



**DEĞİŞKEN PARAMETRELERE SAHİP DELİKLİ KATMANLI  
KOMPOZİT PLAKALARIN KRİTİK BURKULMA YÜKLERİNİN SONLU  
ELEMENLAR YÖNTEMİYLE PARAMETRİK TASARIMI VE YAPAY  
SİNİR AĞLARI İLE MODELLENMESİ**

**Ali ZOP**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
ENDÜSTRİYEL TASARIM MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ARALIK 2023**

## ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Ali ZOP

25/12/2023

DEĞİŞKEN PARAMETRELERE SAHİP DELİKLİ KATMANLI KOMPOZİT  
PLAKALARIN KRİTİK BURKULMA YÜKLERİNİN SONLU ELEMANLAR  
YÖNTEMİYLE PARAMETRİK TASARIMI VE YAPAY SİNİR AĞLARI İLE  
MODELLENMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Ali ZOP

GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Aralık 2023

ÖZET

Kompozit plakalar, genellikle özel uygulamalar için belirli mukavemet ve dayanıklılık gereksinimlerini karşılamak üzere tasarlandıklarından, bazı durumlarda içi delikli bir yapıda üretilirler. Kompozit plakaların delikli bir yapıya sahip olmaları, ağırlık azaltma, estetik ve işlevsellik, maliyet tasarrufu, özelleştirilmiş tasarım, yapısal performans gibi bazı nedenler için tercih edilir. Bu tasarımların dezavantajları da vardır. Bu nedenle dikkatle planlamalı ve mühendislik yöntemleri ile yönetilmelidir. Bu çalışma, mühendislik açısından önemli olan bu problemi ele alarak kompozit malzemelerin burkulma davranışını parametrik olarak araştırmaktadır. Araştırmada, İçerisinde delik bulunan 4 katmanlı bir kompozit plakada oluşan kritik burkulma davranışının parametrik tasarımını sonlu elemanlar yöntemi(SEY) ile ANSYS sonlu elemanlar yazılımının ACP(Pre) modülünde ve MATLAB yazılımında yapay sinir ağları kullanarak modellenmiş ve incelenmiştir. Plaka boyutları, delik çapı y koordinat düzlemine göre ( $R_b$ ), x koordinat düzlemine göre ( $R_a$ ), delik konumu koordinat düzlemine göre ( $x_1$ ) ve ( $y_1$ ), delik açısı x koordinat düzlemine göre ( $\theta$ ), plaka boyu (L), plaka genişliği (W), plaka kalınlığı (t) biçiminde boyutlandırılmıştır. Plakanın oluşturduğu her bir katman için  $[0/30/0/-30]$ ,  $[0/45/0/-45]$ ,  $[0/60/0/-60]$  ve  $[0/90/0/-90]$  yönelim açıları dikkate alınmıştır. Bu boyutsal değerler için ( $W/L$ ), ( $R_a/R_b$ ), ( $x_1/L$ ) ve ( $y_1/W$ ) oranları kullanılarak içerisinde 5 farklı konumda dairesel ve elips delik oluşacak şekilde dikdörtgen plaka için parametrik deney seti oluşturulmuştur. Bu deney setleri ile ANSYS yazılımında parametrik model oluşturulmuştur. Delikli kompozit plakaların burkulma davranışı, çeşitli tasarım parametreleri ile ilişkilendirilmiş ve yapay sinir ağları kullanılarak bu ilişkilerin sayısal modeli geliştirilmiştir. Elde edilen model, delikli kompozit plakaların burkulma davranışını tahmin etmek için kullanılabilecek önemli bir araç olarak sunulmuştur. Bu çalışma, kompozit malzemelerin mühendislik uygulamalarında tasarım ve analiz süreçlerine önemli ölçüde katkı sağlayabilir.

Bilim Kodu : 91417

Anahtar Kelimeler : Kompozit plaka, burkulma, flambaj, sonlu elemanlar modellenmesi ve analizi, Yapay Sinir Ağları (YSA)

Sayfa Adedi : 131

Danışman : Prof. Dr. Murat Tolga ÖZKAN



PARAMETRIC DESIGN OF CRITICAL BUCKLING LOADS OF PERFORATED  
LAYERED COMPOSITE PLATES WITH VARIABLE PARAMETERS USING THE  
FINITE ELEMENT METHOD AND MODELLING WITH ARTIFICIAL NEURAL  
NETWORKS

(M. Sc. Thesis)

Ali ZOP

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

December 2023

ABSTRACT

Composite panels are often designed with a openings structure to meet specific strength and durability requirements for special applications. The perforated structure of composite panels is preferred in some cases for reasons such as weight reduction, aesthetics, functionality, cost savings, customized design, and structural performance. However, these designs also have disadvantages and must be carefully planned and managed using engineering methods. This study addresses this significant engineering problem by parametrically investigating the buckling behavior of composite materials. In the research, the buckling behavior for the flange condition of a 4-layer composite panel with openings is parametrically designed using the Finite Element Method (FEM) in the ANSYS finite element software's ACP (Pre) module and MATLAB software, incorporating artificial neural networks. The plate dimensions are sized as plate length ( $L$ ), plate width ( $W$ ), plate thickness ( $t$ ), opening diameter relative to the y-coordinate plane ( $R_b$ ), opening diameter relative to the x-coordinate plane ( $R_a$ ), opening position relative to the coordinate plane ( $x_1$ ) and ( $y_1$ ), and opening angle relative to the x-coordinate plane ( $\theta$ ). Orientation angles of  $[0/30/0/-30]$ ,  $[0/45/0/-45]$ ,  $[0/60/0/-60]$ , and  $[0/90/0/-90]$  are considered for each layer of the plate. For these dimensional values, a parametric experimental set is created for a rectangular plate with circular and elliptical openings at five different positions using the ratios ( $W/L$ ), ( $R_a/R_b$ ), ( $x_1/L$ ), and ( $y_1/W$ ). Parametric models are then created using the ANSYS software with this experimental set. The buckling behavior of openings composite panels is associated with various design parameters, and a numerical model of these relationships is developed using artificial neural networks. The resulting model is presented as a valuable tool that can be used to predict the buckling behavior of openings. composite panels. This study can significantly contribute to the design and analysis processes in engineering applications of composite materials.

Science Code : 91417

Key Words : Composites, buckling, Finite Element Modelling and Analysis, Artificial Neural Networks

Page Number : 131

Supervisor : Prof. Dr. Murat Tolga ÖZKAN

## TEŞEKKÜR

Çalışmalarım süresince her zaman yanımda olan, bu tez çalışmam sırasında bilgi ve deneyimleriyle beni destekleyen, yönlendiren ve sorunlarıma bıkmadan çözüm üreten saygıdeğer danışman hocam Prof. Dr. Murat Tolga ÖZKAN' a sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca hayatımdaki en büyük destekçilerim olan eşim Meyra ZOP ve kızlarım Eylül Zeynep ZOP ile Elif Mira ZOP' a teşekkürlerimi sunarım.

## İÇİNDEKİLER

|                                                                                                        | Sayfa |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| ÖZET .....                                                                                             | iv    |
| ABSTRACT.....                                                                                          | v     |
| TEŞEKKÜR.....                                                                                          | vi    |
| İÇİNDEKİLER .....                                                                                      | vii   |
| ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....                                                                              | ix    |
| ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....                                                                                | x     |
| SİMGELER VE KISALTMALAR.....                                                                           | xiii  |
| 1. GİRİŞ.....                                                                                          | 1     |
| 2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI .....                                                                         | 5     |
| 3. KOMPOZİT MALZEMELER.....                                                                            | 17    |
| 3.1. Matris Malzemesine Göre Sınıflandırılması .....                                                   | 18    |
| 3.1.1. Polimer matrisli kompozitler.....                                                               | 18    |
| 3.1.2. Metal matrisli kompozitler .....                                                                | 19    |
| 3.1.3. Seramik matrisli kompozitler .....                                                              | 20    |
| 3.2. Katmanlı Kompozitler.....                                                                         | 21    |
| 3.2.1. Katman (Lamina) .....                                                                           | 21    |
| 3.2.2. Matrisler .....                                                                                 | 21    |
| 3.2.3. Katmanlar (Laminat) .....                                                                       | 21    |
| 3.2.4. Ortotropik lamina plakaların gerilme ve gerinim ilişkileri .....                                | 22    |
| 3.2.5. Farklı açılarda yönelime sahip ortotropik lamina plakaların gerilme ve gerinim ilişkileri ..... | 23    |
| 3.3. Katmanlı Kompozit Plakaların Burkulması .....                                                     | 24    |
| 3.4. Sonlu Elemanlar Yöntemi ve Modelleme .....                                                        | 26    |
| 4. MALZEME VE YÖNTEM.....                                                                              | 29    |
| 4.1. Tasarım Analiz ve Modelleme Süreci.....                                                           | 29    |

|                                                                                           | <b>Sayfa</b> |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| 4.2. Analiz Boyut Parametrelerinin Tanımlanması .....                                     | 29           |
| 4.3. Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Kritik Burkulma Yükünün Parametrik Hesaplanması .....    | 32           |
| 4.4. Kompozit Malzemelerde Eigenvalue için Sonlu Eleman Analizi ve ANSYS Uygulaması ..... | 33           |
| 4.5. Plaka Geometrisi ve Katman Yönelimleri .....                                         | 33           |
| 4.6. Geometrinin Oluşturulması .....                                                      | 35           |
| 4.6.1. ACP(pre) modülü ile kompozit malzeme modellenmesi .....                            | 37           |
| 4.7. Yükleme Koşulları ve Sınır Şartları .....                                            | 39           |
| <b>5. BULGULAR .....</b>                                                                  | <b>41</b>    |
| 5.1. Ansys Tasarım Modeli ve Çıktıları .....                                              | 41           |
| 5.1.1. Katman Açılırları ve Delik Konumunun Etkisi .....                                  | 41           |
| 5.1.2. Delik Şekli Daire İçin Katman Açılırları ve Delik Konumunun Etkisi .....           | 100          |
| 5.1.3. Delik Konumu ve Delik Konum Açısının Etkisi .....                                  | 107          |
| 5.1.4. Delik Yarıçap Oranı Etkisi .....                                                   | 109          |
| 5.1.5. En-Boy Oranı Etkisi .....                                                          | 110          |
| 5.1.6. Delik Yarıçap Oranı ve Delik Konum Açısı Etkisi .....                              | 110          |
| 5.2. Yapay Sinir Ağı Yöntemiyle Kritik Burkulma Yükünün Modellemesi .....                 | 113          |
| 5.3. Yapay Sinir Ağları (YSA) .....                                                       | 113          |
| 5.4. Yapay Sinir Ağları ile Model Tasarımı .....                                          | 116          |
| <b>6. SONUÇ, TARTIŞMA ve ÖNERİLER .....</b>                                               | <b>121</b>   |
| <b>KAYNAKLAR .....</b>                                                                    | <b>127</b>   |
| <b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>                                                                     | <b>131</b>   |

## ÇİZELGELERİN LİSTESİ

| Çizelge                                                                                                         | Sayfa |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Çizelge 4.1. Yapının geometrik sınırlarının belirlenmesi ve Ansys sonlu elemanlar yazılımında uygulanması ..... | 31    |
| Çizelge 4.2. Boyutsal parametrelerin görselleri.....                                                            | 31    |
| Çizelge 4.3. Dört katmanlı kompozit plaka açılarının oryantasyon dizinim gösterimi ..                           | 34    |
| Çizelge 4.4. Epoxy Carbon UD (230 MPa) için malzeme özellikleri .....                                           | 35    |
| Çizelge 4.5. Mesh parametreleri .....                                                                           | 36    |
| Çizelge 5.1. Eigenvalue yük çarpanı katsayısı ansys örnek analiz sonuçları .....                                | 111   |
| Çizelge 5.2. Öğrenme modelleri .....                                                                            | 115   |
| Çizelge 5.3. Regresyon analizi.....                                                                             | 119   |
| Çizelge 6.1. Deformasyon, gerilme, gerinim ve eigenvalue sonuç karşılaştırması .....                            | 121   |

## ŞEKİLLERİN LİSTESİ

| Şekil                                                                                      | Sayfa |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Şekil 3.1. Kompozit malzeme faz yapıları.....                                              | 18    |
| Şekil 3.2. Polimer matris kompozitlerin mekanik özellikleri .....                          | 18    |
| Şekil 3.3. Polimer matris kompozitlerde kullanılan fiberlerin mekanik özellikleri.....     | 19    |
| Şekil 3.4. Metal matris kompozitlerin mekanik özellikleri.....                             | 19    |
| Şekil 3.5. Kompozit malzeme seviyeleri .....                                               | 20    |
| Şekil 3.6. Ana malzeme koordinat eksenine göre pozitif yönelmiş x-y eksenine .....         | 24    |
| Şekil 3.7. Burkulma görselleri .....                                                       | 24    |
| Şekil 3.8. Düzgün dağılmış x yönlü basınç yüküne maruz kalan basit desteklenmiş plaka..... | 25    |
| Şekil 4.1. Ansys sonlu elemanlar yazılımı parametrik deney seti .....                      | 32    |
| Şekil 4.2. Ansys ile Eigenvalue burkulma analizi akış diyagramı.....                       | 33    |
| Şekil 4.3. Dört katmanlı kompozit plakanın dizinim gösterimi.....                          | 34    |
| Şekil 4.4. Delik merkezine parametrik koordinat düzlemi atanması .....                     | 35    |
| Şekil 4.5. Modellenen plaka geometrisi.....                                                | 36    |
| Şekil 4.6. Mesh görseli.....                                                               | 36    |
| Şekil 4.7. Kompozit malzemenin modellenmesi için Ansys ACP (pre) ekranı.....               | 38    |
| Şekil 4.8. Katman yönelim açısı ve katman sıralama yönü örneği.....                        | 39    |
| Şekil 4.9. Delikli kompozit plakanın boyutsal tanımlanması ve sınır şartları .....         | 39    |
| Şekil 4.10. Ansys sonlu elemanlar yazılımı sınır şartları.....                             | 40    |
| Şekil 5.1. Deformasyon, gerilme ve gerinim değerleri.....                                  | 41    |
| Şekil 5.2. Sekiz farklı mod için eigenvalue yük çarpanı değerleri .....                    | 43    |
| Şekil 5.3. Deformasyon, gerilme ve gerinim değerleri.....                                  | 44    |
| Şekil 5.4. Sekiz farklı mod için eigenvalue yük çarpanı değerleri .....                    | 46    |
| Şekil 5.5. Deformasyon, gerilme ve gerinim değerleri.....                                  | 48    |
| Şekil 5.6. Sekiz farklı mod için eigenvalue yük çarpanı değerleri .....                    | 49    |

| <b>Şekil</b>                                                             | <b>Sayfa</b> |
|--------------------------------------------------------------------------|--------------|
| Şekil 5.7. Deformasyon, gerilme ve gerinim değerleri .....               | 51           |
| Şekil 5.8. Sekiz farklı mod için eigenvalue yük çarpanı değerleri .....  | 52           |
| Şekil 5.9. Deformasyon, gerilme ve gerinim değerleri .....               | 54           |
| Şekil 5.10. Sekiz farklı mod için eigenvalue yük çarpanı değerleri ..... | 55           |
| Şekil 5.11. Deformasyon, gerilme ve gerinim değerleri .....              | 56           |
| Şekil 5.12. Sekiz farklı mod için eigenvalue yük çarpanı değerleri ..... | 57           |
| Şekil 5.13. Deformasyon, gerilme ve gerinim değerleri .....              | 59           |
| Şekil 5.14. Sekiz farklı mod için eigenvalue yük çarpanı değerleri ..... | 60           |
| Şekil 5.15. Deformasyon, gerilme ve gerinim değerleri .....              | 61           |
| Şekil 5.16. Sekiz farklı mod için eigenvalue yük çarpanı değerleri ..... | 63           |
| Şekil 5.17. Deformasyon, gerilme ve gerinim değerleri .....              | 64           |
| Şekil 5.18. Sekiz farklı mod için eigenvalue yük çarpanı değerleri ..... | 66           |
| Şekil 5.19. Deformasyon, gerilme ve gerinim değerleri .....              | 67           |
| Şekil 5.20. Sekiz farklı mod için eigenvalue yük çarpanı değerleri ..... | 68           |
| Şekil 5.21. Deformasyon, gerilme ve gerinim değerleri .....              | 69           |
| Şekil 5.22. Sekiz farklı mod için eigenvalue yük çarpanı değerleri ..... | 71           |
| Şekil 5.23. Deformasyon, gerilme ve gerinim değerleri .....              | 72           |
| Şekil 5.24. Sekiz farklı mod için eigenvalue yük çarpanı değerleri ..... | 74           |
| Şekil 5.25. Deformasyon, gerilme ve gerinim değerleri .....              | 75           |
| Şekil 5.26. Sekiz farklı mod için eigenvalue yük çarpanı değerleri ..... | 77           |
| Şekil 5.27. Deformasyon, gerilme ve gerinim değerleri .....              | 78           |
| Şekil 5.28. Sekiz farklı mod için eigenvalue yük çarpanı değerleri ..... | 80           |
| Şekil 5.29. Deformasyon, gerilme ve gerinim değerleri .....              | 81           |
| Şekil 5.30. Sekiz farklı mod için eigenvalue yük çarpanı değerleri ..... | 82           |
| Şekil 5.31. Deformasyon, gerilme ve gerinim değerleri .....              | 83           |
| Şekil 5.32. Sekiz farklı mod için eigenvalue yük çarpanı değerleri ..... | 84           |

| <b>Şekil</b>                                                                                           | <b>Sayfa</b> |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| Şekil 5.33. Deformasyon, gerilme ve gerinim değerleri .....                                            | 86           |
| Şekil 5.34. Sekiz farklı mod için eigenvalue yük çarpanı değerleri .....                               | 87           |
| Şekil 5.35. Deformasyon, gerilme ve gerinim değerleri .....                                            | 88           |
| Şekil 5.36. Sekiz farklı mod için eigenvalue yük çarpanı değerleri .....                               | 89           |
| Şekil 5.37. Deformasyon, gerilme ve gerinim değerleri .....                                            | 91           |
| Şekil 5.38. Sekiz farklı mod için eigenvalue yük çarpanı değerleri .....                               | 92           |
| Şekil 5.39. Deformasyon, gerilme ve gerinim değerleri .....                                            | 93           |
| Şekil 5.40. Sekiz farklı mod için eigenvalue yük çarpanı değerleri .....                               | 94           |
| Şekil 5.41. Delik konumu için belirtilen terimlerin gösterimi .....                                    | 95           |
| Şekil 5.42. Deformasyon, gerilme ve gerinim değerleri için katman açısı delik konumu ilişkisi.....     | 96           |
| Şekil 5.43. Sekiz farklı moddaki eigenvalue yük çarpanı için katman açısı delik konumu ilişkisi.....   | 98           |
| Şekil 5.44. Deformasyon, gerilme ve gerinim değerleri .....                                            | 100          |
| Şekil 5.45. Sekiz farklı mod için eigenvalue yük çarpanı değerleri .....                               | 101          |
| Şekil 5.46. Deformasyon, gerilme ve gerinim değerleri için katman açısı delik konumu ilişkisi.....     | 103          |
| Şekil 5.47. Sekiz farklı mod için eigenvalue yük çarpanı için katman açısı delik konumu ilişkisi.....  | 105          |
| Şekil 5.48. Mod-1 için delik konumu ve delik konumu açısı ilişkisi .....                               | 107          |
| Şekil 5.49. Sekiz farklı mod için eigenvalue yük çarpanı katsayısı - delik yarıçap oranı ilişkisi..... | 109          |
| Şekil 5.50. Mod 1 için katman en-boy ilişkisi .....                                                    | 110          |
| Şekil 5.51. Mod 1 için yarıçap teta açısı ilişkisi .....                                               | 110          |
| Şekil 5.52. Yapay sinir ağı modelinin basit gösterimi .....                                            | 114          |
| Şekil 5.53. Öğrenme fonksiyonları .....                                                                | 116          |
| Şekil 5.54. Tasarlanan yapay sinir ağı modeli .....                                                    | 117          |
| Şekil 5.55. Yapay sinir ağı öğrenme modeli: performans ve yanılma analizi .....                        | 118          |



## SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

| <b>Simgeler</b>                         | <b>Açıklamalar</b>                                          |
|-----------------------------------------|-------------------------------------------------------------|
| $t$                                     | Plaka kalınlığı                                             |
| $\lambda$                               | Özvektör (Eigenvalue)                                       |
| $W$                                     | Plaka en                                                    |
| $L$                                     | Plaka boy                                                   |
| $R_a$                                   | X eksenine göre yarıçap                                     |
| $R_b$                                   | Y eksenine göre yarıçap                                     |
| $\theta$                                | Delik açısı                                                 |
| $x_1$                                   | X eksenine göre elips konumu                                |
| $y_1$                                   | Y eksenine göre elips konumu                                |
| $F$                                     | Uygulanan kuvvet                                            |
| $A$                                     | Alan                                                        |
| $\sigma$                                | Gerilme                                                     |
| $m^2$                                   | Metrekare                                                   |
| $\sigma_{23}, \sigma_{13}, \sigma_{12}$ | $x_1, x_2$ ve $x_3$ koordinatındaki normal gerilmeleri      |
| $\sigma_{yz}, \sigma_{xz}, \sigma_{yx}$ | $x, y$ ve $z$ koordinatındaki normal gerilmeleri            |
| $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$    | $x_1, x_2$ ve $x_3$ koordinatındaki mühendislik gerinimleri |
| $\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z$    | $x, y$ ve $z$ koordinatındaki mühendislik gerinimleri       |

| <b>Kısaltmalar</b> | <b>Açıklamalar</b>           |
|--------------------|------------------------------|
| <b>PMC</b>         | Polimer matrisli kompozitler |
| <b>SEY</b>         | Sonlu elemanlar yöntemi      |
| <b>SEM</b>         | Sonlu elemanlar Modelleme    |
| <b>UD</b>          | Unidirectional               |
| <b>YSA</b>         | Yapay sinir ağları           |

## 1. GİRİŞ

Mühendislik ve malzeme bilimleri, teknolojik gelişmelerin ve endüstriyel uygulamaların öncüsü olmuş disiplinlerdir. Bu alanlarda yapılan araştırmalar ve inovasyonlar, pek çok sektörde performans artışı, dayanıklılık, maliyet azaltma ve çevresel sürdürülebilirlik gibi önemli katkılarda bulunmuştur. Bu bağlamda, kompozit malzemeler, özellikle içi delikli kompozit plakalar, bu disiplinlerde büyük bir öneme sahiptir. Kompozit plakalar, genellikle özel uygulamalar için belirli mukavemet ve dayanıklılık gereksinimlerini karşılamak üzere tasarlandıklarından, bazı durumlarda içi delikli bir yapıda üretilirler. Kompozit plakaların boşluklu bir yapıya sahip olmaları; ağırlık azaltma, estetik ve işlevsellik, maliyet tasarrufu, özelleştirilmiş tasarım, yapısal performans gibi bazı nedenler için tercih edilir. Ancak, bu tasarımın dezavantajları da vardır, çünkü delikler plakanın bütünlüğünü zayıflatabilir ve stres konsantrasyonlarına yol açabilir, bu nedenle dikkatle planlanmalı ve mühendislik hesaplamalarıyla yönetilmelidir.

Mukavemet ve yapı elemanlarının boyutlandırılmasında temel öneme sahip olan karakteristiklerden biri deformasyon ve kararlılıktır. Burkulma durumunda, bir denge problemi ortaya çıkar. Eğer denge durumu kararlı değilse, sistemde meydana gelebilecek en küçük bir dengesizlik, sistemin büyük şekil değişikliklerine yol açabilir ve başlangıç konumuna geri dönmesi neredeyse imkânsız hale gelir.

İnce bir plaka, kendi boyutlarına, uygulanan yüklere ve destek yöntemine bağlı olarak çeşitli burkulma modlarına tabi olabilir. Bu sebeple, bu çalışma kapsamında kompozit plakaların burkulma davranışı, sayısal olarak sonlu elemanlar analizi yöntemi ve yapay sinir ağı modeli kullanılarak çeşitli değişken parametreler altında en uygun tasarım parametrelerini belirlemek amaçlanmıştır.

Bu araştırmada, boyutsal ölçüler ve fiber serim açıları parametrik olarak tanımlanmıştır. Fiber serim açılarının belirlenmesi için deney setleri oluşturulmuştur. Burkulma davranışı sonlu elemanlar analiziyle doğrulandıktan sonra, 8 farklı burkulma tipi için delik yarıçap oranı, en-boy oranı, delik konum katsayıları (x ve y eksenlerine göre), delik konum açısı ve fiber serim açısı dahil olmak üzere toplamda 6860 adet kompozit plaka modeli oluşturulmuştur. Parametrik modellemelerden elde edilen sonuçlar yapay sinir ağları ile modellenmiştir. Yapay Sinir Ağları (YSA) kullanılarak farklı plaka boyutları ve fiber açıları,

farklı delik boyutları, farklı delik konumları ve konum açıları için kritik burkulma yükü değerlerini göz önünde bulundurarak tasarım parametrelerinin eniyilemesi gerçekleştirilmiştir. Yapay Sinir Ağları (YSA) kullanılarak ideal tasarım parametreleri belirlenmiştir. Ayrıca, çözümleri elde edilmemiş parametrik değerlere sahip diğer modeller için YSA algoritması kullanılarak yüksek doğruluk ve güvenilirlikte tahminler yapılmıştır. Bu çalışma, bir parametrik modelleme ve analiz çalışmasının ötesinde, tasarımcılara yönelik modern ve kullanışlı bir dijital katalog görevini üstlenmiştir. Bu katalog, farklı tasarım senaryolarını değerlendirmek ve en uygun tasarım parametrelerini belirlemek isteyen mühendisler ve araştırmacılar için önemli bir kaynak olarak hizmet vermektedir.

#### Problem durumu / Konunun tanımı

Malzeme bilimi, tarih boyunca sürekli bir gelişme süreci içerisinde olmuştur. Bu ilerlemeler, özellikle kompozit malzemelerin keşfi ile birlikte, günümüzde makinelerin parçalarının dayanıklılığı, ömrü, hafıflığı, hacmi gibi kritik parametrelerinde olumlu değişikliklere neden olmuştur. Bununla birlikte, bilgisayar destekli tasarım ve analiz yöntemlerinin gelişimi, daha hızlı tasarım çözümlerinin üretilmesine ve gerçeğe yakın analiz sonuçlarının elde edilmesine imkân tanımıştır. Bu teknolojik ilerlemelere ek olarak, günümüz teknolojisinin evrimi, tasarım ve analiz uygulamalarında yapay zekanın kullanımını mümkün kılmıştır. Yapay zekâ ile yürütülen çalışmalar, daha kısa sürelerde ve daha düşük maliyetlerle çözümler sunmaktadır ve aynı zamanda kullanıcı dostu bir modelleme yaklaşımını benimsemektedir. Bu çalışmada, yapının kritik burkulma değerini etkileyen parametre değişikliklerinin analiz edilmesi amacıyla yapay sinir ağları (YSA) kullanılarak ideal tasarım parametrelerinin tespiti hedeflenmiştir.

#### Araştırmanın amacı

Araştırmanın amacı, değişken parametrelere sahip delikli katmanlı kompozit plakaların kritik burkulma yüklerini sonlu elemanlar yöntemiyle hesaplamak ve bu verileri kullanarak Yapay Sinir Ağı (YSA) ile ideal tasarım parametrelerini belirlemektir. Bu araştırma, bilgisayar destekli modelleme ve analiz ile ilgili uzun süreç ve deneyim gerektiren zorlukları aşmak için yapay zekâ tekniklerini kullanarak tasarım parametrelerine dayalı kritik burkulma dayanımı sonuçlarına hızlı, doğru ve güvenilir bir şekilde ulaşmayı hedeflemektedir. Bu tez çalışmasının ana amacı, plakalarda oluşan kritik burkulma yükünün

belirlenmesi ve devamında ise; daire ve elips delik şeklindeki delikli plakalardaki burkulma etkisinin değişken parametrelerde araştırılmasıdır. Plakanın boyutsal özellikleri, daire/elips şekilli deliklerin ve ayrıca elips şeklin küçük çap ve büyük çapın etkisi, elips delikli plakadaki elipsin notasyon açısının değişiminin kritik burkulma yüküne ve plakaya etkileri araştırılmıştır.

### Araştırmanın önemi

Farklı boyutlarda, çeşitli serim açıları ve yükleme tipleri altındaki kompozit yapıların sonlu elemanlar yöntemi kullanarak analizi, önemli ölçüde zaman ve maliyet kaybına yol açabilen bir süreçtir. Bu nedenle, kullanılan Yapay Sinir Ağı (YSA) yöntemi, sonlu elemanlar yöntemi ile uyumlu ve doğrulanabilir bir alternatif olarak değerlendirilmiştir. Ayrıca, YSA yönteminin daha kısa sürede ve daha düşük maliyetle yüksek doğrulukta sonuçlar sunma potansiyeli, tercih edilmesinin temel nedenlerindendir. Bu çalışma sonucunda elde edilen ideal tasarım parametreleri, gelecekteki tasarım projelerinde kullanılabilir ve tasarımcılara maliyet ve zaman tasarrufu sağlama kapasitesine sahiptir.

### Varsayımlar / Sayıtlar

Çalışma kapsamında, parametreler belirli referans kaynaklara dayanarak oluşturulmuş ve malzemenin yapısal özelliklerini içeren bilgilere ANSYS malzeme kütüphanesinden erişilmiştir. Gerçekleştirilen analizler, dinamik burkulma, termal yükler altında burkulma ve basınç etkisi altında meydana gelen burkulma davranışlarını ve burkulma sonrası davranışları içermemektedir.

### Sınırlılıklar

Araştırmanın kapsamında tasarlanan 6860 adet model, büyük boyutları ve gereken kompozit malzeme ile üretim maliyetleri göz önüne alındığında, gerçek dünyada test edilmesi imkansızdır. Bu nedenle, çalışma bilgisayar programları aracılığıyla gerçekleştirilen simülasyonlarla sürdürülmüştür.

### Tanımlar

Tez çalışması sırasında sık sık tekrarlanan bazı ifadeler kısaltmalarla kullanılmıştır. Kullanılan kısaltmalar ve açılımları alfabetik sırayla aşağıda listelenmiştir.

## 2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Katmanlı kompozit plakaların burkulma davranışının araştırıldığı bu çalışmadaki bu bölüm, katmanlı kompozit plakalarda kesiklerin şekli, boyutları, konumu, konum açısı ve burkulma davranışı üzerindeki belirli parametrelerin analizine dair yapılan literatür çalışmalarının kapsamlı bir özetini sunmaktadır. Bu çalışmaların genel olarak, analitik ve sayısal yöntemlerin karşılaştırılmasına dayandığı görülmüştür. Literatürün dikkat çeken yöntemi, sayısal modellemelerin oluşturulması ve bu modellerin sonuçlarının analitik veya deneysel olarak doğrulanması olmuştur. Sayısal çalışmaların çoğunluğu, sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir, bu çalışmaların kapsamı genellikle belirli parametrelerle sınırlıdır ve mühendislik tasarım uygulaması bağlamında yapay zekâ modellemesi için yeterli veriler elde edilmemiştir. Özellikle daire ve elips şeklindeki kesiklerin plaka üzerinde farklı konumlar ve boyutlar için yapılan çalışmalar oldukça kısıtlıdır.

Yong ve Kim vd., merkezinde dairesel kesiklere sahip kompozit plakaların farklı mekanik ve termal yükler altında burkulma ve burkulma sonrası davranışlarını incelemişlerdir. Plakalar, belirli matematiksel teknikler kullanılarak ayrıştırılmıştır. İncelemenin sonucunda, kesik çapı, plaka boyutu, lamine sıralaması ve fiber yönlendirmesi gibi faktörlerin burkulma kararlılığı ve burkulma sonrası tepkileri üzerindeki etkilerini göstermişlerdir [1].

Nemeth, gelişmiş kompozit malzemelerden yapılmış dikdörtgen plakaların burkulma ve burkulma sonrası davranışı üzerindeki kesiklerin etkilerini incelemiştir. Çalışmada, önceden yapılan araştırmaların genel bir özeti sunulmuş ve birçok önemli bulgu tartışılmıştır. Bu bulgular, kesiklerin boyutu, şekli, kesik yönlendirmesi, plakanın boyutları ve inceliği, yüklemeler ve sınır koşulları, plakanın ortotropi ve anizotropi özelliklerinin etkilerini içermektedir. Bu çalışmaların dikkat çeken sonuçlarından bazıları, kesik içeren plakaların, kesiksiz plakalara göre daha yüksek yükler altında burkulabileceği ve önemli bir burkulma sonrası yükü taşıma kapasitesine sahip olabileceğidir [2].

Onkar vd., malzeme özelliklerinin rastgele olduğu hem homojen hem de lamine plakaların burkulma analizini inceleyen bir analitik çalışma yapmışlardır. Plakaların burkulma davranışını hesaplamak için geliştirilmiş ve genelleştirilmiş katmanlara dayalı stokastik

sonlu eleman formülasyonunu sunmuşlardır. Plakaların burkulma analizi için geometrik sertlik matrisi hesaplanırken, plakaların ön burkulma gerilmeleri de hesaba katılmıştır. Bu ön burkulma gerilmelerinin değişkenliği, plakanın burkulma dayanımının ortalama ve değişim katsayısı üzerindeki etkileri detaylı bir şekilde incelenmiştir. Bu analiz, plakaların gerçek burkulma dayanımının farklı sınır koşullarına, ana malzeme yönelimlerine, boyut oranlarına ve kalınlık oranlarına bağlı olarak nasıl değişebileceğini bizlere göstermiştir. Burkulma dayanımının istatistiksel özelliklerini, birinci dereceden pertürbasyon tekniği kullanılarak Taylor serisi açılımıyla belirlemişlerdir. Bu yöntem, plakaların burkulma dayanımının malzeme özelliklerinin rastgele varyasyonlarına duyarlılığını açıklayan önemli sonuçlar ortaya koymuştur. Son olarak, bu çalışmada kullanılan katmanlı plaka teorisi ile elde edilen stokastik sonlu eleman çözümlerinin, çalışmada sunulan analitik çözümlerle uyumlu olduğu göstermişlerdir. Bu, geliştirilen stokastik sonlu eleman yönteminin doğruluk ve güvenilirlik açısından geçerliliğini onaylamaktadır [3].

Ghannadpour vd., polimer matrisli kompozit malzemelerden üretilen dikdörtgen plakaların burkulma davranışı üzerinde kesiklerin etkilerini incelemeyi amaçlamışlardır. Çalışmada, özellikle dikdörtgen şekilli, simetrik çapraz katmanlı lamine plakaların davranışına odaklanılmıştır. Yük uygulanan kenarlar, farklı sınır koşullarının etkilerini incelemek amacıyla hem sabit hem de basit destekli sınır koşulları altında modellenmiştir. Kesiklerin burkulma davranışını tahmin etmek için sonlu eleman analizi yönteminden faydalanılmıştır. Kesiklerin boyutunun, şeklinin, plaka en-boy oranının ve sınır koşullarının plakanın burkulma davranışına olan etkileri ayrıntılı bir şekilde ele alınmıştır. Araştırmanın en önemli bulgularından biri, kesik içeren plakaların, kesiksiz plakalara göre daha yüksek yükleme seviyelerinde burkulma eğiliminde olduğudur [4].

Kömür vd., Eliptik delikli dokuma-cam-polyester lamine kompozit kare plakanın sayısal olarak burkulma analizini gerçekleştirmişlerdir. Analizler, elips deliğin şekline ve konumunun açısına dayalı çeşitli parametrik çalışmalar yapmak için sonlu eleman yöntemi (FEM) kullanmışlardır. Lamine kompozit plakaları, simetrik çapraz katman  $[(0/90)_2]_s$ , ve simetrik açılı katman  $[(15/75)_2]_s$ ,  $[(30/60)_2]_s$ ,  $[(45/45)_2]_s$ , olarak düzenlemişlerdir. Elde edilen sonuçlarla, hem  $c/a$  ( $c$ =elips radyusu,  $a$ =kare plaka kenar uzunluğu) hem de  $b/a$  ( $b$ =elips radyusu,  $a$ =kare plaka kenar uzunluğu) oranlarının kritik burkulma yüklerine etkisini göstermişlerdir. Delik (kesik) konum açısının hem  $c/a$  hem de  $b/a$  oranları ile olan ilişkisini katman fiber açılarına göre ayrıca incelemişlerdir. Bu incelemeler sonucunda

Çapraz katman kompozit kare plakaların, diğ r tüm analiz edilen açılı katmanlı lamine plakalardan daha g  l  olduğunu tespit etmişlerdir [5].

Bisagni vd., eksenini boyunca basınç yüklemesine maruz kalan kompozit takviyeli panellerin lineerleştirilmiş burkulma yükleri için analitik denklemler geliştirmişlerdir. Yapılan çalışmalarda, geliştirilen analitik yöntemle elde edilen sonuçların Sonlu Eleman Analizi ile karşılaştırılması sonucunda, her iki yöntem arasında yaklaşık olarak %7,3'l k bir fark olduğunu belirlemişlerdir [6].

Zhang vd., 1990 yılından 2009 yılına kadar olan dönemde katmanlı kompozit plakalar için sonlu eleman analizi alanındaki gelişmeleri incelemişlerdir. Bu derleme çalışması, çeşitli katmanlı plaka teorilerine dayalı olarak geliştirilen sonlu elemanları ele almaktadır ve bu sonlu elemanlar teorilerinin katmanlı kompozit plakaların dinamik davranışları, serbest titreşimleri, burkulma ve burkulma sonrası analizleri, geometrik olmayan analizler ve geniş deformasyon analizleri ile birlikte katmanlı kompozit plakaların hasar analizleri için nasıl kullanıldığını açıklar. Özellikle, malzeme lineerliği ve ısı etkilerinin burkulma ve burkulma sonrası analizi üzerindeki etkilerine, ilk katmanın hasar analizine ve plaka hasar analizlerine özel bir vurgu yapılmıştır. Ayrıca, gelecekte yapılması gereken araştırmalar konusunda önerilerde bulunulmuştur [7].

Hani Aziz Ameen, ANSYS programını kullanarak sonlu elemanlar yöntemiyle çalışmışlardır. Çalışma, farklı katman sayılarına sahip E-cam elyaf takviyeli poliest r plastik malzemelerden oluşan kompozit numuneler üzerinde deneysel çalışmalar içermektedir. Beş farklı senaryo incelenmiştir. Bu senaryolar kesiklerin şekli, boyutu, köşelerin yuvarlatılma miktarı ve kesiklerin yönlendirilme açıları gibi çeşitli değişkenleri içermektedir. Ayrıca, plaka kalınlığının etkisi de değerlendirilmiştir. Sonuçlar, kare şekilli kesiklerin bulunduğu laminat plakaların iyi bir uyum içinde olduğunu göstermiştir. Kesiklerin şeklinin daire, kare ve dikdörtgen arasında değişmesi ve kesik boyutunun farklı olması, plakaların burkulma yükünün azalmasına, kesik yuvarlatma miktarının kritik yük üzerinde sabit bir etkiye neden olduğu gözlemlenmiştir, ancak kesiklerin konum açıları ve plaka kalınlığı arttıkça kritik yükün arttığı görülmüştür [8].

Pascan vd., merkezinde elips kesik bulunan ve kesik bulunmayan kompozit plakalar üzerinde gerçekleştirilen bu çalışmada hem analitik hem de sayısal yöntemler



kullanmışlardır. Elde edilen sonuçlar, kullanılan analitik ve sayısal yöntemler arasında karşılaştırılmış ve doğrulama işlemi gerçekleştirilmiştir. Çalışma, 4 katmandan oluşan farklı 7 yönelim açısını içermektedir. Sonuç olarak, elips kesiklerin boyutları, açıları, plaka yönelim açıları ve plakanın boyutlarının burkulma yüküne etkisi ile ilgili değerlendirmeler yapmışlardır [9].

Lakshminarayana vd., on altı katmanlı bir grafit/epoksi kompozit plakanın burkulma davranışını farklı kesik tipleri, boyutları ve diğer parametreler altında incelemişlerdir. Sonuçlar, kesiklerin boyutu, konumu ve plakanın bazı özelliklerinin burkulma yüklerini etkilediğini göstermektedir. Bu çalışma, kompozit plakaların burkulma davranışını anlamak ve optimize etmek isteyen araştırmacılara önemli bilgiler sunmaktadır [10].

Murat Yazıcı, polimer matrisli kompozit malzemelerden oluşan dikdörtgen kesitli plakaların burkulma davranışı üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Çalışmada kesiklerin boyutu, kesik yönlendirmesi ve köşe yarıçapı koşulları incelenmiştir. Plaka oryantasyon açıları 0, 15, 30 ve 45 derece olarak belirlenmiştir. Yük uygulanan kenarlar basit destekli sınır koşullarıyla modellenirken, yük uygulanmayan kenarlar serbest olarak kabul edilmiştir. ANSYS sonlu elemanlar analizi kullanılarak çalışma gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar deneysel çalışmalarla karşılaştırılmış, bu karşılaştırmada sonuçlar uyumlu bulunmuştur. Çalışmanın temel bulgularından biri, delik köşe yarıçapının kritik burkulma yükünü değiştirmedir. Kesik açısını artırarak elde edilen maksimum değişikliğin, burkulma yüklerinde %5,91 olduğu gözlemlenmiştir [11].

Sa'el Saleh Al-Jameel vd., sonlu elemanlar analizi yöntemi kullanarak çalışma gerçekleştirilmişlerdir. Kare bir kompozit plakada merkezinde elips şeklinde kesik bulunan bir senaryo üzerinde odaklanmışlardır. Plakaya tek eksenli bir yük uygulanmıştır. Farklı ham malzeme türleri kullanılarak çeşitli denemeler gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, farklı katman yönelim açıları da dikkate alınmıştır. Elipsin konum açısı ve boyutlarının plakanın boyuna oranının burkulma yükü üzerindeki etkisini incelemişlerdir [12].

Narayana vd., sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak bir sayısal çalışma gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışma,  $[0^\circ/+45^\circ/-45^\circ/90^\circ]_2s$  simetrik olarak katmanlı izotrop grafit/epoksi malzemeden oluşan bir dikdörtgen kompozit plakanın burkulma davranışının, farklı değerlerde doğrusal olarak değişen düzlem içi basınç yüklerine maruz kalma durumlarını incelemektedir. Ayrıca,

bu makale, dikdörtgen kesiklerin boyutları, kesiklerin yönlendirmesi (açıları), plakanın en/boy oranı, plakanın uzunluk/kalınlık oranı, sınır koşulları gibi faktörlerin, farklı değerlerde doğrusal olarak değişen düzlem içi basınç yüklerine maruz kalan simetrik olarak katmanlanmış dikdörtgen kompozit plakaların burkulma davranışı üzerindeki etkilerini ele almaktadır. Sonuç olarak bu çalışma, dikdörtgen kesikli kompozit plakanın burkulma dayanıklılığı üzerinde farklı değerlerde doğrusal olarak değişen düzlem içi yüklerin ve sınır koşullarının önemli bir etkisi olduğunu göstermiştir [13].

Ravinder Reddy vd., kare ve dikdörtgen kesiklerin etkilerini değerlendirmek amacıyla, ANSYS yazılımı kullanılarak polimer matrisli kompozit malzemelerden üretilen simetrik lamine bir dikdörtgen kompozit plakanın burkulma davranışı incelenmiştir. Plakanın burkulma davranışı, tek eksenli basınç yüklemesi altında analiz edilmiştir. Bu çalışma, kesiklerin boyutu, kesiklerin yönü ve plaka boyutlarının burkulma davranışı üzerindeki etkilerini ele almaktadır. Araştırmacılar, elde ettikleri sonuçları kesik pozisyon açısı, kesik boyutları ve plaka boyutlarına oranları dikkate alarak değerlendirmişlerdir [14].

Narayana vd., simetrik olarak lamine edilmiş on altı katmanlı yarı-izotropik grafit/epoksi malzemeden oluşan dikdörtgen kompozit plakalar üzerinde araştırmalarını gerçekleştirmişlerdir. Hem kare hem de dikdörtgen kesitlere sahip plakalar kullanmışlardır. Çalışmalarını  $[0^\circ/+45^\circ/-45^\circ/90^\circ]_2s$  yönelim açlarına sahip katmanlı kompozit plaka modelinde, düzlemsel değişken yükler altında gerçekleştirmişlerdir. Kesik boyutu, yönelimi, plaka en-boy oranı, plaka uzunluk-kalınlık oranı ve sınır koşulları gibi çeşitli parametreleri detaylı bir şekilde incelemişlerdir [15].

Dilu Riswana C vd., katmanlı kompozit düz ve silindirik plakalar üzerinde farklı lamina yönelim açılarının etkileri incelemişlerdir. Kompozit plaka malzemesi karbon fiberdir. Analizler için Sonlu Elemanlar Yöntemi kullanılmış ve ANSYS yazılımını tercih etmişlerdir. Plakalarda dairesel, üçgen, kare ve yıldız şeklinde kesikler bulunmaktadır. Ayrıca kesiksiz plakalar da araştırma kapsamına alınmıştır. Farklı lamina yönelim açlarına sahip üç katmanlı kesikli plakalar, çeşitli sınır şartları ve kalınlık değişiminin plakaların burkulma davranışı üzerindeki etkilerini detaylı bir şekilde değerlendirmişlerdir [16].

Altunsaray, Geleneksel Laminasyon Plaka Teorisi denklemlerine dayalı olarak gerçekleştirilen bu çalışmada, Rayleigh Ritz Yöntemi kullanılmıştır. Plakalar, basit destekli

sınır şartlarına tabi tutulmuş ve tek yönlü yükler uygulanmıştır. Toplamda yirmi dört farklı lamine dizilimine sahip kompozit plakaların kritik burkulma yükleri, 12 farklı kenar oranı için parametrik bir yaklaşımla hesaplanmıştır. Bu hesaplamalar sırasında ANSYS adlı sonlu elemanlar yöntemi yazılımı kullanılmıştır [17].

Dakuri vd., simetrik çapraz katmanlı kompozit plakaların burkulma davranışını incelemiştir. Bu çalışmada, farklı kesik türlerini içeren plakalara odaklanılmıştır. Burkulma analizi ile birlikte, belirli sınır koşulları altında plakanın deformasyonunu, gerilme ve gerinimini incelemiştir. Tüm kesikler, plakanın merkezine yerleştirilmiştir. Burkulma analizi, tüm kesikler için aynı kompozit plaka alanını kullanarak yürütülmüştür [18].

Candra vd., elips şeklinde kesik bulunan bir kompozit plakanın burkulma davranışı uniform olmayan yükler altında parametrik olarak incelenmiştir. Çalışmada kesiğin boyutu, kesiğin yönelimi, plaka oryantasyon açısı, sınır koşulları ve katman kalınlığı gibi çeşitli parametrelerin etkisini araştırmışlardır. Yaptıkları gözlemlerde, eliptik dikey kesiklerin, eliptik yatay kesiklere göre daha yüksek burkulma direncine sahip olduğunu ortaya koymuşlardır [19].

Kumar vd., grafit/epoksi katmanlı kompozit plakaların burkulma davranışını inceleyen bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmada, analitik yöntemler kullanılmış ve MATLAB programı tercih edilmiştir. Araştırma, farklı kesik tipleri üzerinde odaklanmıştır, bu kesikler kare, daire, uygulanan yükün yönüne göre dikey dikdörtgen ve yatay dikdörtgen kesiklerden oluşmaktadır. Kesik boyutlarını belirlemek için kesik alanı katsayıları kullanmışlardır. [0/90/90/0], [0/90/0/90], [0/0/90/90], [90/0/0/90] fiber oryantasyonuna sahip kompozit plakalara tek eksenli yük uygulanmış ve dört farklı sınır şartı incelenmiştir. Elde ettikleri sonuçları, kesik tiplerine göre plaka kalınlık oranları ve fiber oryantasyon açıları gibi parametreler ile karşılaştırmışlardır. Bu karşılaştırmalar sonucunda, yükün yönüne göre dikey dikdörtgen kesik şeklinin en düşük burkulma direncini gösterdiği belirlenmiştir [20].

Wankhade vd., laminat kompozit plakaların burkulma davranışını incelemiştir. Bu çalışma, geleneksel Laminasyon Plaka Teorisi denklemlerini kullanarak analitik bir yaklaşımla gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın amacı, farklı sınır koşullarına sahip kompozit plakaların burkulma davranışını araştırmaktır. Sınır koşulları, en-boy oranı, genişlik-kalınlık oranı ve farklı burkulma modları gibi çeşitli parametrelerin, laminat plakaların burkulma

özellikleri üzerindeki etkilerini vurgulamışlardır. Ayrıca, plakaların kalınlık oranının burkulma yükleri üzerindeki etkisi değerlendirilmiş ve sonuçlar, en-boy oranının artmasıyla ince ve orta kalınlıklı plakalarda burkulma yüklerinin yüzde 36 azaldığını göstermiştir. İnce plakalardan kalın plakalara geçişte, burkulma yüklerinin yüzde 62 değiştiği görülmüştür [21].

Evran, fonksiyonel gradyan fiber yönlendirme açıları içeren katmanlı kompozit plakaların burkulma analizi için sayısal ve istatistiksel bir çalışma yapmıştır. Katmanlı kompozit plakalar, Taguchi yöntemi kullanılarak özgün bir şekilde tasarlanmıştır. Bu çalışmada ana parametre olarak fiber yönlendirme açıları belirlenmiştir. Sayısal analizler, ANSYS sonlu eleman yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kritik burkulma yükünün eniyilemesi amacıyla detaylı analizler yapılmıştır. Ayrıca, katmanların önem sıralamaları ve burkulma özelliklerine katkı yüzdeleri varyans analizi ile hesaplanmıştır. Eniyilemiş seviyelerdeki katmanlar kullanılarak, katman dizilimlerinin, örgü boyutunun, eleman türünün, mod tipinin ve sınır koşullarının kritik burkulma yüküne etkileri değerlendirilmiştir [22].

Uslu vd., merkezinde dairesel ve kare kesikler bulunan kompozit plakaların kritik burkulma yüklerini incelemişlerdir. Delik şekilleri, boy uzunluk oranları ve toplam delik alanları gibi farklı parametrelerin burkulma yükleri üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Yedi farklı kesik alanına (%0.79, %3.14, %7.07, %12.57, %19.63, %28.27 ve %38.48) sahip plaka modelleri incelenmiş ve deliksiz bir plaka modeli ile karşılaştırmışlardır. Plakalar, ANSYS yazılımında kullanılan kabuk teorisi kullanılarak modellenmiştir. Çalışma sonucunda kare delikli plakaların dairesel delikli plakalardan daha yüksek bir burkulma yüküne sahip olduğunu gözlemlemişlerdir [23].

Srivatsan vd., baklava şeklindeki kesik için çeşitli parametrelerin kompozit lamine levhaların burkulma analizi üzerindeki etkilerini, sonlu eleman analizi kullanarak incelemişlerdir. Bu çalışmada, kesik şeklinin plaka üzerindeki açısını, boyutunun etkisini, kesiklerin konumu ve katmanların fiber yönelimleri gibi önemli parametreleri değerlendirmişlerdir. Elde edilen sonuçlar, önceden yayınlanmış araştırmalarla karşılaştırılmış ve güçlü bir uyum gösterdiğini görmüşlerdir. Bulgular, kesik boyut oranının artmasıyla birlikte burkulma yükünün azaldığını göstermiştir. Ayrıca, kesiklerin boyutları, levhanın kütesinin azalmasını belirlemede önemli bir rol oynamaktadır. Sonuç olarak, katman fiber yönelimlerinden aralarında en düşük burkulma yüküne sahip olanın [(45/-

45)2]s dizilimdeki plakada olduğunu gözlemlemişler.  $[(0/90)_2]_s$ ,  $[(15/-75)_2]_s$ ,  $[(30/-60)_2]_s$  ve  $[(45/-45)_2]_s$ . [24].

Tao vd., ince cidarlı silindirin aksenal basınç yüklemesi altında flambaj için fiziksel tabanlı yapay sinir ağı analizini gerçekleştirmişlerdir. Bu araştırmada, ince cidarlı silindirlerin flambaj yükünü öngörmek için Seide tarafından toplanan deneysel verileri kullanarak fiziksel bilgileri içeren bir yapay sinir ağı (PANN) kullanmışlardır. PANN, tahmin doğruluğunu geliştirmek ve bazı fiziksel yasaları uygulama yeteneğine sahiptir. PANN' ın yeteneklerini göstermek amacıyla bir giriş problemi örneği sunmuşlardır. Ardından, PANN kullanılarak silindir flambaj analizi gerçekleştirilmiştir. Eşitsizlik kısıtı uygulanmış ve sinir ağı tarafından tahmin edilen flambaj yükünün, ilgili deneysel veriden eşit veya daha küçük olması zorunluluğu uygulanmıştır. Sonuçlar, PANN' ın mükemmel tahmin doğruluğuna ulaşabileceğini ve flambaj yükünü ilgili deneysel flambaj yükünden eşit veya daha küçük bir şekilde tahmin edebileceğini göstermişlerdir [25].

Duong vd., yapay sinir ağı modeli kullanarak fonksiyonel yönelimli kompozit plakaların kritik burkulma yükü için analizini gerçekleştirmişlerdir. Kompozit plakaların kritik burkulma yükü için bir alternatif araç olarak yapay sinir ağı (YSA) kullanılan veri tabanlı bir model sunmuşlardır. İlk işlem olarak, basit desteklenmiş plakalar için analitik bir çözüm kullanılarak rastgele seçilmiş giriş parametreleri için bir veri tabanı oluşturulmuştur. Veri tabanı daha sonra, YSA modelini geliştirmek ve doğrulamak için sırasıyla verilerin %80' ini içeren bir eğitim veri seti ve %20' sini içeren bir test veri setine ayrılmıştır. Otuz iki düğüm içeren altı gizli katman kullanılarak geliştirilen YSA modelinin, veriyle %99,95' lik bir oran ile eşleştiğini göstermişlerdir [26].

Pevzner vd., çalışmalarında MATLAB tabanlı TEW adlı yazılım kodunu aksenal basınç altında güçlendirilmiş dairesel silindirik panellerin burkulma ve çökme yüklerini hesaplamak amacıyla geliştirilmişlerdir. Bu program, etkili genişlik yöntemini kullanarak eğilme burkulması, burulma burkulması ve lokal burkulma gibi deformasyonları incelemektedir. Elde edilen sonuçları, deneysel verilerle ve sonlu eleman hesaplarıyla karşılaştırılmışlardır. Önerilen yöntem, yapılan deneyler ve sonlu eleman analizleri ile tutarlı ve güvenilir sonuçlar vererek yüksek performans göstermiştir. Ayrıca, güçlendirilmiş dairesel silindirik kompozit panellerin tasarımı ve optimizasyonu için bu yöntemin kullanılabileceğini göstermişlerdir [27].

Lin vd., içerisinde dairesel delik bulunan katmanlı kompozit dikdörtgen plakaların aksel yük altındaki flambaj analizini gerçekleştirmişlerdir. İnceleme sürecinde, kayma deformasyon teorisi ve varyasyonel enerji yöntemini analitik çözüm için kullanmışlardır. Sayısal sonuçların elde edilmesinde ise dokuz düğümlü Lagrangian sonlu elemanlar yöntemi tercih etmişlerdir. Çalışma kapsamında, yükleme tiplerinin, delik çapının, malzeme özelliklerinin, levha kalınlığının, tabaka açılarının ve sınır koşullarının kritik burkulma yüklerini nasıl etkilediği detaylı bir şekilde incelemiş ve elde edilen sonuçlar literatür ile karşılaştırılarak grafiklerle gösterilmiştir [28].

Altan, merkezinde dikdörtgen bir delik bulunan ortotropik katmanlı kompozit dikdörtgen plakaların eigenvalue (burkulma) katsayılarını sonlu elemanlar yöntemi ve yapay sinir ağı modellemesi gerçekleştirmiştir. Bu çalışma kapsamında, düzlem içi statik yüklemeye maruz kalan plakanın burkulma analizini sunmuştur. İlk olarak katmanlı kompozit plakaların kritik burkulma yük katsayıları sonlu elemanlar yöntemi ile elde etmiştir. Ardından yapay sinir ağı yöntemi kullanılarak bu sonuçlar kıyaslanmıştır. Sinir ağlarının eğitim ve test çalışması için PASCAL yazılım programını kullanmıştır [29].

Köksal vd., bu araştırmada kapsamında, çekme gerilmesi altındaki miller için çentik faktörü değerini hesaplamak amacıyla Yapay Sinir Ağları (YSA) kullanan bir yazılım geliştirilmişlerdir. Pythia sinir ağlarının geliştirilmesi ve mimarisinin oluşturulması için tasarlanmış program ile oluşturulan bu yazılım sayesinde kullanıcı, bir milin boyut değerlerini ve üzerine uygulanan yükün türünü girebilir ve çentik faktörü hesaplamalarını doğru bir şekilde ayrıca tablolara ihtiyaç duymadan gerçekleştirebilir [30].

Özkan vd., içerisinde elips delik açılmış dikdörtgen plakaları çekme kuvvetine maruz bırakarak oluşan maksimum çekme gerilmelerini hesaplanmış ANSYS sonlu elemanlar yöntemi (SEY) ve Yapay Sinir Ağları (YSA) ile modellenmiş ve analiz etmişlerdir. Bu çalışmadaki girdiler parametrik olarak oluşturulmuşlardır. Elde edilen sonuçların kıyaslarını yapmışlar, grafik ve tablolar ile detaylı olarak göstermişlerdir. Ayrıca SEY ile modellenen plakaların mesh boyutlarına göre değişimlerini sunmuşlardır [31].

Yavuz vd., yaprak yaylarının ANSYS Sonlu Eleman Yöntemi (SEY) yazılımında parametrik olarak analiz edilmesi ve yapay sinir ağları metodu ile ağ mimarisinin oluşturulması üzerine çalışmışlardır. Bu parametreler, model tipi, yay katman sayısı, her bir katman için uzunluk,

katman kalınlığı, yay kavis yarıçapı ve kuvvet değerleridir. Bu parametreler ile oluşturulan deney setleri için elde edilen gerinim-gerilme değerleri kullanılarak bir Yapay Sinir Ağı Modeli geliştirilmiştir [32].

Eren vd., Simetrik “V” şeklindeki çentikli bir plakada Gerilme Konsantrasyon Faktörü (GKF) katsayısını belirlemek üzere YSA modeli geliştirmişlerdir. Literatürdeki deneysel çalışmalardan grafikleri sayısal bir şekilde Excel formatına dönüştürmüşlerdir ve “V” çentik problemi için farklı parametrelerde elde edilen GKF değerlerini matematiksel olarak hesaplamışlardır. MATLAB yazılımı ile YSA mimarisi çalışması yapmışlar, ayrıca matematiksel sonuçlar ile YSA sonuçları karşılaştırmalarını paylaşmışlardır [33].

Hamani vd., içerisinde tek ve iki adet olmak üzere dairesel delikli dikdörtgen kompozit levhaların burkulma analizini, sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak gerçekleştirmişlerdir. Lamine levhaları  $[(\theta/-\theta)_2]_s$  düzenine göre simetrik bir şekilde yerleştirmişlerdir. İlgili parametreler delik yarıçapı, delikler arası mesafe ve levha ebatlarıdır. Delik konumları sabit tutulmuştur. Elde edilen sonuçların, delik yarıçapının etkisinin neredeyse sabit olduğunu gösterdiğini belirtmişlerdir. Anizotropi derecesinin artması ise kritik burkulma yükünü önemli ölçüde artırdığını göstermişlerdir [34].

Husam vd., içerisinde dairesel delik bulunan çapraz katmanlı laminat kare levhaların burkulma yükü için çeşitli parametrelerin etkisine çalışmışlardır. Çalışmada göz önünde bulundurulan parametreler delik boyutu, delik konumu, fiber yönelim açısı, yük tipidir. Bu parametrelerdeki ebat ölçüleri oranlar ile yönetilmiştir. Üç farklı düzlem içi yük incelemişlerdir. Bunlar uniaxial basınç, biaxial basınç ve kesme yüklemeleridir. Delik boyutundaki artışa bağlı olarak burkulma yükündeki azalma, kesme yüklemesi durumunda uniaxial ve biaxial basınca kıyasla daha belirgin olduğunu tespit etmişlerdir. Küçük boyutlu delikler için, deliğin levha kenarına yakın tutulması durumunda daha iyi bir performans elde edilmiştir. Ancak, büyük boyutlu delikler için, deliğin levhanın ortasında tutulması durumunda daha yüksek bir burkulma yükü elde etmişlerdir [35].

Singh vd., kesikli kompozit levhaların burkulma dayanımlarını incelemek amacıyla çeşitli kesik şekilleri, boyutları, katman yönelimleri ve en-boy oranı değişkenlerine göre kompozit levhayı uniaxial, biaxial ve shear yükleri altında farklı varyasyonlara maruz bırakmışlardır. Bu çalışma da hem kombine yüklemeleri hem de ayrı ayrı uygulanan yüklemeleri içeren

çeşitli senaryolar ele alınmıştır. Araştırmada, farklı kısıtlamalar altında en uygun delik alan oranlarını belirlemek için çaba sarf edilmiş ve elde edilen bulgular rapor edilmiştir. Analizlerde, ABAQUS yazılımının kullanılmasıyla, kesikli kompozit levhaların mekanik davranışları detaylı bir şekilde incelenmiştir. Çalışma kapsamında, beş farklı lamine dizilim çeşidi ve beş farklı yükleme tipi dikkate alınarak geniş bir parametrik analiz yapılmıştır. Ayrıca, iki farklı malzeme türü de değerlendirilmiş ve bu malzemelerin burkulma dayanımları üzerindeki etkileri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, kesikli kompozit levhaların burkulma davranışının karmaşıklığını anlamak ve optimize etmek için önemli bir katkı sağlamaktadır [36].

Kumar vd., güçlendirilmiş lamine kompozit panellerin flambaj analizi için Sonlu Eleman Analizi (SEA) ve Yapay Sinir Ağı (YSA) kullanılarak elde edilen sonuçları incelenmiş ve kıyaslanmışlardır. Sonlu Eleman Analizi (SEA), karmaşık problemlerin etkili ve çok yönlü bir şekilde analiz edilmesi için kullanılan bir yöntemdir. SEA modellerinde dört farklı parametre seti oluşturmuşlardır. YSA eğitimi için, çok katmanlı besleme ile sinir ağı içinde iki gizli katmanın kullanıldığı bir ağ mimarisi oluşturmuşlardır. Güçlendirilmiş panellerin burkulma yükünü tahmin etmek için yapılan birkaç iterasyon sonucunda, YSA tarafından başarılı bir ağ mimarisi geliştirilmiştir. YSA' nın bilinmeyen yeni veri seti için yaptığı tahminler, farklı durumlardaki SEA sonuçları ile uyumlu bir şekilde gerçekleştiğini göstermişlerdir [37].





### 3. KOMPOZİT MALZEMELER

Kompozit malzemeler, En az iki farklı malzemenin birbiri içerisinde çözünmeyecek şekilde yani makro seviyede birleştirilmesiyle oluşturulan yeni malzemelerdir. Bu malzemeler, genellikle materyalin ana taşıyıcı bileşeni olan matrisi ve güçlendirici malzeme olan takviye içerir. Bu tür malzemelerin amacı, bileşenlerin tek başına sahip olmadığı hafiflik, dayanıklılık, esneklik gibi bazı özellikleri geliştirmek ve bir araya getirmektir. Elde edilen malzemeler, bileşenlerinin farklı özelliklerini bir araya getirerek istenilen mekanik, termal veya kimyasal özelliklere sahip olabilir.

Örnek olarak, karbon fiber takviyeli epoksi reçine bir kompozit malzeme olabilir. Karbon fiber takviyesi mükemmel mukavemet ve hafiflik sağlarken, epoksi reçine matrisi dayanıklılık ve yapıştırıcı özellikler ekler. Bu tür bir kompozit malzeme, otomotiv, havacılık, uzay endüstrisi, rüzgâr enerjisi üretimi ve daha birçok uygulamada kullanılır.

Kompozit malzemeler genel olarak 2 temel fazı içerir:

#### a. Takviye fazı

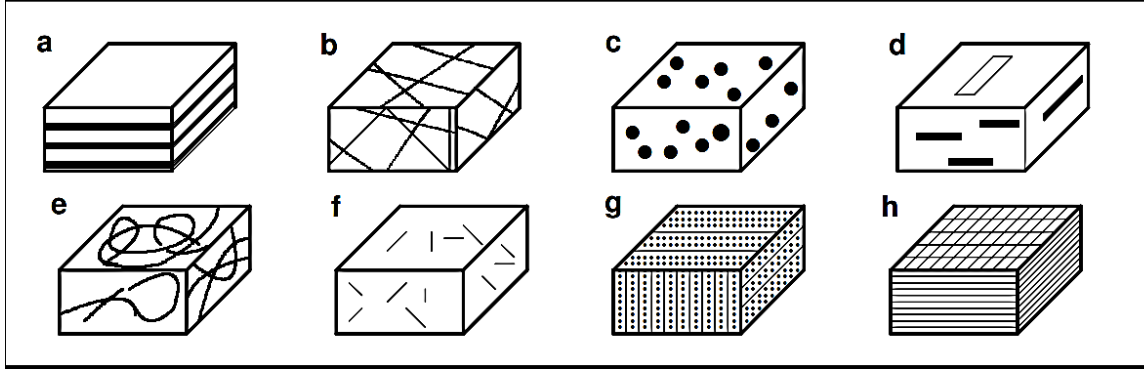
- Takviye fazı, kompozit malzemenin mukavemet, rijitlik ve diğer mekanik özelliklerini artıran fazdır.
- Bu faz, malzemenin dayanıklılığını ve taşıma kapasitesini genellikle artırır.
- Takviye fazı, fiberler, partiküller veya lifçikler gibi farklı formlarda olabilir.

#### b. Matris Fazı

- Matris fazı, takviye fazını çevreleyen ve takviye fazını destekleyen bir materyali ifade eder.
- Bu faz, takviye fazını bir arada tutar ve malzemenin bütünlüğünü sağlar.
- Matris fazı, genellikle polimerler, seramikler veya metaller gibi farklı malzemelerden oluşur.
- Malzemenin dayanıklılığını ve bazen de termal iletkenlik gibi diğer özelliklere katkıda bulunur.

Bu iki temel faz, kompozit malzemenin özelliklerini belirleyen önemli bileşenlerdir. Takviye fazı mukavemet, rijitlik ve benzeri mekanik özellikler sağlarken, matris fazı bu bileşenleri bir arada tutar ve takviye fazının doğru şekilde dağılmasını sağlar. Bu iki fazın seçimi ve

uygun birleştirilmesi, kompozit malzemenin belirli uygulamalardaki performansını şekillendirir. Kompozit malzeme faz yapıları ile ilgili örnek görsel Şekil 3.1. de verilmiştir.



Şekil 3.1. Kompozit malzeme faz yapıları [38]

### 3.1. Matris Malzemesine Göre Sınıflandırılması

#### 3.1.1. Polimer matrisli kompozitler

En yaygın gelişmiş kompozitler, polimer matrisli kompozitler (PMC) olarak bilinir. Bu kompozitler, polimer (örneğin, epoksi, polyester, üretan) ile ince çaplı fiberler (örneğin, grafit, aramid, bor) tarafından takviye edilir. Örneğin, grafitle epoksi kompozitler, ağırlığa göre yaklaşık olarak çelikten beş kat daha güçlüdür. Bunların en yaygın kompozitler olmalarının nedenleri arasında düşük maliyetleri, yüksek mukavemetleri ve basit üretim prensipleri yer almaktadır [39].

| Property                         | Units       | Graphite/<br>epoxy | Glass/<br>epoxy | Steel | Aluminum |
|----------------------------------|-------------|--------------------|-----------------|-------|----------|
| <b>System of Units: USCS</b>     |             |                    |                 |       |          |
| Specific gravity                 | —           | 1.6                | 1.8             | 7.8   | 2.6      |
| Young's modulus                  | Msi         | 26.25              | 5.598           | 30.0  | 10.0     |
| Ultimate tensile strength        | Ksi         | 217.6              | 154.0           | 94.0  | 40.0     |
| Coefficient of thermal expansion | pin./in./°F | 0.01111            | 4.778           | 6.5   | 12.8     |
| <b>System of Units: SI</b>       |             |                    |                 |       |          |
| Specific gravity                 | —           | 1.6                | 1.8             | 7.8   | 2.6      |
| Young's modulus                  | GPa         | 181.0              | 38.6            | 206.8 | 68.95    |
| Ultimate tensile strength        | MPa         | 1500               | 1062            | 648.1 | 275.8    |
| Coefficient of thermal expansion | µm/m/°C     | 0.02               | 8.6             | 11.7  | 23       |

Şekil 3.2. Polimer matris kompozitlerin mekanik özellikleri

| Property                               | Units       | Graphite | Aramid | Glass | Steel | Aluminum |
|----------------------------------------|-------------|----------|--------|-------|-------|----------|
| <b>System of Units: USCS</b>           |             |          |        |       |       |          |
| Specific gravity                       | —           | 1.8      | 1.4    | 2.5   | 7.8   | 2.6      |
| Young's modulus                        | Msi         | 33.35    | 1798   | 1233  | 30.0  | 10.0     |
| Ultimate tensile strength              | Ksi         | 299.8    | 200.0  | 224.8 | 94.0  | 40.0     |
| Axial coefficient of thermal expansion | pin /in /°F | -0.722   | -2.778 | 2.778 | 6.5   | 12.8     |
| <b>System of Units: SI</b>             |             |          |        |       |       |          |
| Specific gravity                       | —           | 1.8      | 1.4    | 2.5   | 7.8   | 2.6      |
| Young's modulus                        | GPa         | 230      | 124    | 85    | 206.8 | 68.95    |
| Ultimate tensile strength              | MPa         | 2067     | 1379   | 1550  | 648.1 | 275.8    |
| Axial coefficient of thermal expansion | µm/m/°C     | -1.3     | -5     | 5     | 11.7  | 23       |

Şekil 3.3. Polimer matris kompozitlerde kullanılan fiberlerin mekanik özellikleri

### 3.1.2. Metal matrisli kompozitler

Metal matrisli kompozitler (MMK'lar), adından da anlaşılacağı gibi bir metal matrise sahiptir. Bu tür kompozitlerde matris olarak alüminyum, magnezyum ve titanyum gibi metaller kullanılırken, tipik fiberler karbon ve silikon karbittir. Metaller, tasarım ihtiyaçlarına uygun olarak özelliklerini artırmak veya azaltmak amacıyla genellikle takviye edilir. Örneğin, metallerin elastik sertliği ve dayanıklılığı fiberlerin eklenmesiyle artırılabilirken, silikon karbitten gibi fiberlerin eklenmesiyle metallerin termal genleşme katsayıları ile termal ve elektriksel iletkenlikleri azaltılabilir [40].

| Property                         | Units       | SiC/<br>aluminum | Graphite/<br>aluminum | Steel | Aluminum |
|----------------------------------|-------------|------------------|-----------------------|-------|----------|
| <b>System of Units: USCS</b>     |             |                  |                       |       |          |
| Specific gravity                 | —           | 2.6              | 2.2                   | 7.8   | 2.6      |
| Young's modulus                  | Msi         | 17               | 18                    | 30    | 10       |
| Ultimate tensile strength        | Ksi         | 175              | 63                    | 94    | 34       |
| Coefficient of thermal expansion | µin /in /°F | 6.9              | 10                    | 6.5   | 12.8     |
| <b>System of Units: SI</b>       |             |                  |                       |       |          |
| Specific gravity                 | —           | 2.6              | 2.2                   | 7.8   | 2.6      |
| Young's modulus                  | GPa         | 117.2            | 124.1                 | 206.8 | 68.95    |
| Ultimate tensile strength        | MPa         | 1206             | 448.2                 | 648.1 | 234.40   |
| Coefficient of thermal expansion | µm/m/°C     | 12.4             | 18                    | 11.7  | 23       |

Şekil 3.4. Metal matris kompozitlerin mekanik özellikleri

### 3.1.3. Seramik matrisli kompozitler

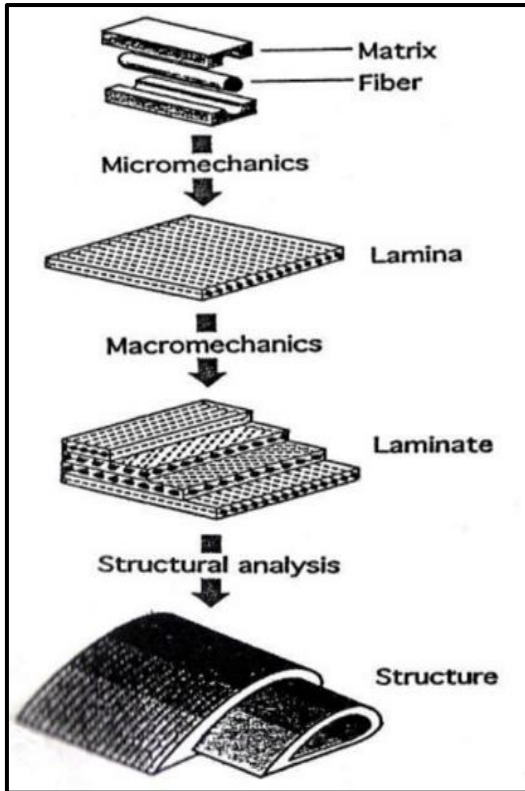
Seramik matrisli kompozitler (SMK'lar), alümina gibi seramik bir matrisle karbon veya silikon karbitten gibi fiberlerle takviye edilen malzemelerdir [39].

Bu matris sınıfındaki kompozitler, yüksek sıcaklık uygulamaları, aşındırıcı ortamlar ve elektronik uygulamalar gibi bir dizi endüstriyel ve teknolojik alanda kullanılır. Mükemmel bir yalıtkan özelliğe sahiptir.

Kompozit malzemeler, iki farklı seviyede analiz edilebilir: makro mekanik analiz ve mikro mekanik analiz.

Mikro mekanik: Malzemeyi oluşturan bileşenlerin mikroskobik seviyedeki etkileşimlerinin mekanik analizi.

Makro mekanik: Malzemenin homojen olduğunu varsayarak ve ortalama mekanik özellikler kullanarak lamina seviyesini incelemek.



Şekil 3.5. Kompozit malzeme seviyeleri [40]

### **3.2. Katmanlı Kompozitler**

Katmanlı kompozitler, en az iki farklı malzeme tabakasının bir araya getirildiği yapılar olarak tanımlanabilir. Bu yapılar, farklı malzeme tabakalarının birleştirilmesiyle elde edilen malzemelerdir. Laminasyon, bu farklı tabakaların en iyi özelliklerini birleştirerek daha kullanışlı bir malzeme elde etmek amacıyla yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Laminasyon sayesinde elde edilebilen özellikler için sertlik, dayanıklılık, hafiflik, aşınma direnci, korozyon direnci gibi örnekler verilebilir.

#### **3.2.1. Katman (Lamina)**

Lamina, düz veya dokuma fiberlerin bir matris içinde düzenli bir yapı oluşturduğu birimdir. Fiberler, bu yapıdaki başlıca yük taşıma araçlarıdır ve genellikle yüksek dayanıklılığa ve sertliğe sahiptirler. Laminalar, farklı yönlendirmelere sahip olabilir ve bu, malzemenin mekanik özelliklerini etkiler.

#### **3.2.2. Matrisler**

Matris, bir lamina içindeki fiberlerin çevresini çevreleyen malzemedir. Matris genellikle polimer, seramik veya metal gibi çeşitli malzemelerden oluşur. Matrisin temel görevi, fiberlere destek sağlamak, onları korumak, yükleri dağıtmak ve fiberler arasında yük iletimini kolaylaştırmaktır.

#### **3.2.3. Katmanlar (Laminat)**

Laminatlar, laminaların farklı ana malzeme yönlendirmeleri ile bir yığın halinde düzenlenmiş yapılardır. Bu, her katmanın farklı mekanik özelliklere sahip olabileceği anlamına gelir. Bu yapılar özellikle mukavemet, sertlik ve dayanıklılık gereksinimlerini karşılamak için tasarlanmış yapılardır. Laminatların temel bileşenleri, katmanları bir arada tutan matris malzemesi ve katmanların kendisidir. Katmanlar, farklı malzemelerin plakalarından veya fiber takviyeli laminaların katmanlarından oluşabilir. Bu, laminatın mekanik özelliklerini çeşitlendirmenin bir yoludur.

### 3.2.4. Ortotropik lamina plakaların gerilme ve gerinim ilişkileri

Ortotropik malzemeler, farklı yönler göre farklı mekanik özelliklere sahiptir ve bu nedenle plakanın üzerine uygulanan kuvvetlere ve momentlere karşı gösterdiği tepkiler de yönler göre farklı olarak değişir.

Bir ortotropik lamina plakanın gerilme ve gerinim ilişkilerini açıklamak için genellikle elastisite teorisi kullanılır. Bu teori, malzemenin deformasyonu ile gerilme arasındaki ilişkiyi tanımlar.

- $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ : Sırasıyla x, y ve z yönlü normal deformasyon bileşenleri,
- $\gamma_{12}$ : x-y düzlemindeki kesme deformasyon bileşeni,
- $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ : Sırasıyla x, y ve z yönlü normal gerilme bileşenleri,
- $\tau_{12}$ : x-y düzlemindeki kesme gerilme bileşeni,
- $E_1, E_2, E_3$ : Elastisite modülleri,
- $\nu_{12}, \nu_{21}, \nu_{23}, \nu_{32}, \nu_{31}, \nu_{13}$ : Poisson oranları,
- $G_{12}, G_{23}, G_{31}$ : Kayma modülleri.

Ortotropik bir malzemede iki boyutlu gerinim-gerilim ilişkileri aşağıdaki gibi ifade edilebilir;

Ortotropik bir malzemede iki boyutlu gerinim-gerilim ilişkileri aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & 0 \\ s_{12} & s_{22} & 0 \\ 0 & 0 & s_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} \quad (3.1)$$

Burada;

$$s_{11} = \frac{1}{E_1}, \quad s_{12} = -\frac{\nu_{12}}{E_1} = -\frac{\nu_{21}}{E_2}, \quad s_{22} = \frac{1}{E_2}, \quad s_{66} = \frac{1}{G_{12}} \quad (3.2)$$

Yukarıdaki denklem tersine çevrilebilir ve gerilim-gerinim denklemi elde edilebilir;

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} \quad (3.3)$$

Veya Mühendislik sabitlerini kullanarak ifade edersek

$$Q_{11} = \frac{E_1}{1 - \nu_{12}\nu_{21}}, \quad Q_{12} = \frac{\nu_{12}E_2}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} = \frac{\nu_{21}E_1}{1 - \nu_{12}\nu_{21}}, \quad Q_{22} = \frac{E_2}{1 - \nu_{12}\nu_{21}}, \quad Q_{66} = G_{12} \quad (3.4)$$

### 3.2.5. Farklı açılarda yönelime sahip ortotropik lamina plakaların gerilme ve gerinim ilişkileri

Ortotropik bir malzeme için gerilme ve gerinimler ana malzeme koordinatlarında tanımlanmıştır. Fakat, ortotropik laminalar genellikle ana koordinat yönleriyle aynı yönde olmayabilir. Bu nedenle, gerilme-gerinim ilişkilerini bir koordinat sistemi üzerinden diğerine dönüştürme yöntemine ihtiyaç duyulmuştur.

Gerilme ve Gerinim ilişkisi x-y koordinatlarına göre aşağıdaki gibidir;

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = [Q'] \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} Q'_{11} & Q'_{12} & Q'_{16} \\ Q'_{12} & Q'_{22} & Q'_{26} \\ Q'_{16} & Q'_{26} & Q'_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} \quad (3.5)$$

Bu durumda;

$$Q'_{11} = Q_{11} \cos^4 \theta + 2(Q_{12} + 2Q_{66}) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + Q_{22} \sin^4 \theta \quad (3.6)$$

$$Q'_{12} = (Q_{11} + Q_{22} - 4Q_{66}) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + Q_{12}(\sin^4 \theta + \cos^4 \theta) \quad (3.7)$$

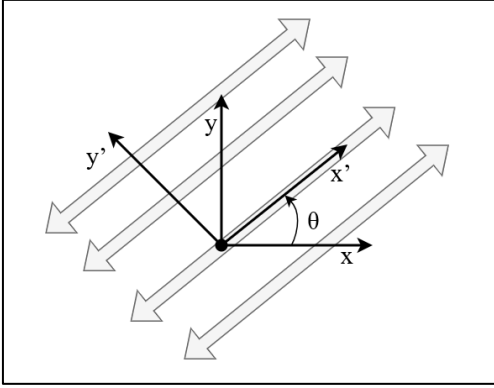
$$Q'_{22} = Q_{11} \sin^4 \theta + 2(Q_{12} + 2Q_{66}) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + Q_{22} \cos^4 \theta \quad (3.8)$$

$$Q'_{16} = (Q_{11} - Q_{12} - 2Q_{66}) \sin \theta \cos^3 \theta + (Q_{12} - Q_{22} + 2Q_{66}) \sin^3 \theta \cos \theta \quad (3.9)$$

$$Q'_{26} = (Q_{11} - Q_{12} - 2Q_{66}) \sin^3 \theta \cos \theta + (Q_{12} - Q_{22} + 2Q_{66}) \sin \theta \cos^3 \theta \quad (3.10)$$

$$Q'_{66} = (Q_{11} + Q_{22} - 2Q_{12} - 2Q_{66}) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + Q_{66}(\sin^4 \theta + \cos^4 \theta) \quad (3.11)$$



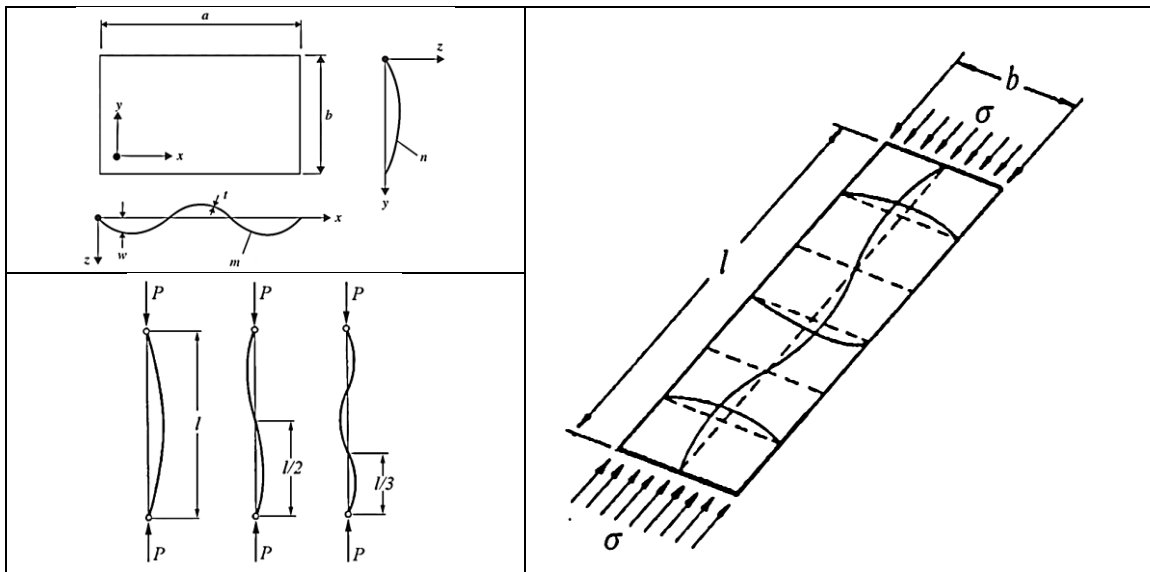


Şekil 3.6. Ana malzeme koordinat eksenine göre pozitif yönelmiş x-y eksenini

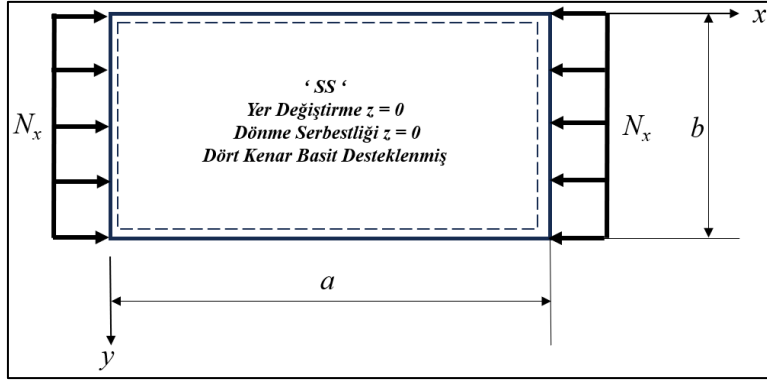
### 3.3. Katmanlı Kompozit Plakaların Burkulması

Ortotropik kompozit malzemeler için plaka kabuk yapıların statik yükler altında kritik burkulma yüklerinin analitik olarak hesaplanma süreci ayrıntılı bir şekilde açıklanmıştır. Analitik hesaplamaların gerçekleştirildiği süreçte, malzemenin doğrusal elastik bir davranış sergilediği temel bir varsayım yapılmış ve burkulmadan önceki deformasyonlar ile enine kayma deformasyonları ihmal edilmiştir.

Burkulma, plakanın düzgün denge durumu artık kararlı olmadığına ve plaka düz bir yapıdan saparak iç düzlem sıkıştırma yükü büyüdüğünde burkulduğu görülür. Düz durumdan sapma anındaki yük, burkulma yükü olarak tanımlanabilir.



Şekil 3.7. Burkulma görselleri



Şekil 3.8. Düzgün dağılmış x yönlü basınç yüküne maruz kalan basit desteklenmiş plaka

Kompozit plakanın dört tarafından basit destekli olduğunu ve üzerine  $\lambda N_x$ ,  $\lambda N_y$  ve  $\lambda N_{xy}$  düzlem içi basınç yükleri uygulandığı durumda, burada  $\lambda$  bir skalar genlik parametresi olan “Eigenvalue” değeridir. Sınır şartları ve düzlem içi basınç yükleri dikkate alındığında plakanın burkulma davranışını ifade eden eşitlik aşağıda gösterilmiştir:

$$D_{11} \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2(D_{12} + 2D_{66}) \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + D_{22} \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} = \lambda \left( N_x \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + N_y \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + N_{xy} \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right) \quad (3.12)$$

Burada,  $w$  plakanın burkulma deplasmanını,  $D_{11}$ ,  $D_{22}$ ,  $D_{12}$ ,  $D_{66}$  elastisite modülüne bağlı bir plaka sabiti olan malzeme özelliklerini temsil eder. İlgili eşitlik aşağıdaki gibidir;

$$w(x, y) = \sum_m \sum_n A_{mn} \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b} \quad (3.13)$$

Eşitlik 3.13’ ün Eşitlik 3.12’ de yerine koyulmasıyla, burkulma yük faktörü ifadesi aşağıdaki şekilde elde edilir.

$$\lambda_i = \frac{\pi^2 \left[ D_{11} \left( \frac{m}{a} \right)^4 + 2(D_{12} + 2D_{66}) \left( \frac{m}{a} \right)^2 \left( \frac{n}{b} \right)^2 + D_{22} \left( \frac{n}{b} \right)^4 \right]}{N_x \left( \frac{m}{a} \right)^2 + N_y \left( \frac{n}{b} \right)^2 + N_{xy} \left( \frac{m}{a} \right) \left( \frac{n}{b} \right)} \quad (3.14)$$

Yukarıdaki eşitlikler ile ilgili olarak açıklanması gereken önemli bir husus, Eşitlik 3.13 ve Eşitlik 3.14 'te  $D_{16}$  ve  $D_{26}$ 'nın yer almamasıdır, çünkü bu değerler ortotropik bir laminat için sıfırdır.

Kritik burkulma yük faktörü " $\lambda$ " plakanın en boy oranına, sınır şartlarına, yük oranına, kalınlığına, malzemesine (kompozit malzemeler için katman açısı ve diğer karakteristiklerine) bağlı olarak değişir. Herhangi bir başarısızlığı önlemek için bu faktör, burkulma açısından incelendiğinde birden küçük olmalıdır.

$$\lambda_{cb} = \min \lambda_b(m, n) \quad (3.15)$$

Eşitlik 3.15, kritik burkulma yük faktörü  $\lambda_{cb}$ 'yi,  $\lambda_b$  fonksiyonunun  $m$  ve  $n$  değişkenlerine bağlı minimum değeri olarak tanımlar. Yani, kritik burkulma yük faktörü  $\lambda_b$  fonksiyonunun tüm  $m$  ve  $n$  kombinasyonları içerisinde minimum değerini alır. Bir kez kritik burkulma yük faktörünü yani "Eigenvalue değerini" elde ettikten sonra, kritik burkulma yükleri Eşitlik 3.16 ve Eşitlik 3.17 ile belirlenebilir.

$$N_{x,cr} = \lambda_{cb} N_x \quad (3.16)$$

$$N_{y,cr} = \lambda_{cb} N_y \quad (3.17)$$

### 3.4. Sonlu Elemanlar Yöntemi ve Modelleme

Sonlu Eleman Modelleme, klasik analiz yöntemleriyle çözümlenmesi zor olan karmaşık yapıların içindeki gerilmeleri ve deformasyonları belirlemek için güçlü bir bilgisayar aracıdır. Malzeme özellikleri, Young modülü ( $E$ ) ve Poisson oranı ( $\mu$ ) gibi, sınırlayıcı koşullar ve uygulanan yükler gibi bilgiler kullanıcı tarafından tercih edilerek SEM'e girilir.

Genel olarak Sonlu Eleman Yönteminin sahip olduğu karakteristikler Aşağıdaki gibidir:

- Karmaşık görünen büyük matris denklemlerini içeren dizileri içerir.
- Basit rijitlik ve eğilme denklemlerini içeren temel kavramları içerir.
- İlk olarak, bir yapının uzayda bulunan elemanlara ortak bir koordinat sistemiyle bölünmesini içeren bir yapı modeli oluşturmaktadır.
- Koordinat noktaları veya düğümler, modelde veri çıktısı sağlanan yerlerdir.
- Temel olarak Sonlu elemanlar yöntemi, bir yapının stres ve eğilme karakteristiklerini kolayca tanımlanabilen küçük elemanlara böler.

Sonlu Eleman Yöntemi ile modelleme önemlidir çünkü sistemin kararlılığını değerlendirmemizi sağlar.

Bir bileşen yetersiz şekilde modellendiğinde, elde edilen analiz sonuçları, maksimum gerilme-gerinim bölgelerinin tahminlerinde yanıltıcı olabilir. Bu tür modelleme eksiklikleri, yapıyı yeterli sayıda ve yeterli kalite seviyesinde elemanlarla modellenmemesi temel sebeplerindendir. Bu tür hatalardan kaçınmanın yolu, yüksek gerilme-gerinim bölgelerini önceden tahmin etmek ve bu bölgelere daha fazla eleman eklemekten geçer, ancak bu tahminleri yapabilmek için mühendislik deneyimi gereklidir.

Genellikle, modelin eleman örgüsü ne kadar ince ve detaylı olursa sonuçlar o kadar doğru olur. Ancak, modelde kullanılan eleman sayısı arttıkça, bilgisayar kapasitesi, analiz için gereken süre ve maliyeti arttırır. Verimliliği yükseltmenin yolu, elemanları kritik olarak tespit ettiğimiz bölgelere yoğunlaştırmak ve kritik olarak görmediğimiz bölgelerde eleman sayısını minimize etmek olabilir.



## 4. MALZEME VE YÖNTEM

Bu bölüm, farklı yöntemler kullanılarak katmanlı kompozit plakanın kritik burkulma yükünün hesaplanması ve bu yükün değişimine etki eden tasarım parametrelerinin belirlenmesi üzerine odaklanmaktadır. Kesik bulunan katmanlı kompozit plakalardaki burkulma hesaplaması için, ANSYS [41] yazılımında "Eigenvalue buckling" yöntemi kullanılarak bir ana model oluşturulmuştur. Bu modelde, belirli plaka boyutları ve parametreler kullanılarak boşluğun konumu parametrik olarak değiştirilebilir.

Bu çalışmadaki kompozit plaka, dört katmandan oluşmaktadır ve her bir katman, ana modelde belirtilmiş olan oryantasyon açılarına ve katman kalınlığına bağlı olarak modellenmiştir. Yönelim açıları, [0/30/0/-30], [0/45/0/-45], [0/60/0/-60] ve [0/90/0/-90] için farklı varyasyonlarda denenmiştir.

Analiz sonuçları, ANSYS yazılımının "Eigenvalue buckling" yöntemi kullanılarak elde edilmiş ve delik bulunan kompozit plakanın burkulma özellikleri belirlenmiştir. Bu hesaplamalar, plakanın dayanıklılığı ve yapısal davranışı hakkında önemli bilgiler sağlamaktadır.

### 4.1. Tasarım Analiz ve Modelleme Süreci

Çalışma kapsamında, öncelikle tasarlanması planlanan kompozit plakanın parametrik boyutları ve kompozit malzeme karakteristikleri belirlendi. Bu parametrik olarak belirlenen elemanlar, ANSYS ortamında üç boyutlu tasarlandı. Ardından, deney setleri oluşturuldu. Oluşturulan deney setleri üzerinde ANSYS ortamında parametrik sonlu elemanlar analizi gerçekleştirildi. Elde edilen veriler, MATLAB ortamında yapay sinir ağlarıyla modellendi. Kullanılan yapay sinir ağları ile belirlenen aralıklarda oluşan deformasyonlar, gerinim-gerilme ve kritik burkulma yükü narinlik oranı tahmin edildi. Elde edilen veriler, geometri boyutları, yönelim açıları ve 8 farklı mod için ayrı ayrı detaylı bir kıyaslama yapıldı ve grafiklerle görsel olarak sunuldu.

### 4.2. Analiz Boyut Parametrelerinin Tanımlanması

Yapıya etkisi en büyük olan, kritik burkulma yükünü belirleyen faktörlerden biri yapıların geometrisidir. Kompozit yapıların burkulma davranışını etkileyen faktörler, yapının

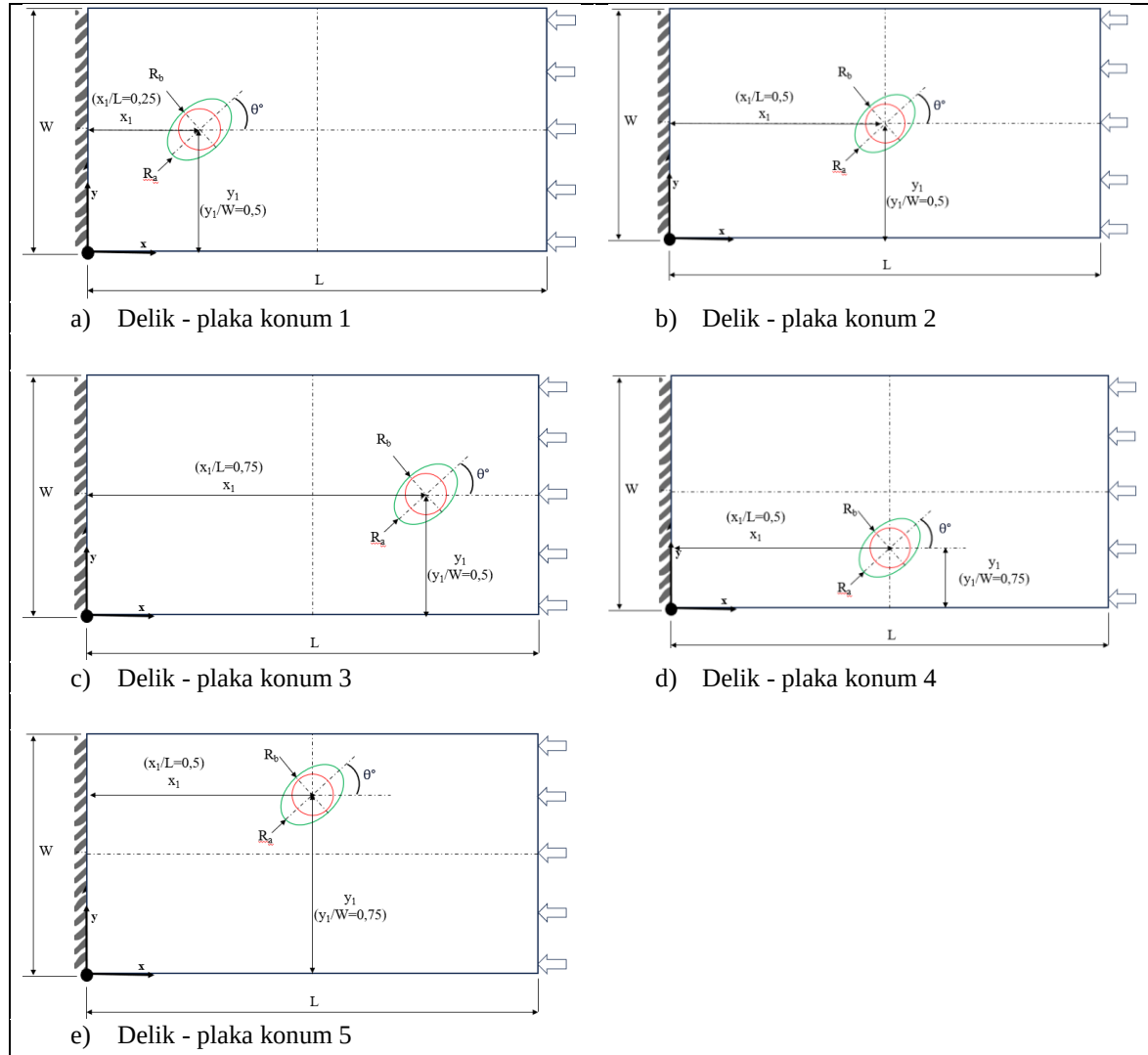
geometrik boyutları, kullanılan malzeme türü, sınır koşulları ve katman dizilimi tarafından tanımlanmaktadır. Bu bölümde, yapının geometrik sınırları paylaşılmış ve Ansys sonlu elemanlar yazılımında uygulanması gösterilmiştir.

Çizelge 4.1’ de Yapının geometrik sınırları paylaşılmıştır. Delikli kompozit plakanın kenar uzunlukları oranı  $W/L$  dir. Bu çalışma için (0,25 - 0,5 - 0,75 - 1 - 1,25 - 1,5 - 2) oranları kullanılmıştır.  $L$  uzunluğu sabit 400 mm alınmış ve bu değere göre plaka eni ( $W$ ) belirlenmiştir.  $W/L = 1$  değeri için plaka şekli kare oluşmaktadır. Delik konumları plaka koordinat düzlemine göre  $x$  eksenindeki hareketi için  $x_1$ ,  $y$  eksenindeki hareketi için  $y_1$  sembolü kullanılmış ve parametrik olarak plaka üzerindeki yerini konumlandırabilmek için  $x_1$  uzunluğunun plaka boyuna oranı ( $x_1/L$ ) (0,25 - 0,5 - 0,75),  $y_1$  uzunluğunun plaka enine oranı ( $y_1/W$ ) (0,25 - 0,5 - 0,75) alınarak işlem yapılmıştır. Delik şeklini ve boyutunu belirleyen oran ( $R_a/R_b$ ) dir.  $R_a$  delik ölçüsünün koordinat düzlemine göre  $x$  eksenindeki yarıçap değerini ifade etmektedir.  $R_b$  delik ölçüsünün koordinat düzlemine göre  $y$  eksenindeki yarıçap değerini ifade etmektedir. Bu çalışmada  $R_a/R_b$  için (0,25 - 0,5 - 0,75 - 1 - 1,25 - 1,5 - 2) oranları kullanılmıştır.  $R_b$  yarıçap değeri sabit 10 mm alınmış ve bu değere göre  $x$  eksenindeki yarıçap değeri ( $R_a$ ) belirlenmiştir.  $R_a/R_b = 1$  değeri için delik şekli daire oluşmaktadır. Delik konum açısı “ $\theta$ ” ( $0^\circ$  -  $30^\circ$  -  $45^\circ$  -  $60^\circ$  -  $90^\circ$  -  $120^\circ$  -  $135^\circ$  -  $150^\circ$ ) değerleri incelenmek için belirlenmiştir. Bu delik konumu açısı değerleri; plaka koordinat düzlemine göre  $+x$  eksen  $0^\circ$ ,  $+y$  eksen  $90^\circ$ ,  $-x$  eksen  $180^\circ$  olacak şekilde parametrik olarak uygulanmıştır. Bu durumda ( $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$ ) değerleri delik konum açısı yönünün ( $+x$ ,  $+y$ ) bölgesinde, ( $120^\circ$  ve  $135^\circ$ ) değerleri ( $-x$ ,  $+y$ ) bölgesinde yöneldiğini göstermektedir. Her bir Ply kalınlığı için 0,25 mm ( $t$ ) değeri belirlenmiş ve delikli kompozit plaka 4 katmandan oluştuğu için toplam kalınlık 1 mm uygulanmıştır. Bu parametrik değerler neticesinde, plaka şekli dikdörtgen/kare ve delik şekli daire/elips olan tüm boyutlar için plaka üzerindeki 5 farklı konumu incelenmiştir. Ayrıca tüm parametre ve konumlar için delik konum açısının ( $\theta$ ) tasarıma etkisi araştırılmıştır. Boyutsal parametrelerin görselleri Çizelge 4.2’ de sunulmuştur.

Çizelge 4.1. Yapının geometrik sınırlarının belirlenmesi ve Ansys sonlu elemanlar yazılımında uygulanması

| W/L  | $x_1/L$ | $y_1/W$ | $R_a/R_b$ | $R_b$ (mm)<br>(Sabit) | t (mm)<br>(Sabit) | L (mm)<br>(Sabit) | $\theta^\circ$<br>(Derece) |
|------|---------|---------|-----------|-----------------------|-------------------|-------------------|----------------------------|
| 0,25 |         |         | 0,25      |                       |                   |                   | 0                          |
| 0,5  |         |         | 0,5       |                       |                   |                   | 30                         |
| 0,75 | 0,25    | 0,25    | 0,75      |                       |                   |                   | 45                         |
| 1    | 0,5     | 0,5     | 1         | 10                    | 0,25              | 400               | 60                         |
| 1,25 | 0,75    | 0,75    | 1,25      |                       |                   |                   | 90                         |
| 1,5  |         |         | 1,5       |                       |                   |                   | 120                        |
| 2    |         |         | 2         |                       |                   |                   | 135                        |
|      |         |         |           |                       |                   |                   | 150                        |

Çizelge 4.2. Boyutsal parametrelerin görselleri





Şekil 4.1’ de Ansys sonlu elemanlar yazılımı parametrik deney seti gösterilmiştir. Burada; boyutsal olarak sınırları belirlenen değerlerin Ansys sonlu elemanlar yazılımında parametre atanarak çözdürülen ekranı sunulmuştur.

| Table of Design Points |                |        |        |         |         |                 |         |         |                                |                                |                                 |                                |
|------------------------|----------------|--------|--------|---------|---------|-----------------|---------|---------|--------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|
| 1                      | A              | B      | C      | D       | E       | F               | G       | H       | I                              | J                              | K                               | L                              |
|                        | Name           | P1 - L | P2 - w | P3 - x1 | P4 - y1 | P5 - ELIPS_TETA | P6 - Rb | P7 - Ra | P8 - ModelingPly. 1 .ply_angle | P9 - ModelingPly. 2 .ply_angle | P10 - ModelingPly. 3 .ply_angle | P11 - ModelingPly .4.ply_angle |
| 2                      | Units          | mm     | mm     | mm      | mm      | degree          | mm      | mm      |                                |                                |                                 |                                |
| 3                      | DP 0 (Current) | 400    | 100    | 100     | 50      | 45              | 10      | 15      | 0                              | 45                             | 0                               | -45                            |
| 4                      | DP 1           | 400    | 500    | 200     | 125     | 0               | 10      | 2,5     | 0                              | 30                             | 0                               | -30                            |
| 5                      | DP 2           | 400    | 500    | 200     | 375     | 0               | 10      | 2,5     | 0                              | 30                             | 0                               | -30                            |
| 6                      | DP 3           | 400    | 600    | 100     | 300     | 0               | 10      | 2,5     | 0                              | 30                             | 0                               | -30                            |
| 7                      | DP 4           | 400    | 600    | 200     | 300     | 0               | 10      | 2,5     | 0                              | 30                             | 0                               | -30                            |
| 8                      | DP 5           | 400    | 600    | 300     | 300     | 0               | 10      | 2,5     | 0                              | 30                             | 0                               | -30                            |
| 9                      | DP 6           | 400    | 600    | 200     | 150     | 0               | 10      | 2,5     | 0                              | 30                             | 0                               | -30                            |
| 10                     | DP 7           | 400    | 200    | 200     | 50      | 135             | 10      | 5       | 0                              | 45                             | 0                               | -45                            |
| 11                     | DP 8           | 400    | 200    | 200     | 150     | 135             | 10      | 5       | 0                              | 45                             | 0                               | -45                            |
| 12                     | DP 9           | 400    | 300    | 100     | 150     | 135             | 10      | 5       | 0                              | 45                             | 0                               | -45                            |
| 13                     | DP 10          | 400    | 300    | 200     | 150     | 135             | 10      | 5       | 0                              | 45                             | 0                               | -45                            |
| 14                     | DP 11          | 400    | 300    | 300     | 150     | 135             | 10      | 5       | 0                              | 45                             | 0                               | -45                            |
| 15                     | DP 12          | 400    | 300    | 200     | 75      | 135             | 10      | 5       | 0                              | 45                             | 0                               | -45                            |
| 16                     | DP 13          | 400    | 100    | 100     | 50      | 45              | 10      | 12,5    | 0                              | 60                             | 0                               | -60                            |
| 17                     | DP 14          | 400    | 100    | 200     | 50      | 45              | 10      | 12,5    | 0                              | 60                             | 0                               | -60                            |
| 18                     | DP 15          | 400    | 100    | 300     | 50      | 45              | 10      | 12,5    | 0                              | 60                             | 0                               | -60                            |
| 19                     | DP 16          | 400    | 100    | 200     | 25      | 45              | 10      | 12,5    | 0                              | 60                             | 0                               | -60                            |
| 20                     | DP 17          | 400    | 100    | 200     | 75      | 45              | 10      | 12,5    | 0                              | 60                             | 0                               | -60                            |
| 21                     | DP 18          | 400    | 200    | 100     | 100     | 45              | 10      | 12,5    | 0                              | 60                             | 0                               | -60                            |
| 22                     | DP 19          | 400    | 200    | 200     | 100     | 45              | 10      | 12,5    | 0                              | 60                             | 0                               | -60                            |
| 23                     | DP 20          | 400    | 200    | 300     | 100     | 45              | 10      | 12,5    | 0                              | 60                             | 0                               | -60                            |
| 24                     | DP 21          | 400    | 200    | 200     | 50      | 45              | 10      | 12,5    | 0                              | 60                             | 0                               | -60                            |
| 25                     | DP 22          | 400    | 200    | 200     | 150     | 45              | 10      | 12,5    | 0                              | 60                             | 0                               | -60                            |
| 26                     | DP 23          | 400    | 100    | 100     | 50      | 45              | 10      | 20      | 0                              | 90                             | 0                               | -90                            |
| 27                     | DP 24          | 400    | 100    | 200     | 50      | 45              | 10      | 20      | 0                              | 90                             | 0                               | -90                            |
| 28                     | DP 25          | 400    | 100    | 300     | 50      | 45              | 10      | 20      | 0                              | 90                             | 0                               | -90                            |
| 29                     | DP 26          | 400    | 100    | 200     | 25      | 45              | 10      | 20      | 0                              | 90                             | 0                               | -90                            |
| 30                     | DP 27          | 400    | 100    | 200     | 75      | 45              | 10      | 20      | 0                              | 90                             | 0                               | -90                            |
| 31                     | DP 28          | 400    | 200    | 100     | 100     | 45              | 10      | 20      | 0                              | 90                             | 0                               | -90                            |
| 32                     | DP 29          | 400    | 200    | 200     | 100     | 45              | 10      | 20      | 0                              | 90                             | 0                               | -90                            |
| 33                     | DP 30          | 400    | 200    | 300     | 100     | 45              | 10      | 20      | 0                              | 90                             | 0                               | -90                            |
| 34                     | DP 31          | 400    | 200    | 200     | 50      | 45              | 10      | 20      | 0                              | 90                             | 0                               | -90                            |

Şekil 4.1. Ansys sonlu elemanlar yazılımı parametrik deney seti

### 4.3. Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Kritik Burkulma Yükünün Parametrik Hesaplanması

Sonlu Elemanlar Yöntemi, mühendislik problemlerini çözmek için kullanılan ve karmaşık yapıdaki problemleri çözmek amacıyla geliştirilmiş bir sayısal analiz yöntemidir. Temel prensibi, bir yapıyı sonlu bir sayıda elemana bölmek, her bir elemanın davranışını matematiksel olarak modellenmesi ve bu modelleri bir araya getirerek bütün yapının davranışını anlamamıza olanak tanımaktır. Karmaşık geometrilere, değişken malzeme özelliklerine ve sınır koşullarına sahip problemlerin parametrik çözümü için uygundur.

#### 4.4. Kompozit Malzemelerde Eigenvalue için Sonlu Eleman Analizi ve ANSYS Uygulaması

Eigenvalue faktörünü belirlemek için bir referans yükü ve gereken sınır koşulları, sonlu eleman modeline uygulanmıştır. Yükün büyüklüğü ihmal edilebilir, çünkü yük eigenvalue tarafından ölçeklenir. Bu nedenle, Ansys analizi ile elde edilen eigenvalue, modele uygulanan referans yükü ile çarpıldığında, belirtilen burkulma modundaki yapı için kritik burkulma yükü hesaplanmaktadır.

$$(K_0^{NM} + \lambda_i K_{\Delta}^{NM}) v_i^M = 0$$

$K_0^{NM}$ , Sonlu elemanlar modelinin rijitlik matrisidir,

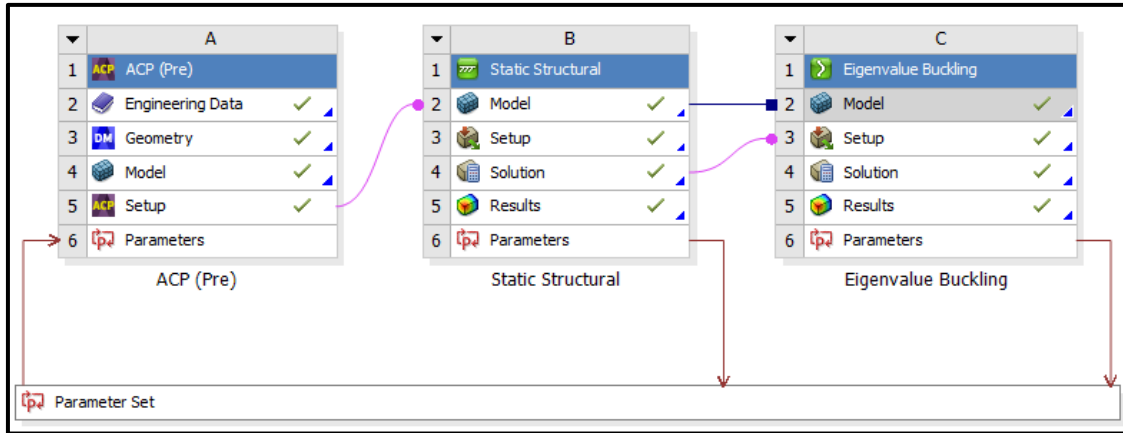
$K_{\Delta}^{NM}$ , Yük rijitlik matrisi,

$v_i^M$ , Burkulma şekli,

$M$  ve  $N$ , sonlu eleman modelinin serbestlik derecesidir ve  $i$  burkulma modu sayısıdır.

Bu Durumda;

$$F_{Burkulma\ Y\ddot{u}k\ddot{u}} = \lambda_i (F_{Uygulanan\ Y\ddot{u}k}) \quad (4.1)$$



Şekil 4.2. Ansys ile Eigenvalue burkulma analizi akış diyagramı

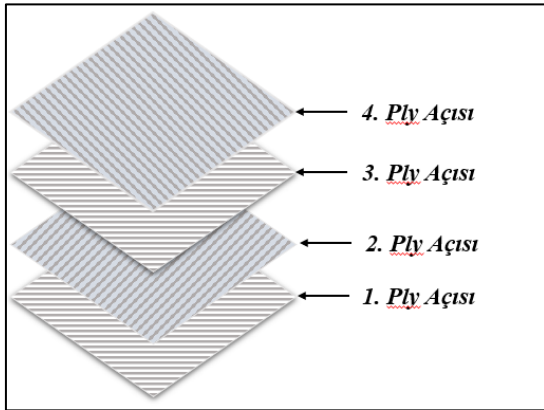
#### 4.5. Plaka Geometrisi ve Katman Yönelimleri

Kompozit malzemeler genellikle çok katmanlı yapılar içerir. Katman sayısı, plakanın toplam kalınlığına ve tasarım gereksinimlerine bağlı olarak tercih edilir. Bu çalışmada, her bir

katmanın kalınlığı  $t=0,25$  mm olarak belirlenmiştir. Kompozit plaka toplamda 4 katmandan oluşmakta ve bu da toplam kalınlığın 1 mm olduğu anlamına gelmektedir.

Her katman farklı bir malzeme içerebilir. Bu malzemelerin mekanik özellikleri, katmanın davranışını etkiler. Genellikle, kompozit malzemeler karbon fiber, cam fiber, aramid fiber gibi güçlendirici lifler ve matris malzemelerinden oluşur. Bu çalışmada, Ansys malzeme kütüphanesinde bulunan Epoxy Carbon UD (230 MPa) prepreg kullanılmıştır.

Her katmanın belirli bir yönelim açısı bulunmaktadır. Bu çalışmanın temel hedeflerinden biri, katmanların yönelim açılarının plaka burkulma değerine olan etkilerini parametrik bir şekilde belirlemektir. Bu yönelim açıları genellikle plakanın ana eksenlerine göre tanımlanmaktadır. Yönelim açıları, katmanın güçlendirici liflerinin ana yük taşıma yönlerine göre nasıl konumlandığı hakkında önemli bilgiler sunar. Bu çalışmada incelenen açı oryantasyonları Çizelge 4.3’ de gösterilmiştir.



Şekil 4.3. Dört katmanlı kompozit plakanın dizinim gösterimi

Çizelge 4.3. Dört katmanlı kompozit plaka açılarının oryantasyon dizinim gösterimi

| 1. Ply Açısı | 2. Ply Açısı | 3. Ply Açısı | 4. Ply Açısı |
|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 0°           | 30°          | 0°           | -30°         |
| 0°           | 45°          | 0°           | -45°         |
| 0°           | 60°          | 0°           | -60°         |
| 0°           | 90°          | 0°           | -90°         |

Çizelge 4.4’ de Epoxy Carbon UD (230 MPa) için malzeme özellikleri verilmiştir. Bu özellikler Ansys sonlu elemanlar yazılım programının malzeme kütüphanesinden elde edilmiştir.

Çizelge 4.4. Epoxy Carbon UD (230 MPa) için malzeme özellikleri

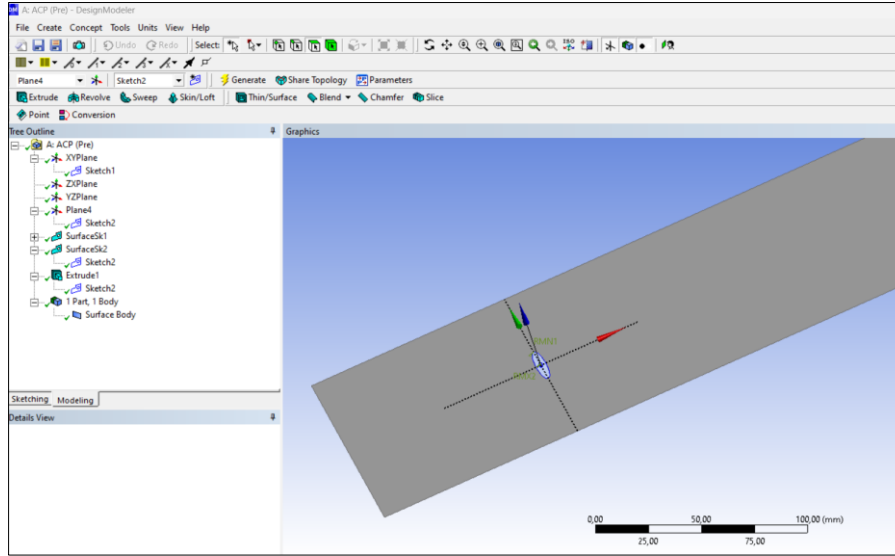
| Yoğunlu<br>k<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | Young<br>Modulu<br>(X)<br>(MPa) | Young<br>Modulu<br>(Y)<br>(MPa) | Young<br>Modulu<br>(Z)<br>(MPa) | Poisson<br>oranı<br>(XY) | Poisson<br>oranı<br>(YZ) | Poisson<br>oranı<br>(ZX) | Kayma<br>Modulu<br>(XY)<br>(MPa) | Kayma<br>Modulu<br>(YZ)<br>(MPa) | Kayma<br>Modulu<br>(ZX)<br>(MPa) |
|--------------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| 1,49                                 | 121<br>000                      | 8 600                           | 8 600                           | 0,27                     | 0,4                      | 0,27                     | 4 700                            | 3 100                            | 4 700                            |

#### 4.6. Geometrinin Oluşturulması

Kompozit plaka geometrisi oluşturulurken bu çalışmanın en önemli kriteri olan deliğin plaka üzerindeki konumunu ve açısını parametrik çalıştırabilmek adına düzenlemeler yapılmıştır. Bu düzenlemeler, deliğin konumuna ve açısına parametre atayabilmek için delik merkezine koordinat düzlemi atanmıştır ve plakanın ana koordinat düzlemine göre ölçülendirmeler parametreye bağlanmıştır.

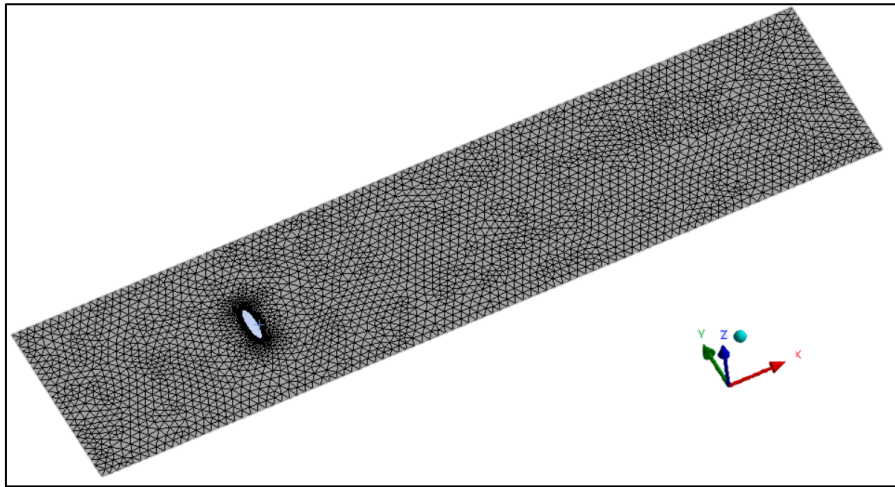
| Details View              |                |
|---------------------------|----------------|
| Details of Plane4         |                |
| Plane                     | Plane4         |
| Sketches                  | 1              |
| Type                      | From Plane     |
| Base Plane                | XYPlane        |
| Transform 1 (RMB)         | Offset X       |
| P FD1, Value 1            | 100 mm         |
| Transform 2 (RMB)         | Offset Y       |
| P FD2, Value 2            | 50 mm          |
| Transform 3 (RMB)         | Rotate about Z |
| P FD3, Value 3            | 0 °            |
| Transform 4 (RMB)         | None           |
| Reverse Normal/Z-Axis?    | No             |
| Flip XY-Axes?             | No             |
| Export Coordinate System? | No             |

Şekil 4.4. Delik merkezine parametrik koordinat düzlemi atanması



Şekil 4.5. Modellenen plaka geometrisi

Geometriye uygun mesh tipi tercih edilerek, 3663 düğüm, 6950 elemandan oluşan triangles tipi mesh uygulanmıştır. Mesh görseli Şekil 4.6' da sunulmuştur.



Şekil 4.6. Mesh görseli

Çizelge 4.5. Mesh parametreleri

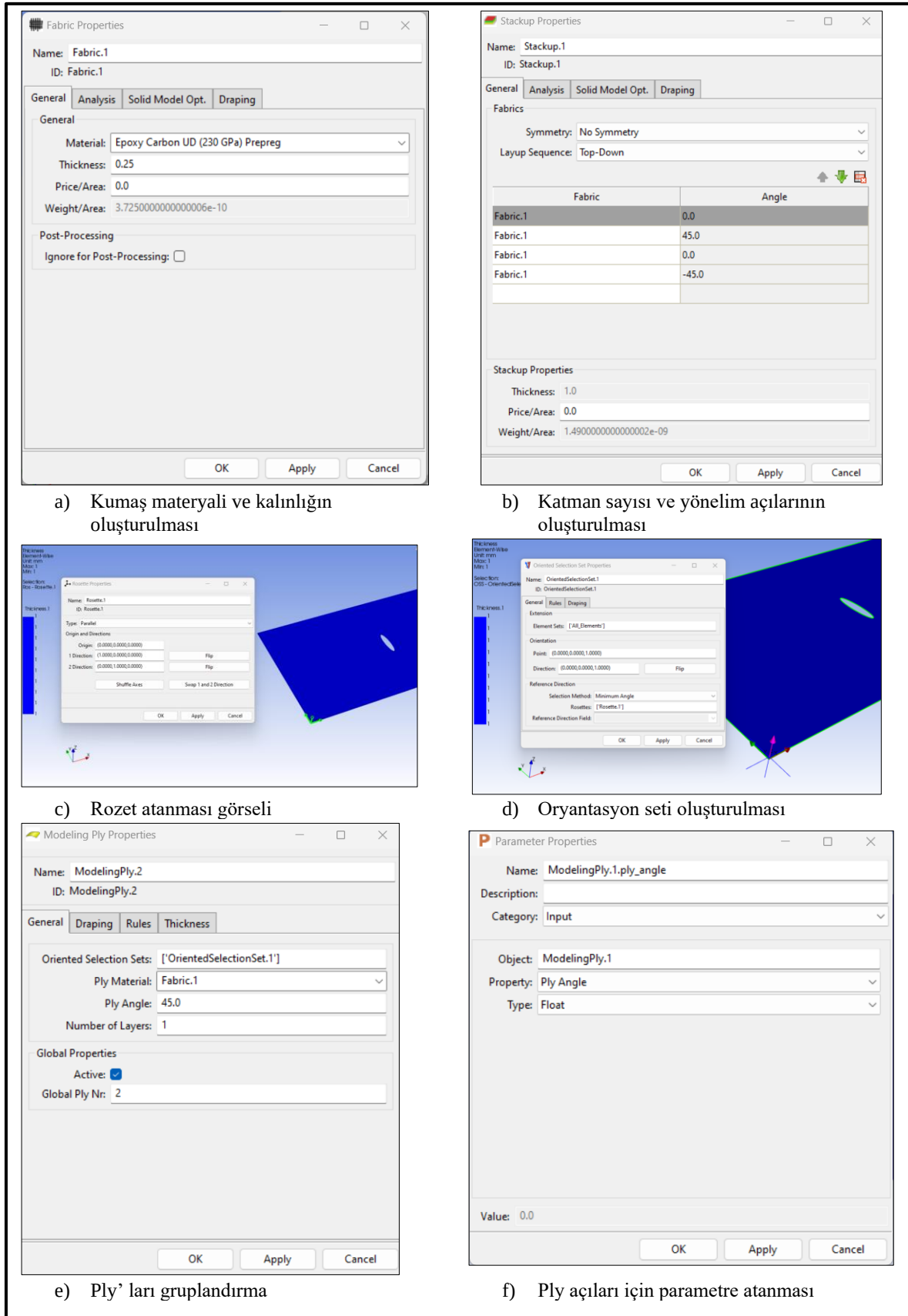
| Mesh Parametreleri  | Element Quality                    | Aspect Ratio                    | Skewness                           | Jacobian Ratio (Gauss Point)      |
|---------------------|------------------------------------|---------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|
| Minimum             | 0,99886                            | 1,0029                          | 1,7898e-005                        | 1                                 |
| Maksimum            | 0,99998                            | 1,9365                          | 0,19883                            | 1                                 |
| Ortalama            | 0,99894                            | 1,1733                          | 4,4929e-002                        | 1                                 |
| ANSYS Önerilen Mesh | $0,85 \leq \text{ortalama} \leq 1$ | $1 \leq \text{ortalama} \leq 5$ | $0 \leq \text{ortalama} \leq 0,25$ | $0,7 \leq \text{ortalama} \leq 1$ |

#### **4.6.1. ACP(pre) modülü ile kompozit malzeme modellenmesi**

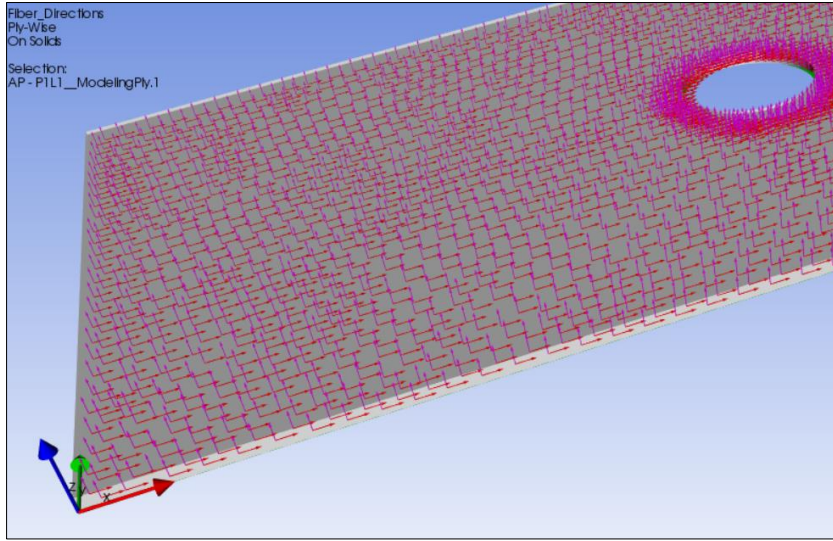
"Ansys ACP" ifadesi, Ansys yazılım paketinin bir parçası olan "Ansys Composite PrepPost" (ACP) modülünü ifade eder. Bu modül, karmaşık kompozit malzemelerin analizi ve tasarımı için özel olarak geliştirilmiştir. ACP, mühendislerin kompozit malzeme yapılarını simüle etmelerini, analiz etmelerini ve optimize etmelerini sağlayan kapsamlı bir çözüm sunar.

"PrepPost" terimi, modülün malzeme ön hazırlık (pre-processing) ve sonuçların görselleştirilmesi (post-processing) aşamalarını içeren geniş bir işlevselliği kapsadığını belirtir. ACP, çeşitli kompozit malzeme yapıları için farklı analiz türlerini destekler, bu da kullanıcılara geniş bir uygulama yelpazesi sunar.

Kompozit malzemenin modellenmesi için Ansys ACP (pre) eleman kullanılmıştır;



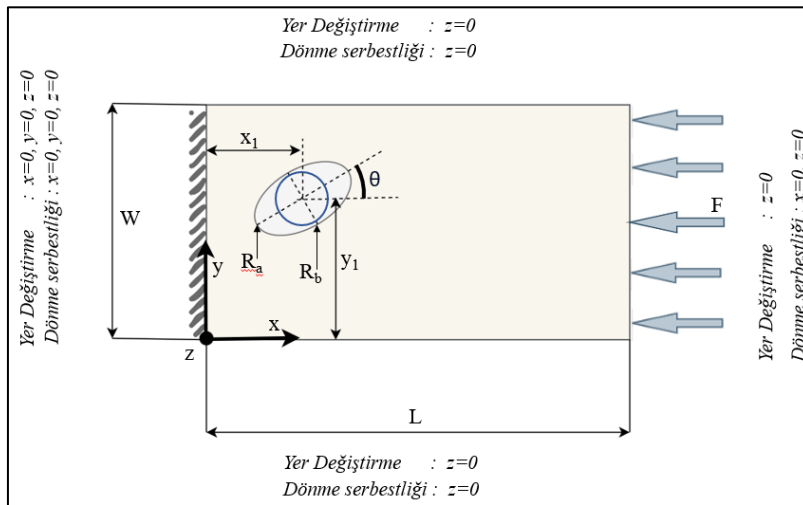
Şekil 4.7. Kompozit malzemenin modellenmesi için Ansys ACP (pre) ekranı



Şekil 4.8. Katman yönelim açısı ve katman sıralama yönü örneği

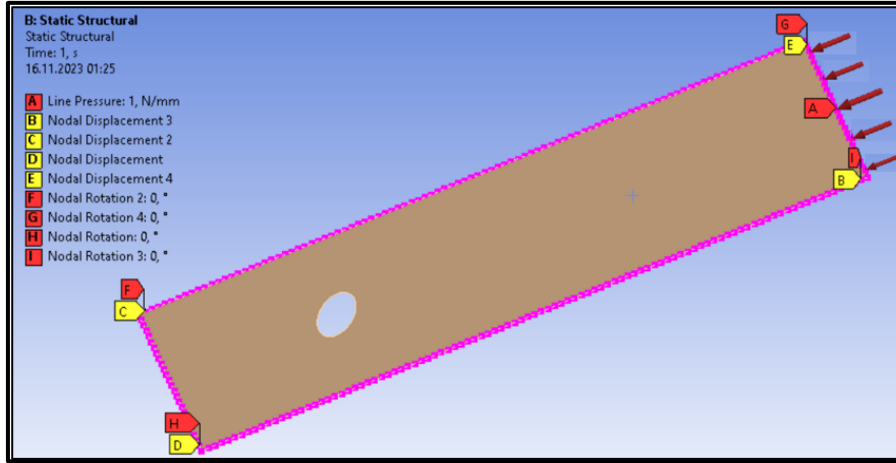
#### 4.7. Yükleme Koşulları ve Sınır Şartları

Eigenvalue değeri için yükleme koşulları ve sınır şartları göz ardı edilemeyecek derecede etkiye sahiptir. Bu yüzden, bu çalışmanın önemli bir unsuru olarak kabul edilmektedir. Sınır koşulları, yapının desteklenme şeklini ve dış kuvvetlere nasıl tepki verdiğini belirler. Bu koşullar, yapı üzerindeki burkulma etkilerini önemli ölçüde etkiler. Bu bölümde, Ansys sonlu elemanlar yazılımında kullanılan özel sınır koşullarının nasıl tanımlandığı ve uygulandığı Şekil 4.9' de detaylı bir şekilde gösterilmiştir. Bu sınır şartları, plakanın belirli bir şekilde yüklenmesi ve çevresel etkileşimlerle olan etkileşimini tanımlamak adına özenle belirlenmiş ve modellenmiştir.



Şekil 4.9. Delikli kompozit plakanın boyutsal tanımlanması ve sınır şartları





Şekil 4.10. Ansys sonlu elemanlar yazılımı sınır şartları

Bu çalışmada, Şekil 4.10' da gösterilen tasarım, sınır koşulları oluştururken 4 adet "Nodal Displacement" (Nodal Deplasman), 4 adet "Nodal Rotation" (Nodal Rotasyon) ve 1 adet "Line Pressure" (Çizgi Basıncı) kullanılmıştır. Tasarım, bir kenarın sabit olduğu ve diğer tüm kenarların basit desteklendiği bir yapı üzerine kurulmuştur. Tek ekseninde  $F=1$  N/mm kuvvet uygulanmıştır. Nodal ve Line Pressure kullanılma sebebi, plakanın "Shell Theory" (Kabuk Teorisi) kapsamında modellenmesidir.

Bu modelleme sürecinde ANSYS sonlu elemanlar yazılımı, Shell181 eleman türünü kullanmaktadır. Shell181 elemanı, ince plakalar ve kabuk yapıların analizi için özel olarak tasarlanmıştır. Bu eleman, lineer ve non-lineer malzeme davranışlarını başarıyla modelleyebilme yeteneğine sahiptir. Bu özellik, malzeme davranışını gerçek dünyadaki durumu daha doğru bir şekilde yansıtabilmek için önemlidir.

Shell181 elemanı, çeşitli sınır şartları ve farklı yük tipleriyle uyumlu bir şekilde kullanılabilir. Bu da çeşitli mühendislik problemlerinin çözümünde esnek bir yaklaşım sunar. Sonuç olarak, bu tasarım ve analiz süreci, çeşitli mühendislik uygulamalarında kullanılabilecek güçlü bir araç sunmaktadır.

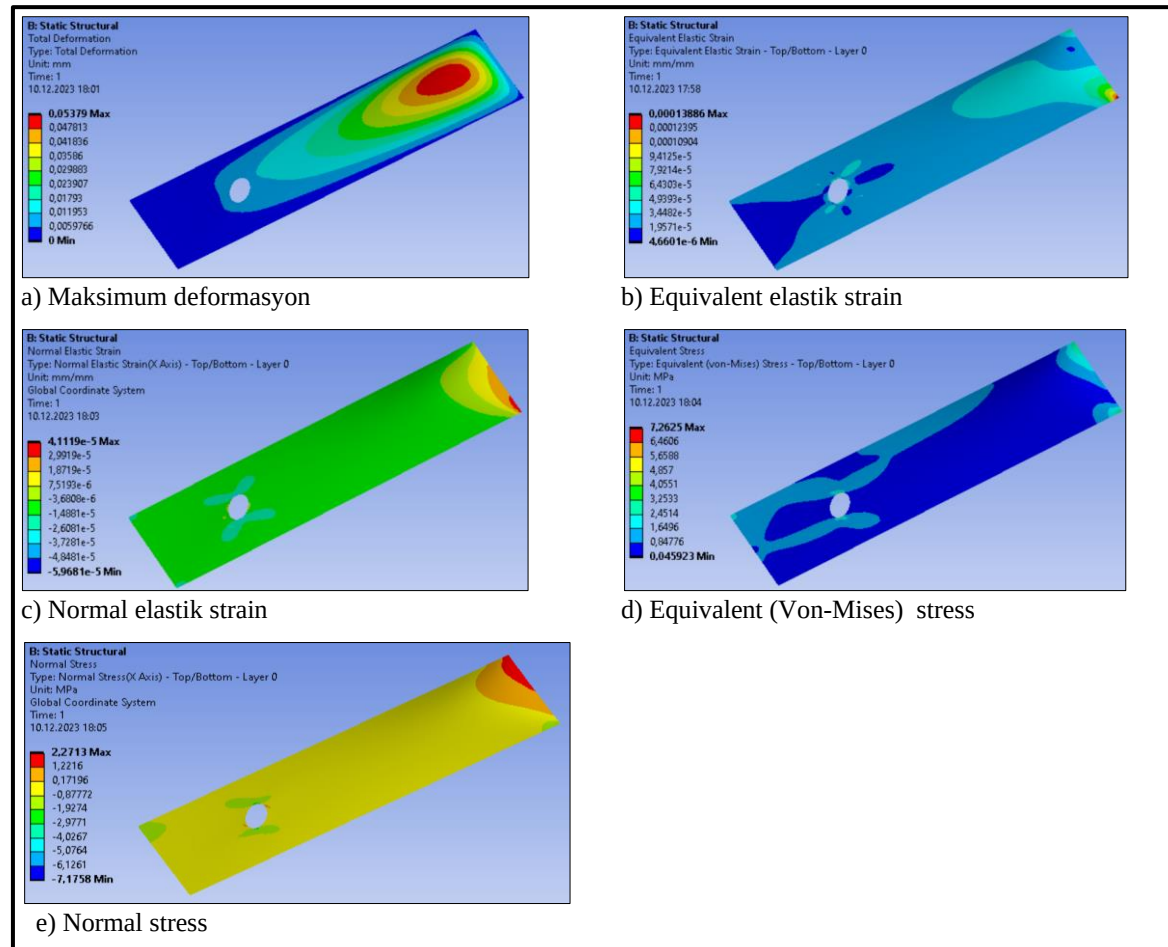
## 5. BULGULAR

### 5.1. Ansys Tasarım Modeli ve Çıktıları

Bu bölümde Eigenvalue yük çarpanı, deformasyon ve gerilme-gerinim için önem teşkil eden çeşitli parametreler belirlenmiştir. Belirlenen bu parametreler doğrultusunda parametrik tasarım yapabilmek için gerekli olan karşılaştırmalar yapılmış, Ansys sonlu elemanlar yazılımı görselleri ve karşılaştırmalı grafikler sunulmuştur.

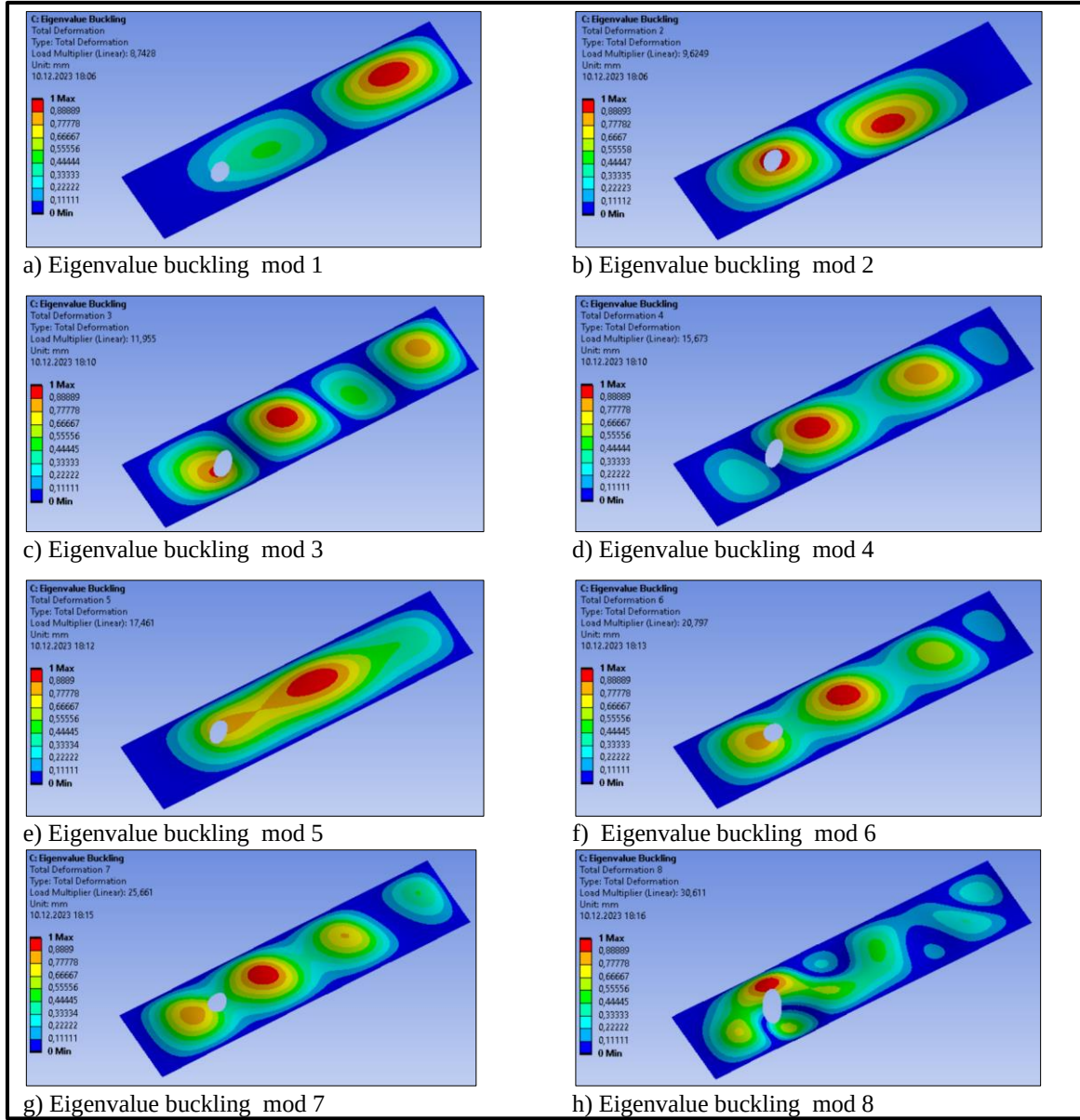
#### 5.1.1. Katman Açılırları ve Delik Konumunun Etkisi

Bu bölümde, üzerinde delik bulunan katmanlı kompozit plakalar için katman yönelimlerine göre çeşitli konumlarda bulunan deliklerin etkisi incelenmiştir. Dört farklı katman yönelim açıları için beş farklı konumdaki deliklerin deformasyon, gerilme - gerinim ve eigenvalue yük çarpanı katsayısı değerleri detaylı bir şekilde sunulmuştur.



Şekil 5.1. Deformasyon, gerilme ve gerinim değerleri ( $[0/30/0/-30- x_1/L=0,25- y_1/W=0,5]$ )

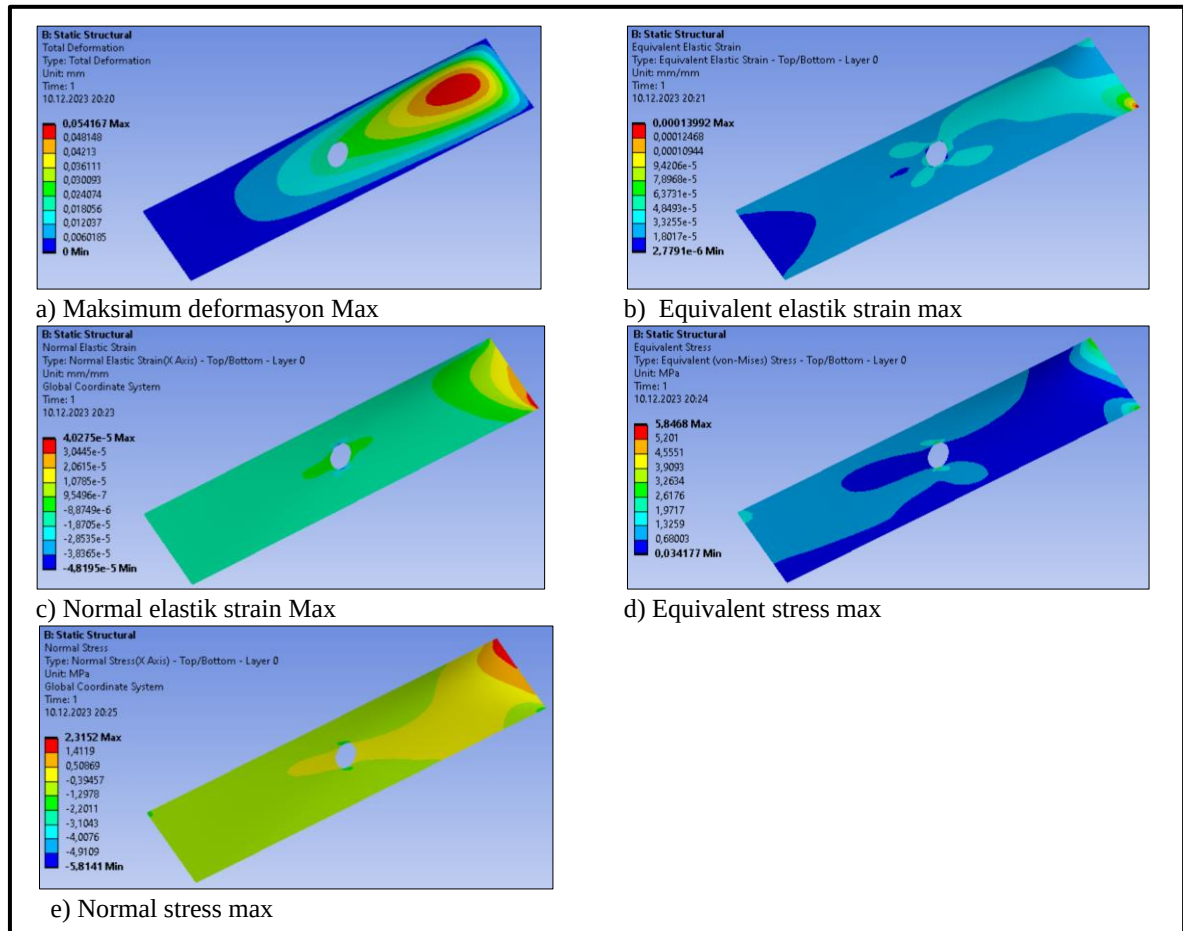
Şekil 5.1' de, delikli kompozit bir plakanın deformasyon, gerilme ve gerinim değerleri gösterilmektedir. (Katman açısı  $[0/30/0/-30]$  -  $R_a/R_b=1,5$  -  $W/L=0,25$  -  $x_1/L=0,25$  -  $y_1/W=0,5$  -  $\theta=45^\circ$ ). Bulgulara göre, delikli plakadaki burkulma sırasında, total maksimum deformasyon değerinin 0,05379 olduğu ve deliğin konumuna göre (delik, kuvvetin uygulandığı koordinat düzleminde x yönünde uzak mesafede bulunduğu zaman) maksimum deformasyonun deliğe uzak, kuvvetin uygulandığı yere yakın bölgede maksimum olduğu gözlemlenmiştir. Equivalent elastik strain maksimum değerinin 0,00013886 mm, minimum değerinin  $4,6601e-6$  mm olduğu ve deliğin konumuna göre uzak, kuvvetin uygulandığı bölgeye yakın yerde yüksek değerlere ulaştığı gözlemlenmiştir. Normal elastik strain için maksimum  $4,119e-5$  mm, minimum  $-5,9681e-5$  mm olduğu ve bu değerlerin delik konumu için Equivalent elastik strain değerleri ile benzer bölgelerde olduğu gözlemlenmiştir. Equivalent (Von-Mises) stress maksimum değerinin 7,2625 MPa, minimum 0,045923 MPa olduğu ve elips uç bölgelerinde (delik " $\theta$ " açısı doğrultusunda) gerilmelerin daha yoğun olduğu görülmüştür. Normal stress maksimum 2,2713 MPa, minimum -7,1758 MPa olduğu ve gerilmelerin yoğunlaştığı bölgelerin Equivalent (Von-Mises) stress ile değerleri ile benzer bölgelerde olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 5.2. Sekiz farklı mod için eigenvalue yük çarpanı değerleri ( $[0/30/0/-30]$  -  $x_1/L=0,25$  -  $y_1/W=0,5$  )

Şekil 5.2' de delikli kompozit bir plakanın eigenvalue yük çarpanı değerleri gösterilmektedir. (Katman açısı  $[0/30/0/-30]$  -  $R_a/R_b=1,5$  -  $W/L=0,25$  -  $x_1/L=0,25$  -  $y_1/W=0,5$  -  $\theta=45^\circ$ ). Bulgulara göre; Eigenvalue yük çarpanı mod 1 için 8,7428 olduğu gözlemlenmiştir. Bu mod şekli, delik bölgesine uzak, yük uygulanan bölgeye yakın kısımda en büyük deformasyonu sergilemektedir. Eigenvalue yük çarpanı mod 2 için 9,6249 olduğu gözlemlenmiştir. Bu mod şekli için, en büyük deformasyonların yükün uygulandığı bölgeden uzak yani delik merkezine yakın olan kısımda sergilemektedir. Eigenvalue yük çarpanı mod 3 için 11,955 olduğu gözlemlenmiştir. Bu mod şekli için, en büyük deformasyonların yükün uygulandığı bölge ile delik merkezine yakın olan kısımda sergilemektedir. Eigenvalue yük çarpanı mod

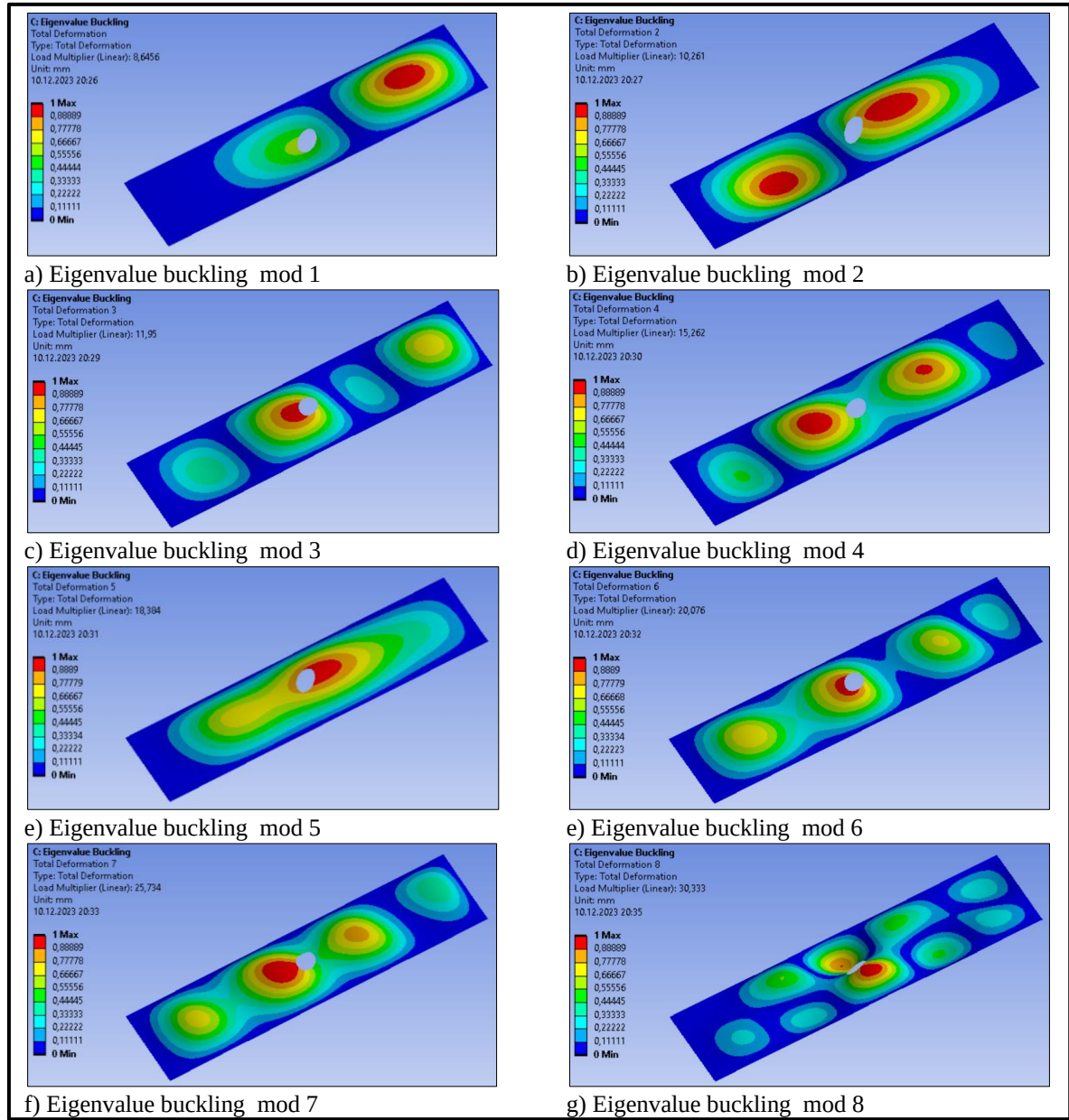
4 için 15,673 olduğu gözlemlenmiştir. Bu mod şekli için, en büyük deformasyonların yükün uygulandığı bölgeden uzak yani delik merkezine yakın olan kısımda sergilemektedir. Eigenvalue yük çarpanı mod 5 için 17,461 olduğu gözlemlenmiştir. Bu mod şekli için, en büyük deformasyonların yükün uygulandığı bölge delik merkezi arasında bulunan kısımda sergilemektedir. Eigenvalue yük çarpanı mod 6 için 20,797 olduğu gözlemlenmiştir. Bu mod şekli için, en büyük deformasyonların yükün uygulandığı bölge delik merkezi arasında bulunan kısımda sergilemektedir. Eigenvalue yük çarpanı mod 7 için 25,661 olduğu gözlemlenmiştir. Bu mod şekli için, en büyük deformasyonların yükün uygulandığı bölgeden uzak yani delik merkezine yakın olan kısımda sergilemektedir. Eigenvalue yük çarpanı mod 8 için 30,611 olduğu gözlemlenmiştir. Bu mod şekli için, en büyük deformasyonların yükün uygulandığı bölgeden uzak yani delik merkezine yakın olan kısımda ve düzensiz şekilde sergilemektedir. Bu durum, yapı üzerindeki deformasyonun ve gerilmenin belirli bir modda yoğunlaştığını ve bu modun belirli bir frekans ve şekil ile karakterize olduğunu göstermektedir.



Şekil 5.3. Deformasyon, gerilme ve gerinim değerleri  
( [0/30/0/-30] -  $x_1/L=0,25$  -  $y_1/W=0,5$  )

Şekil 5.3' de, delikli kompozit bir plakanın deformasyon, gerilme ve gerinim değerleri gösterilmektedir. (Katman açısı  $[0/30/0/-30]$  -  $R_a/R_b=1,5$  -  $W/L=0,25$  -  $x_1/L=0,5$  -  $y_1/W=0,5$  -  $\theta=45^\circ$ ). Bulgulara göre, delikli plakadaki burkulma sırasında, total maksimum deformasyon değerinin 0,054167 olduğu ve deliğin konumuna göre (delik, kuvvetin uygulandığı koordinat düzleminde x yönünde uzak mesafede bulunduğu zaman) maksimum deformasyonun deliğe uzak, kuvvetin uygulandığı yere yakın bölgede maksimum olduğu gözlemlenmiştir. Equivalent elastik strain maksimum değerinin 0,00013992 mm, minimum değerinin  $2,77911e-6$  mm olduğu ve deliğin konumuna göre uzak, kuvvetin uygulandığı bölgeye yakın yerde yüksek değerlere ulaştığı, ayrıca delik konumu yük uygulanan bölgeye yaklaştıkça gerilme alanındaki dağılımda artış meydana geldiği gözlemlenmiştir. Normal elastik strain için maksimum  $4,0275e-5$  mm, minimum  $-4,8195e-5$  mm olduğu ve bu değerlerin delik konumu için Equivalent elastik strain değerlerine kıyasla uygulanan yük yönündeki bölgelerde oluştuğu gözlemlenmiştir. Equivalent (Von-Mises) stress maksimum değerinin 5,8468 MPa, minimum 0,034177 MPa olduğu ve elips uç bölgelerinde (delik " $\theta$ " açısı doğrultusunda) gerilmelerin daha yoğun olduğu görülmüştür. Normal stress maksimum 2,3152 MPa, minimum -5,8141 MPa olduğu ve gerilmelerin yoğunlaştığı bölgelerin Equivalent (Von-Mises) stress bölgelerinin aksine fixlenmiş taraftan uzak yük uygulanan tarafta yoğunlaştığı gözlemlenmiştir.



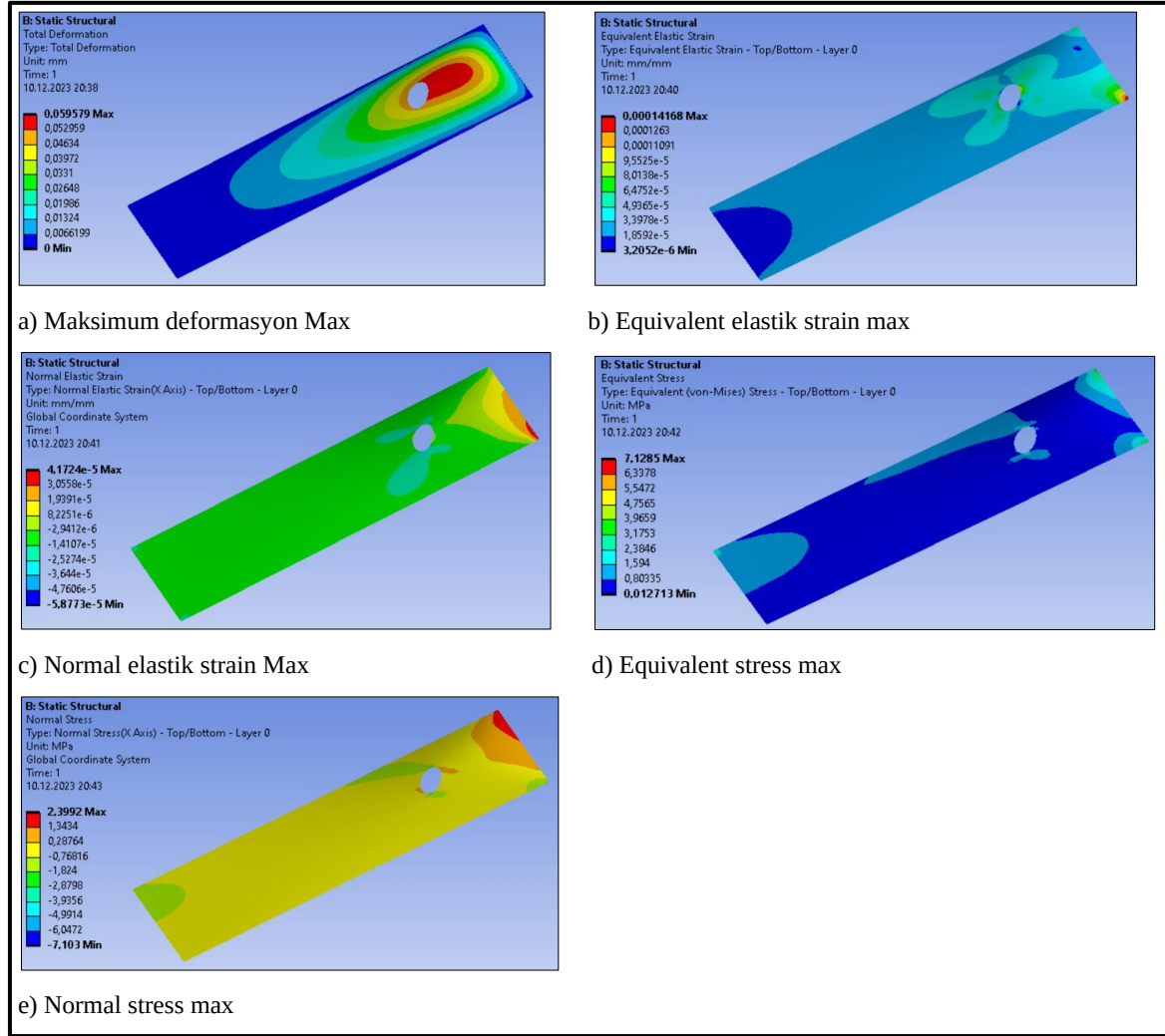


Şekil 5.4. Sekiz farklı mod için eigenvalue yük çarpanı değerleri  
 ([0/30/0/-30] -  $x_1/L=0,5$  -  $y_1/W=0,5$ )

Şekil 5.4' de delikli kompozit bir plakanın eigenvalue yük çarpanı değerleri gösterilmektedir. (Katman açısı [0/30/0/-30] -  $R_a/R_b=1,5$  -  $W/L=0,25$  -  $x_1/L=0,5$  -  $y_1/W=0,5$  -  $\theta=45^\circ$ ). Bulgulara göre; Eigenvalue yük çarpanı mod 1 için 8,6456 olduğu gözlemlenmiştir. Bu mod şekli, delik bölgesine uzak, yük uygulanan bölgeye yakın kısımda en büyük deformasyonu sergilemektedir. Eigenvalue yük çarpanı mod 2 için 10,261 olduğu gözlemlenmiştir. Bu mod şekli için, en büyük deformasyonların yükün uygulandığı bölgeden uzak yani delik merkezine yakın olan kısımda olduğunu, ayrıca deformasyon yönünün Şekil 5.2' ye göre yön değişimini sergilemektedir. Eigenvalue yük çarpanı mod 3 için 11,95 olduğu

gözlemlenmiştir. Bu mod şekli için, en büyük deformasyonların yükün uygulandığı bölge ile delik merkezine yakın olan kısımda sergilemektedir. Eigenvalue yük çarpanı mod 4 için 15,262 olduğu gözlemlenmiştir. Bu mod şekli için, en büyük deformasyonların yükün uygulandığı bölgeden uzak yani delik merkezine yakın olan kısımda sergilemektedir. Eigenvalue yük çarpanı mod 5 için 18,384 olduğu gözlemlenmiştir. Bu mod şekli için, en büyük deformasyonların delik merkezinde yoğunlaştığını sergilemektedir. Eigenvalue yük çarpanı mod 6 için 20,076 olduğu gözlemlenmiştir. Bu mod şekli için, en büyük deformasyonların delik merkezinde yoğunlaştığı sergilemektedir. Eigenvalue yük çarpanı mod 7 için 25,734 olduğu gözlemlenmiştir. Bu mod şekli için, en büyük deformasyonların yükün uygulandığı bölgeden uzak yani delik merkezine yakın olan kısımda sergilemektedir. Eigenvalue yük çarpanı mod 8 için 30,333 olduğu gözlemlenmiştir. Bu mod şekli için, en büyük deformasyonların delik etrafında toplandığı ve düzensiz şekilde sergilemektedir. Bu durum, yapı üzerindeki deformasyonun ve gerilmenin belirli bir modda yoğunlaştığını ve bu modun belirli bir frekans ve şekil ile karakterize olduğunu göstermektedir.

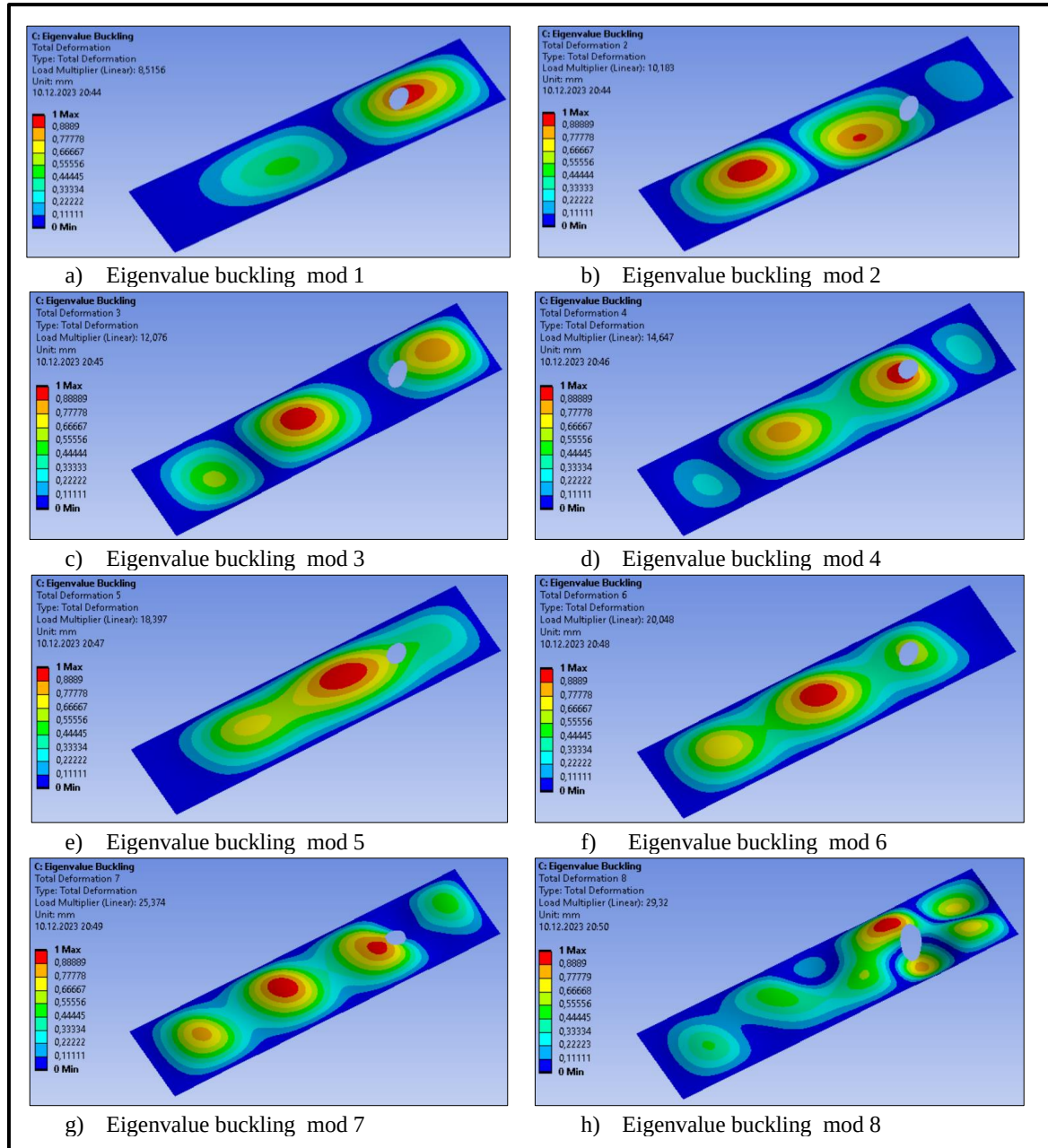




Şekil 5.5. Deformasyon, gerilme ve gerinim değerleri ([0/30/0/-30]-  $x_1/L=0,75$ -  $y_1/W=0,5$ )

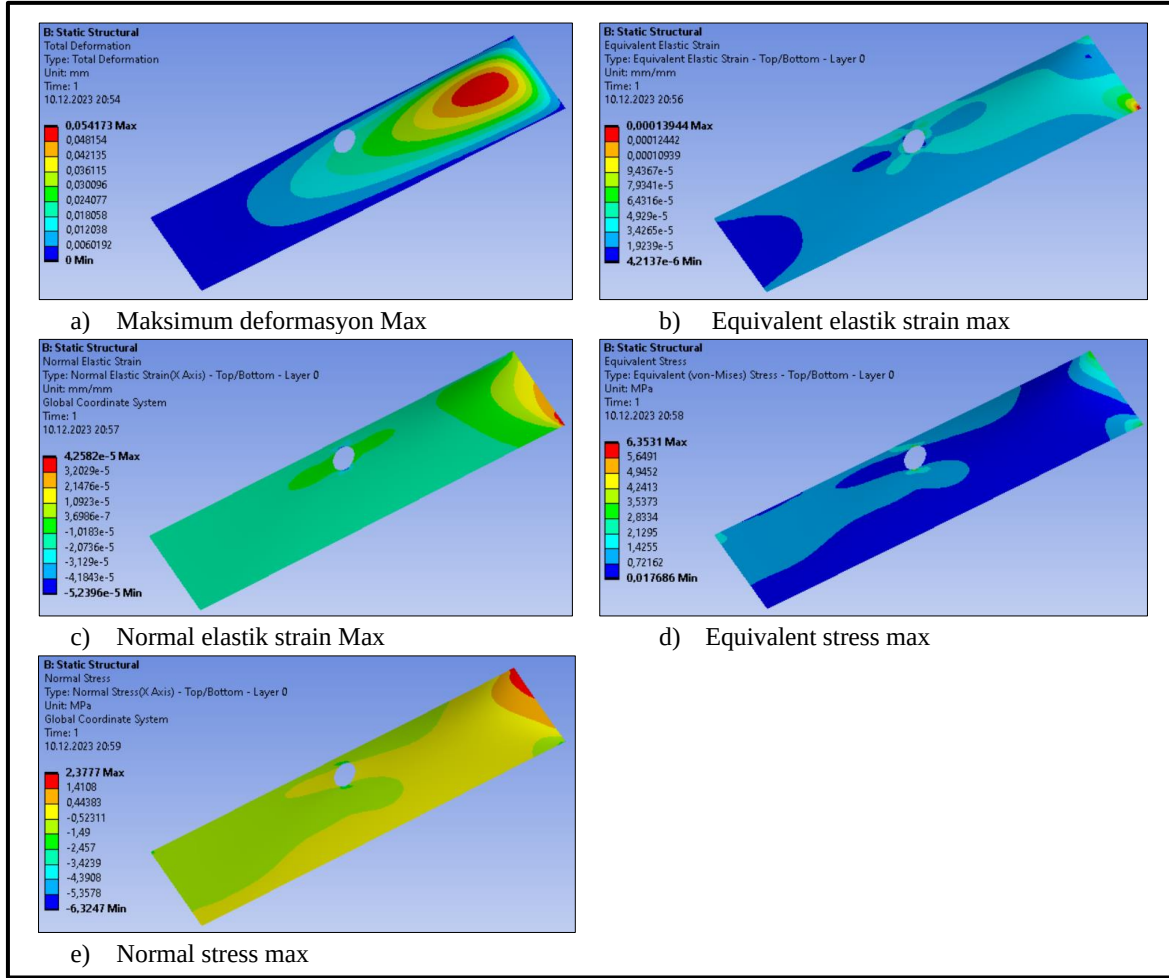
Şekil 5.5' de, delikli kompozit bir plakanın deformasyon, gerilme ve gerinim değerleri gösterilmektedir. (Katman açısı [0/30/0/-30] -  $R_a/R_b=1,5$  -  $W/L=0,25$  -  $x_1/L=0,75$  -  $y_1/W=0,5$  -  $\theta=45^\circ$ ). Bulgulara göre, delikli plakadaki burkulma sırasında, total maksimum deformasyon değerinin 0,059579 mm olduğu ve deliğin konumuna göre (delik, kuvvetin uygulandığı koordinat düzleminde x yönünde yakın mesafede bulunduğu zaman) maksimum deformasyonun deliğe yakın, kuvvetin uygulandığı bölgede maksimum olduğu gözlemlenmiştir. Equivalent elastik strain maksimum değerinin 0,00014168 mm, minimum değerinin  $3,2052e-6$  mm olduğu ve kuvvetin uygulandığı bölgeye yakın yerde yüksek değerlere ulaştığı, ayrıca delik konumu yük uygulanan bölgeye yaklaştıkça gerilme alanındaki dağılımda artış meydana geldiği gözlemlenmiştir. Normal elastik strain için maksimum  $4,1724e-5$  mm, minimum  $-5,8773e-5$  mm olduğu ve bu değerlerin delik konumu için Equivalent elastik strain değerlerine kıyasla uygulanan yük yönündeki bölgelerde

oluştugu gözlemlenmiştir. Equivalent (Von-Mises) stress maksimum değerinin 7,1285 MPa, minimum 0,012713 MPa olduğu ve elips uç bölgelerinde (delik "0" açısı doğrultusunda) gerilmelerin daha yoğun olduğu görülmüştür. Normal stress maksimum 2,3992 MPa, minimum -7,103 MPa olduğu ve gerilmelerin yoğunlaştığı bölgelerin Equivalent (Von-Mises) stress bölgelerinin aksine fixlenmiş taraftan uzak yük uygulanan tarafta yoğunlaştığı gözlemlenmiştir.



Şekil 5.6. Sekiz farklı mod için eigenvalue yük çarpanı değerleri  
( [0/30/0/-30] -  $x_1/L=0,75$  -  $y_1/W=0,5$  )

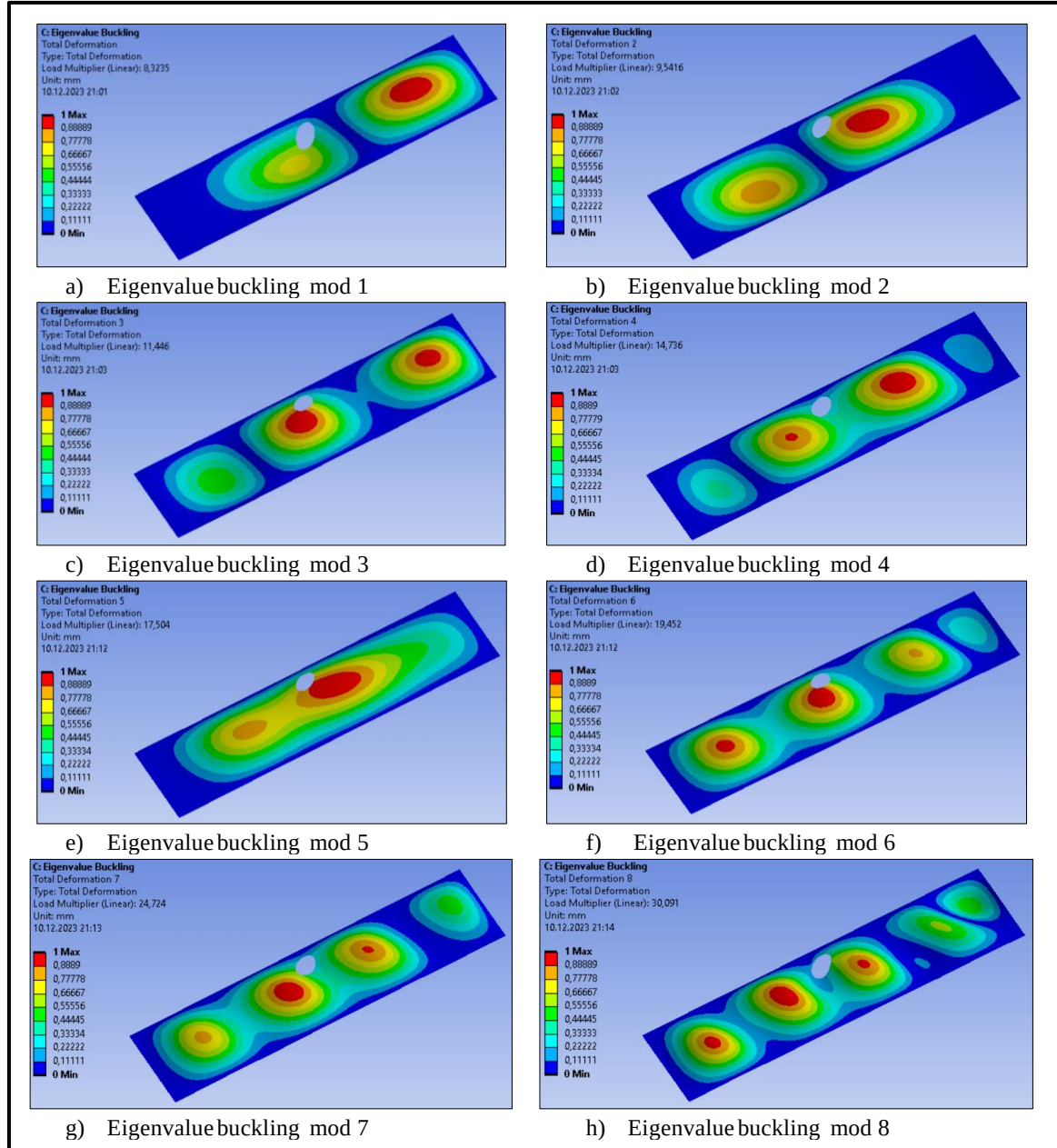
Şekil 5.6' da delikli kompozit bir plakanın eigenvalue yük çarpanı değerleri gösterilmektedir. (Katman açısı  $[0/30/0/-30]$  -  $R_a/R_b=1,5$  -  $W/L=0,25$  -  $x_1/L=0,75$  -  $y_1/W=0,5$  -  $\theta=45^\circ$ ). Bulgulara göre; Eigenvalue yük çarpanı mod 1 için 8,5156 olduğu gözlemlenmiştir. Bu mod şekli, delik merkezinde ve yük uygulanan bölgeye yakın kısımda en büyük deformasyonu sergilemektedir. Eigenvalue yük çarpanı mod 2 için 10,183 olduğu gözlemlenmiştir. Bu mod şekli için, en büyük deformasyonların yükün uygulandığı bölgeden uzak yani fixlenmiş tarafa yakın olan kısımda olduğunu sergilemektedir. Eigenvalue yük çarpanı mod 3 için 12,076 olduğu gözlemlenmiştir. Bu mod şekli için, en büyük deformasyonların yükün uygulandığı bölgeden uzak olan kısımda sergilemektedir. Eigenvalue yük çarpanı mod 4 için 14,647 olduğu gözlemlenmiştir. Bu mod şekli için, en büyük deformasyonların yükün uygulandığı bölgeye yakın yani delik merkezinde olan kısımda sergilemektedir. Eigenvalue yük çarpanı mod 5 için 18,347 olduğu gözlemlenmiştir. Bu mod şekli için, en büyük deformasyonların delik merkezi ile fixlenmiş taraf arasında yoğunlaştığını sergilemektedir. Eigenvalue yük çarpanı mod 6 için 20,048 olduğu gözlemlenmiştir. Bu mod şekli için, en büyük deformasyonların plaka merkezinde yoğunlaştığı sergilemektedir. Eigenvalue yük çarpanı mod 7 için 25,374 olduğu gözlemlenmiştir. Bu mod şekli için, en büyük deformasyonların yükün uygulandığı bölgeden uzak yani plakanın fixlendiği tarafa yakın olan kısımda sergilemektedir. Eigenvalue yük çarpanı mod 8 için 29,32 olduğu gözlemlenmiştir. Bu mod şekli için, en büyük deformasyonların delik etrafında toplandığı ve düzensiz şekilde sergilemektedir. Bu durum, yapı üzerindeki deformasyonun ve gerilmenin belirli bir modda yoğunlaştığını ve bu modun belirli bir frekans ve şekil ile karakterize olduğunu göstermektedir.



Şekil 5.7. Deformasyon, gerilme ve gerinim değerleri  
( [0/30/0/-30] -  $x_1/L=0,5$  -  $y_1/W=0,75$  )

Şekil 5.7' de, delikli kompozit bir plakanın deformasyon, gerilme ve gerinim değerleri gösterilmektedir. (Katman açısı [0/30/0/-30] -  $R_a/R_b=1,5$  -  $W/L=0,25$  -  $x_1/L=0,5$  -  $y_1/W=0,75$  -  $\theta=45^\circ$ ). Bulgulara göre, delikli plakadaki burkulma sırasında, total maksimum deformasyon değerinin 0,05473 mm olduğu ve deliğin konumuna göre (delik, kuvvetin uygulandığı koordinat düzleminde x yönünde uzak mesafede bulunduğu zaman) maksimum deformasyonun deliğe uzak, kuvvetin uygulandığı bölgede maksimum olduğu gözlemlenmiştir. Equivalent elastik strain maksimum değerinin 0,00013944 mm, minimum değerinin  $4,2137e-6$  mm olduğu ve kuvvetin uygulandığı bölgeye yakın yerde yüksek değerlere ulaştığı, ayrıca delik konumu yük uygulanan bölgeye yaklaştıkça gerilme alanındaki dağılımda artış meydana geldiği gözlemlenmiştir. Normal elastik strain için maksimum  $4,2582e-5$  mm, minimum  $-5,2396e-5$  mm olduğu ve bu değerlerin delik konumu için Equivalent elastik strain değerlerine kıyasla uygulanan yük yönüne paralel bölgelerde olduğu gözlemlenmiştir. Equivalent (Von-Mises) stress maksimum değerinin 6,3531 MPa,

minimum 0,017686 MPa olduğu ve elips uç bölgelerinde (delik "0" açısı doğrultusunda) gerilmelerin daha yoğun olduğu görülmüştür. Normal stress maksimum 2,3777 MPa, minimum -6,3247 MPa olduğu ve gerilmelerin yoğunlaştığı bölgelerin Equivalent (Von-Mises) stress bölgelerinin aksine fixlenmiş taraftan uzak yük uygulanan tarafta yoğunlaştığı gözlemlenmiştir.

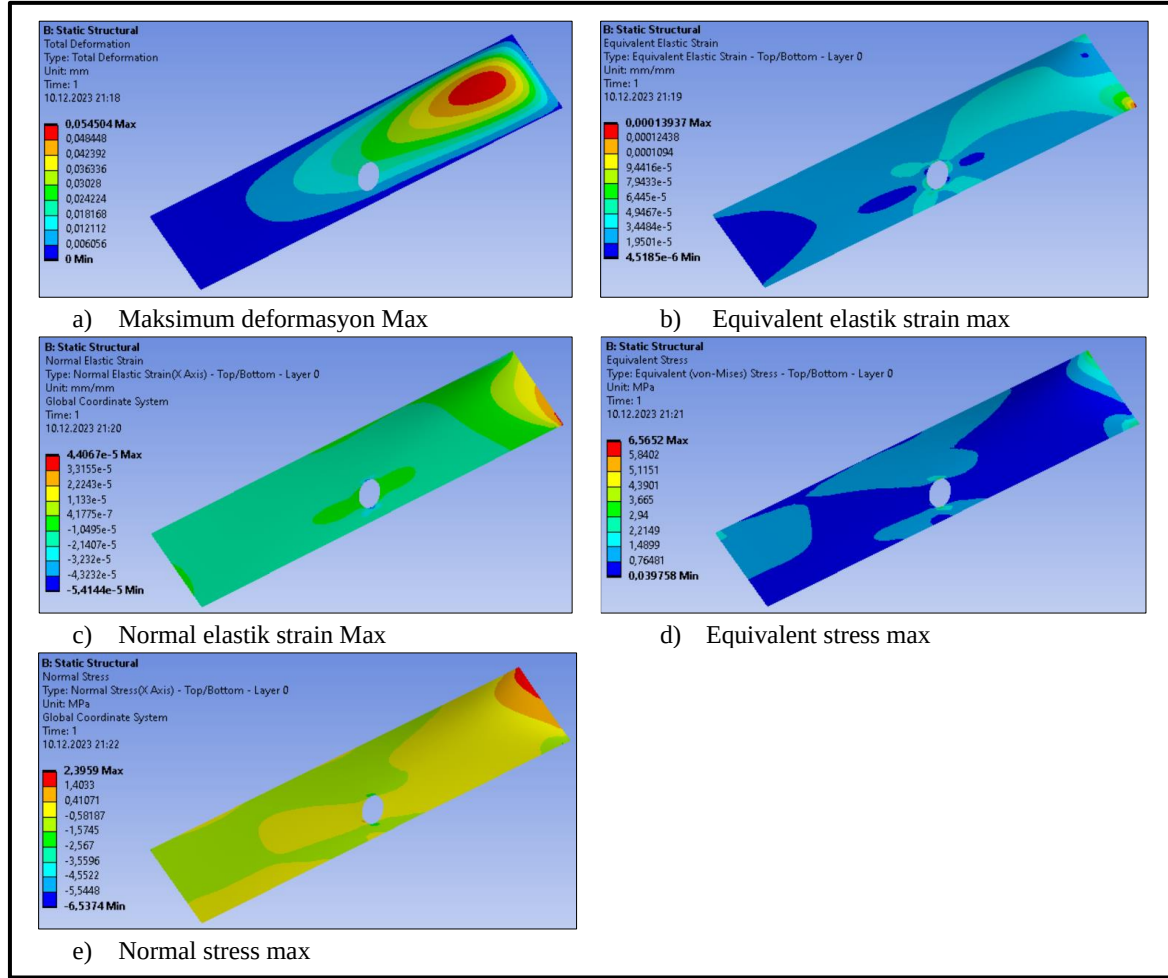


Şekil 5.8. Sekiz farklı mod için eigenvalue yük çarpanı değerleri  
( [0/30/0/-30] -  $x_1/L=0,5$  -  $y_1/W=0,75$  )

Şekil 5.8' de delikli kompozit bir plakanın eigenvalue yük çarpanı değerleri gösterilmektedir. (Katman açısı [0/30/0/-30] -  $R_a/R_b=1,5$  -  $W/L=0,25$  -  $x_1/L=0,5$  -  $y_1/W=0,75$  -  $\theta=45^\circ$ ).

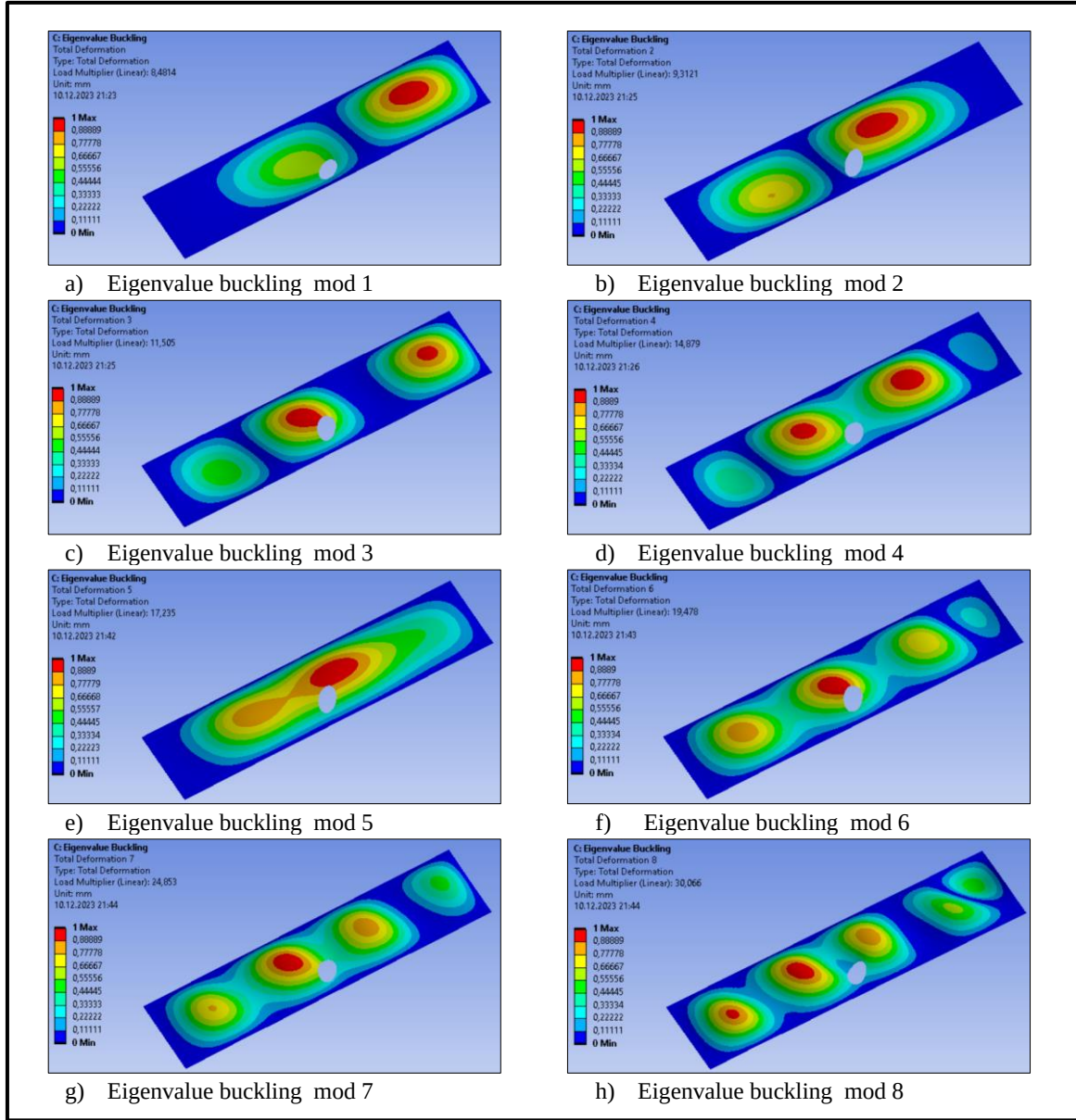


Bulgulara göre; Eigenvalue yük çarpanı mod 1 için 8,3235 olduğu gözlemlenmiştir. Bu mod şekli, delik merkezinden uzak ve yük uygulanan bölgeye yakın kısımda en büyük deformasyonu sergilemektedir. Eigenvalue yük çarpanı mod 2 için 9,5416 olduğu gözlemlenmiştir. Bu mod şekli için, en büyük deformasyonların yükün uygulandığı bölgeye yakın yani fixlenmiş tarafa uzak olan kısımda olduğunu sergilemektedir. Eigenvalue yük çarpanı mod 3 için 11,446 olduğu gözlemlenmiştir. Bu mod şekli için, en büyük deformasyonların delik merkezine yakın kısmında sergilemektedir. Eigenvalue yük çarpanı mod 4 için 14,736 olduğu gözlemlenmiştir. Bu mod şekli için, en büyük deformasyonların yükün uygulandığı bölgeye yakın taraf ile delik merkezi arasında olan kısımda sergilemektedir. Eigenvalue yük çarpanı mod 5 için 17,504 olduğu gözlemlenmiştir. Bu mod şekli için, en büyük deformasyonların delik merkezi ile yük uygulanan taraf arasında yoğunlaştığını sergilemektedir. Eigenvalue yük çarpanı mod 6 için 19,452 olduğu gözlemlenmiştir. Bu mod şekli için, en büyük deformasyonların plaka merkezinde, delik konumuna yakın bölgede yoğunlaştığı sergilemektedir. Eigenvalue yük çarpanı mod 7 için 24,724 olduğu gözlemlenmiştir. Bu mod şekli için, en büyük deformasyonların yükün uygulandığı bölgeden uzak yani plakanın fixlendiği tarafa yakın olan kısımda sergilemektedir. Eigenvalue yük çarpanı mod 8 için 30,091 olduğu gözlemlenmiştir. Bu mod şekli için, en büyük deformasyonların delik etrafında toplandığı ve diğer mod 8' lere kıyasla daha düzenli şekilde sergilemektedir.



Şekil 5.9. Deformasyon, gerilme ve gerinim değerleri ( $[0/30/0/-30]$ - $x_1/L=0,5$  -  $y_1/W=0,25$ )

Şekil 5.9' da, delikli kompozit bir plakanın deformasyon, gerilme ve gerinim değerleri gösterilmektedir. (Katman açısı  $[0/30/0/-30]$  -  $R_a/R_b=1,5$  -  $W/L=0,25$  -  $x_1/L=0,5$  -  $y_1/W=0,25$  -  $\theta=45^\circ$ ). Bulgulara göre, delikli plakadaki burkulma sırasında, total maksimum deformasyon değerinin  $0,054504$  mm olduğu, Equivalent elastik strain maksimum değerinin  $0,00013937$  mm, minimum değerinin  $4,5185e-6$  mm olduğu, Normal elastik strain için maksimum  $4,4067e-5$  mm, minimum  $-5,4144e-5$  mm olduğu, Equivalent (Von-Mises) stress maksimum değerinin  $6,5652$  MPa, minimum  $0,039758$  MPa olduğu, Normal stress maksimum  $2,3959$  MPa, minimum  $-6,5374$  MPa olduğu gözlemlenmiştir. Mevcut yükleme koşulları ve sınır şartlarına göre deliğin Şekil 5.7' ye göre x ekseninde simetrik olarak yer değiştirmesi durumunda deformasyon, gerilme ve gerinimlerin bölgelerinin de aynı şekilde yer değiştirdiği gözlemlenmiştir.

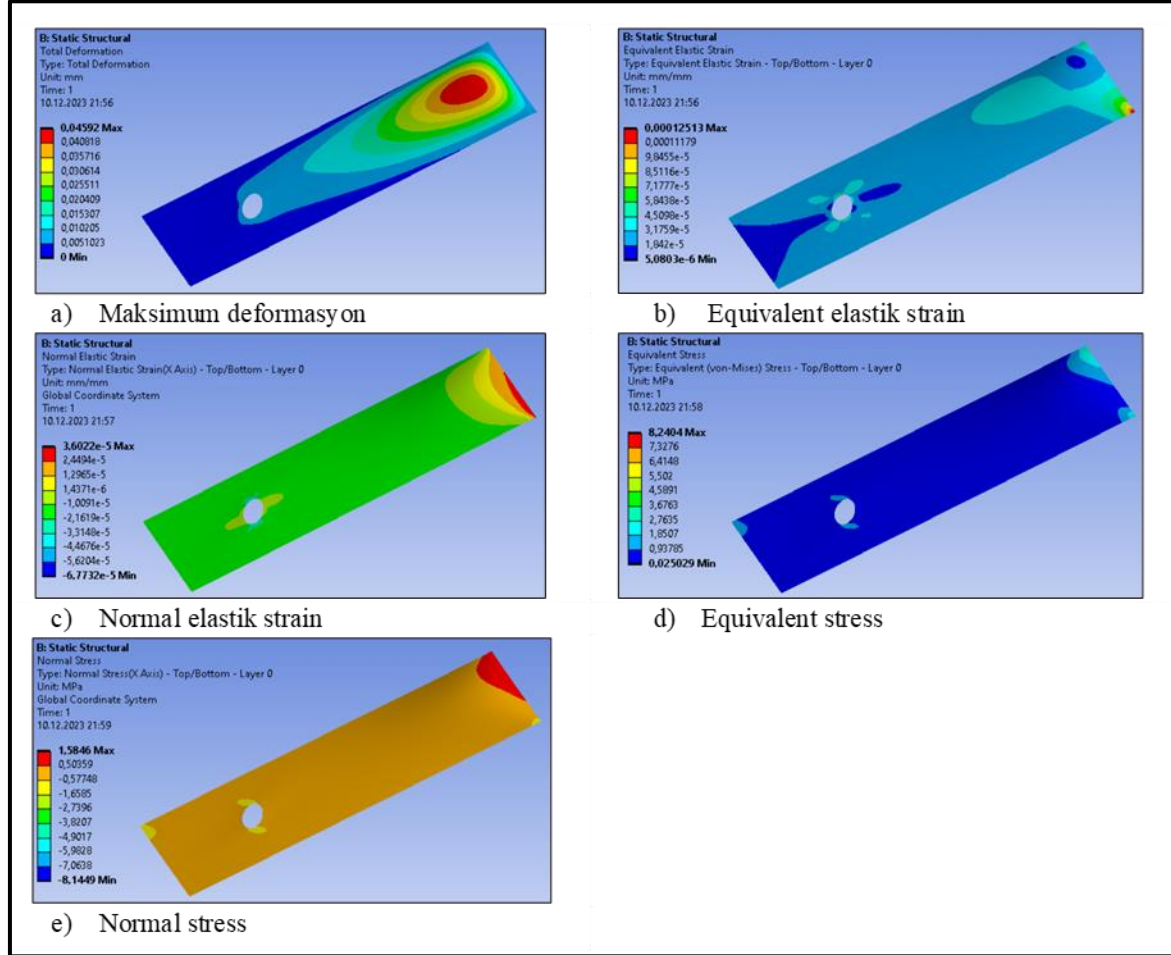


Şekil 5.10. Sekiz farklı mod için eigenvalue yük çarpanı değerleri  
( [0/30/0/-30] -  $x_1/L=0,5$  -  $y_1/W=0,25$  )

Şekil 5.10' da delikli kompozit bir plakanın eigenvalue yük çarpanı değerleri gösterilmektedir. (Katman açısı [0/30/0/-30] -  $R_a/R_b=1,5$  -  $W/L=0,25$  -  $x_1/L=0,5$  -  $y_1/W=0,25$  -  $\theta=45^\circ$ ). Bulgulara göre; Eigenvalue yük çarpanı mod 1 için 8,4814 olduğu, Eigenvalue yük çarpanı mod 2 için 9,3121 olduğu, Eigenvalue yük çarpanı mod 3 için 11,505 olduğu, Eigenvalue yük çarpanı mod 4 için 14,879 olduğu, Eigenvalue yük çarpanı mod 5 için 17,235 olduğu, Eigenvalue yük çarpanı mod 6 için 19,478 olduğu, Eigenvalue yük çarpanı mod 7 için 24,853 olduğu, Eigenvalue yük çarpanı mod 8 için 30,066 olduğu gözlemlenmiştir. Mevcut yükleme koşulları ve sınır şartlarına göre deliğin Şekil 5.8' e göre x ekseninde



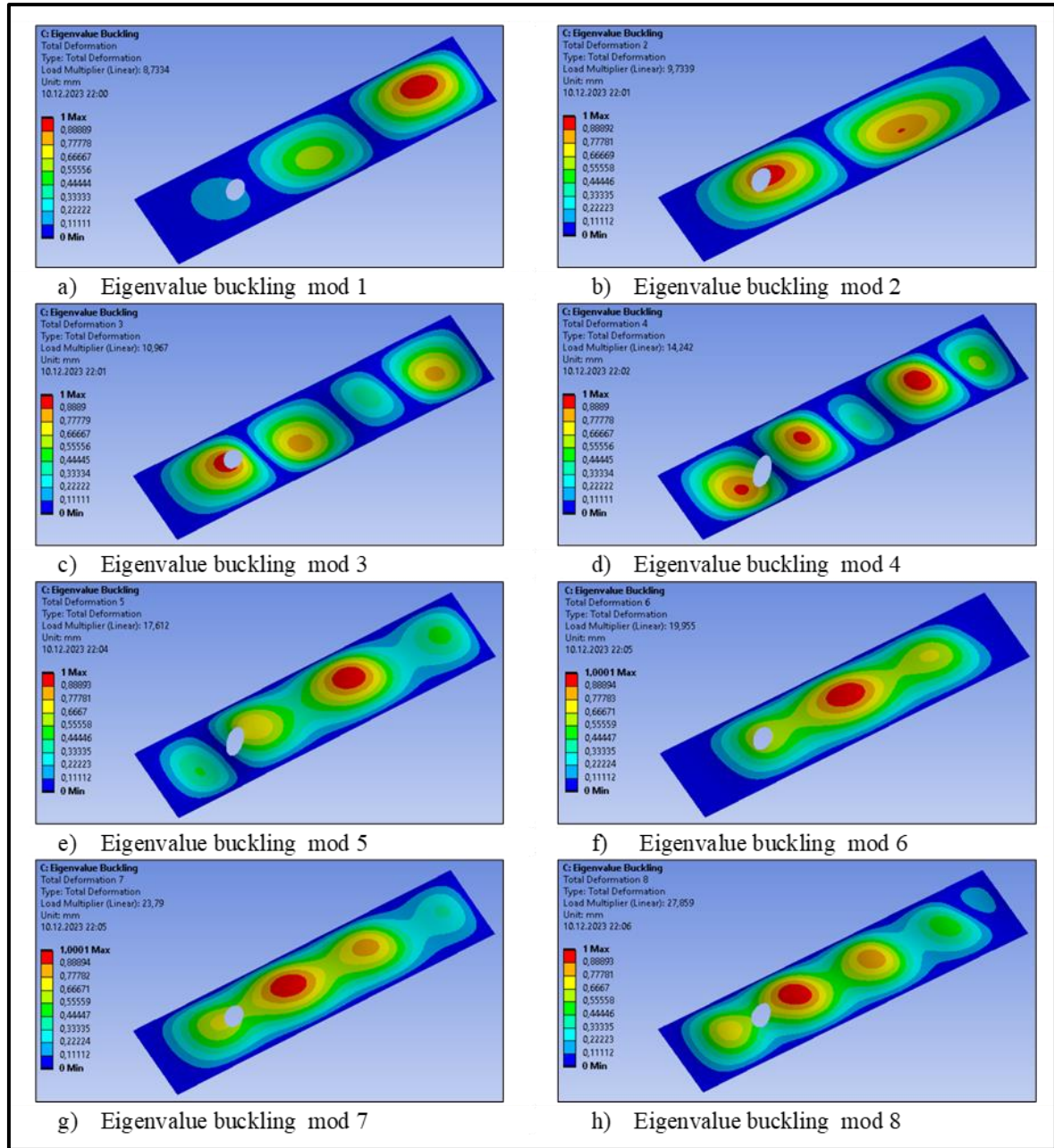
simetrik olarak yer deşiştirmesi durumunda Eigenvalue yk çarpanı mod şekli için neredeyse aynı şekilde olduğu gözlemlenmiştir.



şekil 5.11. Deformasyon, gerilme ve gerinim değerleri  
 ([0/45/0/-45] -  $x_1/L=0,25$  -  $y_1/W=0,5$ )

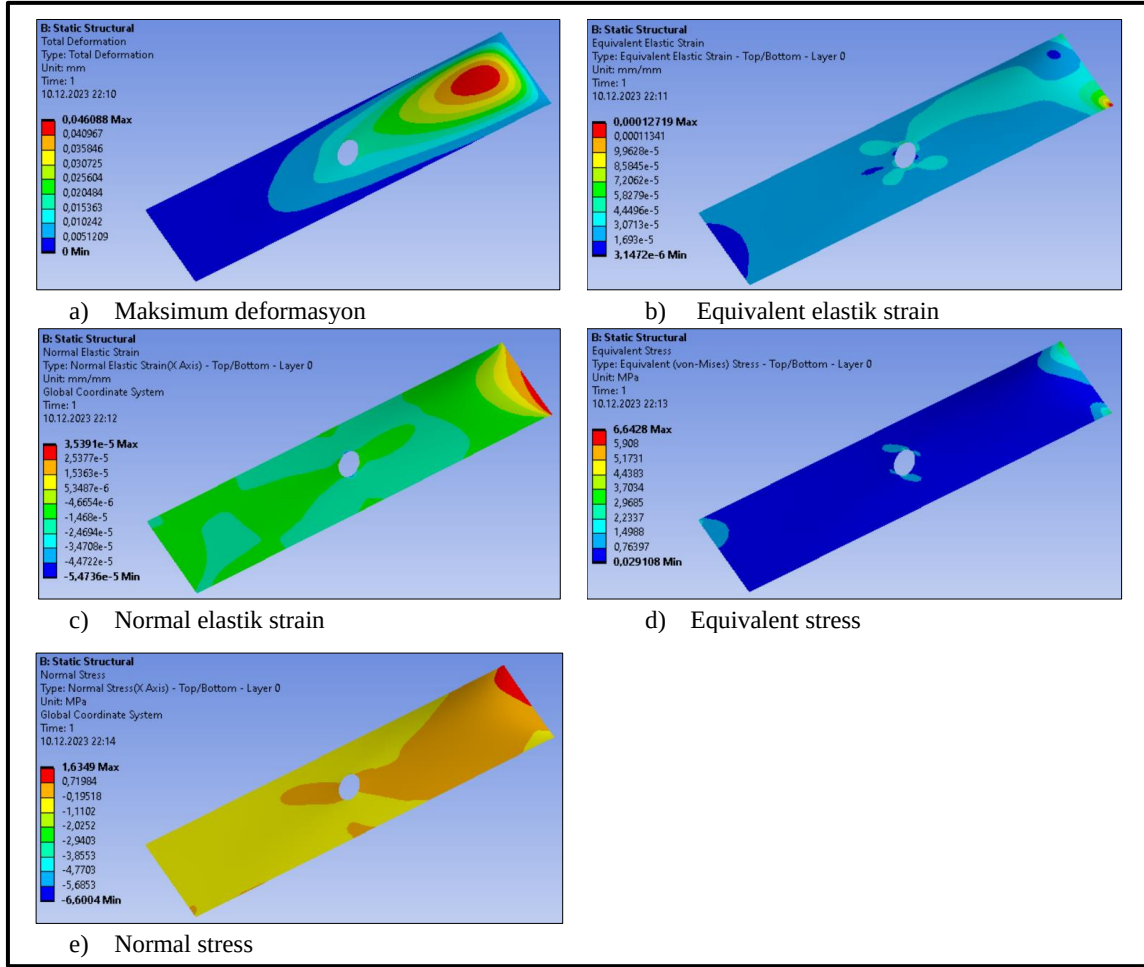
şekil 5.11' de, delikli kompozit bir plakanın deformasyon, gerilme ve gerinim değerleri gösterilmektedir. (Katman açısı [0/45/0/-45] -  $R_a/R_b=1,5$  -  $W/L=0,25$  -  $x_1/L=0,25$  -  $y_1/W=0,5$  -  $\theta=45^\circ$ ). Bulgulara göre, delikli plakadaki burkulma sırasında, total maksimum deformasyon değerinin 0,04592 olduğu ve deliğin konumuna göre (delik, kuvvetin uygulandığı koordinat düzleminde x yönünde uzak mesafede bulunduğu zaman) maksimum deformasyonun deliğe uzak, kuvvetin uygulandığı yere yakın bölgede maksimum olduğu gözlemlenmiştir. Equivalent elastik strain maksimum değerinin 0,00012513 mm, minimum değerinin 5,0803e-6 mm olduğu ve deliğin konumuna göre uzak, kuvvetin uygulandığı bölgeye yakın yerde yüksek değerlere ulaştığı gözlemlenmiştir. Normal elastik strain için maksimum 3,6022e-5 mm, minimum -6,7732e-5 mm olduğu ve bu değerlerin delik konumu

için Equivalent elastik strain değerleri ile benzer bölgelerde oluştuğu gözlemlenmiştir. Equivalent (Von-Mises) stress maksimum değerinin 8,2404 MPa, minimum 0,025029 MPa olduğu ve elips uç bölgelerinde (delik " $\theta$ " açısı doğrultusunda) gerilmelerin daha yoğun olduğu görülmüştür. Normal stress maksimum 1,5846 MPa, minimum -8,1449 MPa olduğu ve gerilmelerin yoğunlaştığı bölgelerin Equivalent (Von-Mises) stress ile değerleri ile benzer bölgelerde oluştuğu gözlemlenmiştir.



Şekil 5.12. Sekiz farklı mod için eigenvalue yük çarpanı değerleri  
( [0/45/0/-45] -  $x_1/L=0,25$  -  $y_1/W=0,5$  )

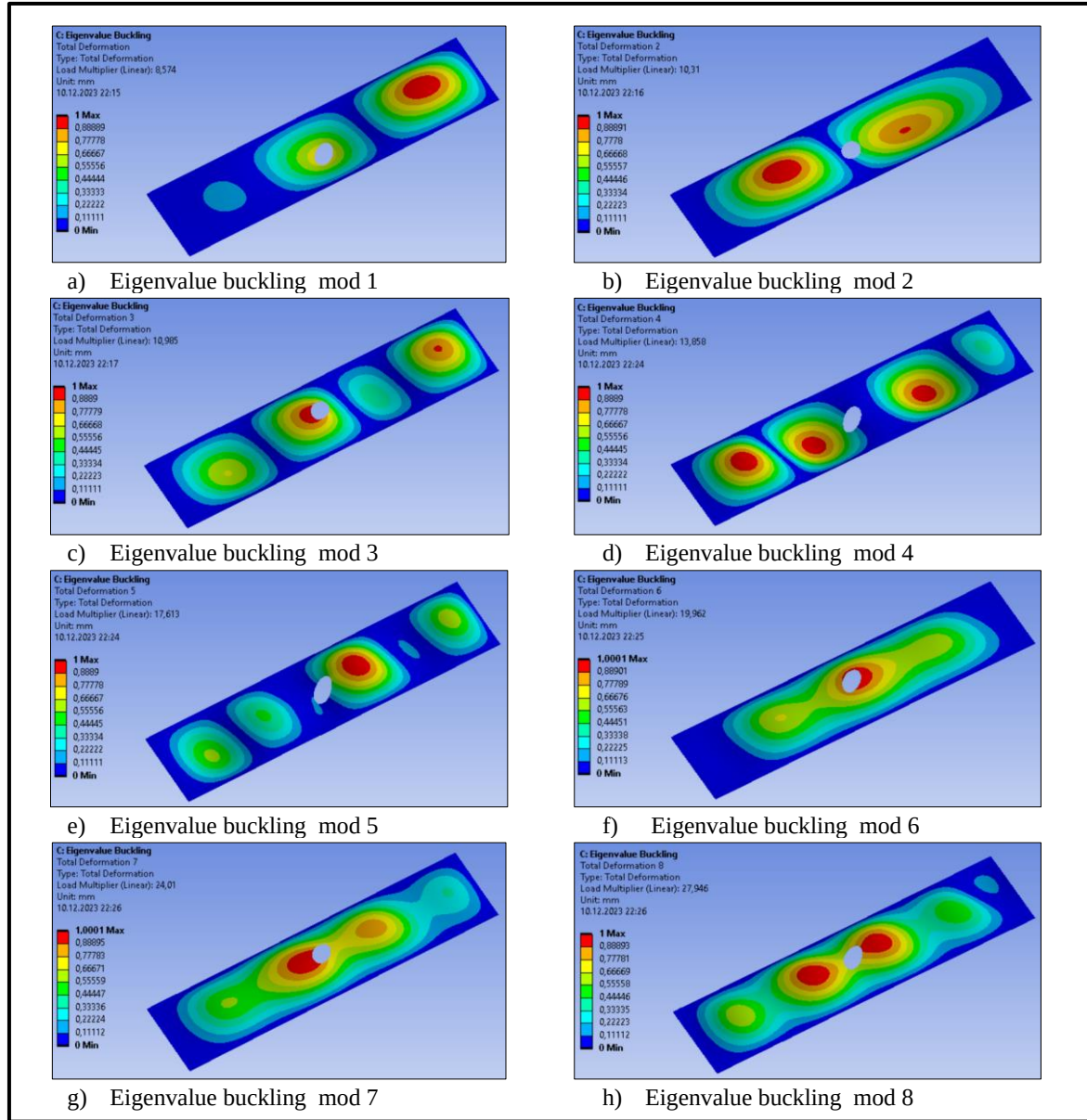
Şekil 5.12' de delikli kompozit bir plakanın eigenvalue yük çarpanı değerleri gösterilmektedir. (Katman açısı  $[0/45/0/-45]$  -  $R_a/R_b=1,5$  -  $W/L=0,25$  -  $x_1/L=0,25$  -  $y_1/W=0,5$  -  $\theta=45^\circ$ ). Bulgulara göre; Eigenvalue yük çarpanı mod 1 için 8,7334 olduğu gözlemlenmiştir. Bu mod şekli, delik bölgesine uzak, yük uygulanan bölgeye yakın kısımda en büyük deformasyonu sergilemektedir. Eigenvalue yük çarpanı mod 2 için 9,7339 olduğu gözlemlenmiştir. Bu mod şekli için, en büyük deformasyonların yükün uygulandığı bölgeden uzak yani delik merkezine yakın olan kısımda sergilemektedir. Eigenvalue yük çarpanı mod 3 için 10,967 olduğu gözlemlenmiştir. Bu mod şekli için, en büyük deformasyonların yükün uygulandığı bölgeden uzak merkezine yakın olan kısımda sergilemektedir. Eigenvalue yük çarpanı mod 4 için 14,242 olduğu gözlemlenmiştir. Bu mod şekli için, en büyük deformasyonların yükün uygulandığı bölgeden uzak yani delik merkezine yakın olan kısımda sergilemektedir. Eigenvalue yük çarpanı mod 5 için 17,612 olduğu gözlemlenmiştir. Bu mod şekli için, en büyük deformasyonların yükün uygulandığı bölge delik merkezi arasında bulunan kısımda sergilemektedir. Eigenvalue yük çarpanı mod 6 için 19,955 olduğu gözlemlenmiştir. Bu mod şekli için, en büyük deformasyonların yükün uygulandığı bölge ile delik merkezi arasında bulunan kısımda sergilemektedir. Eigenvalue yük çarpanı mod 7 için 23,79 olduğu gözlemlenmiştir. Bu mod şekli için, en büyük deformasyonların yükün uygulandığı bölgeden uzak yani delik merkezine yakın olan kısımda sergilemektedir. Eigenvalue yük çarpanı mod 8 için 27,859 olduğu gözlemlenmiştir. Bu mod şekli için, en büyük deformasyonların yükün uygulandığı bölgeden uzak yani delik merkezine yakın olan kısımda ve düzenli şekilde sergilemektedir.



Şekil 5.13. Deformasyon, gerilme ve gerinim değerleri  
( [0/45/0/-45] -  $x_1/L=0,5$  -  $y_1/W=0,5$  )

Şekil 5.13' de, delikli kompozit bir plakanın deformasyon, gerilme ve gerinim değerleri gösterilmektedir. (Katman açısı [0/45/0/-45] -  $R_a/R_b=1,5$  -  $W/L=0,25$  -  $x_1/L=0,5$  -  $y_1/W=0,5$  -  $\theta=45^\circ$ ). Bulgulara göre, delikli plakadaki burkulma sırasında, total maksimum deformasyon değerinin 0,046088 olduğu ve deliğin konumuna göre (delik, kuvvetin uygulandığı koordinat düzleminde x yönünde uzak mesafede bulunduğu zaman) maksimum deformasyonun deliğe uzak, kuvvetin uygulandığı yere yakın bölgede maksimum olduğu gözlemlenmiştir. Equivalent elastik strain maksimum değerinin 0,00012719 mm, minimum değerinin 2,1472e-6 mm olduğu ve deliğin konumuna göre uzak, kuvvetin uygulandığı bölgeye yakın yerde yüksek değerlere ulaştığı, ayrıca delik konumu yük uygulanan bölgeye yaklaştıkça gerilme alanındaki dağılımda artış meydana geldiği gözlemlenmiştir. Normal elastik strain için maksimum 3,5391e-5 mm, minimum -5,4736e-5 mm olduğu ve bu değerlerin delik konumu için Equivalent elastik strain değerlerine kıyasla plaka kenarlarına (x yönünde) bölgelerde olduğu gözlemlenmiştir. Equivalent (Von-Mises) stress

maksimum değerinin 6,6428 MPa, minimum 0,029108 MPa olduğu ve elips uç bölgelerinde (delik "0" açısı doğrultusunda) gerilmelerin daha yoğun olduğu görülmüştür. Normal stress maksimum 1,6349 MPa, minimum -6,6004 MPa olduğu ve gerilmelerin yoğunlaştığı bölgelerin Equivalent (Von-Mises) stress bölgelerinin aksine fixlenmiş taraftan uzak, yük uygulanan tarafta yoğunlaştığı gözlemlenmiştir.

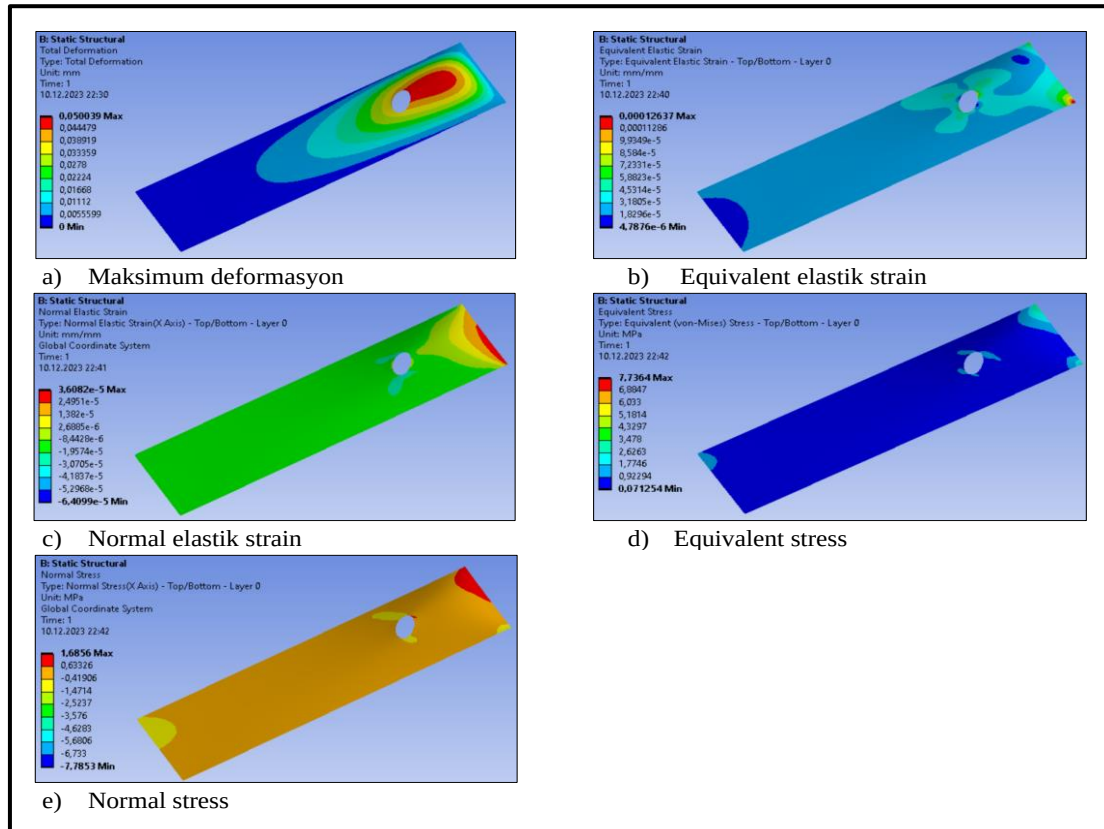


Şekil 5.14. Sekiz farklı mod için eigenvalue yük çarpanı değerleri  
( [0/45/0/-45] -  $x_1/L=0,5$  -  $y_1/W=0,5$  )

Şekil 5.14' de delikli kompozit bir plakanın eigenvalue yük çarpanı değerleri gösterilmektedir. (Katman açısı [0/45/0/-45] -  $R_a/R_b=1,5$  -  $W/L=0,25$  -  $x_1/L=0,5$  -  $y_1/W=0,5$  -  $\theta=45^\circ$ ). Bulgulara göre; Eigenvalue yük çarpanı mod 1 için 8,574 olduğu gözlemlenmiştir.

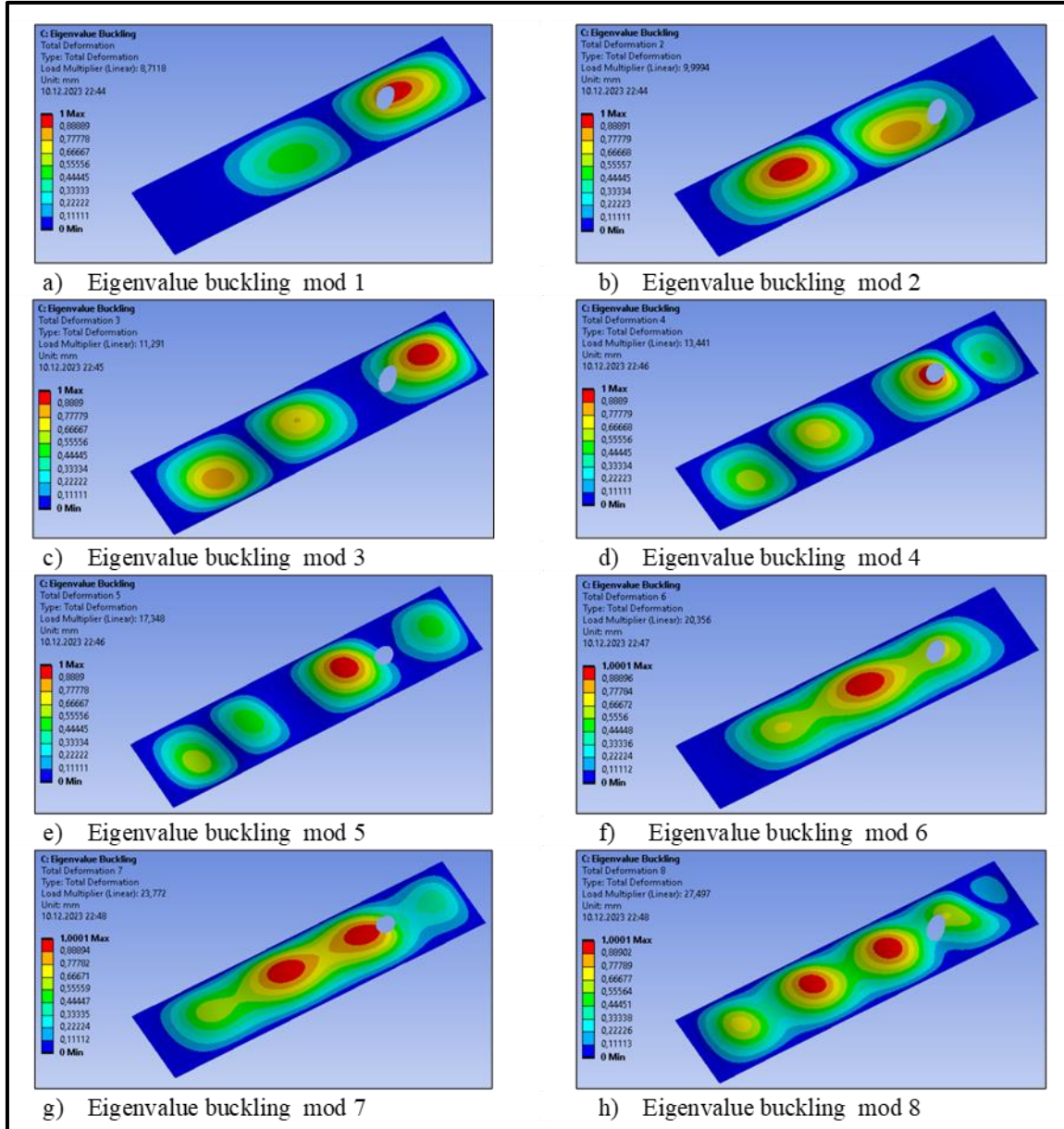


Bu mod şekli, delik bölgesine uzak, yük uygulanan bölgeye yakın kısımda en büyük deformasyonu sergilemektedir. Eigenvalue yük çarpanı mod 2 için 10,31 olduğu gözlemlenmiştir. Bu mod şekli için, en büyük deformasyonların fixlenmiş taraf ile delik merkezi arasındaki kısımda olduğunu sergilemektedir. Eigenvalue yük çarpanı mod 3 için 10,985 olduğu gözlemlenmiştir. Bu mod şekli için, en büyük deformasyonların delik merkezinde yoğunlaştığını sergilemektedir. Eigenvalue yük çarpanı mod 4 için 13,858 olduğu gözlemlenmiştir. Bu mod şekli için, en büyük deformasyonların yükün uygulandığı bölgeden uzak yani delik merkezine yakın ve fixlenmiş kısımda sergilemektedir. Eigenvalue yük çarpanı mod 5 için 17,613 olduğu gözlemlenmiştir. Bu mod şekli için, en büyük deformasyonların delik konumuna yakın yerde yoğunlaştığını sergilemektedir. Eigenvalue yük çarpanı mod 6 için 19,962 olduğu gözlemlenmiştir. Bu mod şekli için, en büyük deformasyonların delik merkezinde yoğunlaştığını sergilemektedir. Eigenvalue yük çarpanı mod 7 için 24,01 olduğu gözlemlenmiştir. Bu mod şekli için, en büyük deformasyonların fixlenmiş taraf ile delik arasında delik konumuna daha yakın olan kısımda sergilemektedir. Eigenvalue yük çarpanı mod 8 için 27,946 olduğu gözlemlenmiştir. Bu mod şekli için, en büyük deformasyonların delik etrafında toplandığı ve düzenli şekilde sergilemektedir.



Şekil 5.15. Deformasyon, gerilme ve gerinim değerleri  
( [0/45/0/-45] -  $x_1/L=0,75$  -  $y_1/W=0,5$  )

Şekil 5.15' de, delikli kompozit bir plakanın deformasyon, gerilme ve gerinim değerleri gösterilmektedir. (Katman açısı  $[0/45/0/-45]$  -  $R_a/R_b=1,5$  -  $W/L=0,25$  -  $x_1/L=0,75$  -  $y_1/W=0,5$  -  $\theta=45^\circ$ ). Bulgulara göre, delikli plakadaki burkulma sırasında, total maksimum deformasyon değerinin  $0,050039$  mm olduğu ve deliğin konumuna göre (delik, kuvvetin uygulandığı koordinat düzleminde  $x$  yönünde yakın mesafede bulunduğu zaman) maksimum deformasyonun deliğe yakın, kuvvetin uygulandığı bölgede maksimum olduğu gözlemlenmiştir. Equivalent elastik strain maksimum değerinin  $0,00012637$  mm, minimum değerinin  $4,7876e-6$  mm olduğu ve kuvvetin uygulandığı bölgeye yakın yerde yüksek değerlere ulaştığı, ayrıca delik konumu yük uygulanan bölgeye yaklaştıkça gerilme alanındaki dağılımda artış meydana geldiği gözlemlenmiştir. Normal elastik strain için maksimum  $3,6082e-5$  mm, minimum  $-6,4099e-5$  mm olduğu ve bu değerlerin delik konumu için Equivalent elastik strain değerlerine kıyasla daha düzenli şekilde olduğu gözlemlenmiştir. Equivalent (Von-Mises) stress maksimum değerinin  $7,7364$  MPa, minimum  $0,071254$  MPa olduğu ve elips uç bölgelerinde (delik " $\theta$ " açısı doğrultusunda) gerilmelerin daha yoğun olduğu görülmüştür. Normal stress maksimum  $1,6856$  MPa, minimum  $-7,7853$  MPa olduğu ve gerilmelerin yoğunlaştığı bölgelerin düzenli olduğu gözlemlenmiştir.

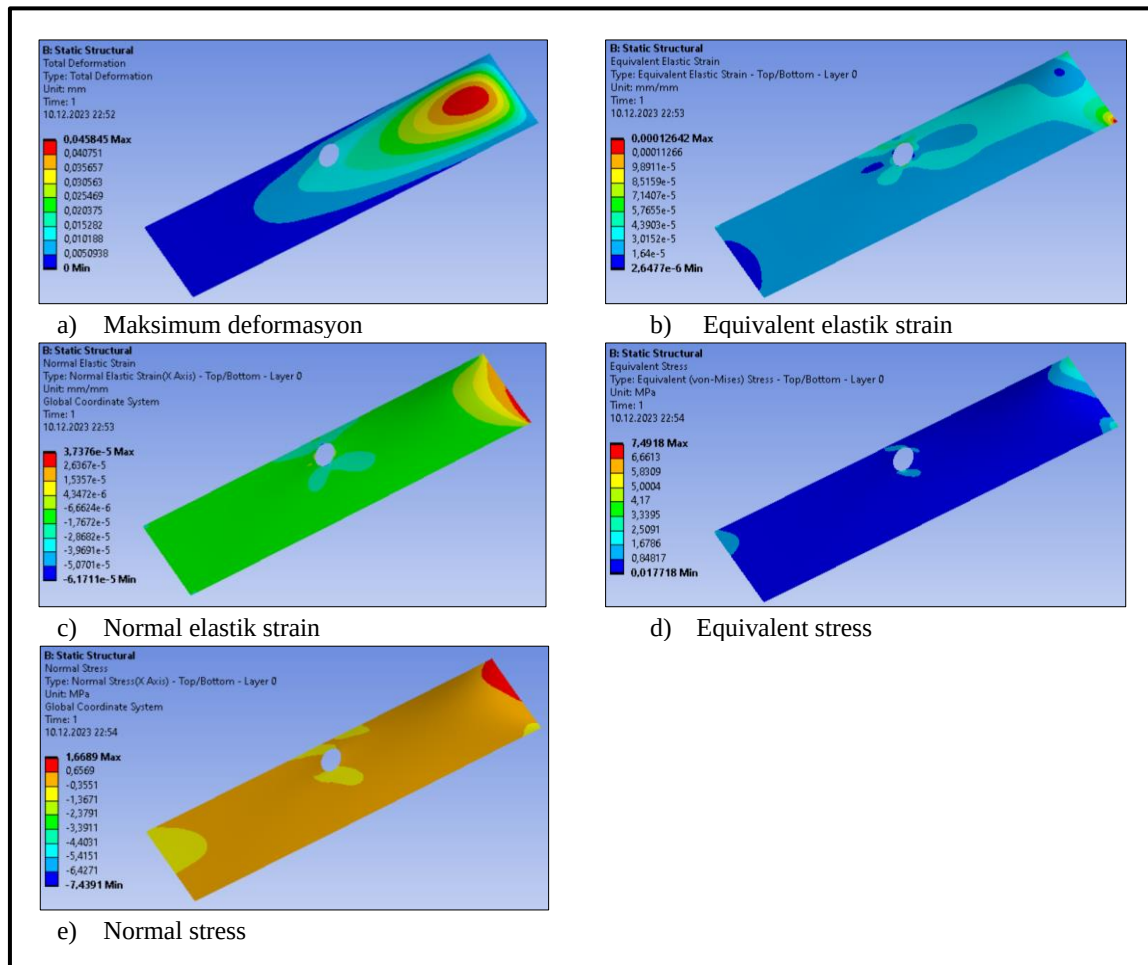


Şekil 5.16. Sekiz farklı mod için eigenvalue yük çarpanı değerleri  
 (  $[0/45/0/-45]$  -  $x_1/L=0,75$  -  $y_1/W=0,5$  )

Şekil 5.16' da delikli kompozit bir plakanın eigenvalue yük çarpanı değerleri gösterilmektedir. (Katman açısı  $[0/45/0/-45]$  -  $R_a/R_b=1,5$  -  $W/L=0,25$  -  $x_1/L=0,75$  -  $y_1/W=0,5$  -  $\theta=45^\circ$ ). Bulgulara göre; Eigenvalue yük çarpanı mod 1 için 8,7118 olduğu gözlemlenmiştir. Bu mod şekli, delik merkezinde ve yük uygulanan bölgeye yakın kısımda en büyük deformasyonu sergilemektedir. Eigenvalue yük çarpanı mod 2 için 9,9994 olduğu gözlemlenmiştir. Bu mod şekli için, en büyük deformasyonların yükün uygulandığı bölgeden uzak yani fixlenmiş tarafa yakın olan kısımda olduğunu sergilemektedir. Eigenvalue yük çarpanı mod 3 için 11,291 olduğu gözlemlenmiştir. Bu mod şekli için, en

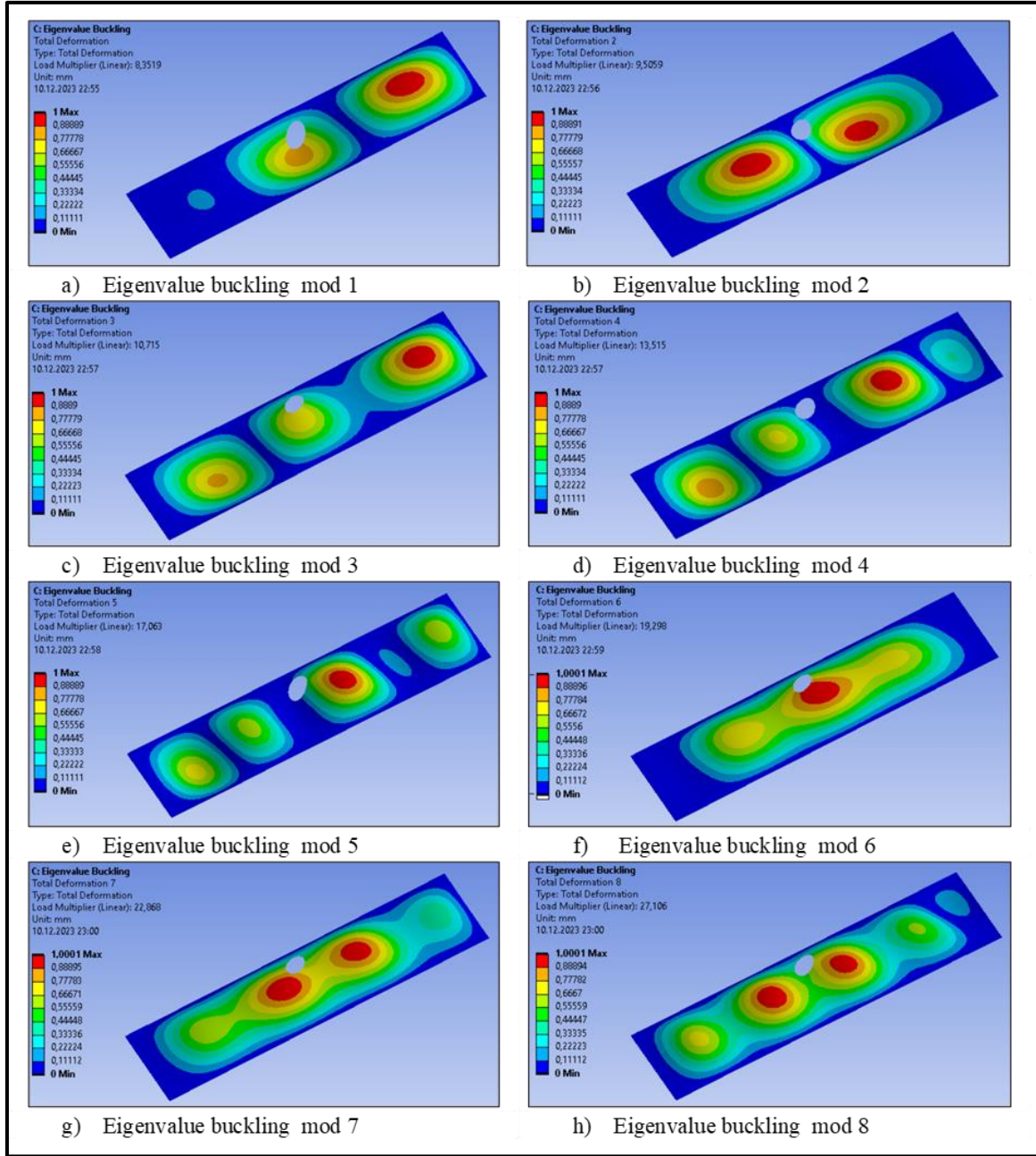


büyük deformasyonların yükün uygulandığı bölgeye ile delik arasında sergilemektedir. Eigenvalue yük çarpanı mod 4 için 13,441 olduğu gözlemlenmiştir. Bu mod şekli için, en büyük deformasyonların yükün uygulandığı bölgeye yakın yani delik merkezinde olan kısımda sergilemektedir. Eigenvalue yük çarpanı mod 5 için 17,348 olduğu gözlemlenmiştir. Bu mod şekli için, en büyük deformasyonların delik merkezi ile fixlenmiş taraf arasında yoğunlaştığını ancak delik konumuna daha yakın olduğunu sergilemektedir. Eigenvalue yük çarpanı mod 6 için 20,356 olduğu gözlemlenmiştir. Bu mod şekli için, en büyük deformasyonların plaka merkezinde yoğunlaştığı sergilemektedir. Eigenvalue yük çarpanı mod 7 için 23,772 olduğu gözlemlenmiştir. Bu mod şekli için, en büyük deformasyonların delik konumu ile plakanın fixlendiği taraf arasındaki kısımda sergilemektedir. Eigenvalue yük çarpanı mod 8 için 27,497 olduğu gözlemlenmiştir. Bu mod şekli için, en büyük deformasyonların plaka merkezi etrafında toplandığı ve düzenli şekilde sergilemektedir.



Şekil 5.17. Deformasyon, gerilme ve gerinim değerleri  
 ([0/45/0/-45] -  $x_1/L=0,5$  -  $y_1/W=0,75$ )

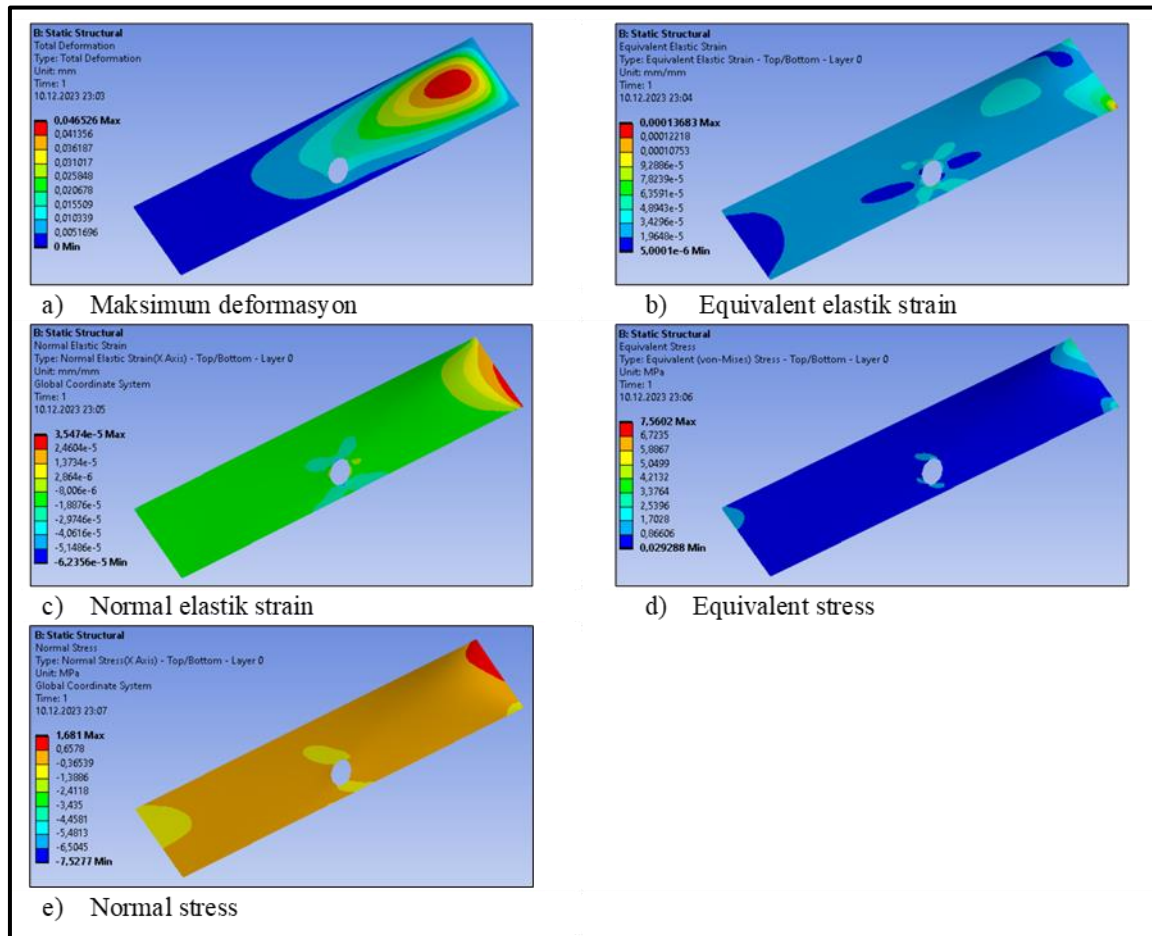
Şekil 5.17' de, delikli kompozit bir plakanın deformasyon, gerilme ve gerinim değerleri gösterilmektedir. (Katman açısı  $[0/45/0/-45]$  -  $R_a/R_b=1,5$  -  $W/L=0,25$  -  $x_1/L=0,5$  -  $y_1/W=0,75$  -  $\theta=45^\circ$ ). Bulgulara göre, delikli plakadaki burkulma sırasında, total maksimum deformasyon değerinin 0,045845 mm olduğu ve deliğin konumuna göre (delik, kuvvetin uygulandığı koordinat düzleminde x yönünde uzak mesafede bulunduğu zaman) maksimum deformasyonun deliğe uzak, kuvvetin uygulandığı bölgede maksimum olduğu gözlemlenmiştir. Equivalent elastik strain maksimum değerinin 0,00012642 mm, minimum değerinin  $2,6477e-6$  mm olduğu ve kuvvetin uygulandığı bölgeye yakın yerde yüksek değerlere ulaştığı, ayrıca delik konumu yük uygulanan bölgeye yaklaştıkça gerinim alanındaki dağılımda artış meydana geldiği gözlemlenmiştir. Normal elastik strain için maksimum  $3,7376e-5$  mm, minimum  $-6,1711e-5$  mm olduğu ve bu değerlerin delik konumu için Equivalent elastik strain değerlerine kıyasla daha düzenli olduğu gözlemlenmiştir. Equivalent (Von-Mises) stress maksimum değerinin 7,4918 MPa, minimum 0,017718 MPa olduğu ve elips uç bölgelerinde (delik " $\theta$ " açısı doğrultusunda) gerilmelerin daha yoğun olduğu görülmüştür. Normal stress maksimum 1,6688 MPa, minimum -7,4391 MPa olduğu ve gerilmelerin düzenli bir şekilde dağılım gösterdiği gözlemlenmiştir.



Şekil 5.18. Sekiz farklı mod için eigenvalue yük çarpanı değerleri  
 ([0/45/0/-45] -  $x_1/L=0,5$  -  $y_1/W=0,75$ )

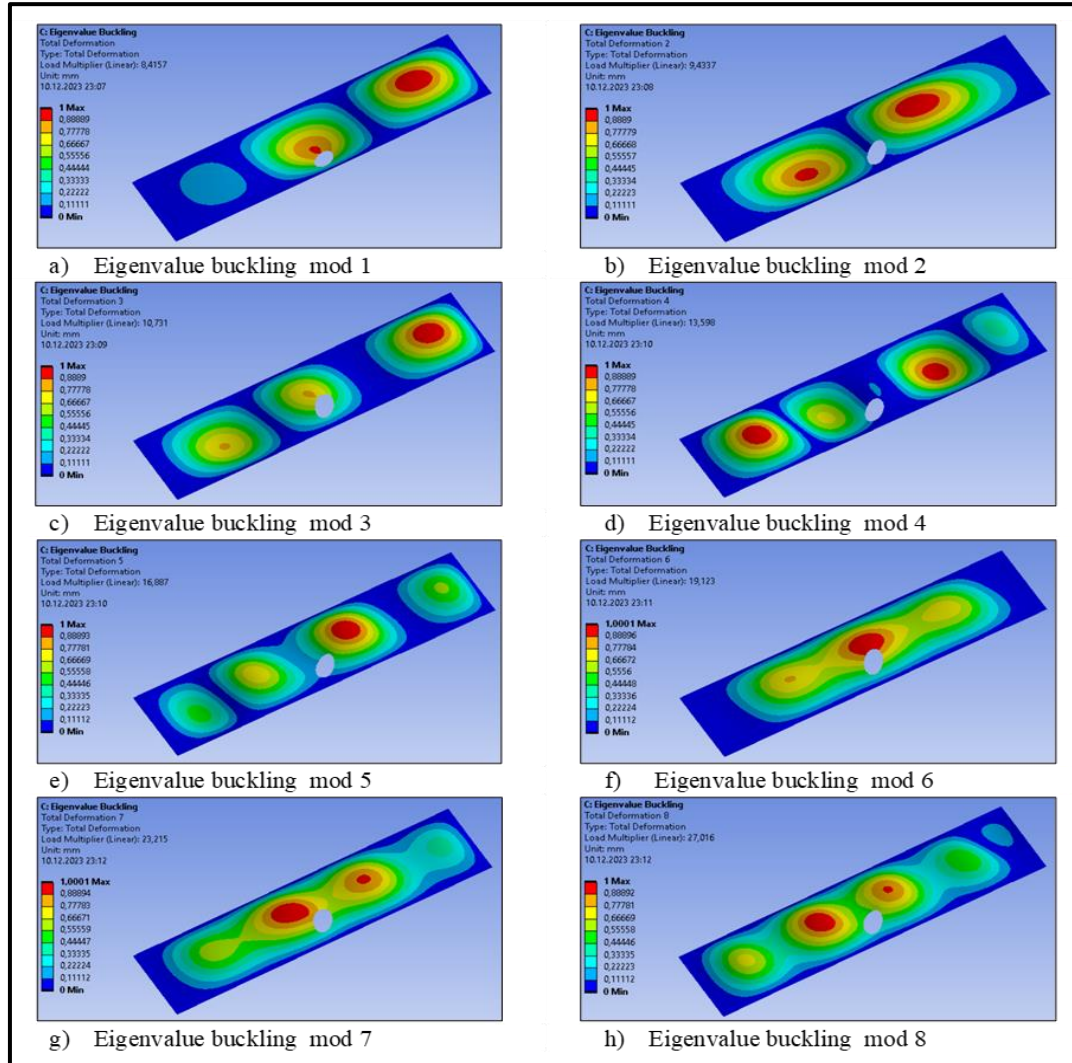
Şekil 5.18' de delikli kompozit bir plakanın eigenvalue yük çarpanı değerleri gösterilmektedir. (Katman açısı [0/45/0/-45] -  $R_a/R_b=1,5$  -  $W/L=0,25$  -  $x_1/L=0,5$  -  $y_1/W=0,75$  -  $\theta=45^\circ$ ). Bulgulara göre; Eigenvalue yük çarpanı mod 1 için 8,3519 olduğu gözlemlenmiştir. Bu mod şekli, delik konumu ile yük uygulanan bölge en büyük deformasyonu sergilemektedir. Eigenvalue yük çarpanı mod 2 için 9,5059 olduğu gözlemlenmiştir. Bu mod şekli için, en büyük deformasyonların plaka genelinde olduğunu sergilemektedir. Eigenvalue yük çarpanı mod 3 için 10,715 olduğu gözlemlenmiştir. Bu mod

şekli için, en büyük deformasyonların delik merkezi ile yük uygulanan bölge arasında, yük uygulanan bölgeye yakın kısmında sergilemektedir. Eigenvalue yük çarpanı mod 4 için 13,515 olduğu gözlemlenmiştir. Bu mod şekli için, en büyük deformasyonların yükün uygulandığı bölge ile delik konumu arasında olduğunu sergilemektedir. Eigenvalue yük çarpanı mod 5 için 17,063 olduğu gözlemlenmiştir. Bu mod şekli için, en büyük deformasyonların delik konumu ile yük uygulanan bölge arasında, delik konumuna daha yakın kısımda yoğunlaştığını sergilemektedir. Eigenvalue yük çarpanı mod 6 için 19,298 olduğu gözlemlenmiştir. Bu mod şekli için, en büyük deformasyonların plaka merkezinde, delik konumuna yakın bölgede yoğunlaştığını sergilemektedir. Eigenvalue yük çarpanı mod 7 için 22,868 olduğu gözlemlenmiştir. Bu mod şekli için, en büyük deformasyonların plaka merkezinde, delik konumuna yakın olan kısımda sergilemektedir. Eigenvalue yük çarpanı mod 8 için 27,106 olduğu gözlemlenmiştir. Bu mod şekli için, en büyük deformasyonların mod 7 ile benzer özellikler gösterdiğini sergilemektedir.



Şekil 5.19. Deformasyon, gerilme ve gerinim değerleri  
( [0/45/0/-45] -  $x_1/L=0,5$  -  $y_1/W=0,25$  )

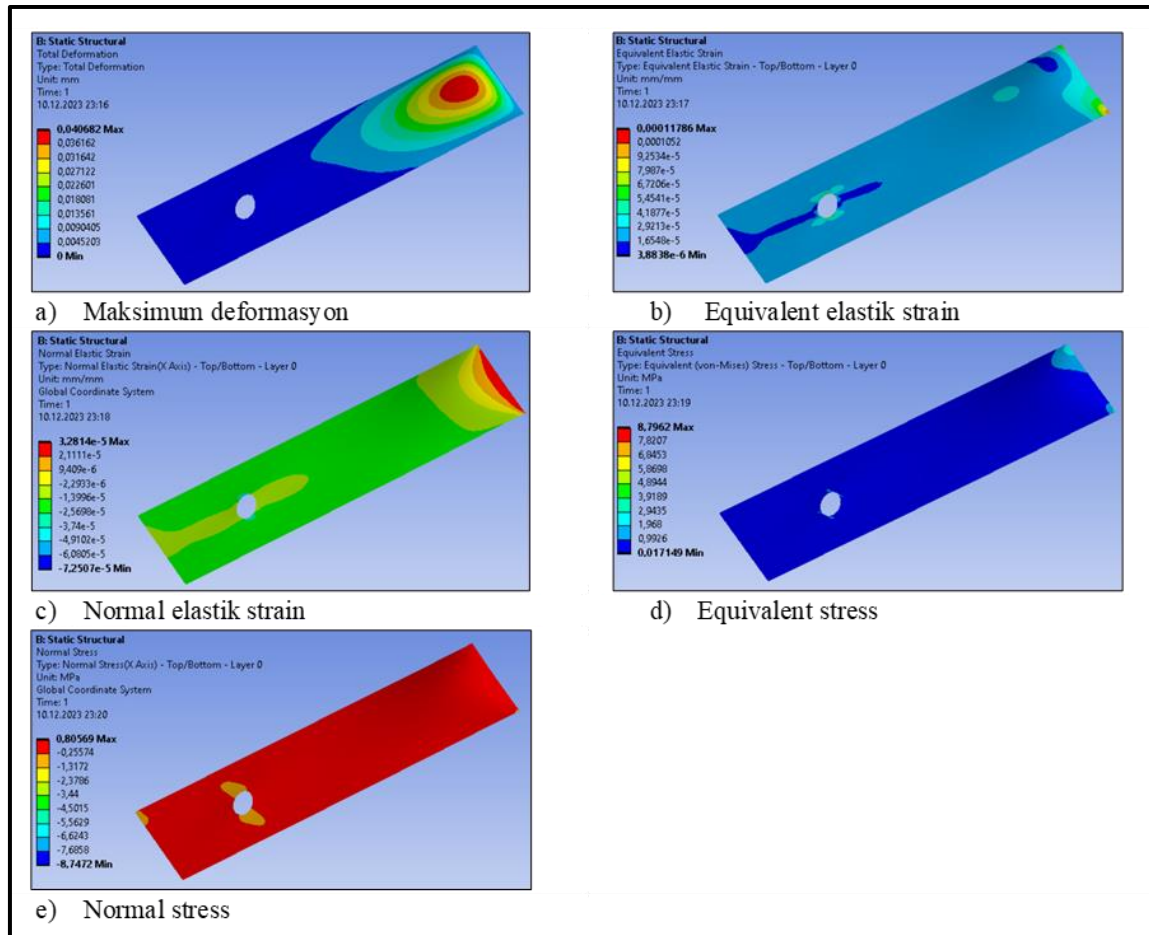
Şekil 5.19' da, delikli kompozit bir plakanın deformasyon, gerilme ve gerinim değerleri gösterilmektedir. (Katman açısı  $[0/45/0/-45]$  -  $R_a/R_b=1,5$  -  $W/L=0,25$  -  $x_1/L=0,5$  -  $y_1/W=0,25$  -  $\theta=45^\circ$ ). Bulgulara göre, delikli plakadaki burkulma sırasında, total maksimum deformasyon değerinin  $0,046526$  mm olduğu, Equivalent elastik strain maksimum değerinin  $0,00013683$  mm, minimum değerinin  $5,0001e-6$  mm olduğu, Normal elastik strain için maksimum  $3,5474e-5$  mm, minimum  $-6,2356e-5$  mm olduğu, Equivalent (Von-Mises) stress maksimum değerinin  $7,5602$  MPa, minimum  $0,029288$  MPa olduğu, Normal stress maksimum  $1,681$  MPa, minimum  $-7,5277$  MPa olduğu gözlemlenmiştir. Mevcut yükleme koşulları ve sınır şartlarına göre deliğin Şekil 5.17' ye göre x ekseninde simetrik olarak yer değiştirmesi durumunda deformasyon, gerilme ve gerinimlerin bölgelerinin de aynı şekilde yer değiştirdiği gözlemlenmiştir.



Şekil 5.20. Sekiz farklı mod için eigenvalue yük çarpanı değerleri  
(  $[0/45/0/-45]$  -  $x_1/L=0,5$  -  $y_1/W=0,25$  )



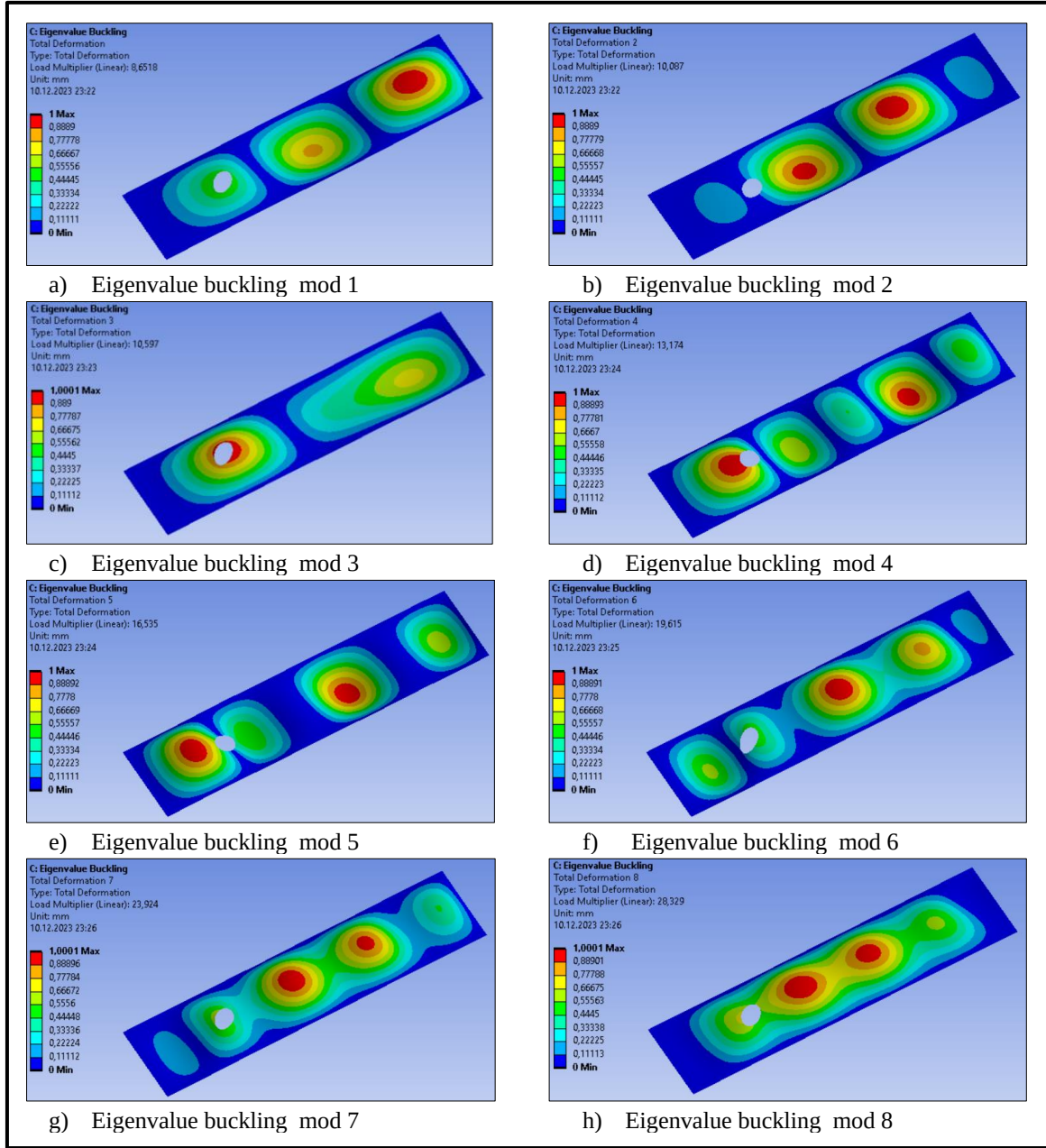
Şekil 5.20' de delikli kompozit bir plakanın eigenvalue yük çarpanı değerleri gösterilmektedir. (Katman açısı  $[0/45/0/-45]$  -  $R_a/R_b=1,5$  -  $W/L=0,25$  -  $x_1/L=0,5$  -  $y_1/W=0,25$  -  $\theta=45^\circ$ ). Bulgulara göre; Eigenvalue yük çarpanı mod 1 için 8,4157 olduğu, Eigenvalue yük çarpanı mod 2 için 9,4337 olduğu, Eigenvalue yük çarpanı mod 3 için 10,731 olduğu, Eigenvalue yük çarpanı mod 4 için 13,598 olduğu, Eigenvalue yük çarpanı mod 5 için 16,887 olduğu, Eigenvalue yük çarpanı mod 6 için 19,123 olduğu, Eigenvalue yük çarpanı mod 7 için 23,215 olduğu, Eigenvalue yük çarpanı mod 8 için 27,016 olduğu gözlemlenmiştir. Mevcut yükleme koşulları ve sınır şartlarına göre deliğin Şekil 5.18' e göre x ekseninde simetrik olarak yer değiştirmesi durumunda Eigenvalue yük çarpanı mod şekli için neredeyse aynı şekilde olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 5.21. Deformasyon, gerilme ve gerinim değerleri  
( $[0/60/0/-60]$  -  $x_1/L=0,25$  -  $y_1/W=0,5$ )

Şekil 5.21' de, delikli kompozit bir plakanın deformasyon, gerilme ve gerinim değerleri gösterilmektedir. (Katman açısı  $[0/60/0/-60]$  -  $R_a/R_b=1,5$  -  $W/L=0,25$  -  $x_1/L=0,25$  -  $y_1/W=0,5$  -  $\theta=45^\circ$ ). Bulgulara göre, delikli plakadaki burkulma sırasında, total maksimum

deformasyon değerinin 0,040682 olduğu ve deliğin konumuna göre (delik, kuvvetin uygulandığı koordinat düzleminde x yönünde uzak mesafede bulunduğu zaman) maksimum deformasyonun deliğe uzak, kuvvetin uygulandığı yere yakın bölgede maksimum olduğu gözlemlenmiştir. Equivalent elastik strain maksimum değerinin 0,00011786 mm, minimum değerinin  $3,8838 \times 10^{-6}$  mm olduğu ve deliğin konumuna göre uzak, kuvvetin uygulandığı bölgeye yakın yerde yüksek değerlere ulaştığı gözlemlenmiştir. Normal elastik strain için maksimum  $3,2814 \times 10^{-5}$  mm, minimum  $-7,2507 \times 10^{-5}$  mm olduğu ve bu değerlerin delik konumu için Equivalent elastik strain değerleri ile benzer bölgelerde oluştuğu gözlemlenmiştir. Equivalent (Von-Mises) stress maksimum değerinin 8,7962 MPa, minimum 0,017109 MPa olduğu ve gerilmelerin homojen dağıldığı görülmüştür. Normal stress maksimum 0,80569 MPa, minimum -8,7472 MPa olduğu ve gerilmelerin Equivalent (Von-Mises) stress ile benzerlik gösterdiği gözlemlenmiştir.

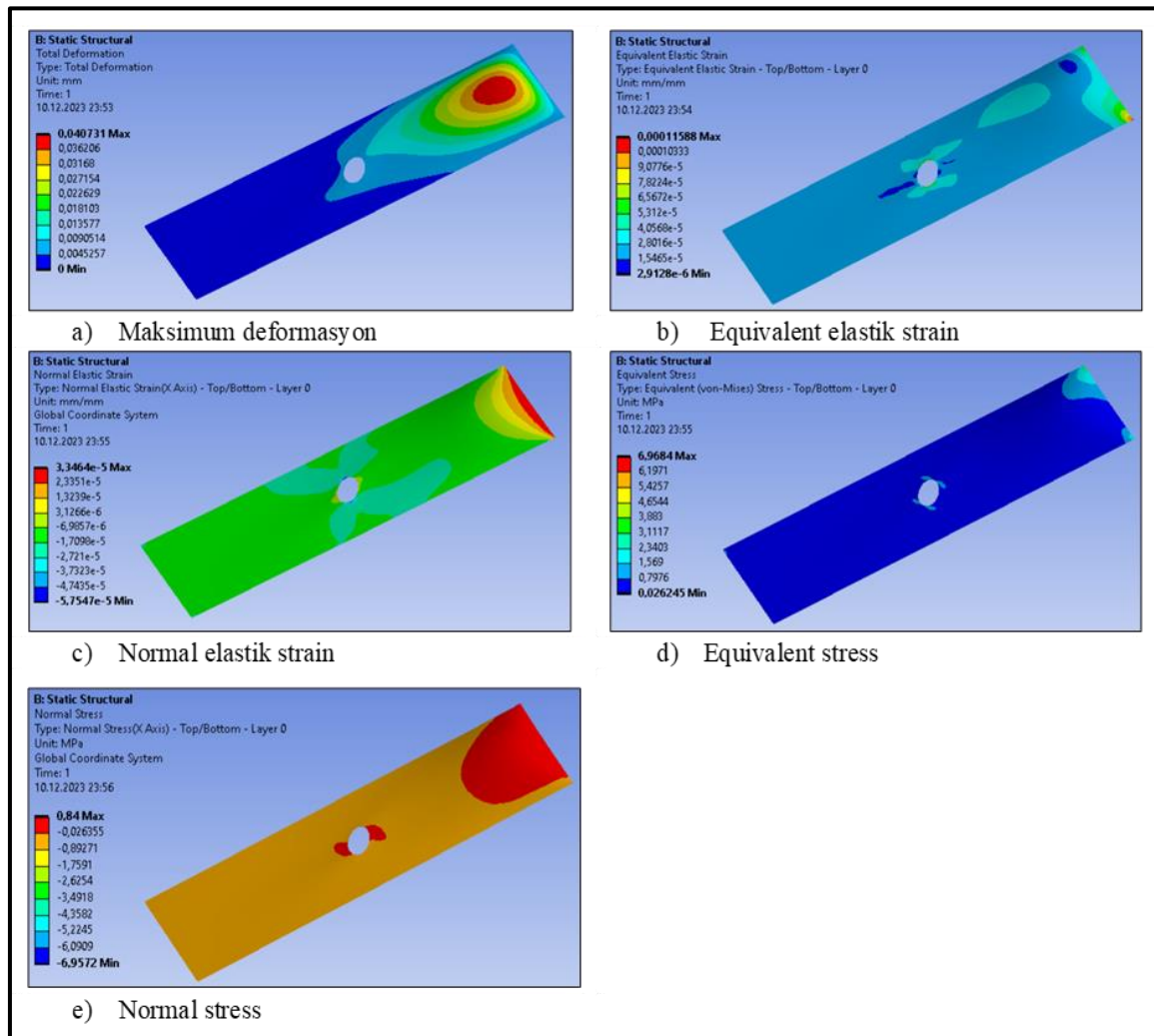


Şekil 5.22. Sekiz farklı mod için eigenvalue yük çarpanı değerleri  
( [0/60/0/-60] -  $x_1/L=0,25$  -  $y_1/W=0,5$  )

Şekil 5.22' de delikli kompozit bir plakanın eigenvalue yük çarpanı değerleri gösterilmektedir. (Katman açısı [0/60/0/-60] -  $R_a/R_b=1,5$  -  $W/L=0,25$  -  $x_1/L=0,25$  -  $y_1/W=0,5$  -  $\theta=45^\circ$ ). Bulgulara göre; Eigenvalue yük çarpanı mod 1 için 8,6518 olduğu gözlemlenmiştir. Bu mod şekli, delik bölgesine uzak, yük uygulanan bölgeye yakın kısımda en büyük deformasyonu sergilemektedir. Eigenvalue yük çarpanı mod 2 için 10,087 olduğu gözlemlenmiştir. Bu mod şekli için, en büyük deformasyonların yükün uygulandığı bölge ile delik konumu arasında sergilemektedir. Eigenvalue yük çarpanı mod 3 için 10,597 olduğu gözlemlenmiştir. Bu mod şekli için, en büyük deformasyonların yükün uygulandığı

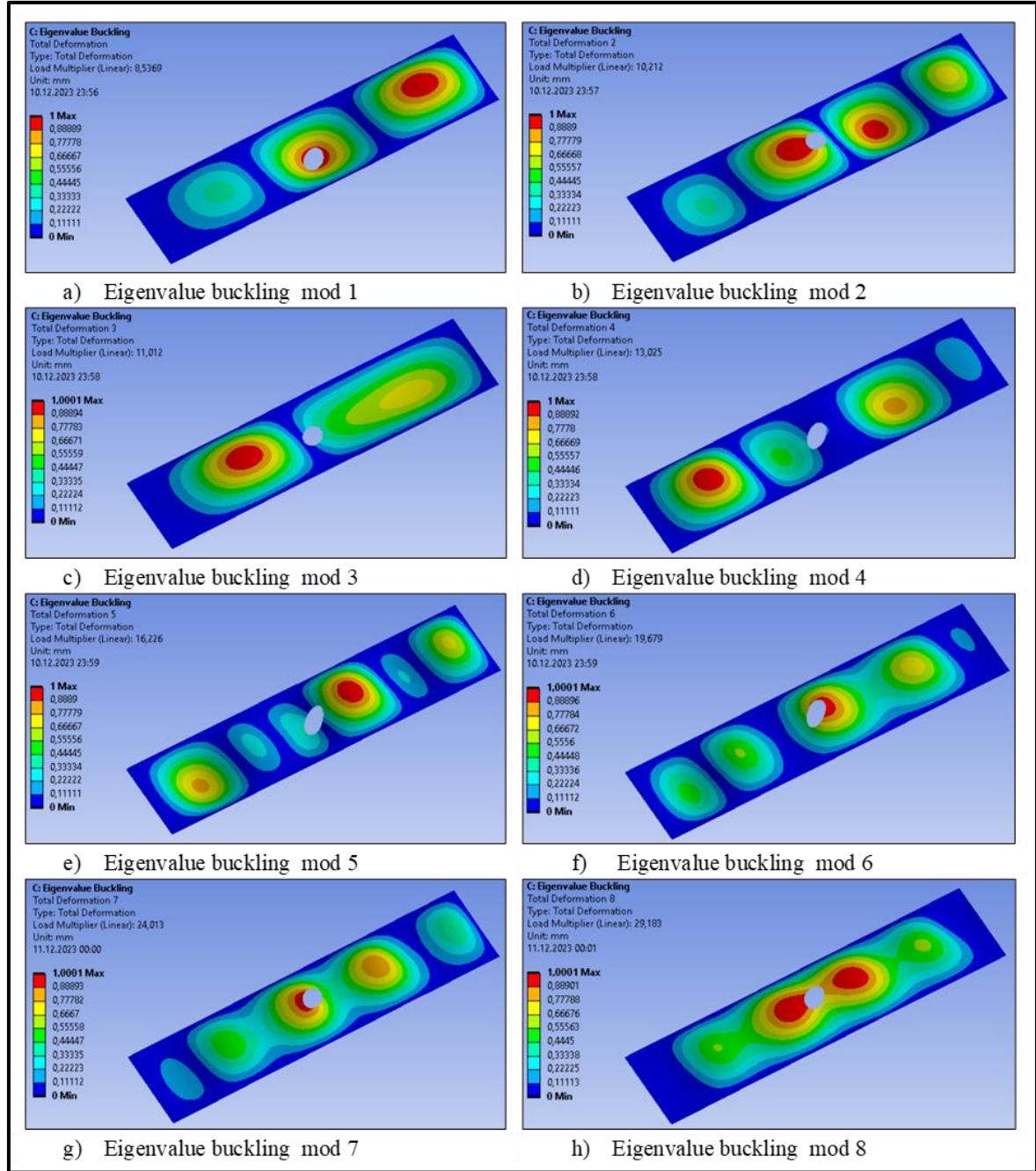


bölgeden uzak delik konumuna yakın olan kısımda sergilemektedir. Eigenvalue yük çarpanı mod 4 için 13,174 olduğu gözlemlenmiştir. Bu mod şekli için, en büyük deformasyonların yükün uygulandığı bölgeye ve delik konumuna yaklaştığını sergilemektedir. Eigenvalue yük çarpanı mod 5 için 16,535 olduğu gözlemlenmiştir. Bu mod şekli için, en büyük deformasyonların mod 4 ile benzer özellikler gösterdiğini sergilemektedir. Eigenvalue yük çarpanı mod 6 için 19,615 olduğu gözlemlenmiştir. Bu mod şekli için, en büyük deformasyonların yükün uygulandığı bölge ile delik konumu arasında bulunan kısımda sergilemektedir. Eigenvalue yük çarpanı mod 7 için 23,924 olduğu gözlemlenmiştir. Bu mod şekli için, en büyük deformasyonların mod 6 ile benzer özellikler gösterdiğini sergilemektedir. Eigenvalue yük çarpanı mod 8 için 28,329 olduğu gözlemlenmiştir. Bu mod şekli için, en büyük deformasyonların mod 6 ve mod 7 ye benzer özellikler gösterdiğini sergilemektedir.



Şekil 5.23. Deformasyon, gerilme ve gerinim değerleri  
( [0/60/0/-60] -  $x_1/L=0,5$  -  $y_1/W=0,5$  )

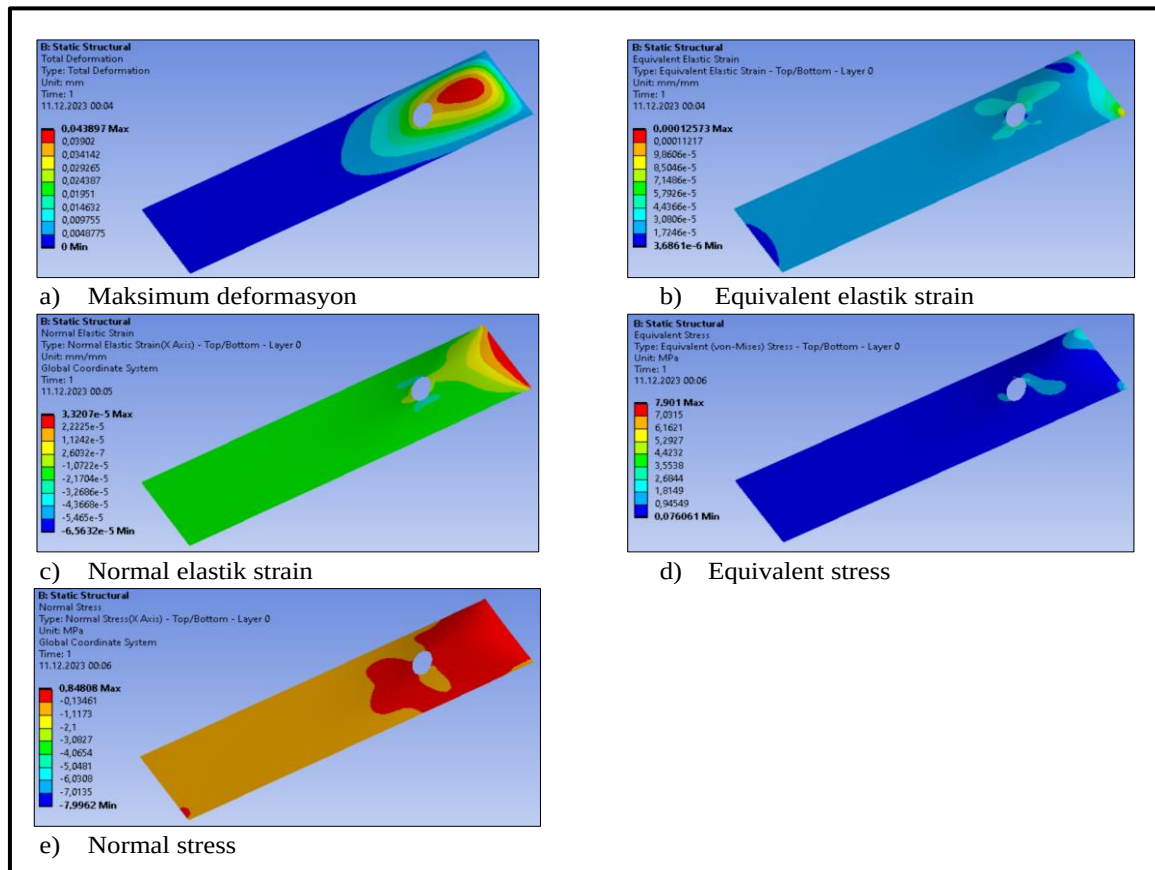
Şekil 5.23' de, delikli kompozit bir plakanın deformasyon, gerilme ve gerinim değerleri gösterilmektedir. (Katman açısı  $[0/60/0/-60]$  -  $R_a/R_b=1,5$  -  $W/L=0,25$  -  $x_1/L=0,5$  -  $y_1/W=0,5$  -  $\theta=45^\circ$ ). Bulgulara göre, delikli plakadaki burkulma sırasında, total maksimum deformasyon değerinin 0,040731 olduğu ve deliğin konumuna göre (delik, kuvvetin uygulandığı koordinat düzleminde x yönünde uzak mesafede bulunduğu zaman) maksimum deformasyonun deliğe uzak, kuvvetin uygulandığı yere yakın bölgede maksimum olduğu gözlemlenmiştir. Equivalent elastik strain maksimum değerinin 0,00011588 mm ve deliğin konumuna göre uzak, kuvvetin uygulandığı bölgeye yakın yerde yüksek değerlere ulaştığı, ayrıca delik konumu yük uygulanan bölgeye yaklaştıkça gerilme alanındaki dağılımda artış meydana geldiği gözlemlenmiştir. Normal elastik strain için maksimum  $3,3464e-5$  mm olduğu gözlemlenmiştir. Equivalent (Von-Mises) stress maksimum değerinin 6,9684 MPa olduğu ve elips uç bölgelerinde (delik " $\theta$ " açısı doğrultusunda) gerilmelerin daha yoğun olduğu görülmüştür. Normal stress maksimum 0,84 MPa olduğu ve gerilmelerin yük uygulanan tarafta yoğunlaştığı gözlemlenmiştir.



Şekil 5.24. Sekiz farklı mod için eigenvalue yük çarpanı değerleri  
 ([0/60/0/-60] -  $x_1/L=0,5$  -  $y_1/W=0,5$ )

Şekil 5.24' de delikli kompozit bir plakanın eigenvalue yük çarpanı değerleri gösterilmektedir. (Katman açısı [0/60/0/-60] -  $R_a/R_b=1,5$  -  $W/L=0,25$  -  $x_1/L=0,5$  -  $y_1/W=0,5$  -  $\theta=45^\circ$ ). Bulgulara göre; Eigenvalue yük çarpanı mod 1 için 8,5369 olduğu gözlemlenmiştir. Bu mod şekli, delik konumu ile yük uygulanan bölgeye yakın kısımda en büyük deformasyonu sergilemektedir. Eigenvalue yük çarpanı mod 2 için 10,212 olduğu gözlemlenmiştir. Bu mod şekli için, en büyük deformasyonların delik konumu etrafında

olduğunu sergilemektedir. Eigenvalue yük çarpanı mod 3 için 11,012 olduğu gözlemlenmiştir. Bu mod şekli için, en büyük deformasyonların fixlenmiş taraf ile delik konumu arasında olduğunu sergilemektedir. Eigenvalue yük çarpanı mod 4 için 13,025 olduğu gözlemlenmiştir. Bu mod şekli için, en büyük deformasyonların fixlenmiş tarafta olduğunu sergilemektedir. Eigenvalue yük çarpanı mod 5 için 16,226 olduğu gözlemlenmiştir. Bu mod şekli, en büyük deformasyonların delik konumuna yakın yerde yoğunlaştığını sergilemektedir. Eigenvalue yük çarpanı mod 6 için 19,679 olduğu gözlemlenmiştir. Bu mod şekli, en büyük deformasyonların delik merkezinde yoğunlaştığını sergilemektedir. Eigenvalue yük çarpanı mod 7 için 24,013 olduğu gözlemlenmiştir. Bu mod şekli için, en büyük deformasyonların delik konumu etrafında olduğunu sergilemektedir. Eigenvalue yük çarpanı mod 8 için 29,183 olduğu gözlemlenmiştir. Bu mod şekli için, en büyük deformasyonların delik etrafında toplandığı ve düzenli şekilde sergilemektedir.

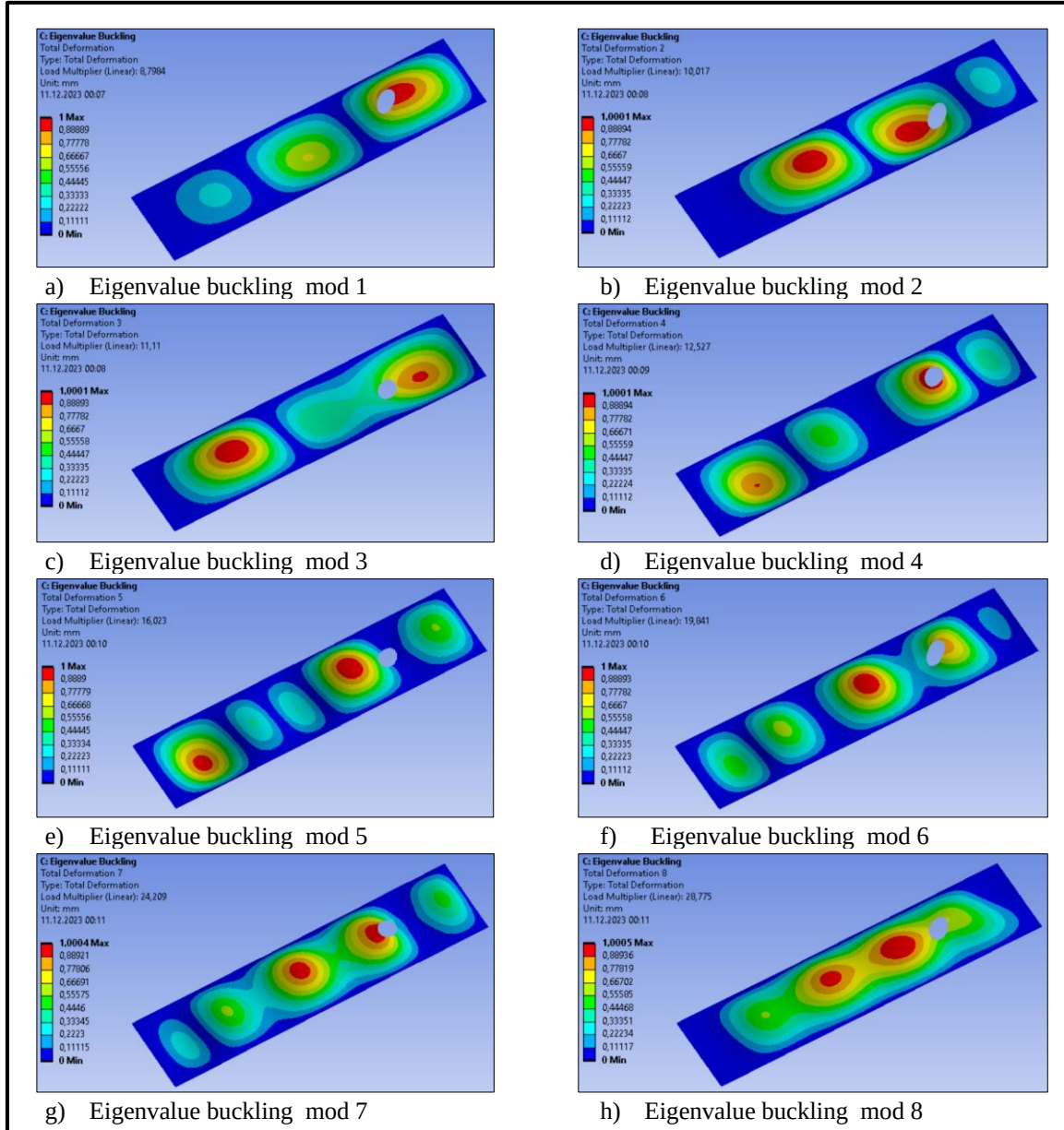


Şekil 5.25. Deformasyon, gerilme ve gerinim değerleri  
( [0/60/0/-60] -  $x_1/L=0,75$  -  $y_1/W=0,5$  )

Şekil 5.25' de, delikli kompozit bir plakanın deformasyon, gerilme ve gerinim değerleri gösterilmektedir. (Katman açısı [0/60/0/-60] -  $R_a/R_b=1,5$  -  $W/L=0,25$  -  $x_1/L=0,75$  -  $y_1/W=0,5$

-  $\theta=45^\circ$ ). Bulgulara göre, delikli plakadaki burkulma sırasında, total maksimum deformasyon değerinin 0,043897 mm olduğu ve deliğin konumuna göre (delik, kuvvetin uygulandığı koordinat düzleminde x yönünde yakın mesafede bulunduğu zaman) maksimum deformasyonun deliğe yakın, kuvvetin uygulandığı bölgede maksimum olduğu gözlemlenmiştir. Equivalent elastik strain maksimum değerinin 0,00012573 mm olduğu ve kuvvetin uygulandığı bölgeye yakın yerde yüksek değerlere ulaştığı, ayrıca delik konumu yük uygulanan bölgeye yaklaştıkça gerilme alanındaki dağılımda artış meydana geldiği gözlemlenmiştir. Normal elastik strain için maksimum  $3,3207 \times 10^{-5}$  mm olduğu ve bu değerlerin delik konumu için Equivalent elastik strain değerlerine kıyasla daha düzenli şekilde oluştuğu gözlemlenmiştir. Equivalent (Von-Mises) stress maksimum değerinin 7,901 MPa olduğu ve elips uç bölgelerinde (delik " $\theta$ " açısı doğrultusunda) gerilmelerin daha yoğun olduğu görülmüştür. Normal stress maksimum 0,84808 MPa olduğu ve yüksek gerilmelerin yoğunlaştığı bölgelerin delik konumu etkisiyle yük uygulanan tarafta artış gösterdiği gözlemlenmiştir.

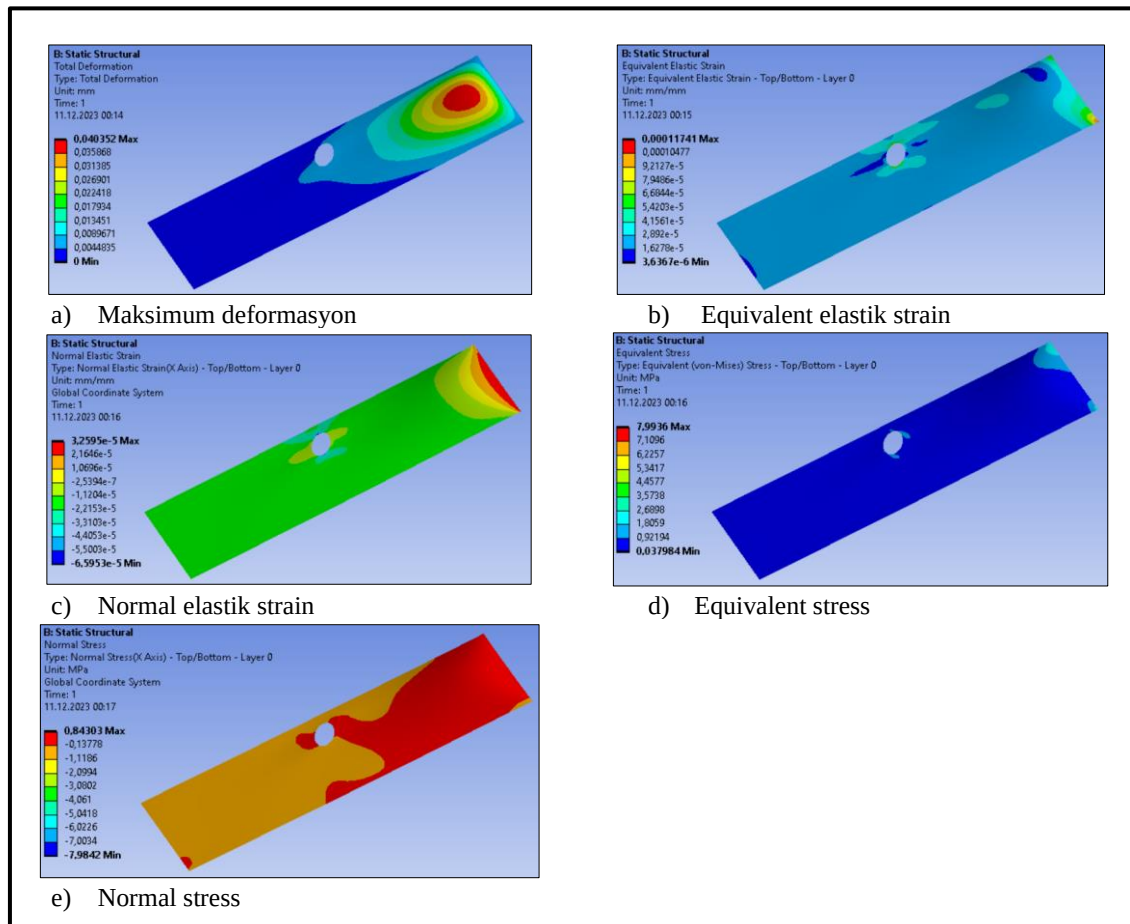




Şekil 5.26. Sekiz farklı mod için eigenvalue yük çarpanı değerleri  
 ([0/60/0/-60] -  $x_1/L=0,75$  -  $y_1/W=0,5$ )

Şekil 5.26' da delikli kompozit bir plakanın eigenvalue yük çarpanı değerleri gösterilmektedir. (Katman açısı [0/60/0/-60] -  $R_a/R_b=1,5$  -  $W/L=0,25$  -  $x_1/L=0,75$  -  $y_1/W=0,5$  -  $\theta=45^\circ$ ). Bulgulara göre; Eigenvalue yük çarpanı mod 1 için 8,7984 olduğu gözlemlenmiştir. Bu mod şekli, delik merkezinde ve yük uygulanan bölgeye yakın kısımda en büyük deformasyonu sergilemektedir. Eigenvalue yük çarpanı mod 2 için 10,017 olduğu gözlemlenmiştir. Bu mod şekli, en büyük deformasyonların yükün uygulandığı bölgeden uzak yani fixlenmiş taraf ile delik konumu arasında olduğunu sergilemektedir. Eigenvalue yük çarpanı mod 3 için 11,11 olduğu gözlemlenmiştir. Bu mod şekli için, en büyük deformasyonların fixlenmiş tarafta ve yükün uygulandığı tarafta olduğu fakat delik

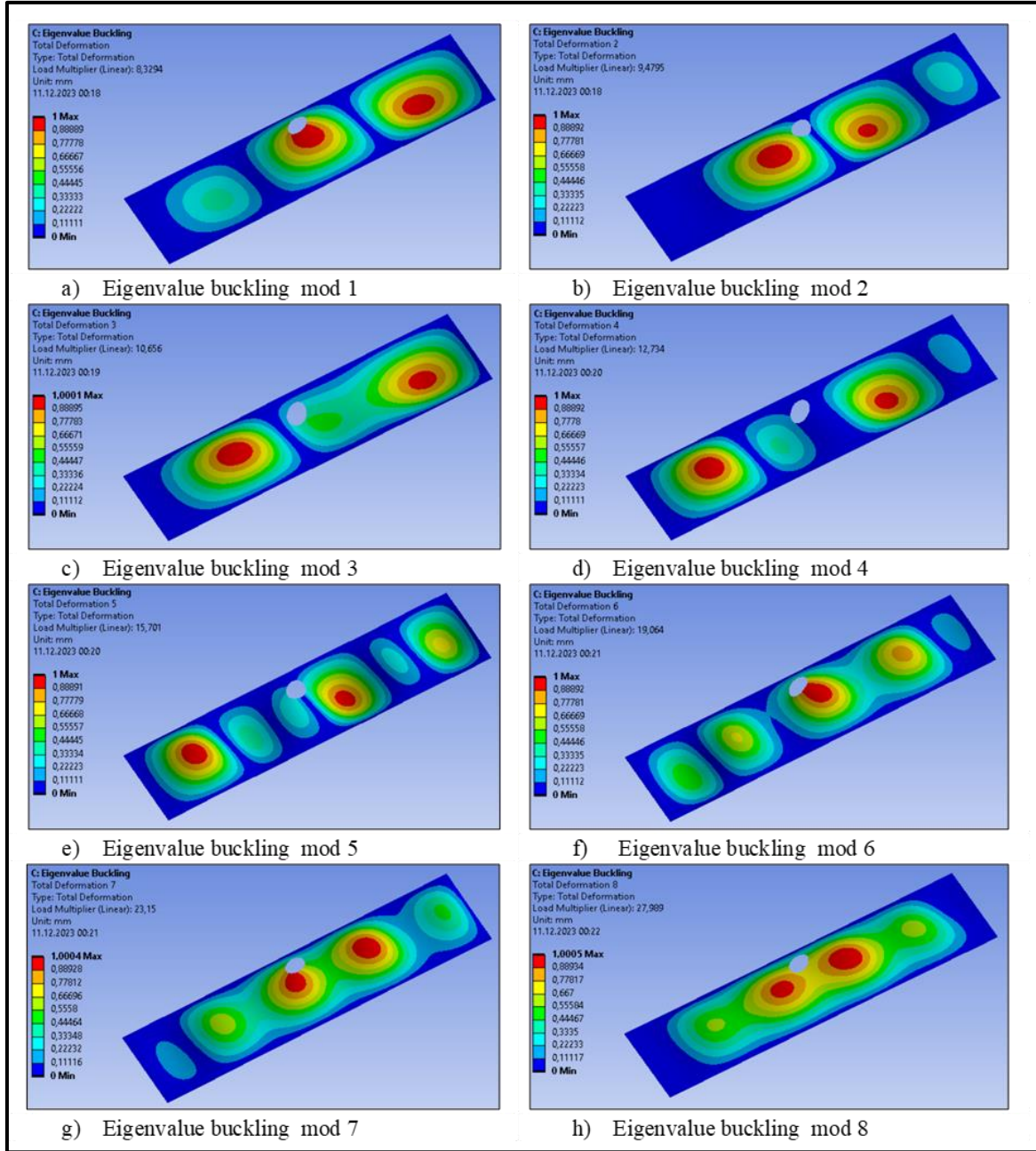
konumu etrafında düzensizlik meydana geldiğini sergilemektedir. Eigenvalue yük çarpanı mod 4 için 12,527 olduğu gözlemlenmiştir. Bu mod şekli, en büyük deformasyonların yükün uygulandığı bölgeye yakın yani delik merkezinde olan kısımda sergilemektedir. Eigenvalue yük çarpanı mod 5 için 16,023 olduğu gözlemlenmiştir. Bu mod şekli, en büyük deformasyonların delik merkezi ile fixlenmiş taraf arasında yoğunlaştığını ancak delik konumuna daha yakın olduğunu sergilemektedir. Eigenvalue yük çarpanı mod 6 için 19,841 olduğu gözlemlenmiştir. Bu mod şekli, en büyük deformasyonların plaka merkezinde yoğunlaştığını sergilemektedir. Eigenvalue yük çarpanı mod 7 için 24,209 olduğu gözlemlenmiştir. Bu mod şekli için, en büyük deformasyonların delik konumu ile plakanın fixlendiği taraf arasındaki kısımda sergilemektedir. Eigenvalue yük çarpanı mod 8 için 28,775 olduğu gözlemlenmiştir. Bu mod şekli, en büyük deformasyonların plaka merkezi etrafında toplandığı ve düzenli şekilde sergilemektedir.



Şekil 5.27. Deformasyon, gerilme ve gerinim değerleri  
( [0/60/0/-60] -  $x_1/L=0,5$  -  $y_1/W=0,75$  )

Şekil 5.27' de, delikli kompozit bir plakanın deformasyon, gerilme ve gerinim değerleri gösterilmektedir. (Katman açısı  $[0/60/0/-60]$  -  $R_a/R_b=1,5$  -  $W/L=0,25$  -  $x_1/L=0,5$  -  $y_1/W=0,75$  -  $\theta=45^\circ$ ). Bulgulara göre, delikli plakadaki burkulma sırasında, total maksimum deformasyon değerinin  $0,040357$  mm olduğu ve deliğin konumuna göre (delik, kuvvetin uygulandığı koordinat düzleminde  $x$  yönünde uzak mesafede bulunduğu zaman) maksimum deformasyonun deliğe uzak, kuvvetin uygulandığı bölgede maksimum olduğu gözlemlenmiştir. Equivalent elastik strain maksimum değerinin  $0,00011741$  mm olduğu ve kuvvetin uygulandığı bölgeye yakın yerde yüksek değerlere ulaştığı, ayrıca delik konumu yük uygulanan bölgeye yaklaştıkça gerinim alanındaki dağılımda artış meydana geldiği gözlemlenmiştir. Normal elastik strain için maksimum  $3,2595e-5$  mm olduğu ve bu değerlerin delik konumu için Equivalent elastik strain değerlerine kıyasla daha düzenli olduğu gözlemlenmiştir. Equivalent (Von-Mises) stress maksimum değerinin  $7,9936$  MPa olduğu ve gerilmelerin plaka üzerinde homojen dağıldığı görülmüştür. Normal stress maksimum  $0,84303$  MPa olduğu ve gerilmelerin yük uygulanan taraf ile delik konumu arasındaki bölgede dağılım gösterdiği gözlemlenmiştir.

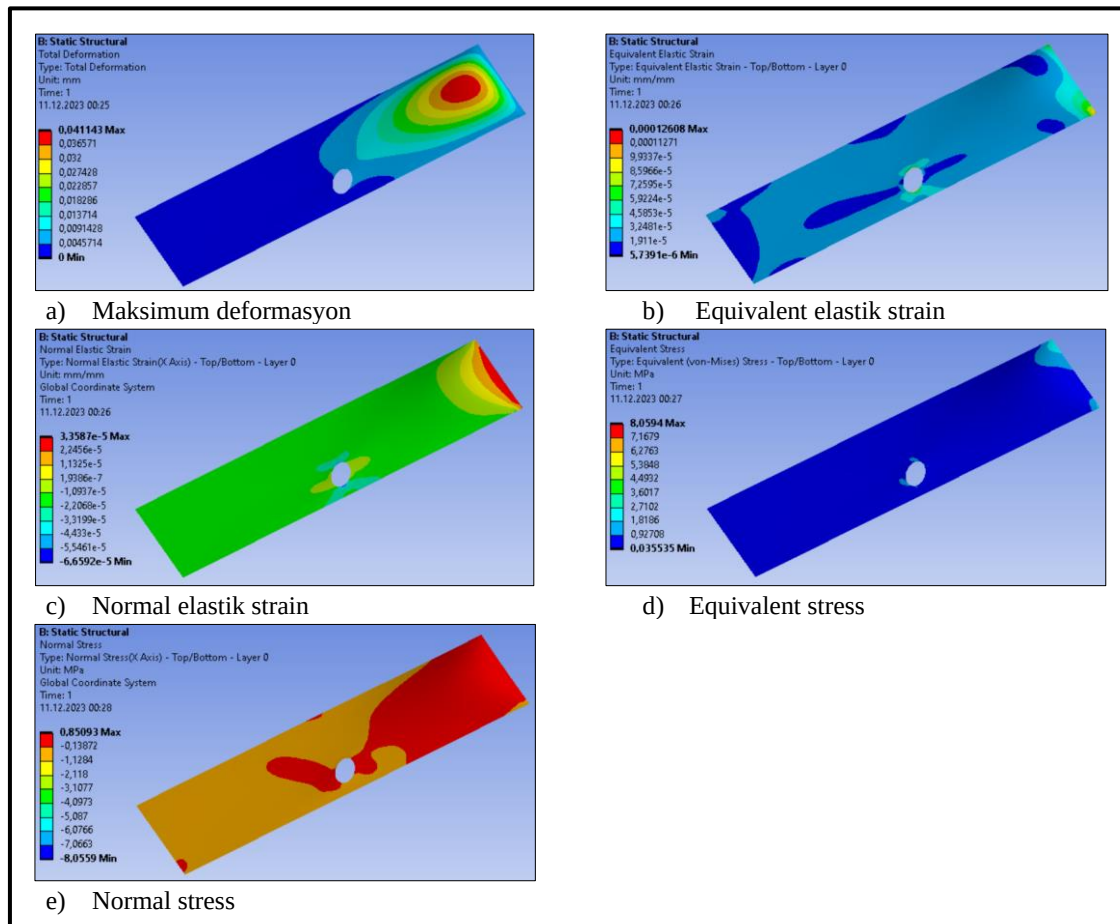




Şekil 5.28. Sekiz farklı mod için eigenvalue yük çarpanı değerleri  
 ([0/60/0/-60] -  $x_1/L=0,5$  -  $y_1/W=0,75$ )

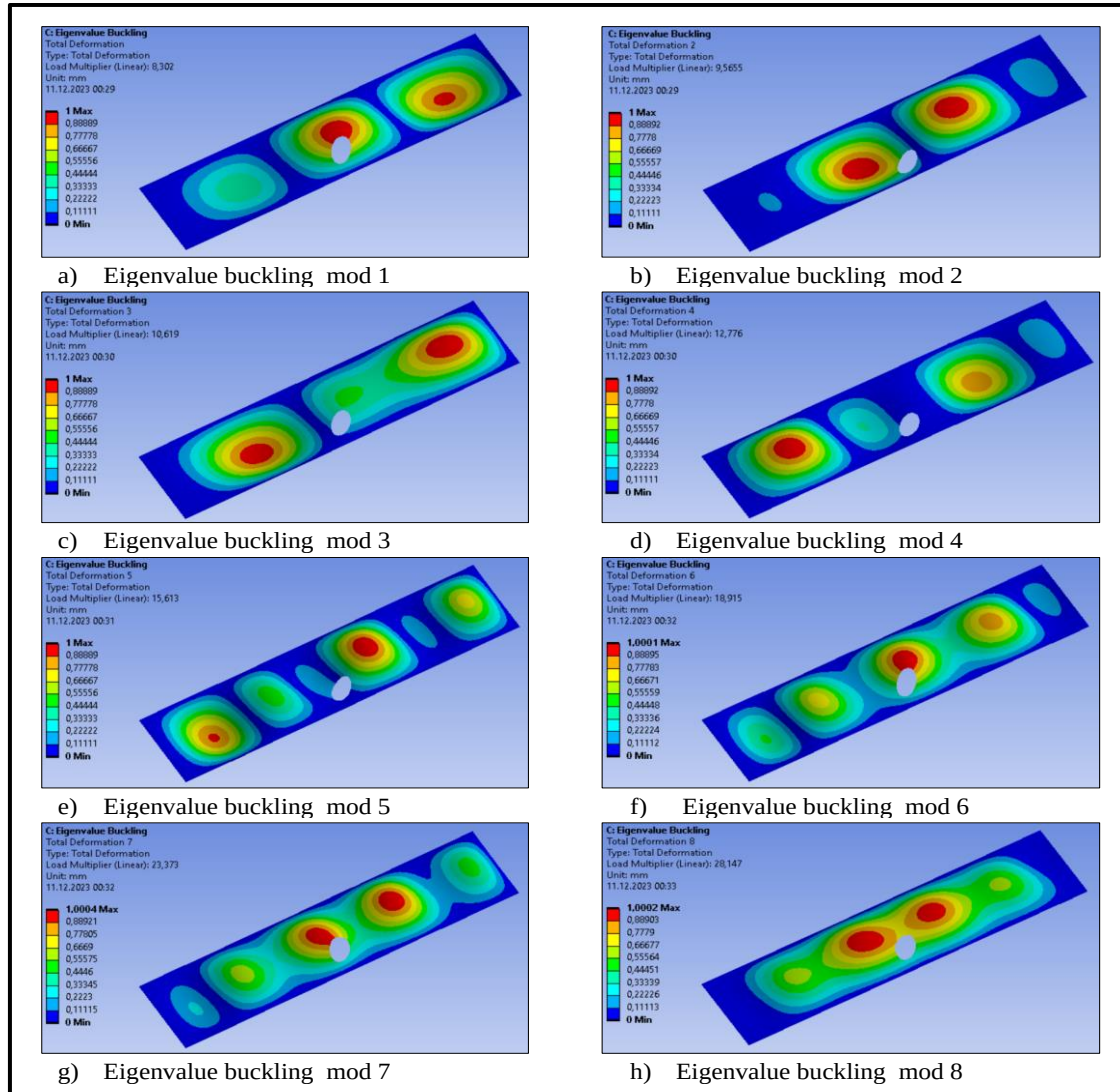
Şekil 5.28' de delikli kompozit bir plakanın eigenvalue yük çarpanı değerleri gösterilmektedir. (Katman açısı [0/60/0/-60] -  $R_a/R_b=1,5$  -  $W/L=0,25$  -  $x_1/L=0,5$  -  $y_1/W=0,75$  -  $\theta=45^\circ$ ). Bulgulara göre; Eigenvalue yük çarpanı mod 1 için 8,3294 olduğu gözlemlenmiştir. Bu mod şekli, delik konumu ile yük uygulanan bölge arasında en büyük deformasyonu sergilemektedir. Eigenvalue yük çarpanı mod 2 için 9,4795 olduğu gözlemlenmiştir. Bu mod şekli, en büyük deformasyonların plaka merkezi etrafında olduğunu sergilemektedir. Eigenvalue yük çarpanı mod 3 için 10,656 olduğu

gözlemlenmiştir. Bu mod şekli, en büyük deformasyonların plakanın her iki ucunda olduğunu ve deliğin mod şekline etkilediği değişimi sergilemektedir. Eigenvalue yük çarpanı mod 4 için 12,734 olduğu gözlemlenmiştir. Bu mod şekli için, en büyük deformasyonların fixlenmiş tarafta meydana geldiğini sergilemektedir. Eigenvalue yük çarpanı mod 5 için 15,701 olduğu gözlemlenmiştir. Bu mod şekli, en büyük deformasyonların mod 4 ile benzer özelliklerde olduğunu sergilemektedir. Eigenvalue yük çarpanı mod 6 için 19,064 olduğu gözlemlenmiştir. Bu mod şekli, en büyük deformasyonların plaka merkezinde, delik konumuna yakın bölgede yoğunlaştığını sergilemektedir. Eigenvalue yük çarpanı mod 7 için 23,15 olduğu gözlemlenmiştir. Bu mod şekli, en büyük deformasyonların plaka merkezinde, delik konumuna yakın olan kısımda sergilemektedir. Eigenvalue yük çarpanı mod 8 için 27,989 olduğu gözlemlenmiştir. Bu mod şekli, en büyük deformasyonların mod 7 ile benzer özellikler gösterdiğini sergilemektedir.



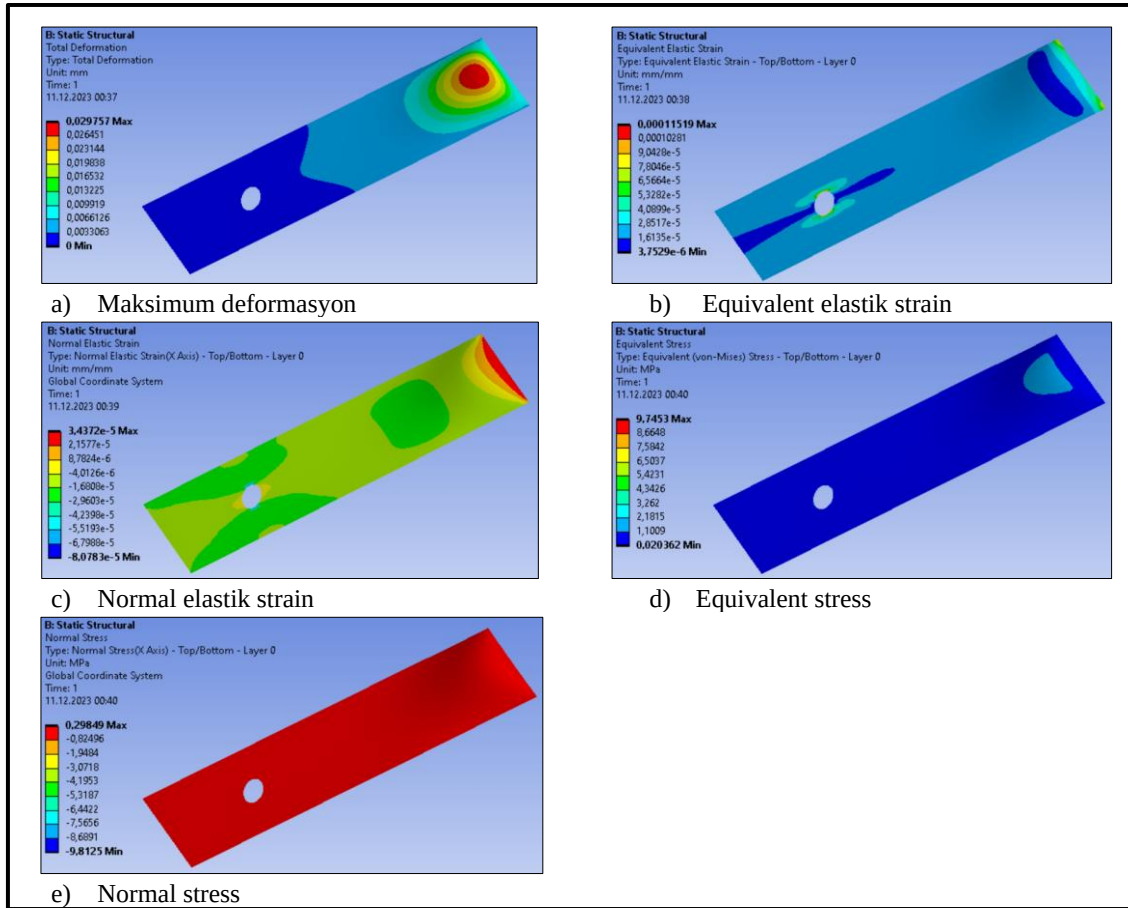
Şekil 5.29. Deformasyon, gerilme ve gerinim değerleri  
( [0/60/0/-60] -  $x_1/L=0,5$  -  $y_1/W=0,25$  )

Şekil 5.29' da, delikli kompozit bir plakanın deformasyon, gerilme ve gerinim değerleri gösterilmektedir. (Katman açısı  $[0/60/0/-60]$  -  $R_a/R_b=1,5$  -  $W/L=0,25$  -  $x_1/L=0,5$  -  $y_1/W=0,25$  -  $\theta=45^\circ$ ). Bulgulara göre, delikli plakadaki burkulma sırasında, total maksimum deformasyon değerinin  $0,041143$  mm olduğu, Equivalent elastik strain maksimum değerinin  $0,00012608$  mm olduğu, Normal elastik strain için maksimum  $3,3587e-5$  mm olduğu, Equivalent (Von-Mises) stress maksimum değerinin  $8,0594$  MPa olduğu, Normal stress maksimum  $0,85093$  MPa olduğu gözlemlenmiştir. Mevcut yükleme koşulları ve sınır şartlarına göre deliğin Şekil 5.27' ye göre x ekseninde simetrik olarak yer değiştirmesi durumunda deformasyon, gerilme ve gerinimlerin bölgelerinin de aynı şekilde yer değiştirdiği gözlemlenmiştir.



Şekil 5.30. Sekiz farklı mod için eigenvalue yük çarpanı değerleri  
(  $[0/60/0/-60]$  -  $x_1/L=0,5$  -  $y_1/W=0,25$  )

Şekil 5.30' da delikli kompozit bir plakanın eigenvalue yük çarpanı değerleri gösterilmektedir. (Katman açısı  $[0/60/0/-60]$  -  $R_a/R_b=1,5$  -  $W/L=0,25$  -  $x_1/L=0,5$  -  $y_1/W=0,25$  -  $\theta=45^\circ$ ). Bulgulara göre; Eigenvalue yük çarpanı mod 1 için 8,302 olduğu, Eigenvalue yük çarpanı mod 2 için 9,5655 olduğu, Eigenvalue yük çarpanı mod 3 için 10,619 olduğu, Eigenvalue yük çarpanı mod 4 için 12,776 olduğu, Eigenvalue yük çarpanı mod 5 için 15,613 olduğu, Eigenvalue yük çarpanı mod 6 için 18,915 olduğu, Eigenvalue yük çarpanı mod 7 için 23,215 olduğu, Eigenvalue yük çarpanı mod 8 için 28,147 olduğu gözlemlenmiştir. Mevcut yükleme koşulları ve sınır şartlarına göre delik konumunun Şekil 5.28' e göre x ekseninde simetrik olarak yer değiştirmesi durumunda Eigenvalue yük çarpanı mod şekli için neredeyse aynı şekilde olduğu gözlemlenmiştir.

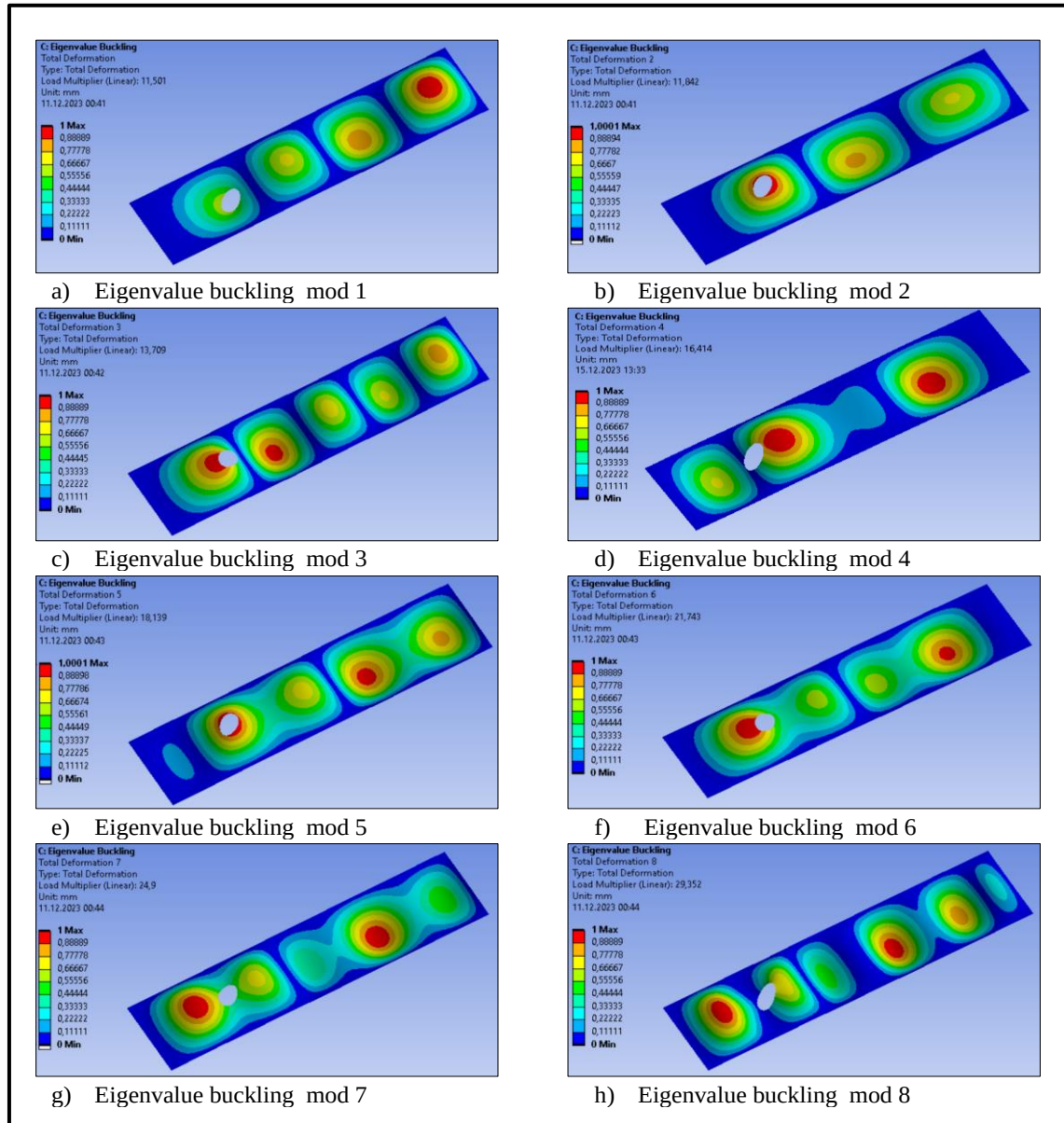


Şekil 5.31. Deformasyon, gerilme ve gerinim değerleri  
(  $[0/90/0/-90]$  -  $x_1/L=0,25$  -  $y_1/W=0,5$  )

Şekil 5.31' de, delikli kompozit bir plakanın deformasyon, gerilme ve gerinim değerleri gösterilmektedir. (Katman açısı  $[0/90/0/-90]$  -  $R_a/R_b=1,5$  -  $W/L=0,25$  -  $x_1/L=0,25$  -  $y_1/W=0,5$  -  $\theta=45^\circ$ ). Bulgulara göre, delikli plakadaki burkulma sırasında, total maksimum deformasyon değerinin 0,029757 olduğu ve deliğin konumuna göre (delik, kuvvetin

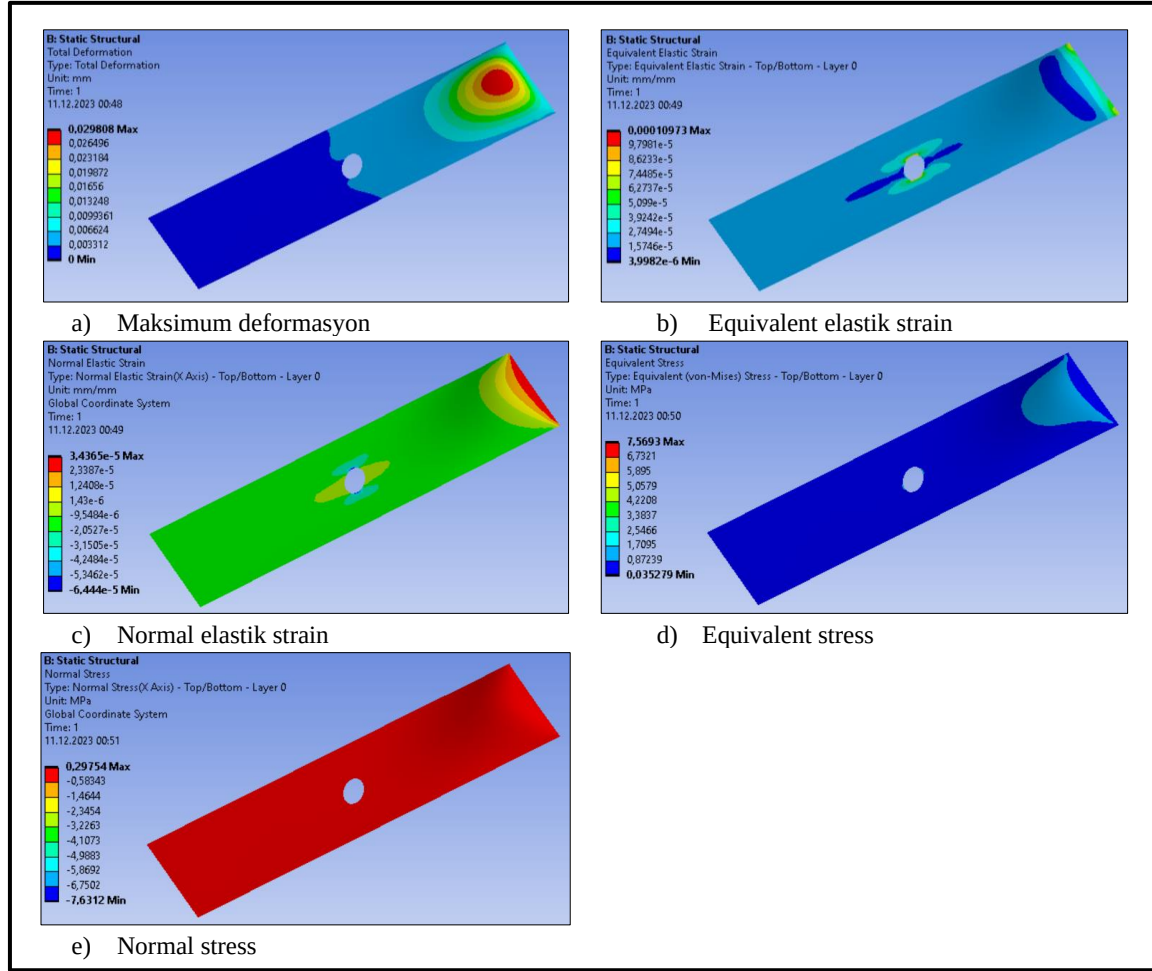


uygulandığı koordinat düzleminde x yönünde uzak mesafede bulunduğu zaman) maksimum deformasyonun deliğe uzak, kuvvetin uygulandığı yere yakın bölgede maksimum olduğu gözlemlenmiştir. Equivalent elastik strain maksimum değerinin 0,00011519 mm olduğu ve gerilmelerin fiber yönelim yönüne göre dağılım gösterdiği gözlemlenmiştir. Normal elastik strain için maksimum 3,4372e-5 mm olduğu ve bu değerlerin delik konumuna göre simetrik bir şekilde oluştuğu gözlemlenmiştir. Equivalent (Von-Mises) stress maksimum değerinin 9,7453 MPa olduğu ve gerilmelerin homojen dağıldığı görülmüştür. Normal stress maksimum 0,29849 MPa olduğu ve gerilmelerin Equivalent (Von-Mises) stress ile benzerlik gösterdiği gözlemlenmiştir.



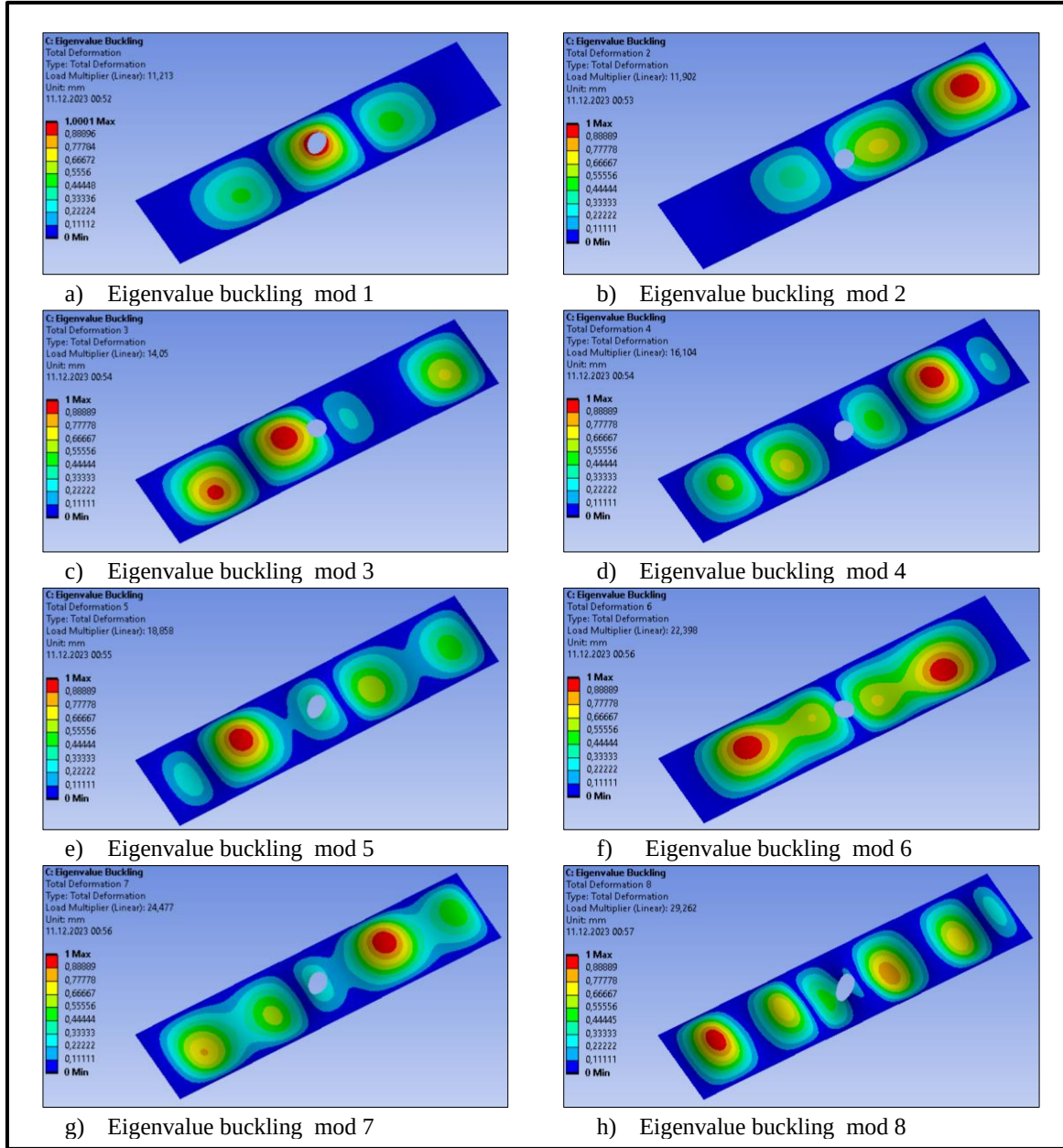
Şekil 5.32. Sekiz farklı mod için eigenvalue yük çarpanı değerleri  
( [0/90/0/-90] -  $x_1/L=0,25$  -  $y_1/W=0,5$  )

Şekil 5.32' de delikli kompozit bir plakanın eigenvalue yük çarpanı değerleri gösterilmektedir. (Katman açısı  $[0/90/0/-90]$  -  $R_a/R_b=1,5$  -  $W/L=0,25$  -  $x_1/L=0,25$  -  $y_1/W=0,5$  -  $\theta=45^\circ$ ). Bulgulara göre; Eigenvalue yük çarpanı mod 1 için 11,501 olduğu gözlemlenmiştir. Bu mod şekli, delik bölgesine uzak, yük uygulanan bölgeye yakın kısımda en büyük deformasyonu sergilemektedir. Eigenvalue yük çarpanı mod 2 için 10,842 olduğu gözlemlenmiştir. Bu mod şekli, en büyük deformasyonların delik konumunda sergilemektedir. Eigenvalue yük çarpanı mod 3 için 13,709 olduğu gözlemlenmiştir. Bu mod şekli, en büyük deformasyonların yükün uygulandığı bölgeden uzak delik konumu etrafında sergilemektedir. Eigenvalue yük çarpanı mod 4 için 16,414 olduğu gözlemlenmiştir. Bu mod şekli, en büyük deformasyonların yükün uygulandığı bölgeye ve delik konumuna yaklaştığını sergilemektedir. Eigenvalue yük çarpanı mod 5 için 18,139 olduğu gözlemlenmiştir. Bu mod şekli, en büyük deformasyonların delik konumu çevresinde ve delik konumu ile yük uygulanan taraf arasında sergilemektedir. Eigenvalue yük çarpanı mod 6 için 21,743 olduğu gözlemlenmiştir. Bu mod şekli, en büyük deformasyonların yükün uygulandığı taraf ve fixlenmiş tarafa yakın bölgelerde oluştuğunu sergilemektedir. Eigenvalue yük çarpanı mod 7 için 24,9 olduğu gözlemlenmiştir. Bu mod şekli, en büyük deformasyonların mod 6 ile benzer özellikler gösterdiğini sergilemektedir. Eigenvalue yük çarpanı mod 8 için 29,352 olduğu gözlemlenmiştir. Bu mod şekli için, en büyük deformasyonların mod 6 ve mod 7 ye benzer özellikler gösterdiğini fakat daha düzensiz oluştuğunu sergilemektedir.



Şekil 5.33. Deformasyon, gerilme ve gerinim değerleri  
 ([0/90/0/-90] -  $x_1/L=0,5$  -  $y_1/W=0,5$ )

Şekil 5.33' de, delikli kompozit bir plakanın deformasyon, gerilme ve gerinim değerleri gösterilmektedir. (Katman açısı [0/90/0/-90] -  $R_a/R_b=1,5$  -  $W/L=0,25$  -  $x_1/L=0,5$  -  $y_1/W=0,5$  -  $\theta=45^\circ$ ). Bulgulara göre, delikli plakadaki burkulma sırasında, total maksimum deformasyon değerinin 0,029808 olduğu ve deliğin konumuna göre (delik, kuvvetin uygulandığı koordinat düzleminde x yönünde uzak mesafede bulunduğu zaman) maksimum deformasyonun deliğe uzak, kuvvetin uygulandığı yere yakın bölgede maksimum olduğu gözlemlenmiştir. Equivalent elastik strain maksimum değerinin 0,00010973 mm olduğu ve yüksek değerlerin delik konumu etrafın ile yük uygulanan kenarda meydana geldiği gözlemlenmiştir. Normal elastik strain için maksimum  $3,4365 \times 10^{-5}$  mm olduğu gözlemlenmiştir. Equivalent (Von-Mises) stress maksimum değerinin 7,5693 MPa olduğu ve gerilmelerin delik konumu için değerlendirildiğinde homojen dağıldığı görülmüştür. Normal stress maksimum 0,29754 MPa olduğu ve gerilmelerin homojen dağıldığı gözlemlenmiştir.

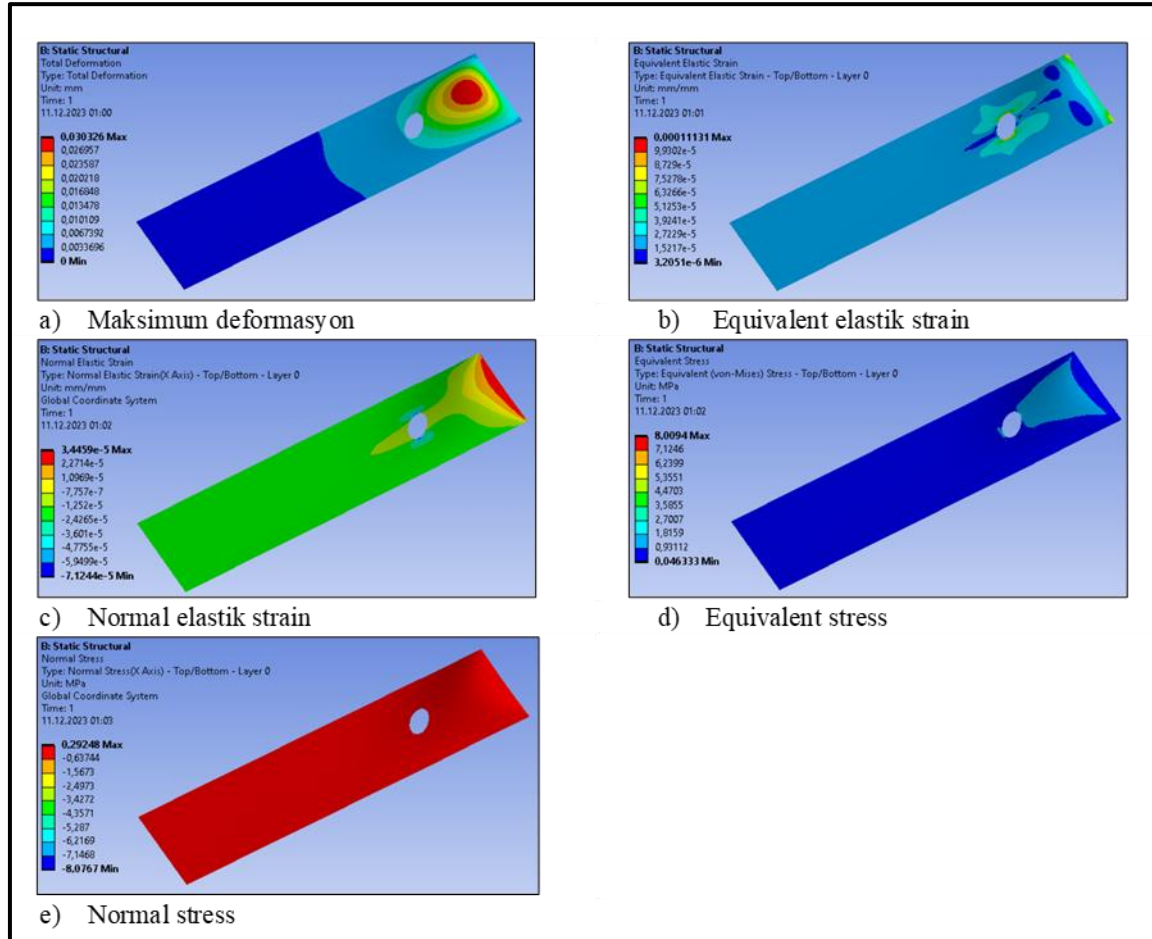


Şekil 5.34. Sekiz farklı mod için eigenvalue yük çarpanı değerleri  
 (  $[0/90/0/-90]$  -  $x_1/L=0,5$  -  $y_1/W=0,5$  )

Şekil 5.34' de delikli kompozit bir plakanın eigenvalue yük çarpanı değerleri gösterilmektedir. (Katman açısı  $[0/90/0/-90]$  -  $R_a/R_b=1,5$  -  $W/L=0,25$  -  $x_1/L=0,5$  -  $y_1/W=0,5$  -  $\theta=45^\circ$ ). Bulgulara göre; Eigenvalue yük çarpanı mod 1 için 11,231 olduğu gözlemlenmiştir. Bu mod şekli, delik konumu etrafında en büyük deformasyonu sergilemektedir. Eigenvalue yük çarpanı mod 2 için 11,902 olduğu gözlemlenmiştir. Bu mod şekli, en büyük deformasyonların delik konumu yük uygulanan taraf arasında ve yük uygulanan tarafa daha yakın olduğunu sergilemektedir. Eigenvalue yük çarpanı mod 3 için 14,05 olduğu gözlemlenmiştir. Bu mod şekli, en büyük deformasyonların fixlenmiş kenar



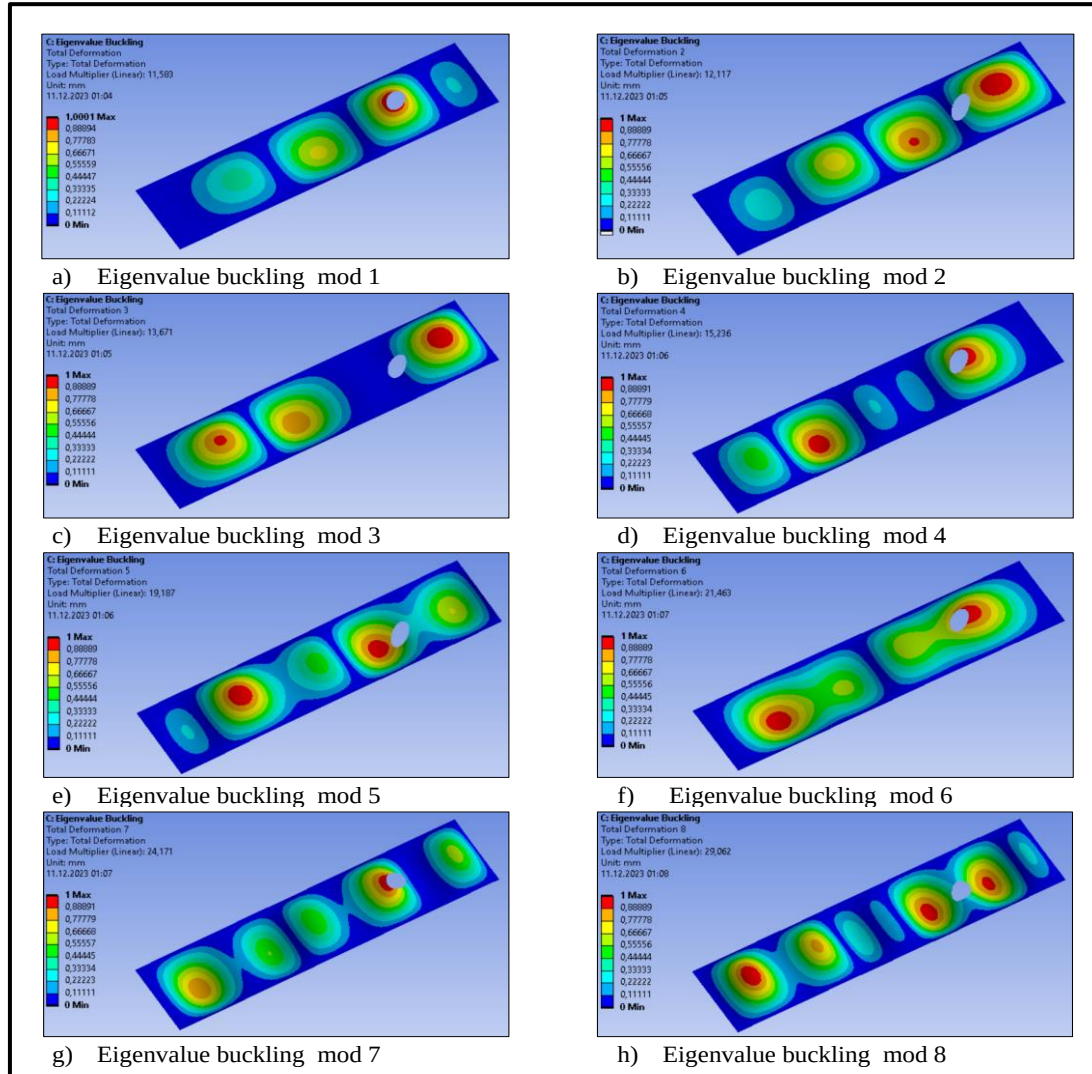
ile delik konumu arasında olduğunu sergilemektedir. Eigenvalue yük çarpanı mod 4 için 16,104 olduğu gözlemlenmiştir. Bu mod şekli, en büyük deformasyonların yük uygulanan kenar ile delik konumu arasında olduğunu sergilemektedir. Eigenvalue yük çarpanı mod 5 için 18,858 olduğu gözlemlenmiştir. Bu mod şekli, en büyük deformasyonların fixlenmiş kenar ile delik konumu arasında olduğunu sergilemektedir. Eigenvalue yük çarpanı mod 6 için 22,398 olduğu gözlemlenmiştir. Bu mod şekli, en büyük deformasyonların yük uygulanan ve fixlenmiş kenarlara yaklaştığını sergilemektedir. Eigenvalue yük çarpanı mod 7 için 24,477 olduğu gözlemlenmiştir. Bu mod şekli, en büyük deformasyonların delik konumu ile yük uygulanan kenar arasında olduğunu sergilemektedir. Eigenvalue yük çarpanı mod 8 için 29,262 olduğu gözlemlenmiştir. Bu mod şekli, en büyük deformasyonların fixlenmiş kenara yakın olduğunu sergilemektedir.



Şekil 5.35. Deformasyon, gerilme ve gerinim değerleri  
( [0/90/0/-90] -  $x_1/L=0,75$  -  $y_1/W=0,5$  )

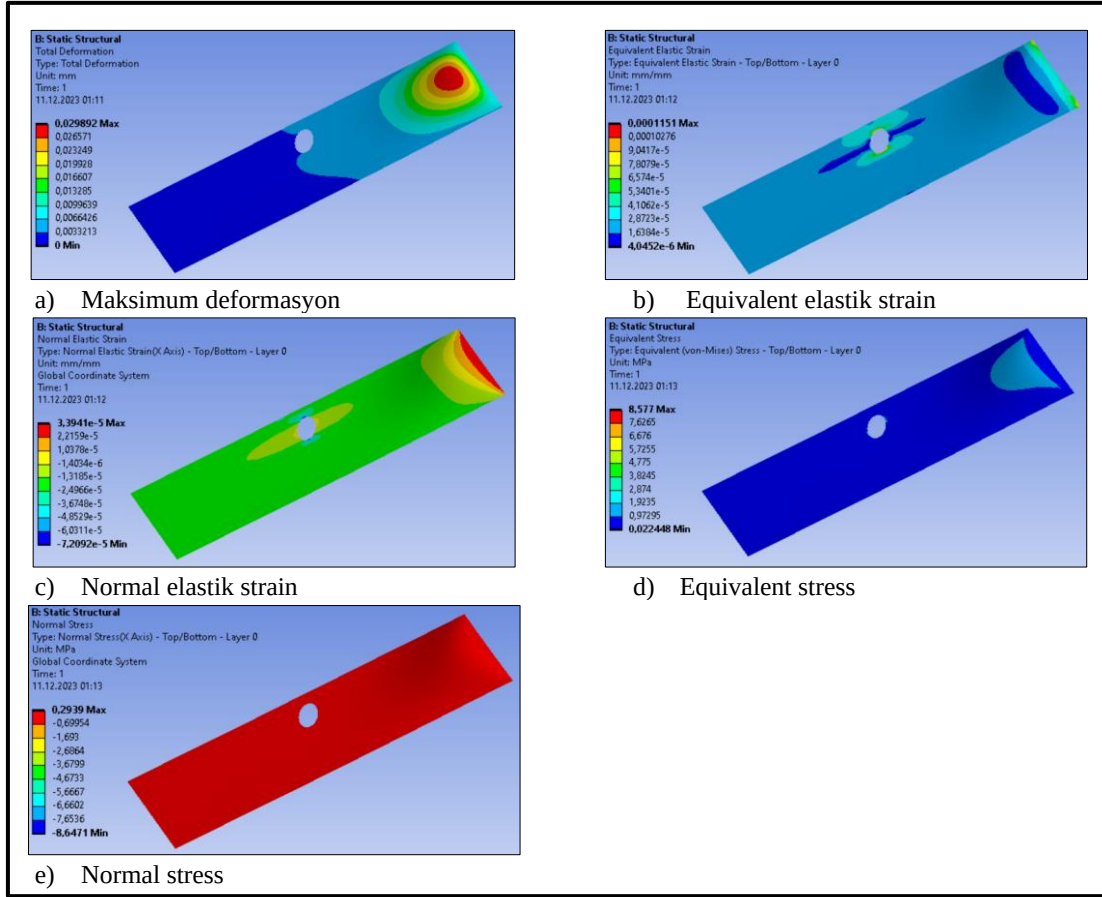
Şekil 5.35' de, delikli kompozit bir plakanın deformasyon, gerilme ve gerinim değerleri gösterilmektedir. (Katman açısı [0/90/0/-90] -  $R_a/R_b=1,5$  -  $W/L=0,25$  -  $x_1/L=0,75$  -  $y_1/W=0,5$

-  $\theta=45^\circ$ ). Bulgulara göre, delikli plakadaki burkulma sırasında, total maksimum deformasyon değerinin 0,030326 mm olduğu ve deliğin konumuna göre (delik, kuvvetin uygulandığı koordinat düzleminde x yönünde yakın mesafede bulunduğu zaman) maksimum deformasyonun deliğe yakın, kuvvetin uygulandığı bölgede maksimum olduğu gözlemlenmiştir. Equivalent elastik strain maksimum değerinin 0,00011131 mm olduğu ve delik konumu etrafında artış meydana geldiği gözlemlenmiştir. Normal elastik strain için maksimum  $3,4459e-5$  mm olduğu ve bu değerlerin delik konumu etrafında (delik x eksenine doğrultusunda) daha fazla etkilendiği gözlemlenmiştir. Equivalent (Von-Mises) stress maksimum değerinin 8,0094 MPa olduğu ve yük uygulanan kenardaki gerilmelerin daha yoğun olduğu görülmüştür. Normal stress maksimum 0,29248 MPa olduğu ve gerilmelerin homojen dağıldığı gözlemlenmiştir.



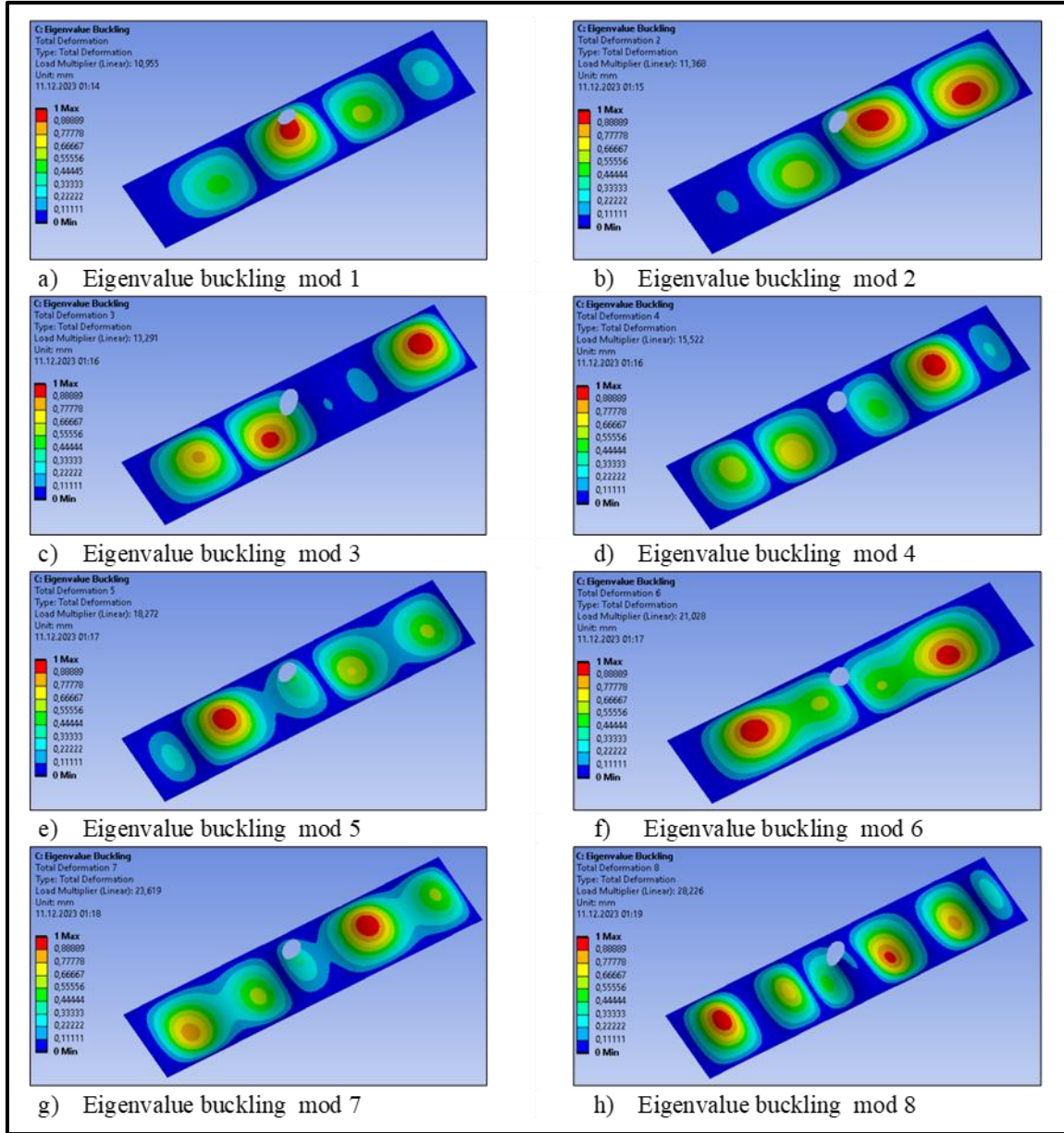
Şekil 5.36. Sekiz farklı mod için eigenvalue yük çarpanı değerleri  
( [0/90/0/-90] -  $x_1/L=0,75$  -  $y_1/W=0,5$  )

Şekil 5.36' da delikli kompozit bir plakanın eigenvalue yük çarpanı değerleri gösterilmektedir. (Katman açısı  $[0/90/0/-90]$  -  $R_a/R_b=1,5$  -  $W/L=0,25$  -  $x_1/L=0,75$  -  $y_1/W=0,5$  -  $\theta=45^\circ$ ). Bulgulara göre; Eigenvalue yük çarpanı mod 1 için 11,583 olduğu gözlemlenmiştir. Bu mod şekli, delik merkezinde en büyük deformasyonu sergilemektedir. Eigenvalue yük çarpanı mod 2 için 12,117 olduğu gözlemlenmiştir. Bu mod şekli, en büyük deformasyonların yük uygulanan kenar ile delik konumu arasında sergilemektedir. Eigenvalue yük çarpanı mod 3 için 13,671 olduğu gözlemlenmiştir. Bu mod şekli, en büyük deformasyonların yük uygulanan kenar ile delik konumu arasında sergilemektedir. Eigenvalue yük çarpanı mod 4 için 15,236 olduğu gözlemlenmiştir. Bu mod şekli, en büyük deformasyonların delik konumunda ve fixlenmiş kenara yakın bölgede sergilemektedir. Eigenvalue yük çarpanı mod 5 için 19,187 olduğu gözlemlenmiştir. Bu mod şekli, en büyük deformasyonların delik merkezi ile fixlenmiş taraf arasında yoğunlaştığını ancak delik konumuna daha yakın olduğunu sergilemektedir. Eigenvalue yük çarpanı mod 6 için 21,463 olduğu gözlemlenmiştir. Bu mod şekli, en büyük deformasyonların yük uygulanan kenarda (delik konumuna yakın) ve fixlenmiş kenarda olduğunu sergilemektedir. Eigenvalue yük çarpanı mod 7 için 24,171 olduğu gözlemlenmiştir. Bu mod şekli, en büyük deformasyonların delik konumu ile plakanın fixlendiği kenar (delik konumuna ve fixlenen kenara yakın) arasındaki bölgede sergilemektedir. Eigenvalue yük çarpanı mod 8 için 29,062 olduğu gözlemlenmiştir. Bu mod şekli, en büyük deformasyonların plaka üzerinde yük uygulanan kenar, fixlenmiş kenar ve delik konumuna göre farklı bölgelere dağılmış şekilde sergilemektedir.



Şekil 5.37. Deformasyon, gerilme ve gerinim değerleri  
( [0/90/0/-90] -  $x_1/L=0,5$  -  $y_1/W=0,75$  )

Şekil 5.37' de, delikli kompozit bir plakanın deformasyon, gerilme ve gerinim değerleri gösterilmektedir. (Katman açısı [0/90/0/-90] -  $R_a/R_b=1,5$  -  $W/L=0,25$  -  $x_1/L=0,5$  -  $y_1/W=0,75$  -  $\theta=45^\circ$ ). Bulgulara göre, delikli plakadaki burkulma sırasında, total maksimum deformasyon değerinin 0,029892 mm olduğu ve deliğin konumuna göre (delik, kuvvetin uygulandığı koordinat düzleminde x yönünde uzak mesafede bulunduğu zaman) maksimum deformasyonun deliğe uzak, kuvvetin uygulandığı bölgede maksimum olduğu gözlemlenmiştir. Equivalent elastik strain maksimum değerinin 0,0001151 mm olduğu ve, delik konumu etrafında gerinim alanındaki dağılımda artış meydana geldiği gözlemlenmiştir. Normal elastik strain için maksimum 3,3941e-5 mm olduğu ve bu değerlerin delik konumu için Equivalent elastik strain değerlerine kıyasla daha düzenli olduğu gözlemlenmiştir. Equivalent (Von-Mises) stress maksimum değerinin 8,577 MPa olduğu ve gerilmelerin plaka üzerinde homojen dağıldığı görülmüştür. Normal stress maksimum 0,2939 MPa olduğu ve gerilmelerin plaka üzerinde homojen dağılım gösterdiği gözlemlenmiştir.

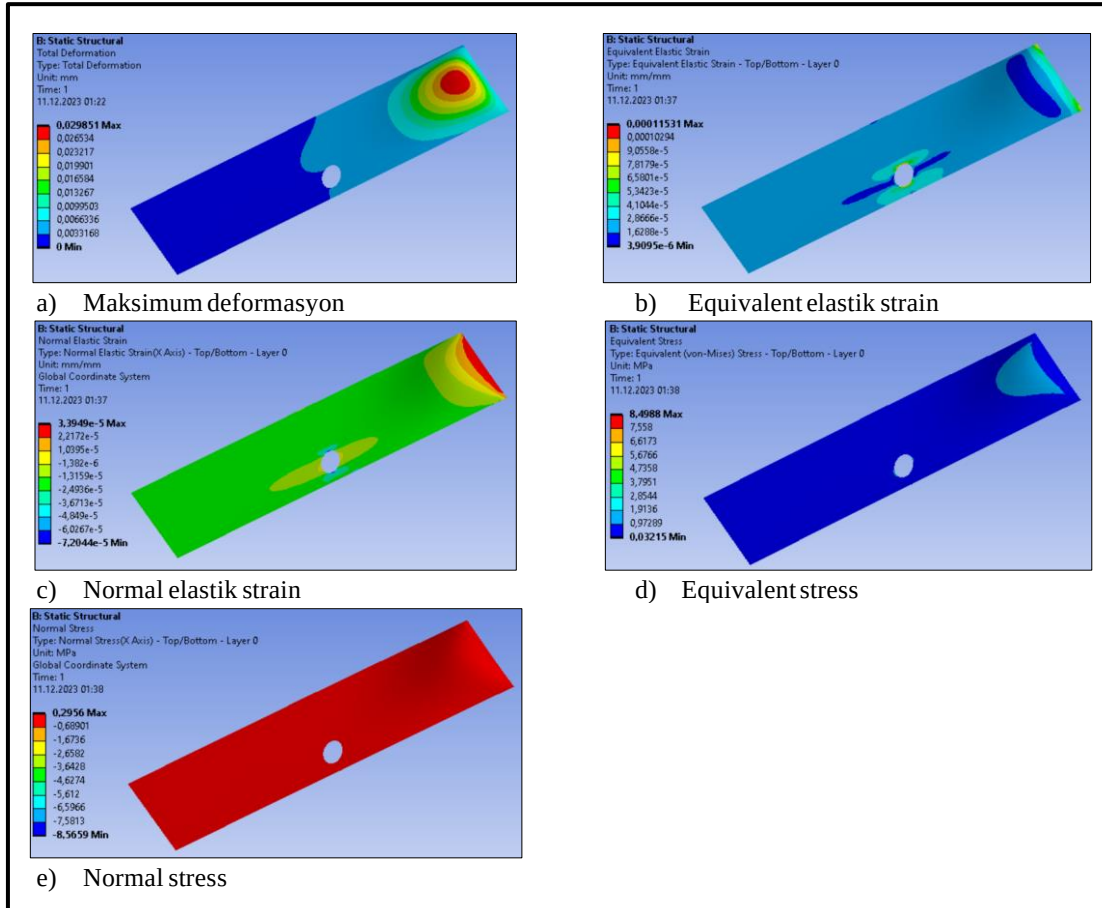


Şekil 5.38. Sekiz farklı mod için eigenvalue yük çarpanı değerleri  
 ([0/90/0/-90] -  $x_1/L=0,5$  -  $y_1/W=0,75$ )

Şekil 5.38' de delikli kompozit bir plakanın eigenvalue yük çarpanı değerleri gösterilmektedir. (Katman açısı [0/90/0/-90] -  $R_a/R_b=1,5$  -  $W/L=0,25$  -  $x_1/L=0,5$  -  $y_1/W=0,75$  -  $\theta=45^\circ$ ). Bulgulara göre; Eigenvalue yük çarpanı mod 1 için 10,955 olduğu gözlemlenmiştir. Bu mod şekli, delik konumu bölgesinde en büyük deformasyonu sergilemektedir. Eigenvalue yük çarpanı mod 2 için 11,368 olduğu gözlemlenmiştir. Bu mod şekli, en büyük deformasyonların delik konumu ile yük uygulanan kenar arasında olduğunu sergilemektedir. Eigenvalue yük çarpanı mod 3 için 13,291 olduğu gözlemlenmiştir. Bu mod şekli, en büyük deformasyonların plakanın delik konumuna göre her iki bölgesinde olduğunu



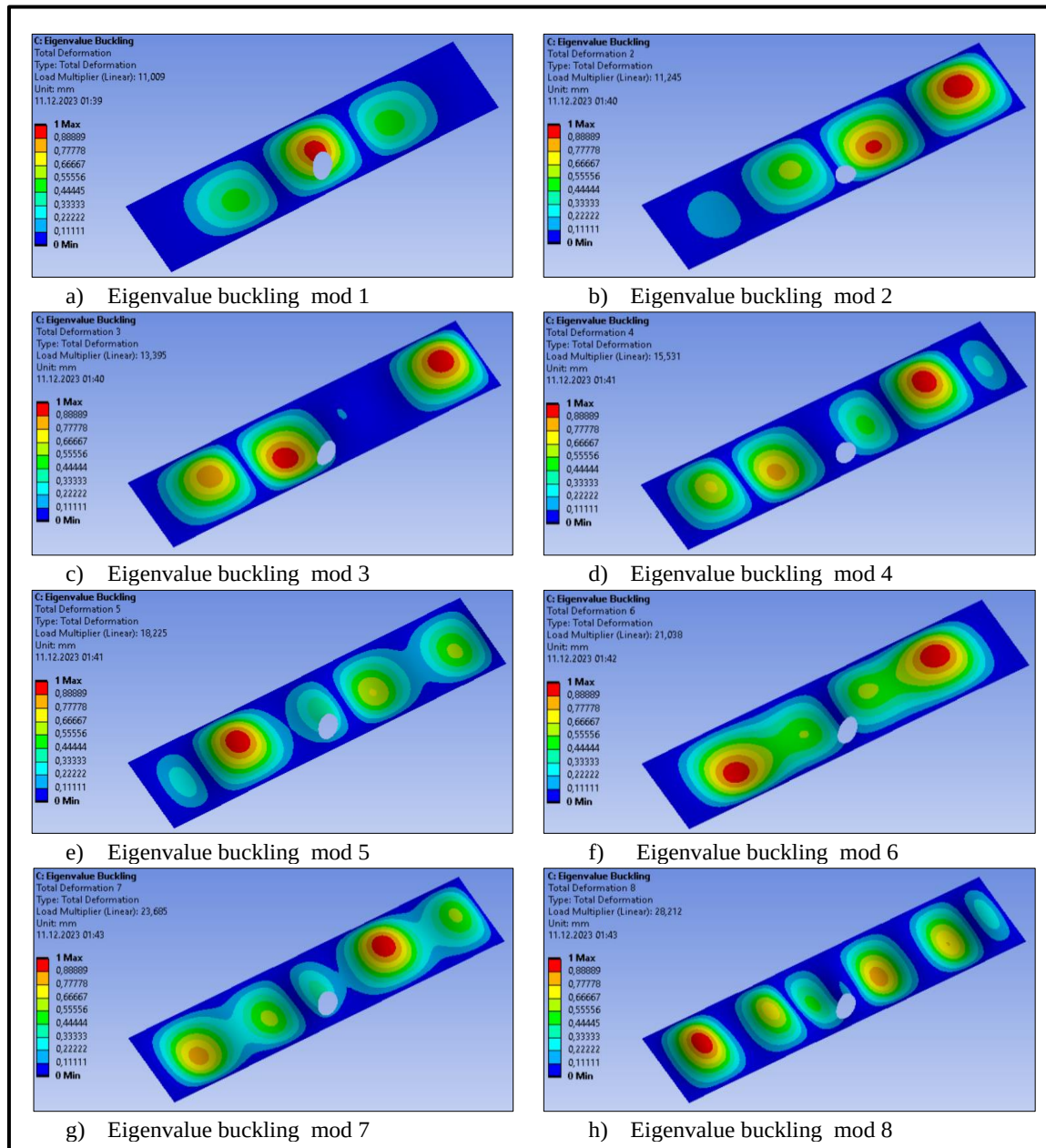
sergilemektedir. Eigenvalue yük çarpanı mod 4 için 15,522 olduğu gözlemlenmiştir. Bu mod şekli, en büyük deformasyonların yük uygulanan kenar ile delik konumu arasında sergilemektedir. Eigenvalue yük çarpanı mod 5 için 18,272 olduğu gözlemlenmiştir. Bu mod şekli, en büyük deformasyonların fixlenmiş kenar ile delik konumu arasında sergilemektedir. Eigenvalue yük çarpanı mod 6 için 21,028 olduğu gözlemlenmiştir. Bu mod şekli, en büyük deformasyonların fixlenmiş kenar ve yük uygulanan kenara yakın olduğunu sergilemektedir. Eigenvalue yük çarpanı mod 7 için 23,619 olduğu gözlemlenmiştir. Bu mod şekli, en büyük deformasyonların delik konumu ile yük uygulanan kenar arasında sergilemektedir. Eigenvalue yük çarpanı mod 8 için 28,226 olduğu gözlemlenmiştir. Bu mod şekli, en büyük deformasyonların plaka üzerinde yük uygulanan kenar, fixlenmiş kenar ve delik konumuna göre farklı bölgelere dağılmış şekilde sergilemektedir.



Şekil 5.39. Deformasyon, gerilme ve gerinim değerleri  
( [0/90/0/-90] -  $x_1/L=0,5$  -  $y_1/W=0,25$  )

Şekil 5.39' da, delikli kompozit bir plakanın deformasyon, gerilme ve gerinim değerleri gösterilmektedir. (Katman açısı [0/90/0/-90] -  $R_a/R_b=1,5$  -  $W/L=0,25$  -  $x_1/L=0,5$  -  $y_1/W=0,25$

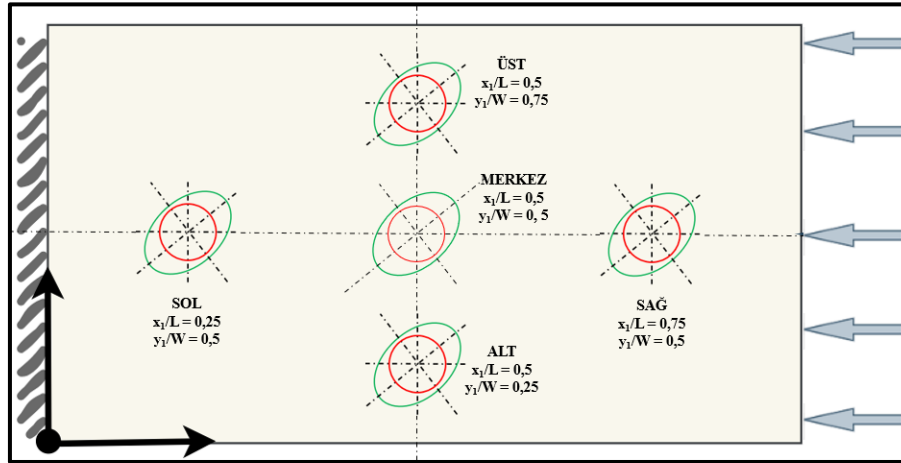
-  $\theta=45^\circ$ ). Bulgulara göre, delikli plakadaki burkulma sırasında, total maksimum deformasyon değerinin 0,029851 mm olduğu, Equivalent elastik strain maksimum değerinin 0,00011531 mm olduğu, Normal elastik strain için maksimum  $3,3949e-5$  mm olduğu, Equivalent (Von-Mises) stress maksimum değerinin 8,4988 MPa olduğu, Normal stress maksimum 0,2956 MPa olduğu gözlemlenmiştir. Mevcut yükleme koşulları ve sınır şartlarına göre deliğin Şekil 5.37' ye göre x ekseninde simetrik olarak yer değiştirmesi durumunda deformasyon, gerilme ve gerinimlerin bölgelerinin de aynı şekilde yer değiştirdiği gözlemlenmiştir.



Şekil 5.40. Sekiz farklı mod için eigenvalue yük çarpanı değerleri  
( [0/90/0/-90] -  $x_1/L=0,5$  -  $y_1/W=0,25$  )

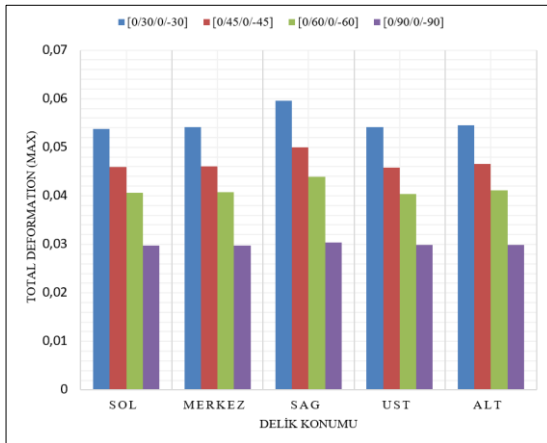
Şekil 5.40' da delikli kompozit bir plakanın eigenvalue yük çarpanı değerleri gösterilmektedir. (Katman açısı  $[0/90/0/-90]$  -  $R_a/R_b=1,5$  -  $W/L=0,25$  -  $x_1/L=0,5$  -  $y_1/W=0,25$  -  $\theta=45^\circ$ ). Bulgulara göre; Eigenvalue yük çarpanı mod 1 için 11,009 olduğu, Eigenvalue yük çarpanı mod 2 için 11,245 olduğu, Eigenvalue yük çarpanı mod 3 için 13,395 olduğu, Eigenvalue yük çarpanı mod 4 için 15,531 olduğu, Eigenvalue yük çarpanı mod 5 için 18,225 olduğu, Eigenvalue yük çarpanı mod 6 için 21,038 olduğu, Eigenvalue yük çarpanı mod 7 için 23,685 olduğu, Eigenvalue yük çarpanı mod 8 için 28,212 olduğu gözlemlenmiştir. Mevcut yükleme koşulları ve sınır şartlarına göre delik konumunun Şekil 5.38' e göre x ekseninde simetrik olarak yer değiştirmesi durumunda Eigenvalue yük çarpanı mod şekli için neredeyse aynı şekilde olduğu gözlemlenmiştir.

Bu çalışmada delik konumu için belirten Sol, Merkez, Sağ, Üst ve Alt terimleri Şekil 5.41' de gösterilmiştir.

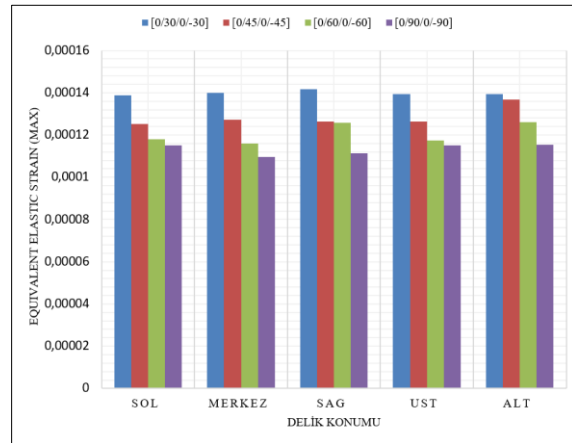


Şekil 5.41. Delik konumu için belirtilen terimlerin gösterimi

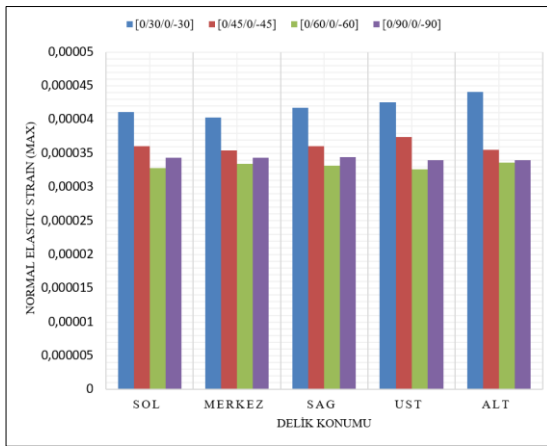




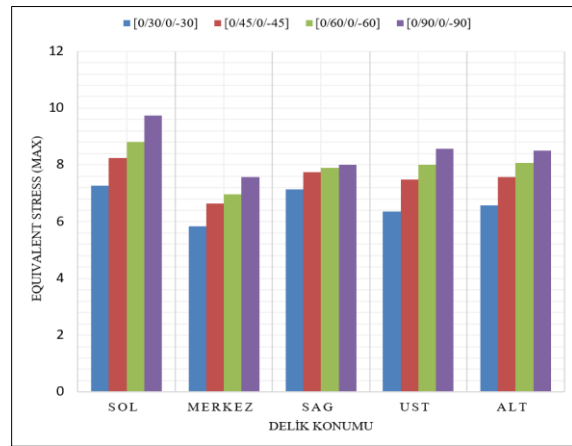
a) Total deformation (max) için katman açısı delik konumu ilişkisi



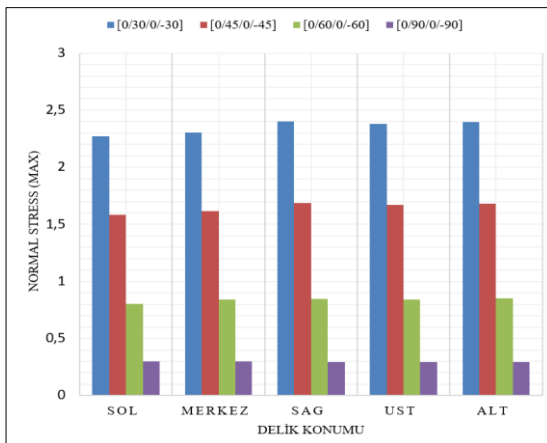
b) Equivalent elastic strain (max) için katman açısı delik konumu ilişkisi



c) Normal elastic strain (max) için katman açısı delik konumu ilişkisi



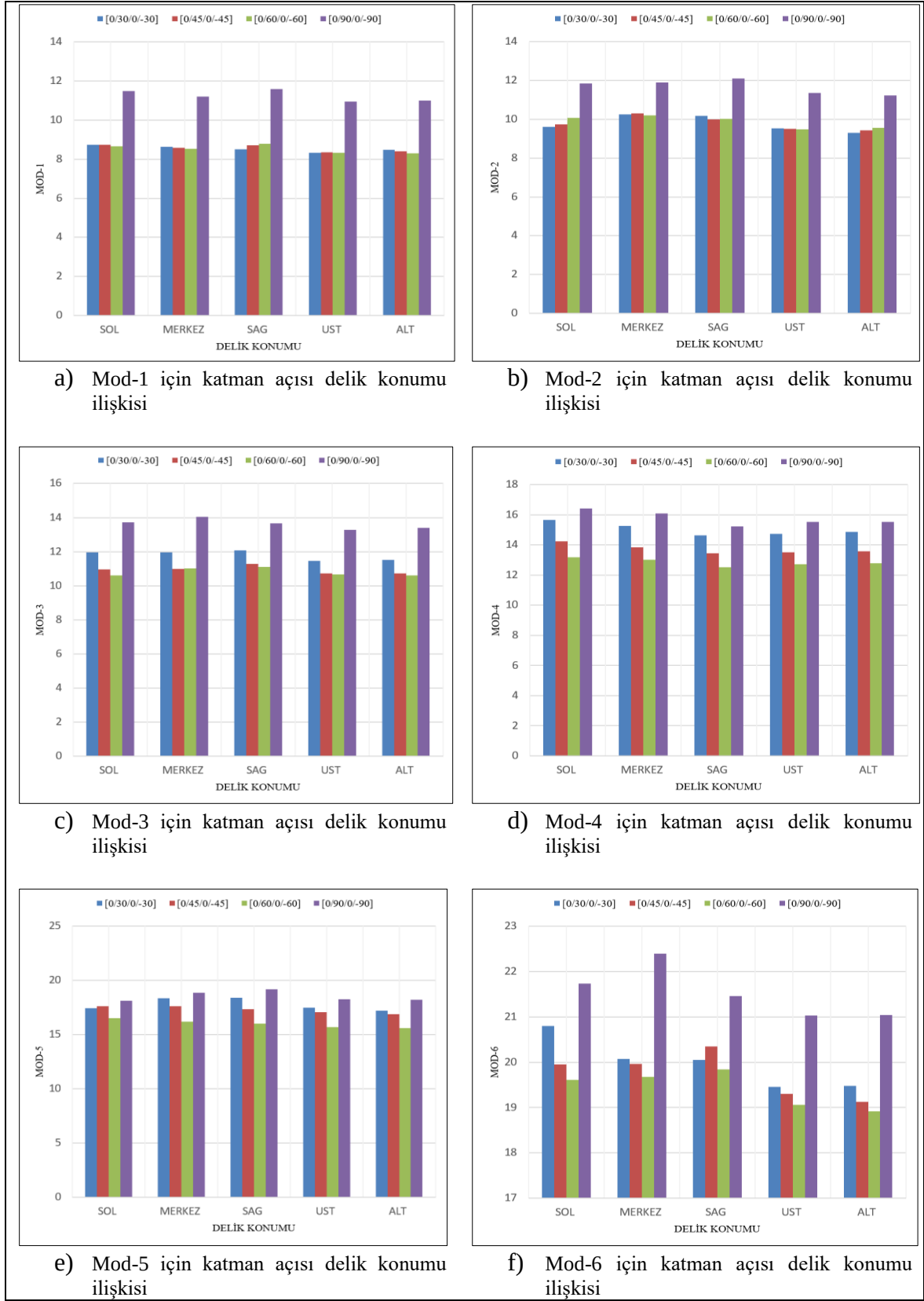
d) Equivalent stress (max) için katman açısı delik konumu ilişkisi



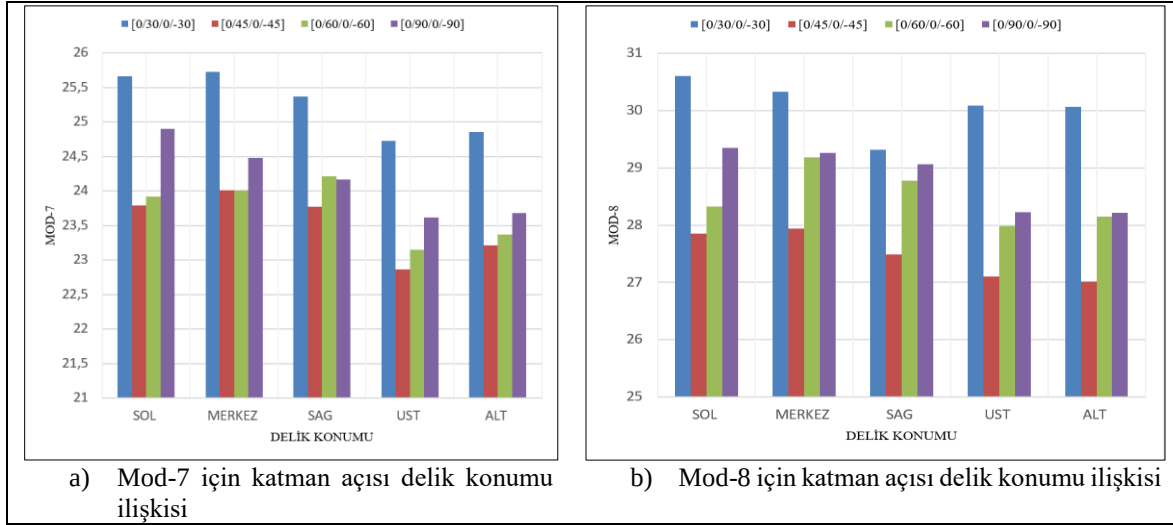
e) Normal stress (max) için katman açısı delik konumu ilişkisi

Şekil 5.42. Deformasyon, gerilme ve gerinim değerleri için katman açısı delik konumu ilişkisi

Şekil 5.42' de, delikli kompozit bir plakanın deformasyon, gerilme ve gerinim değerleri için katman açısı ve delik konumu için karşılaştırılmalı değerler gösterilmektedir. (Katman açısı [0/30/0/-30], [0/45/0/-45], [0/60/0/-60], [0/90/0/-90] -  $R_a/R_b=1,5$  -  $W/L=0,25$  - Sol ( $x_1/L=0,25$  -  $y_1/W=0,5$ ), Merkez ( $x_1/L=0,5$  -  $y_1/W=0,5$ ), Sağ ( $x_1/L=0,75$  -  $y_1/W=0,5$ ), Üst ( $x_1/L=0,5$  -  $y_1/W=0,75$ ), Alt ( $x_1/L=0,5$  -  $y_1/W=0,25$ ) -  $\theta=45^\circ$ ). Bulgulara göre; maksimum total deformasyon en yüksek değerinin katman açısı [0/30/0/-30], delik konumu sağda bulunan kompozit plaka için olduğu ve en düşük değer ise katman açısı [0/90/0/-90], delik konumu sağda kompozit plaka için olduğu gözlemlenmiştir. Equivalent elastic strain (max) en yüksek değerinin katman açısı [0/30/0/-30], delik konumu sağda bulunan kompozit plaka için olduğu ve en düşük değer ise katman açısı [0/90/0/-90], delik konumu solda bulunan kompozit plaka için olduğu gözlemlenmiştir. Normal elastic strain (max) en yüksek değerinin katman açısı [0/30/0/-30], delik konumu altta bulunan kompozit plaka için olduğu ve en düşük değer ise katman açısı [0/60/0/-60], delik konumu altta bulunan kompozit plaka için olduğu gözlemlenmiştir. Equivalent stress (max) en yüksek değerinin katman açısı [0/90/0/-90], delik konumu solda bulunan kompozit plaka için olduğu ve en düşük değer ise katman açısı [0/30/0/-30], delik konumu merkezde bulunan kompozit plaka için olduğu gözlemlenmiştir. Normal stress (max) en yüksek değerinin katman açısı [0/30/0/-30], delik konumu merkezde bulunan kompozit plaka için olduğu ve en düşük değer ise katman açısı [0/90/0/-90], delik konumu solda bulunan kompozit plaka için olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 5.43. Sekiz farklı moddaki eigenvalue yük çarpanı için katman açısı delik konumu ilişkisi

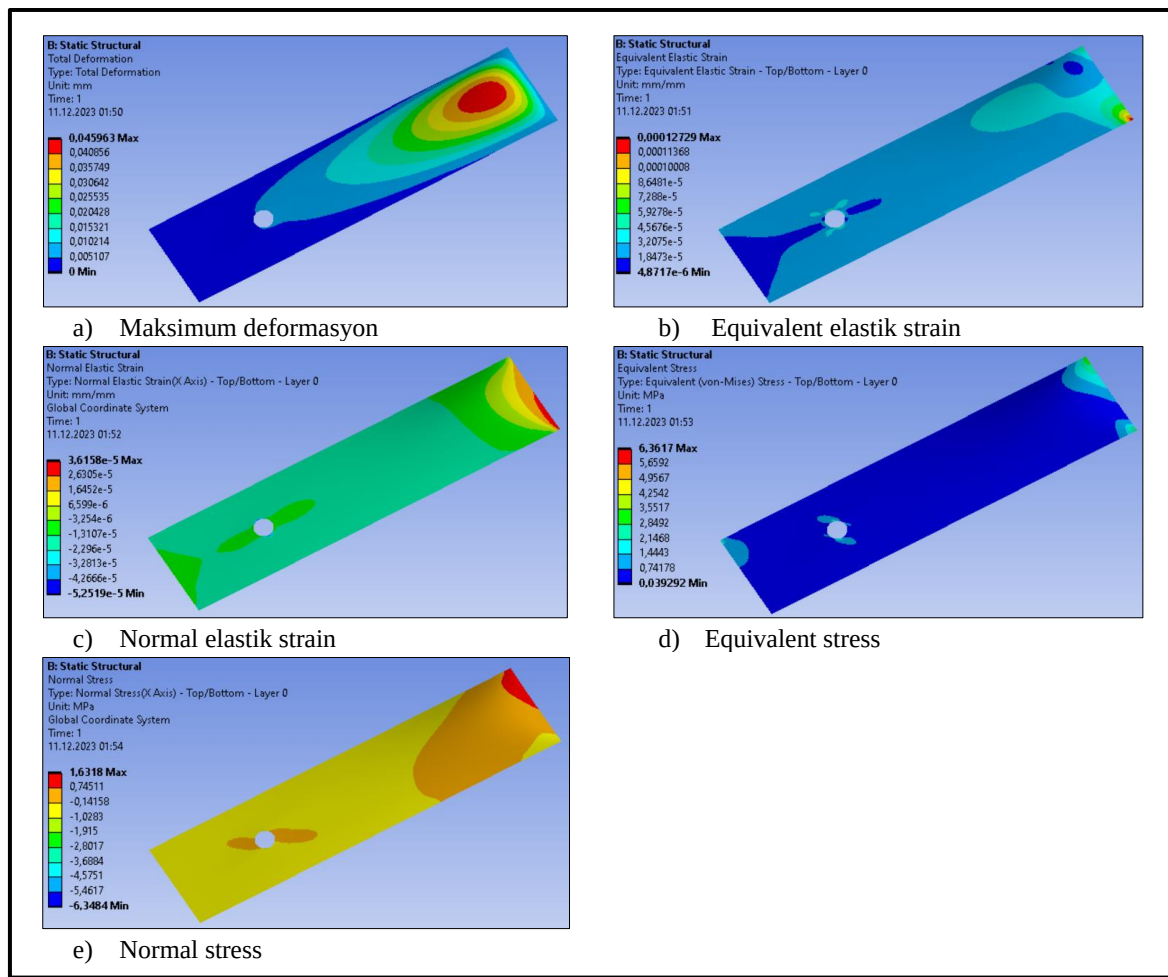


Şekil 5.43. (devam) Sekiz farklı moddaki eigenvalue yük çarpanı için katman açısı delik konumu ilişkisi

Şekil 5.43' de, delikli kompozit bir plakanın sekiz farklı moddaki eigenvalue yük çarpanı için katman açısı delik konumu ilişkisi karşılaştırılmalı değerler gösterilmektedir. (Katman açısı [0/30/0/-30], [0/45/0/-45], [0/60/0/-60], [0/90/0/-90] -  $R_a/R_b=1,5$  -  $W/L=0,25$  - Sol ( $x_1/L=0,25$  -  $y_1/W=0,5$ ), Merkez ( $x_1/L=0,5$  -  $y_1/W=0,5$ ), Sağ ( $x_1/L=0,75$  -  $y_1/W=0,5$ ), Üst ( $x_1/L=0,5$  -  $y_1/W=0,75$ ), Alt ( $x_1/L=0,5$  -  $y_1/W=0,25$ ) -  $\theta=45^\circ$ ). Bulgulara göre; Mod-1 için en yüksek değerinin katman açısı [0/90/0/-90], delik konumu sağda bulunan kompozit plaka için olduğu ve en düşük değer ise katman açısı [0/60/0/-60], delik konumu altta bulunan kompozit plaka için olduğu gözlemlenmiştir. Mod-2 için en yüksek değerinin katman açısı [0/90/0/-90], delik konumu sağda bulunan kompozit plaka için olduğu ve en düşük değer ise katman açısı [0/45/0/-45], delik konumu altta bulunan kompozit plaka için olduğu gözlemlenmiştir. Mod-3 için en yüksek değerinin katman açısı [0/90/0/-90], delik konumu merkezde bulunan kompozit plaka için olduğu ve en düşük değer ise katman açısı [0/60/0/-60], delik konumu sağda bulunan kompozit plaka için olduğu gözlemlenmiştir. Mod-4 için en yüksek değerinin katman açısı [0/90/0/-90], delik konumu solda bulunan kompozit plaka için olduğu ve en düşük değer ise katman açısı [0/60/0/-60], delik konumu solda bulunan kompozit plaka için olduğu gözlemlenmiştir. Mod-5 için en yüksek değerinin katman açısı [0/90/0/-90], delik konumu sağda bulunan kompozit plaka için olduğu ve en düşük değer ise katman açısı [0/60/0/-60], delik konumu solda bulunan kompozit plaka için olduğu gözlemlenmiştir. Mod-6 için en yüksek değerinin katman açısı [0/90/0/-90], delik konumu merkezde bulunan kompozit plaka için olduğu ve en düşük değer ise katman açısı [0/60/0/-60], delik konumu sağda bulunan kompozit plaka için

oluştugu gözlemlenmiştir. Mod-7 için en yüksek değerinin katman açısı  $[0/30/0/-30]$ , delik konumu merkezde bulunan kompozit plaka için oluştuğu ve en düşük değerin ise katman açısı  $[0/45/0/-45]$ , delik konumu üstte bulunan kompozit plaka için oluştuğu gözlemlenmiştir. Mod-8 için en yüksek değerinin katman açısı  $[0/30/0/-30]$ , delik konumu solda bulunan kompozit plaka için oluştuğu ve en düşük değerin ise katman açısı  $[0/45/0/-45]$ , delik konumu üstte bulunan kompozit plaka için oluştuğu gözlemlenmiştir.

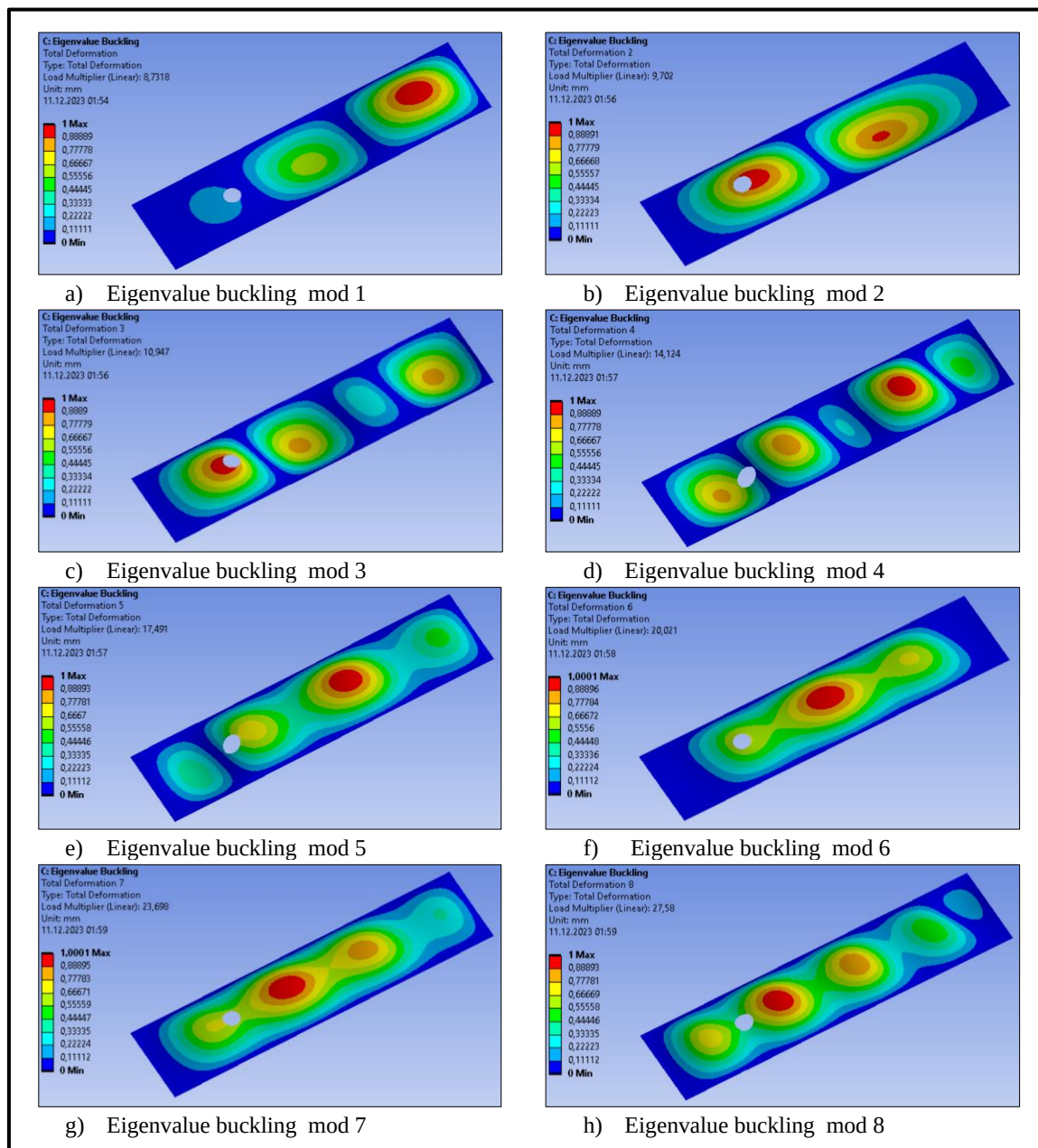
### 5.1.2. Delik Şekli Daire İçin Katman Açıları ve Delik Konumunun Etkisi



Şekil 5.44. Deformasyon, gerilme ve gerinim değerleri  
( $[0/45/0/-45]$  -  $x_1/L=0,5$  -  $y_1/W=0,25$ )

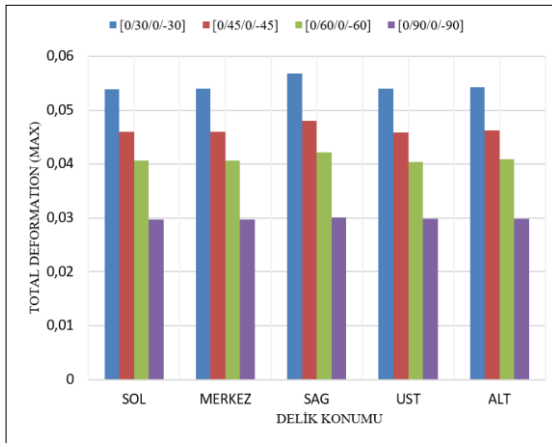
Şekil 5.44' de, delikli kompozit bir plakanın deformasyon, gerilme ve gerinim değerleri gösterilmektedir. (Katman açısı  $[0/45/0/-45]$  -  $R_a/R_b=1$  -  $W/L=0,25$  -  $x_1/L=0,25$  -  $y_1/W=0,5$  -  $\theta=0^\circ$ ). Delik şeklinin daire olduğu durumlar incelenmiştir. Bulgulara göre, delikli plakadaki burkulma sırasında, total maksimum deformasyon değerinin 0,045963 olduğu ve deliğin konumuna göre (delik, kuvvetin uygulandığı koordinat düzleminde x yönünde uzak

mesafede bulunduğu zaman) maksimum deformasyonun deliğe uzak, kuvvetin uygulandığı yere yakın bölgede maksimum olduğu gözlemlenmiştir. Equivalent elastik strain maksimum değerinin 0,00012729 mm olduğu ve bu değerlerin yük uygulanan kenarda artmış olduğu gözlemlenmiştir. Normal elastik strain için maksimum 3,6158e-5 mm olduğu ve bu değerlerin yük uygulanan kenarda artmış olduğu gözlemlenmiştir. Equivalent (Von-Mises) stress maksimum değerinin 6,3617 MPa olduğu ve gerilmelerin dengeli dağıldığı görülmüştür. Normal stress maksimum 1,6318 MPa olduğu ve gerilmelerin yük uygulanan kenarda artmış olduğu gözlemlenmiştir.

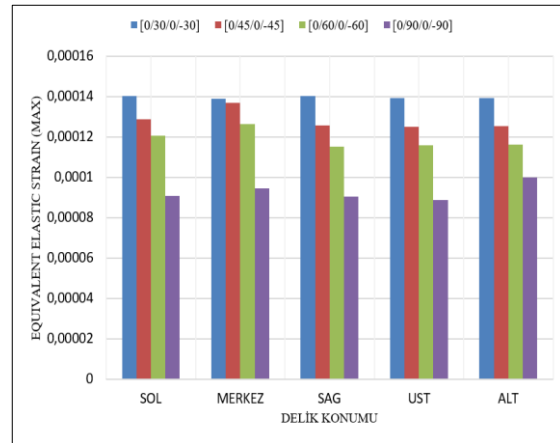


Şekil 5.45. Sekiz farklı mod için eigenvalue yük çarpanı değerleri  
( [0/45/0/-45] -  $x_1/L=0,25$  -  $y_1/W=0,5$  )

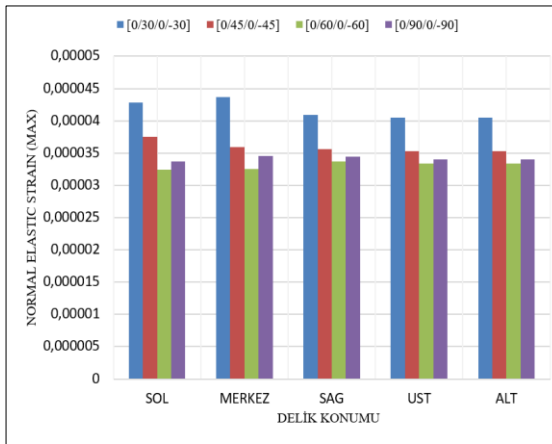
Şekil 5.45' de delikli kompozit bir plakanın eigenvalue yük çarpanı değerleri gösterilmektedir. (Katman açısı  $[0/45/0/-45]$  -  $R_a/R_b=1$  -  $W/L=0,25$  -  $x_1/L=0,25$  -  $y_1/W=0,5$  -  $\theta=0^\circ$ ). Delik şeklinin daire olduğu durumlar incelenmiştir. Bulgulara göre; Eigenvalue yük çarpanı mod 1 için 8,7318 olduğu gözlemlenmiştir. Bu mod şekli, delik bölgesine uzak, yük uygulanan bölgeye yakın kısımda en büyük deformasyonu sergilemektedir. Eigenvalue yük çarpanı mod 2 için 9,702 olduğu gözlemlenmiştir. Bu mod şekli, en büyük deformasyonların delik konumunda sergilemektedir. Eigenvalue yük çarpanı mod 3 için 10,947 olduğu gözlemlenmiştir. Bu mod şekli, en büyük deformasyonların delik konumu etrafında sergilemektedir. Eigenvalue yük çarpanı mod 4 için 14,124 olduğu gözlemlenmiştir. Bu mod şekli, en büyük deformasyonların yükün uygulandığı kenar ile delik konumu arasında (yük uygulanan kenara yakın) sergilemektedir. Eigenvalue yük çarpanı mod 5 için 17,491 olduğu gözlemlenmiştir. Bu mod şekli, en büyük deformasyonların delik konumu ile yük uygulanan kenar arasında sergilemektedir. Eigenvalue yük çarpanı mod 6 için 20,021 olduğu gözlemlenmiştir. Bu mod şekli, en büyük deformasyonların mod 5 ile benzer özellikler sergilemektedir. Eigenvalue yük çarpanı mod 7 için 23,698 olduğu gözlemlenmiştir. Bu mod şekli, en büyük deformasyonların mod 6 ile benzer özellikler gösterdiğini sergilemektedir. Eigenvalue yük çarpanı mod 8 için 27,58 olduğu gözlemlenmiştir. Bu mod şekli için, en büyük deformasyonların mod 6 ve mod 7 ye benzer özellikler gösterdiğini sergilemektedir.



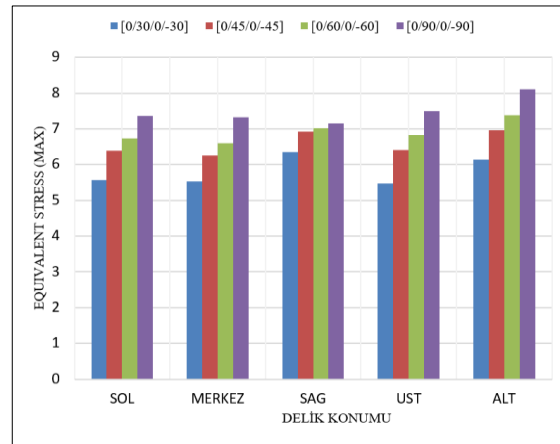
a) Total deformation (max) için katman açısı delik konumu ilişkisi



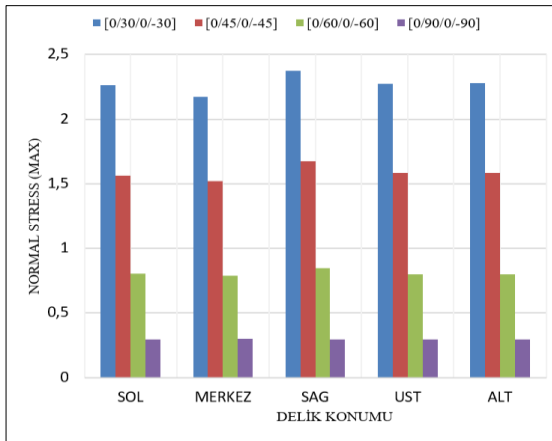
b) Equivalent elastic strain (max) için katman açısı delik konumu ilişkisi



c) Normal elastic strain (max) için katman açısı delik konumu ilişkisi



d) Equivalent stress (max) için katman açısı delik konumu ilişkisi

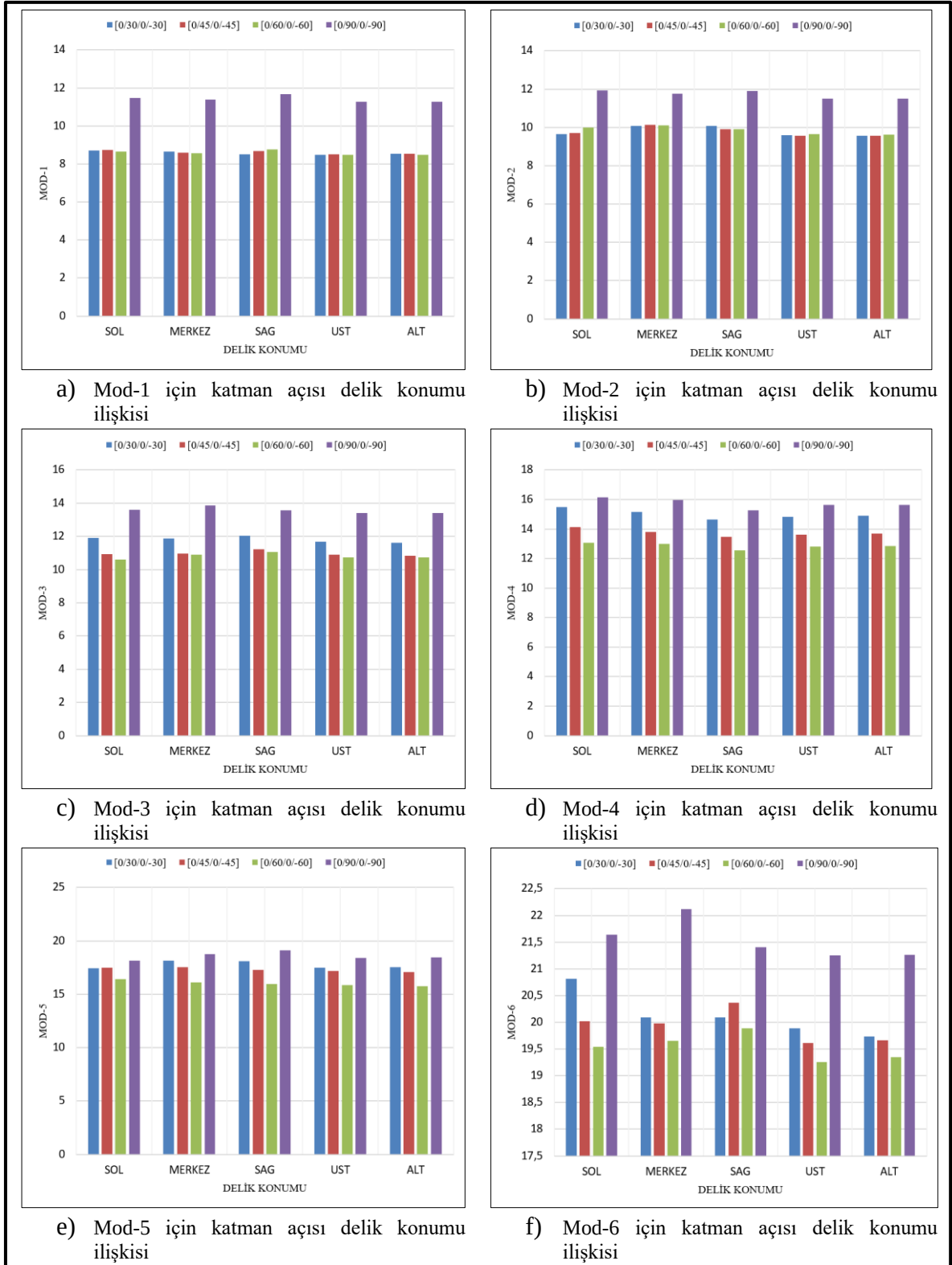


e) Normal stress (max) için katman açısı delik konumu ilişkisi

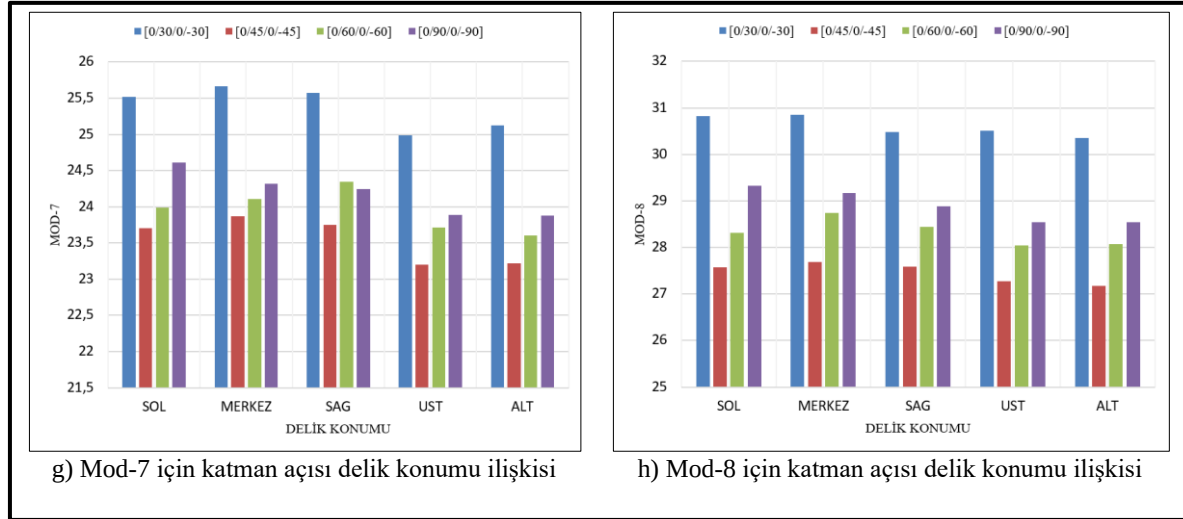
Şekil 5.46. Deformasyon, gerilme ve gerinim değerleri için katman açısı delik konumu ilişkisi



Şekil 5.46' da, delikli kompozit bir plakanın deformasyon, gerilme ve gerinim değerleri için katman açısı ve delik konumu için karşılaştırılmalı değerler gösterilmektedir. (Katman açısı [0/30/0/-30], [0/45/0/-45], [0/60/0/-60], [0/90/0/-90] -  $R_a/R_b=1$  -  $W/L=0,25$  - Sol ( $x_1/L=0,25$  -  $y_1/W=0,5$ ), Merkez ( $x_1/L=0,5$  -  $y_1/W=0,5$ ), Sağ ( $x_1/L=0,75$  -  $y_1/W=0,5$ ), Üst ( $x_1/L=0,5$  -  $y_1/W=0,75$ ), Alt ( $x_1/L=0,5$  -  $y_1/W=0,25$ ) -  $\theta=0^\circ$ ). Delik şeklinin daire olduğu durumlar incelenmiştir. Bulgulara göre; maksimum total deformasyon en yüksek değerinin katman açısı [0/30/0/-30], delik konumu sağda bulunan kompozit plaka için olduğu ve en düşük değer ise katman açısı [0/90/0/-90], delik konumu sağda kompozit plaka için olduğu gözlemlenmiştir. Equivalent elastic strain (max) en yüksek değerinin katman açısı [0/30/0/-30], delik konumu sağda bulunan kompozit plaka için olduğu ve en düşük değer ise katman açısı [0/90/0/-90], delik konumu üstte bulunan kompozit plaka için olduğu gözlemlenmiştir. Normal elastic strain (max) en yüksek değerinin katman açısı [0/30/0/-30], delik konumu merkezde bulunan kompozit plaka için olduğu ve en düşük değer ise katman açısı [0/60/0/-60], delik konumu solda bulunan kompozit plaka için olduğu gözlemlenmiştir. Equivalent stress (max) en yüksek değerinin katman açısı [0/90/0/-90], delik konumu altta bulunan kompozit plaka için olduğu ve en düşük değer ise katman açısı [0/30/0/-30], delik konumu merkezde bulunan kompozit plaka için olduğu gözlemlenmiştir. Normal stress (max) en yüksek değerinin katman açısı [0/30/0/-30], delik konumu sağda bulunan kompozit plaka için olduğu ve en düşük değer ise katman açısı [0/90/0/-90] olan kompozit plaka için olduğu gözlemlenmiştir.



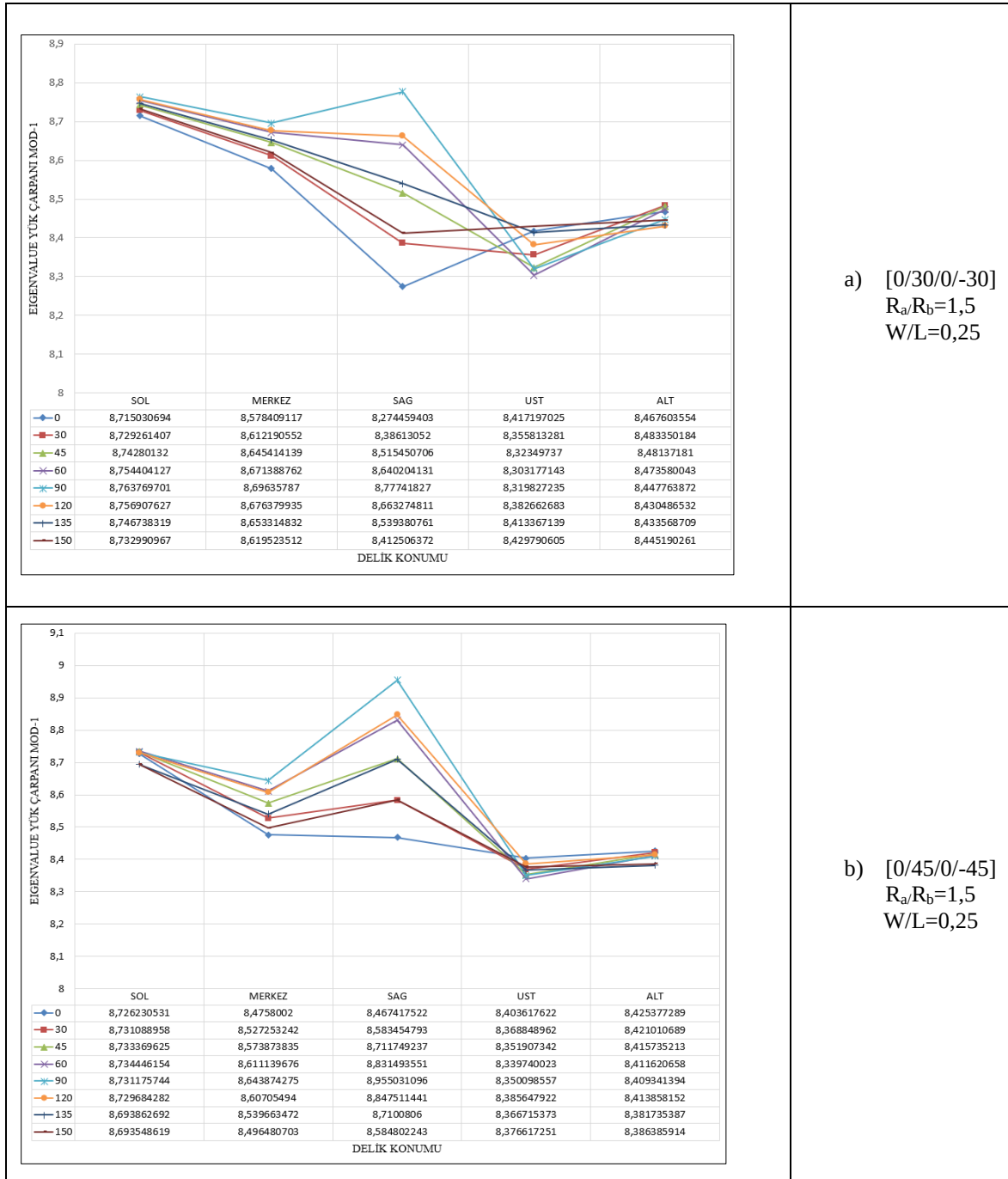
Şekil 5.47. Sekiz farklı mod için eigenvalue yük çarpanı için katman açısı delik konumu ilişkisi



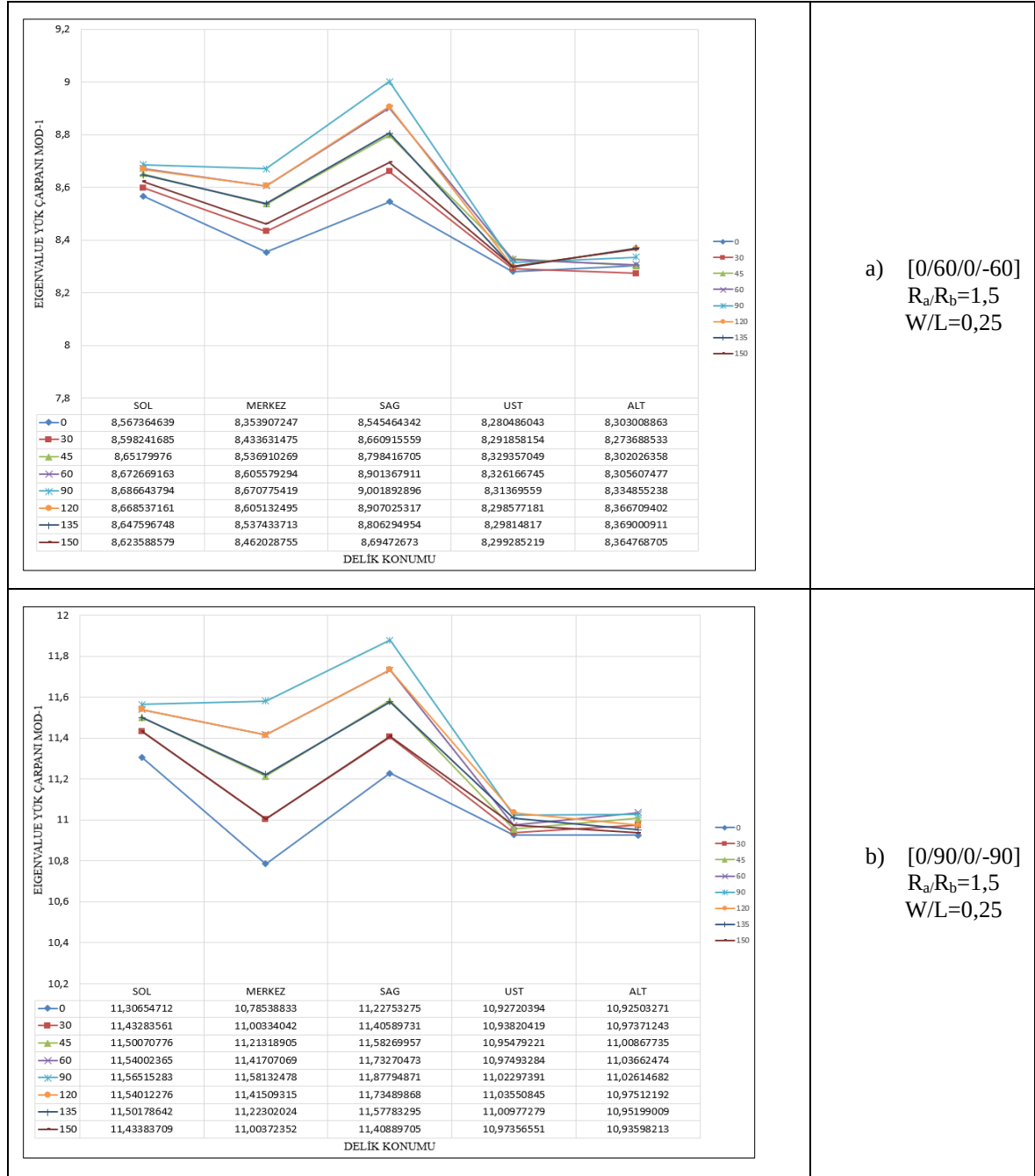
Şekil 5.47. (devam) Sekiz farklı mod için eigenvalue yük çarpanı için katman açısı delik konumu ilişkisi

Şekil 5.47' de, delikli kompozit bir plakanın sekiz farklı moddaki eigenvalue yük çarpanı için katman açısı delik konumu ilişkisi karşılaştırılmalı değerler gösterilmektedir. (Katman açısı  $[0/30/0/-30]$ ,  $[0/45/0/-45]$ ,  $[0/60/0/-60]$ ,  $[0/90/0/-90]$  -  $R_a/R_b=1$  -  $W/L=0,25$  - Sol ( $x_1/L=0,25$  -  $y_1/W=0,5$ ), Merkez ( $x_1/L=0,5$  -  $y_1/W=0,5$ ), Sağ ( $x_1/L=0,75$  -  $y_1/W=0,5$ ), Üst ( $x_1/L=0,5$  -  $y_1/W=0,75$ ), Alt ( $x_1/L=0,5$  -  $y_1/W=0,25$ ) -  $\theta=0^\circ$ ). Delik şeklinin daire olduğu durumlar incelenmiştir. Bulgulara göre; Mod-1 için en yüksek değerinin katman açısı  $[0/90/0/-90]$ , delik konumu sağda bulunan kompozit plaka için olduğu gözlemlenmiştir. Mod-2 için en yüksek değerinin katman açısı  $[0/90/0/-90]$ , delik konumu solda bulunan kompozit plaka için olduğu gözlemlenmiştir. Mod-3 için en yüksek değerinin katman açısı  $[0/90/0/-90]$ , delik konumu merkezde bulunan kompozit plaka için olduğu gözlemlenmiştir. Mod-4 için en yüksek değerinin katman açısı  $[0/90/0/-90]$ , delik konumu solda bulunan kompozit plaka için olduğu gözlemlenmiştir. Mod-5 için en yüksek değerinin katman açısı  $[0/90/0/-90]$ , delik konumu sağda bulunan kompozit plaka için olduğu gözlemlenmiştir. Mod-6 için en yüksek değerinin katman açısı  $[0/90/0/-90]$ , delik konumu merkezde bulunan kompozit plaka için olduğu gözlemlenmiştir. Mod-7 için en yüksek değerinin katman açısı  $[0/30/0/-30]$ , delik konumu merkezde bulunan kompozit plaka için olduğu gözlemlenmiştir. Mod-8 için en yüksek değerinin katman açısı  $[0/30/0/-30]$ , delik konumu solda bulunan kompozit plaka için olduğu gözlemlenmiştir.

### 5.1.3. Delik Konumu ve Delik Konum Açısının Etkisi



Şekil 5.48. Mod-1 için delik konumu ve delik konumu açısı ilişkisi

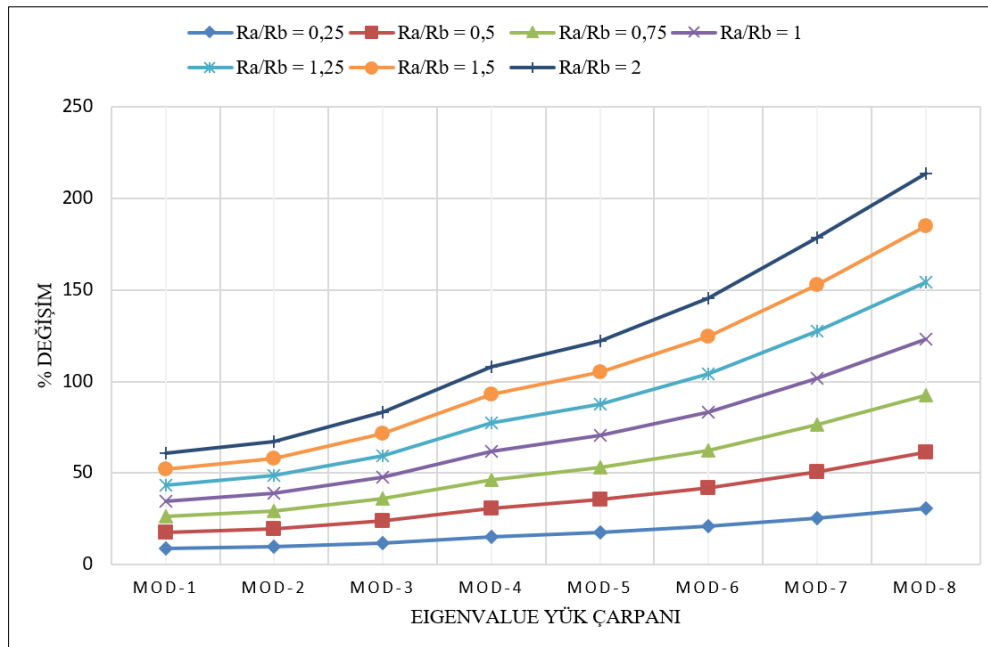


Şekil 5.48. (devam) Mod-1 için delik konumu ve delik konumu açısı ilişkisi

Şekil 5.48' de Mod-1 için delik açısı ve delik konumu ilişkisi gösterilmiştir. Bu karşılaştırma her bir katman açısı için ( [0/30/0/-30], [0/45/0/-45], [0/60/0/-60], [0/90/0/-90] ) ayrı ayrı incelenmiştir. Katman açısı [0/30/0/-30] de en yüksek eigenvalue yük çarpanı katsayısı mod-1 için; delik konumu sağ, konum açısı  $\theta = 90^\circ$  de olduğu ve en düşük eigenvalue yük çarpanı katsayısı mod-1 için; delik konumu sağ, konum açısı  $\theta = 0^\circ$  de olduğu gözlemlenmiştir. Katman açısı [0/45/0/-45] de en yüksek eigenvalue yük çarpanı katsayısı mod-1 için; delik konumu sağ, konum açısı  $\theta = 90^\circ$  de olduğu ve en düşük eigenvalue yük çarpanı katsayısı

mod-1 için; delik konumu sağ, konum açısı  $\theta = 0^\circ$  de olduğu gözlemlenmiştir. Katman açısı  $[0/60/0/-60]$  da en yüksek eigenvalue yük çarpanı katsayısı mod-1 için; delik konumu sağ, konum açısı  $\theta = 90^\circ$  de olduğu ve en düşük eigenvalue yük çarpanı katsayısı mod-1 için; delik konumu alt, konum açısı  $\theta = 30^\circ$  de olduğu gözlemlenmiştir. Katman açısı  $[0/90/0/-90]$  da en yüksek eigenvalue yük çarpanı katsayısı mod-1 için; delik konumu sağ, konum açısı  $\theta = 90^\circ$  de olduğu ve en düşük eigenvalue yük çarpanı katsayısı mod-1 için; delik konumu merkez, konum açısı  $\theta = 0^\circ$  de olduğu gözlemlenmiştir.

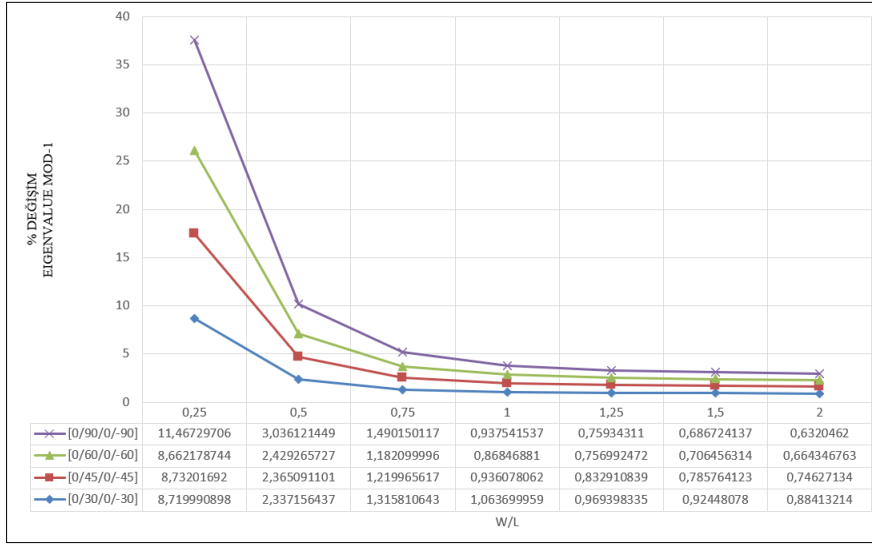
#### 5.1.4. Delik Yarıçap Oranı Etkisi



Şekil 5.49. Sekiz farklı mod için eigenvalue yük çarpanı katsayısı - delik yarıçap oranı ilişkisi ( $[0/30/0/-30]$  -  $x_1/L=0,25$  -  $y_1/W=0,5$  -  $W/L=0,25$  -  $\theta = 0^\circ$  )

Şekil 5.49' da Eigenvalue yük çarpanı katsayısı - delik yarıçap oranı ilişkisi yüzde değişim grafiği gösterilmektedir. (Katman açıları  $[0/30/0/-30]$  -  $x_1/L=0,25$  -  $y_1/W=0,5$  -  $W/L=0,25$  -  $\theta = 0^\circ$  ) Bulgulara göre;  $R_a/R_b=2$  yarıçap oranının modlar arasındaki değişim oranının en yüksek,  $R_a/R_b=0,25$  yarıçap oranının modlar arasındaki değişim oranının en düşük olduğu gözlemlenmiştir.

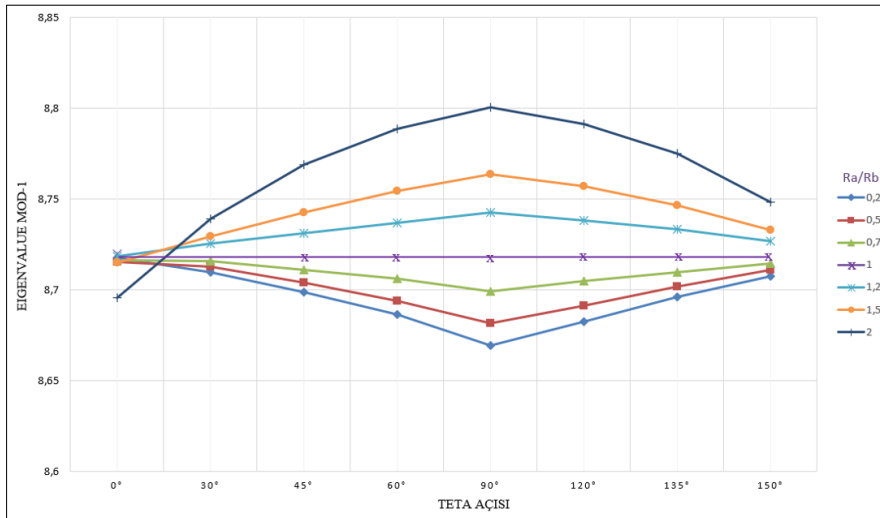
### 5.1.5. En-Boy Oranı Etkisi



Şekil 5.50. Mod 1 için katman en-boy ilişkisi ( $R_a/R_b = 1$  -  $x_1/L=0,25$  -  $y_1/W=0,5$  -  $\theta = 0^\circ$ )

Şekil 5.50' de Eigenvalue yük çarpanı katsayısı mod-1 için katman açıları ve en-boy ilişkisi yüzde değişim grafiği gösterilmektedir. Eigenvalue yük çarpanı katsayısının W/L en-boy oranına göre en yüksek değerinin katman açısı  $[0/90/0/-90]$  en-boy oranı (W/L) 0,25 olduğu, en düşük değerinin ise katman açısı  $[0/30/0/-30]$  en-boy oranı (W/L) 2 olduğu gözlemlenmiştir.

### 5.1.6. Delik Yarıçap Oranı ve Delik Konum Açısı Etkisi



Şekil 5.51. Mod 1 için yarıçap teta açısı ilişkisi  
 ( $[0/30/0/-30]$  -  $W/L = 0,25$  -  $x_1/L=0,25$  -  $y_1/W=0,5$ )

Şekil 5.51’ de delik yarıçap oranının delik konum açısı ile olan ilişkisinin eigenvalue yük çarpanı mod-1 e olan etkisi gösterilmiştir. Grafikteki değerler doğrultusunda; delik yarıçap oranı 2 ( $R_a/R_b=2$ ), delik konum açısı  $90^\circ$  ( $\theta = 90^\circ$ ) için eigenvalue yük çarpanı katsayısının en yüksek değerde olduğu gözlemlenmiştir. Delik yarıçap oranı 0,25 ( $R_a/R_b=0,25$ ), delik konum açısı  $90^\circ$  ( $\theta = 90^\circ$ ) için eigenvalue yük çarpanı katsayısının en düşük değerde olduğu gözlemlenmiştir.

Çizelge 5.1’ de bu çalışmadan elde edilen eigenvalue yük çarpanı katsayısı için bazı parametrelerin sonuçları sekiz farklı mod için sunulmuştur.

Çizelge 5.1. Eigenvalue yük çarpanı katsayısı ansys örnek analiz sonuçları

| Kesik Konum Katman Açılar | W/L  | $R_a/R_b$ | $\theta^\circ$ | Eigenvalue Mod 1 | Eigenvalue Mod 2 | Eigenvalue Mod 3 | Eigenvalue Mod 4 | Eigenvalue Mod 5 | Eigenvalue Mod 6 | Eigenvalue Mod 7 | Eigenvalue Mod 8 |
|---------------------------|------|-----------|----------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| Sol<br>[0/30/0/-30]       | 0,25 | 0,25      | $0^\circ$      | 8,717728136      | 9,860861252      | 11,99171312      | 15,43487378      | 17,87324852      | 20,87682047      | 25,41505203      | 30,78699781      |
|                           | 0,5  | 1,5       | $90^\circ$     | 2,345895787      | 3,488443675      | 5,427016865      | 8,02938603       | 8,63843951       | 9,579273416      | 10,83895871      | 12,99707724      |
|                           | 1    | 2         | $135^\circ$    | 1,06594264       | 2,112250182      | 2,723037204      | 3,168288803      | 4,660394027      | 4,972482726      | 5,439670821      | 5,913952821      |
| Sağ<br>[0/30/0/-30]       | 1,5  | 0,25      | $45^\circ$     | 0,920932253      | 1,289077908      | 2,077756414      | 2,547029608      | 2,896510411      | 3,050738497      | 4,037332521      | 4,074049212      |
|                           | 0,5  | 1,5       | $60^\circ$     | 2,258577538      | 3,372843574      | 5,537504509      | 7,984997656      | 8,581224918      | 9,560657267      | 10,92521794      | 12,78985746      |
|                           | 0,25 | 2         | $120^\circ$    | 8,983419115      | 10,41347634      | 12,21390823      | 14,85863311      | 19,29119272      | 20,09176789      | 25,6527789       | 27,0667286       |
| Merkez<br>[0/30/0/-30]    | 0,25 | 0,25      | $30^\circ$     | 8,697021554      | 10,0242445       | 11,99257835      | 15,04764234      | 18,26413362      | 20,41136615      | 25,60080212      | 30,88266254      |
|                           | 0,5  | 0,75      | $45^\circ$     | 2,320475869      | 3,410964759      | 5,549613436      | 8,1497046        | 8,720027947      | 9,684472416      | 11,04449056      | 13,04895168      |
|                           | 0,75 | 0,25      | $135^\circ$    | 1,305932318      | 2,680865777      | 4,047670701      | 4,439652879      | 5,304596103      | 6,134161766      | 8,26067387       | 8,430770187      |
| Alt<br>[0/30/0/-30]       | 0,75 | 0,75      | $0^\circ$      | 1,302216842      | 2,660080443      | 4,106757749      | 4,443285548      | 5,275514004      | 6,173454841      | 8,216474869      | 8,442718002      |
|                           | 0,75 | 0,5       | $120^\circ$    | 1,304950685      | 2,671918698      | 4,085626242      | 4,441256956      | 5,292672072      | 6,163072755      | 8,240620876      | 8,453048399      |
|                           | 0,75 | 1,5       | $150^\circ$    | 1,297165666      | 2,638714063      | 4,124634937      | 4,397396136      | 5,245154013      | 6,179365694      | 8,168054112      | 8,421174284      |
| Üst<br>[0/30/0/-30]       | 1    | 0,75      | $0^\circ$      | 1,054803226      | 2,132257229      | 2,721747664      | 3,234608831      | 4,676792145      | 5,045488001      | 5,398058299      | 5,995090589      |
|                           | 1    | 1,5       | $30^\circ$     | 1,050065124      | 2,123447499      | 2,704964608      | 3,231829566      | 4,659036211      | 5,029474342      | 5,349503542      | 5,995480164      |
|                           | 1,5  | 0,25      | $90^\circ$     | 0,923566156      | 1,289268038      | 2,07931188       | 2,553767395      | 2,89521675       | 3,05909625       | 4,040389029      | 4,079489315      |
| Sol<br>[0/45/0/-45]       | 1,5  | 1,5       | $0^\circ$      | 0,785668344      | 1,198536217      | 2,072027512      | 2,142985252      | 2,512416635      | 2,867024914      | 3,854137288      | 4,152657157      |
|                           | 2    | 0,25      | $30^\circ$     | 0,746386133      | 0,931240943      | 1,366841153      | 2,036114467      | 2,145232153      | 2,224267914      | 2,57759786       | 2,783625944      |
|                           | 0,25 | 0,5       | $150^\circ$    | 8,7021679        | 9,75081612       | 10,98817892      | 13,98264372      | 17,38067014      | 20,15187269      | 23,47707916      | 27,23043912      |
| Sağ<br>[0/45/0/-45]       | 1,25 | 2         | $30^\circ$     | 0,813864478      | 1,51281549       | 2,11590142       | 2,464280504      | 3,342981479      | 3,500142515      | 4,176916034      | 4,577789073      |
|                           | 0,5  | 1,25      | $90^\circ$     | 2,306443357      | 3,155943702      | 4,911016217      | 7,330831925      | 8,564902276      | 9,441259225      | 10,08967591      | 11,35708395      |
|                           | 1    | 2         | $135^\circ$    | 0,909124557      | 2,022728754      | 2,383805716      | 2,934731943      | 4,212685808      | 4,444937156      | 5,209578069      | 5,749788939      |
| Merkez<br>[0/45/0/-45]    | 1    | 0,25      | $45^\circ$     | 0,931609454      | 2,076515797      | 2,424546226      | 2,960955815      | 4,23421711       | 4,518293031      | 5,299456564      | 5,663701659      |
|                           | 1    | 2         | $90^\circ$     | 0,915264275      | 2,054380975      | 2,37166237       | 2,882861165      | 4,167979377      | 4,476797682      | 5,339760218      | 5,62936391       |
| Alt<br>[0/45/0/-45]       | 1    | 0,75      | $0^\circ$      | 0,929367022      | 2,063816155      | 2,435580396      | 2,967707973      | 4,213552395      | 4,544307112      | 5,259203404      | 5,64145958       |
|                           | 0,5  | 1,25      | $45^\circ$     | 2,334139235      | 3,104437259      | 4,882733935      | 7,214798146      | 8,884450107      | 10,00292069      | 10,19239398      | 11,40148688      |



Çizelge 5.1. (devam) Eigenvalue yük çarpanı katsayısı ansys örnek analiz sonuçları

|                        |      |      |      |             |             |             |             |             |             |             |             |
|------------------------|------|------|------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Üst<br>[0/45/0/-45]    | 0,75 | 0,25 | 0°   | 1,210445391 | 2,340846672 | 3,959360901 | 4,417237352 | 4,904964249 | 5,784063208 | 7,132738483 | 7,751397878 |
|                        | 2    | 2    | 0°   | 0,742195818 | 0,925032921 | 1,357882976 | 2,030058487 | 2,134656431 | 2,219144869 | 2,558574819 | 2,774732167 |
|                        | 0,25 | 1,5  | 30°  | 8,368848962 | 9,524916368 | 10,73892149 | 13,54787222 | 17,10902842 | 19,28205765 | 22,94023437 | 27,16850537 |
| Sol<br>[0/60/0/-60]    | 1    | 2    | 0°   | 0,868146167 | 1,965924963 | 2,513298003 | 3,046800639 | 3,731963599 | 4,422431016 | 5,292680896 | 5,742449985 |
|                        | 1    | 2    | 30°  | 0,86996447  | 1,97112073  | 2,509247259 | 3,03960976  | 3,730912782 | 4,4115388   | 5,309575221 | 5,770018845 |
|                        | 0,5  | 2    | 90°  | 2,420044791 | 3,270335936 | 4,467214323 | 6,644336366 | 8,874683098 | 9,511897763 | 10,06148405 | 10,76997622 |
|                        | 1,25 | 0,75 | 135° | 0,756753837 | 1,617055182 | 1,92680849  | 2,396474852 | 3,470517622 | 3,705922217 | 4,009826703 | 4,311285428 |
| Sağ<br>[0/60/0/-60]    | 1,25 | 0,25 | 60°  | 0,753442314 | 1,618861995 | 1,922733455 | 2,405984472 | 3,462357472 | 3,730468734 | 4,019278408 | 4,316272563 |
|                        | 0,5  | 1,5  | 60°  | 2,334058418 | 3,145607903 | 4,558667264 | 6,796028018 | 8,681381372 | 9,386254378 | 9,938859299 | 11,53718328 |
|                        | 0,5  | 1,5  | 120° | 2,338507526 | 3,141008802 | 4,559766884 | 6,796059486 | 8,687011012 | 9,349417686 | 9,969864486 | 11,53602203 |
|                        | 0,25 | 0,25 | 150° | 8,843314478 | 9,93382009  | 11,04113729 | 12,83231077 | 15,97757564 | 19,97944135 | 24,49917696 | 28,26762465 |
|                        | 0,5  | 0,5  | 150° | 2,397175258 | 3,124774757 | 4,558054521 | 6,796942117 | 8,964929433 | 9,529458791 | 10,16118824 | 11,59366952 |
| Merkez<br>[0/60/0/-60] | 1    | 0,25 | 0°   | 0,862984081 | 1,966453296 | 2,513880782 | 3,065989387 | 3,781758699 | 4,464242527 | 5,340360608 | 5,874004854 |
|                        | 2    | 0,5  | 60°  | 0,662516001 | 0,877806908 | 1,430538859 | 1,860885535 | 1,998039639 | 2,223117542 | 2,578957484 | 2,862661187 |
|                        | 2    | 0,75 | 150° | 0,661221843 | 0,876729715 | 1,429274676 | 1,859314462 | 1,995009266 | 2,22195564  | 2,574497135 | 2,856493061 |
| Alt<br>[0/60/0/-60]    | 0,5  | 0,75 | 0°   | 2,423038267 | 3,05695224  | 4,527996161 | 6,690015776 | 9,110249753 | 9,579434628 | 10,22492513 | 11,66415132 |
|                        | 0,75 | 0,75 | 30°  | 1,17066438  | 2,164337163 | 3,874256093 | 4,219647393 | 5,099633647 | 6,242964064 | 6,682844492 | 7,809338648 |
|                        | 2    | 0,25 | 45°  | 0,663487539 | 0,877755133 | 1,432804177 | 1,862195901 | 1,99898118  | 2,22525831  | 2,580357093 | 2,864494879 |
|                        | 0,75 | 1,25 | 135° | 1,167562391 | 2,157613882 | 3,877289957 | 4,22373682  | 5,09283506  | 6,244761353 | 6,669509147 | 7,833460753 |
|                        | 0,25 | 0,75 | 150° | 8,541139272 | 9,686003174 | 10,76914497 | 12,87663394 | 15,81310933 | 19,41711521 | 23,80106746 | 28,09954725 |
| Üst<br>[0/60/0/-60]    | 2    | 1,25 | 30°  | 0,661176375 | 0,873419142 | 1,427310814 | 1,855403361 | 1,994694775 | 2,214569945 | 2,570105779 | 2,846086332 |
|                        | 1,5  | 0,25 | 120° | 0,704954443 | 1,208361225 | 1,881275402 | 2,14095465  | 2,559585697 | 2,943632238 | 3,695402135 | 3,966466098 |
|                        | 1,5  | 1,5  | 150° | 0,701069131 | 1,20026365  | 1,876275182 | 2,14134485  | 2,545449097 | 2,913778085 | 3,682372762 | 3,963588374 |
| Sol<br>[0/90/0/-90]    | 0,75 | 1,5  | 60°  | 1,493525394 | 2,24861436  | 3,730347956 | 5,199289459 | 5,817147056 | 5,971296698 | 7,249792854 | 8,934782302 |
|                        | 1,25 | 0,25 | 90°  | 0,758266722 | 1,844752506 | 2,118394116 | 2,77041994  | 3,547892878 | 4,07331183  | 4,262741533 | 5,042408375 |
|                        | 0,75 | 0,5  | 135° | 1,488979124 | 2,235334034 | 3,776980385 | 5,233413936 | 5,920567685 | 6,016786897 | 7,377582065 | 8,92613272  |
|                        | 1,25 | 2    | 150° | 0,760055492 | 1,841367804 | 2,107361438 | 2,740453637 | 3,499115614 | 4,02139703  | 4,267331341 | 4,9786737   |
| Sağ<br>[0/90/0/-90]    | 0,75 | 0,5  | 0°   | 1,46608855  | 2,217735534 | 3,808542063 | 5,193742189 | 5,92322463  | 6,057144684 | 7,397659407 | 8,810039235 |
|                        | 2    | 0,5  | 30°  | 0,628778165 | 0,933955406 | 1,7631344   | 1,866186353 | 1,93345294  | 2,508792953 | 3,031981695 | 3,493538916 |
|                        | 2    | 1,25 | 30°  | 0,62601358  | 0,93314945  | 1,753679714 | 1,850788477 | 1,932328595 | 2,509471409 | 3,023896199 | 3,490251823 |
|                        | 1    | 0,75 | 135° | 0,923232131 | 1,919296425 | 3,023884323 | 3,617273713 | 4,087184168 | 5,342144585 | 5,900537828 | 6,49459584  |
| Merkez<br>[0/90/0/-90] | 0,25 | 0,25 | 0°   | 11,63586247 | 12,34083555 | 13,85889359 | 15,95602455 | 18,90203298 | 22,11678214 | 24,42498044 | 29,26234961 |
|                        | 0,75 | 0,75 | 0°   | 1,478930153 | 2,211422886 | 3,799862931 | 5,197779295 | 5,88405024  | 6,036861836 | 7,359948327 | 8,866851216 |
|                        | 2    | 2    | 135° | 0,624244698 | 0,929904925 | 1,758885898 | 1,874350576 | 1,922730542 | 2,468671981 | 3,017119063 | 3,468136557 |
|                        | 0,25 | 2    | 150° | 10,70460477 | 11,90469086 | 14,01590411 | 16,13595572 | 18,8845333  | 22,22613371 | 24,56356738 | 29,13501951 |
| Alt<br>[0/90/0/-90]    | 0,5  | 0,75 | 60°  | 3,031918673 | 4,025147178 | 5,313903856 | 6,808826275 | 9,363514372 | 11,49587629 | 11,91192895 | 12,7133011  |
|                        | 0,75 | 1,25 | 90°  | 1,47277345  | 2,198549797 | 3,777540434 | 5,183417189 | 5,990624382 | 6,105915483 | 7,383482979 | 8,829177944 |
|                        | 2    | 1,25 | 135° | 0,629336766 | 0,928423703 | 1,767200531 | 1,873803579 | 1,92909316  | 2,487983819 | 3,028592798 | 3,484694226 |
| Üst<br>[0/90/0/-90]    | 0,5  | 0,25 | 45°  | 3,036551757 | 4,056409252 | 5,357763139 | 6,822916847 | 9,394231625 | 11,4708936  | 12,13778447 | 12,75711777 |
|                        | 1,5  | 2    | 90°  | 0,67791555  | 1,481526058 | 1,789640277 | 2,209197459 | 3,031231133 | 3,492290385 | 3,802348269 | 4,024977384 |
|                        | 0,5  | 0,75 | 120° | 3,0319395   | 4,025320743 | 5,313794958 | 6,808977584 | 9,363851166 | 11,49533138 | 11,91344584 | 12,71200975 |

## 5.2. Yapay Sinir Ağı Yöntemiyle Kritik Burkulma Yükünün Modellemesi

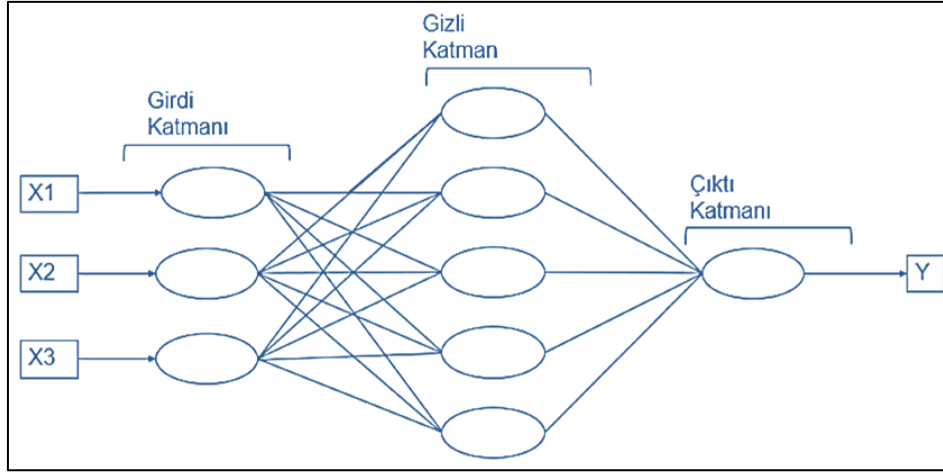
Toplamda 6860 deneyin gerçekleştirildiği bu çalışma, ANSYS ortamında sonlu elemanlar analizi yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu deneylerin sonuçları, yapay sinir ağlarıyla bir model oluşturmak amacıyla kullanılmıştır. Modelleme süreci, MATLAB [42] ortamında gerçekleştirilmiştir ve öğrenme işlemi için Levenberg-Marquardt fonksiyonu kullanılmıştır. Hızlı ve etkili öğrenme yetenekleri nedeniyle tercih edilmiştir.

Levenberg-Marquardt Fonksiyonu, doğrusal olmayan en küçük kareler problemlerinin çözümünde kullanılan bir optimizasyon algoritmasıdır. Bu algoritma, eğrinin veya yüzeyin modellemesinde kullanılan bir matematiksel model ile veriler arasındaki hatayı minimize etmek için iteratif bir yaklaşım kullanır. Bu yöntem, en küçük kareler yaklaşımını kullanarak model parametrelerini tahmin etmeye çalışır ve her iterasyonda modelin verilere daha iyi uymasını sağlamak için parametreleri günceller.

## 5.3. Yapay Sinir Ağları (YSA)

Yapay sinir ağları üzerine yapılan araştırmalar, genellikle "sinir ağları" olarak bilinen bu sistemlerin, insan beyninin geleneksel dijital bilgisayarlardan tamamen farklı bir hesaplama yöntemi kullanması gerçeğini tanıma üzerine kurulmuştur. Beyin, oldukça karmaşık, doğrusal olmayan ve paralel bir bilgisayar (bilgi işleme sistemi) olarak işlev görür. Sinir ağları, nöronlar adı verilen yapısal bileşenleri düzenleme kapasitesine sahiptir, bu sayede özellikle desen tanıma, algı ve motor kontrol gibi belirli hesaplamaları günümüzde mevcut en hızlı dijital bilgisayarlardan çok daha hızlı bir şekilde gerçekleştirebilir [43].

"Sinir ağları" ifadesi, geniş bir yelpazedeki görevlere uygulanan birçok modeli kapsar [44]. Yapay Sinir Ağları (YSA), yapay zekanın alt dallarından biridir. Bu yöntem, insan beyninin öğrenme ve sonrasında muhakeme etme yeteneğini taklit ederek, girdilere karşılık gelen gerekli sayıdaki çıktıyı en iyi doğrulukla tahmin etmek için kullanılan bir modeldir. Yapay sinir ağı modeli, temel olarak girdi, işlem ve çıktı olmak üzere üç ana bölümden oluşur. Bir YSA modeli minimum 2 gizli katman modelinden oluşmalı ve her zaman son katmanın (n'inci katmanın) purelin fonksiyonunu içermelidir. Gizli katman sayısı arttıkça ve kullanılan fonksiyon değiştikçe, öğrenme yeteneği ve hızı da değişmektedir [45-46]. Şekil 5.52' de basit bir yapay sinir ağı modeli görülmektedir.



Şekil 5.52. Yapay sinir ağı modelinin basit gösterimi

Yukarıda açıklanan işlemler, bir yapay sinir ağı (YSA) modelinin oluşturulması ve eğitilmesi sürecini tanımlamaktadır. Bu süreç, matematiksel fonksiyonlara dayanmaktadır ve genel olarak şu adımları içermektedir:

- **Giriş Değerleri ve Çıkış:** İlk adım, YSA'ya giriş olarak verilen değerlerdir. Bu değerler, belirli bir problem veya görevle ilgili bilgileri temsil eder. Bu giriş değerleri, bir matematiksel fonksiyon tarafından işlenir. Her bir girdi değeri için bir çıktı değeri belirlenir. Oluşan çıktı değeri, kendi doğruluk performansını hesaplayarak girdiye karşılık gelen hedef çıktı değerine ne kadar yaklaşıldığını test eder.
- **Matematiksel Fonksiyonlar:** Giriş değerleri, YSA modelindeki matematiksel fonksiyonlar tarafından işlenir. İşlem sonucunda bir çıktı elde edilir.
- **Doğruluk Performansı Hesaplaması:** Elde edilen çıktı, doğruluk performansını değerlendirmek için kullanılır. Gerçek sonuçlarla karşılaştırılarak bir hata veya kayıp fonksiyonu hesaplanır.
- **Geribesleme:** Eğer doğruluk oranı istenilen düzeyde değilse, geribesleme yöntemiyle ağırlıklar ve bias değerleri güncellenir. Bu, öğrenme modelinin iyileştirilmesine ve doğru tahmin yeteneğinin artırılmasına yöneliktir.
- **Yeniden Hesaplama:** Güncellenmiş ağırlıklar ve bias değerleri ile bir sonraki giriş değeri üzerinde işlem yapılır. Bu adım, modelin daha iyi tahminler yapabilmesi için sürekli olarak tekrarlanır.
- **İstatistiksel Değerlendirme:** Elde edilen sonuçlar istatistiksel olarak analiz edilir ve modelin performansı değerlendirilir. Bu değerlendirme, modelin genel başarısını anlamak için kullanılır.

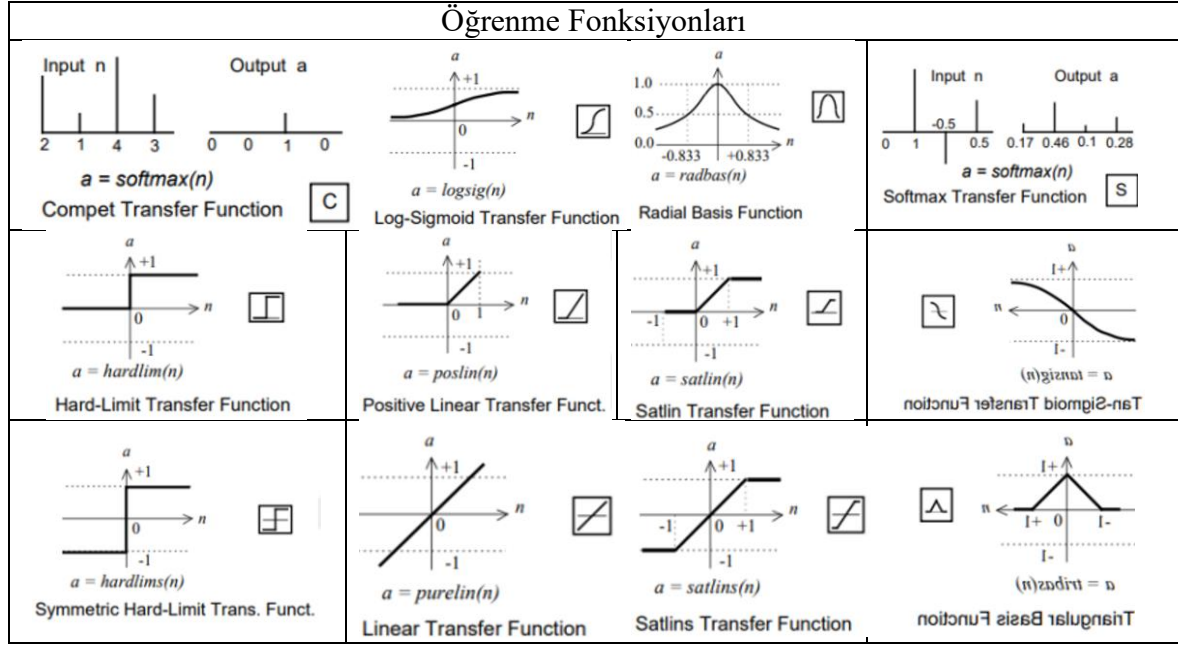
- Yeniden Başlama: Eğer hedef doğruluk oranına ulaşamamışsa, gizli katmandaki nöron sayıları ve diğer parametreler değiştirilerek süreç tekrarlanır.

YSA modelini oluşturmak için kullanılan MATLAB komutları arasında 'newtdnn', 'newcf', 'newc', 'newff', 'newelm' bulunmaktadır. Bu komutlar, farklı türde YSA modelleri oluşturmak için kullanılan araçlardır. Öğrenme modelleri çeşitli parametrelerle yapılandırılarak istenilen görev için en uygun modelin oluşturulmasına olanak tanır. Öğrenme modelleri, aşağıdaki Çizelge 5.2' de belirtilmiştir.

Çizelge 5.2. Öğrenme modelleri

| Fonksiyon | Algoritma                                     |
|-----------|-----------------------------------------------|
| Trainlm   | Levenberg-Marquardt                           |
| Trainbr   | Bayesian Regularization                       |
| trainbfg  | BFGS Quasi-Newton                             |
| trainrp   | Resilient Backpropagation                     |
| trainscg  | Scaled Conjugate Gradient                     |
| traincgb  | Conjugate Gradient with Powell/Beale Restarts |
| traincgf  | Fletcher-Powell Conjugate Gradient            |
| traincgp  | Polak-Ribiere Conjugate Gradient              |
| trainoss  | One Step Secant                               |
| traingdx  | Variable Learning Rate Gradient Descent       |
| traingdm  | Gradient Descent with Momentum                |
| traingd   | Gradient Descent                              |

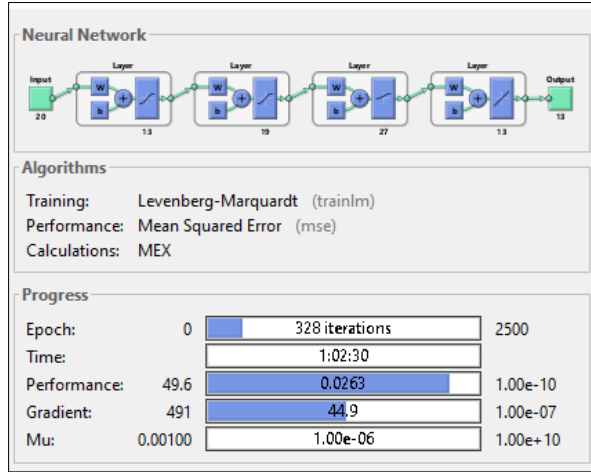
Bu öğrenme metodolojileri arasında, gizli katmanlarda kullanılabilen "logsig," "tansig," "purelin," "hardlim," "tribas" gibi fonksiyonların grafikleri ve algoritmaları, Şekil 5.53' de ayrıntılı olarak sunulmuştur. Her bir algoritmanın ve öğrenme fonksiyonunun performansı, kullanılan veri türüne bağlı olarak değişkenlik gösterir. Model oluşturma sürecinde genellikle tek bir katmanlı bir model ile başlanır. Bu sayı, bir döngü içinde artırılarak en iyi performansı sağlayan değerler,  $R^2$ , MEP ve RMSE gibi ölçütler üzerinden incelenir ve gerçek model belirlenir.



Şekil 5.53. Öğrenme fonksiyonları [47]

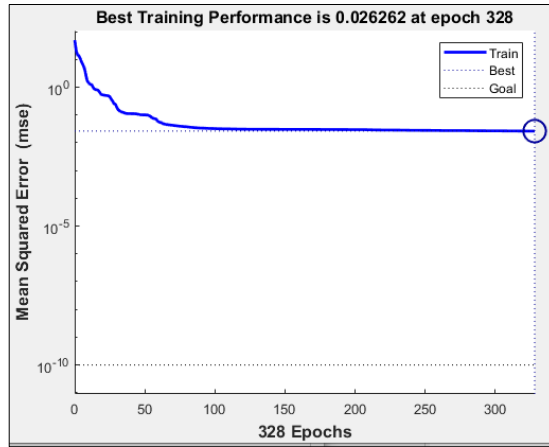
#### 5.4. Yapay Sinir Ağları ile Model Tasarımı

20-[13-19-27-13]-13 nöronları içeren sinir ağı yapısı, kompozit plaka yapısının sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak elde edilen kritik burkulma, deformasyon, gerinim-gerilme değerleri temel alınarak oluşturulmuştur. Bu model, kompozit yapının kritik burkulma değeri, oryantasyon açıları ve geometrik parametreleri gibi 20 adet girdi parametrelerini içermektedir. Ayrıca, modelde tansig-13, tansig-19, logsig-27 ve pürelin-13 fonksiyonları içeren katmanlar bulunmaktadır. Çıkış kısmında ise kritik burkulma yükü, deformasyon ve gerinim-gerilim bilgisini sağlayan 13 adet çıktı elde ettiğimiz bir yapı kullanılmıştır. Oluşturulan model, Şekil 5.54' de gösterildiği gibi tasarlanmıştır.

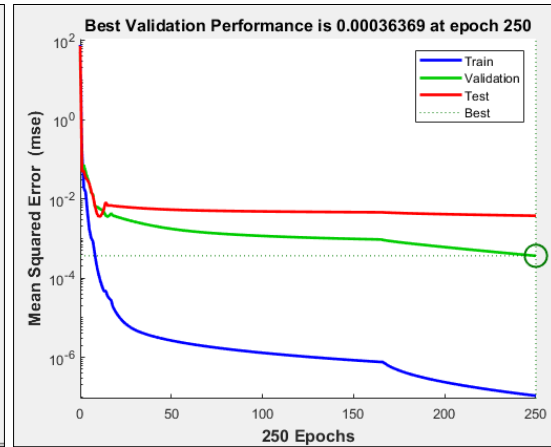


Şekil 5.54. Tasarlanan yapay sinir ağı modeli

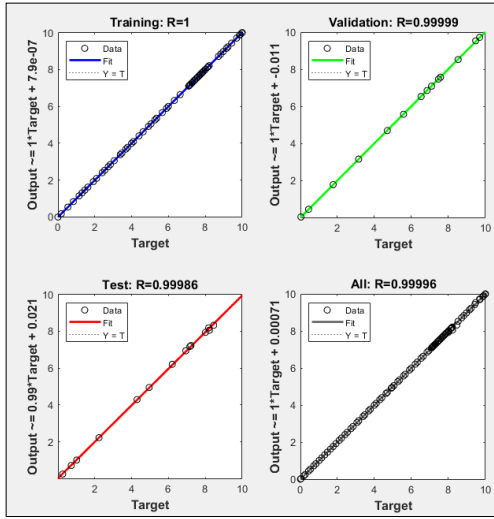
Tasarlanan sinir ağı modelinden elde edilen çıktılara ait grafikler ve görseller, Şekil 5.55’ de detaylı bir şekilde sunulmuştur. Bu grafikler, modelin öğrenme sürecini, tahminlerini ve test regresyonlarını kapsar. Her bir grafiğin üzerinde, modelin hangi aşamada ne kadar başarılı olduğunu gösteren istatistiksel bilgiler yer almaktadır. Bu aşamalar arasında öğrenme aşamasındaki eğilimler, tahmin süreçlerindeki doğruluk ve test regresyonlarında elde edilen sonuçlar detaylı bir değerlendirmeye tabi tutularak modelin genel performansı istatistiksel olarak incelenmiştir. Bu şekilde, modelin güvenilirliği ve etkinliği daha kapsamlı bir perspektiften değerlendirilmiştir.



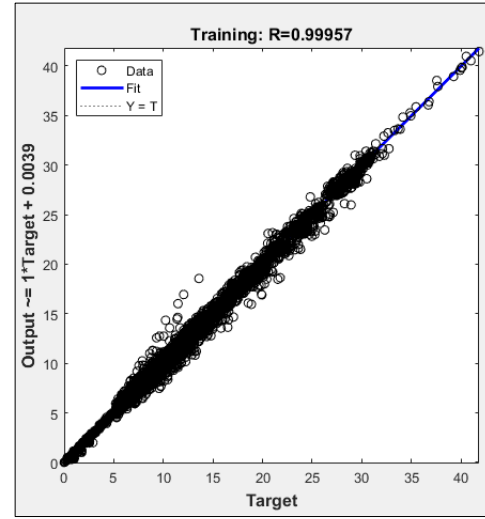
a) YSA algoritmasının en iyi performansı



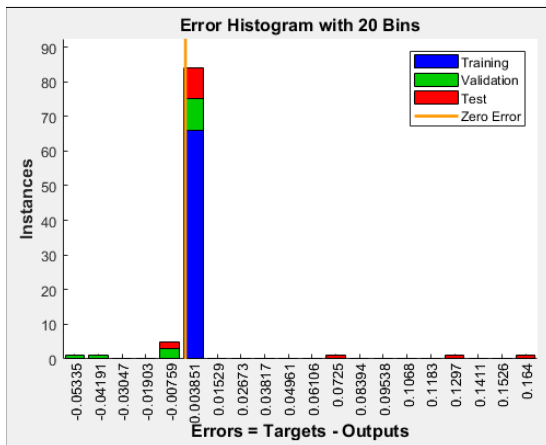
b) Yapay Sinir Ağı Performans Karşılaştırması: Öğrenme, Doğrulama ve Test



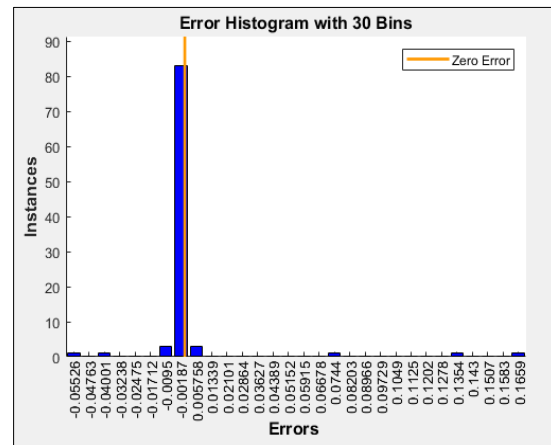
c) Regresyon Performansı Göstergeleri



d) Öğrenme Fonksiyonu Regresyon Verileri



e) 20 Bins Yanılma Histogramı



f) 30 Bins Yanılma Histogramı

Şekil 5.55. Yapay sinir ağı öğrenme modeli: performans ve yanılma analizi

Şekil 5.55a grafiği üzerinde yapılan öğrenme, doğrulama ve test performans karşılaştırmaları değerlendirilmiştir, belirlenen hedef performans değerinin 0,0003639 olduğunu göstermektedir. Oluşturulan Yapay Sinir Ağı (YSA) modelinin öğrenme performansının 10E-07 seviyelerinde hata ile öğrenme sürecini başarıyla gerçekleştirdiği gözlemlenmiştir. Modelin doğrulama yeteneği ve test hataları sırasıyla 10E-03 ve 10E-02 seviyelerine kadar indiği görülmektedir.

Şekil 5.55b grafiğinde, yazılımın öğrenme becerisinin 0,26262 seviyelerinde olduğu belirlenmiştir. Şekil 5.55c grafiğinde ise YSA modelinin Regresyon Performansı Göstergeleri değerlendirilmiştir. Bu değerlendirme sonucunda, öğrenmenin R=1, doğrulamanın R=0,99999, testin R=0,99986 ve genel performansın R=0,99996 olduğu gözlemlenmiştir.

Şekil 5.55d grafiğinde, oluşturulan YSA modelinin Öğrenme Fonksiyonu Regresyon Verileri hesaplanmıştır ve bu değer R=0,99957 olarak belirlenmiştir. Şekil 5.55e ve Şekil 5.55f grafiklerinde ise 20 Bins ve 30 Bins hata histogramları incelenmiş ve sütunlar 20 ve 30 eş parçaya bölünerek yorumlanmıştır. Oluşturulan YSA modelinin büyük çoğunluğunun her iki grafik içinde sıfır hata çizgisinde toplandığı gözlemlenmiştir.

Eğitim, test ve doğrulama performansları, en iyi performans gösteren YSA modelini belirlemek için istatistiksel olarak test edildi. Çizelge 5.3’ de model performansları regresyon analizi (RA) ile istatistiksel olarak test edildi. İstatistiksel olarak, her bir model için ayrı ayrı %OHP (ortalama hata yüzdesi), RMSE (kök-ortalama-kare hatası) ve R<sup>2</sup> (determinasyon katsayısı) değerleri hesaplandı. İstatistiksel hesaplamalar, Eşitlik 5.1, Eşitlik 5.2, Eşitlik 5.3 numaralı denklemler kullanılarak gerçekleştirildi [48-49-50].

Çizelge 5.3. Regresyon analizi

|          | Average Error | Average RMS | Average R <sup>2</sup> |
|----------|---------------|-------------|------------------------|
| FEA- ANN | 4,574250547   | 0,258497907 | 0,99987                |

$$RMSE = \left[ \frac{1}{p} \sum_j |t_j - o_j|^2 \right]^{1/2} \quad (5.1.)$$

$$R^2 = 1 - \left[ \frac{\sum_j (t_j - o_j)^2}{\sum_j (o_j)^2} \right] \quad (5.2.)$$



$$MEP \% = \frac{\sum_j \left( \frac{t_j - o_j}{t_j} \times 100 \right)}{p} \quad (5.3.)$$

## 6. SONUÇ, TARTIŞMA ve ÖNERİLER

Bu çalışmada, içerisinde delik bulunan dört katmanlı bir kompozit plakada oluşan burkulma zorlanmasının sonlu elemanlar yöntemiyle belirlenmesi amaçlanmıştır. Yapılan analizler ve simülasyonlar sonucunda elde edilen veriler, burkulma direnci üzerindeki etkileri değerlendirmek adına önemli bilgiler sunmaktadır.

Sonlu elemanlar analizi, farklı parametrelerin (malzeme özellikleri, plaka ve delik boyutları, katman sayısı ve açısı vb.) burkulma direnci üzerindeki etkilerini açıklamada ve anlamada değerli bir araç sağlamaktadır. Elde edilen sonuçlar, plakanın burkulma direncini belirleyen kritik faktörleri ortaya koymakta ve tasarım süreçlerinde rehberlik etmektedir.

Analiz sonuçlarına dayanarak, farklı en/boy, katman açıları, delik boyutları, delik konumu ve delik konum açıları gibi çeşitli parametrelere sahip kompozit plakalarda oluşan flambaj zorlanmasındaki değişimleri anlamak için çeşitli senaryolar incelenmiştir. En/boy oranı, bir malzeme veya yapı elemanının genel boyut ve şeklini belirleyen kritik bir parametredir. Bu oranın artması, plakanın geometrik özelliklerindeki değişiklikleri ifade eder. Çalışmada elde edilen bulgulara göre;

Çizelge 6.1. Deformasyon, gerilme, gerinim ve eigenvalue sonuç karşılaştırması

|                                 | Katman Açıları | Delik Konumu | W/L  | $R_a/R_b$ | $\theta^\circ$ | Maksimum Değer | Minimum Değer |
|---------------------------------|----------------|--------------|------|-----------|----------------|----------------|---------------|
| Total Deformation (Max)         | [0/90/0/-90]   | Sağ          | 2    | 2         | 90             | ✓              |               |
| Total Deformation (Max)         | [0/90/0/-90]   | Üst          | 0,25 | 0,25      | 60             |                | ✓             |
| Equivalent Elastic Strain (Max) | [0/60/0/-60]   | Sağ          | 1,5  | 0,25      | 0              | ✓              |               |
| Equivalent Elastic Strain (Max) | [0/90/0/-90]   | Sol          | 0,25 | 0,75      | 90             |                | ✓             |
| Normal Elastic Strain (Max)     | [0/60/0/-60]   | Sağ          | 1,5  | 0,25      | 0              | ✓              |               |
| Normal Elastic Strain (Max)     | [0/90/0/-90]   | Alt          | 0,25 | 0,25      | 120            |                | ✓             |
| Equivalent Stress (Max)         | [0/90/0/-90]   | Sağ          | 2    | 0,25      | 0              | ✓              |               |
| Equivalent Stress (Max)         | [0/30/0/-30]   | Sağ          | 0,25 | 2         | 0              |                | ✓             |

Çizelge 6.1. (devam) Deformasyon, gerilme, gerinim ve eigenvalue sonuç karşılaştırması

|                     | Katman Açıları | Delik Konumu | W/L  | $R_a/R_b$ | $\theta^\circ$ | Maksimum Değer | Minimum Değer |
|---------------------|----------------|--------------|------|-----------|----------------|----------------|---------------|
| Normal Stress (Max) | [0/45/0/-45]   | Sağ          | 1,5  | 0,25      | 150            | ✓              |               |
| Normal Stress (Max) | [0/90/0/-90]   | Sağ          | 0,25 | 2         | 45             |                | ✓             |
| Eigenvalue (Mod-1)  | [0/90/0/-90]   | Sağ          | 0,25 | 2         | 90             | ✓              |               |
| Eigenvalue (Mod-1)  | [0/90/0/-90]   | Sağ          | 2    | 2         | 90             |                | ✓             |
| Eigenvalue (Mod-2)  | [0/90/0/-90]   | Sağ          | 0,25 | 2         | 90             | ✓              |               |
| Eigenvalue (Mod-2)  | [0/60/0/-60]   | Merkez       | 2    | 2         | 90             |                | ✓             |
| Eigenvalue (Mod-3)  | [0/90/0/-90]   | Merkez       | 0,25 | 2         | 90             | ✓              |               |
| Eigenvalue (Mod-3)  | [0/45/0/-45]   | Sağ          | 2    | 2         | 60             |                | ✓             |
| Eigenvalue (Mod-4)  | [0/90/0/-90]   | Sol          | 0,25 | 2         | 90             | ✓              |               |
| Eigenvalue (Mod-4)  | [0/60/0/-60]   | Sağ          | 2    | 2         | 90             |                | ✓             |
| Eigenvalue (Mod-5)  | [0/30/0/-30]   | Merkez       | 0,25 | 2         | 90             | ✓              |               |
| Eigenvalue (Mod-5)  | [0/90/0/-90]   | Sol          | 2    | 2         | 90             |                | ✓             |
| Eigenvalue (Mod-6)  | [0/90/0/-90]   | Merkez       | 0,25 | 2         | 90             | ✓              |               |
| Eigenvalue (Mod-6)  | [0/60/0/-60]   | Sağ          | 2    | 2         | 90             |                | ✓             |
| Eigenvalue (Mod-7)  | [0/30/0/-30]   | Merkez       | 0,25 | 2         | 90             | ✓              |               |
| Eigenvalue (Mod-7)  | [0/45/0/-45]   | Üst          | 2    | 2         | 90             |                | ✓             |
| Eigenvalue (Mod-8)  | [0/30/0/-30]   | Sağ          | 0,25 | 0,25      | 45             | ✓              |               |
| Eigenvalue (Mod-8)  | [0/45/0/-45]   | Merkez       | 2    | 2         | 90             |                | ✓             |

Deformasyon, gerilme, gerinim ve eigenvalue sonuç karşılaştırması Çizelge 6.1’de gösterilmiştir. Açıklamaları aşağıdaki gibidir.

- En yüksek Total Deformation (max) değeri katman açısı [0/90/0/-90] -  $R_a/R_b=2$  -  $W/L=2$  -  $x_1/L=0,75$  -  $y_1/W=0,5$  -  $\theta=90^\circ$  parametrelerine sahip plakada 0,560492647296347 mm elde edilmiştir.

- En düşük Total Deformation (max) değeri katman açısı [0/90/0/-90] -  $R_a/R_b=0,25$  -  $W/L=0,25$  -  $x_1/L=0,5$  -  $y_1/W=0,75$  -  $\theta=60^\circ$  parametrelerine sahip plakada 0,0296699294407761 mm elde edilmiştir.
- En yüksek Equivalent Elastic Strain (max) değeri katman açısı [0/60/0/-60] -  $R_a/R_b=0,25$  -  $W/L=1,5$  -  $x_1/L=0,75$  -  $y_1/W=0,5$  -  $\theta=0^\circ$  parametrelerine sahip plakada 0,000551338792623331 mm elde edilmiştir.
- En düşük Equivalent Elastic Strain (max) değeri katman açısı [0/90/0/-90] -  $R_a/R_b=0,75$  -  $W/L=0,25$  -  $x_1/L=0,25$  -  $y_1/W=0,5$  -  $\theta=90^\circ$  parametrelerine sahip plakada 0,0000876039230206515 mm elde edilmiştir.
- En yüksek Normal Elastic Strain (max) değeri katman açısı [0/60/0/-60] -  $R_a/R_b=0,25$  -  $W/L=1,5$  -  $x_1/L=0,75$  -  $y_1/W=0,5$  -  $\theta=0^\circ$  parametrelerine sahip plakada 0,0000682760861915691 mm elde edilmiştir.
- En düşük Normal Elastic Strain (max) değeri katman açısı [0/90/0/-90] -  $R_a/R_b=0,25$  -  $W/L=0,25$  -  $x_1/L=0,5$  -  $y_1/W=0,25$  -  $\theta=120^\circ$  parametrelerine sahip plakada 0,0000320461816348445 mm elde edilmiştir.
- En yüksek Equivalent Stress (max) değeri katman açısı [0/90/0/-90] -  $R_a/R_b=0,25$  -  $W/L=2$  -  $x_1/L=0,75$  -  $y_1/W=0,5$  -  $\theta=0^\circ$  parametrelerine sahip plakada 41,8246545610307 MPa elde edilmiştir.
- En düşük Equivalent Stress (max) değeri katman açısı [0/30/0/-30] -  $R_a/R_b=2$  -  $W/L=0,25$  -  $x_1/L=0,75$  -  $y_1/W=0,5$  -  $\theta=0^\circ$  parametrelerine sahip plakada 5,18358697498194 MPa elde edilmiştir.
- En yüksek Normal Stress (max) değeri katman açısı [0/45/0/-45] -  $R_a/R_b=0,25$  -  $W/L=1,5$  -  $x_1/L=0,75$  -  $y_1/W=0,5$  -  $\theta=150^\circ$  parametrelerine sahip plakada 2,88288903236389 MPa elde edilmiştir.
- En düşük Normal Stress (max) değeri katman açısı [0/90/0/-90] -  $R_a/R_b=2$  -  $W/L=0,25$  -  $x_1/L=0,75$  -  $y_1/W=0,5$  -  $\theta=45^\circ$  parametrelerine sahip plakada 0,290317267179489 MPa elde edilmiştir.
- En yüksek Eigenvalue Yük katsayısı (Mod-1) değeri katman açısı [0/90/0/-90] -  $R_a/R_b=2$  -  $W/L=0,25$  -  $x_1/L=0,75$  -  $y_1/W=0,5$  -  $\theta=90^\circ$  parametrelerine sahip plakada 12,2982275530651 elde edilmiştir.
- En düşük Eigenvalue Yük katsayısı (Mod-1) değeri katman açısı [0/90/0/-90] -  $R_a/R_b=2$  -  $W/L=2$  -  $x_1/L=0,75$  -  $y_1/W=0,5$  -  $\theta=90^\circ$  parametrelerine sahip plakada 0,61782920520638 elde edilmiştir.

- En yüksek Eigenvalue Yük katsayısı (Mod-2) değeri katman açısı [0/90/0/-90] -  $R_a/R_b=2$  -  $W/L=0,25$  -  $x_1/L=0,75$  -  $y_1/W=0,5$  -  $\theta=90^\circ$  parametrelerine sahip plakada 13,9821052654361 elde edilmiştir.
- En düşük Eigenvalue Yük katsayısı (Mod-2) değeri katman açısı [0/60/0/-60] -  $R_a/R_b=2$  -  $W/L=2$  -  $x_1/L=0,5$  -  $y_1/W=0,5$  -  $\theta=90^\circ$  parametrelerine sahip plakada 0,870276838442181 elde edilmiştir.
- En yüksek Eigenvalue Yük katsayısı (Mod-3) değeri katman açısı [0/90/0/-90] -  $R_a/R_b=2$  -  $W/L=0,25$  -  $x_1/L=0,5$  -  $y_1/W=0,5$  -  $\theta=90^\circ$  parametrelerine sahip plakada 14,9641717373425 elde edilmiştir.
- En düşük Eigenvalue Yük katsayısı (Mod-3) değeri katman açısı [0/45/0/-45] -  $R_a/R_b=2$  -  $W/L=2$  -  $x_1/L=0,75$  -  $y_1/W=0,5$  -  $\theta=60^\circ$  parametrelerine sahip plakada 1,35114286469964 elde edilmiştir.
- En yüksek Eigenvalue Yük katsayısı (Mod-4) değeri katman açısı [0/90/0/-90] -  $R_a/R_b=2$  -  $W/L=0,25$  -  $x_1/L=0,25$  -  $y_1/W=0,5$  -  $\theta=90^\circ$  parametrelerine sahip plakada 17,8152287484793 elde edilmiştir.
- En düşük Eigenvalue Yük katsayısı (Mod-4) değeri katman açısı [0/60/0/-60] -  $R_a/R_b=2$  -  $W/L=2$  -  $x_1/L=0,75$  -  $y_1/W=0,5$  -  $\theta=90^\circ$  parametrelerine sahip plakada 1,82436200112911 elde edilmiştir.
- En yüksek Eigenvalue Yük katsayısı (Mod-5) değeri katman açısı [0/30/0/-30] -  $R_a/R_b=2$  -  $W/L=0,25$  -  $x_1/L=0,5$  -  $y_1/W=0,5$  -  $\theta=90^\circ$  parametrelerine sahip plakada 20,1798051552416 elde edilmiştir.
- En düşük Eigenvalue Yük katsayısı (Mod-5) değeri katman açısı [0/90/0/-90] -  $R_a/R_b=2$  -  $W/L=2$  -  $x_1/L=0,25$  -  $y_1/W=0,5$  -  $\theta=90^\circ$  parametrelerine sahip plakada 1,91581096975174 elde edilmiştir.
- En yüksek Eigenvalue Yük katsayısı (Mod-6) değeri katman açısı [0/90/0/-90] -  $R_a/R_b=2$  -  $W/L=0,25$  -  $x_1/L=0,5$  -  $y_1/W=0,5$  -  $\theta=90^\circ$  parametrelerine sahip plakada 23,8240334584116 elde edilmiştir.
- En düşük Eigenvalue Yük katsayısı (Mod-6) değeri katman açısı [0/60/0/-60] -  $R_a/R_b=2$  -  $W/L=2$  -  $x_1/L=0,75$  -  $y_1/W=0,5$  -  $\theta=90^\circ$  parametrelerine sahip plakada 2,19799851225637 elde edilmiştir.
- En yüksek Eigenvalue Yük katsayısı (Mod-7) değeri katman açısı [0/30/0/-30] -  $R_a/R_b=2$  -  $W/L=0,25$  -  $x_1/L=0,5$  -  $y_1/W=0,5$  -  $\theta=90^\circ$  parametrelerine sahip plakada 26,6157164704163 elde edilmiştir.

- En düşük Eigenvalue Yük katsayısı (Mod-7) değeri katman açısı  $[0/45/0/-45]$  -  $R_a/R_b=2$  -  $W/L=2$  -  $x_1/L=0,5$  -  $y_1/W=0,75$  -  $\theta=90^\circ$  parametrelerine sahip plakada 2,5399254907528 elde edilmiştir.
- En yüksek Eigenvalue Yük katsayısı (Mod-8) değeri katman açısı  $[0/30/0/-30]$  -  $R_a/R_b=0,25$  -  $W/L=0,25$  -  $x_1/L=0,75$  -  $y_1/W=0,5$  -  $\theta=45^\circ$  parametrelerine sahip plakada 30,9892270761561 elde edilmiştir.
- En düşük Eigenvalue Yük katsayısı (Mod-8) değeri katman açısı  $[0/45/0/-45]$  -  $R_a/R_b=2$  -  $W/L=2$  -  $x_1/L=0,5$  -  $y_1/W=0,5$  -  $\theta=90^\circ$  parametrelerine sahip plakada 2,74542538198458 elde edilmiştir.
- En/boy oranının artması, plakanın burkulma direncinde bir artışa neden olmuştur. Bu durum, daha uzun ve dar bir geometrinin, burkulma direncini artırabileceğini işaret etmektedir.
- Delikli kompozit plakalar için fiber oryantasyon açıları arttıkça Eigenvalue yük çarpanı katsayısının arttığı görülmüştür.
- Modlar arası yüzdelik değişim tüm varyasyonlar için neredeyse aynıdır.
- Plaka üzerindeki delik konumu, plakada oluşacak mod şeklinin belirlenmesinde kritik bir etkiye sahiptir. Ayrıca, mod şekli katman yönelim açısına göre de etkilenmektedir.
- Delik konum açısı katman yönelim açılarının düzenine göre ayrı ayrı değerlendirilmelidir. Çünkü her katman yönelimi için delik konum açısı tepkisi Eigenvalue yük çarpanı katsayısı için farklı sonuçlar vermiştir.
- Delik konumu yük uygulanan bölgeye yaklaştıkça delik etrafındaki gerilmelerinde artış gözlemlenmiştir.
- Katmanlı kompozit plakalar ortotropik bir malzeme olduğu için deformasyon, gerilme ve gerinim değerleri farklı yönelimlerde farklı değerler vermiştir. Yani, malzemenin yönler göre tepkisi farklıdır.

Bu çalışmadan da anlaşılacağı üzere tek bir kriter için kompozit malzeme tasarımı yapılamaz. Katman açısı, en/boy oranı, kalınlık, ham malzeme, delik konumu, sınır şartları gibi tüm kriterler değerlendirilip en optimum tasarım çalışması gerçekleştirilmelidir.

YSA modelleme yaklaşımı, bilgisayar teknolojisinin kullanımıyla benzer bir yapıya sahip olup, insan beyninin işleme mantığına dayanır. Bu yöntem, malzeme davranışındaki karmaşıklığı anlamak ve doğru tahminlerde bulunmak için kullanılır. Ancak, bir YSA modelini oluşturabilmek için büyük miktarda veri toplanması ve eğitim verileriyle detaylı

bir şekilde geliştirilmesi gerekmektedir. Bu çalışmada oluşturulan YSA modeli, bu ve benzeri tasarımlarda en iyi yaklaşımı elde etmek için kullanılabilir.

Bu çalışma, içerisinde delik bulunan dört katmanlı bir kompozit plakada burkulma zorlanmasının modellenmesi üzerine temel bir anlayış sağlamaktadır. Ancak, gelecekteki çalışmalar, daha fazla parametre ve koşulun dikkate alındığı genişletilmiş modeller içerebilir.

Özellikle, farklı malzeme kombinasyonları, çeşitli delik konfigürasyonları ve gerçek uygulama koşullarını içeren daha karmaşık senaryoların incelenmesi, bu alandaki araştırmalara değerli bir katkı sağlayabilir. Bunun yanı sıra, plakanın burkulma davranışını etkileyen diğer faktörlerin, örneğin termal etkiler veya çeşitli yükleme koşulları, nasıl bir etki yarattığı üzerine yapılan analizler de bu çalışmanın önemli bir parçası olacaktır.

## KAYNAKLAR

1. Kim, Y. H., and Noor, A. K. (1996). Buckling and postbuckling of composite panels with cutouts subjected to combined loads. *Finite Elements in Analysis and Design*, 22(2), 163–185.
2. Nemeth, M. P. (1995). Buckling and postbuckling behaviour of laminated composite plates with a cut-out. In *Buckling and Postbuckling of Composite Plates*, Dordrecht: Springer Netherlands, 260-298.
3. Onkar, A. K., Upadhyay, C. S., and Yadav, D. (2006). Generalized buckling analysis of laminated plates with random material properties using stochastic finite elements. *International Journal of Mechanical Sciences*, 48(7), 780–798.
4. Ghannadpour, S., Najafi, A., and Mohammadi, B. (2006). On the buckling behavior of cross-ply laminated composite plates due to circular/elliptical cutouts. *Composite Structures*, 75(1-4), 3–6.
5. Komur, A., M., Sen, F., Ataş, A., and Arslan, N. (2010). Buckling analysis of laminated composite plates with an elliptical/circular cutout using FEM. *Advances in Engineering Software*, 41(2), 161–164.
6. Bisagni, C., and Vescovini, R. (2009). Analytical formulation for local buckling and post-buckling analysis of stiffened laminated panels. *Thin-Walled Structures*, 47(3), 318–334.
7. Zhang, Y. X., and Yang, C. H. (2009). Recent developments in finite element analysis for laminated composite plates. *Composite Structures*, 88(1), 147–157.
8. Ameen, H. A. (2009). Buckling analysis of composite laminated plate with cutouts. *Journal Of Engineering Technology*, 27, 1611-1621
9. Pascan, O., Zhang, W., and Ponthot, J. P. (2012). Mechanical buckling of composite panels with/without Cutouts. *International Journal of Plant Engineering and Management*, 17(2), 65-76.
10. Lakshmi Narayana, A., Rao, K., and Vijaya Kumar, R. (2013). FEM buckling analysis of quasi-isotropic symmetrically laminated rectangular composite plates with a square/rectangular cutout. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 27, 1427-1435.
11. Yazici, M. (2008). Influence of cut-out variables on buckling behavior of composite plates. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 28(19), 2325–2339.
12. Al-Jameel, S. E. S., and Albazzaz, R. K. (2014). Buckling analysis of Composite Plate with Central Elliptical Cut out. *Al-Rafadain Engineering Journal*, 22(1), 14-25.
13. Narayana, A. L., Rao, K., and Kumar, R. V. (2014). Buckling analysis of rectangular composite plates with rectangular cutout subjected to linearly varying in-plane loading using fem. *Sadhana*, 39(3), 583–596.



14. Reddy, P. R., and Harish, T. (2014). Buckling Analysis of Orthotropic Laminated Composite Plate With Rectangular Cut-Outs by Using FEA. *International Journal of Emerging Technologies in Computational and Applied Sciences*, 10(1), 75-81.
15. Lakshminarayana, A., Kumar, R. V., and Rao, G. K. M. (2012). Buckling analysis of quasi-isotropic symmetrically laminated rectangular composite plates with an elliptical/circular cutout subjected to linearly varying in-plane loading using fem. *International Journal of Mechanics*, 6(1), 1–8.
16. Riswana, C., and Sabeena, M. (2016). Buckling analysis of laminar composite plates with cutouts. *International Journal of Scientific Research in Science, Engineering and Technology*, 2, 250-254.
17. Altunsaray, E. (2017). Static deflections of symmetrically laminated quasi-isotropic super-elliptical thin plates. *Ocean Engineering*, 141, 337-350.
18. Dakuri, T., and Devi, E. (2018). Buckling analysis of different composite laminates with various cutouts. *Cikitusi Journal For Multidisciplinary Research*, 5(6), 1-16.
19. Candra, S., Rajanna, T., and Rao, K. V. (2020). A parametric study on the effect of elliptical cutouts for buckling behavior of composite plates under non-uniform edge loads. *Latin American Journal of Solids and Structures*, 17(8), e328
20. Kumar, R., Lal, A., and Sutaria, B. M. (2020). *Comparative buckling analysis of laminated composite plates with various shapes of hole*. *Materials Today: Proceedings*, 44, 4009-4012.
21. Wankhade, R. L., and Niyogi, S. B. (2020). Buckling analysis of symmetric laminated composite plates for various thickness ratios and modes. *Innovative Infrastructure Solutions*, 5(3), 65.
22. Evran, S. (2020). Numerical and statistical buckling analysis of laminated composite plates with functionally graded fiber orientation angles. *Polymers and Polymer Composites*, 28(7), 502-512.
23. Uslu, F., Saraçoğlu, M. H. and Albayrak, U. (2022). Buckling of square and circular perforated square plates under uniaxial loading. *Journal of Innovations in Civil Engineering and Technology*, 4(2), 61- 75.
24. Srivatsan, B. S., Karthik, B. D., Darshan, P., and Lokavarapu, B. R. (2023). Buckling analysis of laminated composite rectangular plates with diamond cut-outs. *Materials Today: Proceedings*, 2214-7853.
25. Tao, F., Liu, X., Du, H., & Yu, W. (2020). Physics-Informed Artificial Neural Network Approach for Axial Compression Buckling Analysis of Thin-Walled Cylinder. *AIAA Journal*, 1–11.
26. Duong, H. T., Phan, H. C., Tran, T. M., & Dhar, A. S. (2021). Assessment of critical buckling load of functionally graded plates using artificial neural network modeling. *Neural Computing and Applications*. 33, 16425–16437.

27. Pevzner, P., Abramovich, H., Weller, T. (2008). Calculation of the Collapse Load of An Axially Compressed Laminated Composite Stringer-stiffened Curved Panel– An Engineering Approach. *Composite Structures*, 83, 341-353.
28. Lin, C.C., Kuo, C.S., (1989). Buckling of laminated plates with holes. *Journal of Composite Materials*, 23(6), 536-553.
29. Mehmet, F. A. (2013). Artificial neural network approach to buckling coefficients of laminated orthotropic rectangular plates with a centrally rectangular hole. *Scientific Research and Essays*, 8(33), 1618–1622.
30. Köksal, E., Özkan, M. T., Eldem, C., (2013). Çekme Gerilmesi Etkisindeki Millerin Çentik Faktörünün Yapay Sinir Ağları İle Belirlenmesi. *Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 29(1), 81-89.
31. Özkan, M. T., Kaygısız, M., (2016). Elipsel Delikli Plakalarda Oluşan Gerilmelerin Tanımlanması ve Yapay Sinir Ağları ile Tahmini. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part: C Tasarım ve Teknoloji*, 4(3), 135-145.
32. Yavuz, S., Özkan, M. T., (2022). Analyze of leaf springs with parametric finite element analysis and artificial neural network. *Journal of Polytechnic*, 25(2), 827-842.
33. Eren, M., Toktaş, İ., Özkan, M. T., (2023). Simetrik V Şekli Plakadaki Gerilme Yığılma Faktörünün Yapay Sinir Ağı ile Modellenmesi. *Journal of polytechnic*, 26(3), 1199-1205.
34. Hamani, N., Ouinas, D., Taghezout, N., Sahnoun, M., & Viña, J. (2012). Effect of fiber orientation on the critical buckling load of symmetric composite laminated plates. *Advanced Materials Research*, 629, 95–99.
35. Husam, A. Q., Katkhuda, H., Dwairi H., (2009). Assessment of the Buckling Behavior of Square Composite Plates With Circular Cutout Subjected to in-Plane Shear. *Jordan Journal of Civil Engineering*, 3(2), 125-130.
36. Singh, A., Bajaj, R., Soni K., (2020). Buckling analysis of laminate composite plate having cut-out with varying ply-orientation, aspect ratio and skewness. *Journal of Emerging Technologies and Innovative Research*, 7(8), 650-675.
37. Kumar, S., Kumar, R., Mandal, S., & Rahul, A.K. (2018). The Prediction of Buckling Load of Laminated Composite Hat-Stiffened Panels Under Compressive Loading by Using of Neural Networks. *The Open Civil Engineering Journal*. 12, 468-480.
38. Altenbach, H., Altenbach, J., Kissing, W., and Altenbach, H. (2004). *Mechanics of composite structural elements*, Berlin: Springer-Verlag, 122-297.
39. Kaw, A. K., and Willenbring, G. (1997). A software tool for mechanics of composite materials. *International Journal of Engineering Education*, 13(6), 433-441.
40. Daniel, H. I., and Ishai, O. (1994). Phases of a Composite Material. *Engineering Mechanics of Composite Materials*, 1(1), 3.
41. Ansys 2019 (Gazi University).

42. Matlab 2018b (Gazi University).
43. Haykin, S. (2008). *Neural networks and learning machines*, Ontario, Canada: McMaster University Hamilton, 1314-1392.
44. Domany, E., Hemmen, J.L., Schulten, K. (eds) (1995). *Models of neural networks II*. New York: Springer, 1255-1314.
45. Marquardt, D. (1963). An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters. *Society for Industrial and Applied Mathematics*, 11(2), 431–441.
46. Hagan, M.T., Menhaj, M. (1994). Training feed-forward Networks with the Marquardt algorithm. *Institute of Electrical and Electronics Engineers Trans Neural Netw*, 5(6), 989–993.
47. Erdemir, F., Özkan, M. T. (2019). *Esneyerek kilitlenen bağlantı elemanlarının tasarımı ve yapay sinir ağıları (YSA) ile modellenmesi*, Yüksek lisans tezi, Ankara Gazi Üniversitesi, 2-14.
48. Rosenblatt, J. (2002). *Basic statistical methods and models for the sciences*. Boca Raton: CRC Press Company, 125-141.
49. Werbos, P.J. (1974). *Beyond Regression: new tools for prediction and analysis in the behavioral sciences*. Massachusetts: Harvard University Cambridge, 47-59.
50. Perez, C. (2019). *Statistics and data analysis with Matlab cluster analysis and applications*. New York: KDP Press Company, 51-57.



*Gazili olmak ayrıcalıktır*