite modülünü temsil etmektedir.

Enine ısı genleşme katsayısı enerji kanununa göre şu şekilde hesaplanır;

$$\alpha_2 = \alpha_f V_f (1 + \nu_f) + \alpha_m V_m (1 + \nu_m) - \nu_{12} \alpha_1 \quad (4.7)$$

burada ,

$\nu_f, \nu_m$  : Fiber ve matrisin poisson oranları

$\nu_{12} = \nu_f V_f + \nu_m V_m$  : Kompozit tabakasının büyük poisson oranı

$\alpha_1$  : Tabakanın boyuna ısı genleşme katsayısıdır.

x ve y ye göre ısı genleşme katsayıları değişim bağıntılarıyla hesaplanır.

$$\begin{aligned} \alpha_x &= \alpha_1 \cos^2 \theta + \alpha_2 \sin^2 \theta \\ \alpha_y &= \alpha_1 \sin^2 \theta + \alpha_2 \cos^2 \theta \\ \alpha_{xy} &= 2 \cos \theta \sin \theta (\alpha_1 - \alpha_2) \end{aligned} \quad (4.8)$$

#### 4.2. Termal Gerilme Şekil Değiştirme Bağıntıları

Düzlem gerilmede ortotropik tabakalar için termal Gerilme-Şekil değiştirme bağıntıları;

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 - \alpha_1 \Delta T \\ \varepsilon_2 - \alpha_2 \Delta T \\ \gamma_{12} - \alpha_{12} \Delta T \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

şeklinde ifade edilir. Buradan da x,y koordinatlarında k sırasındaki tabakadaki termal gerilme-şekil değiştirme bağıntısı;

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix}_k = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix}_k \begin{bmatrix} \varepsilon_x - \alpha_1 \Delta T \\ \varepsilon_y - \alpha_2 \Delta T \\ \gamma_{xy} - \alpha_{12} \Delta T \end{bmatrix}_k \quad (4.10)$$

şeklinde ifade edilir [19,21,22].

### 4.3 Termal Kuvvet, Moment Şekil Değiştirme Bağlılıları

Termal kuvvet ve moment, şekil değiştirme bağıntıları Eş. 4.9 dan yola çıkılarak;

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} N_x^T \\ N_y^T \\ N_{xy}^T \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

şeklinde hesaplanır. Buradaki termal kuvvetler,

$$\begin{bmatrix} N_x^T \\ N_y^T \\ N_{xy}^T \end{bmatrix} = \int \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix}_k \begin{bmatrix} \alpha_x \\ \alpha_y \\ \alpha_{xy} \end{bmatrix}_k \Delta T dz \quad (4.13)$$

bağıntısıyla hesaplanır. Momentler ise;

$$\begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} M_x^T \\ M_y^T \\ M_{xy}^T \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

şeklinde hesaplanır, buradaki ısı gerilmelerden oluşan momentler ise,

$$\begin{bmatrix} M_x^T \\ M_y^T \\ M_{xy}^T \end{bmatrix} = \int \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix}_k \begin{bmatrix} \alpha_x \\ \alpha_y \\ \alpha_{xy} \end{bmatrix}_k \Delta T_z dz \quad (4.15)$$

şeklinde hesaplanır.

## 5. TABAKALARDAKİ HASAR TEORİLERİ VE ELASTOPLASTİK GERİLMELER

### 5.1. Tabakalardaki Hasar Teorileri

Tabakaların hasar gerilmeleri için birçok akma teorisi ortaya konmuştur. Bu teorilerin hemen hepsi tabakaların homojen ve gerilme-şekil değiştirmenin lineer olduğu varsayımı üzerine kurulmuştur. Bütün teoriler ana malzeme yönündeki mukavemet parametreleri ile açıklanabilir. Aşağıda yaygın olarak kullanılan altı teori açıklanmıştır.

- I. Maksimum Gerilme Teorisi
- II. Maksimum Şekil Değiştirme Teorisi
- III. Tsai-Hill Hasar Teorisi
- IV. Hoffman Hasar Teorisi
- V. Tsai-Wu Hasar Teorisi
- VI. Hashin Hasar Teorisi

Tabaka şeklindeki kompozit malzemelerin mukavemet özellikleri Şekil 3.3 de gösterildiği gibi 1-2-3 eksenleri doğrultusunda verilir. Bir başka deyişle, tabaka şeklindeki kompozit malzemelerin takviye elemanı doğrultusundaki mukavemeti ve takviye elemanına dik doğrultudaki mukavemeti çekme/basma testleri ile belirlenir. Kompozit malzemedeki 1-2-3 ekseninde maksimum kopma ve şekil değiştirme şu şekilde isimlendirilmektedir:

- $X^c$ : 1 yönündeki maksimum basma dayanımı
- $X^t$ : 1 yönündeki maksimum çekme dayanımı
- $Y^c$ : 2 yönündeki maksimum basma dayanımı
- $Y^t$ : 2 yönündeki maksimum çekme dayanımı
- $Z^c$ : 3 yönündeki maksimum basma dayanımı
- $Z^t$ : 3 yönündeki maksimum çekme dayanımı
- $S_{12}$ : 1-2 düzlemindeki maksimum kayma dayanımı

$S_{23}$  : 2-3 düzlemindeki maksimum kayma dayanımı

$S_{13}$  : 1-3 düzlemindeki maksimum kayma dayanımı

$\varepsilon_1^c$  : 1 yönündeki maksimum basma birim uzaması

$\varepsilon_1^T$  : 1 yönündeki maksimum çekme birim uzaması

$\varepsilon_2^c$  : 2 yönündeki maksimum basma birim uzaması

$\varepsilon_2^T$  : 2 yönündeki maksimum çekme birim uzaması

$\varepsilon_3^c$  : 3 yönündeki maksimum basma birim uzaması

$\varepsilon_3^T$  : 3 yönündeki maksimum çekme birim uzaması

$\gamma_{12}^F$  : 1-2 düzlemindeki maksimum kayma açısı

$\gamma_{23}^F$  : 2-3 düzlemindeki maksimum kayma açısı

$\gamma_{13}^F$  : 1-3 düzlemindeki maksimum kayma açısı

## 5.2. Maksimum Gerilme Teorisi

Kompozit tabakada 1-2-3 eksenlerinde normal ve kayma gerilmeleri, aşağıda verilen durumları sağladığı takdirde kompozit malzemede hasar meydana gelmez.

$$-X^C < \sigma_1 < X^T$$

$$-Y^C < \sigma_2 < Y^T$$

$$-Z^C < \sigma_3 < Z^T$$

(5.1)

$$-S_{12} < \tau_{12} < S_{12}$$

$$-S_{23} < \tau_{23} < S_{23}$$

$$-S_{13} < \tau_{13} < S_{13}$$

### 5.3. Maksimum Şekil Değiştirme Teorisi

Kompozit tabakada 1-2-3 eksenlerinde normal ve kayma sekil değiştirmeleri, aşağıda verilen durumları sağladığı takdirde kompozit malzemede hasar oluşmaz.

$$\begin{aligned}
 -\varepsilon_1^c < \varepsilon_1 < \varepsilon_1^T \\
 -\varepsilon_2^c < \varepsilon_2 < \varepsilon_2^T \\
 -\varepsilon_3^c < \varepsilon_3 < \varepsilon_3^T \\
 -\gamma_{12}^F < \gamma_{12} < \gamma_{12}^F \\
 -\gamma_{23}^F < \gamma_{23} < \gamma_{23}^F \\
 -\gamma_{13}^F < \gamma_{13} < \gamma_{13}^F
 \end{aligned} \tag{5.2}$$

### 5.4. Tsai-Hill Hasar Teorisi

Tsai-Hill Hasar teorisi, izotropik malzemeler için geliştirilmiş Von-Mises teorisinin anizotropik malzemelere uyarlanmış seklidir. Bu teoriye göre kompozit tabakadaki gerilme dağılımı aşağıdaki eşitlikleri sağlıyorsa malzemede hasar meydana gelmez.

$$\left[ (G_2 + G_3)\sigma_1^2 + (G_1 + G_3)\sigma_2^2 + (G_1 + G_2)\sigma_3^2 - 2G_3\sigma_1\sigma_2 - 2G_2\sigma_1\sigma_3 - 2G_1\sigma_2\sigma_3 + 2G_4\tau_{23}^2 \right. \\
 \left. + 2G_5\tau_{13}^2 + 2G_6\tau_{12}^2 \right] < 1 \tag{5.3}$$

$$G_1 = \frac{1}{2} \left( \frac{2}{[\sigma_2^T]^2} - \frac{1}{[\sigma_1^T]^2} \right)$$

$$G_2 = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{[\sigma_1^T]^2} \right) \quad (5.4)$$

$$G_3 = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{[\sigma_2^T]^2} \right)$$

$$G_6 = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{[\tau_{12}^T]^2} \right)$$

### 5.5. Hoffman hasar kriteri

Bu teoriye göre kompozit tabakadaki gerilme dağılımı aşağıdaki durumu sağlıyorsa malzemede hasar meydana gelmez.

$$\frac{[C_1(\sigma_1 - \sigma_3)^2 + C_2(\sigma_3 - \sigma_1)^2 + C_3(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + C_4\sigma_1 + C_5\sigma_2 + C_6\sigma_3 + C_7\tau_{23}^2 + C_8\tau_{13}^2 + C_9\tau_{12}^2]}{F} < 1 \quad (5.5)$$

$$C_1 = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{Z^T Z^C} + \frac{1}{Y^T Y^C} - \frac{1}{X^T X^C} \right)$$

$$C_2 = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{X^T X^C} + \frac{1}{Z^T Z^C} - \frac{1}{Y^T Y^C} \right)$$

$$C_3 = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{X^T X^C} + \frac{1}{Y^T Y^C} - \frac{1}{Z^T Z^C} \right)$$

$$C_4 = \frac{1}{X^T} - \frac{1}{X^C} \quad C_5 = \frac{1}{Y^T} - \frac{1}{Y^C} \quad C_6 = \frac{1}{Z^T} - \frac{1}{Z^C}$$

$$C_7 = \frac{1}{S_{23}^2} \quad C_8 = \frac{1}{S_{13}^2} \quad C_9 = \frac{1}{S_{12}^2} \quad (5.6)$$

### 5.6. Tsai-Wu Hasar Teorisi

Tsai-Wu hasar teorisi kompozit malzemelerin gerilme analizlerinde en çok kullanılan teorilerden biridir. Bu teoriye göre aşağıdaki eşitlik sağlandığında yapıda hasar meydana gelmez.

$$F_i \sigma_i + F_{ij} \sigma_i \sigma_j < 1 \quad i, j = 1, 2, 3, \dots, 6$$

$$\left[ \left( \frac{1}{X^T} - \frac{1}{X^C} \right) \sigma_1 + \left( \frac{1}{Y^T} - \frac{1}{Y^C} \right) \sigma_2 + \left( \frac{1}{Z^T} - \frac{1}{Z^C} \right) \sigma_3 + \frac{\sigma_1^2}{X^T X^C} + \frac{\sigma_2^2}{Y^T Y^C} + \frac{\sigma_3^2}{Z^T Z^C} + \frac{\tau_{12}^2}{S_{12}^2} + \frac{\tau_{23}^2}{S_{23}^2} + \frac{\tau_{13}^2}{S_{13}^2} + 2F_{12} \sigma_1 \sigma_2 + 2F_{23} \sigma_2 \sigma_3 + 2F_{13} \sigma_1 \sigma_3 \right] < 1 \quad (5.7)$$

$$F_{12}^2 = \frac{1}{X^T X^C} \frac{1}{Y^T Y^C}$$

$$F_{23}^2 = \frac{1}{Y^T Y^C} \frac{1}{Z^T Z^C} \quad (5.8)$$

$$F_{13}^2 = \frac{1}{X^T X^C} \frac{1}{Z^T Z^C}$$

### 5.7. Hashin Hasar Teorisi

Hashin hasar teorisi hasarın şeklini ayırt edebilmektedir. Bu teoriye göre matris yapıda veya elyafta bir hasarın olup olmadığı tespit edilebilmektedir.

Matris çekme hasarı aşağıdaki durum sağlandığı takdirde meydana gelir.

$$\sigma_2 > 0 \text{ için;}$$

$$\left( \frac{\sigma_2}{Y^T} \right)^2 + \left( \frac{\tau_{12}}{S_{12}} \right)^2 + \left( \frac{\tau_{23}}{S_{23}} \right)^2 > 1 \quad (5.9)$$

Matris basma hasarı aşağıdaki durum sağlandığı takdirde meydana gelir.

$\sigma_2 < 0$  için;

$$\left(\frac{\sigma_2}{Y^c}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S_{12}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{23}}{S_{23}}\right)^2 > 1 \quad (5.10)$$

Elyaf-matris arasındaki kayma hasarı aşağıdaki durum sağlandığı takdirde meydana gelir.

$\sigma_1 < 0$  için;

$$\left(\frac{\sigma_1}{X^c}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S_{12}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{13}}{S_{13}}\right)^2 > 1 \quad (5.11)$$

Elyaf çekme hasarı aşağıdaki durum sağlandığı takdirde meydana gelir.

$\sigma_1 > 0$  için;

$$\left(\frac{\sigma_1}{X^T}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S_{12}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{13}}{S_{13}}\right)^2 > 1 \quad (5.12)$$

Elyaf çekme hasarı aşağıdaki durum sağlandığı takdirde meydana gelir.  $\sigma_1 < 0$  için;

$$\left(\frac{\sigma_1}{X^c}\right) > 1 \quad (5.13)$$

### 5.8. Elasto-Plastik Gerilmeler

Malzemedeki gerilme elastik bölgede ise gerilmeler kaldırıldığında malzeme eski şekline geri döner, bu olay gerilme-şekil değiştirme diyagramında doğrusal bir denklemle ifade edilebilir. Fakat kompozit malzemelerde durum farklıdır, kompozit malzemelerde gerilme-şekil değiştirme doğrusal değildir ve heterojen yapıdan dolayı farklılık gösterir. Tabakalı kompozit malzemelerde genelde akma olayı gerçekleşmez ve malzeme belli değerden sonra kopar . Bu tür malzemelerde daha ayrıntılı gerilme-şekil değiştirme analizi yapmak için elasto-plastik gerilme analizi kullanılır. Elasto plastik gerilme analizi iki adımda incelenir. Birincisi elastik gerilme analizi, ikincisi ise plastik deformasyonun hesaba katılması ile her yük artışında gerilme-zorlanma ilişkilerinin belirlenmesidir.

Plastik bölgede gerilme-zorlanma ilişkisi Ludwik tarafından verilen denklem ile ifade edilmiştir.

$$\sigma = \sigma_p + K\varepsilon_p^n \quad (5.14)$$

Eş. 5.14, toplam şekil değiştirmeye uyarlandığında;

$$\varepsilon = \varepsilon_p + \varepsilon_n^p = \frac{\sigma}{E} + \varepsilon_p \quad (5.15)$$

şeklinde ifade edilir. Eş. 5.14 ve Eş 5.15 denklemleri kullanılarak aşağıdaki gerilme ve toplam şekil değiştirme arasındaki bağıntı bulunur.

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + \left( \frac{\sigma}{K} \right)^{\frac{-1}{n}} \quad (5.16)$$

Burada K; şekil değişimi sertleşmesi parametresi, n ise şekil değişimi sertleşmesi üssünü belirlemektedir. K ve n tek eksenli çekme deneyi sonucunda elde edilen gerilme-şekil değiştirme eğrisinden alınan değerler yardımıyla hesaplanır.

İki boyutlu düzlemsel gerilme halinde Tsai-Hill kuralına göre ortotropik malzeme için elde edilen akma gerilmesi  $\sigma_{eq}^2$  eşdeğer gerilme olarak kullanılır.

$$\sigma_{eq}^2 = \bar{\sigma}^2 = \sigma_1^2 - \sigma_1\sigma_2 + \left(\sigma_2 \frac{X}{Y}\right)^2 + \left(\tau_{12} \frac{X}{S}\right)^2 \quad (5.17)$$

Başlangıç gerilme metoduna göre elasto-plastik gerilme analizinde,  $\sigma_y$  gerilme fonksiyonu

$$\sigma_y = \sigma_0 + K\varepsilon_p^n \quad (5.18)$$

şeklinde yazılır [19,21,22,25].

## 6. TABAKALI MALZEMELERDE TERMAL ELASTO-PLASTİK GERİLME ANALİZİ

### 6.1. Plastik Gerilme analizi

Elasto-plastik çözümlemede malzeme üzerinde oluşan küçük plastik deformasyonların artış miktarından yararlanılır. Tsai-Hill akma kriteri kompozit tabakaların elasto-plastik gerilme şekil değiştirme analizinde kullanılmıştır. Şekil 3.3' te görüldüğü üzere 1 doğrultusu fibere paralel 2 doğrultusu da tabaka düzlemine paraleldir ve 3 doğrultusu tabakaya dik doğrultudur. Burada X ve Y sırasıyla 1 ve 2 doğrultularındaki akma noktalarını ve S' de 1-2 düzlemindeki maksimum kayma gerilmesini belirtmektedir. Tsai-Hill' e göre ortotropik malzemelerde düzlem gerilme hali için, ilk başlıca malzeme yönündeki eşdeğer gerilme;

$$\sigma_{eq}^2 = \bar{\sigma}^2 = \sigma_1^2 - \sigma_1\sigma_2 + \left(\sigma_2 \frac{X}{Y}\right)^2 + \left(\tau_{12} \frac{X}{S}\right)^2 \quad (6.1)$$

şeklinde yazılır. Bu eşdeğer gerilme X' e ulaştığında, plastik deformasyon başlar. Gerilme artışları potansiyel enerji fonksiyonundan aşağıdaki şekilde elde edilir.

$$\begin{Bmatrix} d\varepsilon_1^p \\ d\varepsilon_2^p \\ d\varepsilon_3^p \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial f}{\partial \sigma_1} d\lambda \\ \frac{\partial f}{\partial \sigma_2} d\lambda \\ \frac{\partial f}{\partial \sigma_3} d\lambda \end{Bmatrix} \quad (6.2)$$

Burada  $f = \bar{\sigma} - \sigma_Y(\varepsilon_p)$  ve  $d\lambda$  eşdeğer plastik şekil değiştirme artışını temsil etmektedir. Ludwik eşitliğinden gerilme-şekil değiştirme bağıntısı,

$$\sigma_Y = \sigma_0 + K\varepsilon_p^n \quad (6.3)$$

Burada  $\sigma_0$  X e eşit, K plastisite sabiti ve n de şekil değiştirme sertleşmesi parametresini temsil eder.

Başlıca malzeme eksenlerine göre toplam şekil değiştirme artışları  $\varepsilon_p = d\lambda$  kabul edilirse aşağıdaki şekilde yazılır,

$$d\varepsilon_1 = a_{11}d\sigma_1 + a_{12}d\sigma_2 + \frac{2\sigma_1 - \sigma_2}{2\bar{\sigma}}d\varepsilon_p + \alpha_1dT$$

$$d\varepsilon_2 = a_{12}d\sigma_1 + a_{22}d\sigma_2 + \frac{-\sigma_1 + 2\sigma_2 \left( X^2/Y^2 \right)}{2\bar{\sigma}}d\varepsilon_p + \alpha_2dT \quad (6.4)$$

$$d\varepsilon_{12} = \frac{a_{16}}{2}d\tau_{12} + 2\tau_{12} \frac{X^2/S^2}{2\bar{\sigma}}d\varepsilon_p$$

burada,  $a_{11} = \frac{1}{E_1}$  ,  $a_{12} = -\frac{\nu_{12}}{E_{11}}$  ,  $a_{22} = \frac{1}{E_{22}}$  ve  $a_{66} = \frac{1}{G_{12}}$  değerlerine eşittir.

Yukarıdaki eşitlikler değişim matrisiyle x-y koordinatlarına dönüştürülürse;

$$\begin{bmatrix} d\varepsilon_x \\ d\varepsilon_y \\ d\varepsilon_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m^2 & n^2 & -2mn \\ n^2 & m^2 & 2mn \\ mn & -mn & (m^2 - n^2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d\varepsilon_1 \\ d\varepsilon_2 \\ d\varepsilon_{12} \end{bmatrix} \quad (6.4)$$

şeklinde ifade edilir, burada  $m = \cos \theta$  ve  $n = \sin \theta$  ,  $d\varepsilon_{xy} = \frac{1}{2}d\gamma_{xy}$  ve  $d\varepsilon_{12} = \frac{1}{2}d\gamma_{12}$ .

Mükemmel sınırlanmış sınır şartları için  $\varepsilon_x$  ,  $\varepsilon_y$  ,  $\varepsilon_{xy}$  plakanın bütün kenarlarında sıfır kabul edilir. Bunun sonucunda,  $d\varepsilon_x$  ,  $d\varepsilon_y$  ,  $d\varepsilon_{xy}$  sıfıra eşit olur buradan da;

$$\begin{aligned}
d\varepsilon_x &= (a_{11}m^2 + a_{12}n^2)d\sigma_1 + (a_{11}m^2 + a_{22}n^2)d\sigma_2 - a_{66}mnd\tau_{12} \\
&+ \left( \frac{2\sigma_1 - \sigma_2}{2\bar{\sigma}}m^2 + \frac{-\sigma_1 + 2\sigma_2 \left( \frac{X^2}{Y^2} \right)}{2\bar{\sigma}}n^2 - \frac{4\tau_{12} \left( \frac{X^2}{Y^2} \right)}{2\bar{\sigma}}mn \right) d\varepsilon_p \\
&+ (\alpha_1 m^2 + \alpha_2 n^2) dT = 0 \\
\\
d\varepsilon_y &= (a_{11}n^2 + a_{12}m^2)d\sigma_1 + (a_{11}n^2 + a_{22}m^2)d\sigma_2 + a_{66}mnd\tau_{12} \\
&+ \left( \frac{2\sigma_1 - \sigma_2}{2\bar{\sigma}}n^2 + \frac{-\sigma_1 + 2\sigma_2 \left( \frac{X^2}{Y^2} \right)}{2\bar{\sigma}}m^2 - \frac{4\tau_{12} \left( \frac{X^2}{S^2} \right)}{2\bar{\sigma}}mn \right) d\varepsilon_p \\
&+ (\alpha_1 n^2 + \alpha_2 m^2) dT = 0
\end{aligned} \tag{6.5}$$

$$\begin{aligned}
d\varepsilon_{xy} &= (a_{11} - a_{12})mn\sigma_1 + (a_{12} - a_{22})mn\sigma_2 + \frac{a_{66}}{2}(m^2 - n^2)d\tau_{12} \\
&+ \left( \frac{2\sigma_1 - \sigma_2}{2\bar{\sigma}}mn - \frac{-\sigma_1 + 2\sigma_2 \left( \frac{X^2}{Y^2} \right)}{2\bar{\sigma}}mn + \frac{4\tau_{12} \left( \frac{X^2}{S^2} \right)}{2\bar{\sigma}}(m^2 - n^2) \right) d\varepsilon_p \\
&+ (\alpha_1 - \alpha_2)mndT = 0
\end{aligned}$$

Akma kriteri diferansiyel formda geliştirilirse;

$$(2\sigma_1 - \sigma_2)d\sigma_1 + \left( -\sigma_1 + 2\sigma_2 \frac{X^2}{Y^2} \right) d\sigma_2 + 2\tau_{12} \frac{X^2}{S^2} d\tau_{12} - 2K\bar{\sigma}n\varepsilon_p^{n-1} d\varepsilon_p = 0 \tag{6.6}$$

şeklinde ifade edilir. Bu denklemlerin çözümleri, belirsiz olabilir. Bu nedenle çözüm nümerik metot kullanılarak devam ettirilir. Denklemler diferansiyel ve sembolik formda gösterildiklerinde;

$$\begin{aligned}
\Delta\varepsilon_x &= a_1\Delta\sigma_1 + b_1\Delta\sigma_2 + c_1\Delta\tau_{12} + d_1\Delta\varepsilon_p + e_1\Delta T = 0 \\
\Delta\varepsilon_y &= a_2\Delta\sigma_1 + b_2\Delta\sigma_2 + c_2\Delta\tau_{12} + d_2\Delta\varepsilon_p + e_2\Delta T = 0 \\
\Delta\varepsilon_{xy} &= a_3\Delta\sigma_1 + b_3\Delta\sigma_2 + c_3\Delta\tau_{12} + d_3\Delta\varepsilon_p + e_3\Delta T = 0
\end{aligned} \tag{6.7}$$

$$a_4 \Delta \sigma_1 + b_4 \Delta \sigma_2 + c_4 \Delta \tau_{12} + d_4 \Delta \varepsilon_p = 0$$

şeklinde yazılır. Bunlar matris formuna dönüştürülürse;

$$\begin{bmatrix} a_1 & b_1 & c_1 & d_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 & d_2 \\ a_3 & b_3 & c_3 & d_3 \\ a_4 & b_4 & c_4 & d_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \sigma_1 \\ \Delta \sigma_2 \\ \Delta \tau_{12} \\ \Delta \varepsilon_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -e_1 \\ -e_2 \\ -e_3 \\ 0 \end{bmatrix} \Delta T \quad (6.8)$$

elde edilir. Sembolik olarak  $[A][\Delta \sigma] = [C]$  şeklinde gösterilebilir.  $\Delta \sigma_1$ ,  $\Delta \sigma_2$ ,  $\Delta \tau_{12}$ , ve  $\Delta \varepsilon_p$  matrisin tersi  $[\Delta \sigma] = [A]^{-1}[C]$  alınarak hesaplanabilir.

Şekil değiştirme bileşenleri ve eşdeğer plastik şekil değişimi, adımlarla arttırılan yükler ile bulunur.

$$\begin{aligned} \sigma_1^{(i)} &= \sigma_1^{(i-1)} + \Delta \sigma_1^{(i)} \\ \sigma_2^{(i)} &= \sigma_2^{(i-1)} + \Delta \sigma_2^{(i)} \\ \tau_{12}^{(i)} &= \tau_{12}^{(i-1)} + \Delta \tau_{12}^{(i)} \\ \varepsilon_p^{(i)} &= \varepsilon_p^{(i-1)} + \Delta \varepsilon_p^{(i)} \end{aligned} \quad (6.9)$$

Burada i adım sayısını ifade etmektedir.

## 6.2. Artık Gerilmeler

Artık gerilmeleri bulmak için +T sıcaklığına göre elde edilen gerilme verilerinin, -T'deki tamamen elastik gerilme verileri ile birleştirilmesi ile bulunur. Tamamen elastik çözümü bulmak için, plastik çözümde elde edilen yük ters yönde uygulanır. Artık gerilmeler sıfır dış yüklerle göre statik dengede durmak zorundadır. Birim uzunluk için plastik çözümdeki bileşke momentler;

$$\begin{bmatrix} M_x^P \\ M_y^P \\ M_{xy}^P \end{bmatrix} = \int \begin{bmatrix} \sigma_x^P \\ \sigma_y^P \\ \sigma_{xy}^P \end{bmatrix}_k z dz \quad (6.10)$$

Plastik akmanın başladığı noktadaki bileşke momentler;

$$\begin{bmatrix} M_x^e \\ M_y^e \\ M_{xy}^e \end{bmatrix} = \int \begin{bmatrix} \sigma_x^e \\ \sigma_y^e \\ \sigma_{xy}^e \end{bmatrix}_k z dz \quad (6.11)$$

şeklinde yazılır. Buradaki yöntem malzemedeki yüklerde de aynı şekilde uygulanır.

Sıcaklık üstteki ve aşağılardaki yüzeylerde sıfıra ulaştığında, elastik gerilme bileşenleri şu şekilde hesaplanır;

$$\begin{aligned} \sigma_x &= \frac{(\sigma_x)^e M_x^P}{M_x^P} \\ \sigma_y &= \frac{(\sigma_y)^e M_y^P}{M_y^P} \\ \tau_{xy} &= \frac{(\sigma_{xy})^e M_{xy}^P}{M_{xy}^P} \end{aligned} \quad (6.12)$$

burada;

$$\begin{bmatrix} (\sigma_x)^e \\ (\sigma_y)^e \\ (\tau_{xy})^e \end{bmatrix}_k = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & Q_{16} \\ Q_{12} & Q_{22} & Q_{26} \\ Q_{16} & Q_{26} & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{bmatrix} z \quad (6.13)$$

Plastik gerilmelerin ve elastik gerilmelerin arasındaki fark artık gerilmeleri verir.

$$\sigma_x^r = \sigma_x^p - \sigma_x^e$$

$$\sigma_y^r = \sigma_y^p - \sigma_y^e \quad (6.14)$$

$$\sigma_{xy}^r = \sigma_{xy}^p - \sigma_{xy}^e$$

Burada gerilmeler tabakalı plakalarda statik dengeyi sağlamaktadır.

## 7. ÇEKME DENEYİ

### 7.1. İncelenen Malzemenin Tanıtımı

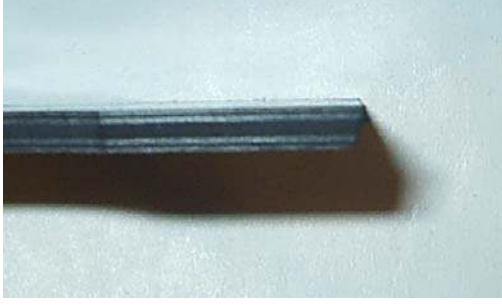
Çalışmada teyp tipi Hexply carbon fiber takviyeli epoksi AS4-8552 kompozit malzeme incelenmiştir. Deney numuneleri su jetiyle hazırlanmıştır, bunun sonucunda numuneler üzerinde ve delik etrafında küçük kabarmalar oluşmuştur bu da malzemenin mukavemetine azaltıcı etki etmiştir. Kompozit malzeme TUSAŞ Havacılık AŞ den temin edilmiş ve malzeme ile ilgili bilgiler HEXCEL firmasının kataloglarından temin edilmiştir. Malzeme sınırlı miktarda olduğu için 10 adet numune oluşturulabilmiştir. Deney numuneleri ve boyutları ile malzeme özellikleri aşağıdaki tabloda verilmiştir.

Çizelge 7.1. Malzeme Özellikleri [31]

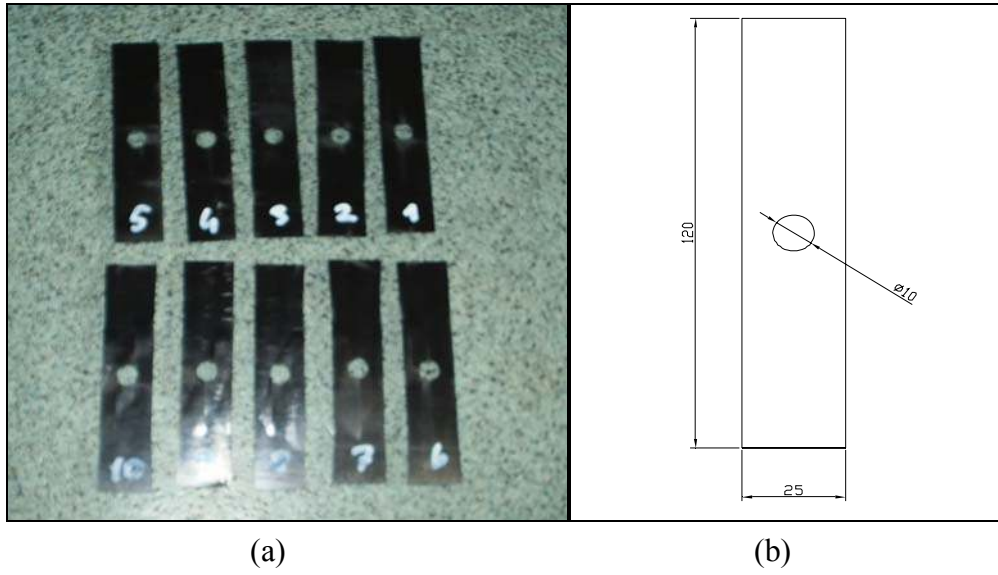
| Malzeme Özellikleri |                  |                 |                                       |
|---------------------|------------------|-----------------|---------------------------------------|
| Elastisite Modülü   | Kayma Modülü     | Poisson Oranı   | Termal Genleşme Katsayısı             |
| $E_{11}=128$ Gpa    | $G_{12}=5.2$ Gpa | $\nu_{12}=0.3$  | $\alpha_1 = 0,14.10^{-6} 1/^{\circ}C$ |
| $E_{22}=10$ Gpa     | $G_{13}=5.2$ Gpa | $\nu_{13}=0.3$  | $\alpha_2 = 8,44.10^{-6} 1/^{\circ}C$ |
| $E_{33}=10$ Gpa     | $G_{23}=3.9$ Gpa | $\nu_{23}=0.48$ | $\alpha_3 = 0,14.10^{-6} 1/^{\circ}C$ |

Malzeme özelliklerinden termal genleşme katsayısı, yaklaşık olarak seçilmiş olup malzemenin çekme dayanımı 625 MPa dır. Yoğunluğu  $1,79 \text{ g/cm}^3$  , malzemenin kalınlığı 2,9 mm dir.

Kullanılan kompozit simetrik ortotropik olarak kabul edilmiştir, tabakaların oryantasyon açıları sırasıyla,  $0^{\circ}/0^{\circ}/45^{\circ}/0^{\circ}/0^{\circ}/-45^{\circ}/90^{\circ}/90^{\circ}/90^{\circ}/90^{\circ}/-45^{\circ}/0^{\circ}/0^{\circ}/45^{\circ}/0^{\circ}/0^{\circ}$  şeklindedir.



Resim 7.1. Simetrik tabakaların görünümü



Resim 7.2 . Numunelerin sıralanışı ve numune boyutları

a) numunelerin sıralanışı, b) mm cinsinden numune boyutları; boy 120 mm, eni 25 mm, ortasında 10mm çapında delik bulunmaktadır.

Resim 7.2 gösterilen numune boyutu ASTM standartlarına göre belirlenmiş olup deney için 10 adet hazırlanıp 1 den 10'a kadar numaralandırılmıştır.

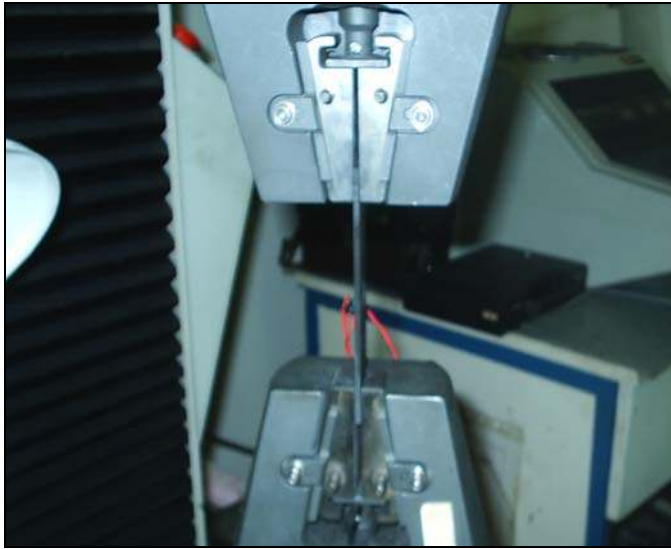
## 7.2. Deneyin Yapılışı

Deneyler Barış Elektrik Endüstrisi AŞ de 10 tonluk Instron fırınlı çekme cihazında gerçekleştirilmiştir. Deneylerde malzeme üzerlerine Şekil 7.1'de belirtilen şekillerde strain gage yapıştırılmış ve o noktalardaki, strain gage yönündeki şekil değişimi ölçülmüştür. Deneyler ASTM standardına göre oda sıcaklığında (25°C) 4 adet, oda

sıcaklığından yüksek sıcaklıklarda, 3 adet 50°C ve 3 adet 100°C sıcaklıklarında fırın içinde malzemede kopma meydana gelene kadar çekilmiştir. Ortamın neminin malzeme özelliklerine etki etmediği kabul edilmiştir. Deneyde alttaki çene sabit ve üstteki çene hareket etmektedir.

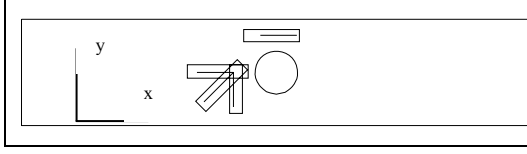


Resim 7.3. Sol; Instron çekme cihazının fırını , sağ; strain gage ve gerilme şekil değiştirme datalarının toplandığı bilgisayarlar.



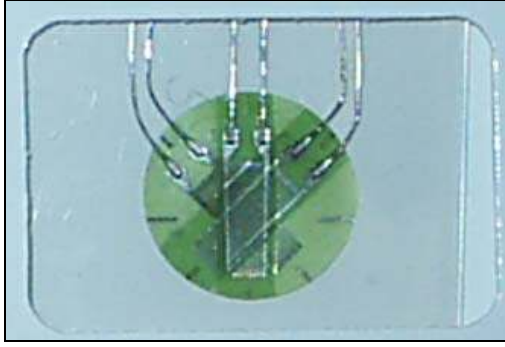
Resim 7.4 . Çenelere tutturulmuş numune, strain gage ve ona bağlı kablolar.

Çekme işlemi 5mm/dak hızla yapılmıştır. Malzemelere yapıştırılan strain gagelerin yerleri aşağıdaki şekilde gösterilmiştir;

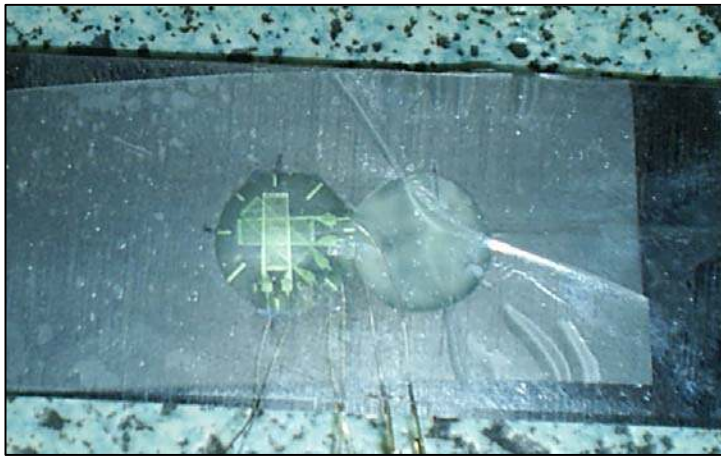


Şekil 7.1. Strain gagelerin yapıştırılma biçimleri numune yatay konumda iken

Burada Şekil 7.1' de, deliğin sol kısmında x'e göre  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  ve  $90^\circ$  lik açılarda, deliğin üstünde ise  $0^\circ$  açısında strain gage yerleştirilmiştir. Malzeme yüzeyindeki fiberlerin çekme deneyi sırasında kopması nedeniyle her numuneden farklı açılarda veriler elde edilmiştir.



Resim 7.5. Kullanılan çok yönlü strain gage.

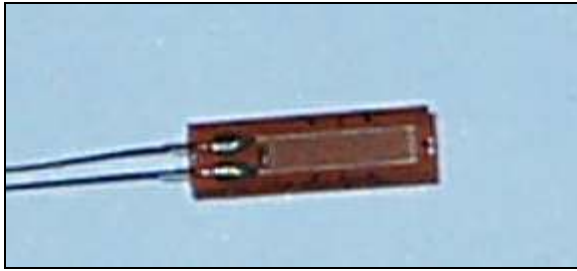


Resim 7.6. Strain gage'in yapıştırılması

Numunelerin hangi sıcaklıklarda çekildikleri ve strain gagelerin hangi numuneye nasıl yerleştirildikleri Çizelge 7.2.'de gösterilmiştir. Strain gagelerin verilerinin

toplandığı üç adet devrenin numaraları 1, 5 ve 8 dir. Bu numaralar bilgisayardan gelen verilerin hangi strain gage den geldiğini gösterir.

Strain gageler içinden elektrik akımı geçen dirençlerdir. Şekil değişimi ile birlikte dirençlerde değişim olur bu potansiyel değişiminin bilgisayarda değerlendirilmesi sonucunda malzemenin strain gage yapıştırılan noktasındaki birim şekil değişimi hesaplanır.



Resim 7.8. Tek yönlü strain gage

Çizelge 7.2. Numune çekme sıcaklığı, çeneler arası uzunluk, strain gage konumları, parantez içindeki numaralar straingagelerin bağlandığı devre numarasını göstermektedir.

| Numune No: | Çekme deneyinin yapıldığı sıcaklık | Çeneler arası uzunluk (mm) | 0° delik üstü, devre numarası | 0° delik yanı, devre numarası | 45° delik yanı, devre numarası | 90° delik yanı, devre numarası |
|------------|------------------------------------|----------------------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| 1          | 100°C                              | 84,02                      | Var , (1)                     | Yok                           | Yok                            | Var, (5)                       |
| 2          | 50°C                               | 77,16                      | Yok                           | Var , (1)                     | Yok                            | Var , (5)                      |
| 3          | 25°C                               | 94,18                      | Yok                           | Var , (1)                     | Var , (5)                      | Var , (8)                      |
| 4          | 100°C                              | 72,22                      | Yok                           | Var , (1)                     | Var , (5)                      | Var , (8)                      |
| 5          | 50°C                               | 87,09                      | Yok                           | Yok                           | Var , (5)                      | Var , (8)                      |
| 6          | 100°C                              | 88,07                      | Var , (1)                     | Yok                           | Yok                            | Yok                            |
| 7          | 50°C                               | 81,06                      | Var , (1)                     | Yok                           | Yok                            | Yok                            |
| 8          | 25°C                               | 82,97                      | Yok                           | Yok                           | Yok                            | Yok                            |
| 9          | 25°C                               | 81,60                      | Yok                           | Yok                           | Yok                            | Yok                            |
| 10         | 25°C                               | 76,18                      | Yok                           | Yok                           | Yok                            | Yok                            |

### 7.3. Deney Sonuçları

Deney sırasında uzama miktarı ve gerilim hesaplanarak veriler saniyede bir kez kaydedilerek, her numune için gerilme, şekil değiştirme diyagramı oluşturulmuştur. Strain gage verileri ise saniyede 3 defa veri alınmış ve bu veriler eklerde verilmiştir. Numuneler için maksimum akma dayanımı değerleri tablo 7.3’de verilmiştir. Ayrıca gerilme şekil değiştirme verilerinde gerilme  $\text{kg/cm}^2$  kuvvet birimi ve uzama da inç cinsinden elde edilmiş sonradan bu değerler MPa ve mm’ye çevrilmiştir. Deney verileri eklerde verilmiştir. 1 nolu numunenin çekme-şekil değişimi verileri sisteme çekme cihazı tarafından girilmediğinden bu veriler elde edilememiştir.

| Sample     | Time (s) | Resistance (ohm) | Strain |
|------------|----------|------------------|--------|
| 0.00       |          |                  |        |
| 1 348.8367 | 0.0000   | -5.127E-0006     |        |
| 5 353.1682 | 0.0000   | -5.104E-0006     |        |
| 8 351.3382 | 0.0000   | -5.090E-0006     |        |
| 0.33       |          |                  |        |
| 1 348.8290 | 0.0000   | -1.534E-0005     |        |
| 5 353.1682 | 0.0000   | -5.104E-0006     |        |
| 8 351.3344 | 0.0000   | -1.018E-0005     |        |
| 0.67       |          |                  |        |
| 1 348.8214 | 0.0000   | -2.555E-0005     |        |
| 5 353.1644 | 0.0000   | -1.021E-0005     |        |
| 8 351.3267 | 0.0000   | -2.036E-0005     |        |
| 1.00       |          |                  |        |
| 1 348.8214 | 0.0000   | -2.555E-0005     |        |
| 5 353.1644 | 0.0000   | -1.021E-0005     |        |
| 8 351.3228 | 0.0000   | -2.549E-0005     |        |
| 1.33       |          |                  |        |
| 1 348.8214 | 0.0000   | -2.555E-0005     |        |
| 5 353.1644 | 0.0000   | -1.021E-0005     |        |
| 8 351.3228 | 0.0000   | -2.549E-0005     |        |

Şekil 7.2. Bilgisayardan alınan strain gage verilerinin görünüşü. Burada en üstteki veri saniyeyi, ilk sütundaki veriler devrelere atanan numaralar, ikinci sütun direnç (ohm) değeri, üçüncü sütun boş veriyi, dördüncü sütun birim şekil değiştirmeyi göstermektedir.

| Sample | Elongation (in) | Load ( $\text{kg/cm}^2$ ) |
|--------|-----------------|---------------------------|
| 1,     | 0,000000,       | -0,9039                   |
| 2,     | 0,003280,       | 38,162                    |
| 3,     | 0,006570,       | 45,261                    |
| 4,     | 0,009850,       | 49,692                    |
| 5,     | 0,013130,       | 65,676                    |
| 6,     | 0,016410,       | 138,47                    |
| 7,     | 0,019690,       | 223,7                     |
| 8,     | 0,022970,       | 324,01                    |
| 9,     | 0,026250,       | 490,9                     |
| 10,    | 0,029530,       | 681,78                    |
| 11,    | 0,032810,       | 895,74                    |
| 12,    | 0,036090,       | 1115                      |
| 13,    | 0,039370,       | 1334,3                    |

Şekil 7.3. Bilgisayardan alınan çekme cihazı verileri. Burada soldan ilk sütun saniyeyi, ikinci sütun inç cinsinden uzamayı, üçüncü sütun  $\text{kg/cm}^2$  yük değerini göstermektedir

Çizelge 7.3 . Deney sonuçları.

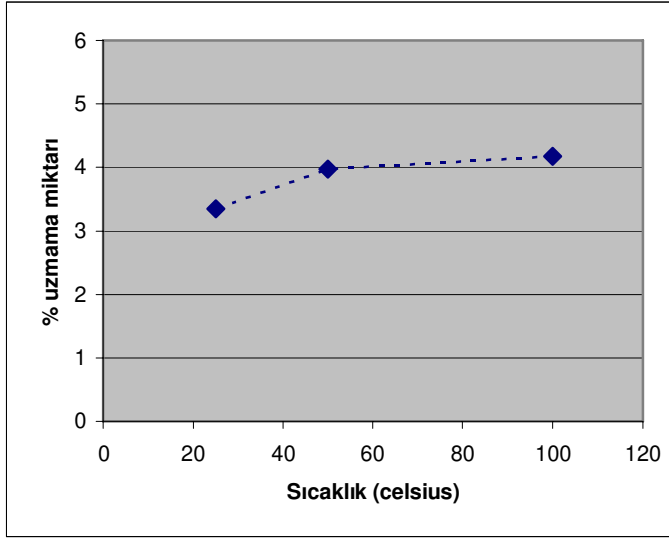
| Numune No: | Çekme deneyinin yapıldığı sıcaklık | Maksimum yük altında şekil değişimi (mm) | Maksimum kuvvet (N) | Maksimum Gerilme (Mpa) | Maksimum yük altındaki % şekil değiştirme |
|------------|------------------------------------|------------------------------------------|---------------------|------------------------|-------------------------------------------|
| 1          | 100°C                              | 2,987                                    | 26030               | 551,6                  | 3,555                                     |
| 2          | 50°C                               | 2,974                                    | 29580               | 623,2                  | 3,854                                     |
| 3          | 25°C                               | 3,544                                    | 27630               | 577,9                  | 3,763                                     |
| 4          | 100°C                              | 3,395                                    | 31230               | 688,0                  | 4,701                                     |
| 5          | 50°C                               | 3,941                                    | 34020               | 705,8                  | 4,525                                     |
| 6          | 100°C                              | 3,754                                    | 30940               | 647,7                  | 4,263                                     |
| 7          | 50°C                               | 2,862                                    | 29050               | 631,5                  | 3,531                                     |
| 8          | 25°C                               | 3,085                                    | 28390               | 648                    | 3,718                                     |
| 9          | 25°C                               | 2,213                                    | 25060               | 526,94                 | 2,712                                     |
| 10         | 25°C                               | 2,444                                    | 27600               | 592,1                  | 3,208                                     |

Gerilme değerlerinin aynı sıcaklıklarda birbirinden farklı çıkmasının nedeni numunelerde imalat sırasında oluşan çentiklerin delik yüzeylerinde meydana gelen yüksek gerilimler nedeniyle malzemenin kopmasına yol açtığını tahmin edilmektedir. Tablodaki değerlerin ortalaması alınır ;

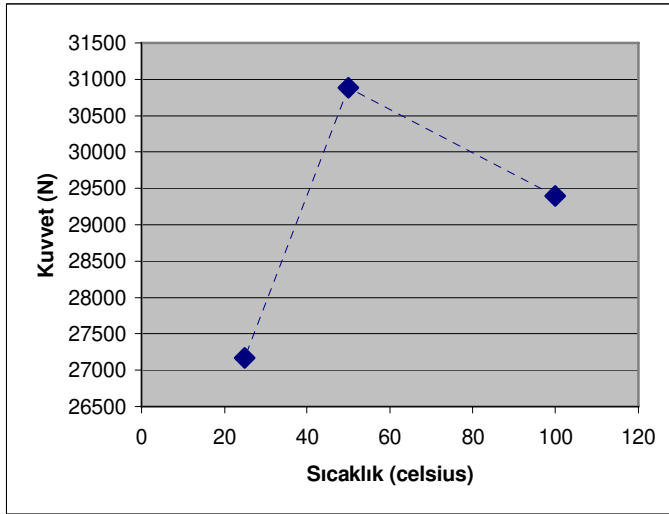
Çizelge 7.4. Verilerin ortalaması

| Çekme deneyinin yapıldığı sıcaklık | Maksimum yük altında şekil değişimi ortalaması (mm) | Maksimum kuvvet ortalaması (N) | Maksimum kuvvet altında x yönündeki gerilme(Mpa) | Maksimum yük altındaki % şekil değiştirme ortalaması |
|------------------------------------|-----------------------------------------------------|--------------------------------|--------------------------------------------------|------------------------------------------------------|
| 100°C                              | 2,987                                               | 29400                          | 629,1                                            | 4,173                                                |
| 50°C                               | 3,259                                               | 30883                          | 653,5                                            | 3,97                                                 |
| 25°C                               | 3,378                                               | 27170                          | 585,98                                           | 3,350                                                |

Görüldüğü üzere sıcaklığa bağlı olarak mukavemet değerleri değişmiştir. Bu değişimleri daha iyi gözleyebilmek sonuçları grafik olarak gösterirsek;

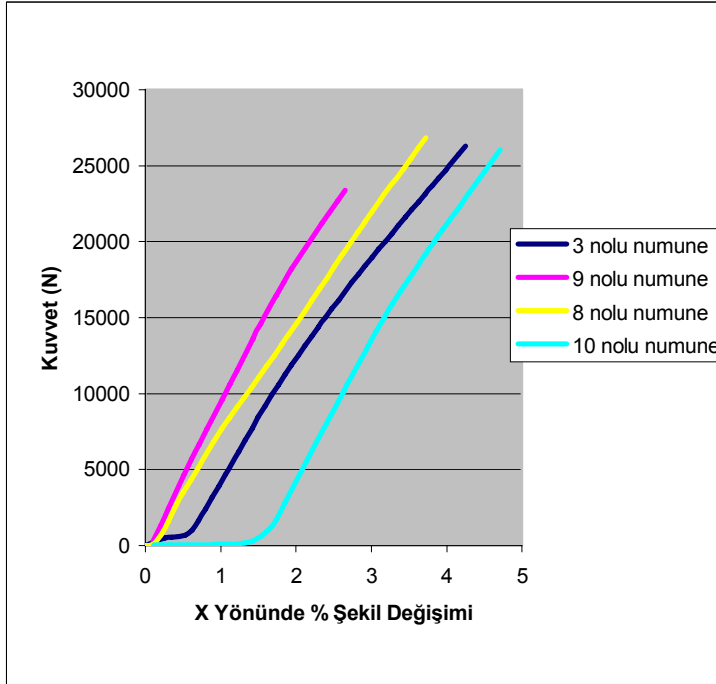


Şekil 7.4 maksimum yük altında sıcaklıkla şekil değişimi miktarının değişimi

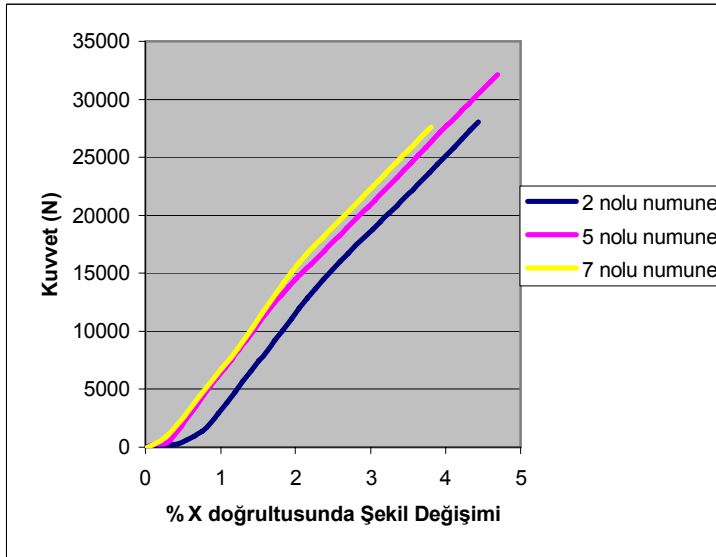


Şekil 7.5 sıcaklıkla uygulanan maksimum yükün değişimi

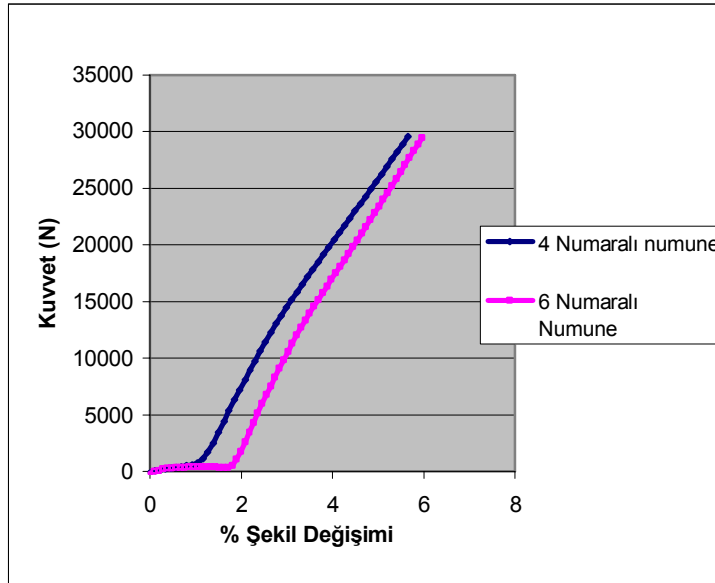
Malzemeyi koparmak için maksimum kuvvetin 50<sup>0</sup> C de uygulandığını görülmektedir. Bilgisayardan alınan yük ve şekil değiştirme verileri grafik haline getirilerek aşağıdaki grafikler elde edilmiştir.



Şekil 7.6. Oda sıcaklığında yük-şekil değişimi grafiği



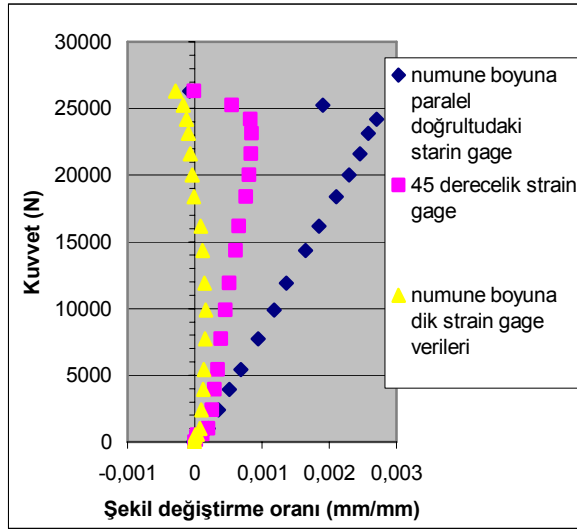
Şekil 7.7. 50° sıcaklığında yük-şekil değişimi grafiği



Şekil 7.8. 100° C sıcaklığında yük-şekil değişimi grafiği

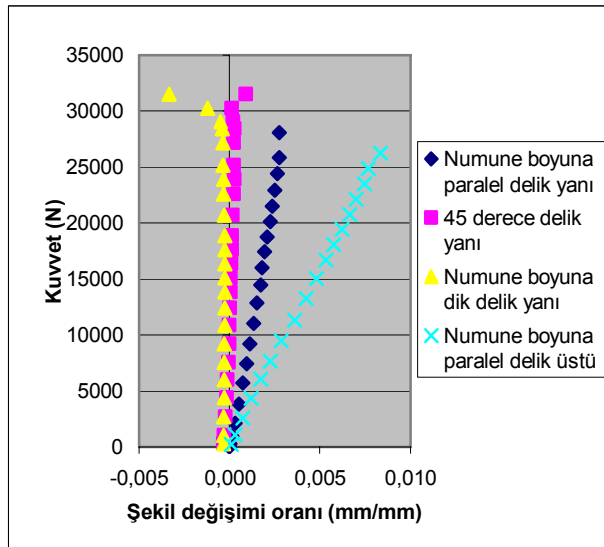
Grafiklerde kuvvette çok yüksek bir artış olmadan önce malzemede şekil değişimi olduğu gözükmemektedir. Bunun nedeni malzeme üzerindeki çenelerin çekme sırasında tam olarak tutunmadan önce bir miktar kayması ve kompozit malzemenin çeneye değen en üst ve en alt tabakanın çeneler yeteri kadar sıkışmadan kayması olarak tahmin edilmektedir. Grafiklere göre sıcaklık yükseldikçe % şekil değişimi artmaktadır.

Kullanılan strain gagelerden alınan veriler incelenip karşılık geldiği kuvvetler grafikte yerine konulursa;

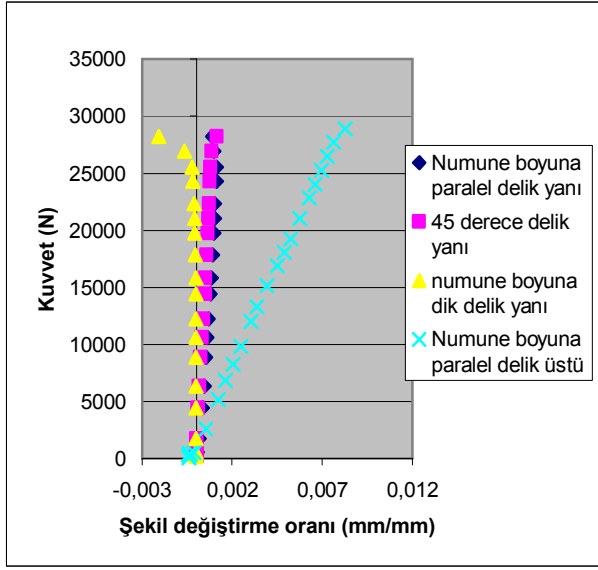


Şekil 7.9. Oda sıcaklığında strain gage –yük değişimi grafiği

Şekil 7.9’ da görülen şekil değiştirme oranı 1mm uzunlukta oluşan şekil değişimini ifade etmektedir.



Şekil 7.10. 50<sup>0</sup> C sıcaklığında strain gage –yük değişimi grafiği



Şekil 7.11. 100<sup>0</sup> C sıcaklığında strain gage –yük değişimi grafiği

grafikleri elde edilir. Grafiklerden görüldüğü üzere numunede deliğin sol tarafında x doğrultusunda çekme gerilimi sonucunda şekil değişimi oluşmaktadır. Grafikler yardımı ile o bölgedeki şekil değişimleri gözlenmektedir. Delik yanında numune boyuna dik bölgede boyda daralma gözlemlenmektedir. Diğer bölgelerde uzama görülmüştür.

## 8. ANSYS İLE ELASTO-PLASTİK GERİLME ANALİZİ

### 8.1. Sonlu Elemanlar Analizi

Sonlu elemanlar metodu, mühendislik problemlerinin çözümünde kullanılan sayısal bir metottur. Sonlu elemanlar metodu kullanılarak, örnek olarak bir yapıda kuvvet altında meydana gelen gerilme dağılımı, deformasyon vb. hesaplanabilir. Bu metod kullanılarak ayrıca ısı transferi, dinamik, titreşim analizi gibi analizler de yapılabilir. Sonlu elemanlar metodunda analiz edilen yapı belirli sayıda elemanlara bölünerek ağ oluşturulur. Her bir eleman birbirine düğüm noktaları ile bağlanır. Analiz sekline ve incelenen yapının geometrisine göre farklı eleman tipleri seçilebilir. Analiz sonucunda elde edilen gerilme, deplasman, sıcaklık, vb. bilgiler düğüm noktalarına aittir. Düğüm noktalarındaki bu bilgilerin ortalamaları alınarak elemana ait bilgiler elde edilir.

Bölüm 2 de belirtilen şekil değiştirme bağıntılarından düzlemsel ortotropik gerilme hali için;

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & 0 \\ S_{12} & S_{22} & 0 \\ 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} \quad (8.1)$$

şeklinde yazılabilir. Eş 8.1' deki uygunluk matrisinin elemanları,

$$\begin{aligned} S_{11} &= \frac{1}{E_1} \\ S_{12} &= -\frac{\nu_{21}}{E_1} = -\frac{\nu_{12}}{E_1} \\ S_{22} &= \frac{1}{E_2} \\ S_{66} &= \frac{1}{G_{12}} \end{aligned} \quad (8.2)$$

şeklindedir. Eş. 8.1' de belirtilen şekil değiştirme-gerilme bağıntısı, gerilme-şekil değiştirme bağıntısı olarak yazıldığında,

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} \quad (8.3)$$

elde edilir. Eş. 8.3' daki  $Q_{ij}$  matrisi indirgenmiş elastisite matrisi olarak tanımlanır ve bu matrisin elemanları,

$$Q_{11} = \frac{E_1}{1 - \nu_{21}\nu_{12}} \quad Q_{22} = \frac{E_2}{1 - \nu_{21}\nu_{12}} \quad Q_{21} = \frac{\nu_{12}E_2}{1 - \nu_{21}\nu_{12}} \quad Q_{66} = G_{12} \quad (8.4)$$

Şekil değiştirme-deplasman bağıntısı ise,

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u \\ v \end{Bmatrix} \quad (8.5)$$

şeklinde ifade edilir. Burada u ve v sırasıyla x ve y yönündeki deplasmanı ifade eder. buradaki eşitlik kısaca ;

$$[\varepsilon] = [D][\delta] \quad (8.6)$$

şeklinde tanımlanabilir.

Minimum potansiyel enerji teorisine göre, elastik bir cismin potansiyel enerjisi,

$$\Pi = U - W \quad (8.7)$$

şeklinde tanımlanır. Burada  $U$ ; şekil değiştirme enerjisini,  $W$  ise dış kuvvetlerin cisim üzerinde yapmış olduğu işi tanımlamaktadır. Minimum potansiyel enerji teorisine göre bir cismin dengede olabilmesi için potansiyel enerjisinin minimum olması gerekir. O halde,

$$\delta\Pi = \delta U - \delta W = 0 \quad (8.8)$$

olmalıdır. buradan şekil değiştirme ifadesi şu şekilde elde edilir.

$$U = \frac{1}{2} \int_V [\varepsilon]^T \{\sigma\} dV = \frac{1}{2} \int_V [\varepsilon]^T [Q] [\varepsilon] dV \quad (8.9)$$

Bir cisme dışarıdan etkiyen yükler üç ana grupta toplanabilir. Bunlar; yayılı yükler (basınç vb.), cisim kuvvetleri ve noktasal yüklerdir. Dış yüklemelerin cisim üzerinde yapmış oldukları iş şu şekilde ifade edilebilir:

$$W = \int_V [\delta]^T [b] dV - \int_{S_1} [\delta]^T [T] dS_1 + \sum_{i=1}^I [\delta_i]^T [P_i] \quad (8.10)$$

Deplasman vektörü, şekil fonksiyonu cinsinden şu şekilde ifade edilmektedir:

$$[\delta] = \begin{bmatrix} u(x, y, z) \\ v(x, y, z) \\ w(x, y, z) \end{bmatrix} = [N] \{q\} \quad (8.11)$$

şekil değiştirme vektörü, düğüm noktalarının yer değiştirmesine  $\{q\}$  bağlı olarak şu şekilde gösterilebilir:

$$[\varepsilon] = [d][N]\{q\} = [B]\{q\} \quad (8.12)$$

Gerilme vektörünün düğüm noktalarının fonksiyonu olarak gösterimi ise;

$$[\sigma] = [D]\{[\varepsilon] - [\varepsilon_0]\} = [D][B]\{q\} - [D]\{\varepsilon_0\} \quad (8.13)$$

Burada;

$$\varepsilon_0 = [\alpha \Delta T, \alpha \Delta T, 0]^T \quad (8.14)$$

$\alpha$  ; ısı genleşme katsayısı,  $\Delta T$  ; sıcaklık farkıdır.

Bu durumda bir elemana ait şekil değiştirme enerjisi aşağıdaki gibi elde edilir:

$$\begin{aligned} \Pi^e = & \frac{1}{2} \int_{V^e} \{q\}^T [B]^T [D][B] \{q\} dV - \int_{V^e} \{q\}^T [B]^T [D][\varepsilon_0] dV \\ & - \int_{V^e} \{q\}^T [N]^T \{b\} dV - \int_{S^e} \{q\}^T [N]^T \{T\} dS_1 \end{aligned} \quad (8.15)$$

Yapıya ait toplam potansiyel enerji, her bir elemanın enerjisinin toplamıdır.

$$\Pi = \sum_{e=1}^E \Pi^e - \{Q\}^T \{F_c\} \quad (8.16)$$

Burada,  $\{Q\}$ , yapının yer değiştirme vektörü tanımlamaktadır.

$$\begin{aligned} \Pi^e = & \frac{1}{2} \{Q\}^T \sum_{e=1}^E \left[ \int_V [B]^T [D][B] dV \right] [Q] \\ & - \{Q\}^T \sum_{e=1}^E \left\{ \int_V [B]^T [D][\varepsilon_0] dV + \int_V [N]^T \{b\} dV + \int_V [N]^T [D][T] dS \right\} - \{Q\}^T \{F_c\} \end{aligned} \quad (8.17)$$

Minimum potansiyel enerji teorisi yukarıda ifade edilen eşitliklerden sonra kısaca şu şekilde de ifade edilebilir:

$$\frac{\partial \Pi}{\partial \{Q\}} = \{0\} \quad (8.18)$$

Buradan,

$$[K]\{Q\} = \{F\} \quad (8.19)$$

eşitliği elde edilir. Bu eşitlik kullanılarak elemanların düğüm noktalarındaki deplasman değerleri ve reaksiyon kuvvetler elde edilir. İki boyutlu, üç düğüm noktasına sahip üçgen eleman için sekil fonksiyonu aşağıda belirtildiği gibidir. u, v deplasmanlarının eleman içerisinde lineer fonksiyon oldukları varsayımı ile şöyle ifade edilebilir:

$$u = b_1 + b_2x + b_3y, \quad v = b_4 + b_5x + b_6y$$

$$b_i (i = 1, 2, \dots, 6)$$

$$u_1 = b_1 + b_2x_1 + b_3y_1$$

$$u_2 = b_1 + b_2x_2 + b_3y_2$$

$$u_3 = b_1 + b_2x_3 + b_3y_3$$

$$v_1 = b_4 + b_5x_1 + b_6y_1$$

$$v_2 = b_4 + b_5x_2 + b_6y_2$$

$$v_3 = b_4 + b_5x_3 + b_6y_3 \quad (8.20)$$

Yukarıda tanımlanan eşitlikler yeniden düzenlenerek aşağıdaki eşitlik elde edilir.

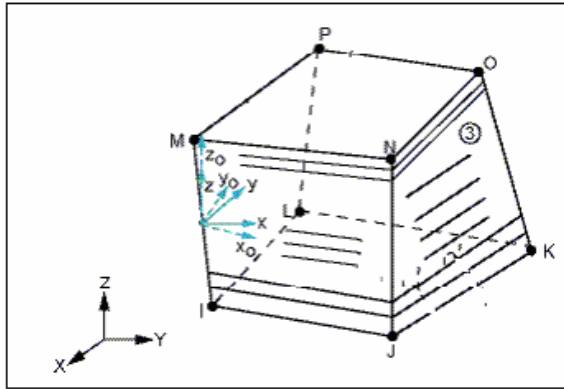
$$\begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = [B]\{q\} = \frac{1}{2A} \begin{bmatrix} y_{23} & 0 & y_{31} & 0 & y_{12} & 0 \\ 0 & x_{32} & 0 & x_{13} & 0 & x_{21} \\ x_{32} & y_{23} & x_{13} & y_{31} & x_{21} & y_{12} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ u_2 \\ v_2 \\ u_3 \\ v_3 \end{Bmatrix} \quad (8.21)$$

Burada A üçgen elemanın alanıdır. buradaki matris ana matriste yerine konulup çözüldüğünde üçgenin köşelerindeki (düğüm noktaları) şekil değişimi bulunur. [29]

## 8.2. ANSYS İle Modelleme

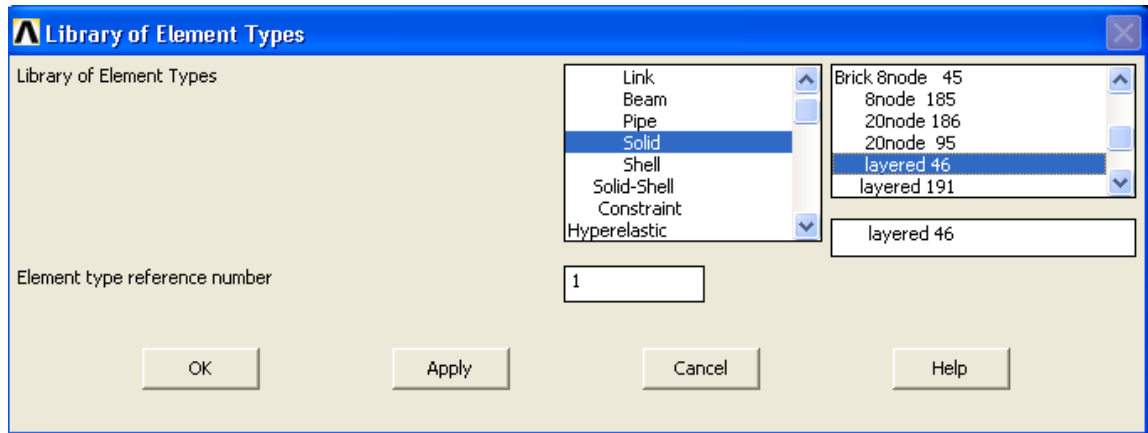
Araştırmada ANSYS v10.0 kullanılmıştır. ANSYS programı modellenen malzemenin üzerinde mesh denen bu üçgenlerden oluşturarak bu üçgenlerdeki düğüm noktalarına gelen kuvvetleri çok uzun hesaplamalar gereken yerlerde hesaplamaları yaparak hem zaman kazandırmakta hem de çok karmaşık modellemelere olanak sağlamaktadır.

Yapılacak modellemede eleman olarak tabakalı malzemeler için olan layered solid 46 eleman türü seçilmiştir. SOLID 46 elemanı, 8 düğüm noktasına sahip olup, tabakalı malzemelerin modellenmesinde kullanılmaktadır. 250'ye kadar tabaka bir eleman içinde modellenebilir. Elemanın her bir düğüm noktasının 3 serbestlik derecesi vardır. Bunlar; x,y, ve z eksenlerindeki doğrusal harekettir. Her tabakadaki gerilme ve sekil değiştirme değerleri hesaplanabilir.



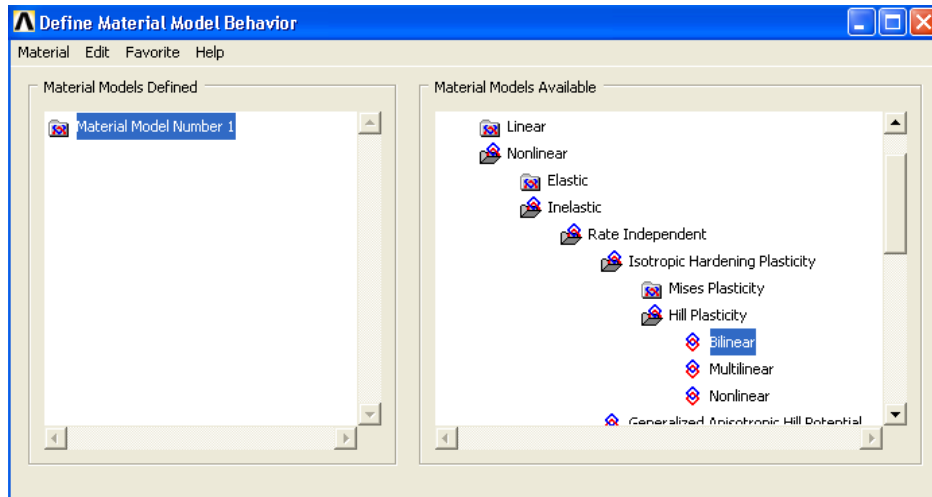
Şekil 8.1 Solid 46 nın görünümü

ANSYS'te eleman seçimi ;



Şekil 8.2: Solid 46 eleman tipinin seçilmesi

Eleman tipi seçildikten sonra malzemenin özelliklerinin girilmesi gerekmektedir. Özelliklerin girilmesi için de malzemenin hangi çözüm yöntemiyle işleneceği belirtilir. Çalışmada Hill bilinear isotropik nonlinear ve linear ortotropik yöntemleri kullanılmıştır. Ayrıca sıcaklık için sıcaklık katsayıları da girilmiştir.



Şekil 8.3. Hill Plastisite çözümünün seçilmesi

Thermal Expansion Secant Coefficient for Material Number 1

Reference temperature

| T1           |                      |
|--------------|----------------------|
| Temperatures | <input type="text"/> |
| ALPX         | 0.14e-6              |
| ALPY         | 8.44e-6              |
| ALPZ         | 0.14e-6              |

Add Temperature Delete Temperature Graph

OK Cancel Help

Şekil 8.4. Isıl genleşme katsayılarının girilmesi

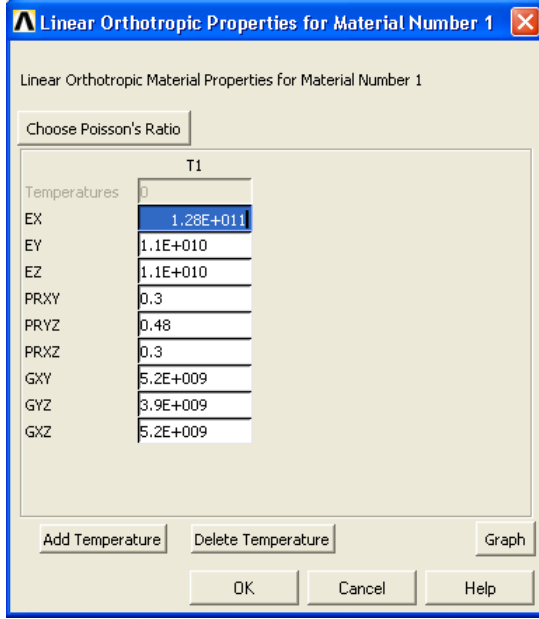
Real Constant Set Number 1, for SOLID46

| Layer number    | Mat no., X-axis rotation, layer thk | MAT | THETA | TK    |
|-----------------|-------------------------------------|-----|-------|-------|
| Layer number 1  | 1 0 0.182                           | 1   | 0     | 0.182 |
| Layer number 2  | 1 0 0.182                           | 1   | 0     | 0.182 |
| Layer number 3  | 1 45 0.182                          | 1   | 45    | 0.182 |
| Layer number 4  | 1 0 0.182                           | 1   | 0     | 0.182 |
| Layer number 5  | 1 0 0.182                           | 1   | 0     | 0.182 |
| Layer number 6  | 1 -45 0.182                         | 1   | -45   | 0.182 |
| Layer number 7  | 1 90 0.182                          | 1   | 90    | 0.182 |
| Layer number 8  | 1 90 0.182                          | 1   | 90    | 0.182 |
| Layer number 9  | 1 90 0.182                          | 1   | 90    | 0.182 |
| Layer number 10 | 1 90 0.182                          | 1   | 90    | 0.182 |

Press [OK] for next 6 layers

OK Cancel Help

Şekil 8.5. solid 46' ya göre tabaka sayısı, tabaka kalınlığı ve oryantasyon açılarının girilmesi



Linear Orthotropic Material Properties for Material Number 1

Choose Poisson's Ratio

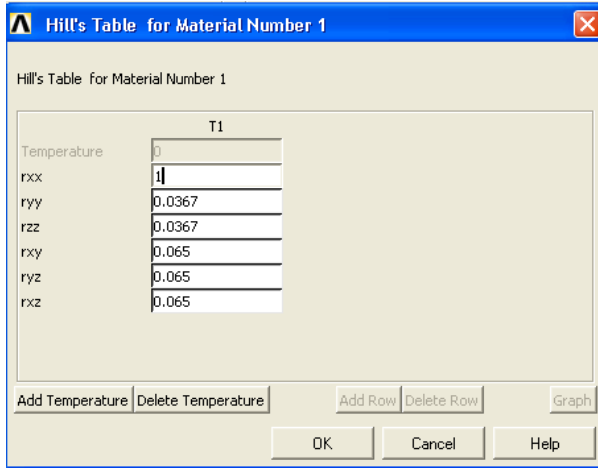
Temperatures: 0

|      | T1        |
|------|-----------|
| EX   | 1.28E+011 |
| EY   | 1.1E+010  |
| EZ   | 1.1E+010  |
| PRXY | 0.3       |
| PRYZ | 0.48      |
| PRXZ | 0.3       |
| GXY  | 5.2E+009  |
| GYZ  | 3.9E+009  |
| GXZ  | 5.2E+009  |

Add Temperature Delete Temperature Graph

OK Cancel Help

Şekil 8.6. Malzemenin mekanik özelliklerinin girilmesi



Hill's Table for Material Number 1

Temperature: 0

|     | T1     |
|-----|--------|
| rxx | 1      |
| ryy | 0.0367 |
| rzz | 0.0367 |
| rxz | 0.065  |
| ryz | 0.065  |
| rxz | 0.065  |

Add Temperature Delete Temperature Add Row Delete Row Graph

OK Cancel Help

Şekil 8.7. Hill sabitlerinin girilmesi

Hill tablosunu oluştururken X, Y ve Z yönündeki tabaka akma mukavemeti değerleri kullanılır bunlar modellenen malzeme için; X=2207 Mpa, Y= 81 Mpa, Z= 144 Mpa ve r değerleri;

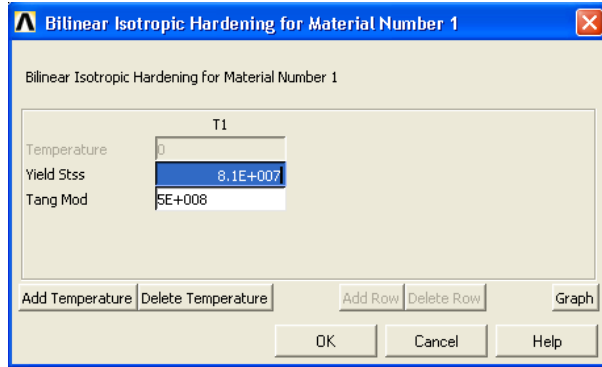
$$r_{xx} = X/X = 1$$

$$r_{yy} = Y/X = 0,0367$$

$$r_{zz} = Y/X = 0,0367$$

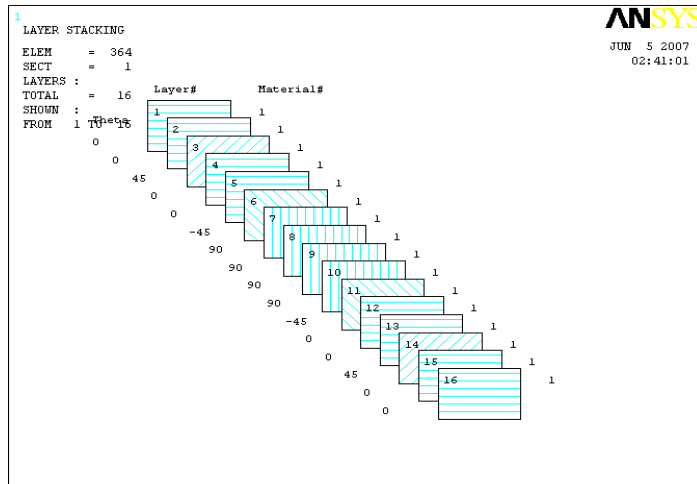
$r_{xy} = r_{xz} = r_{yz} = Z/X = 0,065$  şeklinde hesaplanır.

Son olarak da bilinear izotropik malzeme özellikleri girilir bunlar da, Yield stres; 81 Mpa ve tanjant modülü 500 Mpa olarak seçilir.



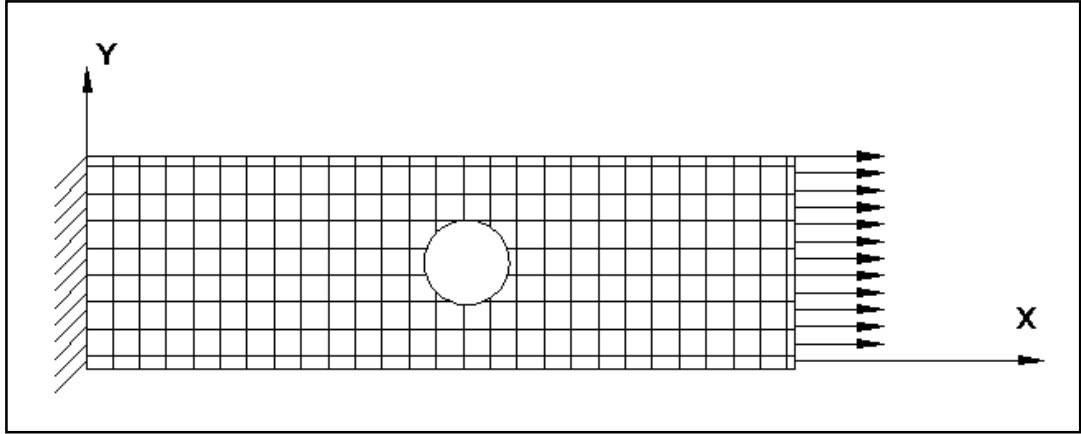
Şekil 8.8. Bilinear izotropik değerlerinin girilmesi

Kompozit malzemenin oryantasyon açıları ve tabakalar şekilde görüldüğü gibi dizilmektedir.

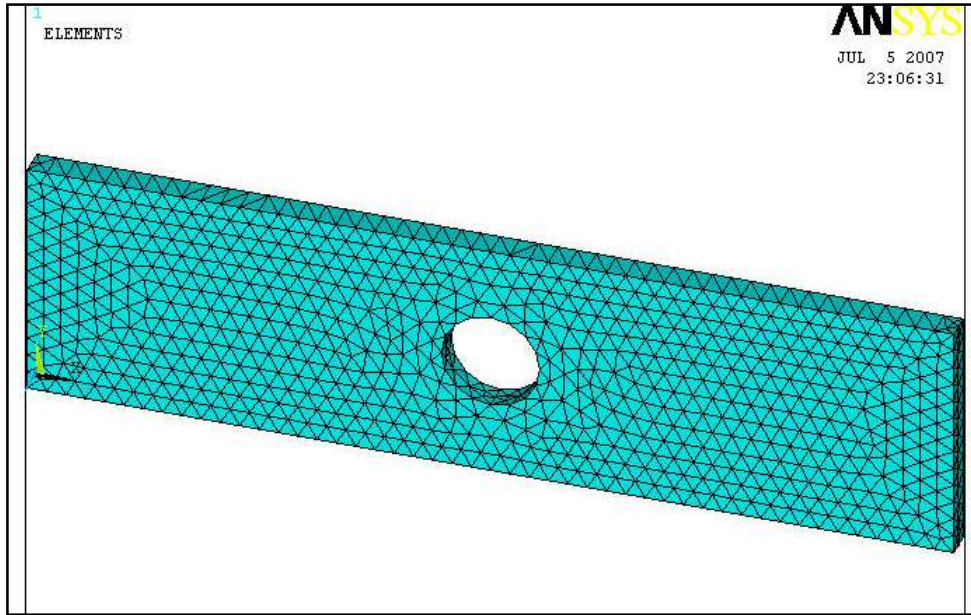


Şekil 8.9: Oryantasyon açıları ve tabakaların dizilimi

Malzeme özellikleri ve eleman türleri belirlendikten sonra modelin şekli oluşturulur ve sınır şartları belirlenir. Aşağıdaki şekilde sınır şartları gösterilmiştir. Oluşturulan bu şartlar deney ortamı göz önünde tutularak tasarlanmıştır.



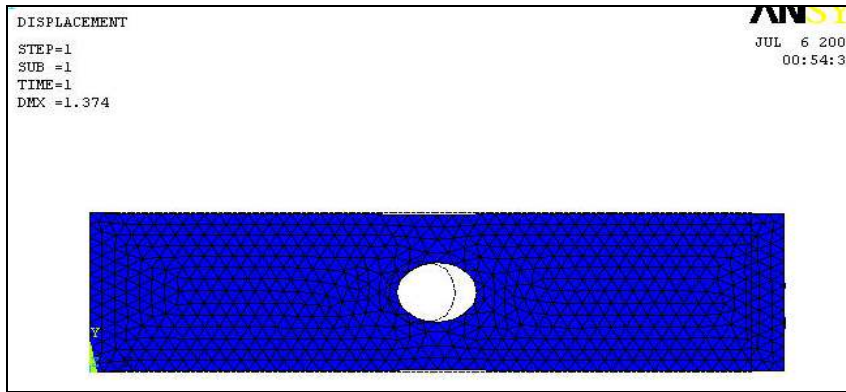
Şekil 8.10. Sınır şartları



Şekil 8.11. Modelin elemanlara ayrılması

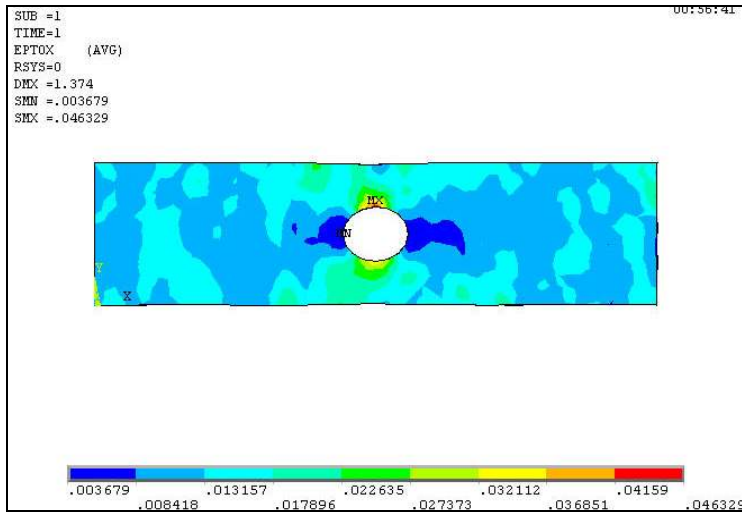
Yapılacak incelemede deneylerde elde edilen maksimum gerilme değerleri ve bu değerlerdeki sıcaklıklar kullanılmaktadır. Buna göre malzemede 100° C’da 29400 N, 50° C’da 30883 N ve 25° C’da 27170 N yük uygulanarak 3 farklı üç farklı sıcaklıkta, numune uzunluğu en uzun çene boyu olan 94 mm alınarak çekme gerilmesi altında incelenmiştir.

Kuvvet doğrultusuna x ve ona dik doğrultuya y dersek, 25° C’da x yönünde 27170 N yük altında malzemenin deformasyonu;



Şekil 8.12. 25°C’da 27170 N yük altında deformasyonu ve yük uygulanmadan önceki halinin karşılaştırılması

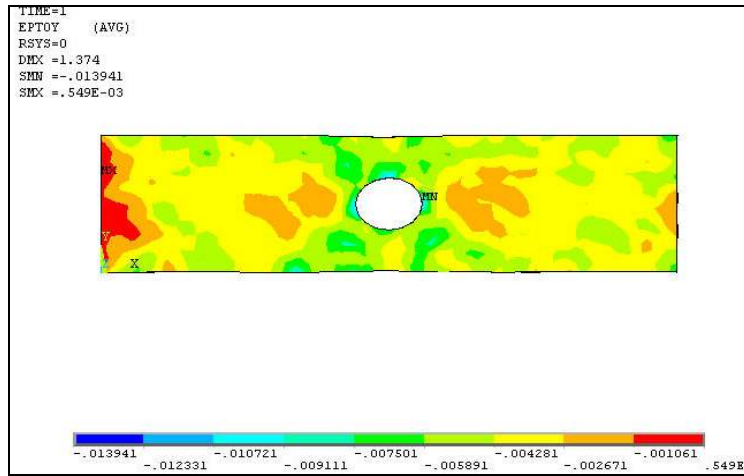
Strain gagelerdeki şekil değişimini görmek için malzemenin x doğrultusundaki şekil değişimi;



Şekil 8.13. 25°C’ da x doğrultusundaki şekil değişimi

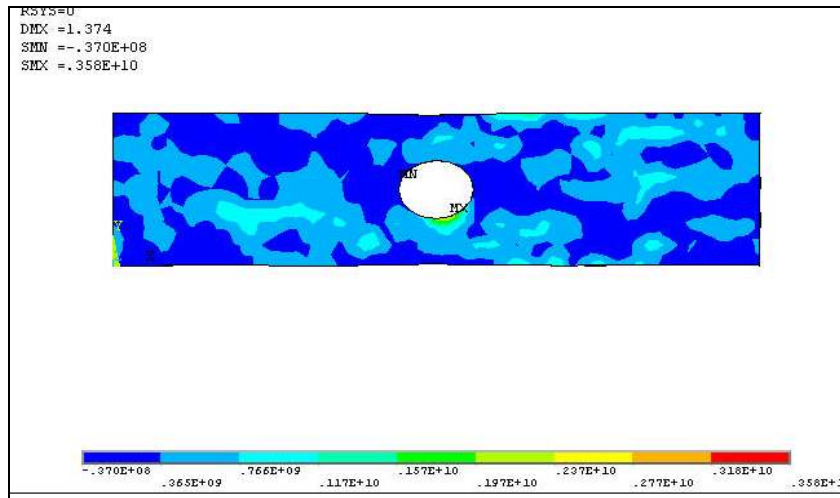
Burada maksimum birim şekil değişimi deliğin üst ve alt kenarlarında oluşmuştur. Buradaki “MN” ve “MX” işaretleri malzeme üzerindeki sırasıyla minimum ve maksimum değerlerin bulunduğu noktaları göstermektedir (Bu değerler mutlak değer olarak hesaplanmamıştır).

Y yönündeki şekil değişimi;



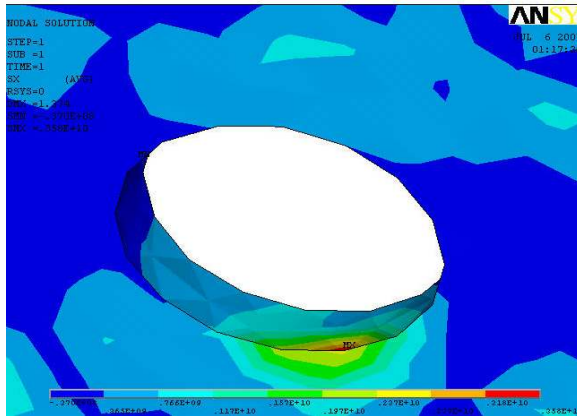
Şekil 8.14 . 25°C’ da 27170 N yük altında y doğrultusundaki şekil değişimi

şeklinde görülür burada maksimum şekil değişimi parçanın alt kısmında görülmüştür. Deliğin yüzeyindeki maksimum gerilme ve şekil değişimlerinin meydana geldiği yerlerde malzemede akma ve kopma görülmektedir.

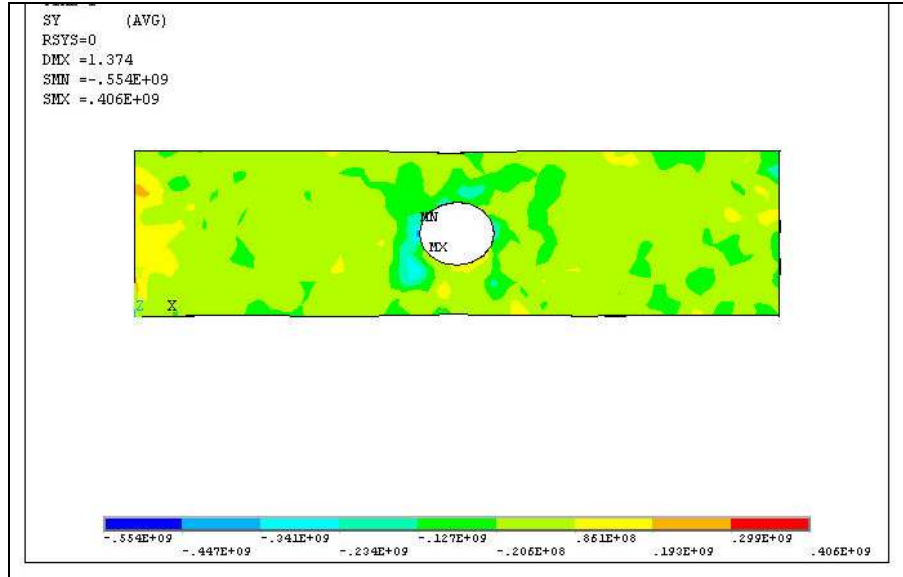


Şekil 8.15. 25°C’ da 27170 N yük altında x doğrultusundaki gerilim dağılımı (Altındaki renkler, o renkteki bölgelere ait Pa olarak gerilme değerlerini göstermektedir).

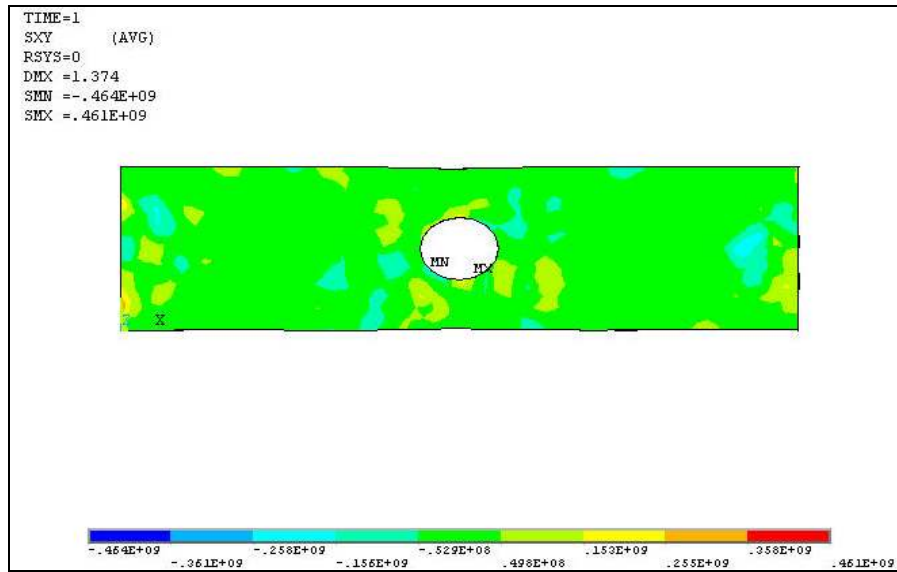
Malzemenin kopmaya başladığı nokta olarak tahmin edilen bölge şekil (8.15) de x doğrultusunda gerilme dağılımında görülmektedir.



Şekil 8.16. Delik kenarındaki 25°C’ da x doğrultusundaki oluşan maksimum gerilmenin gösterilişi

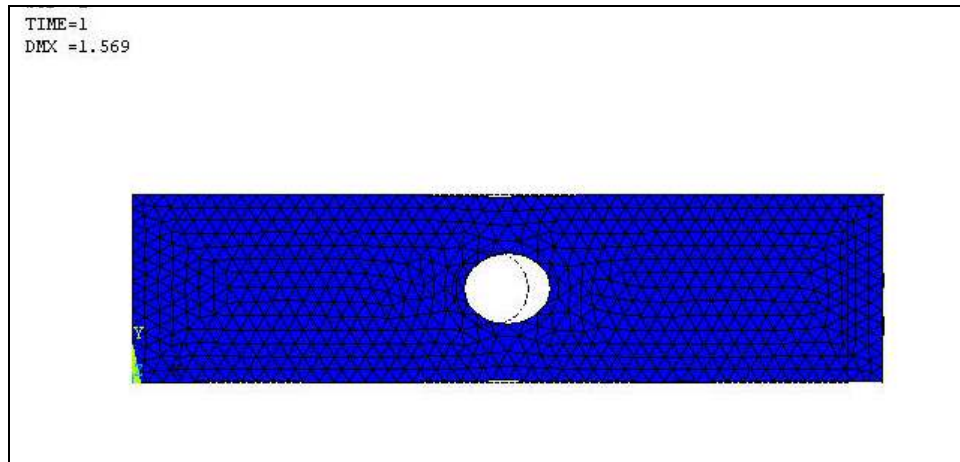


Şekil 8.17. 27170 N yük, 25°C’ da y doğrultusundaki gerilmeler

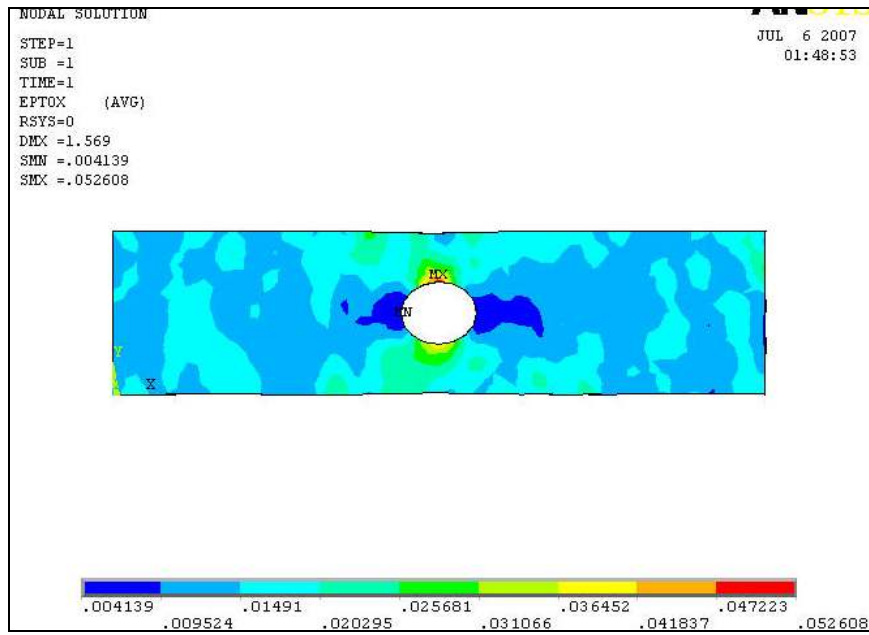


Şekil 8.18. 25°C’ da xy kayma gerilmesi. (mutlak maksimum gerilme malzemenin alt yüzeyinde meydana gelmiştir)

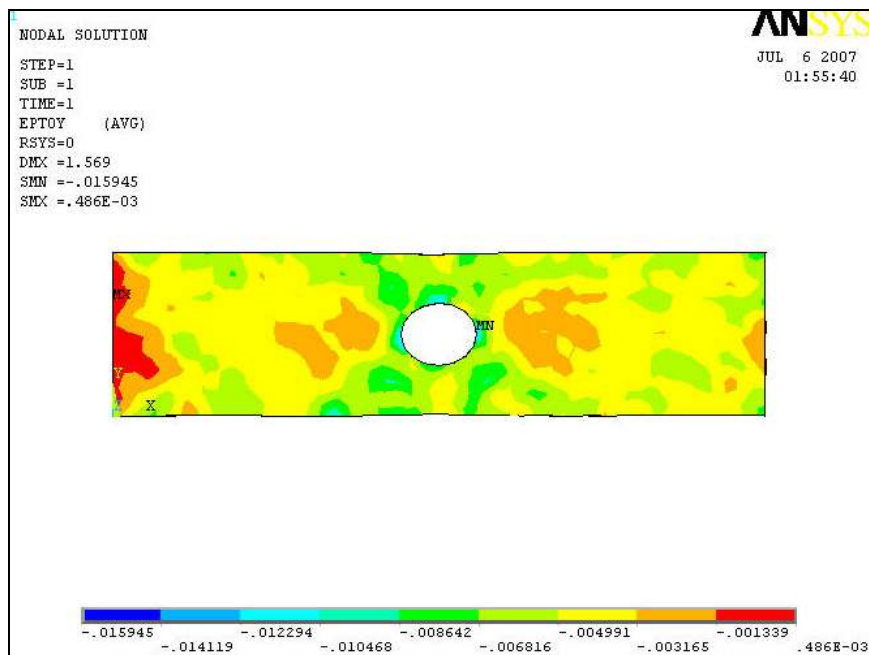
50°C’da 30883 N yük altında malzemenin deformasyonu;



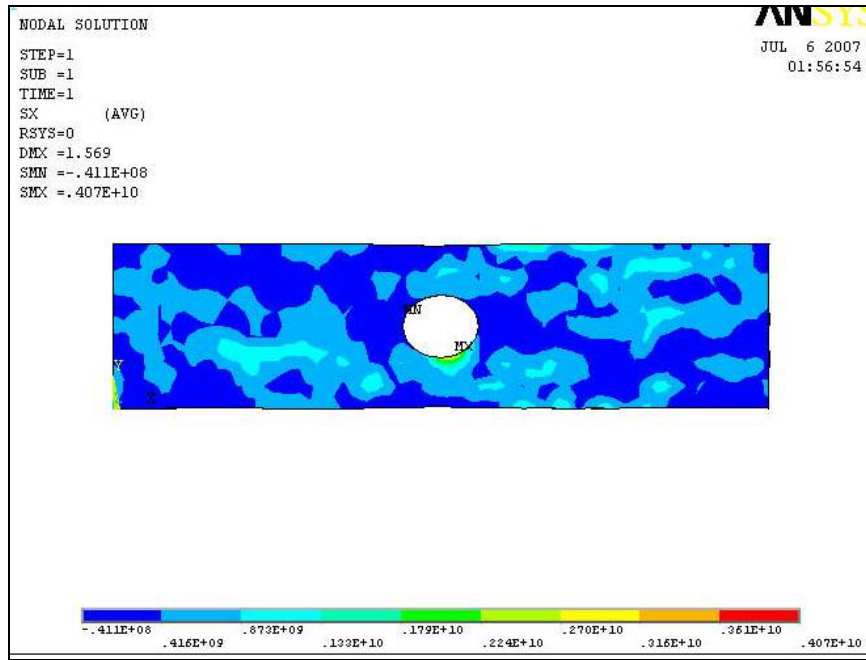
Şekil 8.19. 50°C’da 30883 N yük altında malzemenin deformasyonu



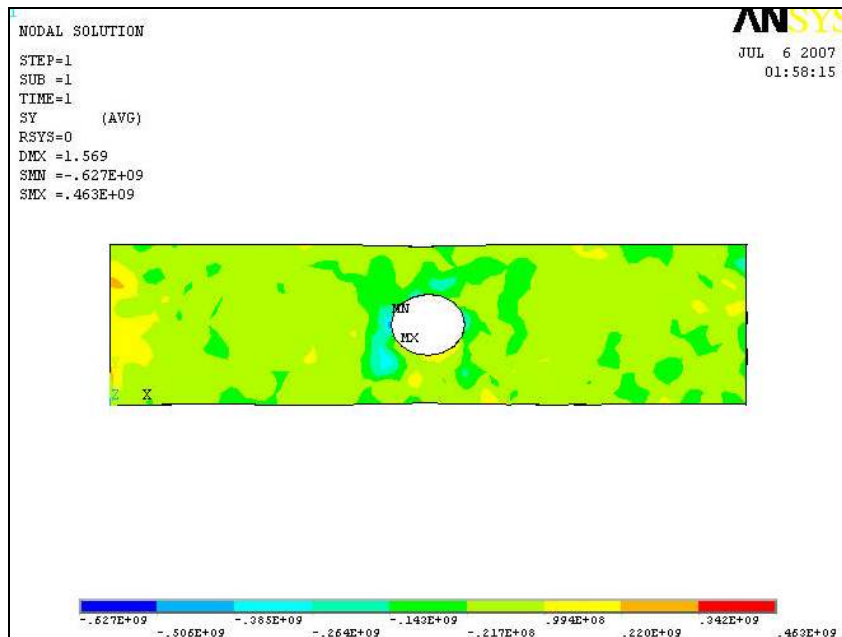
Şekil 8.20. 50°C'da 30883 N yük altında malzemenin x doğrultusundaki şekil değişimi



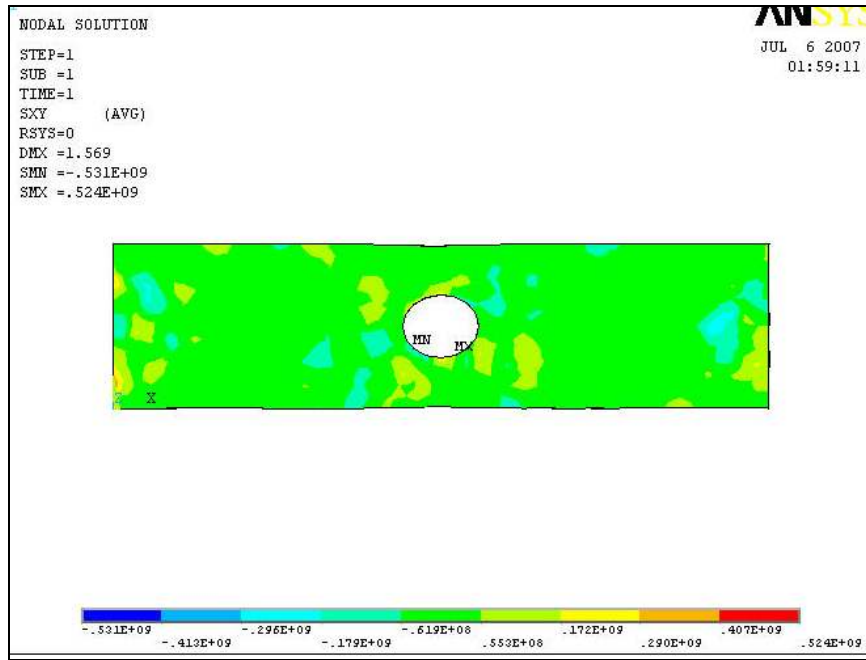
Şekil 8.21. 50°C'da 30883 N yük altında malzemenin y doğrultusundaki şekil değişimi



Şekil 8.22. 50°C’da 30883 N yük altında malzemenin x doğrultusundaki gerilmeler

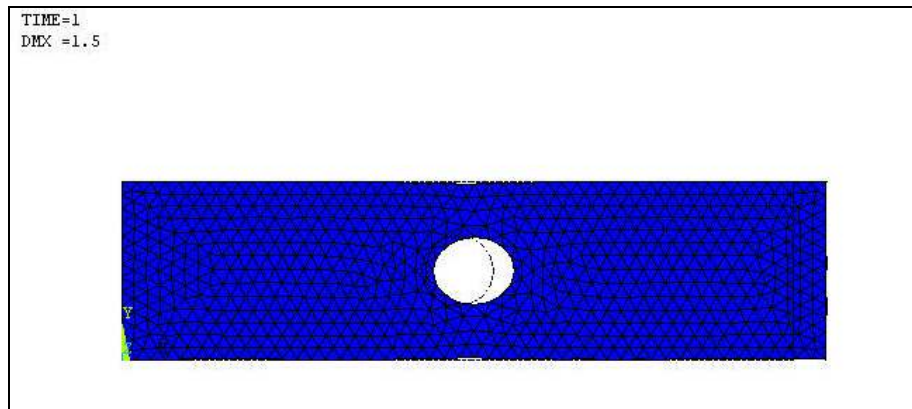


Şekil 8.23. 50°C’da 30883 N yük altında malzemenin y doğrultusundaki gerilmeler

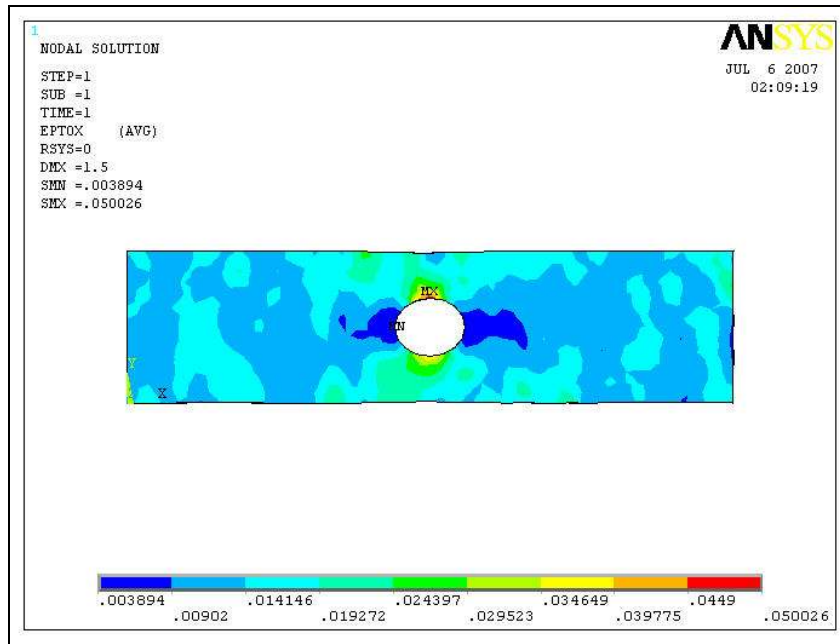


Şekil 8.24. 50°C’da 30883 N yük altında malzemenin xy doğrultusundaki kayma gerilmesi

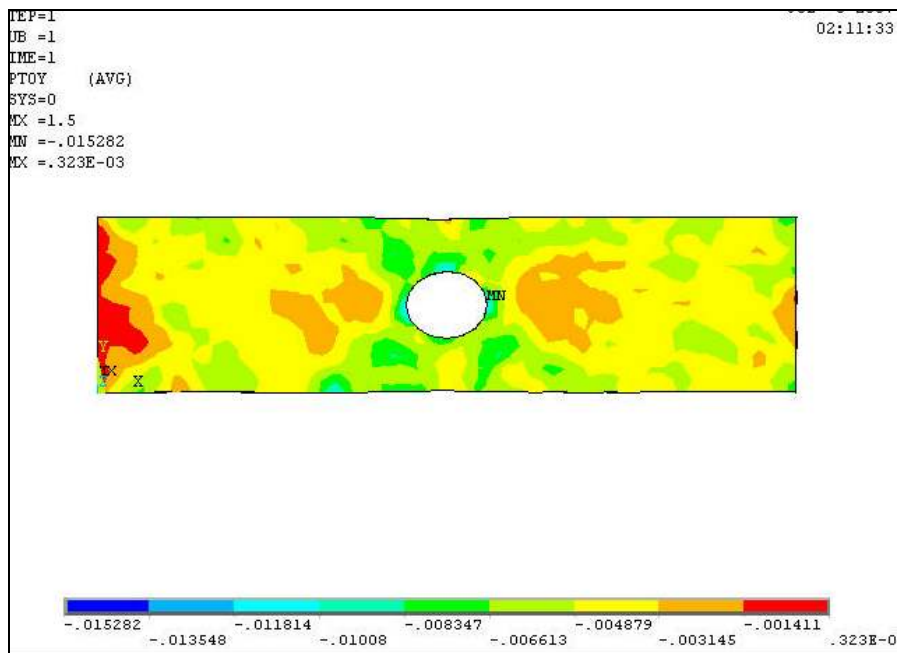
100°C’da 29400 N yük altında malzemenin deformasyonu



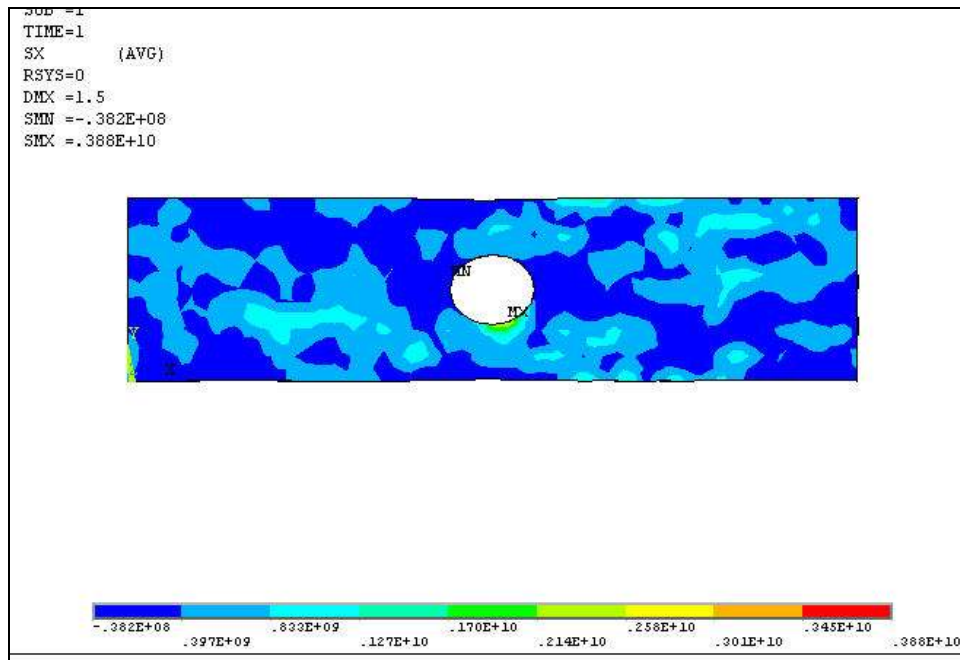
Şekil 8.25. 100°C’da 29400 N yük altında malzemenin deformasyonu



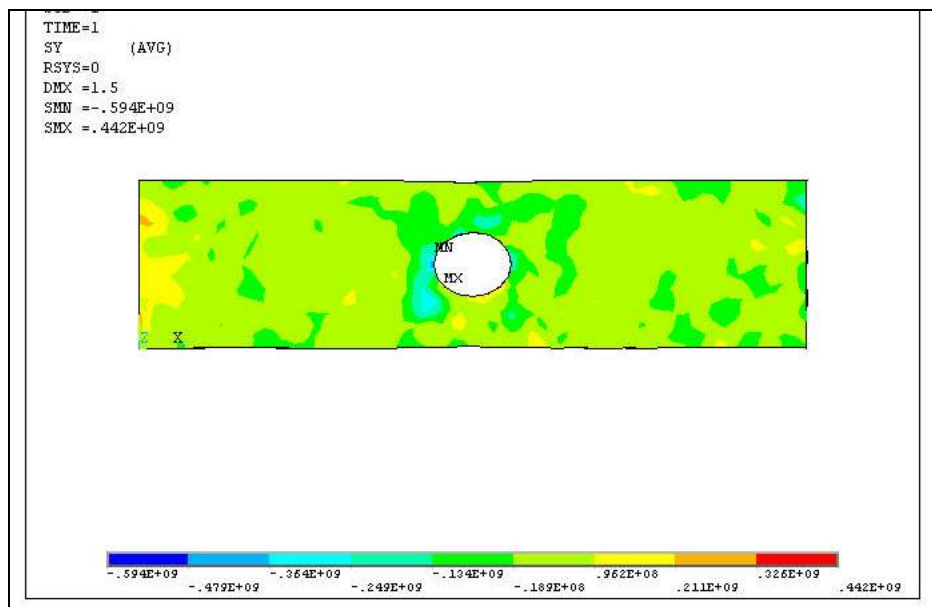
Şekil 8.26. 100°C'da 29400 N yük altında x doğrultusundaki şekil değişimleri



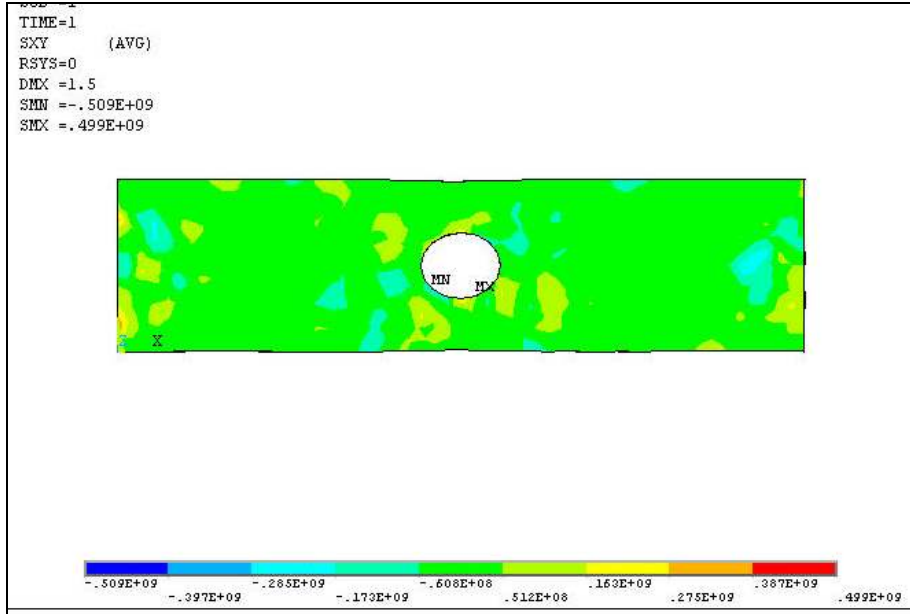
Şekil 8.27. 100°C'da 29400 N yük altında y doğrultusundaki şekil değişimleri



Şekil 8.28. 100°C’da 29400 N yük altında x doğrultusundaki gerilmeler



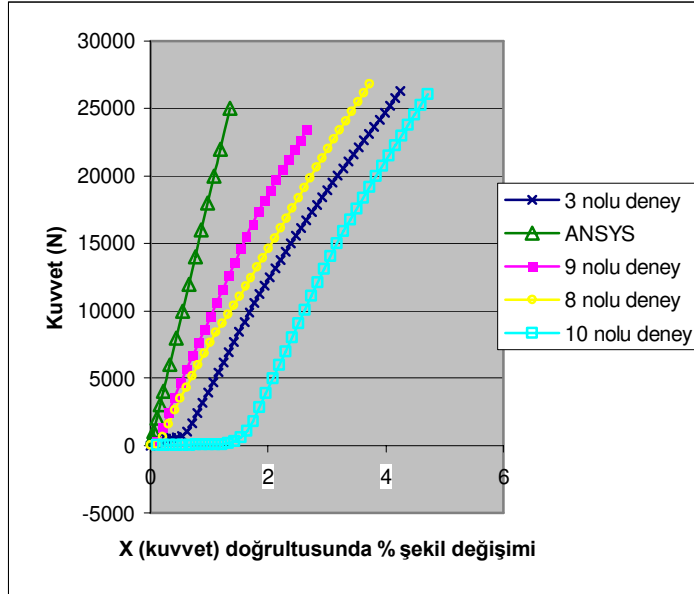
Şekil 8.29. 100°C’da 29400 N yük altında y doğrultusundaki gerilmeler



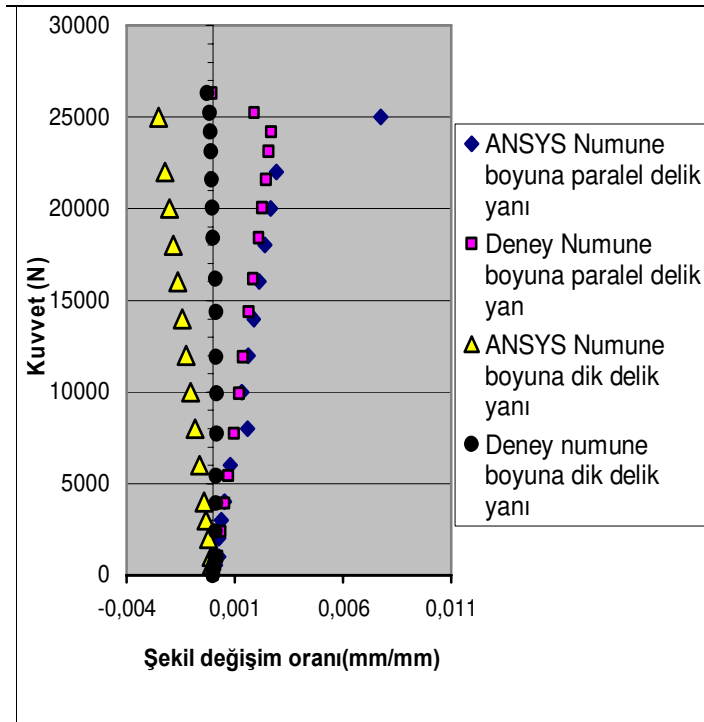
Şekil 8.30. 100°C’da 29400 N yük altında xy doğrultusundaki kayma gerilmeleri

### 8.3. DeneySEL Veriler İle ANSYS Elasto-Plastik Analiz Verilerinin Karşılaştırılması

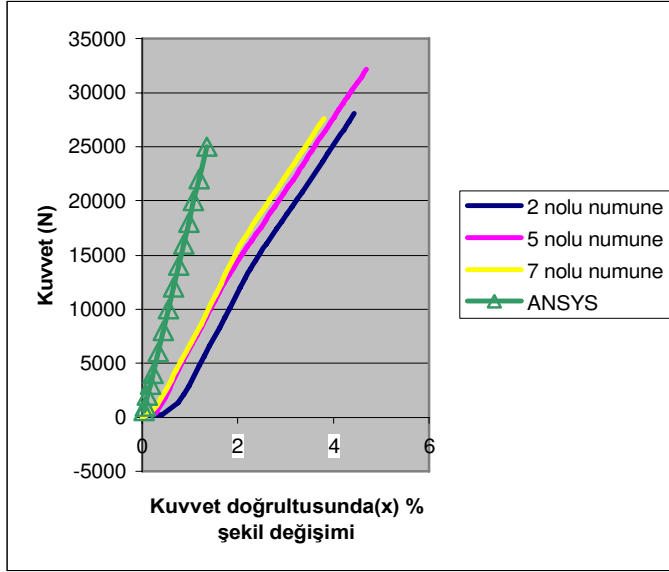
Ansyes ile deney ortamı modellenip 2kN artışla çekme yükü uygulanarak veriler değerlendirilip 550-25000 N arasında kuvvet-şekil değişimi ve strain gage şekil değişimi-kuvvet grafikleri ANSYS’ den elde edilen verilerle birlikte aşağıdaki şekilde grafikler oluşturulmuştur.



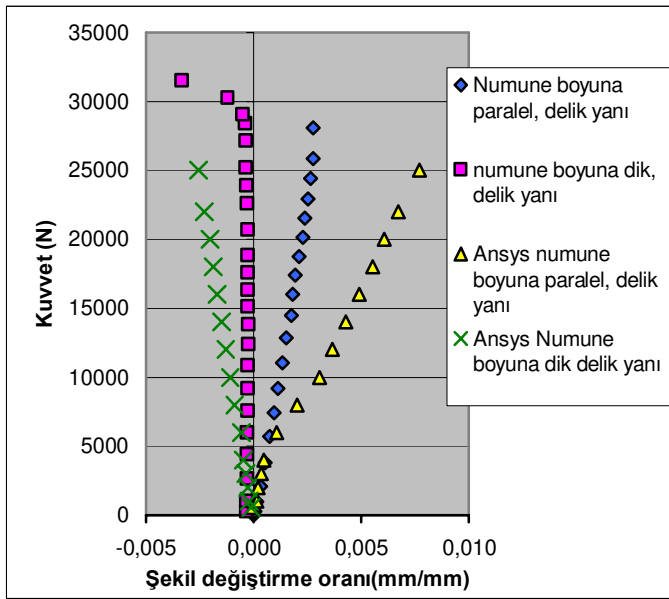
Şekil 8.31. Oda sıcaklığında yük-şekil değişimi grafiği



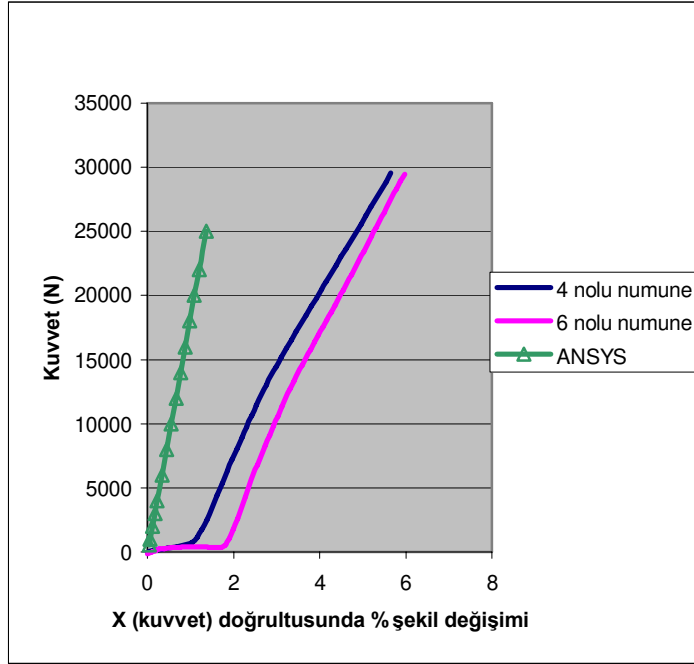
Şekil 8.32. Oda sıcaklığında strain gage –yük değişimi grafiği



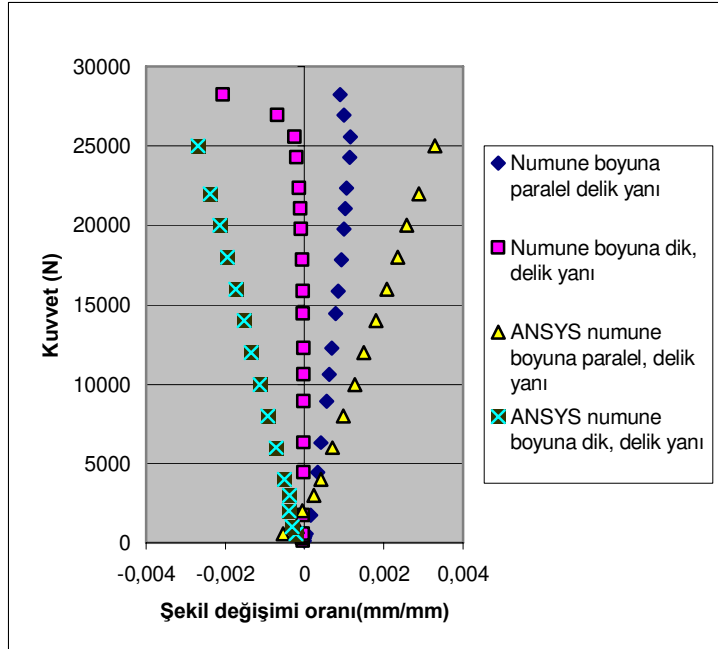
Şekil 8.33. 50<sup>0</sup> C sıcaklığında yük-şekil değişimi grafiği



Şekil 8.34. 50<sup>0</sup> C sıcaklığında strain gage –yük değişimi grafiği



Şekil 8.35. 100<sup>0</sup> C sıcaklığında yük- şekil değişimi grafiği

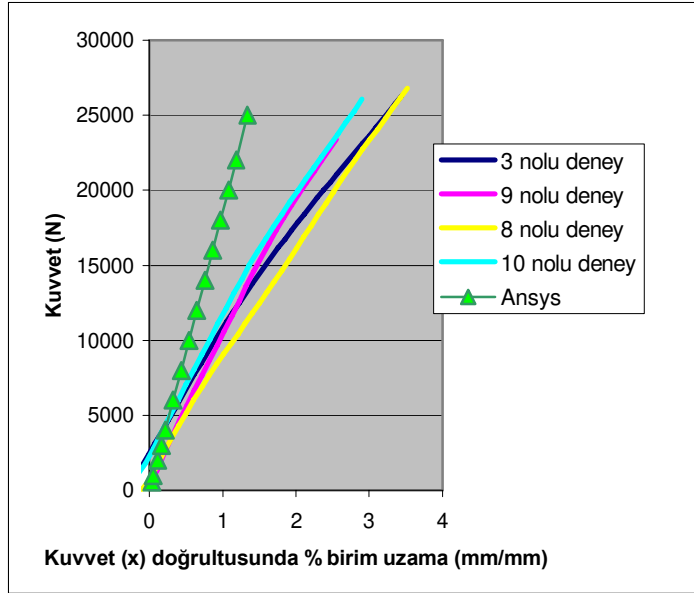


Şekil 8.36. 100<sup>0</sup> C sıcaklığında strain gage –yük değişimi grafiği

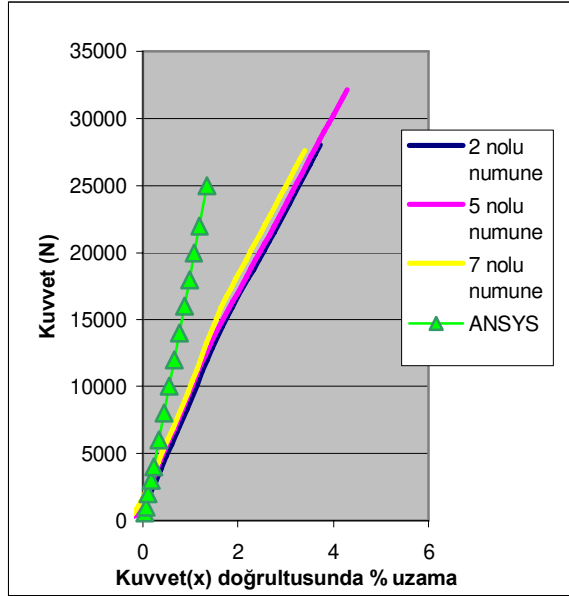
Strain gage verileri ile ANSYS programından alınan veriler benzerlik göstermektedir. ANSYS verileri doğrusal olarak yük artışıyla birlikte değişmektedir.

Deney verileri ise eğrisel bir değişim göstermektedir. ANSYS verileri mutlak değer olarak deney verilerinden daha fazladır.

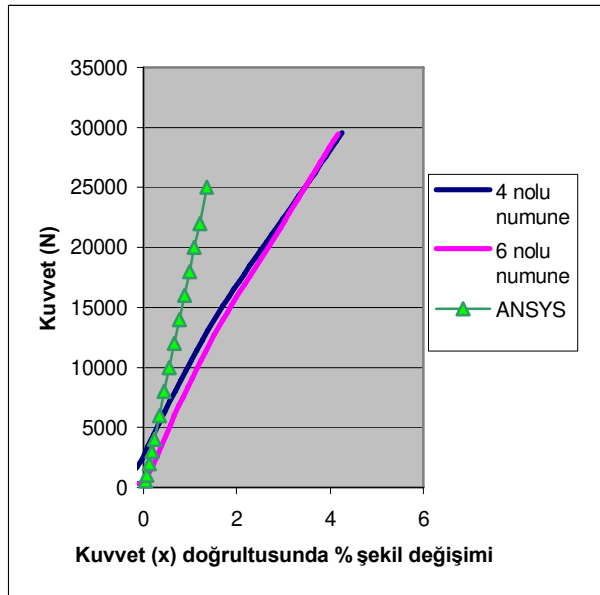
Malzemenin x yönündeki şekil değişim-yük diyagramlarında grafik çizgilerinde küçük kuvvet artışına rağmen yüksek şekil değişimi olduğu görülmüştür. Bu olayın çenelerin tam tutunamadığı için meydana geldiği tahmin edilmektedir. Daha iyi bir karşılaştırma için kayma şekil değişim miktarları göz önüne alınıp bütün değerlerden çıkarılırsa aşağıdaki grafikler elde edilir.



Şekil 8.37. Oda sıcaklığında çenelerden kaynaklanan kayma çıkarılmış yük- şekil değişimi grafiği



Şekil 8.38. 50<sup>0</sup> C sıcaklığında çenelerden kaynaklanan kayma çıkarılmış yük- şekil değişimi grafiği



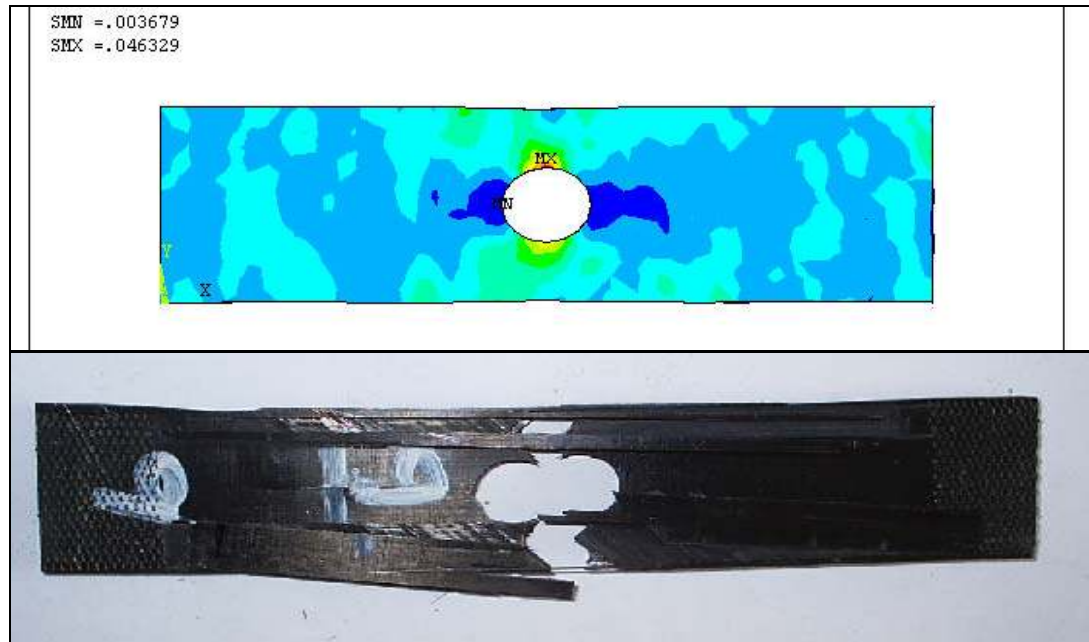
Şekil 8.39. 100<sup>0</sup> C sıcaklığında çenelerden kaynaklanan kayma çıkarılmış yük-şekil değişimi grafiği

Yukarıdaki grafiklerden ANSYS ile deney verilerinin yakınlığı görülmektedir. ANSYS verileri deney verilerinden daha az gözükmekte ve de ANSYS ile elde edilen veriler yük artışıyla doğrusal bir artma göstermektedir. ANSYS verileri ile

deneysel veriler arasındaki farkın deney numunesinin meydana getiriliş sıcaklığının mukavemette önemli bir etkisi olduğu nedeniyle olduğu tahmin edilmektedir.

Çizelge 8.1. Maksimum yük altında şekil değişimlerinin karşılaştırılması

| Çekme deneyinin yapıldığı sıcaklık | Maksimum yük altında şekil değişimi ortalaması (mm) |                | Maksimum yük altında % şekil değişimi ortalaması |                |
|------------------------------------|-----------------------------------------------------|----------------|--------------------------------------------------|----------------|
|                                    | Deney Verileri                                      | ANSYS Verileri | Deney Verileri                                   | ANSYS Verileri |
| 100°C                              | 2,987                                               | 2,173          | 4,173                                            | 1,595          |
| 50°C                               | 3,259                                               | 2,253          | 3,970                                            | 1,699          |
| 25°C                               | 3,378                                               | 2,016          | 3,350                                            | 2,016          |



Resim 8.1. Üst; ANSYS ile modelleme de maksimum yük altında oluşan x yönündeki şekil değişimi, Alt; çekme deneyi sonucunda kopmuş numune. ANSYS ile modellemede maksimum şekil değişimi olan noktada malzeme kopmuştur.

## 9. SONUÇ

Yapılan çalışmayı özetleyecek olursak, ortasında 10 mm delik bulunan AS4 8552 karbon fiber takviyeli kompozit teyp tipi malzeme üç farklı sıcaklıkta çekme deneyine tabii tutulmuştur ve deliğin kenarından strain gage ile şekil değiştirme verileri alınmıştır. Deney sonuçları grafiklerle gösterilmiştir. Ayrıca malzemenin ANSYS Hill yardımı ile çekme deneyinde elde edilen maksimum yük altında oluşan, malzemenin üzerindeki gerilmeler numune sayısı az olduğundan ve malzeme 130-150°C sıcaklığa kadar dayanabildiğinden üç sıcaklık ortamında incelenmiştir bunlar; 25°C(oda sıcaklığı), 50°C ve 100°C' dir. Malzeme üzerinde oluşan gerilmeler gösterilmiştir. Deney verileri ekler kısmında verilmiştir. Deneylerde kullanılan malzeme özel olarak üretildiğinden sınırlı sayıda deney yapılmak zorunda kalmıştır.

Odegard G. ,Kumosa M. (2000) tarafından tek yönlü karbon/PMR15 kompozit malzemenin oda sıcaklığında ve 316° C sıcaklığa kadar olan oda sıcaklığının üstündeki sıcaklıklarda eksensel çekme kuvveti sonucunda, malzemenin elastik ve plastik özelliklerinin sıcaklıkla değiştiği gözlemlenmiştir. Çalışma sonucunda polimer matrisin yumuşadığı ve kompozit malzemenin katılık değerlerinin düştüğü özellikle matrise bağlı sabitlerin düştüğü gözlemlenmiştir[6]. Tez çalışmasında yapılan deneylerde de kompozit malzemenin sıcaklık değişimi ile birlikte mukavemet değerlerinin değiştiği gözlemlenmiştir.

Deney verilerine göre oda sıcaklığında gerçekleştirilen deneylerde ortasında delik bulunan numune dayanımı en düşük çıkmıştır, dayanım 50°C de artmış, ve 100°C de düşmüştür bunun sonucunda malzemenin sıcaklık değişimi ile birlikte dayanımının değiştiği belirlenmiştir.

Deneylerde elde edilen ve ANSYS ten elde edilen kuvvetin etki ettiği x eksenini doğrultusunda % şekil değiştirme miktarı deneysel verilerden düşük çıkmıştır. Bunun nedeninin, çenelerin malzemeyi tam olarak sıkıştırmadan önce bir miktar uzamanın meydana gelmiş olması ve yüzey tabakalarının yeterli basma kuvveti olmadan önce

bir miktar kayarak şekil değişimini etkilemesi olarak tahmin edilmektedir. ANSYS ile yapılan analizde x yönünde maksimum şekil değişiminin görüldüğü nokta kompozit malzemenin kopmaya başladığı noktalar olarak belirlenmiştir. Bunu da çekme deneyi sonucunda numunelerde oluşan hasarlar ile karşılaştırdığımızda benzerlik gösterdiği görülmektedir. Ayrıca malzemenin yük-şekil değişimi grafikleri ANSYS sonuçları ile karşılaştırıldığında grafiklerin artma oranları birbiri ile benzerlik göstermektedir. Böylelikle kompozit malzemelerin kopmaya hangi noktadan başlayabileceği yüksek olasılıkla tespit edilebilir. Yapılan çalışmada ANSYS sonlu elemanlar yönteminin ve deney verilerinin karşılaştırılması sonucunda hassasiyet gerektiren uygulamalarda deney verilerinin gerekli olduğu ancak çok karmaşık yapılarda ANSYS sonlu elemanlar modelinden faydalanılabileceği sonucuna varılmıştır.

Strain-gage verileri ile ANSYS sonlu elemanlar analizi verileri karşılaştırıldığında ANSYS verilerinin yük değişimi ile doğrusal olarak arttığı fakat strain-gage verilerinin doğrusal olarak artmadığı gözlemlenmiştir. Strain-gage verileri ile ANSYS verilerinin karşılaştırılması sonucunda çekme ve basma durumlarının aynı olduğu görülmüştür.

Hill sonlu elemanlar analizinde malzemenin kırılmaya başladığı noktalar delik içinde çekme yönüne paralel dairesel deliğin teğetinde oluşmaktadır. Mukavemeti arttırmak için deliğin şekil değişimini engelleyecek şekilde takviye edilmesi mukavemette artış sağlayacaktır.

Kompozit malzeme üretiminin yaygınlaşması ve kompozit malzeme üzerinde daha çok araştırma yapılması, bu yeni malzeme türünün geliştirilmesine yarar sağlayacağı tahmin edilmektedir.

## KAYNAKLAR

1. Fagan, M.J., "Finite element Analysis Theory and Practice", **Longman**, New York, 61-201 (1992).
2. Moaveni S. "Finite Element Analysis Theory and Application with ANSYS" **Prentice Hall**, Upper Saddle River, New Jersey 30-200 (1999)
3. Kaw, A.K., "Mechanics of Composite Materials", **CRC Press LLC**, New York, 30-120 (1997).
4. Cook, R.D., "Finite Element Modeling for Stress Analysis", **John Wiley & Sons Ltd.**, New York, 1-144 (1995).
5. Daniel, I.M., Ishai, O., "Engineering Mechanics of Composite Materials", **Oxford University Press**, New York, 37-187 (1994).
6. Odegard, G., Kumosa, M. "Elastic-plastic and failure properties of unidirectional carbon/PMR-15 composite at room and elevated temperatures" **Composites Science and Technology**, 60: 2979-2988 (2000).
7. Eason, T. G. ,Ochoa, O. O. "Material behavior of structural reaction injection molded composites under thermomechanical loading" **Journal of Composite Materials** 34(05): 411-432 (2001)
8. Pettermann, H. E., Plankensteiner, A. F., Böhm, H. J., Rammerstrofer, F. G. "A thermo-elasto-plastic constitutive law for inhomogeneous materials based on an incremental Mori-Tanaka approach" **Computers Structures** 72: 197-204 (1999)
9. You, L. H. "Effect of elastic-plastic matrix on thermo-mechanical response of continuous anisotropic fiber-reinforced composites" **Composites Science and Technology**, 62: 2209-2218 (2002).
10. Rui, M. G., Vaz, M. A., "Comparison of Creep Behaviour of UD and Woven CFRP in Bending" **Mechanics of Composite Materials and Structures** 8: 119-134 (2001).
11. Xu Jincheng, Zhao Liang, Deng Xiaoyan, Yu Hui "High temperature simulation of short carbon fiber-reinforced nickel base composite" **Materials and Design** 27: 1152-1156 (2006).
12. Rupnowski, P., Gentz, M., Kumosa, M. "Mechanical response of a unidirectional graphite fiber/polyimide komposite as a function of temperature" **Composites Science and Technology** 66: 1045-1055 (2006).

13. Özes, Ç., Demirsoy, M. “Stres analysis of pin-loaded woven-glass fiber reinforced epoxy laminate conveying chain components” *Computers Structures* 69: 470-481 (2005).
14. Arslan, N., Çelik, M., Arslan, N. “Prediction of the elastic-plastic behaviour of thermoplastic composite laminated plates ( $[0^\circ/\theta^\circ]$ ) with square hole” *Computers Structures* 55: 37-39 (2002).
15. Karakuzu, R., Aslan, Z., Okutan, B. “The effect of ply number, orientation angle and bonding type on residual stresses of woven steel fiber reinforced thermoplastic laminated composite plates subjected to transverse uniform load” *Composites Science and Technology* 64: 1049-1056 (2004).
16. Arriaga A., Lazkano, J.M., Pagaldai, R., Zaldua M.A., Hernandez, R., Atxurra, R., Chrysostomou, A., “Finite-element analysis of quasi-static characterisation tests in thermoplastic materials: Experimental and numerical analysis results correlation with ANSYS” *Polymer Testing* 26: 284-305 (2007).
17. Prasad, E. N., Loidl, D., Vijayakumar, M., Krompp, K. “Elastic properties of silica-silica continuous fibre reinforced, ceramic matrix composites” *Scripta Materialia* 50: 1121-1126 (2004).
18. Song, G., Eang, Y., Zhou, Y. “The mechanical and thermophysical properties of ZrC/W composites at elevated temperature” *Materials Science and Engineering* A334: 223-232 (2002).
19. Çallioğlu, H., Sayman, O., Ataberk, N. “Elasto-plastic thermal stress analysis in symmetric thermoplastic laminates” *Journal of Thermoplastic Composite Materials* 18: 59-76 (2005).
20. Yang, Q., Qin, Q. “Modeling the effective elasto-plastic properties of unidirectional composites reinforced by fibre bundles under transverse tension and shear loading” *Materials Science and Engineering* A344: 140-145 (2003)
21. Bektaş, N., B., Sayman, O. “Elasto-plastic stress analysis in simply supported thermoplastic laminated plates under thermal loads” *Composites Science and Technology* 61: 1695-1701 (2001).
22. İçten, B. M., Karakuzu, R. “Progressive failure analysis of pin-loaded carbon-epoxy woven composite plates” *Composites Science and Technology* 62: 1259-1271 (2002).
23. Şen F. “[60°/60°]<sub>s</sub> ve [60°/60°]<sub>2</sub> oryantasyona sahip delikli ve tabakalı termoplastik kompozit plakalarda uniform sıcaklık altında meydana gelen ısı

- gerilmelerin analizi” *Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi* 10: 249-254 (2006).
24. Özbay, M., Özer, D., “The analysis of elasto-plastic stres in the composite laminate with a circular hole subjected to in plane loads by means of infinite element method” *Journal of Reinforced Plastics & Composites* 24: 621-631 (2005).
  25. Kollar, L., P., Springer, S. G. “Mechanics of Compsoitte Structures” *Cambridge Univercity Pres*, Newyork, 1-168 (2003).
  26. Jones, R., M., “Mechanics od Composite Materials 2. Ed.” *Taylor and Francis*, Philadelphia, 1-275 (1998).
  27. Miracle D., B., Donaldson, S. L. “ASM Handbook Volume 21: Composites” *ASM International* , 21:1-168 (2001).
  28. Şahin, Y., “Kompozit Malzemelere Giriş” *Gazi Kitabevi* , Ankara 1-210 (2000).
  29. Dursun, T., “ Cıvata Bağlantılı Tabakalı Kompozit Levhalarda Hasar Analizi”, doktora tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü* ,Ankara 15-35 (2006).
  30. Şenel, M., “Thermal Elastic-Plastic Stres Analysis of Composite Laminated Plates” *Graduate School of Natural and Applied Sciences of Dokuz Eylül University* , İzmir 15-48 (2002).
  31. Volger, H, T.J., Kyriakides, S. “Inelastic behavior of an AS4/PEEK composite under combined transverse compression and shear. Part II: Modeling” *International Journal of Plasticity*, Texas-USA 15: 807-836 (1999).

**EKLER**

## EK-1 Çekme cihazından alınan gerilme-şekil değiştirme verileri

2 nolu numune hariç, ondalık kısım nokta ile ayrılmıştır.

2 nolu Numune:

Saniye/x yönünde uzama (inç) /yük (kg/cm<sup>2</sup>)

|     |                   |     |                  |     |                  |
|-----|-------------------|-----|------------------|-----|------------------|
| 1,  | 0,000000, -0,9039 | 15, | 0,045940, 1743,5 | 29, | 0,091870, 4397,9 |
| 2,  | 0,003280, 38,162  | 16, | 0,049220, 1945,1 | 30, | 0,095150, 4557,7 |
| 3,  | 0,006570, 45,261  | 17, | 0,052500, 2156,3 | 31, | 0,098430, 4717,5 |
| 4,  | 0,009850, 49,692  | 18, | 0,055780, 2372,1 | 32, | 0,101710, 4880,8 |
| 5,  | 0,013130, 65,676  | 19, | 0,059060, 2587,8 | 33, | 0,104990, 5044,2 |
| 6,  | 0,016410, 138,47  | 20, | 0,062340, 2805,3 | 34, | 0,108270, 5207,5 |
| 7,  | 0,019690, 223,7   | 21, | 0,065620, 3013,9 | 35, | 0,111550, 5378   |
| 8,  | 0,022970, 324,01  | 22, | 0,068900, 3211,9 | 36, | 0,114830, 5548,4 |
| 9,  | 0,026250, 490,9   | 23, | 0,072180, 3396,5 | 37, | 0,118110, 5718,9 |
| 10, | 0,029530, 681,78  | 24, | 0,075460, 3572,3 | 38, | 0,121390, 5887,5 |
| 11, | 0,032810, 895,74  | 25, | 0,078740, 3749,8 | 39, | 0,124680, 6059,8 |
| 12, | 0,036090, 1115    | 26, | 0,082020, 3918,5 | 40, | 0,127960, 6228,4 |
| 13, | 0,039370, 1334,3  | 27, | 0,085310, 4083,6 | 41, | 0,131240, 6405,1 |
| 14, | 0,042650, 1542    | 28, | 0,088590, 4239,9 | 42, | 0,134520, 6578,2 |

3 nolu Numune:

Saniye / x yönünde uzama (inç) / yük (kg/cm<sup>2</sup>)

|     |                      |     |                      |     |                      |
|-----|----------------------|-----|----------------------|-----|----------------------|
| 1,  | .000000, -.903900    | 18, | .055690, 1982.300000 | 35, | .111470, 4445.800000 |
| 2,  | .003200, 35.494000   | 19, | .058970, 2151.900000 | 36, | .114750, 4571.900000 |
| 3,  | .006480, 88.758000   | 20, | .062260, 2319.700000 | 37, | .118030, 4696.200000 |
| 4,  | .009760, 119.840000  | 21, | .065540, 2481.200000 | 38, | .121310, 4815.100000 |
| 5,  | .013040, 129.610000  | 22, | .068810, 2638.400000 | 39, | .124590, 4939.400000 |
| 6,  | .016320, 135.800000  | 23, | .072090, 2788.400000 | 40, | .127870, 5063.700000 |
| 7,  | .019600, 157.120000  | 24, | .075380, 2931.300000 | 41, | .131150, 5184.400000 |
| 8,  | .022890, 237.900000  | 25, | .078660, 3082.300000 | 42, | .134430, 5305.200000 |
| 9,  | .026170, 386.160000  | 26, | .081940, 3229.600000 | 43, | .137710, 5424.100000 |
| 10, | .029440, 561.050000  | 27, | .085220, 3369.900000 | 44, | .140990, 5546.600000 |
| 11, | .032730, 744.810000  | 28, | .088500, 3515.500000 | 45, | .144270, 5669.100000 |
| 12, | .036010, 921.470000  | 29, | .091780, 3652.200000 | 46, | .147560, 5791.700000 |
| 13, | .039290, 1095.500000 | 30, | .095060, 3787.100000 | 47, | .150840, 5914.200000 |
| 14, | .042570, 1268.600000 | 31, | .098340, 3923.800000 | 48, | .154120, 6038.500000 |
| 15, | .045850, 1447.900000 | 32, | .101630, 4062.300000 | 49, | .157400, 6164.500000 |
| 16, | .049130, 1629.900000 | 33, | .104910, 4190.200000 |     |                      |
| 17, | .052410, 1806.600000 | 34, | .108190, 4314.400000 |     |                      |

## EK-1 (Devam) Çekme cihazından alınan gerilme-şekil değiştirme verileri

## 4 nolu Numune:

Saniye / x yönünde uzama (inç) / yük (kg/cm<sup>2</sup>)

|     |          |             |     |          |             |     |          |             |
|-----|----------|-------------|-----|----------|-------------|-----|----------|-------------|
| 1,  | .000000, | -14.220000  | 18, | .055810, | 1685.800000 | 35, | .111420, | 4635.800000 |
| 2,  | .003150, | 17.747000   | 19, | .059090, | 1890.000000 | 36, | .114870, | 4795.600000 |
| 3,  | .006430, | 32.827000   | 20, | .062370, | 2091.500000 | 37, | .117980, | 4939.400000 |
| 4,  | .009720, | 51.478000   | 21, | .065490, | 2282.400000 | 38, | .121260, | 5090.300000 |
| 5,  | .013000, | 67.461010   | 22, | .068930, | 2492.800000 | 39, | .124540, | 5237.700000 |
| 6,  | .016440, | 81.659000   | 23, | .072050, | 2680.100000 | 40, | .127830, | 5390.400000 |
| 7,  | .019560, | 97.643010   | 24, | .075500, | 2879.000000 | 41, | .131110, | 5539.500000 |
| 8,  | .022840, | 115.390000  | 25, | .078780, | 3059.200000 | 42, | .134390, | 5692.200000 |
| 9,  | .026120, | 135.800000  | 26, | .081890, | 3226.100000 | 43, | .137670, | 5843.200000 |
| 10, | .029400, | 172.200000  | 27, | .085170, | 3387.600000 | 44, | .140940, | 5990.500000 |
| 11, | .032850, | 271.630000  | 28, | .088460, | 3552.700000 | 45, | .144230, | 6145.000000 |
| 12, | .035960, | 403.910000  | 29, | .091740, | 3716.100000 | 46, | .147510, | 6311.900000 |
| 13, | .039240, | 579.680000  | 30, | .095020, | 3874.100000 | 47, | .150790, | 6462.800000 |
| 14, | .042690, | 811.390000  | 31, | .098300, | 4028.600000 | 48, | .154070, | 6618.100000 |
| 15, | .045970, | 1039.500000 | 32, | .101580, | 4181.300000 | 49, | .157350, | 6769.100000 |
| 16, | .049090, | 1253.500000 | 33, | .104860, | 4334.000000 | 50, | .160630, | 6933.300000 |
| 17, | .052530, | 1480.800000 | 34, | .108300, | 4492.000000 |     |          |             |

## 5 nolu Numune:

Saniye / x yönünde uzama (inç) / yük (kg/cm<sup>2</sup>)

|     |          |             |     |          |             |     |          |             |
|-----|----------|-------------|-----|----------|-------------|-----|----------|-------------|
| 1,  | .000000, | -32.849000  | 18, | .055700, | 2728.000000 | 35, | .111470, | 5298.100000 |
| 2,  | .003200, | 47.047000   | 19, | .058980, | 2908.200000 | 36, | .114760, | 5449.000000 |
| 3,  | .006490, | 64.794010   | 20, | .062260, | 3082.300000 | 37, | .118040, | 5599.900000 |
| 4,  | .009770, | 96.761000   | 21, | .065540, | 3247.400000 | 38, | .121310, | 5750.800000 |
| 5,  | .013050, | 239.690000  | 22, | .068820, | 3398.300000 | 39, | .124600, | 5905.300000 |
| 6,  | .016330, | 419.890000  | 23, | .072100, | 3543.900000 | 40, | .127880, | 6059.800000 |
| 7,  | .019610, | 624.080000  | 24, | .075390, | 3689.500000 | 41, | .131160, | 6216.000000 |
| 8,  | .022890, | 833.590000  | 25, | .078670, | 3835.100000 | 42, | .134440, | 6369.600000 |
| 9,  | .026170, | 1037.800000 | 26, | .081940, | 3978.900000 | 43, | .137720, | 6507.200000 |
| 10, | .029450, | 1226.000000 | 27, | .085230, | 4126.200000 | 44, | .141000, | 6658.100000 |
| 11, | .032730, | 1408.800000 | 28, | .088510, | 4271.800000 | 45, | .144280, | 6809.000000 |
| 12, | .036020, | 1590.800000 | 29, | .091790, | 4421.000000 | 46, | .147560, | 6937.700000 |
| 13, | .039300, | 1774.600000 | 30, | .095070, | 4566.600000 | 47, | .150840, | 7097.500000 |
| 14, | .042570, | 1962.800000 | 31, | .098350, | 4708.600000 | 48, | .154130, | 7248.400000 |
| 15, | .045860, | 2154.600000 | 32, | .101630, | 4852.400000 | 49, | .157410, | 7386.100000 |
| 16, | .049140, | 2349.000000 | 33, | .104910, | 4999.800000 | 50, | .160690, | 7537.000000 |
| 17, | .052420, | 2543.400000 | 34, | .108190, | 5148.900000 |     |          |             |

# EK-1 (Devam) Çekme cihazından alınan gerilme-şekil değiştirme verileri

## 6 nolu Numune:

Saniye / x yönünde uzama (inç) / yük (kg/cm<sup>2</sup>)

|     |          |            |     |          |             |     |          |             |
|-----|----------|------------|-----|----------|-------------|-----|----------|-------------|
| 1,  | .000070, | -39.970000 | 23, | .072250, | 605.430000  | 45, | .144430, | 4238.100000 |
| 2,  | .003360, | 3.549400   | 24, | .075540, | 808.720000  | 46, | .147720, | 4374.800000 |
| 3,  | .006640, | 18.629000  | 25, | .078810, | 1011.100000 | 47, | .151000, | 4511.500000 |
| 4,  | .009920, | 53.264000  | 26, | .082100, | 1212.700000 | 48, | .154280, | 4650.000000 |
| 5,  | .013200, | 63.008000  | 27, | .085380, | 1410.600000 | 49, | .157560, | 4788.500000 |
| 6,  | .016480, | 71.893010  | 28, | .088660, | 1595.300000 | 50, | .160840, | 4930.600000 |
| 7,  | .019760, | 77.228000  | 29, | .091940, | 1769.300000 | 51, | .164120, | 5069.000000 |
| 8,  | .023040, | 80.777000  | 30, | .095220, | 1946.800000 | 52, | .167400, | 5211.100000 |
| 9,  | .026320, | 85.209010  | 31, | .098500, | 2130.600000 | 53, | .170680, | 5349.600000 |
| 10, | .029600, | 89.662000  | 32, | .101780, | 2308.100000 | 54, | .173960, | 5491.600000 |
| 11, | .032890, | 93.211010  | 33, | .105060, | 2483.900000 | 55, | .177240, | 5630.100000 |
| 12, | .036170, | 96.761000  | 34, | .108340, | 2656.100000 | 56, | .180520, | 5772.100000 |
| 13, | .039440, | 94.975010  | 35, | .111630, | 2822.100000 | 57, | .183800, | 5917.700000 |
| 14, | .042730, | 92.308010  | 36, | .114910, | 2981.900000 | 58, | .187080, | 6059.800000 |
| 15, | .046010, | 91.426000  | 37, | .118190, | 3130.200000 | 59, | .190360, | 6203.600000 |
| 16, | .049290, | 86.994000  | 38, | .121460, | 3275.800000 | 60, | .193640, | 6351.800000 |
| 17, | .052570, | 85.209010  | 39, | .124750, | 3416.000000 | 61, | .196930, | 6493.900000 |
| 18, | .055850, | 83.445010  | 40, | .128030, | 3556.300000 | 62, | .200210, | 6635.900000 |
| 19, | .059130, | 80.777000  | 41, | .131310, | 3698.300000 | 63, | .203490, | 6778.000000 |
| 20, | .062410, | 118.060000 | 42, | .134590, | 3835.100000 | 64, | .206770, | 6906.700000 |
| 21, | .065690, | 246.790000 | 43, | .137870, | 3970.000000 |     |          |             |
| 22, | .068970, | 414.560000 | 44, | .141150, | 4103.200000 |     |          |             |

## 7 nolu Numune:

Saniye / x yönünde uzama (inç) / yük (kg/cm<sup>2</sup>)

|     |          |             |     |          |             |     |          |             |
|-----|----------|-------------|-----|----------|-------------|-----|----------|-------------|
| 1,  | .000000, | -21.319000  | 14, | .042520, | 2220.300000 | 27, | .085170, | 4712.200000 |
| 2,  | .003150, | 52.360000   | 15, | .045800, | 2439.500000 | 28, | .088450, | 4868.400000 |
| 3,  | .006430, | 125.160000  | 16, | .049080, | 2660.600000 | 29, | .091730, | 5026.400000 |
| 4,  | .009710, | 256.550000  | 17, | .052360, | 2884.300000 | 30, | .095010, | 5186.200000 |
| 5,  | .012990, | 421.680000  | 18, | .055640, | 3108.900000 | 31, | .098290, | 5344.200000 |
| 6,  | .016270, | 608.100000  | 19, | .058920, | 3323.700000 | 32, | .101570, | 5505.800000 |
| 7,  | .019550, | 809.630000  | 20, | .062200, | 3529.700000 | 33, | .104850, | 5665.600000 |
| 8,  | .022830, | 1020.000000 | 21, | .065480, | 3730.300000 | 34, | .108130, | 5827.200000 |
| 9,  | .026110, | 1219.800000 | 22, | .068760, | 3913.200000 | 35, | .111410, | 5987.000000 |
| 10, | .029390, | 1415.100000 | 23, | .072040, | 4073.000000 | 36, | .114700, | 6148.500000 |
| 11, | .032670, | 1605.900000 | 24, | .075330, | 4234.600000 | 37, | .117980, | 6311.900000 |
| 12, | .035960, | 1803.000000 | 25, | .078610, | 4394.300000 | 38, | .121260, | 6471.700000 |
| 13, | .039240, | 2007.200000 | 26, | .081890, | 4554.100000 |     |          |             |

## 8 nolu Numune:

Saniye / x yönünde uzama (inç) / yük (kg/cm<sup>2</sup>)

|     |          |             |     |          |             |     |          |             |
|-----|----------|-------------|-----|----------|-------------|-----|----------|-------------|
| 1,  | .000040, | .881850     | 14, | .042860, | 2288.600000 | 27, | .085350, | 4483.100000 |
| 2,  | .003320, | 18.629000   | 15, | .045980, | 2439.500000 | 28, | .088630, | 4655.300000 |
| 3,  | .006610, | 156.240000  | 16, | .049260, | 2600.200000 | 29, | .092070, | 4838.200000 |
| 4,  | .009890, | 375.510000  | 17, | .052700, | 2769.800000 | 30, | .095190, | 5001.600000 |
| 5,  | .013330, | 617.870000  | 18, | .055820, | 2923.400000 | 31, | .098470, | 5168.500000 |
| 6,  | .016450, | 820.270000  | 19, | .059260, | 3102.700000 | 32, | .101750, | 5330.000000 |
| 7,  | .019730, | 1010.200000 | 20, | .062380, | 3263.300000 | 33, | .105030, | 5489.800000 |
| 8,  | .023010, | 1208.200000 | 21, | .065660, | 3430.200000 | 34, | .108480, | 5646.100000 |
| 9,  | .026290, | 1408.800000 | 22, | .069100, | 3613.100000 | 35, | .111760, | 5809.400000 |
| 10, | .029740, | 1612.100000 | 23, | .072220, | 3781.800000 | 36, | .115040, | 5971.000000 |
| 11, | .033020, | 1795.000000 | 24, | .075500, | 3957.600000 | 37, | .118310, | 6132.600000 |
| 12, | .036300, | 1969.000000 | 25, | .078780, | 4133.300000 | 38, | .121430, | 6287.000000 |
| 13, | .039580, | 2131.500000 | 26, | .082060, | 4310.900000 |     |          |             |

## EK-1 (Devam) Çekme cihazından alınan gerilme-şekil değiştirme verileri

## 9 nolu Numune:

Saniye / x yönünde uzama (inç) / yük (kg/cm<sup>2</sup>)

|                         |                          |                          |
|-------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 1, .000000, .881850     | 10, .029460, 2025.800000 | 19, .058990, 4064.100000 |
| 2, .003220, 71.011000   | 11, .032750, 2256.700000 | 20, .062280, 4263.000000 |
| 3, .006500, 305.380000  | 12, .036030, 2489.200000 | 21, .065560, 4447.600000 |
| 4, .009780, 569.040000  | 13, .039310, 2720.900000 | 22, .068830, 4621.600000 |
| 5, .013060, 833.590000  | 14, .042590, 2956.200000 | 23, .072110, 4797.400000 |
| 6, .016340, 1089.300000 | 15, .045870, 3188.800000 | 24, .075400, 4974.900000 |
| 7, .019620, 1331.600000 | 16, .049150, 3419.600000 | 25, .078680, 5148.900000 |
| 8, .022910, 1564.200000 | 17, .052430, 3645.100000 | 26, .081960, 5314.000000 |
| 9, .026190, 1794.100000 | 18, .055710, 3856.400000 | 27, .085240, 5482.700000 |

## 10 nolu Numune:

Saniye / x yönünde uzama (inç) / yük (kg/cm<sup>2</sup>)

|                         |                          |                          |
|-------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 1, .000000, .881850     | 16, .049220, 246.790000  | 31, .098430, 3732.100000 |
| 2, .003280, 7.980700    | 17, .052500, 420.770000  | 32, .101710, 3930.900000 |
| 3, .006570, 8.862599    | 18, .055780, 657.820000  | 33, .104990, 4120.900000 |
| 4, .009850, 9.744400    | 19, .059060, 911.700000  | 34, .108270, 4309.100000 |
| 5, .013130, 9.744400    | 20, .062340, 1157.600000 | 35, .111550, 4499.100000 |
| 6, .016410, 10.648000   | 21, .065620, 1402.600000 | 36, .114830, 4682.000000 |
| 7, .019690, 11.530000   | 22, .068900, 1645.900000 | 37, .118110, 4866.600000 |
| 8, .022970, 12.412000   | 23, .072180, 1886.500000 | 38, .121390, 5042.400000 |
| 9, .026250, 14.198000   | 24, .075460, 2125.300000 | 39, .124680, 5216.400000 |
| 10, .029530, 15.961000  | 25, .078740, 2364.900000 | 40, .127960, 5392.200000 |
| 11, .032810, 19.511000  | 26, .082020, 2606.400000 | 41, .131240, 5571.500000 |
| 12, .036090, 22.179000  | 27, .085310, 2842.600000 | 42, .134520, 5749.000000 |
| 13, .039370, 35.494000  | 28, .088590, 3076.900000 | 43, .137800, 5924.800000 |
| 14, .042650, 71.011000  | 29, .091870, 3302.400000 | 44, .141080, 6107.700000 |
| 15, .045940, 139.380000 | 30, .095150, 3520.800000 |                          |

## EK-2 Strain-gage'lerden alınan şekil değişimi verileri

(E x = 10<sup>x</sup>)

1 numaralı numune:

Saniye,

Strain-gage bağlandığı devre numarası / direnç değeri / boşluk / şekil değişimi oranı

|                               |                               |                                |
|-------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|
| 0.00                          | 5.67                          | 11.33                          |
| 1 118.9213 0.0000 9.318E-0006 | 1 119.1751 0.0000 1.025E-0003 | 1 119.1867 0.0000 1.072E-0003  |
| 5 119.8906 0.0000 0.000E+0000 | 5 119.9069 0.0000 6.488E-0005 | 5 119.9092 0.0000 7.415E-0005  |
| 0.33                          | 6.00                          | 11.67                          |
| 1 119.0028 0.0000 3.355E-0004 | 1 119.1751 0.0000 1.025E-0003 | 1 119.1890 0.0000 1.081E-0003  |
| 5 119.9116 0.0000 8.342E-0005 | 5 119.9069 0.0000 6.488E-0005 | 5 119.9069 0.0000 6.488E-0005  |
| 0.67                          | 6.33                          | 12.00                          |
| 1 119.0936 0.0000 6.990E-0004 | 1 119.1727 0.0000 1.016E-0003 | 1 119.1890 0.0000 1.081E-0003  |
| 5 119.9302 0.0000 1.576E-0004 | 5 119.9092 0.0000 7.415E-0005 | 5 119.9069 0.0000 6.488E-0005  |
| 1.00                          | 6.67                          | 12.33                          |
| 1 119.1145 0.0000 7.829E-0004 | 1 119.1774 0.0000 1.035E-0003 | 1 119.1890 0.0000 1.081E-0003  |
| 5 119.9256 0.0000 1.390E-0004 | 5 119.9092 0.0000 7.415E-0005 | 5 119.9092 0.0000 7.415E-0005  |
| 1.33                          | 7.00                          | 12.67                          |
| 1 119.1331 0.0000 8.575E-0004 | 1 119.1844 0.0000 1.063E-0003 | 1 119.1914 0.0000 1.091E-0003  |
| 5 119.9209 0.0000 1.205E-0004 | 5 119.9092 0.0000 7.415E-0005 | 5 119.9092 0.0000 7.415E-0005  |
| 1.67                          | 7.33                          | 13.00                          |
| 1 119.1471 0.0000 9.134E-0004 | 1 119.1867 0.0000 1.072E-0003 | 1 119.1960 0.0000 1.109E-0003  |
| 5 119.9186 0.0000 1.112E-0004 | 5 119.9092 0.0000 7.415E-0005 | 5 119.9092 0.0000 7.415E-0005  |
| 2.00                          | 7.67                          | 13.33                          |
| 1 119.1588 0.0000 9.601E-0004 | 1 119.1867 0.0000 1.072E-0003 | 1 119.2007 0.0000 1.128E-0003  |
| 5 119.9162 0.0000 1.020E-0004 | 5 119.9092 0.0000 7.415E-0005 | 5 119.9069 0.0000 6.488E-0005  |
| 2.33                          | 8.00                          | 13.67                          |
| 1 119.1657 0.0000 9.880E-0004 | 1 119.1867 0.0000 1.072E-0003 | 1 119.2053 0.0000 1.147E-0003  |
| 5 119.9139 0.0000 9.270E-0005 | 5 119.9092 0.0000 7.415E-0005 | 5 119.9022 0.0000 4.636E-0005  |
| 2.67                          | 8.33                          | 14.00                          |
| 1 119.1704 0.0000 1.007E-0003 | 1 119.1844 0.0000 1.063E-0003 | 1 119.2147 0.0000 1.184E-0003  |
| 5 119.9116 0.0000 8.342E-0005 | 5 119.9092 0.0000 7.415E-0005 | 5 119.9022 0.0000 4.636E-0005  |
| 3.00                          | 8.67                          | 14.33                          |
| 1 119.1704 0.0000 1.007E-0003 | 1 119.1867 0.0000 1.072E-0003 | 1 119.2240 0.0000 1.221E-0003  |
| 5 119.9092 0.0000 7.415E-0005 | 5 119.9092 0.0000 7.415E-0005 | 5 119.9022 0.0000 4.636E-0005  |
| 3.33                          | 9.00                          | 14.67                          |
| 1 119.1727 0.0000 1.016E-0003 | 1 119.1890 0.0000 1.081E-0003 | 1 119.2333 0.0000 1.258E-0003  |
| 5 119.9092 0.0000 7.415E-0005 | 5 119.9092 0.0000 7.415E-0005 | 5 119.9022 0.0000 4.636E-0005  |
| 3.67                          | 9.33                          | 15.00                          |
| 1 119.1751 0.0000 1.025E-0003 | 1 119.1867 0.0000 1.072E-0003 | 1 119.2449 0.0000 1.305E-0003  |
| 5 119.9092 0.0000 7.415E-0005 | 5 119.9092 0.0000 7.415E-0005 | 5 119.8999 0.0000 3.709E-0005  |
| 4.00                          | 9.67                          | 15.33                          |
| 1 119.1751 0.0000 1.025E-0003 | 1 119.1867 0.0000 1.072E-0003 | 1 119.2589 0.0000 1.361E-0003  |
| 5 119.9069 0.0000 6.488E-0005 | 5 119.9092 0.0000 7.415E-0005 | 5 119.8976 0.0000 2.782E-0005  |
| 4.33                          | 10.00                         | 15.67                          |
| 1 119.1774 0.0000 1.035E-0003 | 1 119.1867 0.0000 1.072E-0003 | 1 119.2729 0.0000 1.417E-0003  |
| 5 119.9069 0.0000 6.488E-0005 | 5 119.9069 0.0000 6.488E-0005 | 5 119.8929 0.0000 9.303E-0006  |
| 4.67                          | 10.33                         | 16.00                          |
| 1 119.1751 0.0000 1.025E-0003 | 1 119.1867 0.0000 1.072E-0003 | 1 119.2892 0.0000 1.482E-0003  |
| 5 119.9069 0.0000 6.488E-0005 | 5 119.9069 0.0000 6.488E-0005 | 5 119.8882 0.0000 -9.212E-0006 |
| 5.00                          | 10.67                         | 16.33                          |
| 1 119.1727 0.0000 1.016E-0003 | 1 119.1867 0.0000 1.072E-0003 | 1 119.3032 0.0000 1.538E-0003  |
| 5 119.9092 0.0000 7.415E-0005 | 5 119.9069 0.0000 6.488E-0005 | 5 119.8836 0.0000 -2.776E-0005 |
| 5.33                          | 11.00                         | 16.67                          |
| 1 119.1727 0.0000 1.016E-0003 | 1 119.1867 0.0000 1.072E-0003 | 1 119.3218 0.0000 1.613E-0003  |
| 5 119.9092 0.0000 7.415E-0005 | 5 119.9092 0.0000 7.415E-0005 | 5 119.8766 0.0000 -5.561E-0005 |

## EK-2 (devam) Strain-gage'lerden alınan şekil değişimi verileri

|                                |                                |                                |
|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| 17.00                          | 24.33                          | 31.67                          |
| 1 119.3381 0.0000 1.678E-0003  | 1 119.6784 0.0000 3.041E-0003  | 1 120.0329 0.0000 4.460E-0003  |
| 5 119.8719 0.0000 -7.406E-0005 | 5 119.7483 0.0000 -5.650E-0004 | 5 119.5362 0.0000 -1.408E-0003 |
| 17.33                          | 24.67                          | 32.00                          |
| 1 119.3544 0.0000 1.743E-0003  | 1 119.6947 0.0000 3.106E-0003  | 1 120.0516 0.0000 4.535E-0003  |
| 5 119.8649 0.0000 -1.019E-0004 | 5 119.7413 0.0000 -5.928E-0004 | 5 119.5268 0.0000 -1.445E-0003 |
| 17.67                          | 25.00                          | 32.33                          |
| 1 119.3707 0.0000 1.809E-0003  | 1 119.7110 0.0000 3.171E-0003  | 1 120.0632 0.0000 4.582E-0003  |
| 5 119.8602 0.0000 -1.205E-0004 | 5 119.7343 0.0000 -6.206E-0004 | 5 119.5198 0.0000 -1.472E-0003 |
| 18.00                          | 25.33                          | 32.67                          |
| 1 119.3824 0.0000 1.855E-0003  | 1 119.7273 0.0000 3.237E-0003  | 1 120.0772 0.0000 4.638E-0003  |
| 5 119.8556 0.0000 -1.389E-0004 | 5 119.7273 0.0000 -6.484E-0004 | 5 119.5128 0.0000 -1.500E-0003 |
| 18.33                          | 25.67                          | 33.00                          |
| 1 119.3940 0.0000 1.902E-0003  | 1 119.7460 0.0000 3.311E-0003  | 1 120.0936 0.0000 4.703E-0003  |
| 5 119.8532 0.0000 -1.482E-0004 | 5 119.7203 0.0000 -6.762E-0004 | 5 119.5059 0.0000 -1.528E-0003 |
| 18.67                          | 26.00                          | 33.33                          |
| 1 119.4103 0.0000 1.967E-0003  | 1 119.7623 0.0000 3.377E-0003  | 1 120.1099 0.0000 4.769E-0003  |
| 5 119.8462 0.0000 -1.760E-0004 | 5 119.7156 0.0000 -6.947E-0004 | 5 119.5012 0.0000 -1.547E-0003 |
| 19.00                          | 26.33                          | 33.67                          |
| 1 119.4243 0.0000 2.023E-0003  | 1 119.7786 0.0000 3.442E-0003  | 1 120.1309 0.0000 4.853E-0003  |
| 5 119.8416 0.0000 -1.945E-0004 | 5 119.7087 0.0000 -7.225E-0004 | 5 119.4895 0.0000 -1.593E-0003 |
| 19.33                          | 26.67                          | 34.00                          |
| 1 119.4383 0.0000 2.079E-0003  | 1 119.7973 0.0000 3.517E-0003  | 1 120.1472 0.0000 4.918E-0003  |
| 5 119.8369 0.0000 -2.131E-0004 | 5 119.7040 0.0000 -7.410E-0004 | 5 119.4779 0.0000 -1.639E-0003 |
| 19.67                          | 27.00                          | 34.33                          |
| 1 119.4569 0.0000 2.154E-0003  | 1 119.8136 0.0000 3.582E-0003  | 1 120.1636 0.0000 4.984E-0003  |
| 5 119.8299 0.0000 -2.408E-0004 | 5 119.6970 0.0000 -7.688E-0004 | 5 119.4662 0.0000 -1.685E-0003 |
| 20.00                          | 27.33                          | 34.67                          |
| 1 119.4732 0.0000 2.219E-0003  | 1 119.8299 0.0000 3.648E-0003  | 1 120.1776 0.0000 5.040E-0003  |
| 5 119.8229 0.0000 -2.687E-0004 | 5 119.6900 0.0000 -7.966E-0004 | 5 119.4569 0.0000 -1.722E-0003 |
| 20.33                          | 27.67                          | 35.00                          |
| 1 119.4872 0.0000 2.275E-0003  | 1 119.8462 0.0000 3.713E-0003  | 1 120.1893 0.0000 5.087E-0003  |
| 5 119.8183 0.0000 -2.872E-0004 | 5 119.6853 0.0000 -8.151E-0004 | 5 119.4476 0.0000 -1.759E-0003 |
| 20.67                          | 28.00                          | 35.33                          |
| 1 119.5035 0.0000 2.341E-0003  | 1 119.8626 0.0000 3.778E-0003  | 1 120.2033 0.0000 5.143E-0003  |
| 5 119.8136 0.0000 -3.057E-0004 | 5 119.6807 0.0000 -8.336E-0004 | 5 119.4406 0.0000 -1.787E-0003 |
| 21.00                          | 28.33                          | 35.67                          |
| 1 119.5175 0.0000 2.397E-0003  | 1 119.8766 0.0000 3.834E-0003  | 1 120.2173 0.0000 5.199E-0003  |
| 5 119.8066 0.0000 -3.335E-0004 | 5 119.6760 0.0000 -8.522E-0004 | 5 119.4313 0.0000 -1.824E-0003 |
| 21.33                          | 28.67                          | 36.00                          |
| 1 119.5315 0.0000 2.453E-0003  | 1 119.8929 0.0000 3.900E-0003  | 1 120.2266 0.0000 5.236E-0003  |
| 5 119.8019 0.0000 -3.520E-0004 | 5 119.6690 0.0000 -8.799E-0004 | 5 119.4243 0.0000 -1.852E-0003 |
| 21.67                          | 29.00                          | 36.33                          |
| 1 119.5478 0.0000 2.518E-0003  | 1 119.9092 0.0000 3.965E-0003  | 1 120.2430 0.0000 5.302E-0003  |
| 5 119.7973 0.0000 -3.705E-0004 | 5 119.6620 0.0000 -9.077E-0004 | 5 119.4173 0.0000 -1.880E-0003 |
| 22.00                          | 29.33                          | 36.67                          |
| 1 119.5641 0.0000 2.583E-0003  | 1 119.9256 0.0000 4.031E-0003  | 1 120.2593 0.0000 5.367E-0003  |
| 5 119.7903 0.0000 -3.983E-0004 | 5 119.6550 0.0000 -9.355E-0004 | 5 119.4057 0.0000 -1.926E-0003 |
| 22.33                          | 29.67                          | 37.00                          |
| 1 119.5804 0.0000 2.649E-0003  | 1 119.9419 0.0000 4.096E-0003  | 1 120.2756 0.0000 5.432E-0003  |
| 5 119.7856 0.0000 -4.168E-0004 | 5 119.6364 0.0000 -1.010E-0003 | 5 119.3940 0.0000 -1.972E-0003 |
| 22.67                          | 30.00                          | 37.33                          |
| 1 119.5968 0.0000 2.714E-0003  | 1 119.9606 0.0000 4.171E-0003  | 1 120.2850 0.0000 5.470E-0003  |
| 5 119.7809 0.0000 -4.354E-0004 | 5 119.6014 0.0000 -1.148E-0003 | 5 119.3847 0.0000 -2.009E-0003 |
| 23.00                          | 30.33                          | 37.67                          |
| 1 119.6131 0.0000 2.779E-0003  | 1 119.9769 0.0000 4.236E-0003  | 1 120.2990 0.0000 5.526E-0003  |
| 5 119.7763 0.0000 -4.539E-0004 | 5 119.5758 0.0000 -1.250E-0003 | 5 119.3754 0.0000 -2.046E-0003 |
| 23.33                          | 30.67                          | 38.00                          |
| 1 119.6271 0.0000 2.835E-0003  | 1 119.9909 0.0000 4.292E-0003  | 1 120.3153 0.0000 5.591E-0003  |
| 5 119.7693 0.0000 -4.817E-0004 | 5 119.5665 0.0000 -1.287E-0003 | 5 119.3637 0.0000 -2.093E-0003 |
| 23.67                          | 31.00                          | 38.33                          |
| 1 119.6410 0.0000 2.891E-0003  | 1 120.0049 0.0000 4.348E-0003  | 1 120.3293 0.0000 5.647E-0003  |
| 5 119.7646 0.0000 -5.002E-0004 | 5 119.5571 0.0000 -1.324E-0003 | 5 119.3567 0.0000 -2.120E-0003 |
| 24.00                          | 31.33                          | 38.67                          |
| 1 119.6574 0.0000 2.957E-0003  | 1 120.0189 0.0000 4.404E-0003  | 1 120.3480 0.0000 5.722E-0003  |
| 5 119.7576 0.0000 -5.280E-0004 | 5 119.5455 0.0000 -1.371E-0003 | 5 119.3451 0.0000 -2.167E-0003 |

## EK-2 (devam) Strain-gage'lerden alınan şekil değişimi verileri

|                                |                                |                               |
|--------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|
| 39.00                          | 46.33                          | 53.67                         |
| 1 120.3597 0.0000 5.769E-0003  | 1 120.7289 0.0000 7.247E-0003  | 1 119.7926 0.0000 3.498E-0003 |
| 5 119.3334 0.0000 -2.213E-0003 | 5 118.9353 0.0000 -3.794E-0003 | 5 120.0539 0.0000 6.487E-0004 |
| 39.33                          | 46.67                          | 54.00                         |
| 1 120.3714 0.0000 5.816E-0003  | 1 120.7429 0.0000 7.303E-0003  | 1 119.7693 0.0000 3.405E-0003 |
| 5 119.3241 0.0000 -2.250E-0003 | 5 118.9306 0.0000 -3.813E-0003 | 5 120.0539 0.0000 6.487E-0004 |
| 39.67                          | 47.00                          | 54.33                         |
| 1 120.3877 0.0000 5.881E-0003  | 1 120.7593 0.0000 7.369E-0003  | 1 119.7973 0.0000 3.517E-0003 |
| 5 119.3101 0.0000 -2.305E-0003 | 5 118.9004 0.0000 -3.933E-0003 | 5 120.0562 0.0000 6.580E-0004 |
| 40.00                          | 47.33                          | 54.67                         |
| 1 120.4017 0.0000 5.937E-0003  | 1 120.7756 0.0000 7.434E-0003  | 1 119.8299 0.0000 3.648E-0003 |
| 5 119.2985 0.0000 -2.352E-0003 | 5 118.8678 0.0000 -4.062E-0003 | 5 120.0562 0.0000 6.580E-0004 |
| 40.33                          | 47.67                          | 55.00                         |
| 1 120.4181 0.0000 6.003E-0003  | 1 120.7943 0.0000 7.509E-0003  | 1 119.8019 0.0000 3.535E-0003 |
| 5 119.2892 0.0000 -2.389E-0003 | 5 118.8399 0.0000 -4.173E-0003 | 5 120.0562 0.0000 6.580E-0004 |
| 40.67                          | 48.00                          | 55.33                         |
| 1 120.4321 0.0000 6.059E-0003  | 1 120.9065 0.0000 7.959E-0003  | 1 119.7809 0.0000 3.451E-0003 |
| 5 119.2775 0.0000 -2.435E-0003 | 5 118.6608 0.0000 -4.885E-0003 | 5 120.0562 0.0000 6.580E-0004 |
| 41.00                          | 48.33                          | 55.67                         |
| 1 120.4438 0.0000 6.106E-0003  | 1 121.0211 0.0000 8.418E-0003  | 1 119.7670 0.0000 3.395E-0003 |
| 5 119.2682 0.0000 -2.472E-0003 | 5 118.5096 0.0000 -5.485E-0003 | 5 120.0586 0.0000 6.673E-0004 |
| 41.33                          | 48.67                          | 56.00                         |
| 1 120.4601 0.0000 6.171E-0003  | 1 120.9814 0.0000 8.258E-0003  | 1 119.8019 0.0000 3.535E-0003 |
| 5 119.2589 0.0000 -2.509E-0003 | 5 118.9446 0.0000 -3.757E-0003 | 5 120.0586 0.0000 6.673E-0004 |
| 41.67                          | 49.00                          | 56.33                         |
| 1 120.4812 0.0000 6.255E-0003  | 1 120.9533 0.0000 8.146E-0003  | 1 119.8486 0.0000 3.722E-0003 |
| 5 119.2449 0.0000 -2.564E-0003 | 5 119.3730 0.0000 -2.055E-0003 | 5 120.0586 0.0000 6.673E-0004 |
| 42.00                          | 49.33                          | 56.67                         |
| 1 120.4998 0.0000 6.330E-0003  | 1 120.9978 0.0000 8.324E-0003  | 1 119.8626 0.0000 3.778E-0003 |
| 5 119.2333 0.0000 -2.611E-0003 | 5 119.3660 0.0000 -2.083E-0003 | 5 120.0586 0.0000 6.673E-0004 |
| 42.33                          | 49.67                          | 57.00                         |
| 1 120.5115 0.0000 6.377E-0003  | 1 121.0375 0.0000 8.483E-0003  | 1 119.8369 0.0000 3.676E-0003 |
| 5 119.2216 0.0000 -2.657E-0003 | 5 119.3591 0.0000 -2.111E-0003 | 5 120.0609 0.0000 6.765E-0004 |
| 42.67                          | 50.00                          | 57.33                         |
| 1 120.5279 0.0000 6.442E-0003  | 1 121.0749 0.0000 8.633E-0003  | 1 119.7879 0.0000 3.479E-0003 |
| 5 119.2100 0.0000 -2.703E-0003 | 5 119.3497 0.0000 -2.148E-0003 | 5 120.0609 0.0000 6.765E-0004 |
| 43.00                          | 50.33                          | 57.67                         |
| 1 120.5489 0.0000 6.527E-0003  | 1 121.1100 0.0000 8.774E-0003  | 1 119.7739 0.0000 3.423E-0003 |
| 5 119.1984 0.0000 -2.749E-0003 | 5 119.3404 0.0000 -2.185E-0003 | 5 120.0609 0.0000 6.765E-0004 |
| 43.33                          | 50.67                          | 58.00                         |
| 1 120.5629 0.0000 6.583E-0003  | 1 121.1451 0.0000 8.914E-0003  | 1 119.7879 0.0000 3.479E-0003 |
| 5 119.1844 0.0000 -2.805E-0003 | 5 119.3311 0.0000 -2.222E-0003 | 5 120.0609 0.0000 6.765E-0004 |
| 43.67                          | 51.00                          |                               |
| 1 120.5793 0.0000 6.648E-0003  | 1 121.1756 0.0000 9.036E-0003  |                               |
| 5 119.1518 0.0000 -2.934E-0003 | 5 119.3241 0.0000 -2.250E-0003 |                               |
| 44.00                          | 51.33                          |                               |
| 1 120.5980 0.0000 6.723E-0003  | 1 121.2036 0.0000 9.148E-0003  |                               |
| 5 119.1145 0.0000 -3.082E-0003 | 5 119.3171 0.0000 -2.278E-0003 |                               |
| 44.33                          | 51.67                          |                               |
| 1 120.6120 0.0000 6.779E-0003  | 1 120.6798 0.0000 7.051E-0003  |                               |
| 5 119.1006 0.0000 -3.138E-0003 | 5 119.5944 0.0000 -1.176E-0003 |                               |
| 44.67                          | 52.00                          |                               |
| 1 120.6284 0.0000 6.845E-0003  | 1 120.0002 0.0000 4.330E-0003  |                               |
| 5 119.0912 0.0000 -3.175E-0003 | 5 119.9536 0.0000 2.502E-0004  |                               |
| 45.00                          | 52.33                          |                               |
| 1 120.6471 0.0000 6.920E-0003  | 1 119.8322 0.0000 3.657E-0003  |                               |
| 5 119.0773 0.0000 -3.230E-0003 | 5 120.0422 0.0000 6.024E-0004  |                               |
| 45.33                          | 52.67                          |                               |
| 1 120.6611 0.0000 6.976E-0003  | 1 119.8183 0.0000 3.601E-0003  |                               |
| 5 119.0354 0.0000 -3.397E-0003 | 5 120.0469 0.0000 6.209E-0004  |                               |
| 45.67                          | 53.00                          |                               |
| 1 120.6821 0.0000 7.060E-0003  | 1 119.7973 0.0000 3.517E-0003  |                               |
| 5 118.9562 0.0000 -3.711E-0003 | 5 120.0516 0.0000 6.395E-0004  |                               |
| 46.00                          | 53.33                          |                               |
| 1 120.7078 0.0000 7.163E-0003  | 1 119.7903 0.0000 3.489E-0003  |                               |
| 5 118.9190 0.0000 -3.859E-0003 | 5 120.0516 0.0000 6.395E-0004  |                               |

## EK-2 (devam) Strain-gage'lerden alınan şekil değişimi verileri

2 numaralı numune:

Saniye,

Strain-gage bağlandığı devre numarası / direnç değeri / boşluk / şekil değişimi oranı

|                               |                               |                               |
|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| 0.00                          | 1 118.8189 0.0000 1.026E-0004 | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 |
| 1 118.7934 0.0000 0.000E+0000 | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 | 12.33                         |
| 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 | 6.33                          | 1 118.9586 0.0000 6.622E-0004 |
| 0.33                          | 1 118.8213 0.0000 1.119E-0004 | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 |
| 1 118.7934 0.0000 0.000E+0000 | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 | 12.67                         |
| 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 | 6.67                          | 1 118.9679 0.0000 6.996E-0004 |
| 0.67                          | 1 118.8259 0.0000 1.306E-0004 | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 |
| 1 118.7934 0.0000 0.000E+0000 | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 | 13.00                         |
| 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 | 7.00                          | 1 118.9749 0.0000 7.275E-0004 |
| 1.00                          | 1 118.8283 0.0000 1.399E-0004 | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 |
| 1 118.7957 0.0000 9.328E-0006 | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 | 13.33                         |
| 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 | 7.33                          | 1 118.9842 0.0000 7.649E-0004 |
| 1.33                          | 1 118.8329 0.0000 1.585E-0004 | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 |
| 1 118.7957 0.0000 9.328E-0006 | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 | 13.67                         |
| 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 | 7.67                          | 1 118.9911 0.0000 7.928E-0004 |
| 1.67                          | 1 118.8399 0.0000 1.866E-0004 | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 |
| 1 118.7957 0.0000 9.328E-0006 | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 | 14.00                         |
| 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 | 8.00                          | 1 119.0005 0.0000 8.302E-0004 |
| 2.00                          | 1 118.8469 0.0000 2.145E-0004 | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 |
| 1 118.7980 0.0000 1.859E-0005 | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 | 14.33                         |
| 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 | 8.33                          | 1 119.0074 0.0000 8.582E-0004 |
| 2.33                          | 1 118.8539 0.0000 2.425E-0004 | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 |
| 1 118.7980 0.0000 1.859E-0005 | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 | 14.67                         |
| 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 | 8.67                          | 1 119.0167 0.0000 8.955E-0004 |
| 2.67                          | 1 118.8608 0.0000 2.704E-0004 | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 |
| 1 118.7980 0.0000 1.859E-0005 | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 | 15.00                         |
| 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 | 9.00                          | 1 119.0237 0.0000 9.235E-0004 |
| 3.00                          | 1 118.8701 0.0000 3.078E-0004 | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 |
| 1 118.7980 0.0000 1.859E-0005 | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 | 15.33                         |
| 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 | 9.33                          | 1 119.0330 0.0000 9.608E-0004 |
| 3.33                          | 1 118.8771 0.0000 3.357E-0004 | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 |
| 1 118.8003 0.0000 2.798E-0005 | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 | 15.67                         |
| 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 | 9.67                          | 1 119.0400 0.0000 9.888E-0004 |
| 3.67                          | 1 118.8864 0.0000 3.730E-0004 | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 |
| 1 118.8003 0.0000 2.798E-0005 | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 | 16.00                         |
| 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 | 10.00                         | 1 119.0493 0.0000 1.026E-0003 |
| 4.00                          | 1 118.8934 0.0000 4.011E-0004 | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 |
| 1 118.8003 0.0000 2.798E-0005 | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 | 16.33                         |
| 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 | 10.33                         | 1 119.0563 0.0000 1.054E-0003 |
| 4.33                          | 1 118.9027 0.0000 4.383E-0004 | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 |
| 1 118.8027 0.0000 3.728E-0005 | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 | 16.67                         |
| 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 | 10.67                         | 1 119.0633 0.0000 1.082E-0003 |
| 4.67                          | 1 118.9120 0.0000 4.757E-0004 | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 |
| 1 118.8027 0.0000 3.728E-0005 | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 | 17.00                         |
| 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 | 11.00                         | 1 119.0726 0.0000 1.119E-0003 |
| 5.00                          | 1 118.9213 0.0000 5.130E-0004 | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 |
| 1 118.8073 0.0000 5.594E-0005 | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 | 17.33                         |
| 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 | 11.33                         | 1 119.0796 0.0000 1.147E-0003 |
| 5.33                          | 1 118.9306 0.0000 5.502E-0004 | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 |
| 1 118.8096 0.0000 6.526E-0005 | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 | 17.67                         |
| 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 | 11.67                         | 1 119.0889 0.0000 1.185E-0003 |
| 5.67                          | 1 118.9399 0.0000 5.876E-0004 | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 |
| 1 118.8143 0.0000 8.392E-0005 | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 | 18.00                         |
| 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 | 12.00                         | 1 119.0982 0.0000 1.222E-0003 |
| 6.00                          | 1 118.9493 0.0000 6.249E-0004 | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 |

## EK-2 (devam) Strain-gage'lerden alınan şekil değişimi verileri

|                               |                               |                               |
|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| 18.33                         | 25.67                         | 33.00                         |
| 1 119.1052 0.0000 1.250E-0003 | 1 119.2519 0.0000 1.838E-0003 | 1 119.3824 0.0000 2.361E-0003 |
| 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 |
| 18.67                         | 26.00                         | 33.33                         |
| 1 119.1122 0.0000 1.278E-0003 | 1 119.2589 0.0000 1.866E-0003 | 1 119.3870 0.0000 2.380E-0003 |
| 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 |
| 19.00                         | 26.33                         | 33.67                         |
| 1 119.1215 0.0000 1.315E-0003 | 1 119.2635 0.0000 1.885E-0003 | 1 119.3917 0.0000 2.398E-0003 |
| 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 |
| 19.33                         | 26.67                         | 34.00                         |
| 1 119.1285 0.0000 1.343E-0003 | 1 119.2705 0.0000 1.913E-0003 | 1 119.3987 0.0000 2.426E-0003 |
| 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 |
| 19.67                         | 27.00                         | 34.33                         |
| 1 119.1378 0.0000 1.381E-0003 | 1 119.2752 0.0000 1.932E-0003 | 1 119.4033 0.0000 2.445E-0003 |
| 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 |
| 20.00                         | 27.33                         | 34.67                         |
| 1 119.1448 0.0000 1.409E-0003 | 1 119.2799 0.0000 1.950E-0003 | 1 119.4080 0.0000 2.464E-0003 |
| 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 |
| 20.33                         | 27.67                         | 35.00                         |
| 1 119.1518 0.0000 1.437E-0003 | 1 119.2868 0.0000 1.978E-0003 | 1 119.4150 0.0000 2.492E-0003 |
| 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 |
| 20.67                         | 28.00                         | 35.33                         |
| 1 119.1588 0.0000 1.465E-0003 | 1 119.2915 0.0000 1.997E-0003 | 1 119.4220 0.0000 2.520E-0003 |
| 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 |
| 21.00                         | 28.33                         | 35.67                         |
| 1 119.1681 0.0000 1.502E-0003 | 1 119.2985 0.0000 2.025E-0003 | 1 119.4266 0.0000 2.539E-0003 |
| 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 |
| 21.33                         | 28.67                         | 36.00                         |
| 1 119.1751 0.0000 1.530E-0003 | 1 119.3055 0.0000 2.053E-0003 | 1 119.4313 0.0000 2.557E-0003 |
| 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 |
| 21.67                         | 29.00                         | 36.33                         |
| 1 119.1820 0.0000 1.558E-0003 | 1 119.3125 0.0000 2.081E-0003 | 1 119.4383 0.0000 2.585E-0003 |
| 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 |
| 22.00                         | 29.33                         | 36.67                         |
| 1 119.1890 0.0000 1.586E-0003 | 1 119.3171 0.0000 2.100E-0003 | 1 119.4429 0.0000 2.604E-0003 |
| 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 |
| 22.33                         | 29.67                         | 37.00                         |
| 1 119.1937 0.0000 1.605E-0003 | 1 119.3218 0.0000 2.118E-0003 | 1 119.4476 0.0000 2.623E-0003 |
| 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 |
| 22.67                         | 30.00                         | 37.33                         |
| 1 119.1984 0.0000 1.623E-0003 | 1 119.3288 0.0000 2.146E-0003 | 1 119.4546 0.0000 2.651E-0003 |
| 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 |
| 23.00                         | 30.33                         | 37.67                         |
| 1 119.2053 0.0000 1.651E-0003 | 1 119.3334 0.0000 2.165E-0003 | 1 119.4592 0.0000 2.669E-0003 |
| 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 |
| 23.33                         | 30.67                         | 38.00                         |
| 1 119.2100 0.0000 1.670E-0003 | 1 119.3404 0.0000 2.193E-0003 | 1 119.4639 0.0000 2.688E-0003 |
| 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 |
| 23.67                         | 31.00                         | 38.33                         |
| 1 119.2170 0.0000 1.698E-0003 | 1 119.3451 0.0000 2.212E-0003 | 1 119.4686 0.0000 2.707E-0003 |
| 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 |
| 24.00                         | 31.33                         | 38.67                         |
| 1 119.2216 0.0000 1.717E-0003 | 1 119.3521 0.0000 2.240E-0003 | 1 119.4732 0.0000 2.725E-0003 |
| 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 |
| 24.33                         | 31.67                         | 39.00                         |
| 1 119.2286 0.0000 1.745E-0003 | 1 119.3567 0.0000 2.258E-0003 | 1 119.4779 0.0000 2.744E-0003 |
| 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 |
| 24.67                         | 32.00                         | 39.33                         |
| 1 119.2356 0.0000 1.773E-0003 | 1 119.3637 0.0000 2.286E-0003 | 1 119.4826 0.0000 2.763E-0003 |
| 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 |
| 25.00                         | 32.33                         | 39.67                         |
| 1 119.2403 0.0000 1.791E-0003 | 1 119.3684 0.0000 2.305E-0003 | 1 119.4872 0.0000 2.781E-0003 |
| 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 |
| 25.33                         | 32.67                         | 40.00                         |
| 1 119.2449 0.0000 1.810E-0003 | 1 119.3754 0.0000 2.333E-0003 | 1 119.4919 0.0000 2.800E-0003 |
| 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 |

## EK-2 (devam) Strain-gage'lerden alınan şekil değişimi verileri

|                               |                               |                               |
|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| 40.33                         | 41.67                         | 43.00                         |
| 1 119.4989 0.0000 2.828E-0003 | 1 122.3214 0.0000 1.414E-0002 | 1 124.9794 0.0000 2.480E-0002 |
| 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 |
| 40.67                         | 42.00                         | 43.33                         |
| 1 119.5035 0.0000 2.847E-0003 | 1 124.9794 0.0000 2.480E-0002 | 1 124.9794 0.0000 2.480E-0002 |
| 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 |
| 41.00                         | 42.33                         | 43.67                         |
| 1 119.5082 0.0000 2.865E-0003 | 1 124.9794 0.0000 2.480E-0002 | 1 124.9794 0.0000 2.480E-0002 |
| 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 |
| 41.33                         | 42.67                         | 44.00                         |
| 1 119.6224 0.0000 3.323E-0003 | 1 124.9794 0.0000 2.480E-0002 | 1 124.9794 0.0000 2.480E-0002 |
| 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 |

3 numaralı numune:

Saniye,

Strain-gage bağlandığı devre numarası / direnç değeri / boşluk / şekil değişimi oranı

|                                |                               |                               |
|--------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| 0.00                           | 5 119.8766 0.0000 2.773E-0005 | 7.00                          |
| 1 118.8283 0.0000 0.000E+0000  | 8 121.4354 0.0000 9.185E-0006 | 1 118.8585 0.0000 1.212E-0004 |
| 5 119.8696 0.0000 0.000E+0000  | 3.67                          | 5 119.9069 0.0000 1.482E-0004 |
| 8 121.4330 0.0000 0.000E+0000  | 1 118.8445 0.0000 6.524E-0005 | 8 121.4494 0.0000 6.429E-0005 |
| 0.33                           | 5 119.8789 0.0000 3.707E-0005 | 7.33                          |
| 1 118.8259 0.0000 -9.325E-0006 | 8 121.4354 0.0000 9.185E-0006 | 1 118.8632 0.0000 1.398E-0004 |
| 5 119.8672 0.0000 -9.274E-0006 | 4.00                          | 5 119.9092 0.0000 1.575E-0004 |
| 8 121.4330 0.0000 0.000E+0000  | 1 118.8445 0.0000 6.524E-0005 | 8 121.4494 0.0000 6.429E-0005 |
| 0.67                           | 5 119.8789 0.0000 3.707E-0005 | 7.67                          |
| 1 118.8213 0.0000 -2.798E-0005 | 8 121.4354 0.0000 9.185E-0006 | 1 118.8678 0.0000 1.585E-0004 |
| 5 119.8672 0.0000 -9.274E-0006 | 4.33                          | 5 119.9139 0.0000 1.761E-0004 |
| 8 121.4330 0.0000 0.000E+0000  | 1 118.8445 0.0000 6.524E-0005 | 8 121.4518 0.0000 7.342E-0005 |
| 1.00                           | 5 119.8812 0.0000 4.631E-0005 | 8.00                          |
| 1 118.8213 0.0000 -2.798E-0005 | 8 121.4354 0.0000 9.185E-0006 | 1 118.8748 0.0000 1.865E-0004 |
| 5 119.8672 0.0000 -9.274E-0006 | 4.67                          | 5 119.9162 0.0000 1.854E-0004 |
| 8 121.4330 0.0000 0.000E+0000  | 1 118.8469 0.0000 7.457E-0005 | 8 121.4541 0.0000 8.260E-0005 |
| 1.33                           | 5 119.8859 0.0000 6.486E-0005 | 8.33                          |
| 1 118.8236 0.0000 -1.862E-0005 | 8 121.4377 0.0000 1.834E-0005 | 1 118.8794 0.0000 2.052E-0004 |
| 5 119.8696 0.0000 0.000E+0000  | 5.00                          | 5 119.9209 0.0000 2.039E-0004 |
| 8 121.4330 0.0000 0.000E+0000  | 1 118.8469 0.0000 7.457E-0005 | 8 121.4541 0.0000 8.260E-0005 |
| 1.67                           | 5 119.8882 0.0000 7.413E-0005 | 8.67                          |
| 1 118.8259 0.0000 -9.325E-0006 | 8 121.4377 0.0000 1.834E-0005 | 1 118.8841 0.0000 2.237E-0004 |
| 5 119.8719 0.0000 9.274E-0006  | 5.33                          | 5 119.9209 0.0000 2.039E-0004 |
| 8 121.4330 0.0000 0.000E+0000  | 1 118.8492 0.0000 8.389E-0005 | 8 121.4565 0.0000 9.182E-0005 |
| 2.00                           | 5 119.8906 0.0000 8.335E-0005 | 9.00                          |
| 1 118.8306 0.0000 9.294E-0006  | 8 121.4377 0.0000 1.834E-0005 | 1 118.8911 0.0000 2.518E-0004 |
| 5 119.8742 0.0000 1.849E-0005  | 5.67                          | 5 119.9232 0.0000 2.131E-0004 |
| 8 121.4330 0.0000 0.000E+0000  | 1 118.8492 0.0000 8.389E-0005 | 8 121.4565 0.0000 9.182E-0005 |
| 2.33                           | 5 119.8929 0.0000 9.265E-0005 | 9.33                          |
| 1 118.8329 0.0000 1.862E-0005  | 8 121.4401 0.0000 2.749E-0005 | 1 118.8957 0.0000 2.704E-0004 |
| 5 119.8766 0.0000 2.773E-0005  | 6.00                          | 5 119.9256 0.0000 2.224E-0004 |
| 8 121.4330 0.0000 0.000E+0000  | 1 118.8492 0.0000 8.389E-0005 | 8 121.4565 0.0000 9.182E-0005 |
| 2.67                           | 5 119.8952 0.0000 1.019E-0004 | 9.67                          |
| 1 118.8376 0.0000 3.733E-0005  | 8 121.4424 0.0000 3.674E-0005 | 1 118.9027 0.0000 2.983E-0004 |
| 5 119.8766 0.0000 2.773E-0005  | 6.33                          | 5 119.9279 0.0000 2.316E-0004 |
| 8 121.4354 0.0000 9.185E-0006  | 1 118.8515 0.0000 9.325E-0005 | 8 121.4588 0.0000 1.010E-0004 |
| 3.00                           | 5 119.8999 0.0000 1.204E-0004 | 10.00                         |
| 1 118.8399 0.0000 4.666E-0005  | 8 121.4448 0.0000 4.592E-0005 | 1 118.9097 0.0000 3.264E-0004 |
| 5 119.8766 0.0000 2.773E-0005  | 6.67                          | 5 119.9326 0.0000 2.502E-0004 |
| 8 121.4330 0.0000 0.000E+0000  | 1 118.8539 0.0000 1.026E-0004 | 8 121.4588 0.0000 1.010E-0004 |
| 3.33                           | 5 119.9022 0.0000 1.297E-0004 | 10.33                         |
| 1 118.8422 0.0000 5.592E-0005  | 8 121.4471 0.0000 5.511E-0005 | 1 118.9167 0.0000 3.543E-0004 |

## EK-2 (devam) Strain-gage'lerden alınan şekil değişimi verileri

|                               |                               |                               |
|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| 5 119.9349 0.0000 2.594E-0004 | 16.00                         | 5 119.9932 0.0000 4.911E-0004 |
| 8 121.4588 0.0000 1.010E-0004 | 1 119.0377 0.0000 8.393E-0004 | 8 121.4729 0.0000 1.561E-0004 |
| 10.67                         | 5 119.9629 0.0000 3.707E-0004 | 21.67                         |
| 1 118.9237 0.0000 3.823E-0004 | 8 121.4705 0.0000 1.469E-0004 | 1 119.1448 0.0000 1.269E-0003 |
| 5 119.9372 0.0000 2.687E-0004 | 16.33                         | 5 119.9955 0.0000 5.004E-0004 |
| 8 121.4611 0.0000 1.102E-0004 | 1 119.0447 0.0000 8.673E-0004 | 8 121.4729 0.0000 1.561E-0004 |
| 11.00                         | 5 119.9652 0.0000 3.799E-0004 | 22.00                         |
| 1 118.9306 0.0000 4.102E-0004 | 8 121.4705 0.0000 1.469E-0004 | 1 119.1518 0.0000 1.296E-0003 |
| 5 119.9396 0.0000 2.780E-0004 | 16.67                         | 5 119.9955 0.0000 5.004E-0004 |
| 8 121.4611 0.0000 1.102E-0004 | 1 119.0517 0.0000 8.953E-0004 | 8 121.4729 0.0000 1.561E-0004 |
| 11.33                         | 5 119.9675 0.0000 3.892E-0004 | 22.33                         |
| 1 118.9376 0.0000 4.383E-0004 | 8 121.4705 0.0000 1.469E-0004 | 1 119.1564 0.0000 1.315E-0003 |
| 5 119.9419 0.0000 2.873E-0004 | 17.00                         | 5 119.9979 0.0000 5.097E-0004 |
| 8 121.4635 0.0000 1.194E-0004 | 1 119.0610 0.0000 9.326E-0004 | 8 121.4705 0.0000 1.469E-0004 |
| 11.67                         | 5 119.9675 0.0000 3.892E-0004 | 22.67                         |
| 1 118.9446 0.0000 4.662E-0004 | 8 121.4705 0.0000 1.469E-0004 | 1 119.1611 0.0000 1.334E-0003 |
| 5 119.9442 0.0000 2.966E-0004 | 17.33                         | 5 119.9979 0.0000 5.097E-0004 |
| 8 121.4635 0.0000 1.194E-0004 | 1 119.0656 0.0000 9.513E-0004 | 8 121.4705 0.0000 1.469E-0004 |
| 12.00                         | 5 119.9699 0.0000 3.985E-0004 | 23.00                         |
| 1 118.9516 0.0000 4.942E-0004 | 8 121.4729 0.0000 1.561E-0004 | 1 119.1681 0.0000 1.362E-0003 |
| 5 119.9466 0.0000 3.058E-0004 | 17.67                         | 5 120.0002 0.0000 5.190E-0004 |
| 8 121.4658 0.0000 1.286E-0004 | 1 119.0726 0.0000 9.793E-0004 | 8 121.4705 0.0000 1.469E-0004 |
| 12.33                         | 5 119.9722 0.0000 4.078E-0004 | 23.33                         |
| 1 118.9586 0.0000 5.222E-0004 | 8 121.4729 0.0000 1.561E-0004 | 1 119.1727 0.0000 1.381E-0003 |
| 5 119.9466 0.0000 3.058E-0004 | 18.00                         | 5 120.0026 0.0000 5.283E-0004 |
| 8 121.4658 0.0000 1.286E-0004 | 1 119.0773 0.0000 9.979E-0004 | 8 121.4705 0.0000 1.469E-0004 |
| 12.67                         | 5 119.9722 0.0000 4.078E-0004 | 23.67                         |
| 1 118.9632 0.0000 5.409E-0004 | 8 121.4729 0.0000 1.561E-0004 | 1 119.1797 0.0000 1.408E-0003 |
| 5 119.9489 0.0000 3.151E-0004 | 18.33                         | 5 120.0049 0.0000 5.375E-0004 |
| 8 121.4658 0.0000 1.286E-0004 | 1 119.0866 0.0000 1.035E-0003 | 8 121.4729 0.0000 1.561E-0004 |
| 13.00                         | 5 119.9746 0.0000 4.170E-0004 | 24.00                         |
| 1 118.9725 0.0000 5.782E-0004 | 8 121.4729 0.0000 1.561E-0004 | 1 119.1844 0.0000 1.427E-0003 |
| 5 119.9512 0.0000 3.243E-0004 | 18.67                         | 5 120.0049 0.0000 5.375E-0004 |
| 8 121.4658 0.0000 1.286E-0004 | 1 119.0936 0.0000 1.063E-0003 | 8 121.4705 0.0000 1.469E-0004 |
| 13.33                         | 5 119.9769 0.0000 4.263E-0004 | 24.33                         |
| 1 118.9795 0.0000 6.061E-0004 | 8 121.4729 0.0000 1.561E-0004 | 1 119.1890 0.0000 1.446E-0003 |
| 5 119.9512 0.0000 3.243E-0004 | 19.00                         | 5 120.0072 0.0000 5.468E-0004 |
| 8 121.4658 0.0000 1.286E-0004 | 1 119.1006 0.0000 1.091E-0003 | 8 121.4705 0.0000 1.469E-0004 |
| 13.67                         | 5 119.9792 0.0000 4.355E-0004 | 24.67                         |
| 1 118.9842 0.0000 6.248E-0004 | 8 121.4752 0.0000 1.653E-0004 | 1 119.1937 0.0000 1.464E-0003 |
| 5 119.9536 0.0000 3.336E-0004 | 19.33                         | 5 120.0072 0.0000 5.468E-0004 |
| 8 121.4658 0.0000 1.286E-0004 | 1 119.1075 0.0000 1.119E-0003 | 8 121.4705 0.0000 1.469E-0004 |
| 14.00                         | 5 119.9792 0.0000 4.355E-0004 | 25.00                         |
| 1 118.9911 0.0000 6.528E-0004 | 8 121.4729 0.0000 1.561E-0004 | 1 119.2007 0.0000 1.492E-0003 |
| 5 119.9559 0.0000 3.428E-0004 | 19.67                         | 5 120.0095 0.0000 5.560E-0004 |
| 8 121.4682 0.0000 1.377E-0004 | 1 119.1122 0.0000 1.138E-0003 | 8 121.4682 0.0000 1.377E-0004 |
| 14.33                         | 5 119.9815 0.0000 4.448E-0004 | 25.33                         |
| 1 119.0005 0.0000 6.901E-0004 | 8 121.4752 0.0000 1.653E-0004 | 1 119.2053 0.0000 1.511E-0003 |
| 5 119.9582 0.0000 3.522E-0004 | 20.00                         | 5 120.0119 0.0000 5.653E-0004 |
| 8 121.4682 0.0000 1.377E-0004 | 1 119.1168 0.0000 1.156E-0003 | 8 121.4682 0.0000 1.377E-0004 |
| 14.67                         | 5 119.9839 0.0000 4.541E-0004 | 25.67                         |
| 1 119.0074 0.0000 7.181E-0004 | 8 121.4752 0.0000 1.653E-0004 | 1 119.2123 0.0000 1.539E-0003 |
| 5 119.9582 0.0000 3.522E-0004 | 20.33                         | 5 120.0142 0.0000 5.746E-0004 |
| 8 121.4705 0.0000 1.469E-0004 | 1 119.1238 0.0000 1.185E-0003 | 8 121.4682 0.0000 1.377E-0004 |
| 15.00                         | 5 119.9862 0.0000 4.634E-0004 | 26.00                         |
| 1 119.0144 0.0000 7.461E-0004 | 8 121.4752 0.0000 1.653E-0004 | 1 119.2170 0.0000 1.558E-0003 |
| 5 119.9606 0.0000 3.614E-0004 | 20.67                         | 5 120.0142 0.0000 5.746E-0004 |
| 8 121.4705 0.0000 1.469E-0004 | 1 119.1285 0.0000 1.203E-0003 | 8 121.4682 0.0000 1.377E-0004 |
| 15.33                         | 5 119.9886 0.0000 4.727E-0004 | 26.33                         |
| 1 119.0237 0.0000 7.833E-0004 | 8 121.4729 0.0000 1.561E-0004 | 1 119.2240 0.0000 1.586E-0003 |
| 5 119.9606 0.0000 3.614E-0004 | 21.00                         | 5 120.0166 0.0000 5.839E-0004 |
| 8 121.4705 0.0000 1.469E-0004 | 1 119.1355 0.0000 1.231E-0003 | 8 121.4658 0.0000 1.286E-0004 |
| 15.67                         | 5 119.9909 0.0000 4.819E-0004 | 26.67                         |
| 1 119.0284 0.0000 8.020E-0004 | 8 121.4729 0.0000 1.561E-0004 | 1 119.2286 0.0000 1.604E-0003 |
| 5 119.9629 0.0000 3.707E-0004 | 21.33                         | 5 120.0189 0.0000 5.931E-0004 |
| 8 121.4705 0.0000 1.469E-0004 | 1 119.1401 0.0000 1.250E-0003 | 8 121.4635 0.0000 1.194E-0004 |

## EK-2 (devam) Strain-gage'lerden alınan şekil değişimi verileri

|                               |                                |                                |
|-------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| 27.00                         | 5 120.0469 0.0000 7.044E-0004  | 38.00                          |
| 1 119.2333 0.0000 1.623E-0003 | 8 121.4518 0.0000 7.342E-0005  | 1 119.4127 0.0000 2.342E-0003  |
| 5 120.0212 0.0000 6.024E-0004 | 32.67                          | 5 120.0772 0.0000 8.249E-0004  |
| 8 121.4635 0.0000 1.194E-0004 | 1 119.3288 0.0000 2.006E-0003  | 8 121.4213 0.0000 -4.589E-0005 |
| 27.33                         | 5 120.0516 0.0000 7.229E-0004  | 38.33                          |
| 1 119.2403 0.0000 1.651E-0003 | 8 121.4448 0.0000 4.592E-0005  | 1 119.4173 0.0000 2.361E-0003  |
| 5 120.0235 0.0000 6.116E-0004 | 33.00                          | 5 120.0796 0.0000 8.341E-0004  |
| 8 121.4635 0.0000 1.194E-0004 | 1 119.3358 0.0000 2.034E-0003  | 8 121.4213 0.0000 -4.589E-0005 |
| 27.67                         | 5 120.0609 0.0000 7.600E-0004  | 38.67                          |
| 1 119.2473 0.0000 1.679E-0003 | 8 121.4377 0.0000 1.834E-0005  | 1 119.4220 0.0000 2.379E-0003  |
| 5 120.0235 0.0000 6.116E-0004 | 33.33                          | 5 120.0796 0.0000 8.341E-0004  |
| 8 121.4611 0.0000 1.102E-0004 | 1 119.3404 0.0000 2.052E-0003  | 8 121.4190 0.0000 -5.508E-0005 |
| 28.00                         | 5 120.0656 0.0000 7.785E-0004  | 39.00                          |
| 1 119.2519 0.0000 1.698E-0003 | 8 121.4330 0.0000 0.000E+0000  | 1 119.4243 0.0000 2.389E-0003  |
| 5 120.0235 0.0000 6.116E-0004 | 33.67                          | 5 120.0819 0.0000 8.434E-0004  |
| 8 121.4611 0.0000 1.102E-0004 | 1 119.3451 0.0000 2.071E-0003  | 8 121.4190 0.0000 -5.508E-0005 |
| 28.33                         | 5 120.0632 0.0000 7.693E-0004  | 39.33                          |
| 1 119.2566 0.0000 1.716E-0003 | 8 121.4307 0.0000 -9.185E-0006 | 1 119.4313 0.0000 2.417E-0003  |
| 5 120.0259 0.0000 6.210E-0004 | 34.00                          | 5 120.0842 0.0000 8.527E-0004  |
| 8 121.4588 0.0000 1.010E-0004 | 1 119.3497 0.0000 2.090E-0003  | 8 121.4190 0.0000 -5.508E-0005 |
| 28.67                         | 5 120.0632 0.0000 7.693E-0004  | 39.67                          |
| 1 119.2635 0.0000 1.744E-0003 | 8 121.4307 0.0000 -9.185E-0006 | 1 119.4336 0.0000 2.426E-0003  |
| 5 120.0306 0.0000 6.395E-0004 | 34.33                          | 5 120.0842 0.0000 8.527E-0004  |
| 8 121.4541 0.0000 8.260E-0005 | 1 119.3544 0.0000 2.108E-0003  | 8 121.4190 0.0000 -5.508E-0005 |
| 29.00                         | 5 120.0632 0.0000 7.693E-0004  | 40.00                          |
| 1 119.2682 0.0000 1.763E-0003 | 8 121.4307 0.0000 -9.185E-0006 | 1 119.4383 0.0000 2.445E-0003  |
| 5 120.0306 0.0000 6.395E-0004 | 34.67                          | 5 120.0819 0.0000 8.434E-0004  |
| 8 121.4494 0.0000 6.429E-0005 | 1 119.3591 0.0000 2.127E-0003  | 8 121.4190 0.0000 -5.508E-0005 |
| 29.33                         | 5 120.0656 0.0000 7.785E-0004  | 40.33                          |
| 1 119.2752 0.0000 1.791E-0003 | 8 121.4330 0.0000 0.000E+0000  | 1 119.4406 0.0000 2.454E-0003  |
| 5 120.0329 0.0000 6.487E-0004 | 35.00                          | 5 120.0819 0.0000 8.434E-0004  |
| 8 121.4494 0.0000 6.429E-0005 | 1 119.3637 0.0000 2.146E-0003  | 8 121.4167 0.0000 -6.426E-0005 |
| 29.67                         | 5 120.0702 0.0000 7.971E-0004  | 40.67                          |
| 1 119.2799 0.0000 1.810E-0003 | 8 121.4330 0.0000 0.000E+0000  | 1 119.4453 0.0000 2.473E-0003  |
| 5 120.0352 0.0000 6.580E-0004 | 35.33                          | 5 120.0842 0.0000 8.527E-0004  |
| 8 121.4494 0.0000 6.429E-0005 | 1 119.3684 0.0000 2.164E-0003  | 8 121.4167 0.0000 -6.426E-0005 |
| 30.00                         | 5 120.0726 0.0000 8.064E-0004  | 41.00                          |
| 1 119.2845 0.0000 1.828E-0003 | 8 121.4307 0.0000 -9.185E-0006 | 1 119.4499 0.0000 2.491E-0003  |
| 5 120.0352 0.0000 6.580E-0004 | 35.67                          | 5 120.0842 0.0000 8.527E-0004  |
| 8 121.4541 0.0000 8.260E-0005 | 1 119.3754 0.0000 2.193E-0003  | 8 121.4143 0.0000 -7.345E-0005 |
| 30.33                         | 5 120.0702 0.0000 7.971E-0004  | 41.33                          |
| 1 119.2892 0.0000 1.847E-0003 | 8 121.4307 0.0000 -9.185E-0006 | 1 119.4546 0.0000 2.510E-0003  |
| 5 120.0375 0.0000 6.672E-0004 | 36.00                          | 5 120.0842 0.0000 8.527E-0004  |
| 8 121.4565 0.0000 9.182E-0005 | 1 119.3800 0.0000 2.211E-0003  | 8 121.4143 0.0000 -7.345E-0005 |
| 30.67                         | 5 120.0726 0.0000 8.064E-0004  | 41.67                          |
| 1 119.2938 0.0000 1.866E-0003 | 8 121.4260 0.0000 -2.758E-0005 | 1 119.4569 0.0000 2.519E-0003  |
| 5 120.0375 0.0000 6.672E-0004 | 36.33                          | 5 120.0842 0.0000 8.527E-0004  |
| 8 121.4565 0.0000 9.182E-0005 | 1 119.3870 0.0000 2.239E-0003  | 8 121.4120 0.0000 -8.266E-0005 |
| 31.00                         | 5 120.0749 0.0000 8.156E-0004  | 42.00                          |
| 1 119.2985 0.0000 1.884E-0003 | 8 121.4237 0.0000 -3.677E-0005 | 1 119.4616 0.0000 2.538E-0003  |
| 5 120.0399 0.0000 6.766E-0004 | 36.67                          | 5 120.0866 0.0000 8.620E-0004  |
| 8 121.4541 0.0000 8.260E-0005 | 1 119.3917 0.0000 2.258E-0003  | 8 121.4096 0.0000 -9.185E-0005 |
| 31.33                         | 5 120.0749 0.0000 8.156E-0004  | 42.33                          |
| 1 119.3055 0.0000 1.912E-0003 | 8 121.4237 0.0000 -3.677E-0005 | 1 119.4662 0.0000 2.557E-0003  |
| 5 120.0422 0.0000 6.858E-0004 | 37.00                          | 5 120.0866 0.0000 8.620E-0004  |
| 8 121.4541 0.0000 8.260E-0005 | 1 119.3940 0.0000 2.267E-0003  | 8 121.4096 0.0000 -9.185E-0005 |
| 31.67                         | 5 120.0749 0.0000 8.156E-0004  | 42.67                          |
| 1 119.3101 0.0000 1.931E-0003 | 8 121.4260 0.0000 -2.758E-0005 | 1 119.4709 0.0000 2.575E-0003  |
| 5 120.0446 0.0000 6.951E-0004 | 37.33                          | 5 120.0866 0.0000 8.620E-0004  |
| 8 121.4518 0.0000 7.342E-0005 | 1 119.4010 0.0000 2.295E-0003  | 8 121.4096 0.0000 -9.185E-0005 |
| 32.00                         | 5 120.0749 0.0000 8.156E-0004  | 43.00                          |
| 1 119.3148 0.0000 1.950E-0003 | 8 121.4237 0.0000 -3.677E-0005 | 1 119.4732 0.0000 2.585E-0003  |
| 5 120.0492 0.0000 7.136E-0004 | 37.67                          | 5 120.0842 0.0000 8.527E-0004  |
| 8 121.4518 0.0000 7.342E-0005 | 1 119.4057 0.0000 2.314E-0003  | 8 121.4073 0.0000 -1.010E-0004 |
| 32.33                         | 5 120.0772 0.0000 8.249E-0004  | 43.33                          |
| 1 119.3195 0.0000 1.968E-0003 | 8 121.4213 0.0000 -4.589E-0005 | 1 119.4779 0.0000 2.603E-0003  |

## EK-2 (devam) Strain-gage'lerden alınan şekil değişimi verileri

|                                |                                |                                |
|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| 5 120.0842 0.0000 8.527E-0004  | 49.00                          | 5 119.8672 0.0000 -9.274E-0006 |
| 8 121.4073 0.0000 -1.010E-0004 | 1 118.8096 0.0000 -7.460E-0005 | 8 121.3628 0.0000 -2.754E-0004 |
| 43.67                          | 5 119.8672 0.0000 -9.274E-0006 | 54.67                          |
| 1 119.4802 0.0000 2.613E-0003  | 8 121.3605 0.0000 -2.846E-0004 | 1 118.8143 0.0000 -5.595E-0005 |
| 5 120.0819 0.0000 8.434E-0004  | 49.33                          | 5 119.8649 0.0000 -1.855E-0005 |
| 8 121.4050 0.0000 -1.102E-0004 | 1 118.8120 0.0000 -6.531E-0005 | 8 121.3628 0.0000 -2.754E-0004 |
| 44.00                          | 5 119.8672 0.0000 -9.274E-0006 | 55.00                          |
| 1 119.4849 0.0000 2.631E-0003  | 8 121.3605 0.0000 -2.846E-0004 | 1 118.8143 0.0000 -5.595E-0005 |
| 5 120.0819 0.0000 8.434E-0004  | 49.67                          | 5 119.8649 0.0000 -1.855E-0005 |
| 8 121.4050 0.0000 -1.102E-0004 | 1 118.8143 0.0000 -5.595E-0005 | 8 121.3628 0.0000 -2.754E-0004 |
| 44.33                          | 5 119.8672 0.0000 -9.274E-0006 | 55.33                          |
| 1 119.4895 0.0000 2.650E-0003  | 8 121.3628 0.0000 -2.754E-0004 | 1 118.8143 0.0000 -5.595E-0005 |
| 5 120.0796 0.0000 8.341E-0004  | 50.00                          | 5 119.8672 0.0000 -9.274E-0006 |
| 8 121.4026 0.0000 -1.193E-0004 | 1 118.8143 0.0000 -5.595E-0005 | 8 121.3628 0.0000 -2.754E-0004 |
| 44.67                          | 5 119.8672 0.0000 -9.274E-0006 | 55.67                          |
| 1 119.4965 0.0000 2.678E-0003  | 8 121.3628 0.0000 -2.754E-0004 | 1 118.8143 0.0000 -5.595E-0005 |
| 5 120.0796 0.0000 8.341E-0004  | 50.33                          | 5 119.8672 0.0000 -9.274E-0006 |
| 8 121.4026 0.0000 -1.193E-0004 | 1 118.8143 0.0000 -5.595E-0005 | 8 121.3628 0.0000 -2.754E-0004 |
| 45.00                          | 5 119.8672 0.0000 -9.274E-0006 | 56.00                          |
| 1 119.5012 0.0000 2.697E-0003  | 8 121.3605 0.0000 -2.846E-0004 | 1 118.8143 0.0000 -5.595E-0005 |
| 5 120.0796 0.0000 8.341E-0004  | 50.67                          | 5 119.8649 0.0000 -1.855E-0005 |
| 8 121.4026 0.0000 -1.193E-0004 | 1 118.8120 0.0000 -6.531E-0005 | 8 121.3628 0.0000 -2.754E-0004 |
| 45.33                          | 5 119.8672 0.0000 -9.274E-0006 | 56.33                          |
| 1 119.5035 0.0000 2.706E-0003  | 8 121.3605 0.0000 -2.846E-0004 | 1 118.8143 0.0000 -5.595E-0005 |
| 5 120.0796 0.0000 8.341E-0004  | 51.00                          | 5 119.8649 0.0000 -1.855E-0005 |
| 8 121.4003 0.0000 -1.286E-0004 | 1 118.8120 0.0000 -6.531E-0005 | 8 121.3628 0.0000 -2.754E-0004 |
| 45.67                          | 5 119.8672 0.0000 -9.274E-0006 | 56.67                          |
| 1 119.5082 0.0000 2.725E-0003  | 8 121.3628 0.0000 -2.754E-0004 | 1 118.8120 0.0000 -6.531E-0005 |
| 5 120.0796 0.0000 8.341E-0004  | 51.33                          | 5 119.8649 0.0000 -1.855E-0005 |
| 8 121.4003 0.0000 -1.286E-0004 | 1 118.8120 0.0000 -6.531E-0005 | 8 121.3628 0.0000 -2.754E-0004 |
| 46.00                          | 5 119.8649 0.0000 -1.855E-0005 | 57.00                          |
| 1 119.5105 0.0000 2.734E-0003  | 8 121.3628 0.0000 -2.754E-0004 | 1 118.8120 0.0000 -6.531E-0005 |
| 5 120.0796 0.0000 8.341E-0004  | 51.67                          | 5 119.8649 0.0000 -1.855E-0005 |
| 8 121.4026 0.0000 -1.193E-0004 | 1 118.8120 0.0000 -6.531E-0005 | 8 121.3628 0.0000 -2.754E-0004 |
| 46.33                          | 5 119.8649 0.0000 -1.855E-0005 | 57.33                          |
| 1 119.5152 0.0000 2.753E-0003  | 8 121.3628 0.0000 -2.754E-0004 | 1 118.8120 0.0000 -6.531E-0005 |
| 5 120.0819 0.0000 8.434E-0004  | 52.00                          | 5 119.8649 0.0000 -1.855E-0005 |
| 8 121.4050 0.0000 -1.102E-0004 | 1 118.8120 0.0000 -6.531E-0005 | 8 121.3628 0.0000 -2.754E-0004 |
| 46.67                          | 5 119.8672 0.0000 -9.274E-0006 | 57.67                          |
| 1 119.5175 0.0000 2.762E-0003  | 8 121.3628 0.0000 -2.754E-0004 | 1 118.8143 0.0000 -5.595E-0005 |
| 5 120.0796 0.0000 8.341E-0004  | 52.33                          | 5 119.8649 0.0000 -1.855E-0005 |
| 8 121.4096 0.0000 -9.185E-0005 | 1 118.8120 0.0000 -6.531E-0005 | 8 121.3628 0.0000 -2.754E-0004 |
| 47.00                          | 5 119.8649 0.0000 -1.855E-0005 | 58.00                          |
| 1 119.5222 0.0000 2.781E-0003  | 8 121.3628 0.0000 -2.754E-0004 | 1 118.8143 0.0000 -5.595E-0005 |
| 5 120.0772 0.0000 8.249E-0004  | 52.67                          | 5 119.8649 0.0000 -1.855E-0005 |
| 8 121.4143 0.0000 -7.345E-0005 | 1 118.8143 0.0000 -5.595E-0005 | 8 121.3628 0.0000 -2.754E-0004 |
| 47.33                          | 5 119.8649 0.0000 -1.855E-0005 | 58.33                          |
| 1 119.5245 0.0000 2.790E-0003  | 8 121.3628 0.0000 -2.754E-0004 | 1 118.8143 0.0000 -5.595E-0005 |
| 5 120.0749 0.0000 8.156E-0004  | 53.00                          | 5 119.8649 0.0000 -1.855E-0005 |
| 8 121.4143 0.0000 -7.345E-0005 | 1 118.8143 0.0000 -5.595E-0005 | 8 121.3651 0.0000 -2.663E-0004 |
| 47.67                          | 5 119.8649 0.0000 -1.855E-0005 | 58.67                          |
| 1 119.5268 0.0000 2.799E-0003  | 8 121.3628 0.0000 -2.754E-0004 | 1 118.8143 0.0000 -5.595E-0005 |
| 5 120.0749 0.0000 8.156E-0004  | 53.33                          | 5 119.8649 0.0000 -1.855E-0005 |
| 8 121.4096 0.0000 -9.185E-0005 | 1 118.8143 0.0000 -5.595E-0005 | 8 121.3651 0.0000 -2.663E-0004 |
| 48.00                          | 5 119.8649 0.0000 -1.855E-0005 | 59.00                          |
| 1 119.5315 0.0000 2.818E-0003  | 8 121.3628 0.0000 -2.754E-0004 | 1 118.8143 0.0000 -5.595E-0005 |
| 5 120.0749 0.0000 8.156E-0004  | 53.67                          | 5 119.8649 0.0000 -1.855E-0005 |
| 8 121.4073 0.0000 -1.010E-0004 | 1 118.8120 0.0000 -6.531E-0005 | 8 121.3628 0.0000 -2.754E-0004 |
| 48.33                          | 5 119.8672 0.0000 -9.274E-0006 | 59.33                          |
| 1 119.3055 0.0000 1.912E-0003  | 8 121.3628 0.0000 -2.754E-0004 | 1 118.8120 0.0000 -6.531E-0005 |
| 5 120.0095 0.0000 5.560E-0004  | 54.00                          | 5 119.8649 0.0000 -1.855E-0005 |
| 8 121.3886 0.0000 -1.744E-0004 | 1 118.8120 0.0000 -6.531E-0005 | 8 121.3628 0.0000 -2.754E-0004 |
| 48.67                          | 5 119.8672 0.0000 -9.274E-0006 | 59.67                          |
| 1 118.9469 0.0000 4.756E-0004  | 8 121.3628 0.0000 -2.754E-0004 | 1 118.8120 0.0000 -6.531E-0005 |
| 5 119.9045 0.0000 1.389E-0004  | 54.33                          | 5 119.8649 0.0000 -1.855E-0005 |
| 8 121.3651 0.0000 -2.663E-0004 | 1 118.8120 0.0000 -6.531E-0005 | 8 121.3628 0.0000 -2.754E-0004 |

## EK-2 (devam) Strain-gage'lerden alınan şekil değişimi verileri

|                                |                                |
|--------------------------------|--------------------------------|
| 60.00                          | 5 119.8649 0.0000 -1.855E-0005 |
| 1 118.8143 0.0000 -5.595E-0005 | 8 121.3628 0.0000 -2.754E-0004 |
| 5 119.8649 0.0000 -1.855E-0005 | 65.67                          |
| 8 121.3628 0.0000 -2.754E-0004 | 1 118.8143 0.0000 -5.595E-0005 |
| 60.33                          | 5 119.8649 0.0000 -1.855E-0005 |
| 1 118.8143 0.0000 -5.595E-0005 | 8 121.3628 0.0000 -2.754E-0004 |
| 5 119.8649 0.0000 -1.855E-0005 | 66.00                          |
| 8 121.3628 0.0000 -2.754E-0004 | 1 118.8143 0.0000 -5.595E-0005 |
| 60.67                          | 5 119.8649 0.0000 -1.855E-0005 |
| 1 118.8143 0.0000 -5.595E-0005 | 8 121.3628 0.0000 -2.754E-0004 |
| 5 119.8649 0.0000 -1.855E-0005 | 66.33                          |
| 8 121.3628 0.0000 -2.754E-0004 | 1 118.8143 0.0000 -5.595E-0005 |
| 61.00                          | 5 119.8649 0.0000 -1.855E-0005 |
| 1 118.8143 0.0000 -5.595E-0005 | 8 121.3628 0.0000 -2.754E-0004 |
| 5 119.8649 0.0000 -1.855E-0005 | 66.67                          |
| 8 121.3628 0.0000 -2.754E-0004 | 1 118.8120 0.0000 -6.531E-0005 |
| 61.33                          | 5 119.8649 0.0000 -1.855E-0005 |
| 1 118.8120 0.0000 -6.531E-0005 | 8 121.3628 0.0000 -2.754E-0004 |
| 5 119.8649 0.0000 -1.855E-0005 | 67.00                          |
| 8 121.3628 0.0000 -2.754E-0004 | 1 118.8120 0.0000 -6.531E-0005 |
| 61.67                          | 5 119.8649 0.0000 -1.855E-0005 |
| 1 118.8120 0.0000 -6.531E-0005 | 8 121.3628 0.0000 -2.754E-0004 |
| 5 119.8649 0.0000 -1.855E-0005 | 67.33                          |
| 8 121.3628 0.0000 -2.754E-0004 | 1 118.8120 0.0000 -6.531E-0005 |
| 62.00                          | 5 119.8649 0.0000 -1.855E-0005 |
| 1 118.8120 0.0000 -6.531E-0005 | 8 121.3651 0.0000 -2.663E-0004 |
| 5 119.8649 0.0000 -1.855E-0005 | 67.67                          |
| 8 121.3628 0.0000 -2.754E-0004 | 1 118.8120 0.0000 -6.531E-0005 |
| 62.33                          | 5 119.8672 0.0000 -9.274E-0006 |
| 1 118.8143 0.0000 -5.595E-0005 | 8 121.3628 0.0000 -2.754E-0004 |
| 5 119.8649 0.0000 -1.855E-0005 | 68.00                          |
| 8 121.3651 0.0000 -2.663E-0004 | 1 118.8120 0.0000 -6.531E-0005 |
| 62.67                          | 5 119.8672 0.0000 -9.274E-0006 |
| 1 118.8143 0.0000 -5.595E-0005 | 8 121.3628 0.0000 -2.754E-0004 |
| 5 119.8649 0.0000 -1.855E-0005 | 68.33                          |
| 8 121.3628 0.0000 -2.754E-0004 | 1 118.8120 0.0000 -6.531E-0005 |
| 63.00                          | 5 119.8672 0.0000 -9.274E-0006 |
| 1 118.8143 0.0000 -5.595E-0005 | 8 121.3628 0.0000 -2.754E-0004 |
| 5 119.8649 0.0000 -1.855E-0005 | 68.67                          |
| 8 121.3628 0.0000 -2.754E-0004 | 1 118.8120 0.0000 -6.531E-0005 |
| 63.33                          | 5 119.8649 0.0000 -1.855E-0005 |
| 1 118.8143 0.0000 -5.595E-0005 | 8 121.3651 0.0000 -2.663E-0004 |
| 5 119.8649 0.0000 -1.855E-0005 | 69.00                          |
| 8 121.3628 0.0000 -2.754E-0004 | 1 118.8120 0.0000 -6.531E-0005 |
| 63.67                          | 5 119.8649 0.0000 -1.855E-0005 |
| 1 118.8143 0.0000 -5.595E-0005 | 8 121.3628 0.0000 -2.754E-0004 |
| 5 119.8649 0.0000 -1.855E-0005 |                                |
| 8 121.3628 0.0000 -2.754E-0004 |                                |
| 64.00                          |                                |
| 1 118.8143 0.0000 -5.595E-0005 |                                |
| 5 119.8649 0.0000 -1.855E-0005 |                                |
| 8 121.3628 0.0000 -2.754E-0004 |                                |
| 64.33                          |                                |
| 1 118.8143 0.0000 -5.595E-0005 |                                |
| 5 119.8649 0.0000 -1.855E-0005 |                                |
| 8 121.3628 0.0000 -2.754E-0004 |                                |
| 64.67                          |                                |
| 1 118.8143 0.0000 -5.595E-0005 |                                |
| 5 119.8649 0.0000 -1.855E-0005 |                                |
| 8 121.3628 0.0000 -2.754E-0004 |                                |
| 65.00                          |                                |
| 1 118.8143 0.0000 -5.595E-0005 |                                |
| 5 119.8649 0.0000 -1.855E-0005 |                                |
| 8 121.3628 0.0000 -2.754E-0004 |                                |
| 65.33                          |                                |
| 1 118.8120 0.0000 -6.531E-0005 |                                |

## EK-2 (devam) Strain-gage'lerden alınan şekil değişimi verileri

4 numaralı numune:

Saniye,

Strain-gage bağlandığı devre numarası / direnç değeri / boşluk / şekil değişimi oranı

|                                |                                |                                |
|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| 0.00                           | 4.67                           | 9.33                           |
| 1 348.8367 0.0000 -5.127E-0006 | 1 348.8367 0.0000 -5.127E-0006 | 1 348.8749 0.0000 4.590E-0005  |
| 5 353.1682 0.0000 -5.104E-0006 | 5 353.1914 0.0000 2.536E-0005  | 5 353.1798 0.0000 1.009E-0005  |
| 8 351.3382 0.0000 -5.090E-0006 | 8 351.3113 0.0000 -4.076E-0005 | 8 351.3190 0.0000 -3.058E-0005 |
| 0.33                           | 5.00                           | 9.67                           |
| 1 348.8290 0.0000 -1.534E-0005 | 1 348.8367 0.0000 -5.127E-0006 | 1 348.8826 0.0000 5.611E-0005  |
| 5 353.1682 0.0000 -5.104E-0006 | 5 353.1914 0.0000 2.536E-0005  | 5 353.1798 0.0000 1.009E-0005  |
| 8 351.3344 0.0000 -1.018E-0005 | 8 351.3113 0.0000 -4.076E-0005 | 8 351.3190 0.0000 -3.058E-0005 |
| 0.67                           | 5.33                           | 10.00                          |
| 1 348.8214 0.0000 -2.555E-0005 | 1 348.8367 0.0000 -5.127E-0006 | 1 348.8903 0.0000 6.636E-0005  |
| 5 353.1644 0.0000 -1.021E-0005 | 5 353.1914 0.0000 2.536E-0005  | 5 353.1798 0.0000 1.009E-0005  |
| 8 351.3267 0.0000 -2.036E-0005 | 8 351.3113 0.0000 -4.076E-0005 | 8 351.3152 0.0000 -3.563E-0005 |
| 1.00                           | 5.67                           | 10.33                          |
| 1 348.8214 0.0000 -2.555E-0005 | 1 348.8405 0.0000 0.000E+0000  | 1 348.8979 0.0000 7.658E-0005  |
| 5 353.1644 0.0000 -1.021E-0005 | 5 353.1914 0.0000 2.536E-0005  | 5 353.1798 0.0000 1.009E-0005  |
| 8 351.3228 0.0000 -2.549E-0005 | 8 351.3152 0.0000 -3.563E-0005 | 8 351.3190 0.0000 -3.058E-0005 |
| 1.33                           | 6.00                           | 10.67                          |
| 1 348.8214 0.0000 -2.555E-0005 | 1 348.8405 0.0000 0.000E+0000  | 1 348.9094 0.0000 9.184E-0005  |
| 5 353.1644 0.0000 -1.021E-0005 | 5 353.1875 0.0000 2.026E-0005  | 5 353.1798 0.0000 1.009E-0005  |
| 8 351.3228 0.0000 -2.549E-0005 | 8 351.3152 0.0000 -3.563E-0005 | 8 351.3190 0.0000 -3.058E-0005 |
| 1.67                           | 6.33                           | 11.00                          |
| 1 348.8252 0.0000 -2.043E-0005 | 1 348.8405 0.0000 0.000E+0000  | 1 348.9171 0.0000 1.020E-0004  |
| 5 353.1644 0.0000 -1.021E-0005 | 5 353.1875 0.0000 2.026E-0005  | 5 353.1798 0.0000 1.009E-0005  |
| 8 351.3228 0.0000 -2.549E-0005 | 8 351.3152 0.0000 -3.563E-0005 | 8 351.3190 0.0000 -3.058E-0005 |
| 2.00                           | 6.67                           | 11.33                          |
| 1 348.8252 0.0000 -2.043E-0005 | 1 348.8444 0.0000 5.127E-0006  | 1 348.9285 0.0000 1.173E-0004  |
| 5 353.1682 0.0000 -5.104E-0006 | 5 353.1875 0.0000 2.026E-0005  | 5 353.1836 0.0000 1.515E-0005  |
| 8 351.3228 0.0000 -2.549E-0005 | 8 351.3152 0.0000 -3.563E-0005 | 8 351.3190 0.0000 -3.058E-0005 |
| 2.33                           | 7.00                           | 11.67                          |
| 1 348.8252 0.0000 -2.043E-0005 | 1 348.8444 0.0000 5.127E-0006  | 1 348.9400 0.0000 1.327E-0004  |
| 5 353.1721 0.0000 0.000E+0000  | 5 353.1875 0.0000 2.026E-0005  | 5 353.1836 0.0000 1.515E-0005  |
| 8 351.3228 0.0000 -2.549E-0005 | 8 351.3152 0.0000 -3.563E-0005 | 8 351.3190 0.0000 -3.058E-0005 |
| 2.67                           | 7.33                           | 12.00                          |
| 1 348.8290 0.0000 -1.534E-0005 | 1 348.8482 0.0000 1.021E-0005  | 1 348.9515 0.0000 1.480E-0004  |
| 5 353.1759 0.0000 4.984E-0006  | 5 353.1875 0.0000 2.026E-0005  | 5 353.1875 0.0000 2.026E-0005  |
| 8 351.3228 0.0000 -2.549E-0005 | 8 351.3152 0.0000 -3.563E-0005 | 8 351.3190 0.0000 -3.058E-0005 |
| 3.00                           | 7.67                           | 12.33                          |
| 1 348.8329 0.0000 -1.021E-0005 | 1 348.8558 0.0000 2.034E-0005  | 1 348.9630 0.0000 1.633E-0004  |
| 5 353.1759 0.0000 4.984E-0006  | 5 353.1875 0.0000 2.026E-0005  | 5 353.1914 0.0000 2.536E-0005  |
| 8 351.3228 0.0000 -2.549E-0005 | 8 351.3152 0.0000 -3.563E-0005 | 8 351.3190 0.0000 -3.058E-0005 |
| 3.33                           | 8.00                           | 12.67                          |
| 1 348.8367 0.0000 -5.127E-0006 | 1 348.8558 0.0000 2.034E-0005  | 1 348.9783 0.0000 1.838E-0004  |
| 5 353.1759 0.0000 4.984E-0006  | 5 353.1836 0.0000 1.515E-0005  | 5 353.1991 0.0000 3.553E-0005  |
| 8 351.3190 0.0000 -3.058E-0005 | 8 351.3152 0.0000 -3.563E-0005 | 8 351.3228 0.0000 -2.549E-0005 |
| 3.67                           | 8.33                           | 13.00                          |
| 1 348.8367 0.0000 -5.127E-0006 | 1 348.8596 0.0000 2.547E-0005  | 1 348.9898 0.0000 1.991E-0004  |
| 5 353.1836 0.0000 1.515E-0005  | 5 353.1798 0.0000 1.009E-0005  | 5 353.2029 0.0000 4.059E-0005  |
| 8 351.3152 0.0000 -3.563E-0005 | 8 351.3190 0.0000 -3.058E-0005 | 8 351.3228 0.0000 -2.549E-0005 |
| 4.00                           | 8.67                           | 13.33                          |
| 1 348.8367 0.0000 -5.127E-0006 | 1 348.8673 0.0000 3.568E-0005  | 1 349.0051 0.0000 2.194E-0004  |
| 5 353.1875 0.0000 2.026E-0005  | 5 353.1759 0.0000 4.984E-0006  | 5 353.2068 0.0000 4.570E-0005  |
| 8 351.3152 0.0000 -3.563E-0005 | 8 351.3190 0.0000 -3.058E-0005 | 8 351.3228 0.0000 -2.549E-0005 |
| 4.33                           | 9.00                           | 13.67                          |
| 1 348.8367 0.0000 -5.127E-0006 | 1 348.8711 0.0000 4.081E-0005  | 1 349.0204 0.0000 2.399E-0004  |
| 5 353.1914 0.0000 2.536E-0005  | 5 353.1759 0.0000 4.984E-0006  | 5 353.2145 0.0000 5.587E-0005  |
| 8 351.3113 0.0000 -4.076E-0005 | 8 351.3190 0.0000 -3.058E-0005 | 8 351.3228 0.0000 -2.549E-0005 |

## EK-2 (devam) Strain-gage'lerden alınan şekil değişimi verileri

|                                |                                |                                |
|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| 14.00                          | 5 353.3226 0.0000 1.982E-0004  | 25.00                          |
| 1 349.0319 0.0000 2.552E-0004  | 8 351.3344 0.0000 -1.018E-0005 | 1 349.3804 0.0000 7.199E-0004  |
| 5 353.2184 0.0000 6.097E-0005  | 19.67                          | 5 353.4732 0.0000 3.965E-0004  |
| 8 351.3267 0.0000 -2.036E-0005 | 1 349.2387 0.0000 5.309E-0004  | 8 351.3267 0.0000 -2.036E-0005 |
| 14.33                          | 5 353.3342 0.0000 2.135E-0004  | 25.33                          |
| 1 349.0472 0.0000 2.756E-0004  | 8 351.3344 0.0000 -1.018E-0005 | 1 349.3881 0.0000 7.301E-0004  |
| 5 353.2261 0.0000 7.110E-0005  | 20.00                          | 5 353.4809 0.0000 4.066E-0004  |
| 8 351.3267 0.0000 -2.036E-0005 | 1 349.2502 0.0000 5.462E-0004  | 8 351.3267 0.0000 -2.036E-0005 |
| 14.67                          | 5 353.3380 0.0000 2.185E-0004  | 25.67                          |
| 1 349.0587 0.0000 2.909E-0004  | 8 351.3305 0.0000 -1.527E-0005 | 1 349.3958 0.0000 7.403E-0004  |
| 5 353.2299 0.0000 7.616E-0005  | 20.33                          | 5 353.4886 0.0000 4.169E-0004  |
| 8 351.3267 0.0000 -2.036E-0005 | 1 349.2579 0.0000 5.565E-0004  | 8 351.3267 0.0000 -2.036E-0005 |
| 15.00                          | 5 353.3496 0.0000 2.338E-0004  | 26.00                          |
| 1 349.0740 0.0000 3.114E-0004  | 8 351.3305 0.0000 -1.527E-0005 | 1 349.4035 0.0000 7.506E-0004  |
| 5 353.2338 0.0000 8.127E-0005  | 20.67                          | 5 353.4925 0.0000 4.219E-0004  |
| 8 351.3267 0.0000 -2.036E-0005 | 1 349.2694 0.0000 5.718E-0004  | 8 351.3267 0.0000 -2.036E-0005 |
| 15.33                          | 5 353.3574 0.0000 2.440E-0004  | 26.33                          |
| 1 349.0894 0.0000 3.318E-0004  | 8 351.3305 0.0000 -1.527E-0005 | 1 349.4111 0.0000 7.608E-0004  |
| 5 353.2415 0.0000 9.143E-0005  | 21.00                          | 5 353.5002 0.0000 4.321E-0004  |
| 8 351.3267 0.0000 -2.036E-0005 | 1 349.2809 0.0000 5.872E-0004  | 8 351.3228 0.0000 -2.549E-0005 |
| 15.67                          | 5 353.3651 0.0000 2.542E-0004  | 26.67                          |
| 1 349.1008 0.0000 3.471E-0004  | 8 351.3305 0.0000 -1.527E-0005 | 1 349.4188 0.0000 7.710E-0004  |
| 5 353.2454 0.0000 9.654E-0005  | 21.33                          | 5 353.5080 0.0000 4.423E-0004  |
| 8 351.3267 0.0000 -2.036E-0005 | 1 349.2885 0.0000 5.973E-0004  | 8 351.3228 0.0000 -2.549E-0005 |
| 16.00                          | 5 353.3728 0.0000 2.643E-0004  | 27.00                          |
| 1 349.1123 0.0000 3.624E-0004  | 8 351.3305 0.0000 -1.527E-0005 | 1 349.4264 0.0000 7.812E-0004  |
| 5 353.2531 0.0000 1.067E-0004  | 21.67                          | 5 353.5157 0.0000 4.524E-0004  |
| 8 351.3267 0.0000 -2.036E-0005 | 1 349.3000 0.0000 6.127E-0004  | 8 351.3228 0.0000 -2.549E-0005 |
| 16.33                          | 5 353.3805 0.0000 2.745E-0004  | 27.33                          |
| 1 349.1238 0.0000 3.777E-0004  | 8 351.3305 0.0000 -1.527E-0005 | 1 349.4341 0.0000 7.914E-0004  |
| 5 353.2609 0.0000 1.169E-0004  | 22.00                          | 5 353.5234 0.0000 4.626E-0004  |
| 8 351.3305 0.0000 -1.527E-0005 | 1 349.3077 0.0000 6.229E-0004  | 8 351.3228 0.0000 -2.549E-0005 |
| 16.67                          | 5 353.3921 0.0000 2.897E-0004  | 27.67                          |
| 1 349.1353 0.0000 3.931E-0004  | 8 351.3305 0.0000 -1.527E-0005 | 1 349.4418 0.0000 8.017E-0004  |
| 5 353.2647 0.0000 1.220E-0004  | 22.33                          | 5 353.5273 0.0000 4.677E-0004  |
| 8 351.3305 0.0000 -1.527E-0005 | 1 349.3153 0.0000 6.331E-0004  | 8 351.3228 0.0000 -2.549E-0005 |
| 17.00                          | 5 353.3998 0.0000 2.999E-0004  | 28.00                          |
| 1 349.1468 0.0000 4.084E-0004  | 8 351.3305 0.0000 -1.527E-0005 | 1 349.4533 0.0000 8.170E-0004  |
| 5 353.2724 0.0000 1.321E-0004  | 22.67                          | 5 353.5350 0.0000 4.779E-0004  |
| 8 351.3305 0.0000 -1.527E-0005 | 1 349.3268 0.0000 6.484E-0004  | 8 351.3228 0.0000 -2.549E-0005 |
| 17.33                          | 5 353.4076 0.0000 3.101E-0004  | 28.33                          |
| 1 349.1583 0.0000 4.237E-0004  | 8 351.3305 0.0000 -1.527E-0005 | 1 349.4609 0.0000 8.272E-0004  |
| 5 353.2802 0.0000 1.423E-0004  | 23.00                          | 5 353.5388 0.0000 4.830E-0004  |
| 8 351.3305 0.0000 -1.527E-0005 | 1 349.3383 0.0000 6.637E-0004  | 8 351.3228 0.0000 -2.549E-0005 |
| 17.67                          | 5 353.4191 0.0000 3.253E-0004  | 28.67                          |
| 1 349.1698 0.0000 4.390E-0004  | 8 351.3305 0.0000 -1.527E-0005 | 1 349.4648 0.0000 8.323E-0004  |
| 5 353.2879 0.0000 1.524E-0004  | 23.33                          | 5 353.5466 0.0000 4.931E-0004  |
| 8 351.3305 0.0000 -1.527E-0005 | 1 349.3460 0.0000 6.739E-0004  | 8 351.3190 0.0000 -3.058E-0005 |
| 18.00                          | 5 353.4268 0.0000 3.355E-0004  | 29.00                          |
| 1 349.1813 0.0000 4.544E-0004  | 8 351.3305 0.0000 -1.527E-0005 | 1 349.4724 0.0000 8.426E-0004  |
| 5 353.2956 0.0000 1.626E-0004  | 23.67                          | 5 353.5543 0.0000 5.033E-0004  |
| 8 351.3305 0.0000 -1.527E-0005 | 1 349.3536 0.0000 6.842E-0004  | 8 351.3190 0.0000 -3.058E-0005 |
| 18.33                          | 5 353.4384 0.0000 3.507E-0004  | 29.33                          |
| 1 349.1927 0.0000 4.696E-0004  | 8 351.3267 0.0000 -2.036E-0005 | 1 349.4801 0.0000 8.527E-0004  |
| 5 353.2995 0.0000 1.677E-0004  | 24.00                          | 5 353.5582 0.0000 5.085E-0004  |
| 8 351.3305 0.0000 -1.527E-0005 | 1 349.3613 0.0000 6.944E-0004  | 8 351.3152 0.0000 -3.563E-0005 |
| 18.67                          | 5 353.4462 0.0000 3.609E-0004  | 29.67                          |
| 1 349.2042 0.0000 4.849E-0004  | 8 351.3267 0.0000 -2.036E-0005 | 1 349.4878 0.0000 8.630E-0004  |
| 5 353.3072 0.0000 1.779E-0004  | 24.33                          | 5 353.5659 0.0000 5.185E-0004  |
| 8 351.3344 0.0000 -1.018E-0005 | 1 349.3690 0.0000 7.046E-0004  | 8 351.3152 0.0000 -3.563E-0005 |
| 19.00                          | 5 353.4539 0.0000 3.711E-0004  | 30.00                          |
| 1 349.2157 0.0000 5.003E-0004  | 8 351.3305 0.0000 -1.527E-0005 | 1 349.4954 0.0000 8.732E-0004  |
| 5 353.3149 0.0000 1.881E-0004  | 24.67                          | 5 353.5697 0.0000 5.236E-0004  |
| 8 351.3344 0.0000 -1.018E-0005 | 1 349.3728 0.0000 7.098E-0004  | 8 351.3113 0.0000 -4.076E-0005 |
| 19.33                          | 5 353.4616 0.0000 3.813E-0004  | 30.33                          |
| 1 349.2273 0.0000 5.157E-0004  | 8 351.3267 0.0000 -2.036E-0005 | 1 349.5031 0.0000 8.835E-0004  |

## EK-2 (devam) Strain-gage'lerden alınan şekil değişimi verileri

|                                |                                |                                |
|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| 5 353.5736 0.0000 5.287E-0004  | 36.00                          | 5 353.7397 0.0000 7.475E-0004  |
| 8 351.3113 0.0000 -4.076E-0005 | 1 349.5989 0.0000 1.011E-0003  | 8 351.2075 0.0000 -1.782E-0004 |
| 30.67                          | 5 353.6663 0.0000 6.508E-0004  | 41.67                          |
| 1 349.5108 0.0000 8.937E-0004  | 8 351.2690 0.0000 -9.676E-0005 | 1 349.6832 0.0000 1.124E-0003  |
| 5 353.5775 0.0000 5.338E-0004  | 36.33                          | 5 353.7436 0.0000 7.526E-0004  |
| 8 351.3074 0.0000 -4.585E-0005 | 1 349.6028 0.0000 1.016E-0003  | 8 351.2075 0.0000 -1.782E-0004 |
| 31.00                          | 5 353.6740 0.0000 6.610E-0004  | 42.00                          |
| 1 349.5146 0.0000 8.988E-0004  | 8 351.2690 0.0000 -9.676E-0005 | 1 349.6871 0.0000 1.129E-0003  |
| 5 353.5852 0.0000 5.440E-0004  | 36.67                          | 5 353.7475 0.0000 7.577E-0004  |
| 8 351.3036 0.0000 -5.094E-0005 | 1 349.6066 0.0000 1.021E-0003  | 8 351.2036 0.0000 -1.833E-0004 |
| 31.33                          | 5 353.6818 0.0000 6.712E-0004  | 42.33                          |
| 1 349.5184 0.0000 9.039E-0004  | 8 351.2690 0.0000 -9.676E-0005 | 1 349.6948 0.0000 1.139E-0003  |
| 5 353.5891 0.0000 5.491E-0004  | 37.00                          | 5 353.7513 0.0000 7.628E-0004  |
| 8 351.3036 0.0000 -5.094E-0005 | 1 349.6143 0.0000 1.032E-0003  | 8 351.1960 0.0000 -1.934E-0004 |
| 31.67                          | 5 353.6895 0.0000 6.814E-0004  | 42.67                          |
| 1 349.5261 0.0000 9.141E-0004  | 8 351.2651 0.0000 -1.018E-0004 | 1 349.6986 0.0000 1.144E-0003  |
| 5 353.5891 0.0000 5.491E-0004  | 37.33                          | 5 353.7552 0.0000 7.678E-0004  |
| 8 351.3074 0.0000 -4.585E-0005 | 1 349.6181 0.0000 1.037E-0003  | 8 351.1882 0.0000 -2.037E-0004 |
| 32.00                          | 5 353.6972 0.0000 6.916E-0004  | 43.00                          |
| 1 349.5299 0.0000 9.192E-0004  | 8 351.2651 0.0000 -1.018E-0004 | 1 349.7024 0.0000 1.149E-0003  |
| 5 353.5929 0.0000 5.542E-0004  | 37.67                          | 5 353.7552 0.0000 7.678E-0004  |
| 8 351.3074 0.0000 -4.585E-0005 | 1 349.6181 0.0000 1.037E-0003  | 8 351.1806 0.0000 -2.138E-0004 |
| 32.33                          | 5 353.7088 0.0000 7.068E-0004  | 43.33                          |
| 1 349.5376 0.0000 9.294E-0004  | 8 351.2613 0.0000 -1.069E-0004 | 1 349.7063 0.0000 1.154E-0003  |
| 5 353.6006 0.0000 5.644E-0004  | 38.00                          | 5 353.7629 0.0000 7.780E-0004  |
| 8 351.3036 0.0000 -5.094E-0005 | 1 349.6219 0.0000 1.042E-0003  | 8 351.1767 0.0000 -2.189E-0004 |
| 32.67                          | 5 353.7165 0.0000 7.170E-0004  | 43.67                          |
| 1 349.5414 0.0000 9.345E-0004  | 8 351.2574 0.0000 -1.120E-0004 | 1 349.7101 0.0000 1.159E-0003  |
| 5 353.6045 0.0000 5.695E-0004  | 38.33                          | 5 353.7668 0.0000 7.831E-0004  |
| 8 351.2997 0.0000 -5.603E-0005 | 1 349.6257 0.0000 1.047E-0003  | 8 351.1690 0.0000 -2.291E-0004 |
| 33.00                          | 5 353.7204 0.0000 7.221E-0004  | 44.00                          |
| 1 349.5491 0.0000 9.447E-0004  | 8 351.2536 0.0000 -1.171E-0004 | 1 349.7101 0.0000 1.159E-0003  |
| 5 353.6161 0.0000 5.746E-0004  | 38.67                          | 5 353.7745 0.0000 7.933E-0004  |
| 8 351.2997 0.0000 -5.603E-0005 | 1 349.6296 0.0000 1.052E-0003  | 8 351.1575 0.0000 -2.444E-0004 |
| 33.33                          | 5 353.7242 0.0000 7.271E-0004  | 44.33                          |
| 1 349.5529 0.0000 9.499E-0004  | 8 351.2497 0.0000 -1.223E-0004 | 1 349.7101 0.0000 1.159E-0003  |
| 5 353.6161 0.0000 5.847E-0004  | 39.00                          | 5 353.7745 0.0000 7.933E-0004  |
| 8 351.2959 0.0000 -6.108E-0005 | 1 349.6334 0.0000 1.057E-0003  | 8 351.1536 0.0000 -2.495E-0004 |
| 33.67                          | 5 353.7281 0.0000 7.322E-0004  | 44.67                          |
| 1 349.5606 0.0000 9.601E-0004  | 8 351.2459 0.0000 -1.273E-0004 | 1 349.7139 0.0000 1.164E-0003  |
| 5 353.6238 0.0000 5.949E-0004  | 39.33                          | 5 353.7822 0.0000 8.035E-0004  |
| 8 351.2959 0.0000 -6.108E-0005 | 1 349.6411 0.0000 1.067E-0003  | 8 351.1460 0.0000 -2.596E-0004 |
| 34.00                          | 5 353.7320 0.0000 7.373E-0004  | 45.00                          |
| 1 349.5645 0.0000 9.652E-0004  | 8 351.2421 0.0000 -1.324E-0004 | 1 349.7139 0.0000 1.164E-0003  |
| 5 353.6354 0.0000 6.101E-0004  | 39.67                          | 5 353.7899 0.0000 8.137E-0004  |
| 8 351.2921 0.0000 -6.618E-0005 | 1 349.6487 0.0000 1.078E-0003  | 8 351.1344 0.0000 -2.749E-0004 |
| 34.33                          | 5 353.7320 0.0000 7.373E-0004  | 45.33                          |
| 1 349.5683 0.0000 9.703E-0004  | 8 351.2383 0.0000 -1.374E-0004 | 1 349.7139 0.0000 1.164E-0003  |
| 5 353.6393 0.0000 6.152E-0004  | 40.00                          | 5 353.8054 0.0000 8.340E-0004  |
| 8 351.2882 0.0000 -7.131E-0005 | 1 349.6526 0.0000 1.083E-0003  | 8 351.1229 0.0000 -2.902E-0004 |
| 34.67                          | 5 353.7320 0.0000 7.373E-0004  | 45.67                          |
| 1 349.5759 0.0000 9.805E-0004  | 8 351.2305 0.0000 -1.477E-0004 | 1 349.6794 0.0000 1.119E-0003  |
| 5 353.6470 0.0000 6.254E-0004  | 40.33                          | 5 353.8054 0.0000 8.340E-0004  |
| 8 351.2844 0.0000 -7.636E-0005 | 1 349.6602 0.0000 1.093E-0003  | 8 351.0691 0.0000 -3.614E-0004 |
| 35.00                          | 5 353.7320 0.0000 7.373E-0004  | 46.00                          |
| 1 349.5836 0.0000 9.907E-0004  | 8 351.2228 0.0000 -1.578E-0004 | 1 349.6257 0.0000 1.047E-0003  |
| 5 353.6509 0.0000 6.305E-0004  | 40.67                          | 5 353.8054 0.0000 8.340E-0004  |
| 8 351.2767 0.0000 -8.658E-0005 | 1 349.6679 0.0000 1.103E-0003  | 8 350.9768 0.0000 -4.835E-0004 |
| 35.33                          | 5 353.7358 0.0000 7.424E-0004  | 46.33                          |
| 1 349.5874 0.0000 9.958E-0004  | 8 351.2190 0.0000 -1.629E-0004 | 1 349.5951 0.0000 1.006E-0003  |
| 5 353.6586 0.0000 6.406E-0004  | 41.00                          | 5 353.8363 0.0000 8.747E-0004  |
| 8 351.2767 0.0000 -8.658E-0005 | 1 349.6717 0.0000 1.108E-0003  | 8 350.8308 0.0000 -6.769E-0004 |
| 35.67                          | 5 353.7397 0.0000 7.475E-0004  | 46.67                          |
| 1 349.5951 0.0000 1.006E-0003  | 8 351.2113 0.0000 -1.731E-0004 | 1 349.5529 0.0000 9.499E-0004  |
| 5 353.6624 0.0000 6.457E-0004  | 41.33                          | 5 353.8827 0.0000 9.358E-0004  |
| 8 351.2728 0.0000 -9.167E-0005 | 1 349.6794 0.0000 1.119E-0003  | 8 350.5772 0.0000 -1.013E-0003 |

## EK-2 (devam) Strain-gage'lerden alınan şekil değişimi verileri

|                                |                                |                                |
|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| 47.00                          | 5 353.2299 0.0000 7.616E-0005  | 58.00                          |
| 1 349.5146 0.0000 8.988E-0004  | 8 350.4429 0.0000 -1.190E-0003 | 1 358.4239 0.0000 1.278E-0002  |
| 5 353.9329 0.0000 1.002E-0003  | 52.67                          | 5 353.2223 0.0000 6.603E-0005  |
| 8 350.3162 0.0000 -1.358E-0003 | 1 358.4239 0.0000 1.278E-0002  | 8 350.4467 0.0000 -1.185E-0003 |
| 47.33                          | 5 353.2299 0.0000 7.616E-0005  | 58.33                          |
| 1 349.4993 0.0000 8.783E-0004  | 8 350.4429 0.0000 -1.190E-0003 | 1 358.4239 0.0000 1.278E-0002  |
| 5 353.9716 0.0000 1.053E-0003  | 53.00                          | 5 353.2223 0.0000 6.603E-0005  |
| 8 350.1128 0.0000 -1.627E-0003 | 1 358.4239 0.0000 1.278E-0002  | 8 350.4467 0.0000 -1.185E-0003 |
| 47.67                          | 5 353.2299 0.0000 7.616E-0005  | 58.67                          |
| 1 349.4954 0.0000 8.732E-0004  | 8 350.4429 0.0000 -1.190E-0003 | 1 358.4239 0.0000 1.278E-0002  |
| 5 353.9948 0.0000 1.083E-0003  | 53.33                          | 5 353.2223 0.0000 6.603E-0005  |
| 8 349.9478 0.0000 -1.846E-0003 | 1 358.4239 0.0000 1.278E-0002  | 8 350.4467 0.0000 -1.185E-0003 |
| 48.00                          | 5 353.2299 0.0000 7.616E-0005  | 59.00                          |
| 1 349.4993 0.0000 8.783E-0004  | 8 350.4429 0.0000 -1.190E-0003 | 1 358.4239 0.0000 1.278E-0002  |
| 5 354.0180 0.0000 1.114E-0003  | 53.67                          | 5 353.2184 0.0000 6.097E-0005  |
| 8 349.8443 0.0000 -1.983E-0003 | 1 358.4239 0.0000 1.278E-0002  | 8 350.4429 0.0000 -1.190E-0003 |
| 48.33                          | 5 353.2261 0.0000 7.110E-0005  | 59.33                          |
| 1 349.5184 0.0000 9.039E-0004  | 8 350.4429 0.0000 -1.190E-0003 | 1 358.4239 0.0000 1.278E-0002  |
| 5 354.0527 0.0000 1.160E-0003  | 54.00                          | 5 353.2184 0.0000 6.097E-0005  |
| 8 349.7791 0.0000 -2.069E-0003 | 1 358.4239 0.0000 1.278E-0002  | 8 350.4429 0.0000 -1.190E-0003 |
| 48.67                          | 5 353.2299 0.0000 7.616E-0005  | 59.67                          |
| 1 349.5376 0.0000 9.294E-0004  | 8 350.4467 0.0000 -1.185E-0003 | 1 358.4239 0.0000 1.278E-0002  |
| 5 354.0837 0.0000 1.201E-0003  | 54.33                          | 5 353.2184 0.0000 6.097E-0005  |
| 8 349.7292 0.0000 -2.135E-0003 | 1 358.4239 0.0000 1.278E-0002  | 8 350.4429 0.0000 -1.190E-0003 |
| 49.00                          | 5 353.2299 0.0000 7.616E-0005  | 60.00                          |
| 1 349.5568 0.0000 9.550E-0004  | 8 350.4467 0.0000 -1.185E-0003 | 1 358.4239 0.0000 1.278E-0002  |
| 5 354.0952 0.0000 1.216E-0003  | 54.67                          | 5 353.2184 0.0000 6.097E-0005  |
| 8 349.6717 0.0000 -2.211E-0003 | 1 358.4239 0.0000 1.278E-0002  | 8 350.4429 0.0000 -1.190E-0003 |
| 49.33                          | 5 353.2299 0.0000 7.616E-0005  | 60.33                          |
| 1 349.5836 0.0000 9.907E-0004  | 8 350.4467 0.0000 -1.185E-0003 | 1 358.4239 0.0000 1.278E-0002  |
| 5 354.1107 0.0000 1.236E-0003  | 55.00                          | 5 353.2184 0.0000 6.097E-0005  |
| 8 349.6181 0.0000 -2.282E-0003 | 1 358.4239 0.0000 1.278E-0002  | 8 350.4429 0.0000 -1.190E-0003 |
| 49.67                          | 5 353.2299 0.0000 7.616E-0005  | 60.67                          |
| 1 353.5041 0.0000 6.218E-0003  | 8 350.4467 0.0000 -1.185E-0003 | 1 358.4239 0.0000 1.278E-0002  |
| 5 353.7242 0.0000 7.271E-0004  | 55.33                          | 5 353.2184 0.0000 6.097E-0005  |
| 8 352.4817 0.0000 1.509E-0003  | 1 358.4239 0.0000 1.278E-0002  | 8 350.4429 0.0000 -1.190E-0003 |
| 50.00                          | 5 353.2261 0.0000 7.110E-0005  | 61.00                          |
| 1 357.8862 0.0000 1.206E-0002  | 8 350.4467 0.0000 -1.185E-0003 | 1 358.4239 0.0000 1.278E-0002  |
| 5 353.2879 0.0000 1.524E-0004  | 55.67                          | 5 353.2184 0.0000 6.097E-0005  |
| 8 352.9059 0.0000 2.070E-0003  | 1 358.4239 0.0000 1.278E-0002  | 8 350.4429 0.0000 -1.190E-0003 |
| 50.33                          | 5 353.2261 0.0000 7.110E-0005  | 61.33                          |
| 1 358.4239 0.0000 1.278E-0002  | 8 350.4467 0.0000 -1.185E-0003 | 1 358.4239 0.0000 1.278E-0002  |
| 5 353.2415 0.0000 9.143E-0005  | 56.00                          | 5 353.2184 0.0000 6.097E-0005  |
| 8 350.4467 0.0000 -1.185E-0003 | 1 358.4239 0.0000 1.278E-0002  | 8 350.4429 0.0000 -1.190E-0003 |
| 50.67                          | 5 353.2261 0.0000 7.110E-0005  | 61.67                          |
| 1 358.4239 0.0000 1.278E-0002  | 8 350.4467 0.0000 -1.185E-0003 | 1 358.4239 0.0000 1.278E-0002  |
| 5 353.2377 0.0000 8.633E-0005  | 56.33                          | 5 353.2184 0.0000 6.097E-0005  |
| 8 350.4467 0.0000 -1.185E-0003 | 1 358.4239 0.0000 1.278E-0002  | 8 350.4429 0.0000 -1.190E-0003 |
| 51.00                          | 5 353.2261 0.0000 7.110E-0005  | 62.00                          |
| 1 358.4239 0.0000 1.278E-0002  | 8 350.4467 0.0000 -1.185E-0003 | 1 358.4239 0.0000 1.278E-0002  |
| 5 353.2338 0.0000 8.127E-0005  | 56.67                          | 5 353.2145 0.0000 5.587E-0005  |
| 8 350.4467 0.0000 -1.185E-0003 | 1 358.4239 0.0000 1.278E-0002  | 8 350.4429 0.0000 -1.190E-0003 |
| 51.33                          | 5 353.2261 0.0000 7.110E-0005  | 62.33                          |
| 1 358.4239 0.0000 1.278E-0002  | 8 350.4429 0.0000 -1.190E-0003 | 1 358.4239 0.0000 1.278E-0002  |
| 5 353.2338 0.0000 8.127E-0005  | 57.00                          | 5 353.2145 0.0000 5.587E-0005  |
| 8 350.4467 0.0000 -1.185E-0003 | 1 358.4239 0.0000 1.278E-0002  | 8 350.4429 0.0000 -1.190E-0003 |
| 51.67                          | 5 353.2223 0.0000 6.603E-0005  | 62.67                          |
| 1 358.4239 0.0000 1.278E-0002  | 8 350.4429 0.0000 -1.190E-0003 | 1 358.4239 0.0000 1.278E-0002  |
| 5 353.2338 0.0000 8.127E-0005  | 57.33                          | 5 353.2145 0.0000 5.587E-0005  |
| 8 350.4429 0.0000 -1.190E-0003 | 1 358.4239 0.0000 1.278E-0002  | 8 350.4390 0.0000 -1.195E-0003 |
| 52.00                          | 5 353.2223 0.0000 6.603E-0005  | 63.00                          |
| 1 358.4239 0.0000 1.278E-0002  | 8 350.4467 0.0000 -1.185E-0003 | 1 358.4239 0.0000 1.278E-0002  |
| 5 353.2299 0.0000 7.616E-0005  | 57.67                          | 5 353.2145 0.0000 5.587E-0005  |
| 8 350.4429 0.0000 -1.190E-0003 | 1 358.4239 0.0000 1.278E-0002  | 8 350.4390 0.0000 -1.195E-0003 |
| 52.33                          | 5 353.2223 0.0000 6.603E-0005  | 63.33                          |
| 1 358.4239 0.0000 1.278E-0002  | 8 350.4467 0.0000 -1.185E-0003 | 1 358.4239 0.0000 1.278E-0002  |

## EK-2 (devam) Strain-gage'lerden alınan şekil değişimi verileri

|                                |                                |                                |
|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| 5 353.2145 0.0000 5.587E-0005  | 5 353.2107 0.0000 5.080E-0005  | 5 353.2068 0.0000 4.570E-0005  |
| 8 350.4390 0.0000 -1.195E-0003 | 8 350.4390 0.0000 -1.195E-0003 | 8 350.4390 0.0000 -1.195E-0003 |
| 63.67                          | 66.00                          | 68.33                          |
| 1 358.4239 0.0000 1.278E-0002  | 1 358.4239 0.0000 1.278E-0002  | 1 358.4239 0.0000 1.278E-0002  |
| 5 353.2107 0.0000 5.080E-0005  | 5 353.2107 0.0000 5.080E-0005  | 5 353.2068 0.0000 4.570E-0005  |
| 8 350.4390 0.0000 -1.195E-0003 | 8 350.4429 0.0000 -1.190E-0003 | 8 350.4390 0.0000 -1.195E-0003 |
| 64.00                          | 66.33                          | 68.67                          |
| 1 358.4239 0.0000 1.278E-0002  | 1 358.4239 0.0000 1.278E-0002  | 1 358.4239 0.0000 1.278E-0002  |
| 5 353.2107 0.0000 5.080E-0005  | 5 353.2107 0.0000 5.080E-0005  | 5 353.2068 0.0000 4.570E-0005  |
| 8 350.4390 0.0000 -1.195E-0003 | 8 350.4390 0.0000 -1.195E-0003 | 8 350.4390 0.0000 -1.195E-0003 |
| 64.33                          | 66.67                          | 69.00                          |
| 1 358.4239 0.0000 1.278E-0002  | 1 358.4239 0.0000 1.278E-0002  | 1 358.4239 0.0000 1.278E-0002  |
| 5 353.2107 0.0000 5.080E-0005  | 5 353.2068 0.0000 4.570E-0005  | 5 353.2068 0.0000 4.570E-0005  |
| 8 350.4429 0.0000 -1.190E-0003 | 8 350.4429 0.0000 -1.190E-0003 | 8 350.4390 0.0000 -1.195E-0003 |
| 64.67                          | 67.00                          | 69.33                          |
| 1 358.4239 0.0000 1.278E-0002  | 1 358.4239 0.0000 1.278E-0002  | 1 358.4239 0.0000 1.278E-0002  |
| 5 353.2107 0.0000 5.080E-0005  | 5 353.2068 0.0000 4.570E-0005  | 5 353.2068 0.0000 4.570E-0005  |
| 8 350.4390 0.0000 -1.195E-0003 | 8 350.4390 0.0000 -1.195E-0003 | 8 350.4390 0.0000 -1.195E-0003 |
| 65.00                          | 67.33                          | 69.67                          |
| 1 358.4239 0.0000 1.278E-0002  | 1 358.4239 0.0000 1.278E-0002  | 1 358.4239 0.0000 1.278E-0002  |
| 5 353.2107 0.0000 5.080E-0005  | 5 353.2068 0.0000 4.570E-0005  | 5 353.2068 0.0000 4.570E-0005  |
| 8 350.4390 0.0000 -1.195E-0003 | 8 350.4390 0.0000 -1.195E-0003 | 8 350.4390 0.0000 -1.195E-0003 |
| 65.33                          | 67.67                          | 70.00                          |
| 1 358.4239 0.0000 1.278E-0002  | 1 358.4239 0.0000 1.278E-0002  | 1 358.4239 0.0000 1.278E-0002  |
| 5 353.2107 0.0000 5.080E-0005  | 5 353.2068 0.0000 4.570E-0005  | 5 353.2068 0.0000 4.570E-0005  |
| 8 350.4390 0.0000 -1.195E-0003 | 8 350.4390 0.0000 -1.195E-0003 | 8 350.4429 0.0000 -1.190E-0003 |
| 65.67                          | 68.00                          |                                |
| 1 358.4239 0.0000 1.278E-0002  | 1 358.4239 0.0000 1.278E-0002  |                                |

5 numaralı numune:

Saniye,

Strain-gage bağlandığı devre numarası / direnç değeri / boşluk / şekil değişimi oranı

|                                |                                |                                |
|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| 0.00                           | 5 353.2570 0.0000 -3.252E-0004 | 4.33                           |
| 1 358.4239 0.0000 0.000E+0000  | 8 351.4536 0.0000 -3.257E-0004 | 1 358.4239 0.0000 0.000E+0000  |
| 5 353.5002 0.0000 -5.099E-0006 | 2.33                           | 5 353.2763 0.0000 -2.998E-0004 |
| 8 351.6960 0.0000 -5.126E-0006 | 1 358.4239 0.0000 0.000E+0000  | 8 351.4575 0.0000 -3.206E-0004 |
| 0.33                           | 5 353.2570 0.0000 -3.252E-0004 | 4.67                           |
| 1 358.4239 0.0000 0.000E+0000  | 8 351.4536 0.0000 -3.257E-0004 | 1 358.4239 0.0000 0.000E+0000  |
| 5 353.3728 0.0000 -1.728E-0004 | 2.67                           | 5 353.2802 0.0000 -2.947E-0004 |
| 8 351.5767 0.0000 -1.628E-0004 | 1 358.4239 0.0000 0.000E+0000  | 8 351.4613 0.0000 -3.155E-0004 |
| 0.67                           | 5 353.2570 0.0000 -3.252E-0004 | 5.00                           |
| 1 358.4239 0.0000 0.000E+0000  | 8 351.4575 0.0000 -3.206E-0004 | 1 358.4239 0.0000 0.000E+0000  |
| 5 353.2493 0.0000 -3.353E-0004 | 3.00                           | 5 353.2879 0.0000 -2.845E-0004 |
| 8 351.4613 0.0000 -3.155E-0004 | 1 358.4239 0.0000 0.000E+0000  | 8 351.4613 0.0000 -3.155E-0004 |
| 1.00                           | 5 353.2570 0.0000 -3.252E-0004 | 5.33                           |
| 1 358.4239 0.0000 0.000E+0000  | 8 351.4575 0.0000 -3.206E-0004 | 1 358.4239 0.0000 0.000E+0000  |
| 5 353.2531 0.0000 -3.302E-0004 | 3.33                           | 5 353.2995 0.0000 -2.693E-0004 |
| 8 351.4613 0.0000 -3.155E-0004 | 1 358.4239 0.0000 0.000E+0000  | 8 351.4651 0.0000 -3.104E-0004 |
| 1.33                           | 5 353.2609 0.0000 -3.201E-0004 | 5.67                           |
| 1 358.4239 0.0000 0.000E+0000  | 8 351.4575 0.0000 -3.206E-0004 | 1 358.4239 0.0000 0.000E+0000  |
| 5 353.2531 0.0000 -3.302E-0004 | 3.67                           | 5 353.3072 0.0000 -2.591E-0004 |
| 8 351.4575 0.0000 -3.206E-0004 | 1 358.4239 0.0000 0.000E+0000  | 8 351.4651 0.0000 -3.104E-0004 |
| 1.67                           | 5 353.2686 0.0000 -3.099E-0004 | 6.00                           |
| 1 358.4239 0.0000 0.000E+0000  | 8 351.4575 0.0000 -3.206E-0004 | 1 358.4239 0.0000 0.000E+0000  |
| 5 353.2570 0.0000 -3.252E-0004 | 4.00                           | 5 353.3149 0.0000 -2.489E-0004 |
| 8 351.4536 0.0000 -3.257E-0004 | 1 358.4239 0.0000 0.000E+0000  | 8 351.4690 0.0000 -3.053E-0004 |
| 2.00                           | 5 353.2724 0.0000 -3.049E-0004 | 6.33                           |
| 1 358.4239 0.0000 0.000E+0000  | 8 351.4575 0.0000 -3.206E-0004 | 1 358.4239 0.0000 0.000E+0000  |

## EK-2 (devam) Strain-gage'lerden alınan şekil değişimi verileri

|            |            |              |              |             |              |             |              |              |              |             |
|------------|------------|--------------|--------------|-------------|--------------|-------------|--------------|--------------|--------------|-------------|
| 5 353.3226 | 0.0000     | -2.388E-0004 | 12.00        | 5 353.5234  | 0.0000       | 2.534E-0005 |              |              |              |             |
| 8 351.4690 | 0.0000     | -3.053E-0004 | 1 358.4239   | 0.0000      | 0.000E+0000  | 8 351.5152  | 0.0000       | -2.443E-0004 |              |             |
| 6.67       | 5 353.4462 | 0.0000       | -7.625E-0005 | 17.67       | 1 358.4239   | 0.0000      | 0.000E+0000  |              |              |             |
| 1 358.4239 | 0.0000     | 0.000E+0000  | 8 351.4920   | 0.0000      | -2.748E-0004 | 5 353.5273  | 0.0000       | 3.044E-0005  |              |             |
| 5 353.3303 | 0.0000     | -2.287E-0004 | 12.33        | 1 358.4239  | 0.0000       | 0.000E+0000 | 8 351.5190   | 0.0000       | -2.392E-0004 |             |
| 8 351.4690 | 0.0000     | -3.053E-0004 | 1 358.4239   | 0.0000      | 0.000E+0000  | 18.00       | 1 358.4239   | 0.0000       | 0.000E+0000  |             |
| 7.00       | 5 353.4539 | 0.0000       | -6.609E-0005 | 18.33       | 5 353.5311   | 0.0000      | 3.554E-0005  |              |              |             |
| 1 358.4239 | 0.0000     | 0.000E+0000  | 8 351.4920   | 0.0000      | -2.748E-0004 | 8 351.5190  | 0.0000       | -2.392E-0004 |              |             |
| 5 353.3419 | 0.0000     | -2.134E-0004 | 12.67        | 1 358.4239  | 0.0000       | 0.000E+0000 | 18.33        | 1 358.4239   | 0.0000       | 0.000E+0000 |
| 8 351.4728 | 0.0000     | -3.002E-0004 | 1 358.4239   | 0.0000      | 0.000E+0000  | 18.67       | 5 353.5350   | 0.0000       | 4.059E-0005  |             |
| 7.33       | 5 353.4578 | 0.0000       | -6.099E-0005 | 18.33       | 8 351.5190   | 0.0000      | -2.392E-0004 |              |              |             |
| 1 358.4239 | 0.0000     | 0.000E+0000  | 8 351.4920   | 0.0000      | -2.748E-0004 | 19.00       | 1 358.4239   | 0.0000       | 0.000E+0000  |             |
| 5 353.3496 | 0.0000     | -2.033E-0004 | 13.00        | 1 358.4239  | 0.0000       | 0.000E+0000 | 5 353.5427   | 0.0000       | 5.079E-0005  |             |
| 8 351.4767 | 0.0000     | -2.951E-0004 | 1 358.4239   | 0.0000      | 0.000E+0000  | 8 351.5229  | 0.0000       | -2.341E-0004 |              |             |
| 7.67       | 5 353.4655 | 0.0000       | -5.087E-0005 | 19.33       | 1 358.4239   | 0.0000      | 0.000E+0000  |              |              |             |
| 1 358.4239 | 0.0000     | 0.000E+0000  | 8 351.4959   | 0.0000      | -2.697E-0004 | 5 353.5388  | 0.0000       | 4.569E-0005  |              |             |
| 5 353.3574 | 0.0000     | -1.931E-0004 | 13.33        | 1 358.4239  | 0.0000       | 0.000E+0000 | 8 351.5190   | 0.0000       | -2.392E-0004 |             |
| 8 351.4767 | 0.0000     | -2.951E-0004 | 1 358.4239   | 0.0000      | 0.000E+0000  | 19.00       | 1 358.4239   | 0.0000       | 0.000E+0000  |             |
| 8.00       | 5 353.4732 | 0.0000       | -4.072E-0005 | 19.33       | 5 353.5466   | 0.0000      | 5.585E-0005  |              |              |             |
| 1 358.4239 | 0.0000     | 0.000E+0000  | 8 351.4959   | 0.0000      | -2.697E-0004 | 8 351.5229  | 0.0000       | -2.341E-0004 |              |             |
| 5 353.3689 | 0.0000     | -1.779E-0004 | 13.67        | 19.67       | 1 358.4239   | 0.0000      | 0.000E+0000  |              |              |             |
| 8 351.4767 | 0.0000     | -2.951E-0004 | 1 358.4239   | 0.0000      | 0.000E+0000  | 5 353.5466  | 0.0000       | 5.585E-0005  |              |             |
| 8.33       | 5 353.4771 | 0.0000       | -3.562E-0005 | 19.33       | 8 351.5229   | 0.0000      | -2.341E-0004 |              |              |             |
| 1 358.4239 | 0.0000     | 0.000E+0000  | 8 351.4959   | 0.0000      | -2.697E-0004 | 20.00       | 1 358.4239   | 0.0000       | 0.000E+0000  |             |
| 5 353.3728 | 0.0000     | -1.728E-0004 | 14.00        | 1 358.4239  | 0.0000       | 0.000E+0000 | 5 353.5543   | 0.0000       | 6.605E-0005  |             |
| 8 351.4767 | 0.0000     | -2.951E-0004 | 1 358.4239   | 0.0000      | 0.000E+0000  | 8 351.5267  | 0.0000       | -2.290E-0004 |              |             |
| 8.67       | 5 353.4848 | 0.0000       | -2.546E-0005 | 20.67       | 1 358.4239   | 0.0000      | 0.000E+0000  |              |              |             |
| 1 358.4239 | 0.0000     | 0.000E+0000  | 8 351.4998   | 0.0000      | -2.646E-0004 | 5 353.5582  | 0.0000       | 7.115E-0005  |              |             |
| 5 353.3805 | 0.0000     | -1.626E-0004 | 14.33        | 15.67       | 8 351.5267   | 0.0000      | -2.290E-0004 |              |              |             |
| 8 351.4806 | 0.0000     | -2.900E-0004 | 1 358.4239   | 0.0000      | 0.000E+0000  | 21.00       | 1 358.4239   | 0.0000       | 0.000E+0000  |             |
| 9.00       | 5 353.4886 | 0.0000       | -2.036E-0005 | 15.33       | 5 353.5582   | 0.0000      | 7.115E-0005  |              |              |             |
| 1 358.4239 | 0.0000     | 0.000E+0000  | 8 351.4998   | 0.0000      | -2.646E-0004 | 8 351.5267  | 0.0000       | -2.290E-0004 |              |             |
| 5 353.3882 | 0.0000     | -1.525E-0004 | 14.67        | 1 358.4239  | 0.0000       | 0.000E+0000 | 21.33        | 1 358.4239   | 0.0000       | 0.000E+0000 |
| 8 351.4806 | 0.0000     | -2.900E-0004 | 1 358.4239   | 0.0000      | 0.000E+0000  | 5 353.5582  | 0.0000       | 7.115E-0005  |              |             |
| 9.33       | 5 353.4925 | 0.0000       | -1.530E-0005 | 15.00       | 8 351.5267   | 0.0000      | -2.290E-0004 |              |              |             |
| 1 358.4239 | 0.0000     | 0.000E+0000  | 8 351.4998   | 0.0000      | -2.646E-0004 | 21.00       | 1 358.4239   | 0.0000       | 0.000E+0000  |             |
| 5 353.3960 | 0.0000     | -1.423E-0004 | 15.00        | 1 358.4239  | 0.0000       | 0.000E+0000 | 5 353.5582   | 0.0000       | 7.115E-0005  |             |
| 8 351.4844 | 0.0000     | -2.850E-0004 | 1 358.4239   | 0.0000      | 0.000E+0000  | 8 351.5267  | 0.0000       | -2.290E-0004 |              |             |
| 9.67       | 5 353.4964 | 0.0000       | -1.020E-0005 | 20.67       | 1 358.4239   | 0.0000      | 0.000E+0000  |              |              |             |
| 1 358.4239 | 0.0000     | 0.000E+0000  | 8 351.4998   | 0.0000      | -2.646E-0004 | 5 353.5582  | 0.0000       | 7.115E-0005  |              |             |
| 5 353.3998 | 0.0000     | -1.372E-0004 | 15.33        | 1 358.4239  | 0.0000       | 0.000E+0000 | 8 351.5267   | 0.0000       | -2.290E-0004 |             |
| 8 351.4844 | 0.0000     | -2.850E-0004 | 1 358.4239   | 0.0000      | 0.000E+0000  | 21.00       | 1 358.4239   | 0.0000       | 0.000E+0000  |             |
| 10.00      | 5 353.5041 | 0.0000       | 0.000E+0000  | 15.67       | 5 353.5582   | 0.0000      | 7.115E-0005  |              |              |             |
| 1 358.4239 | 0.0000     | 0.000E+0000  | 8 351.4998   | 0.0000      | -2.646E-0004 | 8 351.5267  | 0.0000       | -2.290E-0004 |              |             |
| 5 353.4076 | 0.0000     | -1.270E-0004 | 15.00        | 1 358.4239  | 0.0000       | 0.000E+0000 | 21.33        | 1 358.4239   | 0.0000       | 0.000E+0000 |
| 8 351.4883 | 0.0000     | -2.798E-0004 | 1 358.4239   | 0.0000      | 0.000E+0000  | 5 353.5582  | 0.0000       | 7.115E-0005  |              |             |
| 10.33      | 5 353.5080 | 0.0000       | 5.059E-0006  | 16.00       | 8 351.5229   | 0.0000      | -2.341E-0004 |              |              |             |
| 1 358.4239 | 0.0000     | 0.000E+0000  | 8 351.4998   | 0.0000      | -2.646E-0004 | 21.67       | 1 358.4239   | 0.0000       | 0.000E+0000  |             |
| 5 353.4153 | 0.0000     | -1.168E-0004 | 16.33        | 1 358.4239  | 0.0000       | 0.000E+0000 | 5 353.5620   | 0.0000       | 7.613E-0005  |             |
| 8 351.4883 | 0.0000     | -2.798E-0004 | 5 353.5157   | 0.0000      | 1.518E-0005  | 8 351.5190  | 0.0000       | -2.392E-0004 |              |             |
| 10.67      | 8 351.5036 | 0.0000       | -2.595E-0004 | 22.00       | 1 358.4239   | 0.0000      | 0.000E+0000  |              |              |             |
| 1 358.4239 | 0.0000     | 0.000E+0000  | 16.67        | 1 358.4239  | 0.0000       | 0.000E+0000 | 5 353.5659   | 0.0000       | 8.123E-0005  |             |
| 5 353.4191 | 0.0000     | -1.119E-0004 | 1 358.4239   | 0.0000      | 0.000E+0000  | 8 351.5190  | 0.0000       | -2.392E-0004 |              |             |
| 8 351.4883 | 0.0000     | -2.798E-0004 | 5 353.5195   | 0.0000      | 2.024E-0005  | 22.33       | 1 358.4239   | 0.0000       | 0.000E+0000  |             |
| 11.00      | 8 351.5036 | 0.0000       | -2.595E-0004 | 17.00       | 5 353.5697   | 0.0000      | 8.633E-0005  |              |              |             |
| 1 358.4239 | 0.0000     | 0.000E+0000  | 1 358.4239   | 0.0000      | 0.000E+0000  | 8 351.5152  | 0.0000       | -2.443E-0004 |              |             |
| 5 353.4268 | 0.0000     | -1.017E-0004 | 5 353.5195   | 0.0000      | 2.024E-0005  | 22.67       | 1 358.4239   | 0.0000       | 0.000E+0000  |             |
| 8 351.4920 | 0.0000     | -2.748E-0004 | 8 351.5113   | 0.0000      | -2.494E-0004 | 5 353.5736  | 0.0000       | 9.139E-0005  |              |             |
| 11.33      | 17.33      | 1 358.4239   | 0.0000       | 0.000E+0000 | 8 351.5152   | 0.0000      | -2.443E-0004 |              |              |             |
| 1 358.4239 | 0.0000     | 0.000E+0000  | 17.00        | 1 358.4239  | 0.0000       | 0.000E+0000 |              |              |              |             |
| 5 353.4346 | 0.0000     | -9.151E-0005 | 1 358.4239   | 0.0000      | 0.000E+0000  |             |              |              |              |             |
| 8 351.4920 | 0.0000     | -2.748E-0004 | 5 353.5195   | 0.0000      | 2.024E-0005  |             |              |              |              |             |
| 11.67      | 17.33      | 1 358.4239   | 0.0000       | 0.000E+0000 |              |             |              |              |              |             |
| 1 358.4239 | 0.0000     | 0.000E+0000  | 8 351.5113   | 0.0000      | -2.494E-0004 |             |              |              |              |             |
| 5 353.4423 | 0.0000     | -8.131E-0005 | 17.33        | 1 358.4239  | 0.0000       | 0.000E+0000 |              |              |              |             |
| 8 351.4920 | 0.0000     | -2.748E-0004 | 1 358.4239   | 0.0000      | 0.000E+0000  |             |              |              |              |             |

## EK-2 (devam) Strain-gage'lerden alınan şekil değişimi verileri

|                                |                                |                                |
|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| 23.00                          | 5 353.6238 0.0000 1.575E-0004  | 34.00                          |
| 1 358.4239 0.0000 0.000E+0000  | 8 351.5152 0.0000 -2.443E-0004 | 1 358.4239 0.0000 0.000E+0000  |
| 5 353.5736 0.0000 9.139E-0005  | 28.67                          | 5 353.6740 0.0000 2.236E-0004  |
| 8 351.5190 0.0000 -2.392E-0004 | 1 358.4239 0.0000 0.000E+0000  | 8 351.4920 0.0000 -2.748E-0004 |
| 23.33                          | 5 353.6238 0.0000 1.575E-0004  | 34.33                          |
| 1 358.4239 0.0000 0.000E+0000  | 8 351.5152 0.0000 -2.443E-0004 | 1 358.4239 0.0000 0.000E+0000  |
| 5 353.5775 0.0000 9.649E-0005  | 29.00                          | 5 353.6779 0.0000 2.286E-0004  |
| 8 351.5152 0.0000 -2.443E-0004 | 1 358.4239 0.0000 0.000E+0000  | 8 351.4883 0.0000 -2.798E-0004 |
| 23.67                          | 5 353.6277 0.0000 1.625E-0004  | 34.67                          |
| 1 358.4239 0.0000 0.000E+0000  | 8 351.5152 0.0000 -2.443E-0004 | 1 358.4239 0.0000 0.000E+0000  |
| 5 353.5852 0.0000 1.067E-0004  | 29.33                          | 5 353.6818 0.0000 2.337E-0004  |
| 8 351.5152 0.0000 -2.443E-0004 | 1 358.4239 0.0000 0.000E+0000  | 8 351.4844 0.0000 -2.850E-0004 |
| 24.00                          | 5 353.6316 0.0000 1.677E-0004  | 35.00                          |
| 1 358.4239 0.0000 0.000E+0000  | 8 351.5152 0.0000 -2.443E-0004 | 1 358.4239 0.0000 0.000E+0000  |
| 5 353.5852 0.0000 1.067E-0004  | 29.67                          | 5 353.6856 0.0000 2.388E-0004  |
| 8 351.5113 0.0000 -2.494E-0004 | 1 358.4239 0.0000 0.000E+0000  | 8 351.4806 0.0000 -2.900E-0004 |
| 24.33                          | 5 353.6316 0.0000 1.677E-0004  | 35.33                          |
| 1 358.4239 0.0000 0.000E+0000  | 8 351.5152 0.0000 -2.443E-0004 | 1 358.4239 0.0000 0.000E+0000  |
| 5 353.5891 0.0000 1.117E-0004  | 30.00                          | 5 353.6895 0.0000 2.439E-0004  |
| 8 351.5113 0.0000 -2.494E-0004 | 1 358.4239 0.0000 0.000E+0000  | 8 351.4767 0.0000 -2.951E-0004 |
| 24.67                          | 5 353.6354 0.0000 1.727E-0004  | 35.67                          |
| 1 358.4239 0.0000 0.000E+0000  | 8 351.5152 0.0000 -2.443E-0004 | 1 358.4239 0.0000 0.000E+0000  |
| 5 353.5891 0.0000 1.117E-0004  | 30.33                          | 5 353.6934 0.0000 2.490E-0004  |
| 8 351.5113 0.0000 -2.494E-0004 | 1 358.4239 0.0000 0.000E+0000  | 8 351.4767 0.0000 -2.951E-0004 |
| 25.00                          | 5 353.6393 0.0000 1.778E-0004  | 36.00                          |
| 1 358.4239 0.0000 0.000E+0000  | 8 351.5152 0.0000 -2.443E-0004 | 1 358.4239 0.0000 0.000E+0000  |
| 5 353.5929 0.0000 1.168E-0004  | 30.67                          | 5 353.6972 0.0000 2.541E-0004  |
| 8 351.5113 0.0000 -2.494E-0004 | 1 358.4239 0.0000 0.000E+0000  | 8 351.4728 0.0000 -3.002E-0004 |
| 25.33                          | 5 353.6431 0.0000 1.829E-0004  | 36.33                          |
| 1 358.4239 0.0000 0.000E+0000  | 8 351.5152 0.0000 -2.443E-0004 | 1 358.4239 0.0000 0.000E+0000  |
| 5 353.5968 0.0000 1.219E-0004  | 31.00                          | 5 353.7011 0.0000 2.591E-0004  |
| 8 351.5113 0.0000 -2.494E-0004 | 1 358.4239 0.0000 0.000E+0000  | 8 351.4690 0.0000 -3.053E-0004 |
| 25.67                          | 5 353.6470 0.0000 1.880E-0004  | 36.67                          |
| 1 358.4239 0.0000 0.000E+0000  | 8 351.5113 0.0000 -2.494E-0004 | 1 358.4239 0.0000 0.000E+0000  |
| 5 353.6006 0.0000 1.270E-0004  | 31.33                          | 5 353.7050 0.0000 2.642E-0004  |
| 8 351.5113 0.0000 -2.494E-0004 | 1 358.4239 0.0000 0.000E+0000  | 8 351.4690 0.0000 -3.053E-0004 |
| 26.00                          | 5 353.6470 0.0000 1.880E-0004  | 37.00                          |
| 1 358.4239 0.0000 0.000E+0000  | 8 351.5113 0.0000 -2.494E-0004 | 1 358.4239 0.0000 0.000E+0000  |
| 5 353.6045 0.0000 1.321E-0004  | 31.67                          | 5 353.7088 0.0000 2.693E-0004  |
| 8 351.5152 0.0000 -2.443E-0004 | 1 358.4239 0.0000 0.000E+0000  | 8 351.4651 0.0000 -3.104E-0004 |
| 26.33                          | 5 353.6509 0.0000 1.931E-0004  | 37.33                          |
| 1 358.4239 0.0000 0.000E+0000  | 8 351.5074 0.0000 -2.545E-0004 | 1 358.4239 0.0000 0.000E+0000  |
| 5 353.6084 0.0000 1.372E-0004  | 32.00                          | 5 353.7165 0.0000 2.795E-0004  |
| 8 351.5152 0.0000 -2.443E-0004 | 1 358.4239 0.0000 0.000E+0000  | 8 351.4613 0.0000 -3.155E-0004 |
| 26.67                          | 5 353.6547 0.0000 1.982E-0004  | 37.67                          |
| 1 358.4239 0.0000 0.000E+0000  | 8 351.5074 0.0000 -2.545E-0004 | 1 358.4239 0.0000 0.000E+0000  |
| 5 353.6084 0.0000 1.372E-0004  | 32.33                          | 5 353.7165 0.0000 2.795E-0004  |
| 8 351.5190 0.0000 -2.392E-0004 | 1 358.4239 0.0000 0.000E+0000  | 8 351.4575 0.0000 -3.206E-0004 |
| 27.00                          | 5 353.6586 0.0000 2.032E-0004  | 38.00                          |
| 1 358.4239 0.0000 0.000E+0000  | 8 351.5036 0.0000 -2.595E-0004 | 1 358.4239 0.0000 0.000E+0000  |
| 5 353.6122 0.0000 1.422E-0004  | 32.67                          | 5 353.7165 0.0000 2.795E-0004  |
| 8 351.5190 0.0000 -2.392E-0004 | 1 358.4239 0.0000 0.000E+0000  | 8 351.4536 0.0000 -3.257E-0004 |
| 27.33                          | 5 353.6663 0.0000 2.134E-0004  | 38.33                          |
| 1 358.4239 0.0000 0.000E+0000  | 8 351.5036 0.0000 -2.595E-0004 | 1 358.4239 0.0000 0.000E+0000  |
| 5 353.6161 0.0000 1.473E-0004  | 33.00                          | 5 353.7165 0.0000 2.795E-0004  |
| 8 351.5152 0.0000 -2.443E-0004 | 1 358.4239 0.0000 0.000E+0000  | 8 351.4497 0.0000 -3.308E-0004 |
| 27.67                          | 5 353.6663 0.0000 2.134E-0004  | 38.67                          |
| 1 358.4239 0.0000 0.000E+0000  | 8 351.4998 0.0000 -2.646E-0004 | 1 358.4239 0.0000 0.000E+0000  |
| 5 353.6161 0.0000 1.473E-0004  | 33.33                          | 5 353.7165 0.0000 2.795E-0004  |
| 8 351.5152 0.0000 -2.443E-0004 | 1 358.4239 0.0000 0.000E+0000  | 8 351.4459 0.0000 -3.359E-0004 |
| 28.00                          | 5 353.6702 0.0000 2.185E-0004  | 39.00                          |
| 1 358.4239 0.0000 0.000E+0000  | 8 351.4998 0.0000 -2.646E-0004 | 1 358.4239 0.0000 0.000E+0000  |
| 5 353.6200 0.0000 1.524E-0004  | 33.67                          | 5 353.7126 0.0000 2.744E-0004  |
| 8 351.5152 0.0000 -2.443E-0004 | 1 358.4239 0.0000 0.000E+0000  | 8 351.4459 0.0000 -3.359E-0004 |
| 28.33                          | 5 353.6740 0.0000 2.236E-0004  | 39.33                          |
| 1 358.4239 0.0000 0.000E+0000  | 8 351.4959 0.0000 -2.697E-0004 | 1 358.4239 0.0000 0.000E+0000  |

## EK-2 (devam) Strain-gage'lerden alınan şekil değişimi verileri

|                                |                                |                                |
|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| 5 353.7126 0.0000 2.744E-0004  | 45.00                          | 5 353.3188 0.0000 -2.438E-0004 |
| 8 351.4459 0.0000 -3.359E-0004 | 1 358.4239 0.0000 0.000E+0000  | 8 350.2893 0.0000 -1.865E-0003 |
| 39.67                          | 5 353.6856 0.0000 2.388E-0004  | 50.67                          |
| 1 358.4239 0.0000 0.000E+0000  | 8 351.3613 0.0000 -4.477E-0004 | 1 358.4239 0.0000 0.000E+0000  |
| 5 353.7126 0.0000 2.744E-0004  | 45.33                          | 5 353.3110 0.0000 -2.540E-0004 |
| 8 351.4420 0.0000 -3.410E-0004 | 1 358.4239 0.0000 0.000E+0000  | 8 350.3047 0.0000 -1.845E-0003 |
| 40.00                          | 5 353.6624 0.0000 2.083E-0004  | 51.00                          |
| 1 358.4239 0.0000 0.000E+0000  | 8 351.3267 0.0000 -4.935E-0004 | 1 358.4239 0.0000 0.000E+0000  |
| 5 353.7165 0.0000 2.795E-0004  | 45.67                          | 5 353.3072 0.0000 -2.591E-0004 |
| 8 351.4382 0.0000 -3.460E-0004 | 1 358.4239 0.0000 0.000E+0000  | 8 350.3123 0.0000 -1.835E-0003 |
| 40.33                          | 5 353.6547 0.0000 1.982E-0004  | 51.33                          |
| 1 358.4239 0.0000 0.000E+0000  | 8 351.3190 0.0000 -5.037E-0004 | 1 358.4239 0.0000 0.000E+0000  |
| 5 353.7204 0.0000 2.846E-0004  | 46.00                          | 5 353.3072 0.0000 -2.591E-0004 |
| 8 351.4344 0.0000 -3.511E-0004 | 1 358.4239 0.0000 0.000E+0000  | 8 350.3162 0.0000 -1.830E-0003 |
| 40.67                          | 5 353.6431 0.0000 1.829E-0004  | 51.67                          |
| 1 358.4239 0.0000 0.000E+0000  | 8 351.3113 0.0000 -5.139E-0004 | 1 358.4239 0.0000 0.000E+0000  |
| 5 353.7204 0.0000 2.846E-0004  | 46.33                          | 5 353.3033 0.0000 -2.642E-0004 |
| 8 351.4344 0.0000 -3.511E-0004 | 1 358.4239 0.0000 0.000E+0000  | 8 350.3200 0.0000 -1.825E-0003 |
| 41.00                          | 5 353.6161 0.0000 1.473E-0004  | 52.00                          |
| 1 358.4239 0.0000 0.000E+0000  | 8 351.2728 0.0000 -5.647E-0004 | 1 358.4239 0.0000 0.000E+0000  |
| 5 353.7242 0.0000 2.896E-0004  | 46.67                          | 5 353.2995 0.0000 -2.693E-0004 |
| 8 351.4305 0.0000 -3.562E-0004 | 1 358.4239 0.0000 0.000E+0000  | 8 350.3200 0.0000 -1.825E-0003 |
| 41.33                          | 5 353.5929 0.0000 1.168E-0004  | 52.33                          |
| 1 358.4239 0.0000 0.000E+0000  | 8 351.1921 0.0000 -6.715E-0004 | 1 358.4239 0.0000 0.000E+0000  |
| 5 353.7204 0.0000 2.846E-0004  | 47.00                          | 5 353.2995 0.0000 -2.693E-0004 |
| 8 351.4267 0.0000 -3.613E-0004 | 1 358.4239 0.0000 0.000E+0000  | 8 350.3200 0.0000 -1.825E-0003 |
| 41.67                          | 5 353.5968 0.0000 1.219E-0004  | 52.67                          |
| 1 358.4239 0.0000 0.000E+0000  | 8 351.1037 0.0000 -7.884E-0004 | 1 358.4239 0.0000 0.000E+0000  |
| 5 353.7165 0.0000 2.795E-0004  | 47.33                          | 5 353.2995 0.0000 -2.693E-0004 |
| 8 351.4229 0.0000 -3.663E-0004 | 1 358.4239 0.0000 0.000E+0000  | 8 350.3239 0.0000 -1.820E-0003 |
| 42.00                          | 5 353.6316 0.0000 1.677E-0004  | 53.00                          |
| 1 358.4239 0.0000 0.000E+0000  | 8 350.7770 0.0000 -1.220E-0003 | 1 358.4239 0.0000 0.000E+0000  |
| 5 353.7050 0.0000 2.642E-0004  | 47.67                          | 5 353.2995 0.0000 -2.693E-0004 |
| 8 351.4305 0.0000 -3.562E-0004 | 1 358.4239 0.0000 0.000E+0000  | 8 350.3239 0.0000 -1.820E-0003 |
| 42.33                          | 5 353.7822 0.0000 3.659E-0004  | 53.33                          |
| 1 358.4239 0.0000 0.000E+0000  | 8 350.1166 0.0000 -2.094E-0003 | 1 358.4239 0.0000 0.000E+0000  |
| 5 353.7050 0.0000 2.642E-0004  | 48.00                          | 5 353.2956 0.0000 -2.744E-0004 |
| 8 351.4344 0.0000 -3.511E-0004 | 1 358.4239 0.0000 0.000E+0000  | 8 350.3277 0.0000 -1.815E-0003 |
| 42.67                          | 5 353.9522 0.0000 5.896E-0004  | 53.67                          |
| 1 358.4239 0.0000 0.000E+0000  | 8 349.6679 0.0000 -2.687E-0003 | 1 358.4239 0.0000 0.000E+0000  |
| 5 353.7050 0.0000 2.642E-0004  | 48.33                          | 5 353.2956 0.0000 -2.744E-0004 |
| 8 351.4344 0.0000 -3.511E-0004 | 1 358.4239 0.0000 0.000E+0000  | 8 350.3277 0.0000 -1.815E-0003 |
| 43.00                          | 5 354.0257 0.0000 6.863E-0004  | 54.00                          |
| 1 358.4239 0.0000 0.000E+0000  | 8 349.3766 0.0000 -3.072E-0003 | 1 358.4239 0.0000 0.000E+0000  |
| 5 353.7088 0.0000 2.693E-0004  | 48.67                          | 5 353.2956 0.0000 -2.744E-0004 |
| 8 351.4344 0.0000 -3.511E-0004 | 1 358.4239 0.0000 0.000E+0000  | 8 350.3277 0.0000 -1.815E-0003 |
| 43.33                          | 5 354.0876 0.0000 7.676E-0004  | 54.33                          |
| 1 358.4239 0.0000 0.000E+0000  | 8 349.0702 0.0000 -3.478E-0003 | 1 358.4239 0.0000 0.000E+0000  |
| 5 353.7088 0.0000 2.693E-0004  | 49.00                          | 5 353.2956 0.0000 -2.744E-0004 |
| 8 351.4344 0.0000 -3.511E-0004 | 1 358.4239 0.0000 0.000E+0000  | 8 350.3277 0.0000 -1.815E-0003 |
| 43.67                          | 5 354.1571 0.0000 8.592E-0004  | 54.67                          |
| 1 358.4239 0.0000 0.000E+0000  | 8 348.9094 0.0000 -3.690E-0003 | 1 358.4239 0.0000 0.000E+0000  |
| 5 353.7126 0.0000 2.744E-0004  | 49.33                          | 5 353.2956 0.0000 -2.744E-0004 |
| 8 351.4344 0.0000 -3.511E-0004 | 1 358.4239 0.0000 0.000E+0000  | 8 350.3277 0.0000 -1.815E-0003 |
| 44.00                          | 5 354.2190 0.0000 9.406E-0004  | 55.00                          |
| 1 358.4239 0.0000 0.000E+0000  | 8 349.1851 0.0000 -3.326E-0003 | 1 358.4239 0.0000 0.000E+0000  |
| 5 353.7165 0.0000 2.795E-0004  | 49.67                          | 5 353.2956 0.0000 -2.744E-0004 |
| 8 351.4305 0.0000 -3.562E-0004 | 1 358.4239 0.0000 0.000E+0000  | 8 350.3277 0.0000 -1.815E-0003 |
| 44.33                          | 5 353.9986 0.0000 6.506E-0004  | 55.33                          |
| 1 358.4239 0.0000 0.000E+0000  | 8 349.5721 0.0000 -2.814E-0003 | 1 358.4239 0.0000 0.000E+0000  |
| 5 353.7204 0.0000 2.846E-0004  | 50.00                          | 5 353.2917 0.0000 -2.795E-0004 |
| 8 351.4267 0.0000 -3.613E-0004 | 1 358.4239 0.0000 0.000E+0000  | 8 350.3239 0.0000 -1.820E-0003 |
| 44.67                          | 5 353.5388 0.0000 4.569E-0005  | 55.67                          |
| 1 358.4239 0.0000 0.000E+0000  | 8 349.9747 0.0000 -2.281E-0003 | 1 358.4239 0.0000 0.000E+0000  |
| 5 353.7088 0.0000 2.693E-0004  | 50.33                          | 5 353.2917 0.0000 -2.795E-0004 |
| 8 351.4074 0.0000 -3.867E-0004 | 1 358.4239 0.0000 0.000E+0000  | 8 350.3277 0.0000 -1.815E-0003 |

## EK-2 (devam) Strain-gage'lerden alınan şekil değişimi verileri

|                                |                                |                                |
|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| 56.00                          | 57.67                          | 59.33                          |
| 1 358.4239 0.0000 0.000E+0000  | 1 358.4239 0.0000 0.000E+0000  | 1 358.4239 0.0000 0.000E+0000  |
| 5 353.2917 0.0000 -2.795E-0004 | 5 353.2917 0.0000 -2.795E-0004 | 5 353.2879 0.0000 -2.845E-0004 |
| 8 350.3277 0.0000 -1.815E-0003 | 8 350.3277 0.0000 -1.815E-0003 | 8 350.3277 0.0000 -1.815E-0003 |
| 56.33                          | 58.00                          | 59.67                          |
| 1 358.4239 0.0000 0.000E+0000  | 1 358.4239 0.0000 0.000E+0000  | 1 358.4239 0.0000 0.000E+0000  |
| 5 353.2917 0.0000 -2.795E-0004 | 5 353.2879 0.0000 -2.845E-0004 | 5 353.2917 0.0000 -2.795E-0004 |
| 8 350.3277 0.0000 -1.815E-0003 | 8 350.3277 0.0000 -1.815E-0003 | 8 350.3239 0.0000 -1.820E-0003 |
| 56.67                          | 58.33                          | 60.00                          |
| 1 358.4239 0.0000 0.000E+0000  | 1 358.4239 0.0000 0.000E+0000  | 1 358.4239 0.0000 0.000E+0000  |
| 5 353.2917 0.0000 -2.795E-0004 | 5 353.2879 0.0000 -2.845E-0004 | 5 353.2879 0.0000 -2.845E-0004 |
| 8 350.3277 0.0000 -1.815E-0003 | 8 350.3277 0.0000 -1.815E-0003 | 8 350.3239 0.0000 -1.820E-0003 |
| 57.00                          | 58.67                          | 60.33                          |
| 1 358.4239 0.0000 0.000E+0000  | 1 358.4239 0.0000 0.000E+0000  | 1 358.4239 0.0000 0.000E+0000  |
| 5 353.2917 0.0000 -2.795E-0004 | 5 353.2879 0.0000 -2.845E-0004 | 5 353.2879 0.0000 -2.845E-0004 |
| 8 350.3277 0.0000 -1.815E-0003 | 8 350.3277 0.0000 -1.815E-0003 | 8 350.3277 0.0000 -1.815E-0003 |
| 57.33                          | 59.00                          | 60.67                          |
| 1 358.4239 0.0000 0.000E+0000  | 1 358.4239 0.0000 0.000E+0000  | 1 358.4239 0.0000 0.000E+0000  |
| 5 353.2917 0.0000 -2.795E-0004 | 5 353.2879 0.0000 -2.845E-0004 | 5 353.2879 0.0000 -2.845E-0004 |
| 8 350.3277 0.0000 -1.815E-0003 | 8 350.3277 0.0000 -1.815E-0003 | 8 350.3277 0.0000 -1.815E-0003 |

6 numaralı numune:

Saniye,

Strain-gage bağlandığı devre numarası / direnç değeri / boşluk / şekil değişimi oranı

|                                |                                |                                |
|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| 0.00                           | 3.67                           | 7.33                           |
| 1 118.8818 0.0000 -9.260E-0006 | 1 118.7840 0.0000 -4.007E-0004 | 1 118.7817 0.0000 -4.100E-0004 |
| 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000  | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000  | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000  |
| 0.33                           | 4.00                           | 7.67                           |
| 1 118.8189 0.0000 -2.609E-0004 | 1 118.7840 0.0000 -4.007E-0004 | 1 118.7817 0.0000 -4.100E-0004 |
| 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000  | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000  | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000  |
| 0.67                           | 4.33                           | 8.00                           |
| 1 118.7585 0.0000 -5.032E-0004 | 1 118.7840 0.0000 -4.007E-0004 | 1 118.7840 0.0000 -4.007E-0004 |
| 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000  | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000  | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000  |
| 1.00                           | 4.67                           | 8.33                           |
| 1 118.7608 0.0000 -4.939E-0004 | 1 118.7817 0.0000 -4.100E-0004 | 1 118.7840 0.0000 -4.007E-0004 |
| 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000  | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000  | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000  |
| 1.33                           | 5.00                           | 8.67                           |
| 1 118.7585 0.0000 -5.032E-0004 | 1 118.7794 0.0000 -4.193E-0004 | 1 118.7864 0.0000 -3.914E-0004 |
| 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000  | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000  | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000  |
| 1.67                           | 5.33                           | 9.00                           |
| 1 118.7585 0.0000 -5.032E-0004 | 1 118.7771 0.0000 -4.286E-0004 | 1 118.7864 0.0000 -3.914E-0004 |
| 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000  | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000  | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000  |
| 2.00                           | 5.67                           | 9.33                           |
| 1 118.7585 0.0000 -5.032E-0004 | 1 118.7771 0.0000 -4.286E-0004 | 1 118.7887 0.0000 -3.821E-0004 |
| 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000  | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000  | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000  |
| 2.33                           | 6.00                           | 9.67                           |
| 1 118.7608 0.0000 -4.939E-0004 | 1 118.7771 0.0000 -4.286E-0004 | 1 118.7887 0.0000 -3.821E-0004 |
| 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000  | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000  | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000  |
| 2.67                           | 6.33                           | 10.00                          |
| 1 118.7654 0.0000 -4.752E-0004 | 1 118.7771 0.0000 -4.286E-0004 | 1 118.7887 0.0000 -3.821E-0004 |
| 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000  | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000  | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000  |
| 3.00                           | 6.67                           | 10.33                          |
| 1 118.7724 0.0000 -4.473E-0004 | 1 118.7771 0.0000 -4.286E-0004 | 1 118.7910 0.0000 -3.727E-0004 |
| 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000  | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000  | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000  |
| 3.33                           | 7.00                           | 10.67                          |
| 1 118.7794 0.0000 -4.193E-0004 | 1 118.7794 0.0000 -4.193E-0004 | 1 118.7910 0.0000 -3.727E-0004 |
| 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000  | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000  | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000  |

## EK-2 (devam) Strain-gage'lerden alınan şekil değişimi verileri

|                                |                                |                               |
|--------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|
| 11.00                          | 18.33                          | 25.67                         |
| 1 118.7910 0.0000 -3.727E-0004 | 1 118.7910 0.0000 -3.727E-0004 | 1 119.1588 0.0000 1.100E-0003 |
| 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000  | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000  | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 |
| 11.33                          | 18.67                          | 26.00                         |
| 1 118.7910 0.0000 -3.727E-0004 | 1 118.7910 0.0000 -3.727E-0004 | 1 119.1774 0.0000 1.175E-0003 |
| 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000  | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000  | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 |
| 11.67                          | 19.00                          | 26.33                         |
| 1 118.7934 0.0000 -3.634E-0004 | 1 118.7957 0.0000 -3.541E-0004 | 1 119.1960 0.0000 1.249E-0003 |
| 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000  | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000  | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 |
| 12.00                          | 19.33                          | 26.67                         |
| 1 118.7934 0.0000 -3.634E-0004 | 1 118.8050 0.0000 -3.168E-0004 | 1 119.2147 0.0000 1.324E-0003 |
| 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000  | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000  | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 |
| 12.33                          | 19.67                          | 27.00                         |
| 1 118.7934 0.0000 -3.634E-0004 | 1 118.8189 0.0000 -2.609E-0004 | 1 119.2310 0.0000 1.389E-0003 |
| 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000  | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000  | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 |
| 12.67                          | 20.00                          | 27.33                         |
| 1 118.7934 0.0000 -3.634E-0004 | 1 118.8329 0.0000 -2.050E-0004 | 1 119.2473 0.0000 1.455E-0003 |
| 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000  | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000  | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 |
| 13.00                          | 20.33                          | 27.67                         |
| 1 118.7934 0.0000 -3.634E-0004 | 1 118.8492 0.0000 -1.398E-0004 | 1 119.2659 0.0000 1.529E-0003 |
| 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000  | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000  | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 |
| 13.33                          | 20.67                          | 28.00                         |
| 1 118.7957 0.0000 -3.541E-0004 | 1 118.8655 0.0000 -7.450E-0005 | 1 119.2822 0.0000 1.595E-0003 |
| 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000  | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000  | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 |
| 13.67                          | 21.00                          | 28.33                         |
| 1 118.7934 0.0000 -3.634E-0004 | 1 118.8841 0.0000 0.000E+0000  | 1 119.2985 0.0000 1.660E-0003 |
| 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000  | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000  | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 |
| 14.00                          | 21.33                          | 28.67                         |
| 1 118.7934 0.0000 -3.634E-0004 | 1 118.9027 0.0000 7.457E-0005  | 1 119.3148 0.0000 1.725E-0003 |
| 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000  | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000  | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 |
| 14.33                          | 21.67                          | 29.00                         |
| 1 118.7934 0.0000 -3.634E-0004 | 1 118.9213 0.0000 1.492E-0004  | 1 119.3334 0.0000 1.800E-0003 |
| 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000  | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000  | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 |
| 14.67                          | 22.00                          | 29.33                         |
| 1 118.7934 0.0000 -3.634E-0004 | 1 118.9399 0.0000 2.238E-0004  | 1 119.3497 0.0000 1.865E-0003 |
| 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000  | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000  | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 |
| 15.00                          | 22.33                          | 29.67                         |
| 1 118.7934 0.0000 -3.634E-0004 | 1 118.9609 0.0000 3.076E-0004  | 1 119.3684 0.0000 1.940E-0003 |
| 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000  | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000  | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 |
| 15.33                          | 22.67                          | 30.00                         |
| 1 118.7934 0.0000 -3.634E-0004 | 1 118.9818 0.0000 3.915E-0004  | 1 119.3847 0.0000 2.005E-0003 |
| 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000  | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000  | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 |
| 15.67                          | 23.00                          | 30.33                         |
| 1 118.7934 0.0000 -3.634E-0004 | 1 119.0028 0.0000 4.754E-0004  | 1 119.4033 0.0000 2.080E-0003 |
| 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000  | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000  | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 |
| 16.00                          | 23.33                          | 30.67                         |
| 1 118.7934 0.0000 -3.634E-0004 | 1 119.0214 0.0000 5.500E-0004  | 1 119.4196 0.0000 2.145E-0003 |
| 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000  | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000  | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 |
| 16.33                          | 23.67                          | 31.00                         |
| 1 118.7910 0.0000 -3.727E-0004 | 1 119.0424 0.0000 6.340E-0004  | 1 119.4360 0.0000 2.211E-0003 |
| 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000  | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000  | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 |
| 16.67                          | 24.00                          | 31.33                         |
| 1 118.7934 0.0000 -3.634E-0004 | 1 119.0610 0.0000 7.085E-0004  | 1 119.4546 0.0000 2.285E-0003 |
| 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000  | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000  | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 |
| 17.00                          | 24.33                          | 31.67                         |
| 1 118.7934 0.0000 -3.634E-0004 | 1 119.0819 0.0000 7.925E-0004  | 1 119.4709 0.0000 2.350E-0003 |
| 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000  | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000  | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 |
| 17.33                          | 24.67                          | 32.00                         |
| 1 118.7910 0.0000 -3.727E-0004 | 1 119.1006 0.0000 8.671E-0004  | 1 119.4872 0.0000 2.416E-0003 |
| 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000  | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000  | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 |
| 17.67                          | 25.00                          | 32.33                         |
| 1 118.7910 0.0000 -3.727E-0004 | 1 119.1215 0.0000 9.510E-0004  | 1 119.5035 0.0000 2.481E-0003 |
| 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000  | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000  | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 |
| 18.00                          | 25.33                          | 32.67                         |
| 1 118.7910 0.0000 -3.727E-0004 | 1 119.1401 0.0000 1.026E-0003  | 1 119.5222 0.0000 2.556E-0003 |
| 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000  | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000  | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 |

## EK-2 (devam) Strain-gage'lerden alınan şekil değişimi verileri

|                               |                               |                               |
|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| 33.00                         | 40.33                         | 47.67                         |
| 1 119.5385 0.0000 2.621E-0003 | 1 119.8696 0.0000 3.947E-0003 | 1 120.2103 0.0000 5.312E-0003 |
| 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 |
| 33.33                         | 40.67                         | 48.00                         |
| 1 119.5525 0.0000 2.677E-0003 | 1 119.8859 0.0000 4.013E-0003 | 1 120.2243 0.0000 5.368E-0003 |
| 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 |
| 33.67                         | 41.00                         | 48.33                         |
| 1 119.5688 0.0000 2.743E-0003 | 1 119.9022 0.0000 4.078E-0003 | 1 120.2359 0.0000 5.415E-0003 |
| 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 |
| 34.00                         | 41.33                         | 48.67                         |
| 1 119.5851 0.0000 2.808E-0003 | 1 119.9162 0.0000 4.134E-0003 | 1 120.2500 0.0000 5.471E-0003 |
| 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 |
| 34.33                         | 41.67                         | 49.00                         |
| 1 119.5991 0.0000 2.864E-0003 | 1 119.9326 0.0000 4.200E-0003 | 1 120.2640 0.0000 5.527E-0003 |
| 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 |
| 34.67                         | 42.00                         | 49.33                         |
| 1 119.6154 0.0000 2.929E-0003 | 1 119.9466 0.0000 4.256E-0003 | 1 120.2780 0.0000 5.583E-0003 |
| 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 |
| 35.00                         | 42.33                         | 49.67                         |
| 1 119.6317 0.0000 2.995E-0003 | 1 119.9629 0.0000 4.321E-0003 | 1 120.2920 0.0000 5.639E-0003 |
| 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 |
| 35.33                         | 42.67                         | 50.00                         |
| 1 119.6457 0.0000 3.051E-0003 | 1 119.9769 0.0000 4.377E-0003 | 1 120.3060 0.0000 5.695E-0003 |
| 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 |
| 35.67                         | 43.00                         | 50.33                         |
| 1 119.6597 0.0000 3.107E-0003 | 1 119.9932 0.0000 4.443E-0003 | 1 120.3177 0.0000 5.742E-0003 |
| 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 |
| 36.00                         | 43.33                         | 50.67                         |
| 1 119.6737 0.0000 3.163E-0003 | 1 120.0095 0.0000 4.508E-0003 | 1 120.3317 0.0000 5.798E-0003 |
| 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 |
| 36.33                         | 43.67                         | 51.00                         |
| 1 119.6877 0.0000 3.219E-0003 | 1 120.0259 0.0000 4.573E-0003 | 1 120.3480 0.0000 5.864E-0003 |
| 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 |
| 36.67                         | 44.00                         | 51.33                         |
| 1 119.7040 0.0000 3.284E-0003 | 1 120.0422 0.0000 4.639E-0003 | 1 120.3597 0.0000 5.911E-0003 |
| 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 |
| 37.00                         | 44.33                         | 51.67                         |
| 1 119.7180 0.0000 3.340E-0003 | 1 120.0562 0.0000 4.695E-0003 | 1 120.3761 0.0000 5.976E-0003 |
| 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 |
| 37.33                         | 44.67                         | 52.00                         |
| 1 119.7320 0.0000 3.396E-0003 | 1 120.0726 0.0000 4.760E-0003 | 1 120.3924 0.0000 6.042E-0003 |
| 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 |
| 37.67                         | 45.00                         | 52.33                         |
| 1 119.7460 0.0000 3.452E-0003 | 1 120.0889 0.0000 4.826E-0003 | 1 120.4064 0.0000 6.098E-0003 |
| 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 |
| 38.00                         | 45.33                         | 52.67                         |
| 1 119.7623 0.0000 3.518E-0003 | 1 120.1052 0.0000 4.891E-0003 | 1 120.4228 0.0000 6.163E-0003 |
| 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 |
| 38.33                         | 45.67                         | 53.00                         |
| 1 119.7763 0.0000 3.574E-0003 | 1 120.1216 0.0000 4.957E-0003 | 1 120.4391 0.0000 6.229E-0003 |
| 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 |
| 38.67                         | 46.00                         | 53.33                         |
| 1 119.7926 0.0000 3.639E-0003 | 1 120.1379 0.0000 5.022E-0003 | 1 120.4531 0.0000 6.285E-0003 |
| 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 |
| 39.00                         | 46.33                         | 53.67                         |
| 1 119.8089 0.0000 3.704E-0003 | 1 120.1519 0.0000 5.078E-0003 | 1 120.4671 0.0000 6.341E-0003 |
| 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 |
| 39.33                         | 46.67                         | 54.00                         |
| 1 119.8229 0.0000 3.760E-0003 | 1 120.1659 0.0000 5.134E-0003 | 1 120.4812 0.0000 6.397E-0003 |
| 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 |
| 39.67                         | 47.00                         | 54.33                         |
| 1 119.8393 0.0000 3.826E-0003 | 1 120.1799 0.0000 5.190E-0003 | 1 120.4952 0.0000 6.453E-0003 |
| 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 |
| 40.00                         | 47.33                         | 54.67                         |
| 1 119.8556 0.0000 3.891E-0003 | 1 120.1963 0.0000 5.256E-0003 | 1 120.5092 0.0000 6.509E-0003 |
| 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 |

## EK-2 (devam) Strain-gage'lerden alınan şekil değişimi verileri

|                               |                               |
|-------------------------------|-------------------------------|
| 55.00                         | 62.33                         |
| 1 120.5232 0.0000 6.566E-0003 | 1 120.8364 0.0000 7.820E-0003 |
| 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 |
| 55.33                         | 62.67                         |
| 1 120.5372 0.0000 6.622E-0003 | 1 120.8528 0.0000 7.885E-0003 |
| 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 |
| 55.67                         | 63.00                         |
| 1 120.5512 0.0000 6.678E-0003 | 1 120.9533 0.0000 8.288E-0003 |
| 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 |
| 56.00                         | 63.33                         |
| 1 120.5653 0.0000 6.734E-0003 | 1 122.9861 0.0000 1.643E-0002 |
| 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 |
| 56.33                         | 63.67                         |
| 1 120.5793 0.0000 6.790E-0003 | 1 124.9794 0.0000 2.441E-0002 |
| 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 |
| 56.67                         | 64.00                         |
| 1 120.5933 0.0000 6.846E-0003 | 1 124.9794 0.0000 2.441E-0002 |
| 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 |
| 57.00                         | 64.33                         |
| 1 120.6073 0.0000 6.902E-0003 | 1 124.9794 0.0000 2.441E-0002 |
| 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 |
| 57.33                         | 64.67                         |
| 1 120.6213 0.0000 6.959E-0003 | 1 124.9794 0.0000 2.441E-0002 |
| 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 |
| 57.67                         | 65.00                         |
| 1 120.6354 0.0000 7.015E-0003 | 1 124.9794 0.0000 2.441E-0002 |
| 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 |
| 58.00                         | 65.33                         |
| 1 120.6471 0.0000 7.062E-0003 | 1 124.9794 0.0000 2.441E-0002 |
| 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 |
| 58.33                         | 65.67                         |
| 1 120.6611 0.0000 7.118E-0003 | 1 124.9794 0.0000 2.441E-0002 |
| 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 |
| 58.67                         | 66.00                         |
| 1 120.6751 0.0000 7.174E-0003 | 1 124.9794 0.0000 2.441E-0002 |
| 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 |
| 59.00                         | 66.33                         |
| 1 120.6914 0.0000 7.239E-0003 | 1 124.9794 0.0000 2.441E-0002 |
| 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 |
| 59.33                         | 66.67                         |
| 1 120.7055 0.0000 7.296E-0003 | 1 124.9794 0.0000 2.441E-0002 |
| 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 |
| 59.67                         | 67.00                         |
| 1 120.7195 0.0000 7.352E-0003 | 1 124.9794 0.0000 2.441E-0002 |
| 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 |
| 60.00                         | 67.33                         |
| 1 120.7359 0.0000 7.417E-0003 | 1 124.9794 0.0000 2.441E-0002 |
| 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 |
| 60.33                         | 67.67                         |
| 1 120.7499 0.0000 7.473E-0003 | 1 124.9794 0.0000 2.441E-0002 |
| 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 |
| 60.67                         |                               |
| 1 120.7663 0.0000 7.539E-0003 |                               |
| 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 |                               |
| 61.00                         |                               |
| 1 120.7803 0.0000 7.595E-0003 |                               |
| 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 |                               |
| 61.33                         |                               |
| 1 120.7943 0.0000 7.651E-0003 |                               |
| 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 |                               |
| 61.67                         |                               |
| 1 120.8107 0.0000 7.717E-0003 |                               |
| 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 |                               |
| 62.00                         |                               |
| 1 120.8224 0.0000 7.764E-0003 |                               |
| 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 |                               |

## EK-2 (devam) Strain-gage'lerden alınan şekil değişimi verileri

7 numaralı numune:

Saniye,

Strain-gage bağlandığı devre numarası / direnç değeri / boşluk / şekil değişimi oranı

|                                |                               |                               |
|--------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| 0.00                           | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 | 1 119.6434 0.0000 2.283E-0003 |
| 1 119.0726 0.0000 0.000E+0000  | 6.33                          | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 |
| 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000  | 1 119.2566 0.0000 7.357E-0004 | 12.67                         |
| 0.33                           | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 | 1 119.6690 0.0000 2.385E-0003 |
| 1 119.0703 0.0000 -9.306E-0006 | 6.67                          | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 |
| 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000  | 1 119.2729 0.0000 8.008E-0004 | 13.00                         |
| 0.67                           | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 | 1 119.6923 0.0000 2.478E-0003 |
| 1 119.0726 0.0000 0.000E+0000  | 7.00                          | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 |
| 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000  | 1 119.2938 0.0000 8.847E-0004 | 13.33                         |
| 1.00                           | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 | 1 119.7156 0.0000 2.572E-0003 |
| 1 119.0796 0.0000 2.792E-0005  | 7.33                          | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 |
| 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000  | 1 119.3148 0.0000 9.685E-0004 | 13.67                         |
| 1.33                           | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 | 1 119.7413 0.0000 2.674E-0003 |
| 1 119.0796 0.0000 2.792E-0005  | 7.67                          | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 |
| 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000  | 1 119.3358 0.0000 1.052E-0003 | 14.00                         |
| 1.67                           | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 | 1 119.7670 0.0000 2.777E-0003 |
| 1 119.0796 0.0000 2.792E-0005  | 8.00                          | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 |
| 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000  | 1 119.3544 0.0000 1.127E-0003 | 14.33                         |
| 2.00                           | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 | 1 119.7926 0.0000 2.879E-0003 |
| 1 119.0843 0.0000 4.653E-0005  | 8.33                          | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 |
| 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000  | 1 119.3777 0.0000 1.220E-0003 | 14.67                         |
| 2.33                           | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 | 1 119.8183 0.0000 2.982E-0003 |
| 1 119.0936 0.0000 8.378E-0005  | 8.67                          | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 |
| 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000  | 1 119.3987 0.0000 1.304E-0003 | 15.00                         |
| 2.67                           | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 | 1 119.8509 0.0000 3.113E-0003 |
| 1 119.1006 0.0000 1.117E-0004  | 9.00                          | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 |
| 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000  | 1 119.4196 0.0000 1.388E-0003 | 15.33                         |
| 3.00                           | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 | 1 119.8859 0.0000 3.252E-0003 |
| 1 119.1075 0.0000 1.396E-0004  | 9.33                          | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 |
| 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000  | 1 119.4406 0.0000 1.472E-0003 | 15.67                         |
| 3.33                           | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 | 1 119.9162 0.0000 3.374E-0003 |
| 1 119.1192 0.0000 1.862E-0004  | 9.67                          | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 |
| 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000  | 1 119.4616 0.0000 1.555E-0003 | 16.00                         |
| 3.67                           | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 | 1 119.9466 0.0000 3.495E-0003 |
| 1 119.1331 0.0000 2.420E-0004  | 10.00                         | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 |
| 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000  | 1 119.4849 0.0000 1.649E-0003 | 16.33                         |
| 4.00                           | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 | 1 119.9746 0.0000 3.607E-0003 |
| 1 119.1448 0.0000 2.887E-0004  | 10.33                         | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 |
| 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000  | 1 119.5082 0.0000 1.742E-0003 | 16.67                         |
| 4.33                           | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 | 1 120.0026 0.0000 3.719E-0003 |
| 1 119.1588 0.0000 3.445E-0004  | 10.67                         | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 |
| 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000  | 1 119.5315 0.0000 1.835E-0003 | 17.00                         |
| 4.67                           | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 | 1 120.0282 0.0000 3.822E-0003 |
| 1 119.1751 0.0000 4.096E-0004  | 11.00                         | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 |
| 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000  | 1 119.5501 0.0000 1.910E-0003 | 17.33                         |
| 5.00                           | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 | 1 120.0539 0.0000 3.924E-0003 |
| 1 119.1890 0.0000 4.656E-0004  | 11.33                         | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 |
| 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000  | 1 119.5734 0.0000 2.003E-0003 | 17.67                         |
| 5.33                           | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 | 1 120.0796 0.0000 4.027E-0003 |
| 1 119.2053 0.0000 5.307E-0004  | 11.67                         | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 |
| 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000  | 1 119.5968 0.0000 2.096E-0003 | 18.00                         |
| 5.67                           | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 | 1 120.1076 0.0000 4.139E-0003 |
| 1 119.2193 0.0000 5.866E-0004  | 12.00                         | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 |
| 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000  | 1 119.6201 0.0000 2.189E-0003 | 18.33                         |
| 6.00                           | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 | 1 120.1332 0.0000 4.242E-0003 |
| 1 119.2379 0.0000 6.611E-0004  | 12.33                         | 5 124.9794 0.0000 0.000E+0000 |

## EK-2 (devam) Strain-gage'lerden alınan şekil değişimi verileri

|            |        |             |  |            |        |             |  |            |        |             |  |  |
|------------|--------|-------------|--|------------|--------|-------------|--|------------|--------|-------------|--|--|
| 18.67      |        |             |  | 26.00      |        |             |  | 33.33      |        |             |  |  |
| 1 120.1589 | 0.0000 | 4.344E-0003 |  | 1 120.6143 | 0.0000 | 6.166E-0003 |  | 1 120.9907 | 0.0000 | 7.671E-0003 |  |  |
| 5 124.9794 | 0.0000 | 0.000E+0000 |  | 5 124.9794 | 0.0000 | 0.000E+0000 |  | 5 124.9794 | 0.0000 | 0.000E+0000 |  |  |
| 19.00      |        |             |  | 26.33      |        |             |  | 33.67      |        |             |  |  |
| 1 120.1846 | 0.0000 | 4.447E-0003 |  | 1 120.6307 | 0.0000 | 6.231E-0003 |  | 1 121.0071 | 0.0000 | 7.736E-0003 |  |  |
| 5 124.9794 | 0.0000 | 0.000E+0000 |  | 5 124.9794 | 0.0000 | 0.000E+0000 |  | 5 124.9794 | 0.0000 | 0.000E+0000 |  |  |
| 19.33      |        |             |  | 26.67      |        |             |  | 34.00      |        |             |  |  |
| 1 120.2056 | 0.0000 | 4.531E-0003 |  | 1 120.6471 | 0.0000 | 6.296E-0003 |  | 1 121.0258 | 0.0000 | 7.811E-0003 |  |  |
| 5 124.9794 | 0.0000 | 0.000E+0000 |  | 5 124.9794 | 0.0000 | 0.000E+0000 |  | 5 124.9794 | 0.0000 | 0.000E+0000 |  |  |
| 19.67      |        |             |  | 27.00      |        |             |  | 34.33      |        |             |  |  |
| 1 120.2289 | 0.0000 | 4.624E-0003 |  | 1 120.6657 | 0.0000 | 6.371E-0003 |  | 1 121.0445 | 0.0000 | 7.886E-0003 |  |  |
| 5 124.9794 | 0.0000 | 0.000E+0000 |  | 5 124.9794 | 0.0000 | 0.000E+0000 |  | 5 124.9794 | 0.0000 | 0.000E+0000 |  |  |
| 20.00      |        |             |  | 27.33      |        |             |  | 34.67      |        |             |  |  |
| 1 120.2523 | 0.0000 | 4.718E-0003 |  | 1 120.6821 | 0.0000 | 6.437E-0003 |  | 1 121.0632 | 0.0000 | 7.961E-0003 |  |  |
| 5 124.9794 | 0.0000 | 0.000E+0000 |  | 5 124.9794 | 0.0000 | 0.000E+0000 |  | 5 124.9794 | 0.0000 | 0.000E+0000 |  |  |
| 20.33      |        |             |  | 27.67      |        |             |  | 35.00      |        |             |  |  |
| 1 120.2756 | 0.0000 | 4.811E-0003 |  | 1 120.6985 | 0.0000 | 6.502E-0003 |  | 1 121.0796 | 0.0000 | 8.026E-0003 |  |  |
| 5 124.9794 | 0.0000 | 0.000E+0000 |  | 5 124.9794 | 0.0000 | 0.000E+0000 |  | 5 124.9794 | 0.0000 | 0.000E+0000 |  |  |
| 20.67      |        |             |  | 28.00      |        |             |  | 35.33      |        |             |  |  |
| 1 120.2990 | 0.0000 | 4.904E-0003 |  | 1 120.7172 | 0.0000 | 6.577E-0003 |  | 1 121.0984 | 0.0000 | 8.101E-0003 |  |  |
| 5 124.9794 | 0.0000 | 0.000E+0000 |  | 5 124.9794 | 0.0000 | 0.000E+0000 |  | 5 124.9794 | 0.0000 | 0.000E+0000 |  |  |
| 21.00      |        |             |  | 28.33      |        |             |  | 35.67      |        |             |  |  |
| 1 120.3247 | 0.0000 | 5.007E-0003 |  | 1 120.7335 | 0.0000 | 6.642E-0003 |  | 1 121.1171 | 0.0000 | 8.176E-0003 |  |  |
| 5 124.9794 | 0.0000 | 0.000E+0000 |  | 5 124.9794 | 0.0000 | 0.000E+0000 |  | 5 124.9794 | 0.0000 | 0.000E+0000 |  |  |
| 21.33      |        |             |  | 28.67      |        |             |  | 36.00      |        |             |  |  |
| 1 120.3504 | 0.0000 | 5.110E-0003 |  | 1 120.7476 | 0.0000 | 6.698E-0003 |  | 1 121.1358 | 0.0000 | 8.251E-0003 |  |  |
| 5 124.9794 | 0.0000 | 0.000E+0000 |  | 5 124.9794 | 0.0000 | 0.000E+0000 |  | 5 124.9794 | 0.0000 | 0.000E+0000 |  |  |
| 21.67      |        |             |  | 29.00      |        |             |  | 36.33      |        |             |  |  |
| 1 120.3690 | 0.0000 | 5.185E-0003 |  | 1 120.7616 | 0.0000 | 6.754E-0003 |  | 1 121.1568 | 0.0000 | 8.335E-0003 |  |  |
| 5 124.9794 | 0.0000 | 0.000E+0000 |  | 5 124.9794 | 0.0000 | 0.000E+0000 |  | 5 124.9794 | 0.0000 | 0.000E+0000 |  |  |
| 22.00      |        |             |  | 29.33      |        |             |  | 36.67      |        |             |  |  |
| 1 120.3877 | 0.0000 | 5.259E-0003 |  | 1 120.7780 | 0.0000 | 6.820E-0003 |  | 1 121.1779 | 0.0000 | 8.419E-0003 |  |  |
| 5 124.9794 | 0.0000 | 0.000E+0000 |  | 5 124.9794 | 0.0000 | 0.000E+0000 |  | 5 124.9794 | 0.0000 | 0.000E+0000 |  |  |
| 22.33      |        |             |  | 29.67      |        |             |  | 37.00      |        |             |  |  |
| 1 120.4064 | 0.0000 | 5.334E-0003 |  | 1 120.7943 | 0.0000 | 6.885E-0003 |  | 1 121.1966 | 0.0000 | 8.494E-0003 |  |  |
| 5 124.9794 | 0.0000 | 0.000E+0000 |  | 5 124.9794 | 0.0000 | 0.000E+0000 |  | 5 124.9794 | 0.0000 | 0.000E+0000 |  |  |
| 22.67      |        |             |  | 30.00      |        |             |  | 37.33      |        |             |  |  |
| 1 120.4274 | 0.0000 | 5.418E-0003 |  | 1 120.8107 | 0.0000 | 6.951E-0003 |  | 1 122.1572 | 0.0000 | 1.234E-0002 |  |  |
| 5 124.9794 | 0.0000 | 0.000E+0000 |  | 5 124.9794 | 0.0000 | 0.000E+0000 |  | 5 124.9794 | 0.0000 | 0.000E+0000 |  |  |
| 23.00      |        |             |  | 30.33      |        |             |  | 37.67      |        |             |  |  |
| 1 120.4484 | 0.0000 | 5.502E-0003 |  | 1 120.8270 | 0.0000 | 7.016E-0003 |  | 1 124.0239 | 0.0000 | 1.980E-0002 |  |  |
| 5 124.9794 | 0.0000 | 0.000E+0000 |  | 5 124.9794 | 0.0000 | 0.000E+0000 |  | 5 124.9794 | 0.0000 | 0.000E+0000 |  |  |
| 23.33      |        |             |  | 30.67      |        |             |  | 38.00      |        |             |  |  |
| 1 120.4671 | 0.0000 | 5.577E-0003 |  | 1 120.8434 | 0.0000 | 7.082E-0003 |  | 1 124.9794 | 0.0000 | 2.362E-0002 |  |  |
| 5 124.9794 | 0.0000 | 0.000E+0000 |  | 5 124.9794 | 0.0000 | 0.000E+0000 |  | 5 124.9794 | 0.0000 | 0.000E+0000 |  |  |
| 23.67      |        |             |  | 31.00      |        |             |  | 38.33      |        |             |  |  |
| 1 120.4835 | 0.0000 | 5.642E-0003 |  | 1 120.8621 | 0.0000 | 7.156E-0003 |  | 1 124.9794 | 0.0000 | 2.362E-0002 |  |  |
| 5 124.9794 | 0.0000 | 0.000E+0000 |  | 5 124.9794 | 0.0000 | 0.000E+0000 |  | 5 124.9794 | 0.0000 | 0.000E+0000 |  |  |
| 24.00      |        |             |  | 31.33      |        |             |  | 38.67      |        |             |  |  |
| 1 120.4998 | 0.0000 | 5.708E-0003 |  | 1 120.8808 | 0.0000 | 7.231E-0003 |  | 1 124.9794 | 0.0000 | 2.362E-0002 |  |  |
| 5 124.9794 | 0.0000 | 0.000E+0000 |  | 5 124.9794 | 0.0000 | 0.000E+0000 |  | 5 124.9794 | 0.0000 | 0.000E+0000 |  |  |
| 24.33      |        |             |  | 31.67      |        |             |  | 39.00      |        |             |  |  |
| 1 120.5185 | 0.0000 | 5.782E-0003 |  | 1 120.8995 | 0.0000 | 7.306E-0003 |  | 1 124.9794 | 0.0000 | 2.362E-0002 |  |  |
| 5 124.9794 | 0.0000 | 0.000E+0000 |  | 5 124.9794 | 0.0000 | 0.000E+0000 |  | 5 124.9794 | 0.0000 | 0.000E+0000 |  |  |
| 24.67      |        |             |  | 32.00      |        |             |  | 39.33      |        |             |  |  |
| 1 120.5372 | 0.0000 | 5.857E-0003 |  | 1 120.9159 | 0.0000 | 7.372E-0003 |  | 1 124.9794 | 0.0000 | 2.362E-0002 |  |  |
| 5 124.9794 | 0.0000 | 0.000E+0000 |  | 5 124.9794 | 0.0000 | 0.000E+0000 |  | 5 124.9794 | 0.0000 | 0.000E+0000 |  |  |
| 25.00      |        |             |  | 32.33      |        |             |  | 39.67      |        |             |  |  |
| 1 120.5559 | 0.0000 | 5.932E-0003 |  | 1 120.9346 | 0.0000 | 7.446E-0003 |  | 1 124.9794 | 0.0000 | 2.362E-0002 |  |  |
| 5 124.9794 | 0.0000 | 0.000E+0000 |  | 5 124.9794 | 0.0000 | 0.000E+0000 |  | 5 124.9794 | 0.0000 | 0.000E+0000 |  |  |
| 25.33      |        |             |  | 32.67      |        |             |  | 40.00      |        |             |  |  |
| 1 120.5746 | 0.0000 | 6.007E-0003 |  | 1 120.9533 | 0.0000 | 7.521E-0003 |  | 1 124.9794 | 0.0000 | 2.362E-0002 |  |  |
| 5 124.9794 | 0.0000 | 0.000E+0000 |  | 5 124.9794 | 0.0000 | 0.000E+0000 |  | 5 124.9794 | 0.0000 | 0.000E+0000 |  |  |
| 25.67      |        |             |  | 33.00      |        |             |  | 40.33      |        |             |  |  |
| 1 120.5956 | 0.0000 | 6.091E-0003 |  | 1 120.9720 | 0.0000 | 7.596E-0003 |  | 1 124.9794 | 0.0000 | 2.362E-0002 |  |  |
| 5 124.9794 | 0.0000 | 0.000E+0000 |  | 5 124.9794 | 0.0000 | 0.000E+0000 |  | 5 124.9794 | 0.0000 | 0.000E+0000 |  |  |

## EK-2 (devam) Strain-gage'lerden alınan şekil değişimi verileri

40.67  
1 124.9794 0.0000 2.362E-0002  
5 124.9794 0.0000 0.000E+0000

## ÖZGEÇMİŞ

### Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : YAVUZYILMAZ, Özkan  
Uyruğu : T.C.  
Doğum tarihi ve yeri : 07.01.1983 Ankara  
Medeni hali : Bekar  
Telefon : 0 (312) 4352229  
e-mail : [ozkanxyavuzyilmaz@hotmail.com](mailto:ozkanxyavuzyilmaz@hotmail.com).

### Eğitim

| Derece | Eğitim Birimi                            | Mezuniyet tarihi |
|--------|------------------------------------------|------------------|
| Lisans | Kırıkkale Üniversitesi/ Mühendislik Fak. | 2004             |
| Lise   | TED Ankara Koleji                        | 2000             |

### Yabancı Dil

İngilizce

### Hobiler

Bilgisayar teknolojileri, bilgisayar oyunları, sinema