

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



**VAKUM İNFÜZYON YÖNTEMİYLE YAMA YAPILMIŞ HİBRİD  
KOMPOZİT PLAKLARDA LİNEER OLMAYAN BURKULMA  
ANALİZİ**

**Serkan ERDEM**

Doktora Tezi

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

OCAK 2020

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

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Doktora Tezi

**VAKUM İNFÜZYON YÖNTEMİYLE YAMA YAPILMIŞ HİBRİD  
KOMPOZİT PLAKLARDA LİNEER OLMAYAN BURKULMA  
ANALİZİ**

Tez Yazarı  
**Serkan ERDEM**

Danışman  
Dr. Öğr. Üy. Mustafa GÜR

OCAK 2020  
ELAZIĞ

T. C.  
FIRAT ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Doktora Tezi

Başlığı: Vakum İnfüzyon Yöntemiyle Yama Yapılmış Hibrid Kompozit Plaklarda  
Lineer Olmayan Burkulma Analizi

Yazarı: Serkan ERDEM

İlk Teslim Tarihi: 25.12.2019

Savunma Tarihi: 31.1.2020

**TEZ ONAYI**

Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına göre hazırlanan bu tez aşağıda imzaları bulunan jüri üyeleri tarafından değerlendirilmiş ve akademik dinleyicilere açık yapılan savunma sonucunda OYBİRLİĞİ ile kabul edilmiştir.

Danışman: Dr. Öğr. Üy. Mustafa GÜR  
Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi

İmza  
Onayladım

Başkan: Prof. Dr. Aydın TURGUT  
Bingöl Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi

Onayladım

Üye: Prof. Dr. Mete Onur KAMAN  
Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi

Onayladım

Üye: Prof. Dr. Şemsettin TEMİZ  
İnönü Üniversitesi Mühendislik Fakültesi

Onayladım

Üye: Doç. Dr. Murat Yavuz SOLMAZ  
Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi

Onayladım

Bu tez, Enstitü Yönetim Kurulunun ...../...../20..... tarihli toplantısında tescillenmiştir.

Prof. Dr. Soner ÖZGEN  
Enstitü Müdürü

## BEYAN

Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım “Vakum İnfüzyon Yöntemiyle Yama Yapılmış Hibrid Kompozit Plaklarda Lineer Olmayan Burkulma Analizi” Başlıklı Doktora Tezimin içindeki bütün bilgilerin doğru olduğunu, bilgilerin üretilmesi ve sunulmasında bilimsel etik kurallarına uygun davrandığımı, kullandığım bütün kaynakları atıf yaparak belirttiğimi, maddi ve manevi desteği olan tüm kurum/kuruluş ve kişileri belirttiğimi, burada sunduğum veri ve bilgileri unvan almak amacıyla daha önce hiçbir şekilde kullanmadığımı beyan ederim.

31/1/2020

**Serkan ERDEM**



# ÖNSÖZ

Kompozit plaklar mekanik özelliklerinin yüksek olması sebebiyle ince kesitli olarak yapı sistemlerinde kullanılabilmektedir. Ancak ince kesitli olmaları plakların kolay bir şekilde burkulmasına neden olmaktadır. Bu çalışmada tabakalı hibrid kompozit plakların burkulması incelenmiştir. Burkulma öncesi ve burkulma sonrası plak davranışları hasarsız, ortasında delik, tek kenar U ve çift kenar yarım daire çentikli numuneler için incelenmiştir. Daha sonra dairesel delikli numuneler ıslak yamalı vakum infüzyon yöntemiyle yama yapılmış ve burkulma deneyine tabi tutulmuştur. Ayrıca plakların burkulma davranışları sayısal olarak sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilmiş ve deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.

Doktora eğitimim ve tez çalışmalarım süresince her türlü destek, yardım ve katkılarıyla çalışmamı yönlendiren Danışman Hocam Dr. Öğr. Üyesi Mustafa GÜR’e teşekkürü bir borç bilirim.

Yüksek lisans eğitimim boyunca aldığım dersler ve özellikle tez çalışmamın şekillenmesinde her türlü bilgi ve tecrübesiyle yardım ve desteklerini hiç esirgemeyen Hocam Prof. Dr. Mete Onur KAMAN’a teşekkürlerimi sunarım. Yardımları için Hocalarım Prof. Dr. Aydın TURGUT, Doç. Dr. Murat Yavuz SOLMAZ, Doç. Dr. Kadir TURAN ve Bölüm Başkanımız Sayın Prof. Dr. İhsan DAĞTEKİN’e teşekkür ederim.

Tez dönemi süresince desteklerini gördüğüm değerli arkadaşlarım Arş. Gör. Yunus Onur YILDIZ, Arş. Gör. Mehmet Erbil ÖZCAN ve Arş. Gör. İsmail Hakkı ŞANLITÜRK’e şükranlarımı sunarım.

Çalışmalarım boyunca maddi manevi destekleriyle beni hiçbir zaman yalnız bırakmayan aileme sonsuz teşekkür ederim.

Bu tez çalışması, Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi (FÜBAP) tarafından **MF.16.43** protokol numaralı proje ile desteklenmiştir. Ayrıca Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından 3001- Başlangıç AR-GE proje türü kapsamında **217M140** numaralı proje ile desteklenmiştir.

**Serkan ERDEM**

ELAZIĞ, 2020

# İÇİNDEKİLER

|                                                                     | Sayfa     |
|---------------------------------------------------------------------|-----------|
| ÖNSÖZ.....                                                          | iv        |
| İÇİNDEKİLER .....                                                   | v         |
| ÖZET .....                                                          | vii       |
| ABSTRACT .....                                                      | viii      |
| ŞEKİLLER LİSTESİ .....                                              | ix        |
| TABLolar LİSTESİ .....                                              | xiv       |
| SİMGELER .....                                                      | xv        |
| KISALTMALAR .....                                                   | xvi       |
| <b>1. GİRİŞ .....</b>                                               | <b>1</b>  |
| <b>2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....</b>                                | <b>2</b>  |
| <b>3. PLAKLAR VE PLAKLARDA BURKULMA DENKLEMLERİ .....</b>           | <b>9</b>  |
| 3.1. Plak Tanımı .....                                              | 9         |
| 3.2. Plak Çeşitleri .....                                           | 9         |
| 3.3. Plaklarda Burkulma .....                                       | 10        |
| 3.3.1. Burkulmanın Tanımı .....                                     | 10        |
| 3.3.2. Burkulma Analizi .....                                       | 13        |
| 3.3.3. Lineer Analiz.....                                           | 13        |
| 3.3.4. Lineer Olmayan Analiz .....                                  | 22        |
| 3.4. Fiber Takviyeli Kompozit Malzemeler.....                       | 28        |
| 3.4.1. Fiber Takviyeli Kompozit Plakların Teorisi.....              | 28        |
| <b>4. SAYISAL BURKULMA ANALİZİ.....</b>                             | <b>39</b> |
| 4.1. Sonlu Elemanlar Yöntemi .....                                  | 39        |
| 4.2. ANSYS Programı ve Çözüm Basamakları .....                      | 39        |
| 4.2.1. Özdeğer (Lineer) Problemin Çözümü .....                      | 39        |
| 4.2.2. Lineer Olmayan Problemin Çözümü.....                         | 41        |
| <b>5. KOMPOZİT PLAKLARDA TAMİR .....</b>                            | <b>44</b> |
| 5.1. Mekanik Birleştirme .....                                      | 44        |
| 5.2. Termal Birleştirme.....                                        | 44        |
| 5.3. Yapıştırıcı ile Birleştirme .....                              | 45        |
| 5.4. Kompozitlerde Oluşan Hasarlar .....                            | 45        |
| 5.4.1. Yüzey Hasarı.....                                            | 46        |
| 5.4.2. Tabaka Hasarı.....                                           | 46        |
| 5.5. Onarım Tipleri.....                                            | 47        |
| 5.5.1. Yamasız Onarım.....                                          | 47        |
| 5.5.2. Yamalı Onarım.....                                           | 47        |
| <b>6. MATERYAL VE METOD .....</b>                                   | <b>53</b> |
| 6.1. Problemin Tanımı .....                                         | 53        |
| 6.2. Deneysel Çalışma .....                                         | 55        |
| 6.2.1. Kompozit Plak Üretimi .....                                  | 55        |
| 6.2.2. Yamalı Deney Numunesi İmalatı .....                          | 61        |
| 6.2.3. Nano Partikül Katkılı Deney Numunelerinin Hazırlanması ..... | 62        |

|                                                                                      |            |
|--------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 6.2.4. Reçineye Nano Partikül Eklenmesi .....                                        | 62         |
| 6.2.5. Üretilen Plakların Mekanik Özelliklerinin Tespit Edilmesi .....               | 64         |
| 6.2.6. Kompozit Plagın Mekanik Özellikleri.....                                      | 65         |
| 6.2.7. Sınır Şartları .....                                                          | 69         |
| 6.3. Sayısal Çalışma .....                                                           | 71         |
| 6.3.1. Modelin Oluşturulması.....                                                    | 71         |
| 6.3.2. Malzemenin Özelliklerinin Programa Tanıtılması .....                          | 71         |
| 6.3.3. Sınır Şartlarının Belirlenmesi .....                                          | 72         |
| <b>7. BULGULAR.....</b>                                                              | <b>75</b>  |
| 7.1. Çentik Tipinin Değişiminin Burkulma Davranışına Etkisi .....                    | 77         |
| 7.2. Yama Kalınlığının (Tabaka Sayısı) Değişiminin Burkulma Davranışına Etkisi ..... | 80         |
| 7.3. Yama Uzunluğunun Değişiminin Burkulma Davranışına Etkisi .....                  | 84         |
| 7.4. Plak Fiber Açısının Değişiminin Burkulma Davranışına Etkisi .....               | 89         |
| 7.5. Plak Tabaka Diziliminin Değişiminin Burkulma Davranışına Etkisi .....           | 94         |
| 7.6. Yama Fiber Açısının Değişiminin Burkulma Davranışına Etkisi .....               | 98         |
| 7.7. Yama İçerisine Nano Malzeme Katkısının Burkulma Davranışına Etkisi.....         | 103        |
| 7.7.1. Yama İçerisine Karbon Nanotüp (CNT) Eklenmesi.....                            | 103        |
| 7.7.2. Yama İçerisine Grafen Eklenmesinin Burkulma Davranışına Etkisi .....          | 109        |
| <b>8. SONUÇLAR.....</b>                                                              | <b>116</b> |
| KAYNAKLAR.....                                                                       | 120        |
| ÖZGEÇMİŞ.....                                                                        | A          |

## ÖZET

### Vakum İnfüzyon Yöntemiyle Yama Yapılmış Hibrid Kompozit Plaklarda Lineer Olmayan Burkulma Analizi

**Serkan ERDEM**

Doktora Tezi

FIRAT ÜNİVERSİTESİ  
Fen Bilimleri Enstitüsü

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Ocak 2020, Sayfa: xvi + 124

Bu çalışmada tabakalı hibrid kompozit plaklarda burkulma davranışı çentikli ve yamalı numuneler için sayısal ve deneysel olarak incelenmiştir.

Deneysel çalışmada; hibrid malzeme olarak karbon-aramid örgülü kumaş seçilmiştir. Kumaşlar aynı oryantasyon açısına sahip olacak şekilde kesilmiş ve üst üste dört tabaka olarak kompozit plak üretimi sıcaklık kontrollü vakum infüzyon üretim ünitesinde gerçekleştirilmiştir. Üretilen deney numunelerinde ortada dairesel delik, U tek kenar ve yarım daire çift kenar çentikler oluşturulmuştur. Dairesel delikli numuneler ıslak yama ile bir yüzünden yamanmış ve burkulma yükü üzerinde yapışma performansı araştırılmıştır. Ayrıca yama matris malzemesinde nano partikül katkılı ve katkısız kompozit plaklar için burkulma deney sonuçları karşılaştırılmıştır.

Sayısal çalışmada; nano katkılı ve katkısız ıslak yama yöntemi ile yamanmış kompozit plakların burkulma analizi sonlu elemanlar paket programı ANSYS ile gerçekleştirilmiştir. Sonuçta, plaklar için lineer olmayan burkulma analizinde elde edilen sayısal sonuçlar ile deneysel sonuçların birbiriyle uyumlu olduğu görülmüştür.

Elde edilen sonuçlara göre; genel olarak burkulma sonunda yama ara yüzeyinde ayrılma olmadığı için, ıslak yama yönteminin başarılı bir yama şekli olduğu görülmüştür. Dairesel delikli numunelerin ıslak yama ile yapıştırılması, deliksiz numunelere göre hasar yüklerini minimum %65 artırmıştır. Yükleme doğrultusuna paralel fiber açısına sahip yama malzemesine ağırlıkça %1 CNT ve grafen katkısı hasar yüklerini nano katkısız yamaya göre, sırasıyla %22.5 ve %12.6 oranında artırırken, %2 CNT katkısı hasar yüklerini %50 oranında artırmış, %2 grafen katkısı ise hasar yüklerini %1 oranında kısmi olarak düşürmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Kompozit plaklar, Burkulma, Burkulma öncesi, Burkulma sonrası, Yama, Tamir

# ABSTRACT

---

## Nonlinear Buckling Analysis in Patched Hybrid Composite Plates by Vacuum Infusion Method

**Serkan ERDEM**

Ph.D. Thesis

FIRAT UNIVERSITY  
Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Department of Mechanical Engineering

January 2020, Pages: xvi + 124

---

In this study, the buckling behavior of layered hybrid composite plates has been investigated numerically and experimentally for notched and patched samples.

In the experimental study; carbon-aramid woven fabric was chosen as hybrid material. The fabrics were cut to have the same orientation angle and the production of composite plates as four layers in a overlap was carried out in a temperature-controlled vacuum infusion production unit. Circular hole, U single edge and half circle double edge notches were formed in the experimental samples produced. Circular holed specimens were patched with a wet patch on one face and adhesion performance on the buckling load was investigated. In addition, buckling test results were compared for composite plates with and without nanoparticles in patch matrix material.

In the numerical study; The buckling behavior of composite plates patched with nano-doped and non-doped wet patch method was realized with finite element package program *ANSYS*. As a result, numerical results describing nonlinear buckling behavior for plates were found to be consistent with experimental results.

According to the results obtained; In general, the successful applicability of the wet patch method has been shown since there is no separation at the patch interface at the end of the buckling. Wet patch repair of circular hole samples increased the damage loads by 65% compared to non-hole samples. 1% by weight of CNT and graphene admixture to patch material with fiber angle parallel to loading direction increased damage loads by 22.5% and 12.6%, respectively, by 2% CNT and graphene admixture by 50% and 1% partial as the lowered.

**Keywords:** Composite plates, Buckling, Pre-buckling, Post-buckling, Patch, Repair,

## ŞEKİLLER LİSTESİ

|                                                                                                 | Sayfa |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Şekil 3.1. Membran geometrisi ve taşıdığı yükler .....                                          | 9     |
| Şekil 3.2. İnce plak geometrisi .....                                                           | 9     |
| Şekil 3.3. Kalın plak geometrisi .....                                                          | 10    |
| Şekil 3.4. Kararlı ve kararsız sistem .....                                                     | 10    |
| Şekil 3.5. Burkulma grafiği .....                                                               | 11    |
| Şekil 3.6. Rijitliği sabit olan yay eşitliği .....                                              | 11    |
| Şekil 3.7. Rijitliği değişken olan sistemlerin kuvvet-uzama grafiği .....                       | 12    |
| Şekil 3.8. Rijitliği artan kuvvetle artan balık oltası .....                                    | 12    |
| Şekil 3.9. Plak denklemleri için ayırım cetveli .....                                           | 13    |
| Şekil 3.10. Sabit kalınlıktaki bir plak eleman .....                                            | 14    |
| Şekil 3.11. Plagın bir parçasının eğilmeden önceki ve sonraki durumu .....                      | 14    |
| Şekil 3.12. Bir plak elemanında eğilme momentleri, burulma momentleri ve kesme kuvvetleri ..... | 15    |
| Şekil 3.13. Bir plak elemanında eksenel kuvvetler ve kayma kuvvetleri .....                     | 17    |
| Şekil 3.14. Eğilme ve burulma momentlerine ilişkin normal ve kayma gerilmeleri .....            | 19    |
| Şekil 3.15. İki uçtan basma kuvvetine maruz basit mesnetli dikdörtgen plak .....                | 21    |
| Şekil 3.16. Plak diferansiyel elemanı .....                                                     | 23    |
| Şekil 3.17. Kayma açıları .....                                                                 | 24    |
| Şekil 3.18. <i>Hooke Doğrusu</i> .....                                                          | 25    |
| Şekil 3.19. Fiber takviyeli tabaka .....                                                        | 29    |
| Şekil 3.20. $x$ - $z$ düzlemindeki deformasyon geometrisi .....                                 | 30    |
| Şekil 3.21. Düzgün laminada düzlem-içi kuvvetler .....                                          | 32    |
| Şekil 3.22. Düzgün laminaya etkileyen momentler .....                                           | 33    |
| Şekil 3.23. $n$ katlı lamina geometrisi .....                                                   | 33    |
| Şekil 3.24. Plak elemanında eksenel kuvvetler .....                                             | 35    |
| Şekil 4.1. Statik analiz öncesi ön gerilmenin aktif hale getirilmesi .....                      | 40    |
| Şekil 4.2. Özdeğer burkulma seçenekleri sekmesi .....                                           | 40    |
| Şekil 4.3. Alt iterasyon seçenekleri sekmesi .....                                              | 41    |
| Şekil 4.4. Lineer olmayan çözüm kontrol sekmesi .....                                           | 42    |
| Şekil 4.5. <i>Newton-Raphson</i> lineer olmayan analiz tipleri .....                            | 42    |
| Şekil 4.6. Arc-Length metodunun çalışma prensibi .....                                          | 43    |
| Şekil 4.7. Çözüm kontrolleri sekmesi .....                                                      | 43    |

|                                                                                                         |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 5.1. Başlıca yüzey hasarları .....                                                                | 46 |
| Şekil 5.2. Tabaka hasarı .....                                                                          | 47 |
| Şekil 5.3. Yamalı Onarım tipleri .....                                                                  | 48 |
| Şekil 5.4. Mekanik bağlantılı yama ile onarım .....                                                     | 49 |
| Şekil 5.5. Yapıştırılmalı yama ile onarım .....                                                         | 50 |
| Şekil 6.1. Çalışmada kullanılan çentikli numuneler. ....                                                | 53 |
| Şekil 6.2. Çalışmada kullanılan yamalı plakta yükleme öncesi ve yükleme sonrası durum. ....             | 54 |
| Şekil 6.3. LVDT doğrusal değişken fark transformatoru. ....                                             | 55 |
| Şekil 6.4. Sıcaklık kontrollü vakum infüzyon tezgâhı. ....                                              | 55 |
| Şekil 6.5. Release filmin ısıtıcı tablaya çift tarafı bant ile yapıştırılması .....                     | 56 |
| Şekil 6.6. Karbon/aramid hibrid dokuma kumaş .....                                                      | 56 |
| Şekil 6.7. Kumaş üzerine serilen soyma kumaşı (peel ply). ....                                          | 57 |
| Şekil 6.8. Ayırıcı tabaka (Release film) üzerine serilen infüzyon filesi. ....                          | 57 |
| Şekil 6.9. Spiral hortumun yerleştirilmesi .....                                                        | 58 |
| Şekil 6.10. Vakumda hava kaçağı kontrolü .....                                                          | 58 |
| Şekil 6.11. Kumaşa reçine verilmesi. ....                                                               | 59 |
| Şekil 6.12. Kompozit plak kütleme grafiği .....                                                         | 60 |
| Şekil 6.13. Kompozit plak kesmede kullanılan sulu mermer kesme makinesi. ....                           | 60 |
| Şekil 6.14. Çentikli deney numunelerinin elde edilmesi. ....                                            | 61 |
| Şekil 6.15. Vakum infüzyon yöntemiyle ıslak yamalı kompozit plak tamiri.....                            | 62 |
| Şekil 6.16. Hassas terazi .....                                                                         | 62 |
| Şekil 6.17. Ultrasonik karıştırıcı ile karıştırma.....                                                  | 63 |
| Şekil 6.18. Nano partikül eklenmiş yamalı numune üretimi .....                                          | 64 |
| Şekil 6.19. ASTM 3039 Test numunesi .....                                                               | 65 |
| Şekil 6.20. Malzemelerin mekanik özelliklerinin tespiti için numunelerin çekme cihazına bağlanması..... | 66 |
| Şekil 6.21. Çekme testi sonucu kompozit plağa ait gerilme şekil değiştirme grafiği. ....                | 67 |
| Şekil 6.22. 0°-90° strain gauge.....                                                                    | 67 |
| Şekil 6.23. VTA-1704 model veri toplama cihazı. ....                                                    | 68 |
| Şekil 6.24. Şekil değiştirme oranları arasındaki değişim grafiği ( $\epsilon_x - \epsilon_y$ ). ....    | 68 |
| Şekil 6.25. Numunenin çekmedeki gerilme-şekil değiştirme grafiği.....                                   | 69 |
| Şekil 6.26. UTEST çekme test cihazına bağlanan deney numuneleri. ....                                   | 70 |
| Şekil 6.27. Numunelerin deney sonrası burkulma durumlarında önden ve yandan görüşleri.....              | 70 |
| Şekil 6.28. Sayısal modelin oluşturulma adımları .....                                                  | 71 |
| Şekil 6.29. $x$ - $y$ düzleminde oluşturulmuş plak.....                                                 | 72 |

|                                                                                                                                                                     |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Şekil 6.30.</b> Sonlu elemanlara ayrılan model. ....                                                                                                             | 73 |
| <b>Şekil 6.31.</b> Modelin sınır şartları. ....                                                                                                                     | 74 |
| <b>Şekil 6.32.</b> Sayısal çalışmada burkulma sonrası durum.....                                                                                                    | 74 |
| <b>Şekil 7.1.</b> Yamalı kompozit plaklar için tipik burkulma davranışı ve önemli bölgeler; a) Yama ayrılması olmayan numune, b) Yama ayrılması olan numune .....   | 75 |
| <b>Şekil 7.2.</b> Sonlu elemanlar analizinde yük-yer değiştirme grafikleri; a) Boyut faktörü (SF), b) Eleman boyutunun değişiminin etkisi .....                     | 76 |
| <b>Şekil 7.3.</b> Deliksiz ve dairesel delikli plaklar için sayısal ve deneysel sonuçlara göre -y eksenindeki yük-yer değiştirme grafikleri .....                   | 78 |
| <b>Şekil 7.4.</b> U tek kenar ve yarım daire çift kenar çentikli plaklar için sayısal ve deneysel sonuçlara göre -y eksenindeki yük-yer değiştirme grafikleri ..... | 78 |
| <b>Şekil 7.5</b> Deliksiz, dairesel delikli ve tamirli numune için a) Maksimum yük, b) Maksimum yer değiştirme grafikleri.....                                      | 79 |
| <b>Şekil 7.6.</b> Deliksiz, dairesel delikli ve tamirli numune için a) Kritik yük, b) Eğim değişim grafiği .....                                                    | 79 |
| <b>Şekil 7.7.</b> 2 tabaka yama için a) -y eksenindeki yük-yer değiştirme, b) -z eksenindeki yük-yer değiştirme grafikleri .....                                    | 80 |
| <b>Şekil 7.8.</b> 4 tabaka yama için a) -y eksenindeki yük-yer değiştirme, b) -z eksenindeki yük-yer değiştirme grafikleri .....                                    | 81 |
| <b>Şekil 7.9.</b> 8 tabaka yama için -y eksenindeki yük-yer değiştirme grafiği .....                                                                                | 82 |
| <b>Şekil 7.10.</b> Yama kalınlığının a) Maksimum yük ile değişim, b) Maksimum yer değiştirme ile değişim grafikleri .....                                           | 83 |
| <b>Şekil 7.11.</b> Yama kalınlığının a) Kritik yük, b) Eğim ile değişim grafikleri .....                                                                            | 83 |
| <b>Şekil 7.12.</b> 30 mm yama için a) -y eksenindeki yük-yer değiştirme, b) -z eksenindeki yük-yer değiştirme grafikleri .....                                      | 85 |
| <b>Şekil 7.13.</b> 40 mm yama için a) -y eksenindeki yük-yer değiştirme, b) -z eksenindeki yük-yer değiştirme grafikleri .....                                      | 86 |
| <b>Şekil 7.14.</b> 50 mm yama için -y eksenindeki yük-yer değiştirme grafiği .....                                                                                  | 86 |
| <b>Şekil 7.15.</b> Yama uzunluğunun a) Maksimum yük ile değişim, b) Maksimum yer değiştirme ile değişim grafikleri .....                                            | 87 |
| <b>Şekil 7.16.</b> Yama uzunluğunun a) Kritik yük, b) Eğim grafiklei.....                                                                                           | 87 |
| <b>Şekil 7.17.</b> 0° plak fiber açısı için a) -y eksenindeki yük-yer değiştirme, b) -z eksenindeki yük-yer değiştirme grafikleri.....                              | 89 |
| <b>Şekil 7.18.</b> 15° plak fiber açısı için a) -y eksenindeki yük-yer değiştirme, b) -z eksenindeki yük-yer değiştirme grafikleri.....                             | 90 |
| <b>Şekil 7.19.</b> 30° plak fiber açısı için a) -y eksenindeki yük-yer değiştirme, b) -z eksenindeki yük-yer değiştirme grafikleri.....                             | 90 |
| <b>Şekil 7.20.</b> 45° plak fiber açısı için a) -y eksenindeki yük-yer değiştirme, b) -z eksenindeki yük-yer değiştirme grafikleri.....                             | 91 |

|                                                                                                                                                                                |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Şekil 7.21.</b> Plak fiber açısının a) Maksimum yük ile değişim, b) Maksimum yer değiştirme ile değişim grafikleri .....                                                    | 91  |
| <b>Şekil 7.22.</b> Plak fiber açısının a) Kritik yük, b) Eğim ile değişim grafikleri .....                                                                                     | 92  |
| <b>Şekil 7.23.</b> $[0^\circ]_4$ Plak tabaka dizilimi için a) -y eksenindeki yük-yer değiştirme, b) -z eksenindeki yük-yer değiştirme grafikleri .....                         | 94  |
| <b>Şekil 7.24.</b> $[0^\circ/45^\circ]_2$ plak tabaka dizilimi için a) -y eksenindeki yük-yer değiştirme, b) -z eksenindeki yük-yer değiştirme grafikleri .....                | 95  |
| <b>Şekil 7.25.</b> $[0^\circ/45^\circ]_5$ plak tabaka dizilimi için a) -y eksenindeki yük-yer değiştirme, b) -z eksenindeki yük-yer değiştirme grafikleri .....                | 95  |
| <b>Şekil 7.26.</b> Plak tabaka diziliminin a) Maksimum yük, b) Maksimum yer değiştirme ile değişiminin grafikleri .....                                                        | 96  |
| <b>Şekil 7.27.</b> Plak tabaka diziliminin a) Kritik yük, b) Eğim ile değişiminin grafikleri .....                                                                             | 96  |
| <b>Şekil 7.28.</b> Yama fiber açısı $\theta = 0^\circ$ için a) -y eksenindeki yük-yer değiştirme, b) -z eksenindeki yük-yer değiştirme grafikleri.....                         | 99  |
| <b>Şekil 7.29.</b> Yama fiber açısı $\theta = 15^\circ$ için a) -y eksenindeki yük-yer değiştirme, b) -z eksenindeki yük-yer değiştirme grafikleri.....                        | 99  |
| <b>Şekil 7.30.</b> Yama fiber açısı $\theta = 30^\circ$ için a) -y eksenindeki yük-yer değiştirme, b) -z eksenindeki yük-yer değiştirme grafikleri.....                        | 100 |
| <b>Şekil 7.31.</b> Yama fiber açısı $\theta = 45^\circ$ için a) -y eksenindeki yük-yer değiştirme, b) -z eksenindeki yük-yer değiştirme grafikleri.....                        | 100 |
| <b>Şekil 7.32.</b> Yama fiber açısının a) Maksimum yük, b) Maksimum yer değiştirme ile değişim grafiği .....                                                                   | 101 |
| <b>Şekil 7.33.</b> Yama fiber a) Kritik yük, b) Eğim ile değişim grafikleri .....                                                                                              | 101 |
| <b>Şekil 7.34.</b> Yama fiber açısı $\theta = 0^\circ$ nano katkısız yama için a) -y eksenindeki yük-yer değiştirme, b) -z eksenindeki yük-yer değiştirme grafikleri .....     | 103 |
| <b>Şekil 7.35.</b> Yama fiber açısı $\theta = 45^\circ$ nano katkısız yama için a) -y eksenindeki yük-yer değiştirme, b) -z eksenindeki yük-yer değiştirme grafikleri .....    | 104 |
| <b>Şekil 7.36.</b> Yama fiber açısı $\theta = 0^\circ$ %1 CNT katkılı yama için a) -y eksenindeki yük-yer değiştirme, b) -z eksenindeki yük-yer değiştirme grafikleri .....    | 104 |
| <b>Şekil 7.37.</b> Yama fiber açısı $\theta = 45^\circ$ %1 CNT katkılı yama için a) -y eksenindeki yük-yer değiştirme, b) -z eksenindeki yük-yer değiştirme grafikleri .....   | 105 |
| <b>Şekil 7.38.</b> Yama fiber açısı $\theta = 0^\circ$ %2 CNT katkılı yama için a) -y eksenindeki yük-yer değiştirme, b) -z eksenindeki yük-yer değiştirme grafikleri .....    | 105 |
| <b>Şekil 7.39.</b> Yama fiber açısı $\theta = 45^\circ$ %2 CNT katkılı yama için a) -y eksenindeki yer değiştirme, b) -z eksenindeki yer değiştirme .....                      | 106 |
| <b>Şekil 7.40.</b> Yamadaki CNT oranının a) Maksimum gerilme, b) Maksimum yer değiştirme/yama kalınlığı ile değişim grafikleri.....                                            | 107 |
| <b>Şekil 7.41.</b> Yamadaki CNT oranının a) Kritik gerilme, b) Eğim/yama kalınlığı ile değişim grafikleri .....                                                                | 107 |
| <b>Şekil 7.42.</b> Yama fiber açısı $\theta = 0^\circ$ %1 Grafen katkılı yama için a) -y eksenindeki yük-yer değiştirme, b) -z eksenindeki yük-yer değiştirme grafikleri ..... | 110 |

|                                                                                                                                                                                    |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Şekil 7.43.</b> Yama fiber açısı $\theta = 45^\circ$ %1 Grafen katkılı yama için a) -y eksenindeki yük-yer değiştirme,<br>b) -z eksenindeki yük-yer değiştirme grafikleri ..... | 111 |
| <b>Şekil 7.44.</b> Yama fiber açısı $\theta = 0^\circ$ %2 Grafen katkılı yama için a) -y eksenindeki yük-yer değiştirme,<br>b) -z eksenindeki yük-yer değiştirme grafikleri .....  | 111 |
| <b>Şekil 7.45.</b> Yama fiber açısı $\theta = 45^\circ$ %2 Grafen katkılı yama için a) -y eksenindeki yük-yer değiştirme,<br>b) -z eksenindeki yük-yer değiştirme grafikleri ..... | 112 |
| <b>Şekil 7.46.</b> Yamadaki Grafen oranının a) Maksimum gerilme, b) Maksimum yer değiştirme/kalınlık ile<br>değişim grafikleri .....                                               | 112 |
| <b>Şekil 7.47.</b> Yamadaki grafen oranının a) Kritik gerilme, b) Eğim/yama kalınlığı ile değişim grafikleri ...                                                                   | 113 |



## TABLÖLAR LİSTESİ

|                                                                                                   | Sayfa |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| <b>Tablo 6.1.</b> Çalışmada kullanılan plak değişkenleri. ....                                    | 54    |
| <b>Tablo 6.2.</b> Kompozit plak üretiminde kullanılan reçine karışımının özellikleri .....        | 59    |
| <b>Tablo 6.3.</b> Yama içerisine katılan nano partiküllerin özellikleri .....                     | 64    |
| <b>Tablo 6.4.</b> Yama malzemelerinin mekanik özellikleri .....                                   | 69    |
| <b>Tablo 7.1.</b> Yama kalınlığının değişiminin gerilmelere olan etkisi .....                     | 84    |
| <b>Tablo 7.2.</b> Yama uzunluğunun değişiminin gerilmelere olan etkisi.....                       | 88    |
| <b>Tablo 7.3.</b> Plak fiber açısının değişiminin gerilmelere olan etkisi .....                   | 93    |
| <b>Tablo 7.4.</b> Plak tabaka diziliminin değişiminin gerilmelere olan etkisi .....               | 98    |
| <b>Tablo 7.5.</b> Yama fiber açısının değişiminin gerilmelere olan etkisi.....                    | 102   |
| <b>Tablo 7.6.</b> 0° yama fiber açısında yamaya CNT eklenmesinin gerilmelere olan etkisi .....    | 108   |
| <b>Tablo 7.7.</b> 45° yama fiber açısında yamaya CNT eklenmesinin gerilmelere olan etkisi .....   | 109   |
| <b>Tablo 7.8.</b> 0° yama fiber açısında yamaya grafen eklenmesinin gerilmelere olan etkisi ..... | 114   |
| <b>Tablo 7.9.</b> 45° yama fiber açısında yamaya grafen eklenmesinin gerilmelere olan etkisi..... | 115   |

## SİMGELER

|                    |                                                                  |
|--------------------|------------------------------------------------------------------|
| $a$                | : Plâğın boyu(mm)                                                |
| $A_{ij}$           | : Uzama rijitlikleri                                             |
| $b$                | : Plâğın eni(mm)                                                 |
| $B_{ij}$           | : Eğilme-uzama rijitlikleri                                      |
| $D_{ij}$           | : Eğilme rijitlikleri                                            |
| $E$                | : Elastisite modülü                                              |
| $f$                | : U çentik yarım daire başlangıç noktası                         |
| $\{F\}$            | : Uygulanan kuvvet                                               |
| $\{F_{i+1}^a\}$    | : Plak üzerine uygulanan kuvvet                                  |
| $\{F_{i+1}^{nr}\}$ | : Elemanlar üzerindeki gerilmeyi oluşturan iç kuvvet             |
| $G$                | : Kayma modülü                                                   |
| $[K]$              | : Plâğın rijitlik matrisi                                        |
| $[K_i^T]$          | : Tanjant rijitlik matrisi                                       |
| $l_1$              | : Plak uzunluğu                                                  |
| $l_2$              | : Yama uzunluğu                                                  |
| $m$                | : X eksen boyunca oluşan dalga sayısı                            |
| $M_{xy}, M_{yx}$   | : Burulma momenti                                                |
| $n$                | : Y eksen boyunca oluşan dalga sayısı                            |
| $N$                | : Newton                                                         |
| $N_x$              | : Laminadaki birim genişlik için kuvvet                          |
| $Q_{ij}$           | : İndirgenmiş rijitlikler                                        |
| $\bar{Q}_{ij}$     | : Dönüştürülmüş azaltılmış rijitlikler                           |
| $R$                | : Delik yarıçapı                                                 |
| $[S]$              | : Gerilme rijitlik matrisi                                       |
| $t$                | : Kalınlık(mm)                                                   |
| $t_1$              | : Plak kalınlığı                                                 |
| $t_2$              | : Yama kalınlığı                                                 |
| $T$                | : Dış yüklemenin potansiyeli                                     |
| $u$                | : -x eksenindeki yer değiştirme                                  |
| $U$                | : Elastik yüzeyin şekil değiştirme enerjisi                      |
| $v$                | : -y eksenindeki yer değiştirme                                  |
| $w$                | : -z eksenindeki yer değiştirme                                  |
| $w_1$              | : Plak genişliği                                                 |
| $\alpha$           | : lamine orta düzleminin eğimi                                   |
| $\theta$           | : Yama fiber açısı                                               |
| $\beta$            | : Plak fiber açısı                                               |
| $\lambda_i$        | : Öz değer                                                       |
| $\emptyset$        | : x ve y yer değiştirme ifadesine bağlı bir gerilme fonksiyondur |
| $\Pi$              | : Toplam potansiyel enerji                                       |
| $\vartheta$        | : Poisson oranı                                                  |
| $\sigma_1$         | : Asal eksenindeki gerilme                                       |
| $\varphi_i$        | : Yer değiştirme öz vektörü                                      |
| $\{\Delta U_i\}$   | : Yer değiştirme vektörünün artışı                               |
| $\emptyset D$      | : Delik çapı                                                     |

## KISALTMALAR

|       |                                                                                    |
|-------|------------------------------------------------------------------------------------|
| CNT   | : Carbon Nanotubes (Karbon nanotüp)                                                |
| DIC   | : Digital Image Correlation (Dijital Görüntü Korelasyonu)                          |
| FEM   | : Finite Element Method (Sonlu Elemanlar Yöntemi)                                  |
| GRE   | : Glass Reinforced Epoxy (Cam Elyaf Takviyeli Epoksi)                              |
| GNP   | : Graphene Nanoplatelets (Grafen Nano tabakaları)                                  |
| ILSS  | : Interlaminar shear strength (Tabakalar arası kayma mukavemeti)                   |
| MWCNT | : Multi-Walled Carbon Nanotubes (Çok duvarlı karbon nano tüp)                      |
| LVDT  | : Linear variable differential transformer (Doğrusal Değişken Fark Transformatoru) |



# 1. GİRİŞ

Makine ve yapı sistemlerinde çok sayıda ve farklı türde elemanlar mevcuttur. Bu elemanların tasarlanmasında en büyük sorun boyutlar ve dayanımdır. Dayanım, elemanların boyutlarının artırılmasıyla çözülebilecek bir problemidir. Ancak bu işlem elemanların ağırlıklarının ve boyutlarının artmasına neden olmaktadır. Oysa tasarımlarda ağırlığın ve boyutların artması işçiliği ve maliyeti artıracaktır. Bu sebeple tasarımlarda, boyutları artırmadan dayanımı artırmak için mukavemet özellikleri yüksek olan farklı tip malzemelerin kullanılmasına gerek duyulmaktadır.

İzotrop bir malzeme kullanılarak istenilen amacı yerine getirmenin mümkün olmadığı durumlarda, birden fazla malzeme makro düzeyde bir araya getirilerek yeni malzemeler üretilebilir. İstenilen belirli özelliklere sahip bir malzeme elde etmek için özellikleri ve kimyasal bileşenleri birbirinden farklı birbiri içinde makro anlamda çözünmeyen iki ya da daha fazla malzemenin birleştirilmesiyle elde edilen malzemelere kompozit malzeme denir.

Kompozit malzemeler bünyelerinde bileşenlerin özelliklerini birlikte ihtiva etmeleri, daha yüksek mukavemet ve performans gösterebilme özellikleri sebebiyle de sanayide birçok alanda, makine ve yapı sistemlerinde yoğun olarak kullanılmakta ve tercih edilmektedirler.

Kompozit malzeme üretim tekniklerinin gelişmesine bağlı olarak, makine veya yapı sistemini oluşturan elemanların önemli bir bölümü kompozitten üretilme imkânına sahip olabilmektedir. Bu elemanlardan en çok kullanılanlardan biri de plaklardır.

Kompozit plaklar başta uçak ve gemi sanayi olmak üzere birçok sektörde kullanılan yapı elemanlarıdır [1, 2]. Kompozit plak tek çeşit fiber ve matriksin bir araya getirilmesiyle oluşturulabileceği gibi farklı özellikli fiberlerden birkaçının bir araya getirilmesiyle yani hibridleştirilmesiyle de üretilebilmektedir [3, 4].

Plaklar birçok sektörde kullanılan yapı elemanlarıdır. Fakat bu elemanlar burkulmaya çok elverişli olduğundan kullanılmadan önce çok iyi analizleri yapılmalıdır.

Bu çalışmada tabakalı hibrid kompozit plakların burkulması incelenmiştir. Burkulma olayı burkulma öncesi ve burkulma sonrası davranış olmak üzere iki kısımda incelenir. Burkulma öncesi (pre buckling) ve burkulma sonrası (post buckling) plak davranışları hasarsız, ortasında delik, tek kenar U ve çift kenar yarım daire çentikli numuneler için incelenmiştir. Daha sonra dairesel delikli numuneler ıslak yamalı vakum infüzyon yöntemiyle yama yapılmış ve burkulma deneyine tabi tutulmuştur. Ayrıca plakların burkulma davranışları sayısal olarak sonlu elemanlar yöntemini kullanan ANSYS paket programı kullanılarak elde edilmiş ve deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Çalışmanın amacı; çentik tipinin, kompozit yama kalınlığının, kompozit yama yüksekliğinin, kompozit plakta takviye açısının, kompozit plakta tabaka diziliminin, kompozit yamada fiber oryantasyonunun ve yama içerisine nanotüp katkısının değişiminin burkulma davranışına etkisini sayısal ve deneysel olarak incelemektir.

## 2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Bu çalışmada fiber takviyeli kompozit yamalı kompozit plakların burkulma öncesi ve sonrası davranışı önce deneysel olarak incelenmiştir. Daha sonra ise çentikli plakların fiber takviyeli kompozit yama ile tamir edilmiş hallerinin lineer olmayan burkulma öncesi ve sonrası davranışı sayısal olarak analiz edilmiş ve sonuçlar deneysel çalışma ile karşılaştırılmıştır. Önceki çalışmalarda genelde yama ile tamirde yapıştırma yöntemi kullanılırken bu çalışmada yama, vakum ortamında sıcaklık kontrollü olarak ıslak yama yöntemi ile yapılmıştır. Nanotüp takviyeli matriks malzemesinin fiber kumaşlara homojen olarak emdirilmesinde ıslak yama yöntemi etkilidir. Bu yöntemle yama ile ana plak tek bir parça olacak şekilde hareket ederek burkulma için gerekli yükün artacağı öngörülmüş ve sonuçta uygun yama ve plak özelliklerinin tespitinin yapılabilmesi hedeflenmiştir.

Kompozit malzemeler ileri teknoloji ürünü olup geleneksel malzemelerin yerini almaya başlamışlardır. Dolayısıyla geleneksel malzemeler hangi yapı veya makine elemanı olarak kullanılıyorsa kompozitlerde bu alanlarda kullanılmaya başlanmış ve ilgili çalışmalar yapılmıştır. Potoğlu, E-camı/epoksi kabuklu PVC ve PET köpüğü çekirdekli sandviç kompozit malzemelerin düşük hızlı darbe test davranışlarını deneysel olarak incelemiştir [1]. Yıldız, ANSYS sonlu elemanlar yazılımı kullanarak basit mesnetli ve eksenel basma yükü altında fiber kompozit plakların burkulma analizlerini yapmıştır [2]. Zhu vd. diğ., tek eksenli basınç yükü altında, desteklenmiş kompozit panelin I şeklindeki desteğinin rijitliğinin, çökene kadar burkulma ve burkulma sonrası davranışına etkisini incelemişlerdir [5]. Whittingham vd. kompozit uçak yapılarının kalınlık boyunca kademeli tamirinde sert yamanın üretilmesi için iki yöntem araştırılmışlardır [6]. Birincisi, yamanın bir kalıp içine yerleştirildiği ve onarım boşluğuna bağlanmadan önce kürlendiği kalıplanmış yaklaşım diğeri yamanın bir kompozit panelden işlenmesini içerir.

Kompozit malzemeler yapı elemanlarının yerine kullanılmaya başlanmasıyla kullanıldığı yerlere göre çeşitli yüklemelere maruz kalabilmektedir. Bu yüklemeler karşısında gerek yapı elemanları gerek kompozit malzemeler hasar görür ve bunların tamiri önem kazanır. Gerek geleneksel gerekse kompozit malzemelerin tamirinde çeşitli yöntemler kullanılmıştır. Tamir konusunda yapılan çalışmalar incelendiğinde mekanik bağlantılı ve yapıştırırmalı olmak üzere iki tip birleştirme metodu vardır. Bu iki metodla ilgili çok sayıda çalışmalar yapılmıştır. Mekanik bağlantılı birleştirme yönteminde Mariam vd. alüminyum alaşımlı (AA7075) ve cam elyaf takviyeli epoksi (GRE) kompozitin benzer ve birbirine benzemeyen bindirmeli birleşimlerinin gerilme ve yorulma özelliklerini incelemiştir. Mekanik olarak tutturulmuş Huck cıvatalı bağlantılar, Araldite epoksi yapıştırıcı bağlantılar, yapıştırıcı ve Huck cıvatalar içeren hibrid üç birleştirme yöntemi kullanılmıştır [7]. Zhai vd. tek turlu, havşa başlı kompozit-alüminyum cıvatalı bağlantıların yatak

tepkisi üzerine birleştirme ara yüzü koşulunun (kesme ve arayüz boşluğu dahil) etkisi üzerine deneysel çalışmışlardır [8]. Armentani vd. çekme dış yüküne maruz kalmış tek bindirmeli bir hibrid (yapışmalı/cıvatalı) kompozit birleşiminin yapısal davranışını Sonlu Elemanlar Yöntemi (FEM) ile değerlendirmişlerdir [9].

Mekanik bağlantılı birleştirmede, birleştirme elemanlarının parçalar üzerinde kullanılabilmesi için parçalarda delik açılması gerekmektedir. Açılan delikler parçanın dayanımı açısından zayıflaması anlamına gelmektedir. Parçalara yük uygulandığında bu delik açılmış bölgede gerilme yığılmaları oluşmaktadır. Oluşan gerilmelere parçaların dayanabilmesi için parça kesitinin artırılması ya da daha mukavemetli malzeme kullanılması gerekmektedir. Oysa kesitin artırılması ağırlığın dolayısıyla da maliyetin artması anlamına gelmektedir. Günümüzde özellikle uçaklarda ağırlığın artması maliyeti artıracığından dolayı istenmez.

Yapıştırıcıyla yapılan birleştirmelerde ise elemanlar arasındaki temas alanı büyük olduğundan dolayı yük transferi daha iyi ve gerilme daha düşüktür [10]. Yapıştırıcı kullanılarak yapılan birleştirmelerde; farklı malzemeler birleştirilebilir, gerilme dağılımı düzgün olur, yapışan malzemeler özelliklerini korur, sızdırmazlık sağlar, aerodinamik yüzeyler elde edilir ve korozyon direnci sağlanır. Bu birleştirmeler; iyi dinamik-yorulma direnci sağlar, düşük maliyetli bir yöntemdir, farklı ve karmaşık geometrilere uygulanabilir ayrıca ağırlığı azaltır, titreşimi sönümler. Yapıştırmayla tamir; gerek metal üzerine dıştan metal yamayla [11], gerek metal üzerine dıştan kompozit yamayla [12, 13], gerekse de çeşitli yapı elemanı olarak kullanılan kompozit malzeme üzerine kompozit yamayla [6, 14] yapılmaktadır.

Yapıştırma ile ilgili çalışmalar incelendiğinde, Jian-Bin vd. iki taraflı kompozit yama ile onarılmış kalın merkezi çatlak içeren alüminyum plakların (10 mm) yorulma davranışı üzerine deneysel bir çalışma yapmışlardır. Kompozit prepregler alüminyum plağa elle yatırma yöntemiyle yapıştırılmıştır. Onarılmış örneklerin alanları vakum torbasına konulmuş ve 0.1 MPa basınçta 80 C° 'de 4 saat ve 120 C° 'de ise 2 saat süreyle kürlenmiştir. Yorulma testlerinde, iki taraflı onarılan numunelerin yorulma ömrünün, hasar görmemiş numunelerin yorulma ömründen 31 kat daha fazla olduğu görülmüştür [15]. Rezgani, karbon/epoksi kompozit yama ile yapıştırılarak onarılan hasarlı 2024-T3 alüminyum plağın yorulma davranışı üzerindeki etkisini yama ve yapışkan açısından analiz etmiştir. Su ile daldırma süresi ne kadar fazlaysa, onarılmış yapının yorulma dayanımı o kadar az olduğu ve kırılma döngüsü sayısının doğrudan yaşlanma süresine bağlı olduğunu belirlemiştir [16]. Osnes vd. yapışkanla birleştirilen katlar arasındaki bağ mukavemetini incelemiştir. Epoksi bazlı yapısal yapıştırıcılar kullanılarak ön çatlaklı kirişlere kompozit yamalar uygulanmıştır. Deneysel olarak elde edilen hatalı yükler, sunulmuş ve teorik tahminlerle karşılaştırılmıştır [17]. Andrew ve Arumugam, hibrid dış yamalı, hasar görmüş cam/epoksi kompozit laminatların çekme tepkisini incelemişlerdir. Hasar gören ana laminanın her iki yüzüne de cam ve kevlar dokuma kumaşlar içeren hibrid harici yamalar kullanılmıştır [18]. Ergun vd. tek

yönlü kompozit plaklardan yapılmış yamayla yapıştırılmış 2024 alüminyumun onarılan çatlaklardaki yorulma ömrü, hidrotermal etki açısından deneysel ve sayısal olarak araştırılmıştır. Bu deneylerden elde edilen sonuçlar ve sayısal çözümler karşılaştırılmıştır. Böylece sayısal çözüm güvenilirliği kanıtlanmıştır [19]. Cheng, vd. harici yamalarla yapıştırılan kompozit yapıların gerilme davranışlarını incelemişlerdir. Yama onarımlarını optimize etmek için sonlu elemanlar modellemesi kullanılmıştır. Ana plağın her iki tarafına farklı oryantasyonlarda çeşitli yamalar kullanılmış ve optimum yama tamiri sonlu elemanlar modellemesi ile hesaplanmıştır. Böylece çentiksiz bir numunenin dayanımının %90 'ından fazlası elde edilmiştir [20]. Aggelopoulos vd. kalınlık yönünde büyüyen yorulma çatlaklarına sahip çelik plakların kompozit yama ile güçlendirilmesini hem analitik hem de deneysel olarak incelemişlerdir. Bu amaçla, özel olarak tasarlanmış ve hazırlanmış yamalı çatlaklı çelik numunelerin yorulma testleri gerçekleştirilmiştir. Sonuçta çatlak büyümesinin, analitik olarak elde edilen sonuçlarla makul derecede uyumlu olduğu bulunmuştur [21]. Aakkula ve Saarela, çatlak içeren alüminyum plakları çok yönlü karbon/epoksi ve bor/epoksi yamalar ile onarmışlardır. En iyi performans, en yüksek rijitlik oranına sahip ıslak yapıştırılmış yamalarda elde edilmiştir [22]. Gong vd. dış yama onarımının optimizasyonu için bir metod önermişlerdir. Yamalı onarım ile çentikli numunelerin çekme davranışı sonlu elemanlar analizi kullanılarak incelenmiş ve deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Ana malzemeden dairesel parça kesilerek standart yapıştırma prosedürüyle plağın her iki tarafına yama yapılmıştır. Optimum yama tasarımının mukavemet oranı ile karakterize edilebileceği bulunmuştur [23]. Schubbe vd. çatlaklı 7050, 7075, 5083 ve 6061 serisi alüminyum plakların korozyona maruz kalmış bir ortamda yorulma koşulları altındaki servis ömrünü uzatmak için kompozit yamanın performansını araştırmışlardır [24]. Coelho vd. yama ile onarılmış kompozitlerin performansını incelemişlerdir. Elle yatırma yöntemi ile plaklar üretilmiştir. Bu plaklar 20 mm çapında delinmiş ve bu plaklara küçük ebattaki yamalar tek ve çift taraflı yapıştırılarak darbe performansı incelenmiştir. Maksimum yük çift taraflı yapıştırma da elde edilmiştir [25]. Park ve Kong, düşük hızlı darbe hasarı ve hasarlı bölgenin çıkarılıp dış yama ile tamir edilmesini incelemişlerdir. Çalışmada numuneler otoklav ile imal edilmiştir. Tamirin etkisini görmek için hasarsız ve tamir yapılmış numuneler için basınç gerilme testleri yapılmıştır [26]. Caminero vd. tek eksenli çekme yükü altında çentikli (açık delikli) numunelerde meydana gelen hasarlar üzerinde durmuşlardır. Kompozit paneller elle yatırma yöntemiyle prepreg bantlarla üretilmiştir. Çekme yükü altında kompozit panellerde yapışkanla birleştirilen yama onarımının performansını karakterize etmek için DIC tekniği kullanılmıştır [27]. Manalo vd. önden reçine emdirilmiş karbon fiber takviyeli onarım sistemi ile, kirişlerin yapısal testini yapmışlardır. Sonuçlar, laminat üretimi sırasında vakum kullanılmasının, elyafa katmanlarının daha iyi bir şekilde sağlamlaştırılmasından ötürü daha iyi mekanik özellikler sağladığını göstermiştir [28].

Kompozit malzemeler ileri teknoloji ürünleridir ve mekanik özellikleri oldukça iyi olmalarına karşın bu özelliklerinin daha da artırılması için pek çok çalışma yapılmaktadır. Kompozitlerin mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi için yeni uygulamalardan olan nanotüp eklenmesi üzerine çeşitli çalışmalar yapılmış ve yapılmaya devam edilmektedir. Matriks malzemesi içerisine nano partikül takviyesinin, reçine mukavemetini ve elyaf/matriks ara yüzey bağını iyileştirdiği bilinmektedir [29-31]. Karbon elyaf takviyeli epoksi kompozitlerin ara yüzey dayanımına etki eden kimyasal bağlanma performansı, nano teknolojik yöntemler ile Acar vd. tarafından arttırılmaya çalışılmıştır. Bu kapsamda reçine içine kütlece %0,1 oranında iki ayrı kimyasal işlem görmüş “Grafen” nanopartiküller (GO) eklenmiş ve kompozit–prepreg üretim yöntemi ile nano partikül katkılı karbon elyaf takviyeli kompozitler üretilmiştir. Grafen eklenmiş kompozitin tabakalar arası kayma mukavemeti (ILSS) değerinde %58 oranında artışlar sağlanarak kompozitin ara yüzey dayanımı arttırılmıştır. [32]. Rafiee vd. epoksi içerisine kütlece %0.1 oranında grafen ve tek/çok katmanlı karbon nano tüplerin, kompozitin mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Buna göre, grafen kompozitlerde elastisite modülünü yaklaşık %31 artırırken, tek katmanlı karbon nanotüp %3 civarında artırmıştır. Ayrıca Mod I kırılma tokluğunu, grafen %53 artırırken, çok katmanlı karbon nanotüpte bu artış %20’ler seviyesinde gerçekleşmiştir [33]. Zaman vd. iki farklı ara yüzey dayanıma sahip grafen/epoksi nano kompozit üretilmiştir. Grafen eklenerek imal edilen kompozitlerin, katkısız kompozitlere göre yüksek mekanik özellikler sergiledikleri gözlenmiştir [34]. Li vd. epoksi matriks içine eklenmiş hibrid CNT-GNP/epoksi karışımının, optimum nano partikül dağılımı sağladığı, ayrıca kompozitin yük dağıtma kabiliyetini arttırdığı belirlemişlerdir. Sonuç olarak, %0.5 ’lik bir hibrid katkı ile çekme mukavemeti %36 artarken, elastisite modülünde %40 artış sağlanmıştır [35]. Avila ve Peixoto, grafen takviyesinin karbon elyaf/epoksi kompozitinin eğilme performansına olan etkisi için yapılan bir çalışmada kütlece %0.5 oranında takviye edilen grafen nano partiküllerinin, kompozitin eğilme mukavemetini 623 MPa ’dan 1260 MPa ’a çıkardığını belirtmişlerdir [36]. Shishevan vd. kompozitin reçinesine iki farklı oranda grafen veya karbon nanotüp ekleyerek bu kompozitlerin elyaf-matriks ara yüzey davranışlarının iyileştirilmesi ve kompozit tokluğunun artırılması üzerinde çalışmışlardır. Çalışma kapsamında kullanılan kompozit numuneler vakum torbalama yöntemi kullanılarak üretilmiş ve su jeti ile kesilmiştir. Üretilmiş kompozit malzemeler, tokluğun belirlenmesi amacıyla düşük hızlı darbe deneyine tabi tutulmuştur. Çalışmadan elde edilen sonuçlara göre, reçinesine karbon nanotüp ve grafen eklenmiş kompozitin mekanik özelliklerinin yüksek oranda arttığı ve ayrıca tokluğunun artmasıyla birlikte darbe davranışının iyileştiği gözlenmiştir [37]. Xu ve Hoa, reçinesine kütlece %0.1 MWCNT nano katkı eklenmesi ile elastisite modülünün %20 arttığını belirlemişlerdir. Araştırma sonuçlarına göre, kompozitin mekanik özelliklerinin daha da iyileştirmesi için kullanılan MWCNT oranını arttırmak gerekmektedir [38]. Kim vd. karbon elyaf takviyeli kompozit malzemenin reçinesine CNT eklemişler ve mekanik

özelliklerini araştırmışlardır. Malzemenin çekme özelliklerinde pek fazla bir değişme olmamıştır. Reçineye %0.3 oranında CNT eklendiğinde malzemenin eğilme modülünde %12 ve eğilme mukavemetinde %18 'lik bir artış görülmüştür. Malzemenin özelliklerindeki bu iyileşmenin, nano partikül eklenmesinin malzeme kusurlarında azalmaya neden olmasıyla açıklanmıştır [39]. Hao ve Yu, karbon elyaf takviyeli kompozit malzemelerin reçinesini GNP eklemiş ve bunun etkilerini eğilme deneyleri yaparak araştırmışlardır. Reçineye GNP eklenmesi, kompozit malzemenin sertliğinin ve eğilme mukavemetinin artmasına neden olmuştur. %0, %0.5 ve %1.5 oranlarında GNP matriks malzemesine eklenmesi ile eğilme rijitliği 28 GPa dan 77 GPa'a kadar artmıştır. Kompozitin matriks malzemesine %1.0 ve %1.5 GNP eklenmesi, numunelerin sertlik değerlerinde hafif bir artışa neden olmuş ve sırasıyla 38 GPa 'lık ve 59 GPa 'lık eğilme rijitliği değerleri elde edilmiştir [40].

Kompozit malzemeler yapı elemanı olarak kullanıldıkları yerlere göre çeşitli yüklemelere maruz kalmaktadırlar. Bu yüklemelerden biride burkulma yüklemesidir. Kompozit plaklar yüksek dayanım ve mekanik özelliklerinden dolayı ince olarak imal edilirler. Kompozit plakların ince olmaları onların kolaylıkla burkulmaya maruz kalmasına neden olmaktadır. Bu sebeple burkulma analizlerinin çok iyi yapılması gerektiğinden, burkulma ile ilgili çok sayıda çalışma yapılmıştır. Yeter vd. hibridleştirilen, simetrik ve simetrik olmayan fiber oryantasyonlarının, değişik kesme şekillerinin ve uzunluk/kalınlık oranlarının, kompozit plakların burkulma davranışları üzerine etkisini incelemişlerdir. Aynı zamanda sayısal çalışmada uzunluk/kalınlık oranı ve farklı kesme şekillerinin burkulma yüküne etkisini araştırmışlardır. Karbon, aramid ve cam fiberlerden hibridleştirme yapılarak deneysel olarak burkulmasına bakılmış ve sayısal çalışmada ise lineer burkulma analizi yapılarak kritik burkulma yükü araştırılmıştır [3]. Üçüncü, kompozit plaklarda değişik geometriye sahip deliklerin bulunması halinde plağın taşıyabileceği kritik burkulma yükünü incelemiştir. Lineer analizde kritik burkulma yükü, farklı ebat ve geometrideki delikler için analitik ve sayısal olarak bulunmuş ve karşılaştırılmıştır. Delik şeklinin burkulma yüküne etkisinin, delik kesit alanından daha önemli olduğunu vurgulamışlardır [41]. Ovesy vd. genişliği boyunca delemantasyon bulunan kompozit tabakanın burkulma ve sonrası davranışını analitik olarak araştırmışlardır. ANSYS bilgisayar programı ile sonuçlar karşılaştırılmış ve uyum elde edilmiştir [42]. Kharazi vd. genişliği boyunca delemantasyonlu kompozit tabakanın burkulma davranışını farklı plak teorisi kullanarak çalışmışlardır. ANSYS sonlu elemanlar programı kullanılarak sonuçlar elde edilerek karşılaştırılmış ve uyumlu sonuçlar bulunmuştur [43]. Czapski ve Kubiak, statik basınca maruz ince cidarlı kare kesitli tüplerin burkulma ve burkulma sonrası davranışlarını incelemişlerdir. ANSYS ile sayısal olarak tüp modeli hazırlanmış, lineer ve lineer olmayan burkulma analizi yapılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır [44]. Yaman, statik yükleme altında, basit mesnetli, izotropik dikdörtgen plakların lineer burkulma problemini incelemiştir. Kritik burkulma yükü analitik ve sayısal olarak elde edilerek karşılaştırılmış kritik burkulma yüküne kesit boyutunun

önemli biçimde etki ettiği vurgulanmıştır [45]. Eryiğit, tarafından dairesel delikli tabakalı kompozit kirişlerde, lineer burkulma davranışları araştırılmıştır. Kiriş bir ucundan ankastre olarak mesnetlenmiş, diğer ucundan düşey doğrultuda yanal yük uygulanmıştır. ANSYS yardımıyla, kiriş boyutunun, kirişteki dairesel deliğin konum ve boyutlarının yanal kritik burkulma yüküne etkileri farklı fiber yönlendirme açılarına göre incelenmiştir [46]. Labeas vd. hasarlı kompozit plağın burkulma ve burkulma sonrası davranışını sayısal olarak irdelenmiştir [47]. Bingöl, dairesel plakların lineer burkulma davranışlarını deneysel ve sayısal olarak çalışmıştır. Alüminyum ve kompozit dairesel plak için kritik burkulma yükü hesaplanmış ayrıca plak kalınlığı, delik boyutu, tabaka sayısı gibi etmenlerin burkulma yüküne etkisi irdelenmiştir [48]. Baba, tarafından delaminasyonlu tabakalı kompozit plakların lineer burkulma davranışları araştırılmıştır. İki farklı sınır koşulu için üç boyutlu sonlu elemanlar modeli oluşturularak kompozit plakların burkulma yükleri belirlenmiştir. Sonlu elemanlar yöntemi ile burkulma yükleri üzerine delaminasyonun çapı ve konumu, fiber oryantasyonu ve farklı sınır koşullarının etkileri incelenmiştir [49]. Turan yama ile yapıştırılarak tamir edilen kompozit plakların burkulma davranışını deneysel ve sayısal olarak araştırmıştır. Dairesel delikli tek yönlü karbon/epoksi kompozit plakalar yama ile yapıştırılarak onarılmıştır. Kompozit plakların kritik burkulma yükü deliksiz, dairesel delikli, tek yamalı ve çift yamalı onarımları için araştırılmıştır. Ayrıca yama uzunluğu ve yapışkan kalınlığının etkisi incelenmiştir. Sonuçta dairesel delikli kompozit plakların tek ve çift yama ile onarılması kritik burkulma yükünü sırasıyla %96 ve %263 artırmıştır [50]. Erdem vd. dairesel deliğe sahip kompozit plakalar, ıslak yama tekniği kullanılarak kompozit yama ile tamir etmişlerdir. Kompozit levhalar, karbon ve aramid hibrid dokuma kumaştan üretilmiştir. Başlangıçta, kompozit plakalarda dairesel delik açılmıştır. Daha sonra, bu plakalar ıslak yama tekniği ile kompozit yama ile vakum infüzyon tekniğiyle tamir edilmiştir. Deneylerde tamir edilmiş kompozitlerin burkulma davranışı incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, deliği olmayan numunelerle karşılaştırılmıştır. Onarılmış numunelerin bükülme mukavemetinin, deliksiz kompozit plakalara göre % 175 arttığı görülmüştür [51]. Erdem vd. izotrop çelik plakların burkulma öncesi ve burkulma sonrası davranışlarını incelemiştir. İzotrop çelik plakların burkulma öncesi durumda, mod değerlerinin değişimine bağlı olarak meydana gelen kritik yük değeri analitik olarak elde edilmiş ve daha sonra sayısal çözüm yapılmıştır. Burkulma sonrası lineer olmayan problemde ise analitik olarak bulunan yük sehim değişimi sonuçları grafiklerde verilmiştir. Basınç kuvveti altında plağın burkulmasının analitik çözümü, sayısal olarak bulunan kritik burkulma değerleri ile karşılaştırılmıştır. Bulunan değerlerin literatür çözümleri ile uyumlu olduğu tespit edilmiştir. Maksimum kritik yük değerlerinin, geometrisinde süreksizlik bulunmayan plaklarda meydana geldiği görülmüştür [52].

Yapılan çalışmalar incelendiğinde kompozitlerde ki hasar onarımı genellikle tek ve çift taraflı olarak hazır kompozitin yapıştırıcı kullanılarak ana plak ile birleştirilmesi şeklindedir. Çalışmada daha iyi yapışma ve pratikliği açısından ıslak yama yöntemiyle onarım yapılmıştır.

Karbon günümüzde bulunmuş en yüksek mekanik özelliklere sahip olan malzemedir, bu sebeple onarımda kullanılan fiber içerisine karbon tüp eklenmiştir. Deneysel çalışmalarda, genelde kompozit plaklarda geometri, fiber oryantasyon açısı ve malzemesi değişimi için burkulma öncesi ve sonrası durum incelenirken, sayısal analizde kritik burkulma yükü hesap edilmiş ancak burkulma sonrası davranış üzerinde çok fazla durulmamıştır. Çalışmada onarılmış kompozit plakların burkulma sonrası davranışı deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Özellikle sayısal çalışmada nanotüp takviyeli kompozit yamanın burkulma sonrası davranışa katkısı literatürde olmayan bir kısımdır. Günümüzde kompozit malzemelerde mukavemet performansı ve devamlılığı önemli bir parametredir. Dolayısıyla bu çalışma ile nanotüp takviyesinin kompozit yamanın onarım performansına etkisi burkulma öncesi ve sonrası davranış için incelenmiştir.

Çalışmada çentik tipinin, kompozit yama kalınlığının, kompozit yama yüksekliğinin, kompozit plakta takviye açısının, kompozit plakta tabaka diziliminin, kompozit yamada fiber oryantasyonun ve yama içerisine nanotüp katkısının değişiminin burkulma davranışına etkisini sayısal ve deneysel olarak incelenmiştir.

### 3. PLAKLAR VE PLAKLARDA BURKULMA DENKLEMLERİ

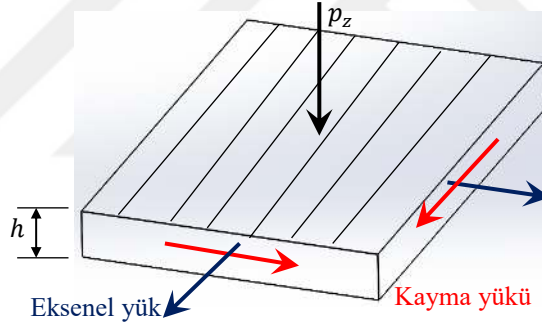
Bu bölümde, plak ve çeşitleri hakkında bilgi verilecektir. Ayrıca plaklarda burkulma ve burkulma denklemlerinin çıkarımı yapılacaktır.

#### 3.1. Plak Tanımı

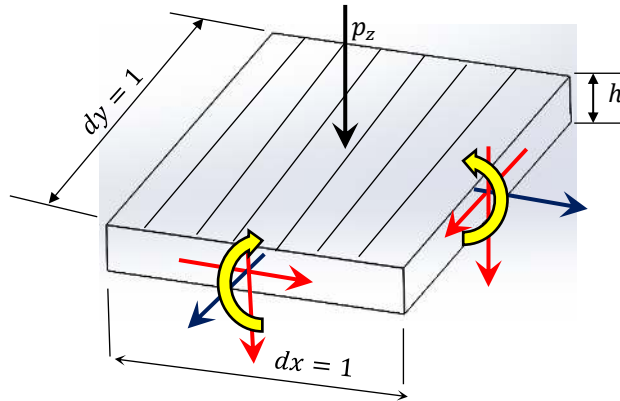
Kalınlıkları diğer boyutlarına göre çok küçük olan ve düzlem yüzeyine dik olarak yük taşıyan taşıyıcı elemanlara plak denir. Köprü, uçak ve gemiler gibi pek çok yerde kullanılmaktadır.

#### 3.2. Plak Çeşitleri

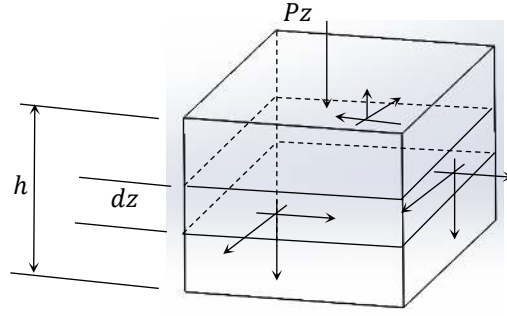
Plaklar genel olarak yanal yükleri taşıyan membranlar (Şekil 3.1), aksel ve merkezsel kayma yükleri taşıyan ince plaklar (Şekil 3.2) ve iç gerilme durumu üç boyutlu davranış gösteren kalın plaklar (Şekil 3.3) olmak üzere üç grupta incelenir.



Şekil 3.1. Membran geometrisi ve taşıdığı yükler [52]



Şekil 3.2. İnce plak geometrisi [53]



**Şekil 3.3.** Kalın plak geometrisi [53]

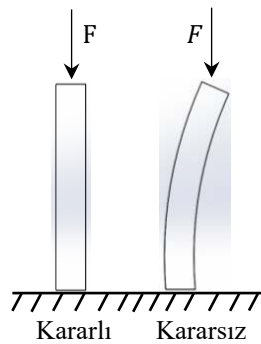
### 3.3. Plaklarda Burkulma

Plakların kesitleri ince olduğundan dolayı burkulmaya çok elverişlidir. Bu sebeple burkulma davranışları iyi analiz edilmelidir.

#### 3.3.1. Burkulmanın Tanımı

Yüklemeye maruz pek çok elemanın deformasyon karakteristiklerinde meydana gelen değişiklikler sonucunda deformasyon durumunun kararsız hale geçip, sistemin yeni bir kararlı durumu araması olayına burkulma denir.

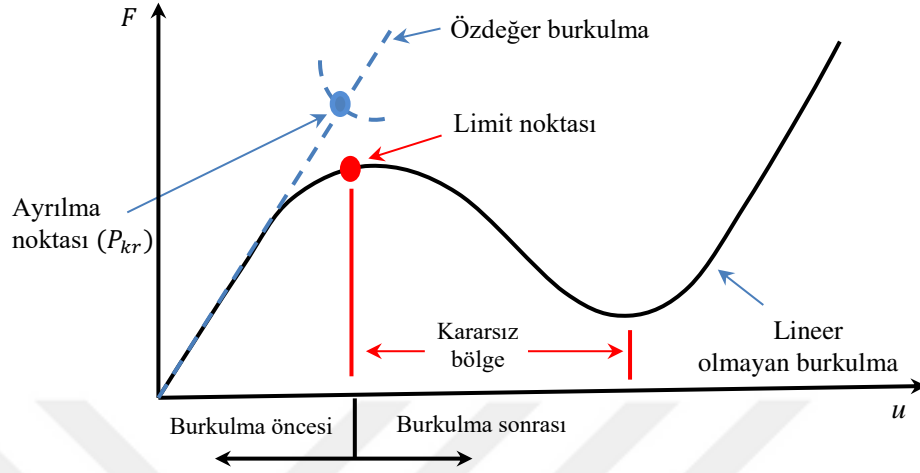
Sistemin kararlı hali, o sistemin deformasyon sonrası durumunun nasıl olacağının önceden bilinmesiyle, sistemin kararsız hali ise deformasyon sonrasının belirsizliğiyle açıklanabilir (Şekil 3.4).



**Şekil 3.4.** Kararlı ve kararsız sistem [2]

Burkulma deneyinin sonucunda çizilen kuvvet-sehim grafiği Şekil 3.5'te görülmektedir. Yükün belirli bir değerinden sonraki küçük bir artışta şekil değişimi çok büyük olmaktadır, bu noktadaki yük değeri kritik burkulma yükünü (ayrılma noktası-bifurcation point) vermektedir. Bu noktadan sonra sistem kararsız davranışa geçer ve nasıl davranacağı bilinmez. Sistemin burkulma

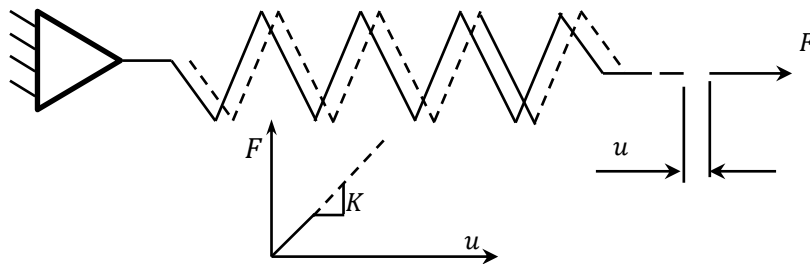
öncesi (pre-buckling) ve burkulma sonrası (post-buckling) durumunun incelenmesi lineer olmayan analizinin yapılmasını gerektirmektedir.



Şekil 3.5. Burkulma grafiği [54]

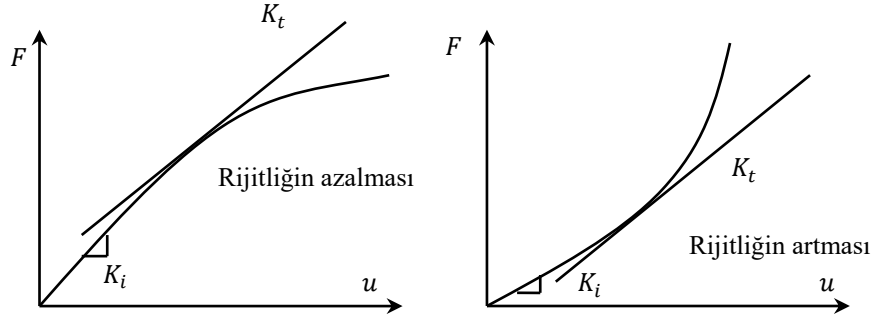
Lineer (özdeğer) problem çözümlerinde ayrılma noktasına doğru geldikçe bu metodun verdiği sonuçlar yetersiz kalmaktadır. Çünkü lineer problemin çözümleri sistemin mükemmel olduğu durum için yapılmaktadır. Ancak yapılar genellikle mükemmel olmayan davranış gösterirler. Mükemmel olan yapılarda sistemin rijitliği  $[K]$  sabit iken mükemmel olmayan yapılarda sabit değildir.

Mükemmel yapılarda rijitliğin sabit olması,  $\{F\} = [K]\{u\}$  sonlu elemanlar eşitliğiyle açıklanabilir (Şekil 3.6). Burada  $\{F\}$  uygulanan kuvvet vektörünü,  $[K]$  rijitliği ve  $\{u\}$  yer değişim vektörünü göstermektedir. Bu basit bir yay için kuvvet deformasyon eşitliğidir ve bu teoriye uyan yapılara mükemmel yapılar denir. Mükemmel olmayan yapılarda sistemin rijitliği uygulanan kuvvetin etkisiyle artıp azalabilir. Burkulan yapı sistemlerinde deformasyonun artmasıyla birlikte rijitlik te azalacaktır.



Şekil 3.6. Rijitliği sabit olan yay eşitliği [55]

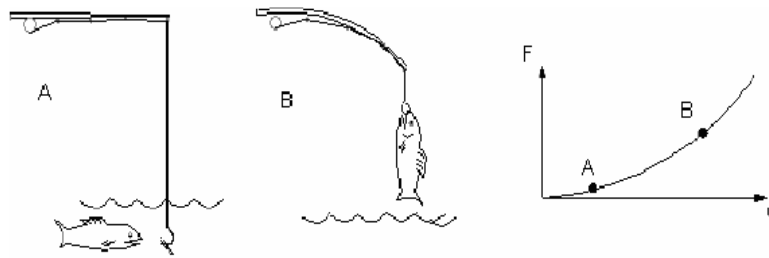
Burkulma noktasına kadar artan kuvvetle birlikte yapıda artan bir deformasyon olacaktır ancak uygulanan kuvvet burkulma yükünü aştıktan sonra çok küçük kuvvet değişimlerinde bile yapı çok büyük bir hasara uğrar, buda yapının rijitliğinin azaldığını gösterir (Şekil 3.7).



Şekil 3.7. Rijitliği değişken olan sistemlerin kuvvet-uzama grafiği [55]

Rijitliğin artmasına ise Şekil 3.8'deki uzun balık oltası örnek verilebilir. Burada küçük deformasyonla birlikte uygulanan kuvvetin arttığı gözlenir. Çünkü uygulanan kuvvetle birlikte kuvvetin yönü de değişir ve yönü değişen kuvvetin oluşturduğu eğilme momenti azalır, buda yapının rijitliğinin arttığını gösterir.

Mükemmel plak küçük deformasyon teorisi (small displacement theory) göz önüne alınarak plak elemanının orta düzleminde yüklemeye bağlı deformasyon olmadığı kabul edilip analiz yapılır.



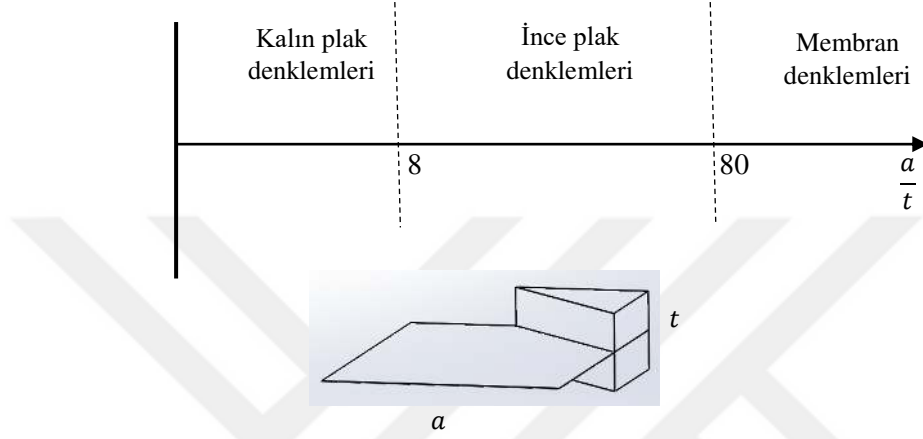
Şekil 3.8. Rijitliği artan kuvvetle artan balık oltası [55]

Mükemmel olmayan plaklar ise, büyük deformasyon teorisiyle incelenip diferansiyel elemanının orta düzleminde meydana gelen şekil değişimi dikkate alınarak analizler yapılır.

### 3.3.2. Burkulma Analizi

Burkulma analizi, sistemin kararlı halden kararsız hale geçtiği ve bunu oluşturan kritik burkulma yükünün hesabını içerir.

Plakta ne tür bir analizin yapılacağını plağın geometrisi belirlemektedir. Buna göre ayırım cetveli Şekil 3.9’ da gösterilmiştir.



Şekil 3.9. Plak denklemleri için ayırım cetveli [56]

Çalışmada plak geometrisi için uygun aralık ince plaklara denk gelmektedir, dolayısıyla ince plak geometrisi için kritik burkulma yükleri araştırılmıştır. İnce plak denklemleri, plakların küçük deformasyonu ve plakların büyük deformasyonu olmak üzere iki grupta incelenmektedir.

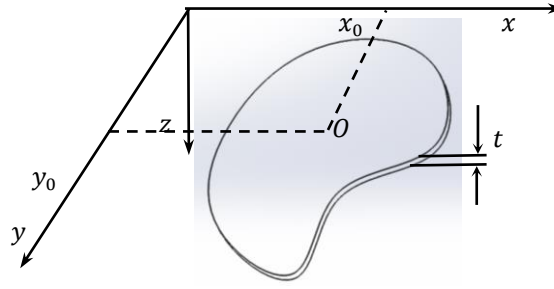
Bu iki denklemi birbirinden ayıran fark, deformasyon denklemlerinin farklılığıdır. Birinde plak orta düzlemi şekil değiştirirken diğerinde değiştirmemesidir.

### 3.3.3. Lineer Analiz

Burkulma; lineer ve lineer olmayan analiz olmak üzere iki kısımda incelenmektedir. Lineer burkulma analizde plağın burkulma şekline uygun olan yük değeri hesaplanır.

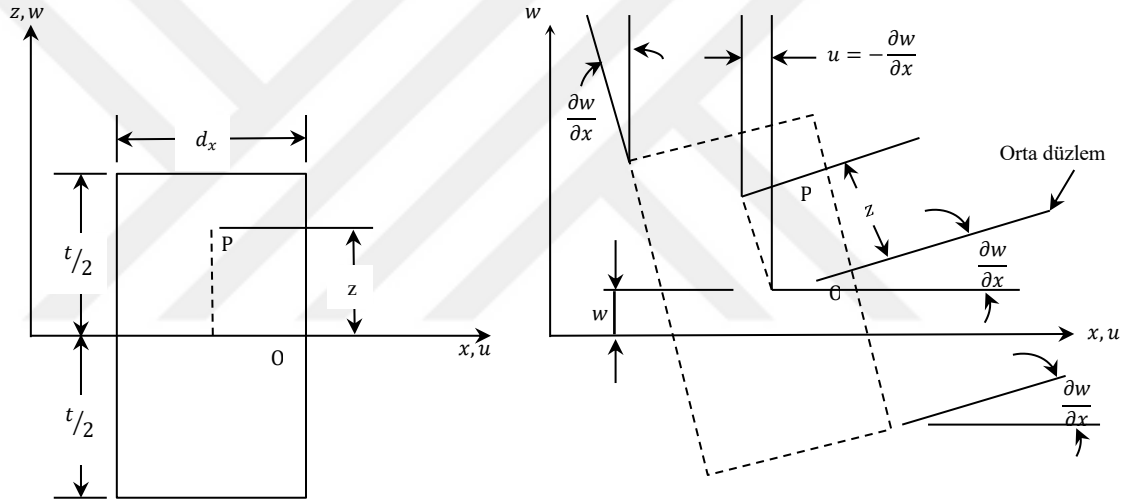
#### Küçük Deformasyonlar Denklemi

Şekil 3.10’da, xy düzlemi plağın orta düzlemi ile çakışık olan ve yük uygulanmamış bir plak gösterilmiştir. Plağın herhangi bir noktasında x, y ve z yönlerindeki yer değişimlerinin sırasıyla u, v ve w olduğu kabul edilmiştir.



Şekil 3.10. Sabit kalınlıktaki bir plak eleman [57]

Yükleme sonucu deformasyon oluştuğunda, O ( $x_0, y_0$ ) noktasının  $z$  yönündeki yer değişimi Şekil 3.11’de görüldüğü gibi  $w$  kadar olacaktır.



Şekil 3.11. Plakın bir parçasının eğilmeden önceki ve sonraki durumu [57]

“Kirchhoff Plak Teorisi” diye de adlandırılan “Plakların Küçük Deformasyon Teorisi”nde plakların eğilmesindeki ana kabuller şu şekilde açıklanabilir;

- Plak orta düzleminde ölçülen sehim (deflection) değerleri plakın kalınlığına göre küçüktür. Bu nedenle orta düzlemin sehimi ihmal edilerek hesaba katılmaz.
- Plak orta düzlemi eğilmeden etkilenmez ve konumunu korur.
- Düzlem kesitler orta düzleme dik kalabilmek için eğilme sırasında döner ve bozulmazlar. Böylelikle dik kayma şekil değiştirmeleri ile normal şekil değiştirmeleri ihmal edilir.
- Orta düzleme dik olan gerilmesi, diğer gerilme değerlerine göre çok küçük olduğundan ihmal edilebilir.

Yapılan bu kabuller sayesinde üç boyutlu plak problemi, iki boyutta incelenebilecek duruma gelir. Plakın diferansiyel denkleminin çıkarımına, ince plakların taşıdığı yüklerin gruplanmasıyla başlanabilir.

Bunlar;

- İç momentler ve kesme kuvvetleri
- Eksenel ve merkezi kayma kuvvetleri

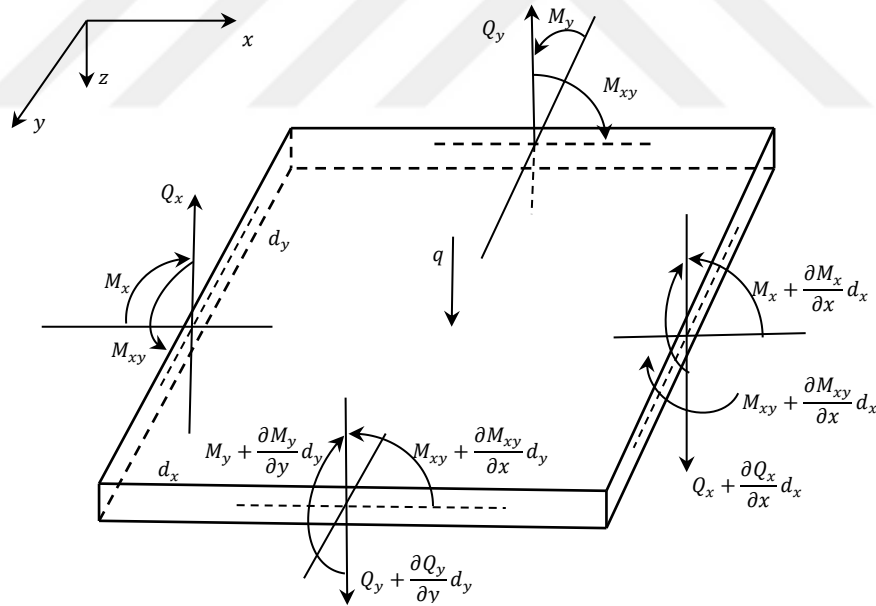
Bu tür bir gruplama diferansiyel plak eleman üzerindeki kuvvet ve moment dengelerini daha kolay anlamayı sağlar.

### İç Momentlerin ve Kesme Kuvvetlerinin Dengesi

Eğilme ve burulma momentleri ile  $xy$  düzlemine dik kesme kuvvetleri Şekil 3.12’de gösterilmiştir.

Plak diferansiyel elemana etkiyen kuvvet ve moment için denge denklemleri yazılarak;

$\sum F_z = 0$ ’dan kesme kuvvetleri,  $\sum M_x = 0$  ve  $\sum M_y = 0$ ’dan da kesme kuvvetlerinin döndürme etkilerini veren eğilme momentleri ifadeleri aşağıdaki gibi elde edilir.



Şekil 3.12. Bir plak elemanında eğilme momentleri, burulma momentleri ve kesme kuvvetleri [57]

$$\sum F_z = 0,$$

$$-Q_x dy + \left( Q_x + \frac{\partial Q_x}{\partial x} dx \right) dy - Q_y dx + \left( Q_y + \frac{\partial Q_y}{\partial y} dy \right) dx + q dx dy = 0 \quad (3.1)$$

ifadesinde gerekli sadeleştirmeler yapıldıktan sonra Denklem 3.2 elde edilir. Burada  $Q_x, Q_y$  ve  $q_z$  sırasıyla diferansiyel elemanın kenarlarında oluşan net kesme kuvvetleri ve diferansiyel elemana gelen dik yükleri göstermektedir.

$$\frac{\partial Q_x}{\partial x} + \frac{\partial Q_y}{\partial y} + q_z = 0 \quad (3.2)$$

$$\Sigma M_x = 0,$$

$$Q_y dx \frac{dy}{2} + \left( Q_y + \frac{\partial Q_y}{\partial y} dy \right) dx \frac{dy}{2} + M_y dx - \left( M_y + \frac{\partial M_y}{\partial y} dy \right) dx - M_{xy} dy + \left( M_{xy} + \frac{\partial M_{xy}}{\partial x} dx \right) dy = 0 \quad (3.3)$$

ifadesinde gerekli sadeleştirmeler yapıldıktan sonra Denklem 3.4 elde edilir. Burada,  $M_y$  ve  $M_{xy}$  diferansiyel elemanın kenarlarında oluşan eğilme ve burulma momentleridir.

$$Q_y - \frac{\partial M_y}{\partial y} + \frac{\partial M_{xy}}{\partial x} = 0 \quad (3.4)$$

$$\Sigma M_y = 0,$$

$$-Q_x dy \frac{dx}{2} - \left( Q_x + \frac{\partial Q_x}{\partial x} dx \right) dy \frac{dx}{2} - M_x dy + \left( M_x + \frac{\partial M_x}{\partial x} dx \right) dy - M_{yx} dx + \left( M_{yx} + \frac{\partial M_{yx}}{\partial y} dy \right) dx = 0 \quad (3.5)$$

bu ifadelerde sadeleştirmeler yapıldıktan sonra Denklem 3.6 elde edilir.

$$Q_x - \frac{\partial M_x}{\partial x} + \frac{\partial M_{yx}}{\partial y} = 0 \quad (3.6)$$

Denklem 3.4 ve 3.6 Denklem 3.2’de yerine yazarak, Denklem 3.7 elde edilir.

$$\left( \frac{\partial M_x}{\partial x} - \frac{\partial M_{yx}}{\partial y} \right) + \left( \frac{\partial M_y}{\partial y} - \frac{\partial M_{xy}}{\partial x} \right) + q_z = 0 \quad (3.7)$$

### Eksenel ve Kayma (Kesme) Kuvvetlerinin Dengesi

Şekil 3.13’te plak elemanına gelen eksenel ve merkezi kayma kuvvetleri görülmektedir. Plak elemanına gelen  $x$  ve  $y$  yönündeki kuvvetlerin dengesinden,

$$\Sigma F_x = 0,$$

$$\frac{\partial N_x}{\partial x} + \frac{\partial N_{xy}}{\partial y} = 0 \quad (3.8)$$

$$\Sigma F_y = 0,$$

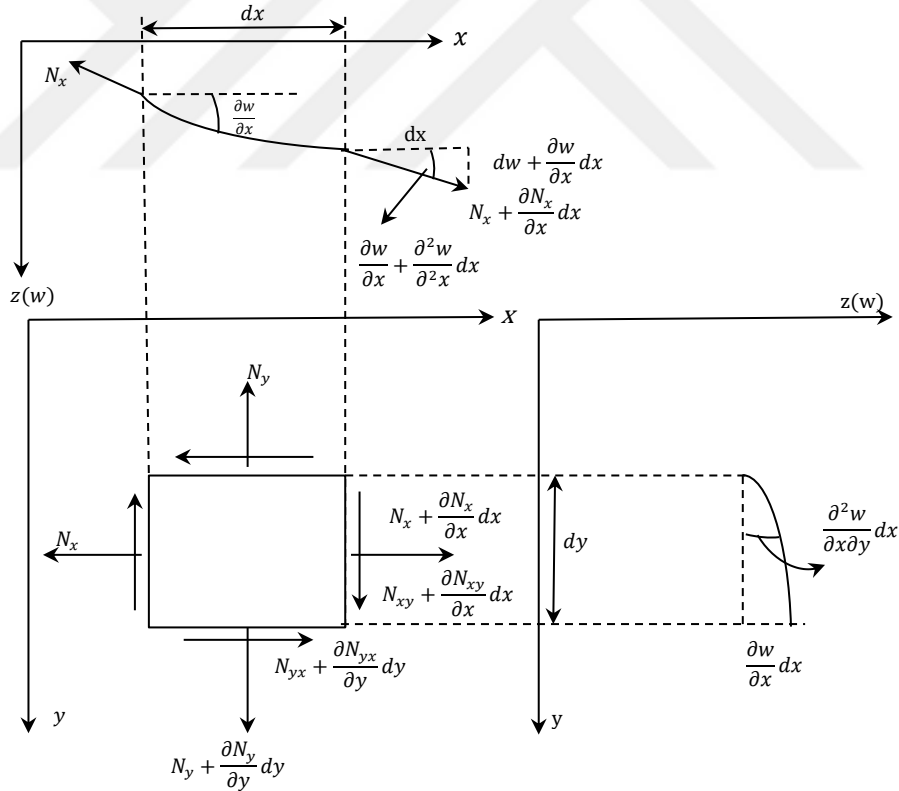
$$\frac{\partial N_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial N_y}{\partial y} = 0 \quad (3.9)$$

eşitlikleri bulunur. Burada  $N_x$ ,  $N_y$  ve  $N_{xy}$  plağın bir birim uzunluğundaki kuvvetleri tanımlamaktadır. Şekil 3.13' de verilen diferansiyel elemanın statik dengesini sağlamak için, üzerine etkiyen aynı yöndeki kuvvetleri ele alacağız.  $x$  yönündeki  $N_x$  ve  $N_x + \frac{\partial N_x}{\partial x} dx$  kuvvetleri,  $xy$  düzlemi ile yaptığı açılarla çarpılarak kesme kuvvetlerinin  $z$  yönündeki bileşenlerini veren Denklem 3.10 elde edilir.

$$-N_x \frac{\partial w}{\partial x} dy + \left( N_x + \frac{\partial N_x}{\partial x} dx \right) \left( \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} dx \right) dy \quad (3.10)$$

bu ifade sadeleştirilerek Denklem 3.11 elde edilir.

$$N_x \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} dx dy + \frac{\partial N_x}{\partial x} \frac{\partial w}{\partial x} dx dy \quad (3.11)$$



Şekil 3.13. Bir plak elemanında eksenel kuvvetler ve kayma kuvvetleri [58]

Aynı şekilde,  $y$  yönündeki kuvvetlerinde, aynı yöntemle  $z$  yönündeki bileşenleri Denklem 3.12'deki gibi bulunur.

$$N_y \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} dx dy + \frac{\partial N_y}{\partial y} \frac{\partial w}{\partial y} dx dy \quad (3.12)$$

$N_{xy}$  Kesme kuvvetlerinin  $z$  yönündeki bileşenine bakılınca, elemanın karşılıklı iki yüzünde, elastik yüzeyin  $y$  doğrultusundaki eğiminin  $\frac{\partial w}{\partial y}$  ve  $\left(\frac{\partial w}{\partial y}\right) + \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y}\right)dx$  olduğu anlaşılır. O zaman kesme kuvvetlerinin  $z$  yönündeki bileşeni Denklem 3.13'deki gibi olur.

$$N_{xy} \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} dx dy + \frac{\partial N_{xy}}{\partial x} \frac{\partial w}{\partial y} dx dy \quad (3.13)$$

$N_{xy} = N_{yx}$  eşitliğinden yararlanarak, bütün kesme kuvvetlerinin  $z$  yönündeki bileşenleri yazılırsa Denklem 3.14 eşitliği elde edilir.

$$2N_{xy} \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} dx dy + \frac{\partial N_{xy}}{\partial x} \frac{\partial w}{\partial y} dx dy + \frac{\partial N_{xy}}{\partial y} \frac{\partial w}{\partial x} dx dy \quad (3.14)$$

Yukarıda elde ettiğimiz Denklem 3.12, 3.13 ve 3.14'de elde ettiğimiz ifadeler Denklem 3.7'de yerine yazılıp, Denklem 3.15 elde edilir.

$$\frac{\partial^2 M_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M_y}{\partial y^2} - 2 \frac{\partial^2 M_{xy}}{\partial x \partial y} = - \left( q_z + N_x \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + N_y \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + 2N_{xy} \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right) \quad (3.15)$$

Burada, moment ifadelerini  $w$  ( $z$  yönündeki yer değişim) cinsinden yazmak için, ilk önce; plağın eğilmeden sonraki yer değişimlerini Plakların Küçük Deformasyon Teorisinde belirtilen kabullere uygun biçimde düzenlemek gerekir (Eş 3.16).

$$\begin{aligned} w &= w(x, y) \\ u &= -z \frac{\partial w}{\partial x} \\ v &= -z \frac{\partial w}{\partial y} \end{aligned} \quad (3.16)$$

Daha sonra yer değiştirme ifadelerinden şekil değiştirmeler elde edilebilir.

$$\begin{aligned} \epsilon_x &= \frac{\partial u}{\partial x} = -z \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \\ \epsilon_y &= \frac{\partial v}{\partial y} = -z \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \\ \epsilon_z &= \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \end{aligned} \quad (3.17)$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} = -2z \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y}$$

$$\gamma_{yz} = \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} = -\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial y} = 0$$

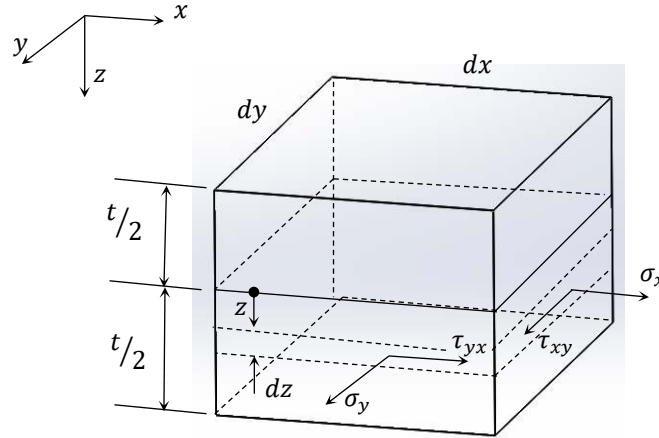
$$\gamma_{xz} = \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} = -\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial x} = 0$$

Sınır şartlarından şekil değıştirme bileşenleri sıfırdır. Buradan şekil değıştirmelere bağı olarak

$$\begin{aligned}\sigma_x &= \frac{E}{1-\nu^2} (\varepsilon_x + \nu \varepsilon_y) = -\frac{Ez}{1-\nu^2} \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) \\ \sigma_y &= \frac{E}{1-\nu^2} (\varepsilon_y + \nu \varepsilon_x) = -\frac{Ez}{1-\nu^2} \left( \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) \\ \tau_{xy} &= \frac{E}{2(1+\nu)} \gamma_{xy} = -\frac{Ez}{2(1+\nu)} \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y}\end{aligned}\quad (3.18)$$

gerilmeler elde edilir.

Normal ve kayma gerilmelerinden dolayı oluşan  $M_x$ ,  $M_y$  ve  $M_{xy}$  moment büyüklükleri, bahsedilen gerilmelerin orta düzleminden olan uzaklıklarıyla doğru orantılıdır. Şekil 3.14'te eğilme ve burulma momentlerine ilişkin normal ve kayma gerilmeleri gösterilmiştir.



Şekil 3.14. Eğilme ve burulma momentlerine ilişkin normal ve kayma gerilmeleri [57]

Bir birim uzunluktaki net moment ifadeleri aşağıdaki eşitliklerde verilmiştir [58].

$$M_x = \int_{-t/2}^{t/2} \sigma_x z dz \quad (3.19)$$

$$M_y = \int_{-t/2}^{t/2} \sigma_y z dz \quad (3.20)$$

$$M_{xy} = - \int_{-t/2}^{t/2} \tau_{xy} z dz \quad (3.21)$$

Elde edilen moment ifadelerinde gerilmelerin yerine  $w$  şekil değiştirmeler cinsinden değerleri yazılarak integrali alınır aşağıdaki eşitlikler bulunur.

$$M_x = \int_{-t/2}^{t/2} \sigma_x z dz = \int_{-t/2}^{t/2} \left( - \frac{E z}{1-\nu^2} \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) \right) z dz$$

$$M_x = -D \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) \quad (3.22)$$

$$M_y = \int_{-t/2}^{t/2} \sigma_y z dz = \int_{-t/2}^{t/2} \left( - \frac{E z}{1-\nu^2} \left( \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) \right) z dz$$

$$M_y = -D \left( \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) \quad (3.23)$$

$$M_{xy} = - \int_{-t/2}^{t/2} \tau_{xy} z dz = - \int_{-t/2}^{t/2} \left( - \frac{E z}{(1+\nu)} \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right) \right) z dz$$

$$M_{xy} = D(1-\nu) \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \quad (3.24)$$

Bu eşitliklerde geçen  $D$  büyüklüğü, plağın eğilme rijitliğidir.

$$D = \frac{E t^3}{12(1-\nu^2)} \quad (3.25)$$

Denklem 3.15'teki moment ifadeleri yerine, Denklem 3.22, 3.23 ve 3.24'deki karşılıklarını yazarsak;

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} = \frac{1}{D} \left( q_z + N_x \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + N_y \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + 2N_{xy} \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right) \quad (3.26)$$

lineer burkulma analizinde kullanacak genel plak denklemi elde edilir.

### İki Kenardan Basma Kuvvetine Maruz Plağın Kritik Yük Hesabı

İki uçtan basma kuvvetine maruz bir plağın deformasyonuna bağlı olarak kritik burkulma gerilmesi aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

Şekil 3.15'te gösterilen, uzunluğu  $a$ , eni  $b$  olan basit mesnetli dikdörtgen bir plak, iki kenarından düzgün yayılı  $N_x$  basma kuvveti etkisine maruzdur ve  $N_y$ ,  $N_{xy}$  ve  $q_z$  kuvvetleri ise sıfırdır.

Genel plak denkleminde (Denklem 3.26),  $\sigma_x = \frac{N_x}{bt}$ ,  $N_x = \sigma_x bt$ ,  $N_{xy} = 0$ , ve  $q_z = 0$  değerleri yerine yazılırsa;

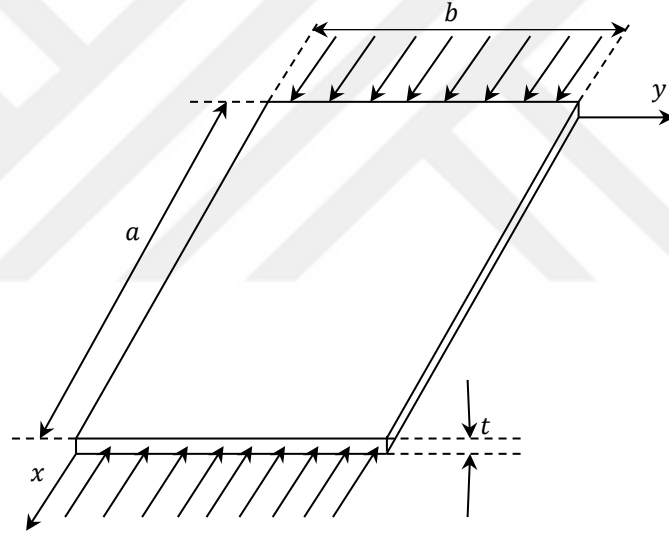
$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} = \frac{\sigma t}{D} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \quad (3.27)$$

elde edilir. Basit mesnet için sınır şartları, Denklem 3.28 ve 3.29'da verilmiştir.

$$x = 0 \text{ ve } x = a \text{ da } w = 0 \text{ ve } M_x = \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} = 0 \quad (3.28)$$

$$y = 0 \text{ ve } y = b \text{ de } w = 0 \text{ ve } M_y = \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = 0 \quad (3.29)$$

$w(x, y)$  yer değiştirme ifadesi, sınır şartlarını sağlayan bir Çift Fourier Serisi şeklinde yazılabilir [2].



**Şekil 3.15.** İki uçtan basma kuvvetine maruz basit mesnetli dikdörtgen plak

$$w = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} A_{mn} \sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{n\pi y}{b}\right) \quad \begin{matrix} m = 1, 2, 3... \\ n = 1, 2, 3... \end{matrix} \quad (3.30)$$

Denklem 3.30'daki  $w(x, y)$  fonksiyonu Denklem 3.27'de yerine yazılır ve gerekli kısmi türevler alınırsa denklem aşağıdaki hale gelir.

$$\sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} A_{mn} \left[ \frac{m^4 \pi^4}{a^4} + 2 \frac{m^2 n^2 \pi^4}{a^2 b^2} + \frac{n^4 \pi^4}{b^4} - \frac{\sigma t}{D} \frac{m^2 \pi^2}{a^2} \right] \sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{n\pi y}{b}\right) = 0 \quad (3.31)$$

Denklem 3.31'i sağlayan denklemdeki ifadenin sıfıra eşit olabilmesi için aşağıdaki sadeleştirilmiş çarpanın sıfıra eşit olması gerekmektedir.

$$\left[ \pi^4 \left( \frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2} \right)^2 - \frac{\sigma t}{D} \frac{m^2 \pi^2}{a^2} \right] = 0 \quad (3.32)$$

Bu eşitlikten  $\sigma$  kritik burkulma gerilmesi bulunur.

$$\sigma_{kr} = \frac{D\pi^2}{tb^2} \left( \frac{mb}{a} + \frac{n^2 a}{mb} \right)^2 \quad (3.33)$$

şeklinde elde edilir.

### 3.3.4. Lineer Olmayan Analiz

Lineer burkulma analizde plağın burkulma şekline uygun olan yük değeri hesaplanır. Ancak lineer olmayan burkulma analizinde, plağa yükleme kademeli olarak yapılır ve buna göre sistemin cevabı aranır. Alınan sonuçlara göre çizilen grafiğin yorumlanması ile sistem hakkında bilgi sahibi olunur. Bu analizde kullanılacak olan ifadeler, büyük deformasyonlar ifadeleri ile şekil değiştirme enerji ifadeleri adlı başlıklarda incelenecektir.

#### Büyük Deformasyonlar Teorisi

“Plakların Küçük Deformasyon Teorisi”nde orta düzleminde bir şekil değişiminin olmadığı kabul edilir. Ancak kenar yüklemelerinin sonucunda plak elemanı eğilir ve bunun bir sonucu olarak da orta düzlemde bir uzama meydana gelir. “Plakların Büyük Deformasyon Teorisi”, orta düzlemde meydana gelen bu uzamayı da hesaba katmaktadır. Bu teori von Karman tarafından geliştirilmiştir [58].

Plak kenarlarından uygulanabilecek gerilmelerin fonksiyonunu veren ifadeler aşağıda verilmiştir. Burada  $\sigma_x = \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2}$ ,  $x$  ve  $y$  yer değiştirme büyüklüklerine bağlı “Airy’s Gerilme Fonksiyonu”dır [60].

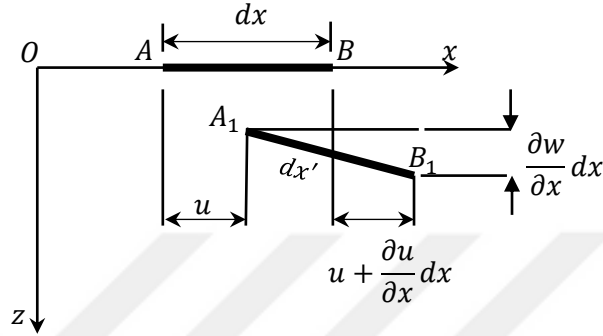
$$\sigma_x = \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} \quad \sigma_y = \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} \quad \tau_{xy} = -\frac{\partial^2 \phi}{\partial x \partial y} \quad (3.34)$$

Denklemler 3.34’deki gerilme bileşenleri aşağıda verilen şekil değiştirme ifadelerinde yerine yazılırsa,

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{1}{E} (\sigma_x - \nu \sigma_y) = \frac{1}{E} \left( \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} - \nu \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} \right) \\ \varepsilon_y &= \frac{1}{E} (\sigma_y - \nu \sigma_x) = \frac{1}{E} \left( \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} - \nu \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} \right) \\ \gamma_{xy} &= \frac{1}{G} \tau_{xy} = -\frac{2(1+\nu)}{E} \frac{\partial^2 \phi}{\partial x \partial y} \end{aligned} \quad (3.35)$$

eşitlikleri elde edilir.

Yanal yükleme sonucu, plağın orta düzlemi eğilir ve eğilme sonucunda orta düzlemde uzama veya kısalma meydana gelir. Bu yüzden Şekil 3.16'da gösterilen AB elemanının,  $x$  yönündeki yer değiştirmesine bağlı olarak boyunun  $(\frac{\partial u}{\partial x} dx)$  kadar uzadığı kabul edilmektedir.



**Şekil 3.16.** Plak diferansiyel elemanı [58]

Şekil 3.16'da  $z$  yönünde yer değiştirerek  $A_1B_1$  konumuna geçen  $dx$  uzunluğundaki AB elemanının,  $x$  eksenindeki birim şekil değişimi  $\varepsilon_{x,w} = \frac{dx' - dx}{dx} = \left( \frac{\sqrt{(dx)^2 + \left(\frac{dw}{dx} dx\right)^2}}{dx} \right) - 1$

olduğundan bu ifade de gerekli düzenlemeler yapılırsa;

$$\varepsilon_{x,w} = \sqrt{1 + \left(\frac{dw}{dx}\right)^2} - 1 \approx 1 + \frac{1}{2} \left(\frac{dw}{dx}\right)^2 - 1 = \frac{1}{2} \left(\frac{dw}{dx}\right)^2 \quad (3.36)$$

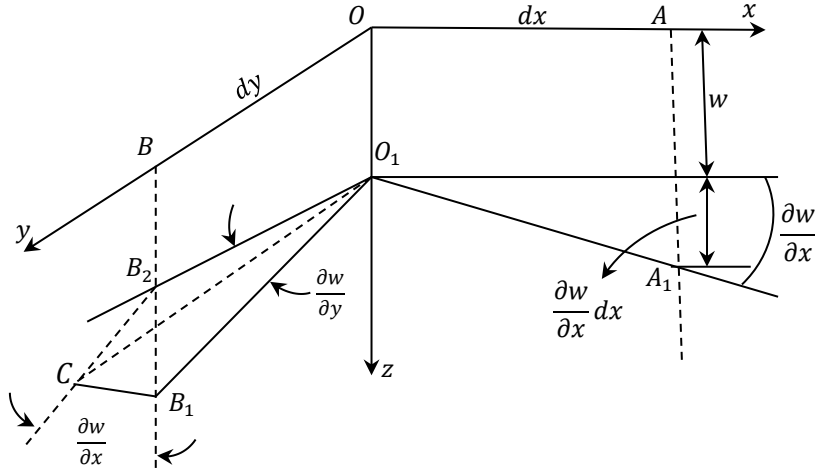
sonucuna ulaşılır.  $x$  ekseni boyunca meydana gelen birim uzama;

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial x}\right)^2 \quad (3.37)$$

şeklinde olur. Aynı şekilde  $y$  doğrultusundaki şekil değiştirme de;

$$\varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial y}\right)^2 \quad (3.38)$$

şeklinde yazılır. Kayma şekil değiştirmesi için Denklem 3.17'den,  $x$ - $y$  yönünde meydana gelen kayma şekil değiştirmesinin  $\left(\frac{\partial u}{\partial y}\right) + \left(\frac{\partial v}{\partial x}\right)$  olduğu görülür.  $z$  yönünde meydana gelen yer değiştirme sonucunda oluşan kayma şekil değiştirmesi Şekil 3.17'deki gibi çizilir.



Şekil 3.17. Kayma açıları [58]

OA ve OB kenarları yer değiştirme sonucunda  $O_1A_1$  ve  $O_1B_1$  durumunu alır. Burada OB 'ye paralel  $B_2O_1A_1$  düzlemini  $O_1A_1$  ekseninde  $\frac{\partial w}{\partial y}$  açısı kadar döndürürsek,  $B_2$  noktası C noktasının üzerine gelir. Bu dönme sırasında;  $B_2C$  arasındaki yer değiştirme  $\left(\frac{\partial w}{\partial y}\right)dy$  kadardır ve  $B_2B_1$  düşeyi ile de  $\frac{\partial w}{\partial x}$  kadar açı yapar. O zaman  $CB_1$  uzunluğu  $\left(\frac{\partial w}{\partial x}\right)\left(\frac{\partial w}{\partial y}\right)dy$  kadar olur. Böylelikle meydana gelen  $CO_1B_1$  kayma açısı  $\left(\frac{\partial w}{\partial x}\right)\left(\frac{\partial w}{\partial y}\right)$  olarak bulunur. Genel kayma açısı ise;

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial w}{\partial y} \quad (3.39)$$

ifadesi ile bulunur. Denklem 3.37-Denklem 3.39'da verilen ifadelerin Denklem 3.40'daki gibi kısmi türevleri alınır;

$$\frac{\partial^2 \epsilon_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \epsilon_y}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 \gamma_{xy}}{\partial x \partial y} = \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right)^2 - \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \quad (3.40)$$

elde edilir. Denklem 3.34'teki gerilme fonksiyonuna bağlı elde edilen şekil değiştirme ifadeleri Denklem 3.40'da yerine yazılırsa,

$$\frac{\partial^4 \phi}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 \phi}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 \phi}{\partial y^4} = E \left[ \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right)^2 - \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right] \quad (3.41)$$

bulunur.  $\phi$  ve  $w$  büyüklüklerini tayin etmek için gerekli plan ikinci denklem Denklem 3.34'ün, Denklem 3.26'da yerine konulması ile

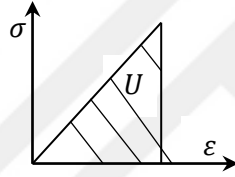
$$\begin{aligned} \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} = \frac{t}{D} \left[ \frac{q_z}{t} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right. \\ \left. + \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} - 2 \frac{\partial^2 \phi}{\partial x \partial y} \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right] \end{aligned} \quad (3.42)$$

eşitliği elde edilir.

Denklem 3.41 ve Denklem 3.42 deki ifadeler ince plakların büyük deformasyonları için genel diferansiyel denklem takımlarıdır [60].

### Şekil Değiştirme Enerjisi

Elastik bölge için gerilme – şekil değiştirme grafiğinde eğri altındaki alan şekil değiştirme enerjisini vermektedir (Şekil 3.18). Buna göre, şekil değiştirme enerjisi grafikten



Şekil 3.18. Hooke Doğrusu

$$U = \frac{1}{2} \sigma_{ij} \varepsilon_{ij} \quad (3.43)$$

şeklinde ifade edilir. Bu ifade 3 boyutlu bir problem için şu şekilde yazılabilir [2].

$$U = \frac{1}{2} \iiint_V [\sigma_x \varepsilon_x + \sigma_y \varepsilon_y + \sigma_z \varepsilon_z + \tau_{xy} \gamma_{xy} + \tau_{yz} \gamma_{yz} + \tau_{xz} \gamma_{xz}] dx dy dz \quad (3.44)$$

Ele alınan plak problemi için  $\varepsilon_z = 0$ ,  $\gamma_{yz} = 0$  ve  $\gamma_{xz} = 0$  olduğu Denklem 3.17'de verilmiştir. Buna göre; Denklem 3.44'ün sadeleştirilmiş hali aşağıdaki gibi olur.

$$U = \frac{1}{2} \iiint_V [\sigma_x \varepsilon_x + \sigma_y \varepsilon_y + \tau_{xy} \gamma_{xy}] dx dy dz \quad (3.45)$$

Denklem 3.45'deki gerilme ifadeleri yerine, Denklem 3.18'de verilen karşılıkları yazıldığında denklem;

$$U = \frac{E}{2(1-\nu^2)} \iiint_V \left[ \varepsilon_x^2 + \varepsilon_y^2 + 2\nu \varepsilon_x \varepsilon_y + \frac{(1-\nu)}{2} \gamma_{xy}^2 \right] dx dy dz \quad (3.46)$$

halini alır. Denklem 3.46'da yer alan şekil değiştirme enerjisi yerine, plakların küçük deformasyon teorisinde sözü edilen ve Denklem 3.17'deki şekil değiştirmelerin yer değiştirmeleri cinsinden

karşılığı yazılarak, şekil değiştirme enerjisi,  $w$  yer değiştirmesine bağlı olarak aşağıdaki gibi elde edilir.

$$U = \frac{D}{2} \iint \left\{ \left[ \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right)^2 + \left( \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right)^2 + 2\nu \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right] + 2(1-\nu) \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right)^2 \right\} dx dy \quad (3.47)$$

Plağın orta düzlemine etkiyen kuvvetlerin oluşturduğu potansiyel enerjiyi hesaplamak için Denklem 3.45'deki denklemden yararlanılır. Denklem 3.45'te gerilmenin değeri  $\sigma_{ij}=N_{ij}/t$  ifadesi yerine konur ve buradan Denklem 3.48'deki ifade elde edilir.

$$U = \iint (N_x \varepsilon_x + N_y \varepsilon_y + N_{xy} \gamma_{xy}) dx dy \quad (3.48)$$

Denklem 3.37-Denklem 3.379'da belirtilen ifadeler, yukarıdaki Denklem 3.48'de yerlerine yazılırsa;

$$U = \iint \left[ N_x \frac{\partial u}{\partial x} + N_y \frac{\partial v}{\partial y} + N_{xy} \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] dx dy + \frac{1}{2} \iint \left[ N_x \left( \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + N_y \left( \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 + 2N_{xy} \frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial w}{\partial y} \right] dx dy \quad (3.49)$$

elde edilir. Eşitliğin sağında yer alan ilk çift katlı integral, plağın orta düzlemine tesir eden kuvvetlerin, eğilme esnasında yaptıkları işe eşittir. İkinci çift katlı integral ise, plağın orta düzlemine etkiyen tüm yanal yüklerin ortak tesiri sonucunda, plakta oluşan eğilmeyi sağlayan toplam şekil değiştirme enerjisini verir. Eşitliğin sağında yer alan ilk terim dikkate alınır ve bu ifade

$$T = \iint \left[ N_x \frac{\partial u}{\partial x} + N_y \frac{\partial v}{\partial y} + N_{xy} \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] dx dy \quad (3.50)$$

şeklinde yazılır. Denklem 3.37, Denklem 3.38 ve Denklem 3.39'da yer alan şekil değiştirme bileşenleri plak kenarlarında sıfır olacaktır.

Buna göre;

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 = 0, \frac{\partial u}{\partial x} = -\frac{1}{2} \left( \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 \\ \varepsilon_y &= \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 = 0, \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{2} \left( \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \\ \gamma_{xy} &= \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial w}{\partial y} = 0, \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} = -\frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial w}{\partial y} \end{aligned} \quad (3.51)$$

eşitlikleri elde edilir. Denklem 3.51'deki terimler, Denklem 3.50'de yerlerine yazılırsa;

$$T = \frac{1}{2} \iint \left[ N_x \left( \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + N_y \left( \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 + 2N_{xy} \frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial w}{\partial y} \right] dx dy \quad (3.52)$$

bulunur.

### İki Yönden Basma Kuvvetine Maruz Plâğın Kritik Yük Hesabı

İki yönden basma kuvvetine maruz bir plâğın kritik yük hesabı, toplam potansiyel enerji denklemi kullanılarak aşağıdaki gibi yapılabilir.

Şekil 3.15'te gösterilen, uzunluğu  $a$ , eni  $b$  olan basit mesnetli dikdörtgen bir plak, iki kenarından düzgün yayılı  $N_x$  basma kuvveti etkisine maruz ise  $N_y, N_{xy}$  ve  $q_z$  sıfır olur.

**Kritik yük hesabı;** plak yüzeyinin şekil değiştirme enerjisi ile plak kenarından yapılan yüklemenin oluşturduğu potansiyel enerjisinin toplamını sıfır yapan yükleme değeri kritik yüklemeyi verecektir. Bunun hesabı, Denklem 3.53'deki formül ile yapılacaktır.

$\Pi = U + T = 0$  için  $\Pi$  : Toplam potansiyel enerji,  $U$  : Elastik yüzeyin şekil değiştirme enerjisi ve  $T$  : Dış yüklemenin potansiyelidir.

$$\begin{aligned} \Pi = \frac{1}{2} \iint \left[ N_x \left( \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + N_y \left( \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 + 2N_{xy} \frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial w}{\partial y} \right] dx dy \\ + \frac{1}{2} D \iint \left\{ \left[ \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right)^2 + \left( \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right)^2 + 2\nu \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right] + 2(1-\nu) \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right)^2 \right\} dx dy \end{aligned} \quad (3.53)$$

Denklem 3.47'de de bahsedilen plâğın şekil değiştirme sırasında depoladığı enerji eşitliği sadeleştirme yapılarak.

$$U = \frac{1}{2} D \iint \left\{ \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right)^2 + 2(1-\nu) \left[ \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} - \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right)^2 \right] \right\} dx dy \quad (3.54)$$

şeklinde yazılabilir. Denklem 3.30'da verilen  $w$  plak deformasyon değeri yukarıdaki denklemde yerine yazılarak Denklem 3.55 bulunur.

$$U = \frac{1}{2} D \iint \left\{ \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} A_{mn} \left( \frac{m^2 \pi^2}{a^2} + \frac{n^2 \pi^2}{b^2} \right) \sin \left( \frac{m \pi x}{a} \right) \sin \left( \frac{n \pi y}{b} \right) \right\}^2 dx dy \quad (3.55)$$

Burada;

$$\left[ \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} - \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right)^2 \right]$$

kısmi türev ifadesi ihmal edilmiştir. Denklem 3.55'in integrali alınarak,

$$U = \frac{D a b}{8} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} A_{mn}^2 \left( \frac{m^2 \pi^2}{a^2} + \frac{n^2 \pi^2}{b^2} \right)^2 \quad (3.56)$$

eşitliği bulunur. Denklem 3.52'de bahsedilen plâğa etkiyen dış yüklemenin potansiyelinde  $N_y$  ve

$N_{xy}$  ifadeleri sıfıra eşitlinir ve gerekli sadeleştirmeler yapılırsa

$$T = \frac{1}{2} \sigma t \iint \left( \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 dx dy \quad (3.57)$$

eşitliği bulunur. Denklem 3.30'da verilen  $w$  plak deformasyon değeri yukarıdaki denklemde yerine yazılıp integrali alınarak Denklem 3.58 bulunur.

$$T = \frac{\pi^2 b}{8 a} \sigma t \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} m^2 A_{mn}^2 \quad (3.58)$$

Denklem 3.53'de belirtilen Toplam Potansiyel Enerjinin sıfıra eşitliğinden

$$\frac{D a b}{8} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} A_{mn}^2 \left( \frac{m^2 \pi^2}{a^2} + \frac{n^2 \pi^2}{b^2} \right) = \frac{\pi^2 b}{8 a} \sigma t \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} m^2 A_{mn}^2 \quad (3.59)$$

denklemini elde edilir. Denklem 3.59'da gerekli sadeleştirmeler yapılır ve  $\sigma_{kr}$  gerilmesi için,

$$\sigma_{kr} = \frac{\pi^2 a^2 D}{m^2 t} \left( \frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2} \right) = \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left( \frac{t}{b} \right)^2 \left( \frac{1}{\phi^2} + \phi^2 + 2 \right) \quad (3.60)$$

eşitliği bulunur. Denklemde gerekli düzenlemeler yapılarak,

$$\sigma_{kr} = \frac{K \pi^2 D}{t b^2} = \frac{K \pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left( \frac{t}{b} \right)^2 \quad (3.61)$$

denklemini bulunur. Böylece plak denklemleri ile hesaplanan kritik gerilme ile toplam potansiyel enerji denklemlerinden hesaplanan kritik gerilmenin aynı olduğu görülür.

### 3.4. Fiber Takviyeli Kompozit Malzemeler

İki veya daha fazla sayıda farklı özellikteki malzemelerin kullanım alanlarında istenilen özelliklerde uygun bir malzeme üretmek için makro seviyede birleştirilmesiyle elde edilen malzemelere kompozit malzemeler denir.

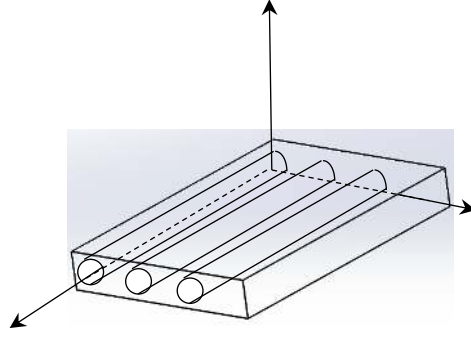
Fiber takviyeli kompozit laminalar, farklı fiber takviye açılarında üretilen tabakalar veya bunların birkaç tanesinin birleştirilmesiyle elde edilen malzemelerdir.

#### 3.4.1. Fiber Takviyeli Kompozit Plakların Teorisi

İzotropik malzemelerin tüm yöndeki mekanik özellikleri aynıdır. Ağaç ve kontraplak gibi malzemeler ise anizotropiktir. Eğer bir homojen malzemenin birbirine dik üç simetri eksenine varsa bu malzemeye ortotropik malzeme denir.

#### Laminanın Gerilme-Şekil Değiştirme Bağlılıkları

Düzlem gerilme altındaki ortotropik malzeme için asal eksenlerdeki gerilme-şekil değiştirme bağıntısı Denklem 3.62'de verilmiştir (Şekil 3.19).



Şekil 3.19. Fiber takviyeli tabaka [61]

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} \quad (3.62)$$

$Q_{ij}$  indirgenmiş rijitlik matris elemanları

$$\begin{aligned} Q_{11} &= \frac{E_1}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} \\ Q_{22} &= \frac{E_2}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} \\ Q_{12} &= \frac{\nu_{21}E_1}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} = \frac{\nu_{12}E_2}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} \\ Q_{66} &= G_{12} \\ \frac{\nu_{12}}{E_1} &= \frac{\nu_{21}}{E_2} \end{aligned} \quad (3.63)$$

eşitlikleriyle tanımlanır. Lamina düzleminde başka bir  $x$ - $y$  düzlemindeki gerilmeler,  $\bar{Q}_{ij}$  terimleri döndürülmüş eksenlerdeki rijitlikler ile Denklem 3.64'teki gibi ifade edilir.

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} \quad (3.64)$$

Bu matristeki  $\bar{Q}_{ij}$  terimleri döndürülmüş eksenlerdeki rijitlikler ( $Q_{ij}$ ) cinsinden eşitliği

Denklem 3.65'teki gibi verilmiştir [2].

$$\begin{aligned} \bar{Q}_{11} &= Q_{11}\cos^4\theta + 2(Q_{12} + 2Q_{66})\sin^2\cos^2\theta + Q_{22}\sin^4\theta \\ \bar{Q}_{12} &= (Q_{11} + Q_{22} - 4Q_{66})\sin^2\theta\cos^2\theta + Q_{12}(\sin^4\cos^4\theta) \\ \bar{Q}_{22} &= Q_{11}\sin^4\theta + 2(Q_{12} + 2Q_{66})\sin^2\cos^2\theta + Q_{22}\sin^4\theta \\ \bar{Q}_{16} &= (Q_{11} - Q_{12} - 2Q_{66})\sin\theta\cos^3\theta + (Q_{12} - Q_{22} + 2Q_{66})\sin^3\theta\cos\theta \end{aligned} \quad (3.65)$$

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

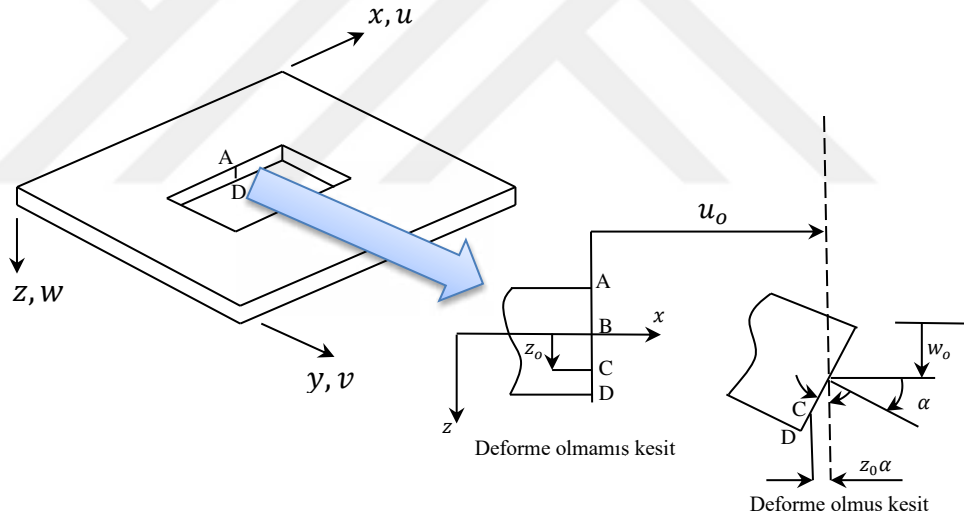
$$\bar{Q}_{66} = (Q_{11} + Q_{22} - 2Q_{12} - 2Q_{66})\sin^2\theta\cos^2\theta + Q_{66}(\sin^4\theta + \cos^4\theta)$$

Burada,  $\theta$  fiber açısını göstermektedir. Keyfi koordinatlardaki gerilme-şekil değiştirme bağıntıları, yani Denklem 3.62'deki lamina rijitlik elemanlarıdır. Denklem 3.64 ve Denklem 3.65 lamina için gerilme-şekil değiştirme bağıntılarını verir. Burada Denklem 3.62'yi şu şekilde yazabiliriz.

$$\{\sigma\}_k = [\bar{Q}]_k \{\varepsilon\}_k \quad (3.66)$$

### Laminadaki Gerilme-Şekil Değiştirme Değişimi

Gerilmelerin ve şekil değiştirmelerin çok katlı lamina kalınlığı boyunca değişiminin nasıl olacağı, ancak; çok katlı laminanın uzama ve eğilme rijitliklerinin tanımlanması ile olur. Laminanın kalınlığı eğer ince ise, orta düzleme dik ve düzgün olan bir çizgi, eğilmeden sonra da düz ve dik konumu koruduğu kabulü yapılır (Şekil 3.20).



Şekil 3.20. x-z düzlemindeki deformasyon geometrisi [61]

ABCD çizgisi deformasyondan sonra da düz kaldığından C noktasının yer değiştirmesi Denklem 3.67'deki gibi olur.

$$u_c = u_0 - z_c \alpha \quad (3.67)$$

Deformasyon altında ABCD orta düzleme dik kalacaktır. Lamina orta düzleminin eğimi ( $\alpha$ )

$$\alpha = \frac{\partial w_0}{\partial x} \quad (3.68)$$

şeklinde olur. Burada lamina kalınlığınca herhangi bir noktadaki yer değiştirme  $u$ , 3.69'daki gibi ifade edilir.

$$u = u_0 - z \frac{\delta w_0}{\delta x} \quad (3.69)$$

Aynı şekilde y yönündeki  $v$  yer değişimi ise Denklem 3.70’de verilmiştir.

$$v = v_0 - z \frac{\delta w_0}{\delta y} \quad (3.70)$$

Lamina şekil değiştirmeleri Kirchoff hipotezine bağlı olarak  $\varepsilon_x$ ,  $\varepsilon_y$  ve  $\gamma_{xy}$  haline dönüşmüştür. Yani;  $\varepsilon_z = \gamma_{xz} = \gamma_{yz} = 0$ ’dır. Küçük şekil değiştirmeler için (Lineer elastik) diğer gerilme-şekil değiştirmeler Denklem 3.71’de verilmiştir.

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{\partial u}{\partial x} \\ \varepsilon_y &= \frac{\partial v}{\partial y} \end{aligned} \quad (3.71)$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}$$

Denklem 3.69 ve Denklem 3.70, Denklem 3.71’de yerine yazılırsa;

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{\partial u_0}{\partial x} - z \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \\ \varepsilon_y &= \frac{\partial v_0}{\partial y} - z \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \\ \gamma_{xy} &= \frac{\partial u_0}{\partial y} + \frac{\partial v_0}{\partial x} - 2z \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \end{aligned} \quad (3.72)$$

eşitlikleri elde edilir. Aynı eşitliklerin matris şeklinde yazımı ise Denklem 3.73’de verilmiştir.

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{bmatrix} + z \begin{bmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{bmatrix} \quad (3.73)$$

Bu eşitlikteki orta düzlem şekil değiştirmeleri şu şekilde tanımlanır.

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial u_o}{\partial x} \\ \frac{\partial v_o}{\partial y} \\ \frac{\partial u_o}{\partial y} + \frac{\partial v_o}{\partial x} \end{bmatrix} \quad (3.74)$$

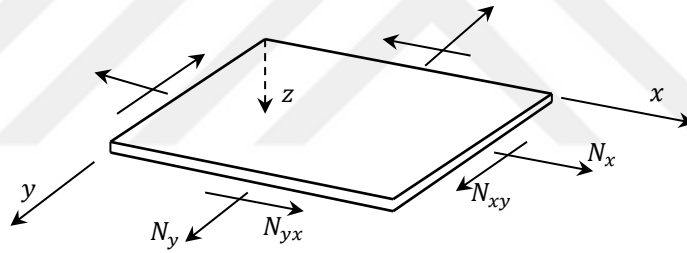
Orta düzlem eğilmeleri ise;

$$\begin{bmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \\ \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \\ \frac{2\partial^2 w}{\partial x \partial y} \end{bmatrix} \quad (3.75)$$

şeklindedir.

Kalınlık boyunca şekil değiştirme değerleri Denklem 3.73'ü, Denklem 3.64'de yerine yazılarak, k'nci tabakadaki gerilmeler, çok katlı laminanın orta düzlem şekil değiştirmeleri ve eğilmeleri cinsinden Denklem 3.76'daki gibi elde edilir.

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{bmatrix} + z \begin{bmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{bmatrix} \quad (3.76)$$

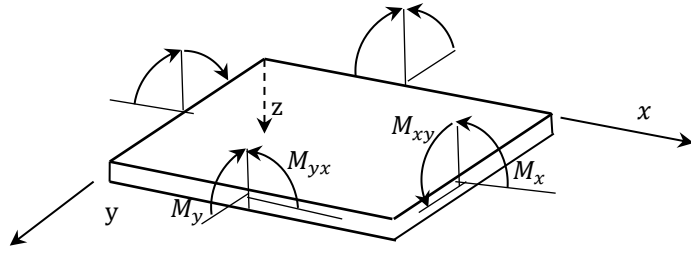


Şekil 3.21. Düzgün laminada düzlem-içi kuvvetler [61]

$$N_x = \int_{-t/2}^{t/2} \sigma_x dz$$

$$M_x = \int_{-t/2}^{t/2} \sigma_x z dz \quad (3.77)$$

Şekil 3.21'de  $N_x$  laminadaki birim genişlik başına düşen kuvvet ve aynı şekilde Şekil 3.22'de  $M_x$ 'de birim uzunluk başına düşen moment değeridir.

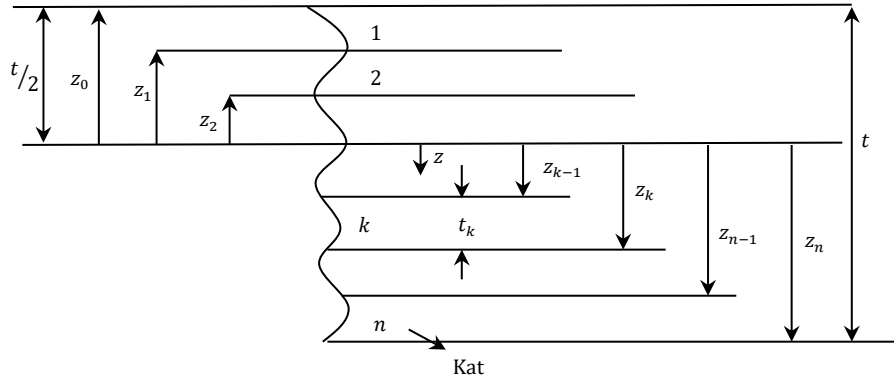


Şekil 3.22. Düzgün laminaya etkiyen momentler [61]

Denklem 3.77'deki kuvvet ve moment ifadelerini matris formda aşağıdaki gibi yazmak mümkündür.

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{bmatrix} = \int_{-t/2}^{t/2} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} dz = \sum_{k=1}^N \int_{z^{(k-1)}}^{z^{(k)}} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} dz \quad (3.78)$$

$$\begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \int_{-t/2}^{t/2} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} z dz = \sum_{k=1}^N \int_{z^{(k-1)}}^{z^{(k)}} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} z dz \quad (3.79)$$



Şekil 3.23. n katlı lamina geometrisi [61]

Denklem 3.78 ve Denklem 3.79 rijitlik matrisi lamina  $[\bar{Q}_{ij}]_k$  terimlerinin sabit kaldığı kabul edilerek yeniden düzenlenebilir. Böylelikle; rijitlik matrisi integrasyon dışına çıkabilir. Lamina gerilme-şekil değiştirme eşitlikleri Denklem 3.76, Denklem 3.78 ve Denklem 3.79'da yerine yazılırsa kuvvet ve momentler için (Şekil 3.23),

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{bmatrix} = \sum_{k=1}^N \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix} \left[ \int_{z^{(k-1)}}^{z^{(k)}} \begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{bmatrix} dz + \int_{z^{(k-1)}}^{z^{(k)}} \begin{bmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{bmatrix} z dz \right] \quad (3.80)$$

$$\begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \sum_{k=1}^N \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix} \left[ \int_{z^{(k-1)}}^{z^{(k)}} \begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{bmatrix} z dz + \int_{z^{(k-1)}}^{z^{(k)}} \begin{bmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{bmatrix} z^2 dz \right] \quad (3.81)$$

eşitlikleri elde edilir. Denklem 3.80 ve Denklem 3.81 aşağıdaki gibi tekrar düzenlenebilir.

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{bmatrix} \quad (3.82)$$

$$\begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{bmatrix} \quad (3.83)$$

Burada  $A_{ij}$ ,  $B_{ij}$  ve  $C_{ij}$  matris elemanları,

Uzama rijitlikleri:

$$A_{ij} = \sum_{k=1}^N (\bar{Q}_{ij})_k (z_k - z_{k-1}) \quad (3.84)$$

Eğilme-uzama rijitlikleri:

$$B_{ij} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^N (\bar{Q}_{ij})_k (z_k^2 - z_{k-1}^2) \quad (3.85)$$

Eğilme rijitlikleri :

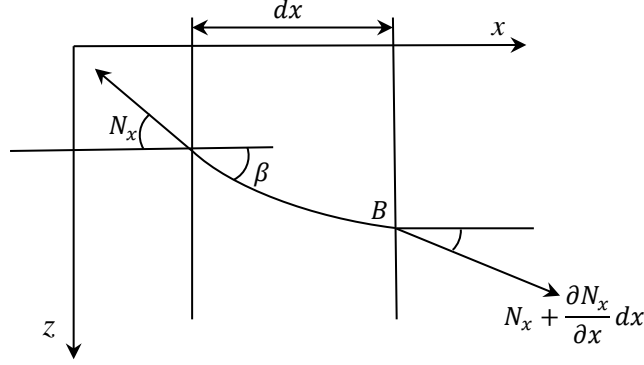
$$D_{ij} = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^N (\bar{Q}_{ij})_k (z_k^3 - z_{k-1}^3) \quad (3.86)$$

eşitlikleri ile ifade edilir. Buradan genel rijitlik matrisi Denklem 3.87'deki gibi elde edilir.

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \\ M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} & B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} & B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} & B_{16} & B_{26} & B_{66} \\ B_{11} & B_{12} & B_{16} & D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} & D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} & D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \\ \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{bmatrix} \quad (3.87)$$

### Tabakalı Kompozit Plaklarda Burkulma

Küçük deformasyonlar teorisinde Denklem 3.8-3.9 eşitliklerinden;



Şekil 3.24. Plak elemanında eksenel kuvvetler [2]

Şekil 3.24'te  $N_x$ 'in  $z$  eksenine doğrultusundaki izdüşüm bileşeni,  $-N_x dy \sin \beta + \left( N_x + \frac{\partial N_x}{\partial x} dx \right) dy \sin \beta'$  şeklinde yazılabilir.  $\beta$  ve  $\beta'$  çok küçük açılar olduğundan;  $\sin \beta \approx \beta \approx \frac{\partial w}{\partial x}$  olarak alınabilir ve  $\beta' \approx \beta + \frac{\partial \beta}{\partial x} dx = \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} dx$  yazılır.

$$-N_x dy \frac{\partial w}{\partial x} + \left( N_x + \frac{\partial N_x}{\partial x} dx \right) \left( \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} dx \right) dy \quad (3.88)$$

Eğer yüksek mertebeden türevler ihmal edilirse;

$$N_x \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} dx dy + \frac{\partial N_x}{\partial x} \frac{\partial w}{\partial x} dx dy \quad \text{olacaktır.} \quad (3.89)$$

$N_{xy}$  'lerin  $z$  doğrultusunda bileşenleri;

$$N_{xy} \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} dx dy + \frac{\partial N_{xy}}{\partial x} \frac{\partial w}{\partial y} dx dy \quad (3.90)$$

$$N_{xy} \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} dx dy + \frac{\partial N_{xy}}{\partial y} \frac{\partial w}{\partial x} dx dy \quad (3.91)$$

$N_y$  'nin  $z$  doğrultusunda bileşenleri ise;

$$N_y \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial N_y}{\partial y} \frac{\partial w}{\partial y} \quad \text{olacaktır.} \quad (3.92)$$

Buna göre Şekil 3.12'den  $z$  doğrultusundaki  $\sum F_z = 0$  denge şartı yazılacak olursa;

$$\begin{aligned} \frac{\partial Q_x}{\partial x} + \frac{\partial Q_y}{\partial y} - N_x \frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} - 2N_{xy} \frac{\partial^2 w_0}{\partial x \partial y} - N_y \frac{\partial^2 w_0}{\partial y^2} \\ - \left( \frac{\partial N_x}{\partial x} + \frac{\partial N_{xy}}{\partial y} \right) \frac{\partial w_0}{\partial x} - \left( \frac{\partial N_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial N_y}{\partial y} \right) \frac{\partial w_0}{\partial y} = 0 \end{aligned} \quad (3.93)$$

eşitliği bulunur. Kısmi türevler ihmal edilerek,

$$\frac{\partial Q_x}{\partial x} + \frac{\partial Q_y}{\partial y} - N_x \frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} - 2N_{xy} \frac{\partial^2 w_0}{\partial x \partial y} - N_y \frac{\partial^2 w_0}{\partial y^2} + q = 0 \quad (3.94)$$

eşitliği elde edilir.

$$\frac{\partial M_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial M_y}{\partial y} - Q_y = 0$$

$$\frac{\partial M_x}{\partial x} + \frac{\partial M_{xy}}{\partial y} - Q_x = 0$$

Denklemlerinden,

$$\frac{\partial^2 M_x}{\partial x^2} + 2 \frac{\partial^2 M_{xy}}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 M_y}{\partial y^2} - N_x \frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} - 2N_{xy} \frac{\partial^2 w_0}{\partial x \partial y} - N_y \frac{\partial^2 w_0}{\partial y^2} + q = 0 \quad (3.95)$$

eşitliği bulunur.

$$\begin{Bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & 0 \\ D_{12} & D_{22} & 0 \\ 0 & 0 & D_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} -\frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} \\ -\frac{\partial^2 w_0}{\partial y^2} \\ -2 \frac{\partial^2 w_0}{\partial x \partial y} \end{Bmatrix} \quad \text{denklemindeki } M_x, M_y, M_{xy} \text{ ifadeleri Denklem}$$

3.95'teki yerine yazılıp

$$\begin{aligned} D_{11} \frac{\partial^4 w_0}{\partial x^4} + 2(D_{12} + 2D_{66}) \frac{\partial^4 w_0}{\partial x^2 \partial y^2} + D_{22} \frac{\partial^4 w_0}{\partial y^4} - N_x \frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} \\ - 2N_{xy} \frac{\partial^2 w_0}{\partial x \partial y} - N_y \frac{\partial^2 w_0}{\partial y^2} + q = 0 \end{aligned} \quad (3.96)$$

denklemini elde edilir.

Basınç kuvveti etkisindeki dikdörtgen plağın maruz kalacağı kuvvetler  $N_x = -N_{x0}$ ,  $N_y = -N_{y0}$ ,  $N_{xy} = 0$  ve  $q = 0$  şeklinde olacaktır. Bu durumda denklem,

$$D_{11} \frac{\partial^4 w_0}{\partial x^4} + 2(D_{12} + 2D_{66}) \frac{\partial^4 w_0}{\partial x^2 \partial y^2} + D_{22} \frac{\partial^4 w_0}{\partial y^4} = -N_{x0} \frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} - N_{y0} \frac{\partial^2 w_0}{\partial y^2} \quad (3.97)$$

halini alır. Eğer plak dörtkenarından basit mesnetlenmiş ve eğilme etkisi halindeki sınır şartlarına sahip ise  $w_0(x, y)$  yer değiştirme ifadesi,

$$w_0(x, y) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} w_{mn} \sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{n\pi y}{b}\right) \quad (3.98)$$

şeklinde elde edilir. Burada  $m$  ve  $n$  -x ve -y doğrultularındaki mod şekillerinin sayısıdır. Bu ifade kısmi diferansiyel denklemde yerine yazılarak,

$$\begin{aligned} & \pi^2 \mathcal{K}_{mn}^4 \left[ D_{11} \left( \frac{m}{a} \right)^4 + 2(D_{12} + 2D_{66}) \left( \frac{mn}{ab} \right)^2 + D_{22} \left( \frac{n}{b} \right)^4 \right] \\ & \mathcal{K}_{mn}^2 \pi^2 \left[ N_{x0} \left( \frac{m}{a} \right)^2 + N_{y0} \left( \frac{n}{b} \right)^2 \right] \end{aligned} \quad (3.99)$$

eşitliği elde edilir. Elde edilen bu denklem ortotropik dikdörtgen bir plağın burkulma davranışını tespitinde kullanılabilir.

#### Tek Eksenli Basınç Altında Burkulma

Eğer  $N_{x0} = N_0$  ve  $N_{y0} = 0$  olursa bu durumda denklem

$$N_0(m, n) = \pi^2 \left[ D_{11} \left( \frac{m}{a} \right)^2 + 2(D_{12} + 2D_{66}) \left( \frac{n}{b} \right)^2 + D_{22} \left( \frac{n}{b} \right)^4 \left( \frac{a}{m} \right)^2 \right] [62] \quad (3.100)$$

halini alacaktır. Burkulma yükü ( $m$  ve  $n$ 'in) farklı kombinasyonları için elde edilebilir. Kritik burkulma yükü bu değerlerin en küçük olanıdır. En küçük yük değerinin elde edilebilmesi için,  $n = 1$  olmalıdır. Buna göre  $N_0$  burkulma yükü;

$$N_0(m, 1) = \pi^2 \left[ D_{11} \left( \frac{m}{a} \right)^2 + 2(D_{12} + 2D_{66}) \frac{1}{b^2} + D_{22} \frac{1}{b^4} \left( \frac{a}{m} \right)^2 \right] \quad (3.101)$$

şeklinde elde edilir. Herhangi bir  $m$  değerine göre elde edilecek olan  $N_0$  yükü eğilme rijitliği ve  $a/b$  oranına bağlıdır. Kritik yük sayısal hesaplamayla elde edilir.

$$\frac{D_{11}}{D_{22}} = 10 \text{ ve } \frac{D_{12} + 2D_{66}}{D_{22}} = 1 \text{ için denklem,}$$

$$N_0(m, 1) = \frac{\pi^2 D_{22}}{b^2} \left[ 10m^2 \left( \frac{b}{a} \right)^2 + 2 + \frac{1}{m^2} \left( \frac{a}{b} \right)^2 \right] \quad (3.102)$$

şeklinde ifade edilir. Boyutsuz burkulma yükü  $\bar{N} = \frac{N_0 b^2}{\pi^2 D_{22}}$  şeklinde tanımlanırsa

$$\bar{N} = N_0(m,1) \frac{b^2}{\pi^2 D_{22}} = \left[ 10m^2 \left( \frac{b}{a} \right)^2 + 2 + \frac{1}{m^2} \left( \frac{a}{b} \right)^2 \right] \quad (3.103)$$

olarak elde edilmiş olur. Kritik burkulma yükü  $m = 1$  ve  $a = b$  için;

$$(N_0)_{crit} = \frac{13\pi^2 D_{22}}{a^2} \quad (3.104)$$

şeklinde olur. En düşük kritik burkulma yükü  $a/b = 1.78$  için meydana gelir.

$$(N_0)_{crit} = \frac{8.3245\pi^2 D_{22}}{b^2} \quad (3.105)$$

eşitliğiyle hesaplanır. İzotrop malzemeler için ise  $m = 1$  değeri için kritik yük,

$$(N_0)_{crit} = \frac{4\pi^2 D}{a^2} \quad (3.106)$$

eşitliği ile hesaplanır

## 4. SAYISAL BURKULMA ANALİZİ

Plakların burkulma davranışları deneysel olarak elde edilmiş daha sonra aynı modeller sayısal olarak çözülerek karşılaştırması yapılmıştır.

### 4.1. Sonlu Elemanlar Yöntemi

Sonlu elemanlar yöntemi, günlük hayatta karşılaşılan problemlerin çözümünde kullanılan sayısal yöntemlerdendir. Bu yöntemde yapı birçok elemana bölünür ve bu elemanlar düğüm noktalarıyla (node) birbirlerine bağlanır. Bu her bir noktadaki düğümlere denge denklemleri uygulanır. Dolayısıyla çok fazla sayıda denklem elde edilir. Bu denklem takımlarının çözümünden yapının davranışı hakkında bilgi sahibi olunur. Ancak bu denklemleri çözmek oldukça güç hatta bazen imkânsız olmakta, dolayısıyla bunların çözümünde bilgisayar programlarından yararlanılmaktadır. ANSYS® programı bu sebeplerden yapıların incelenmesinde oldukça yardımcı olmaktadır.

### 4.2. ANSYS Programı ve Çözüm Basamakları

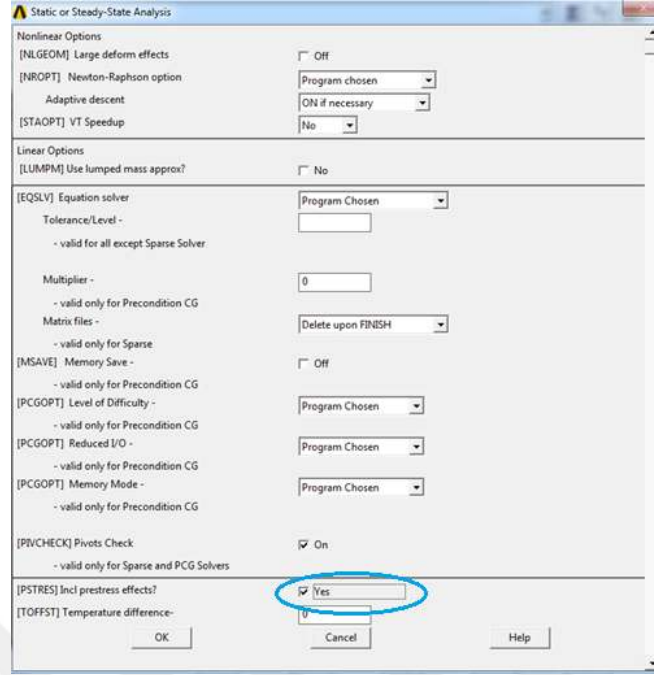
ANSYS programının çözüm safhaları; probleme uygun eleman tipinin girilmesi, malzemeye ait özelliklerin girilmesi, geometrinin oluşturulması ve sınır şartlarının uygulanmasından oluşmaktadır.

ANSYS® burkulma analizi iki grupta ele alınır.

- Özdeğer (lineer) problemin çözümü
- Lineer olmayan analizdir.

#### 4.2.1. Özdeğer (Lineer) Problemin Çözümü

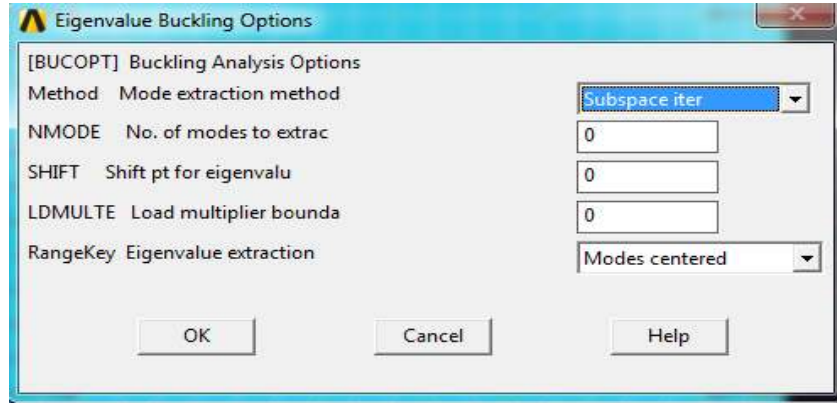
Özdeğer problemin çözümünde, Denklem 4.1' de yer alan öz değer problemin çözümü aranmaktadır. Çözüm sırasında seçilen eleman tipine ve malzeme özelliklerine göre sistemin rijitlik matrisi oluşturulur. Her bir düğüm noktasındaki meydana gelen gerilme ve şekil değişim miktarlarını bulmak için önce statik analiz yapılır. Sisteme dışardan uygulanan kuvvetleri barındıran gerilme matrisi de statik analiz esnasında hesaplanır. Gerilme matrisinin hesaplanması için ön gerilme etkilerinin (prestress) hesaba katılması gerekmektedir. Bu sebeple statik çözüm yaptırılmadan önce ANSYS® programında Şekil 4.1'de gösterilen kısım aktif hale getirilir.



Şekil 4.1. Statik analiz öncesi ön gerilmenin aktif hale getirilmesi

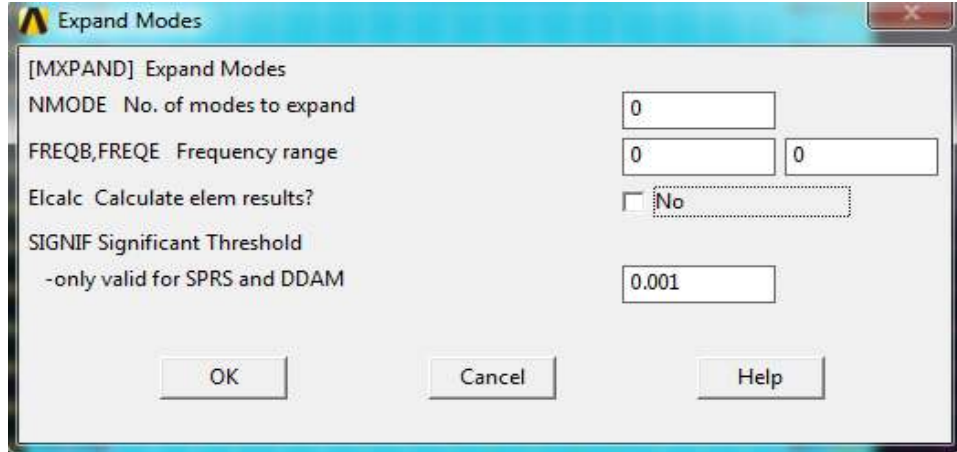
$$([K] + \lambda_i [S])\{\varphi_i\} = \{0\} \quad (4.1)$$

Burada;  $[K]$ : Plâğın rijitlik matrisi,  $[S]$ : gerilme rijitlik matrisi,  $\lambda_i$ : öz değer ve  $\varphi_i$ : yer değiştirme öz vektörüdür.



Şekil 4.2. Özdeğer burkulma seçenekleri sekmesi

Şekil 4.2’de belirtilen “*Eigen Buckling Options*” sekmesinden iterasyon yöntemi olarak titreşim problemlerinde kullanılan “*Block Lanczos*” ve analizde kullandığımız “*Subspace*” mevcuttur. İkinci olarak “*NMODE*” seçeneğinde kaç tane mod istenildiği girilir. “*SHIFT*” seçeneğine ise; özdeğerin ötelenmesi istenildiğinde, öteleme miktarının yazılacağı kısımdır.



Şekil 4.3. Alt iterasyon seçenekleri sekmesi

Şekil 4.3'te verilen “*Expand Modes*” sekmesindeki “*NMODE*” seçeneğine istenilen mod sayısı girilmelidir. Bu seçeneklerin girilmesinden sonra ilgili çözüm yapılarak sonuçlar alınır.

#### 4.2.2. Lineer Olmayan Problemin Çözümü

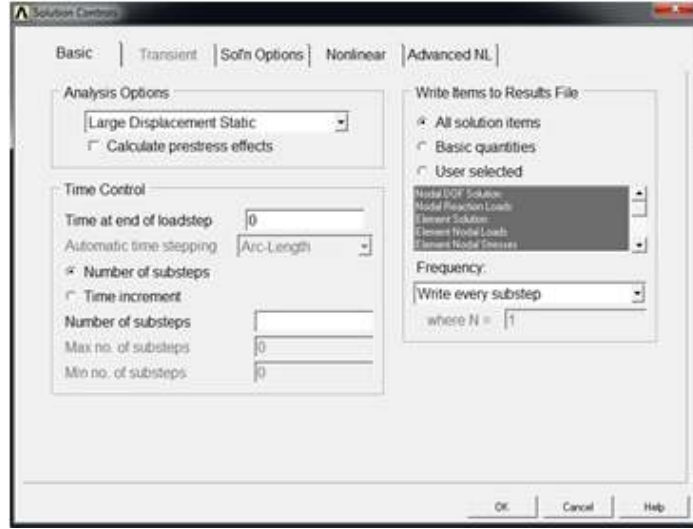
Lineer olmayan analizde ANSYS® programı *Newton-Raphson* ve *Arc-Lenght* yöntemlerini kullanmaktadır.

##### Newton-Raphson Metodu

ANSYS® programında yapılan lineer olmayan analizlerde Newton-Raphson metodu kullanılmaktadır.

$$\left[ K_i^T \right] \{ \Delta U_i \} = \{ F_{i+1}^a \} - \{ F_{i+1}^{nr} \} \quad (4.2)$$

Burada;  $[K_i^T]$ : Tanjant rijitlik matrisi,  $\{ \Delta U_i \}$ : yer değiştirme vektörünün artışı,  $\{ F_{i+1}^a \}$ : plak üzerine uygulanan kuvvet ve  $\{ F_{i+1}^{nr} \}$ : elemanlar üzerindeki gerilmeyi oluşturan iç kuvvettir.



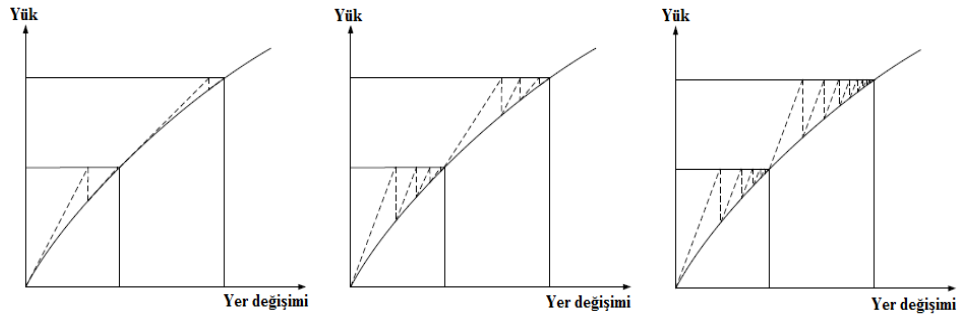
Şekil 4.4. Lineer olmayan çözüm kontrol sekmesi

Şekil 4.4'te verilen sekmede sol taraftaki “Analysis Options” bölümünde “Large Displacement Static” seçilerek *Newton-Raphson Metodu* aktif hale getirilir. Sağ tarafta ise “Frequency” bölümünde sonuç dosyalarına yazılacak bilgiler ve yazılma sıklığı belirtilir. “All solution items” ve “Write every substep” seçilerek her adımda bütün çözüm sonuçlarının dosyalanması sağlanır.

Ayrıca ANSYS® programında hesaplanan tanjant rijitlik matrisinin güncelleme sıklığı seçilebilmektedir. Tanjant rijitlik matrisinin güncellenme sıklığı için seçenekler (Şekil 4.5);

- 1-Full- tanjant stiffness matris (tam –her iterasyon aşamasında)
- 2-Modified (yenileme-her alt adım aşamasında)
- 3-Initial Stiffness (başlangıç rijitlikli-sabit eğimli iterasyon)

*Newton-Raphson* metodu, rijitliği sıfır veya eksi işaretli olan sistemlerde yetersiz kalmaktadır bu durumda çalışmada da kullanılan yay uzunluk (*Arc-Length*) metodu geçerli olmaktadır.



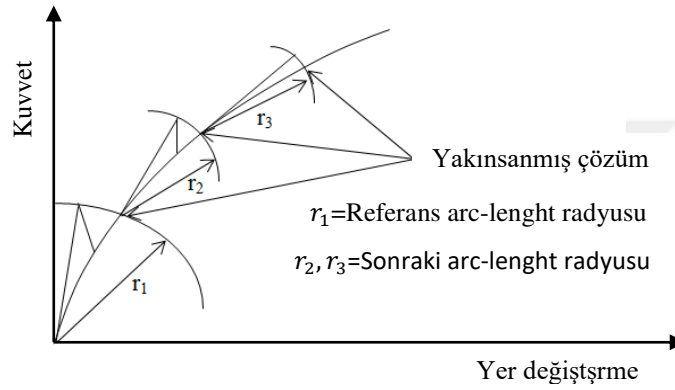
Şekil 4.5. *Newton-Raphson* lineer olmayan analiz tipleri [55]

### Yay Uzunluk (Arc-Length) Metodu

Yay uzunluk metodunda (Şekil 4.6), yapının sıfır veya eksi rijitlik gösterdiği hallerde de analizleri yapılabilmek için, Newton-Raphson metoduna ilave olarak  $\lambda$  şeklinde bir sabit gelir.

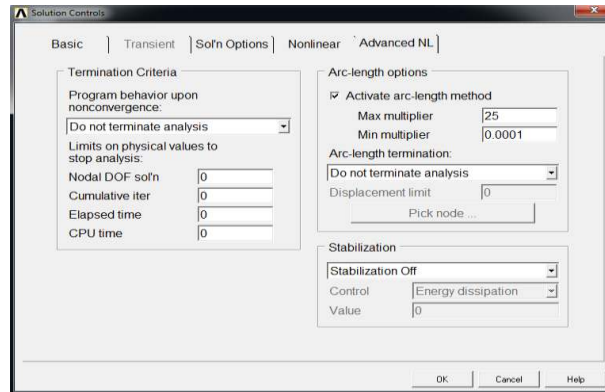
$$[K_i^T]\{\Delta_i\} = \lambda\{F^A\} - \{F_i^{nr}\} \quad (4.3)$$

Bu sabit  $-1 \leq \lambda \leq 1$  arasında bir değerdir.  $n$  adım sayısını,  $i$  ise iterasyon sayısını göstermektedir.



Şekil 4.6. Arc-Length metodunun çalışma prensibi [2]

Çözüm esnasında programın durmaması için Şekil 4.7’deki sekmeden “Do not terminate analysis” seçeneği seçilir. Sağ tarafta ise “Arc-Length” metodu aktif hale getirilerek çözüm metodu seçilmiş olur.



Şekil 4.7. Çözüm kontrolleri sekmesi

Burada maksimum ve minimum çarpanlar, “Max multiplier” ve “Min multiplier” değerleri 25 ve 0.0001 değerleri seçilmiştir.

## 5. KOMPOZİT PLAKLARDA TAMİR

Makine ve yapıları oluşturan parçalar, kullanımları esnasında maruz kaldıkları yüklemeler sebebiyle zaman içerisinde hasara maruz kalabilmektedirler. Hasara uğrayan parçaların işlevini yerine getirebilmesi için bunların yenilenmesi gerekmektedir. Parça değişimi maliyetin artmasına neden olmaktadır, imkân var ise bu parçaların tamir edilerek kullanılması çok daha avantajlı olacaktır. Parçaların tamir edilmesinde hasarlı parça, yama ile birleştirilerek hasar giderilebilir. Ayrıca güç ve hareket aktarımının gerekli olduğu yerlerde parçaların birbiriyle birleştirilmesi de yama ile tamir etme yöntemiyle gerçekleştirilebilir.

Makine ve yapı elemanı olarak kullanılan çok çeşitli malzemeler vardır. Bu malzemelerin birleştirilmesi gereken durumlarda en uygun birleştirme yöntemi seçilmelidir.

Üç temel birleştirme yöntemi vardır:

- Mekanik; cıvata, vida veya perçin
- Termal; kaynak, lehim vs.
- Kimyasal; yapıştırma

### 5.1. Mekanik Birleştirme

Metal-metal ve metal-kompozit gibi malzemelerin birleştirilmesinde kullanılabilen ve istenildiğinde sökme, takma avantajının olduğu bir yöntemdir. İşlem cıvata ve vida ile yapılabilir.

Bu birleştirme işleminde parçaların her birine delik açılması gerekmektedir, buda kesiti zayıflatır. Parçalar yüke maruz kaldığında açılan delik, çevresinde oluşan gerilme yoğunlaşması nedeniyle malzemelerin dayanımının azalmasına sebep olmaktadır. Dayanımın yükseltilmesi için kullanılan malzemenin kalınlığının artırılması gerekmektedir. Ancak buda ağırlığı artırmaktadır. Ağırlığın artması maliyetleri artıracığından dolayı istenmeyen bir durumdur. Bir başka durum cıvata ve vida deliklerinin açılması malzemede korozyona sebep olacaktır. Bu sebeple ayrıca korozyon önleyici yüzey koruma işlemi ihtiyacı da ortaya çıkacaktır.

### 5.2. Termal Birleştirme

Metal-metal malzemelerin birleştirilmesinde kullanılabilen bir metottur. Kaynak ve lehim gibi yöntemler ile yapılabilmektedir. Benzer malzemelere uygulanması ve sökülememesi yöntemin sınırlı uygulanmasına sebep olmaktadır. Ayrıca kaynak ve lehim yapılması esnasında çok yüksek sıcaklıklara çıkılması malzemelerde istenmeyen gerilmelere neden olmaktadır.

### 5.3. Yapıştırıcı ile Birleştirme

Metal-kompozit veya kompozit-kompozit malzemelerin birleştirilmesinde günümüzde havacılık ve uzay sanayi gibi birçok alanda sıklıkla kullanılan yöntemdir. Diğer birleştirme yöntemlerinde olduğu gibi bu yönteminde avantajlı ve dezavantajlı yönleri mevcuttur.

- Düzgün gerilme dağılımı: malzemede delik açılmadığı için gerilme yığılması oluşmaz.
- Yapısal bozukluğun olmaması: kaynak gibi malzemelerin özelliğini bozmaz.
- Farklı malzemelerin birleştirilmesi: kaynaktaki gibi benzer malzeme olması gerekmez.
- Sızdırmazlık: cıvata ve perçinli birleştirmede sızdırmazlık için ekstra işlem gerekir.
- Elektriksel yalıtım gibi özellikleri yapıştırmanın avantajlı yönleridir.

Yapıştırıcı ile birleştirmenin dezavantajları ise;

- Birleştirmenin kontrolü zordur.
- Birleştirmenin dizaynı, yükleri minimize edecek şekilde olmalıdır.
- Birleşim kalıcıdır, sökülemez.
- Birleştirmede kullanılan yapıştırıcıların bazıları yüksek sıcaklığa direnci zayıftır.

Yapışma, adhezyon ve kohezyon kuvvetleri sonucunda oluşan fiziksel ve kimyasal bir olaydır.

**Adhezyon:** İki maddenin temas yüzeylerindeki yapışma kuvvetidir. Yapışmanın kaliteli olabilmesi için yüzeylerin tümünün ıslatılması gerekir. Yapışma kuvveti, yüzeylerin ıslatılmasına ve yüzeylerin yapışma özelliklerine bağlıdır. Yüzeyde yabancı maddelerin bulunması da ıslatmayı olumsuz etkiler [63, 64].

**Kohezyon:** Yapıştırıcıyı meydana getiren malzemenin, yapışma esnasında bir arada tutunması olayıdır. Kohezyon, yapıştırıcı molekülleri arasında bulunan ve yapıştırıcıyı bir arada tutan kuvvettir.

### 5.4. Kompozitlerde Oluşan Hasarlar

Tabakalı kompozitlerde meydana gelen hasarlar metallere farklı olmaktadır bu sebeple hasar tamir edilmeden önce hasarın yorumlanması gerekmektedir [65, 66].

Kompozitlerde oluşan hasarlar, dış kuvvetlerden kaynaklanan ve üretim hatalarından kaynaklanan olmak üzere iki gruba ayrılır.

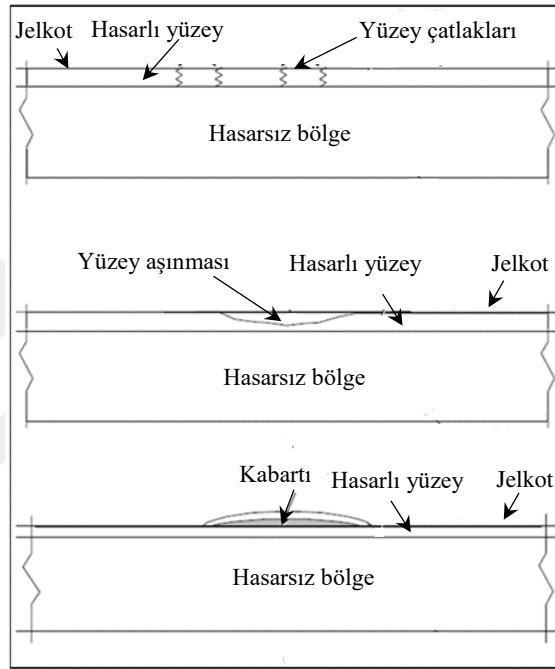
Hasarın türüne göre üç onarım tipi mevcuttur [66, 67].

- Elemanda meydana gelen büyük hasarlar hemen onarılmalıdır.
- Parçanın dayanabildiği küçük hasarlar belirli dönem içinde onarılmalıdır.

- Tolere edilebilecek hasarlar ise kozmetik iyileştirmeye ihtiyaç duyarlar.

#### 5.4.1. Yüzey Hasarı

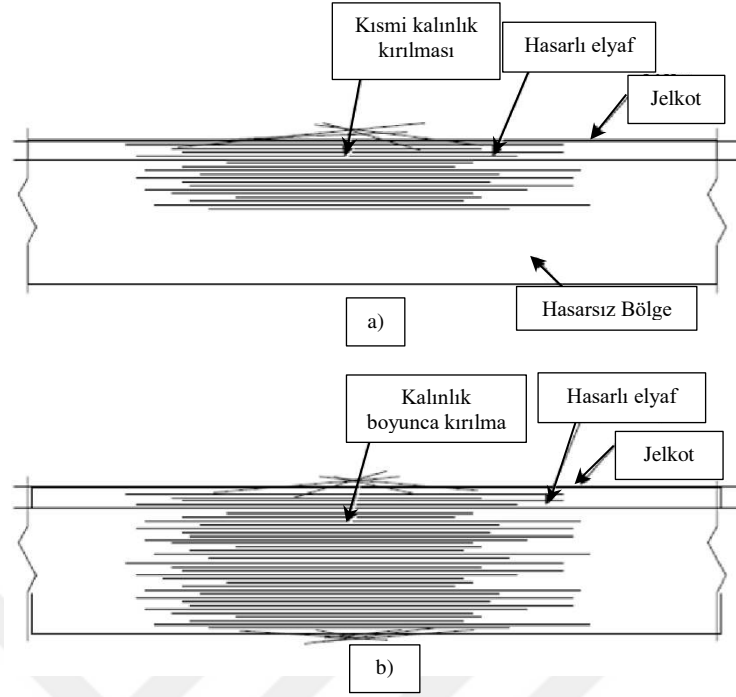
Çatlak, aşınma ve kabartı gibi üretim yöntemine de bağlı olan kompozit hasarları yaygın hasar tipleridir (Şekil 5.1). Yüzey hasarları malzeme yüzeyinde meydana geldiğinden fiber bölgesine yayılmazlar dolayısıyla tek başına malzemelerde büyük bir etkisi olmaz. Ancak onarılmazsa zamanla fiber aralarına sıvı sızması ile tabaka ayrılmasına neden olabilir [68, 69].



Şekil 5.1. Başlıca yüzey hasarları

#### 5.4.2. Tabaka Hasarı

Malzemeye uygulanan büyük yüklemeler deliklere, ezilmelere ve tabakalar arası ayrılmalara neden olabilir. Bu hasarlar kompozitlerde fiber hasarı meydana getirir (Şekil 5.2). Fiber hasarı kısmi veya kalınlık boyunca oluşabilir [68, 69].



Şekil 5.2. Tabaka hasarı

## 5.5. Onarım Tipleri

Geleneksel metal alaşımlarına göre çok farklı hasar tiplerine sahip kompozitlerin günden güne kullanımının artması, kompozit yapılara uygulanan onarım metotlarını gelişmesine neden olmuştur [66, 70].

Malzemede onarım yapılmadan önce oluşan hasar incelenip ona uygun bir onarım metodu seçilmelidir. Yüzey hasarları (kozmetik hasarlar) hasar bölgesine reçine enjekte edilerek, tabaka hasarı ise yama uygulanarak tamir edilir. Böylece hasarlı yapı orijinaline benzetilir [66, 71].

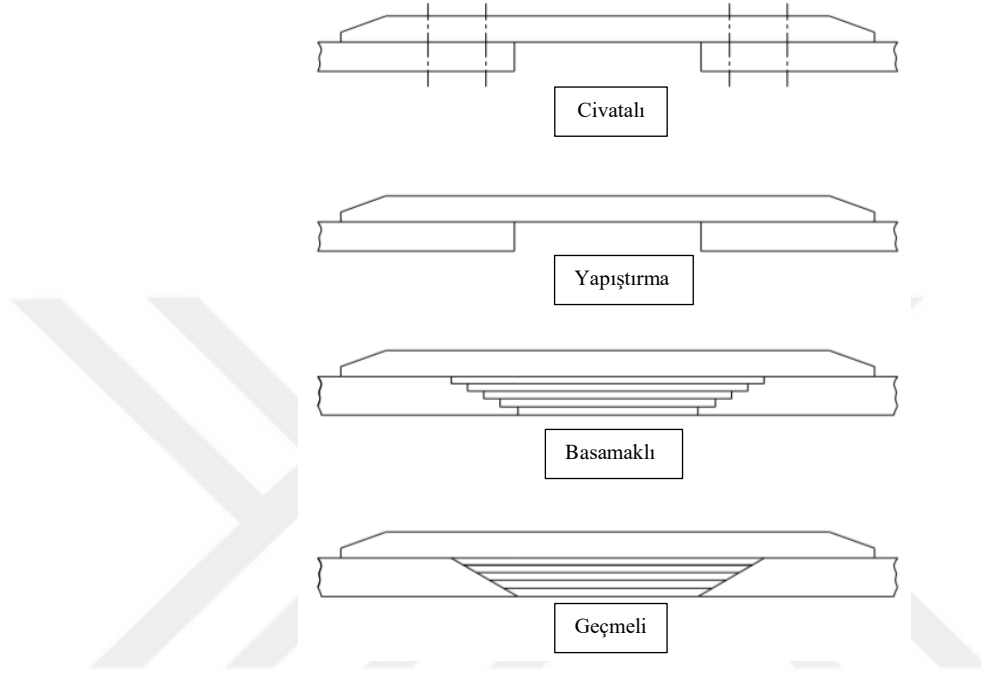
### 5.5.1. Yamasız Onarım

Kompozit yapıda fiber hasarının olmadığı yalnızca yüzey hasarının olduğu durumlarda, hasar reçine ile doldurularak onarım yapılır [68, 74]. Tabakalar arası ayrılma olduğunda da bu bölgeye delik açılarak buradan hasarlı bölgeye reçine uygulanır ve kompozitin dayanımı iyileştirilir [66, 73].

### 5.5.2. Yamalı Onarım

Kompozit yapıda tabaka hasarının olduğu durumlarda yalnızca hasarlı bölgeye reçine ilave etmek yeterli gelmeyeceğinden yama ile onarım gerekir. Yama ile onarım mekanik bağlantılı ve yapıştırılmalı olmak üzere iki şekilde yapılmaktadır (Şekil 5.3). Mekanik bağlantılı birleştirmelerde

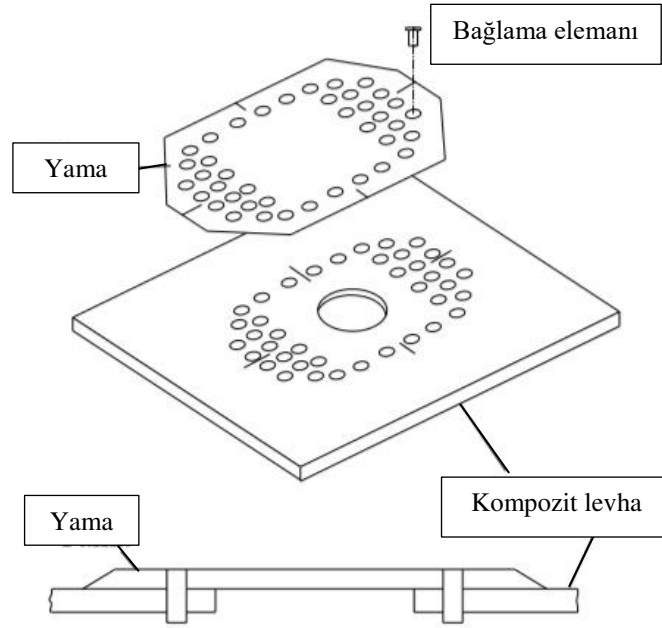
kompozit levhalarda cıvata, vida deliklerinin açılması gerekmektedir. Bu delikler gerilme yığılması ve kesit zayıflığına sebep olurken bağlantı elemanları kullanımı ağırlığı arttırıcı yönde olumsuzluk doğurur. Yapıştırıcı kullanılarak yapılan onarımda kompozit levhalar arasındaki temas alanının büyük olması, yük transferinin ve mukavemetin daha iyi olmasını sağlar [66, 10].



Şekil 5.3. Yamalı Onarım tipleri [66, 74]

#### Mekanik Bağlantılı Yama ile Onarım

Mekanik bağlantılı yamada tamir uygulaması kısa sürede yapılmaktadır. Bu uygulamada hasarlı bölge çıkarılır ve hazırlanan yama ile hasarlı numunede karşılıklı vida delikleri açılarak bağlantı elemanı ile birleştirilir (Şekil 5.4). Bu durum parçanın ömrünü olumsuz yönde etkileyebilir. Yama ve hasarlı numuneye delik açarken tabaka ayrılması ve fiber hasarı oluşmaması için dikkat edilmelidir [65, 66].

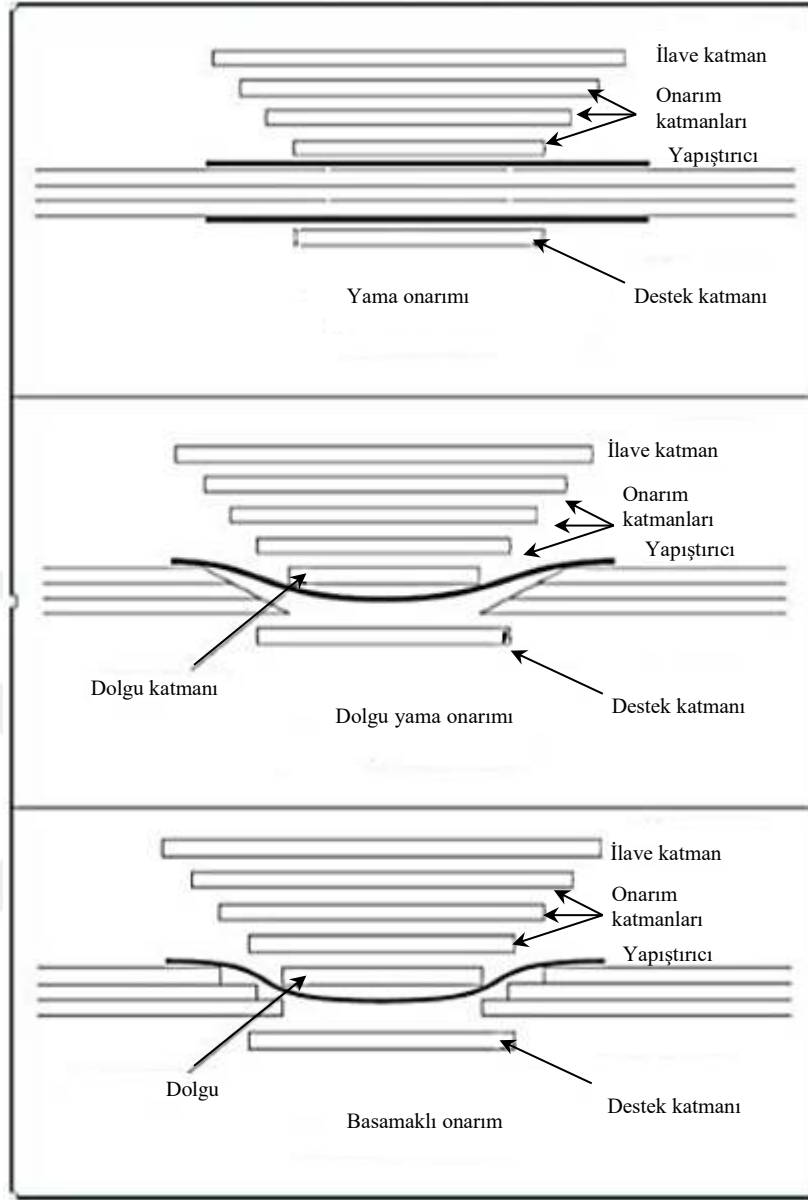


**Şekil 5.4.** Mekanik bağlantılı yama ile onarım [66, 75]

Uygulamada pratikliği ve sökülebilme kolaylığı olduğundan kompozit elemanların onarımında mekanik bağlantılı yamalı onarım yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bu onarım yönteminde, yapıştırırmalı yamalı onarımlarda önemli olan nem ve sıcaklık problemleri olmadığı gibi yüzey hazırlama işlemi de gerektirmez. Yama ve hasarlı numune farklı genleşme katsayısına sahip olması kalıcı şekil değişimine sebep olacağından yama malzemesinin seçimi önemlidir. Mekanik bağlantılı onarım ince ve bal peteği yapılarından ziyade kalın tabakalar için uygundur.

#### **Yapıştırırmalı Yama ile Onarım**

Hasara uğramış malzemede hasar tipi muayene yöntemleri kullanılarak tespit edildikten sonra nasıl bir onarım yapılacağına karar verilir. Tabaka hasarının olduğu ve mekanik birleştirmenin uygun olmadığı durumlarda yapıştırırmalı yama uygulanır. Yapıştırırmalı yamada direk yama yapıştırma, geçmeli veya basamaklı yama yapıştırma uygulamalarından hangisine karar verilirse hasarlı malzeme ona göre hazırlanmalıdır (Şekil 5.5).



Şekil 5.5. Yapıştırırmalı yama ile onarım [76]

Öncelikle mekanik birleştirmede olduğu gibi hasarlı bölge düzgün biçimde kesilerek çıkarılmalıdır. Hasar bölgesi çıkarıldıktan sonra, yüzeyler temizlenmeli ve yamalar hazırlanmalıdır. Bundan sonra yapıştırırmalı yama ile onarım,

- Koruyucu Bant Metodu
- Oda Sıcaklığında El Yatırması Metodu
- Yüksek Sıcaklıklarda El Yatırması Metodu
- Pre-Preg Onarımı
- Vakum Destekli Reçine İnfüzyon metodu yöntemlerinden uygun olan ile yama yapılmalıdır [70].

- **Koruyucu Bant Metodu**

Koruyucu bant metodunda, 0,025-0,075 mm arasında değişen kalınlıklarda alüminyum folyo kullanılır. Folyoda bulunan yapışkan hasarlı yüzey iyice temizlendikten sonra üzerine yapıştırılır. Folyo fiberlerin dağılmasını engelleyerek kalıcı yama yapılana kadar geçici bir onarım sağlar, dayanım sağlamaz

- **Oda Sıcaklığında El Yatırması Metodu**

Yama yapılacak olan kumaşlara hasarlı numunenin şeklinin kolaylıkla verilmesi ve ısıtma ihtiyacına gerek duymayışı yamanın yapılışını oldukça kolaylaştırır. Yama yapılacak numuneden hasarlı bölge kesilip çıkarıldıktan sonra uygun ebatla ve sayıda yama kumaşları kesilir. Doğru oranlarda tartılıp, karıştırılan reçine hasar bölgesine yamanın ebatlarına göre dökülür rulo veya fırça ile hasarlı numune reçineyle ıslatılır. Daha sonra her bir yama tabakası serilir ve reçine dökülerek rulo ile ıslatılır, son olarak yamadan fazla reçine atılması için üzerine ağırlık konulur.

- **Yüksek Sıcaklıklarda El Yatırması Metodu**

Bu metot, oda sıcaklığında el yatırması metodunun uygulamasının aynısı olmakla beraber ekstra olarak ısıya ihtiyaç duyar. Kürlemenin çabuk olmasının istendiğı durumlarda bu işlem uygulanır. Oda sıcaklığında veya yüksek sıcaklıkta el yatırması metodunda fazla reçinenin atılması için ağırlık koymanın mümkün olmadığı durumlarda vakum uygulanarak reçinenin fazlası atılabilir.

- **Pre-Preg Onarımı**

Pre-preg önceden reçine emdirilmiş kumaş demektir. Yine tamir yapılacak hasarlı numuneden hasar bölgesi kesilip, hasar yüzeyi temizlendikten sonra pre-pregler kaç tabaka ve hangi ebatla olacaksa ona göre yüzeye yapıştırılarak uygulan temiz ve kolay yöntemdir. El yatırmasına benzer ancak reçine hazırlama işlemine gerek yoktur. Temiz ve basit bir uygulama olmasına rağmen pre-preglerin saklama koşullarını sağlamak zordur.

- **Vakum destekli reçine infüzyon metodu**

Bu yöntem ile üretilecek parçanın boyutunun sınırı yoktur, üretilen üründe herhangi bir boşluk olmaz, vakum ile boşluk doldurulur. Temiz ve elyaf/reçine oranı yüksek ancak maliyetli bir uygulamadır. Tamiri yapılacak olan kompozitten hasarlı bölge kesilip temizlendikten sonra hasara uygun ebat ve sayıda yama malzemesi kesilir. Uygulama üretimi yapılacak kompozit malzemesine bir ucundan reçine verilerek diğer taraftan vakumla çekilmesine dayanır.

Hasarlı numunenin, reçine verildikten sonra zemine yapışmaması için, altına ayırıcı(release film) serilir. Vakum ortamının sağlanabilmesi için zemin ile release filmi ortalayacak şekilde çift taraflı bantla yapıştırılır. Hasarlı bölgeye yama malzemesi serilir. Uygulama bitiminde gereksiz olan

malzemelerin kolayca sökülebilmesi için yamanın üzerine soyma kumaşı(peel ply) serilir. Peel ply'ın üzerine reçinenin rahatça akmasını sağlayan infüzyon filesi serilir. Reçinenin yamayı homojen şekilde ıslatabilmesi için reçinenin girişine ve çıkışına yama ebatında spiral hortum yerleştirilir. Son olarak vakum torbası çift taraflı bantla yapışacak şekilde serilir ve bir taraftan vakum hortuma reçine verilir diğer taraftan vakum pompası yardımıyla reçine çekilir bu esnada yamaların ıslanması sağlanır.

Başarılı bir kompozit onarımında her şeyden önce hangi tür tamirin yapılacağını seçimi önemlidir. Ayrıca hasarlı bölgenin kesilip çıkarıldıktan sonra temizlenmesi ve yapıştırıcıya baskı uygulanması ve kütleme iyi bir yama için gereklidir.

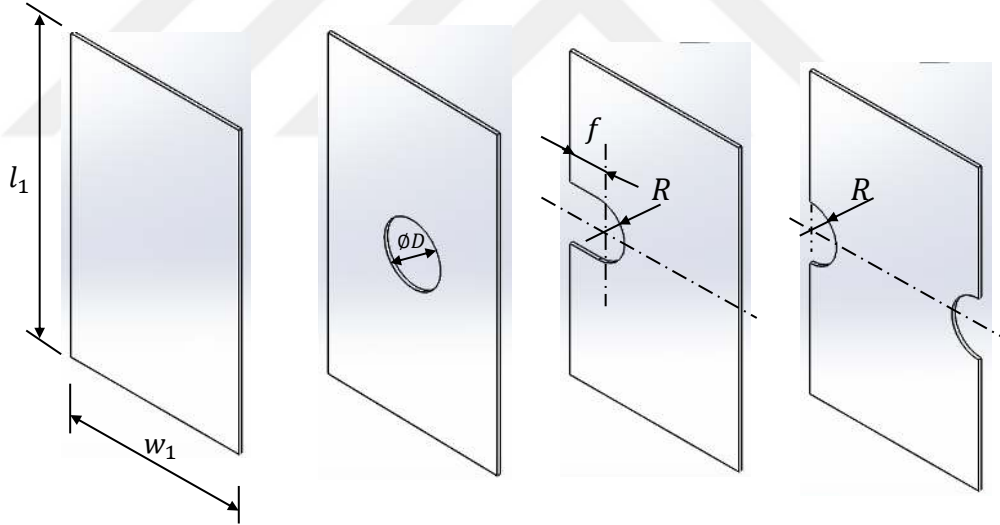


## 6. MATERYAL VE METOD

Bu çalışmada plakların burkulma davranışı deneysel ve sayısal olarak irdelenmiş ve birbiri ile uyumu araştırılmıştır.

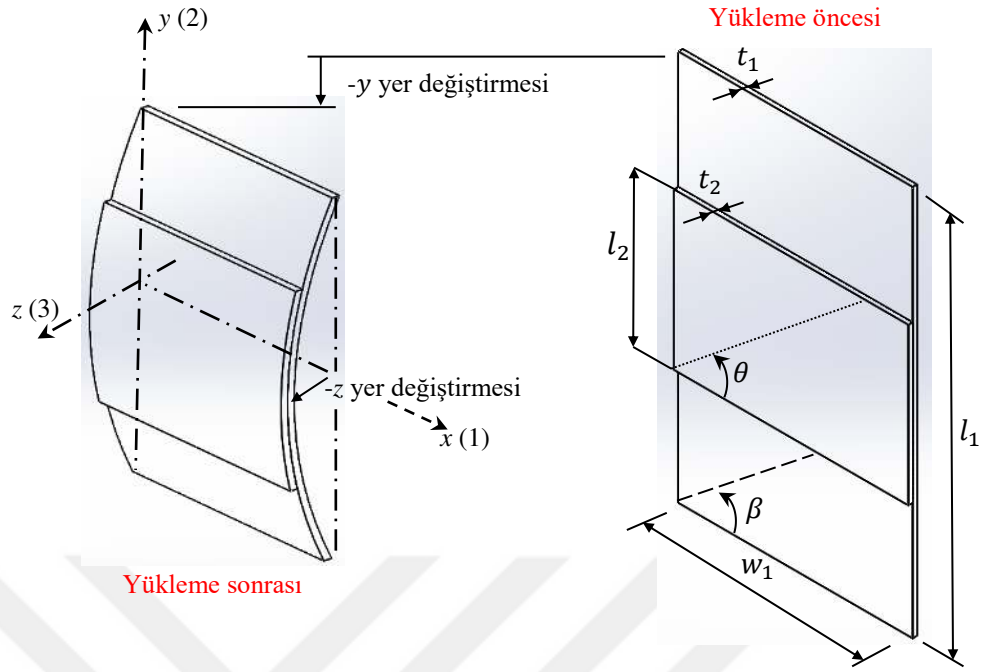
### 6.1. Problemin Tanımı

Bu çalışmada tabakalı hibrid kompozit plakların ve yamalı plakların burkulma davranışları deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Hasarsız, ortasında dairesel delikli, U kenar çentikli ve yarım daire çift kenar çentikli plaklar için burkulma öncesi ve burkulma sonrası plak davranışları incelenmiştir. Daha sonra dairesel delikli numunelere ıslak yamalı vakum infüzyon yöntemiyle yama yapılmış ve *UTEST* marka universal çekme cihazında burkulma deneyine tabi tutulmuştur. Çalışmada 1 m<sup>2</sup>'lik dört tabakalı 0° oryantasyon açısına sahip karbon ve aramid örgülü hibrid kumaştan vakum infüzyon yöntemiyle sıcaklık kontrollü olarak plak üretilmiştir. Daha sonra bu plaklardan deney numuneleri hazırlanıp Şekil 6.1'deki çentikler açılmıştır.



Şekil 6.1. Çalışmada kullanılan çentikli numuneler

Çentikli numunelerin burkulma davranışları incelendikten sonra, çentik etkisini ortadan kaldırmak veya iyileştirmek için dairesel delikli plaklar Şekil 6.2'de görüldüğü gibi yama ile onarılmıştır. Çalışmada Şekil 6.2'de verilen boyutlar değiştirilmiş ve bu değişkenlerin burkulma öncesi ve sonrası duruma etkileri sayısal ve deneysel olarak incelenmiştir. Tablo 6.1'de boyutların hangi aralıkta değiştiği verilmiştir.



**Şekil 6.2.** Çalışmada kullanılan yamalı plakta yüklem öncesi ve yüklem sonrası durum

**Tablo 6.1.** Çalışmada kullanılan plak değişkenleri.

|                                |                                           |                                                                              |                                           |                                         |                                          |
|--------------------------------|-------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|-----------------------------------------|------------------------------------------|
| $\theta$<br>(Yama fiber açısı) | 0°                                        | 15°                                                                          |                                           | 30°                                     | 45°                                      |
| $\beta$<br>(Plak fiber açısı)  | 0°                                        | 15°                                                                          |                                           | 30°                                     | 45°                                      |
| $l_1$<br>(Plak uzunluğu)       | 100 mm                                    |                                                                              |                                           |                                         |                                          |
| $l_2$<br>(Yama uzunluğu)       | 30 mm                                     | 40 mm                                                                        |                                           | 50 mm                                   |                                          |
| $w_1$<br>(Plak genişliği)      | 60 mm                                     |                                                                              |                                           |                                         |                                          |
| $t_1$<br>(Plak kalınlığı)      | 1.06                                      |                                                                              |                                           |                                         |                                          |
| $t_2$<br>(Yama kalınlığı)      | 0.65 mm<br>(2 tabaka<br>nano<br>katkısız) | 1.1 mm<br>(4 tabaka nano katkısız<br>ve 4 tabaka %1 ve %2<br>grafen katkılı) | 2.16 mm<br>(8 tabaka<br>nano<br>katkısız) | 1.34 mm<br>(4 tabaka %1<br>CNT katkılı) | 2.1 mm<br>(4 tabakalı %2<br>CNT katkılı) |
| $\varnothing D$                | 20 mm                                     |                                                                              |                                           |                                         |                                          |
| $f$                            | 10 mm                                     |                                                                              |                                           |                                         |                                          |
| $R$                            | 10 mm                                     |                                                                              |                                           |                                         |                                          |

Burkulmada plakların – y eksenindeki yer değişimini *UTEST* universal çekme cihazı ile – z eksenindeki sehimini ise Şekil 6.3’de gösterilen *OPKON SLPS 100 D5K1M LVDT* doğrusal değişken fark transformatoru ile ölçölmüştür. Ayrıca plakların burkulma davranışları sayısal olarak sonlu elemanlar yöntemini kullanan *ANSYS* paket programı kullanarak ta elde edilmiş ve deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.



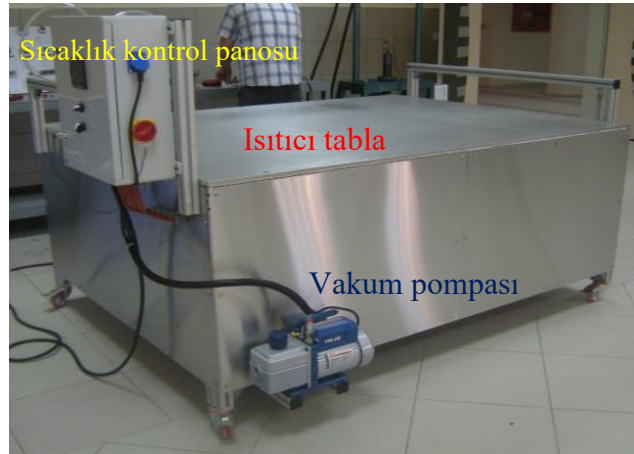
Şekil 6.3. LVDT doğrusal değişken fark transformatoru

## 6.2. Deneysel Çalışma

Çalışmada kompozit plak üretilmiş ve bundan deney numuneleri elde edilerek burkulma deneyi yapılmıştır.

### 6.2.1. Kompozit Plak Üretimi

Kompozit plak, vakum infüzyon metodu kullanılarak üretilmiştir. Üretim Şekil 6.4’de görölen sıcaklık kontrollü vakum infüzyon tezgâhında yapılmıştır.



Şekil 6.4. Sıcaklık kontrollü vakum infüzyon tezgâhı

Plak, karbon ve aramid fiberlerden oluşan hibrid kumaşa vakum infüzyon metoduyla reçine emdirilerek üretilmiştir. Üretim metodu adım adım aşağıda izah edilmiştir.

Öncelikle Şekil 6.5'te görüldüğü gibi tezgâh üzerine ayırıcı tabaka (release film) serilmiş ve release filmin etrafına tezgâha yapışması için çift taraflı bant yapıştırılmıştır.



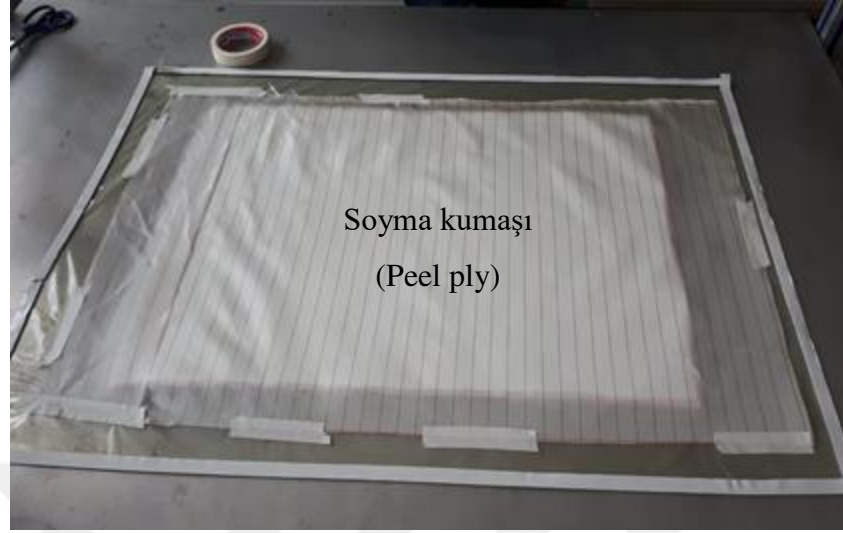
**Şekil 6.5.** Release filmin ısıtıcı tablaya çift taraflı bant ile yapıştırılması

Şekil 6.6'da görüldüğü gibi release film üzerine 1x1 m<sup>2</sup> ebatında örgülü 0°, 4 tabaka [0°]<sub>4</sub> karbon ve aramid fiberlerden oluşan dokuma hibrid kumaşlar serilmiştir.



**Şekil 6.6.** Karbon/aramid hibrid dokuma kumaş

Kumaş üzerine imalat bittikten sonra üretilen plağı kullanılan sarf malzemelerden kolayca ayırmak için Şekil 6.7’de görüldüğü gibi soyma kumaşı (peel ply) serilir.



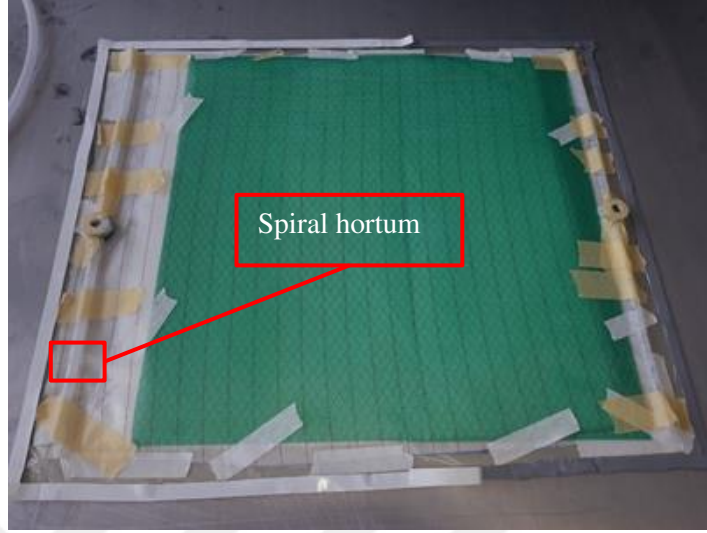
**Şekil 6.7.** Kumaş üzerine serilen soyma kumaşı (peel ply)

Kumaşa emdirilecek olan reçinenin rahatça akıp tüm kumaşı ıslatması için soyma kumaşının üzerine Şekil 6.8’de görüldüğü gibi infüzyon filesi (mesh) serilmiştir. Hem soyma kumaşı hem de infüzyon filesinin vakum etkisinde konumunu bozmaması için kâğıt bant ile ayırıcı filme yapıştırılmıştır.



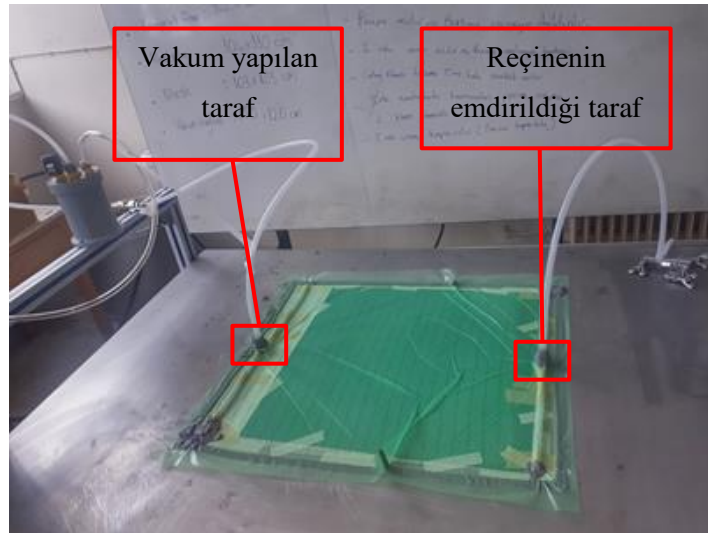
**Şekil 6.8.** Ayırıcı tabaka (Release film) üzerine serilen infüzyon filesi

Bu aşamada reçinenin rahatça tüm kumaş yüzeyini homojen şekilde ıslatabilmesi için reçinenin çekileceği ve fazlasının atılacağı her iki yöne de Şekil 6.9’da görüldüğü gibi spiral hortum yerleştirilmiştir.



Şekil 6.9. Spiral hortumun yerleştirilmesi

Son olarak ayırıcı film ile ısıtma tablasına yapışık olan çift taraflı bandın üzerine Şekil 6.10’da görüldüğü gibi vakum naylonu serilmiştir. Reçine emdirilecek taraftan vakum hortumunun ağzı kapatılıp 10 dk kadar vakum komparatörü gözlemlenerek herhangi bir hava kaçağı olup olmadığı kontrol edilmiştir.



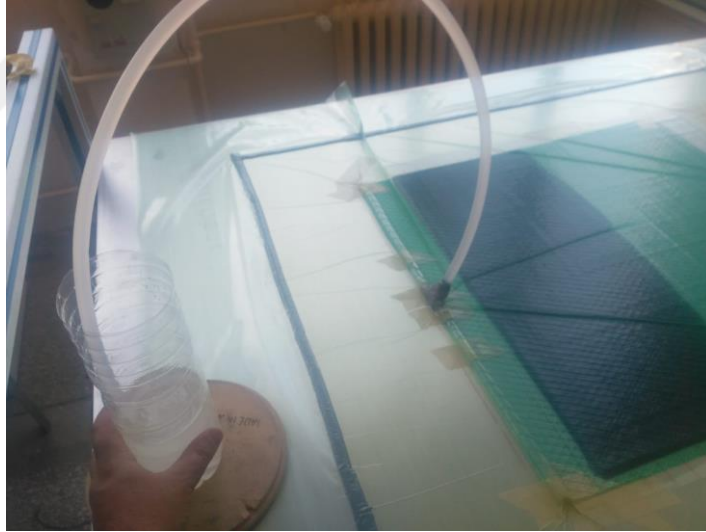
Şekil 6.10. Vakumda hava kaçağı kontrolü

Hava kaçağı olmayan sistem için reçine karışımı hazırlanmıştır. Mekanik özellikleri Tablo 6.2’de verilen *Fibermak* kompozit firmasından alınan *F-1564* reçine ve *F-3487* sertleştirici ağırlıkça 100/34 oranında katılıp homojen karışım elde edilene 5-10 dak süreyle elle karıştırılmıştır. Ayrıca hava kabarcıklarının geçmesi için karışım 10 dak dinlendirilmiştir.

**Tablo 6.2.** Kompozit plak üretiminde kullanılan reçine karışımının özellikleri [77]

| Epoksi malzeme                      | <i>F-1564</i> reçine | <i>F-3487</i> sertleştirici |
|-------------------------------------|----------------------|-----------------------------|
| 25 °C viskozite (MPa)               | 1250-1450            | 30-70                       |
| 25 °C yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> ) | 1.1-1.2              | 0.98-1.0                    |
| Ağırlıkça karışım oranı (birim)     | 100                  | 34                          |

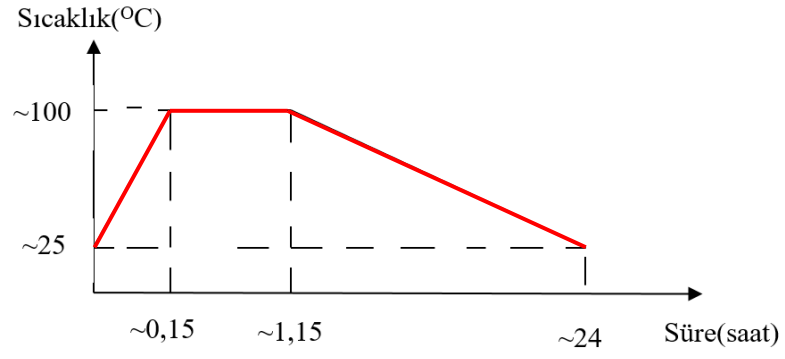
Kaçak kontrolünden sonra dinlendirilen karışım vakum halindeyken vakum pompası çalıştırılmış vakum hortumu hava girişi olmayacak şekilde karışıma daldırılmıştır. Böylece karışım kumaşı ıslatarak ilerlemeye başlamıştır (Şekil 6.11).



**Şekil 6.11.** Kumaşa reçine verilmesi

Vakum hortumu tarafında biraz reçine çıkmaya başladığında önce reçine emilen taraftaki hortum daha sonra vakum hortumu kapatılarak reçine akışı kesilmiş ve kompozit vakumda beklemeye bırakılmıştır. Bu arada tezgâh çalıştırılmış ve plağın ısıtılması sağlanmıştır.

Tezgâh Şekil 6.12’de görüldüğü gibi oda sıcaklığından 100 °C’ye kadar ısıtılmış ve bu sıcaklıkta 1 saat kürleme yapılmıştır. Daha sonra plak oda sıcaklığında soğumaya bırakılmış 24 saat sonra sökülüştür.



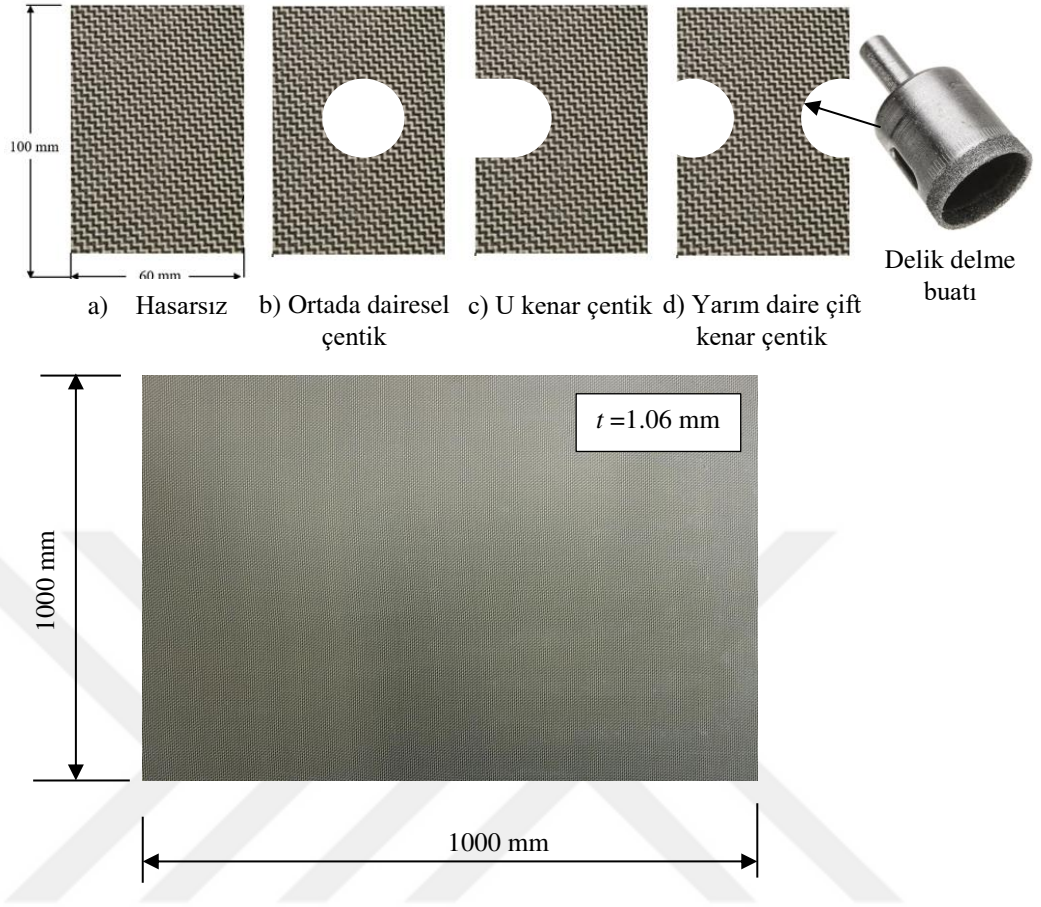
Şekil 6.12. Kompozit plak kürleme grafiği

İmalatı yapılan kompozit plaktan Şekil 6.13’ deki *FALCON FS 3600* model sulu mermer kesme makinesinde Şekil 6.14’te görüldüğü gibi 60x100 mm ebadında deney numuneleri kesilmiştir.



Şekil 6.13. Kompozit plak kesmede kullanılan sulu mermer kesme makinesi

Numunelerde çentik oluşturmak için Ø20 mm elmas buat ile freze tezgâhında ortasında dairesel delik ve U kenar ile yarım daire çentikler 3000 d/dak ile açılmıştır.



Şekil 6.14. Çentikli deney numunelerinin elde edilmesi

### 6.2.2. Yamalı Deney Numunesi İmalatı

Kompozit plaklar önceki kısımda anlatıldığı gibi vakum infüzyon yöntemiyle üretilmiştir. Daha sonra plaktan deney numuneleri kesilmiş ve bunlara dairesel delik açılmıştır. Plâğın delik bölgesine rulo ile reçine sürülmüş daha sonra üzerine elle yatırma yöntemiyle ısıtılmış yama hibrid kumaşları serilmiştir. Bu işlem toplam yama tabaka sayısı kadar her katman için tekrarlanmıştır.

Daha sonra kumaş ve plakların üzerine vakum infüzyon yöntemindeki sırayla önce peel ply sonra infüzyon filesi ve vakum torbası serilmiştir. Reçine tarafında vakum konnektörü konulmamış yalnızca vakum pompasının olduğu taraftan vakum hortumu yardımı ile vakum uygulaması yapılmıştır (Şekil 6.15). Böylelikle plak ve yamada bulunan reçinenin fazlası atılmıştır. Vakum 1 saat boyunca açık tutulmuş daha sonra kapatılarak sistem soğumaya bırakılmıştır. Bu sırada sıcaklık yine Şekil 6.12'deki gibi açılarak kütleme yapılmıştır. 24 saat sonra numuneler ısıtıcı tabladan sökülerek kesime gönderilmiştir.



Şekil 6.15. Vakum infüzyon yöntemiyle ıslak yamalı kompozit plak tamiri

#### 6.2.3. Nano Partikül Katkılı Deney Numunelerinin Hazırlanması

Yamalı deney numunesinin üretimi Bölüm 6.2.2’de anlatılmıştır. Nano partikül katkı yamalı deney numunesinin üretiminde tek fark kullanılan reçineye nano partikül eklenmiş ve yamanın bu şekilde yapılmış olmasıdır.

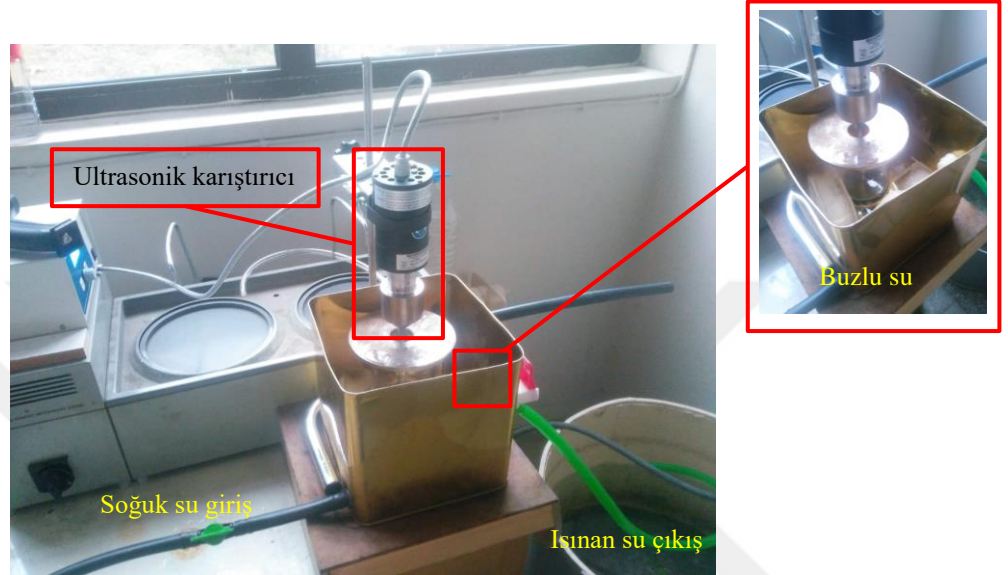
#### 6.2.4. Reçineye Nano Partikül Eklenmesi

Nano tüp miktarı, reçineye katılacak gerekli olan reçine ağırlık yüzdesi kadar miktar Şekil 6.16’te gösterilen 1/1000 hassasiyetteki RADWAG PS/510/C/I marka terazisi ile ölçülmüştür.



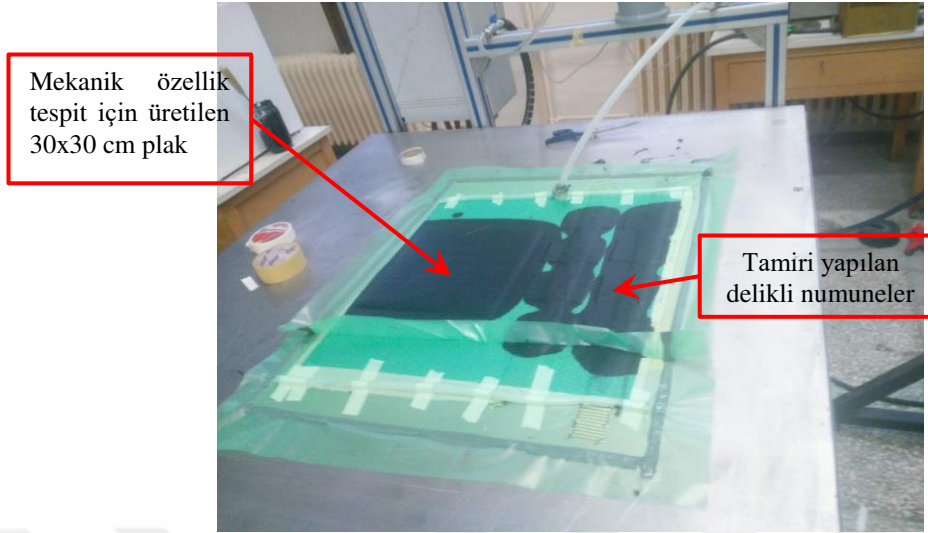
Şekil 6.16. Hassas terazi

Tartımı yapılan nano partikülün üzerine gerekli olan miktarda reçine eklenmiş ve daha sonra *SONOPULS HD 2200* model ultrasonik karıştırıcı ile 30 dk 30 kHz frekansta [78] Şekil 6.17’de gösterilen soğutucu kapta karıştırılmıştır. Karıştırma esnasında su sıcaklığı sürekli kontrol edilmiş, oda sıcaklığının üzerine çıkılmamıştır.



Şekil 6.17. Ultrasonik karıştırıcı ile karıştırma

Daha sonra reçine için gerekli miktarda sertleştirici eklenerek elle 10 dk boyunca karıştırılmıştır. Elde edilen reçine ve nano partikül karışımı yamalı deney numunesi üretiminde olduğu gibi delikli plak üzerine sürülmüş daha sonra yama kumaşı serilmiş ve tekrar karışım sürülmüştür. Bu işlem her yama tabakası için yapılmıştır. Sonrasında sırasıyla peel ply, mesh ve vakum naylonu serilmiş ve sistem yine tek taraftan vakum konnektörü bağlanarak vakuma alınmıştır. Sonrasında yine Şekil 6.12’de verilen grafiğe uygun olarak sıcaklık açılıp Şekil 6.18’deki gibi kürleme yapılmıştır. Nano partiküllü yamanın mekanik özelliklerini tespit edebilmek amacıyla 30x30 mm ebatlarında ayrı bir numune de hazırlanmıştır (Şekil 6.18).



**Şekil 6.18.** Nano partikül eklenmiş yamalı numune üretimi

Yama içerisine katılan nano partiküllerin özellikleri Tablo 6.3'te verilmiştir.

**Tablo 6.3.** Yama içerisine katılan nano partiküllerin özellikleri [79]

| Ürün adı          | Karbon nano tüp (MWCNT) | Grafen                |
|-------------------|-------------------------|-----------------------|
| Safılık           | > % 95                  | > % 99,9              |
| Renk              | Siyah                   | Gri                   |
| Dış çap           | 30-50 nm                | 7 nm                  |
| İç çap            | 5-10 nm                 | -                     |
| Uzunluk           | 10-25 nm                | -                     |
| Üretim metodu     | Kimyasal buharlaştırma  | -                     |
| Özgül yüzey alanı | 50 m <sup>2</sup> /g    | 170 m <sup>2</sup> /g |

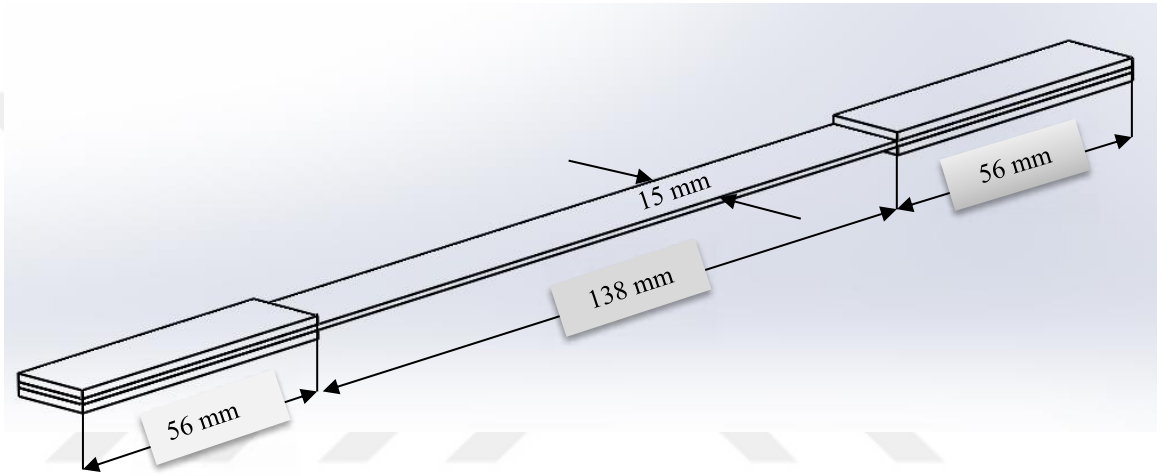
#### 6.2.5. Üretilen Plakların Mekanik Özelliklerinin Tespit Edilmesi

Çalışmada ayrıca sayısal analiz sonucunda numunelerin davranışları incelenip deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Sayısal çalışmanın yapılabilmesi için üretilen numunelerin mekanik özelliklerinin tespit edilmesi gerekmektedir. Bu amaçla mekanik özelliklerin tespitinin nasıl yapıldığı aşağıdaki bölümde anlatılmıştır.

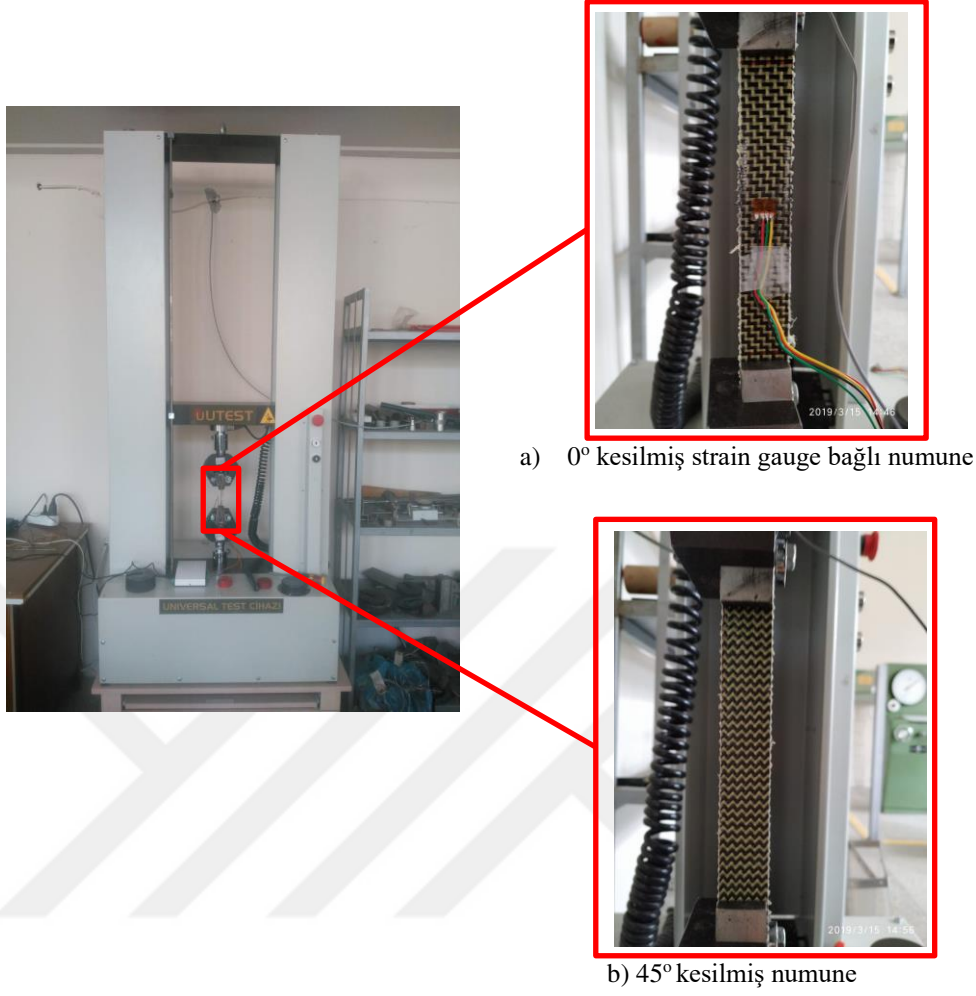
### 6.2.6. Kompozit Plagın Mekanik Özellikleri

Burkulma deneyinde kullanılan numuneler, vakum infüzyon yöntemiyle 1 m<sup>2</sup> boyutunda hibrid kumaştan [0°]<sub>4</sub> olacak şekilde üretilmiştir. Daha sonrasında plaklar Şekil 6.13'te verilen sulu mermer kesme makinesinde kesilerek 60x100 mm<sup>2</sup> ebatında deney numuneleri elde edilmiştir.

Sayısal olarak ANSYS programında burkulma davranışının gözlemlenebilmesi için programa elastisite modülü, kayma modülü ve Poisson oranı girilmesi gerekmektedir. Bu amaçla Şekil 6.14'teki plaktan ASTM 3039 (Şekil 6.19) standartlarına uygun olarak kesilmiş ve Şekil 6.20'de görüldüğü gibi çekme cihazına bağlanmıştır.



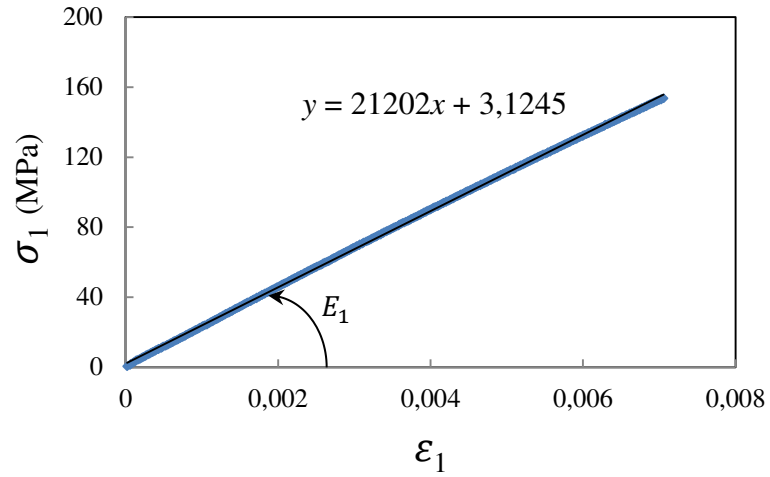
Şekil 6.19. ASTM 3039 Test numunesi



Şekil 6.20. Malzemelerin mekanik özelliklerinin tespiti için numunelerin çekme cihazına bağlanması

### Elastisite Modülünün Hesaplanması

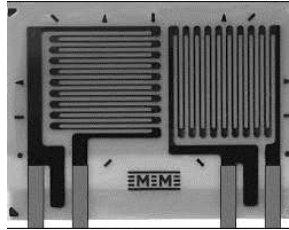
ASTM 3039 standartlarında 0° kesilen numune UTEST 10000 N'luk universal çekme cihazına bağlanmış ve çekme testi uygulanmıştır. Deney sonucunda  $\sigma - \varepsilon$  grafiği elde edilmiştir. Grafiğin eğimi Hooke yasasına göre elastisite modülünü vermektedir. Elde edilen grafik Şekil 6.21'de verilmiştir.



**Şekil 6.21.** Çekme testi sonucu kompozit plağa ait gerilme şekil değiştirme grafiği

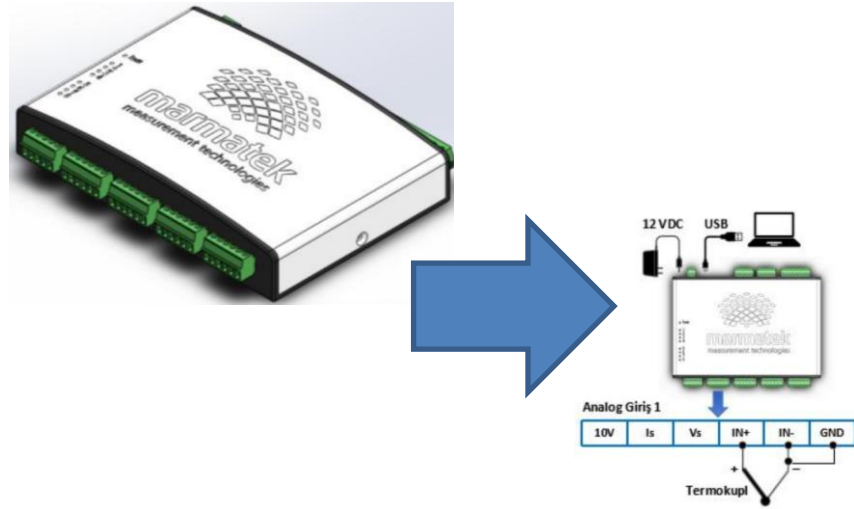
#### Poisson Oranının Bulunması

ASTM 3039 standartlarında 0° olarak kesilen numuneye Şekil 6.22’de gösterilen Vishay Precision Group, Inc. firmasının 0°-90° CEA-06-125UT-350 model strain gauge Şekil 6.20-a’da görüldüğü gibi yapıştırılmış ve uzama oranları Şekil 6.23’de verilen Marmatek firmasının VTA-1704 model veri toplama cihazından okunmuştur.



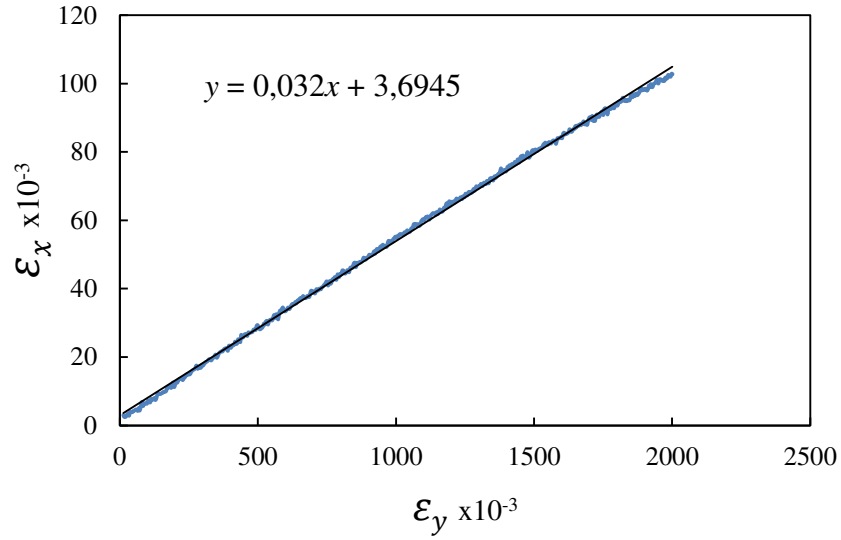
**Şekil 6.22.** 0°-90° strain gauge

Strain gauge (Şekil 6.22) kompozit plak üzerine yapıştırılmadan önce yüzey 400’lük zımpara ile zımparalanmış ve %99 saflıkta etil alkol ile tüy yapmayacak bir kumaş ile silinmiştir. Sonra strain gauge *Quickstar* yapıştırıcı ile deney numunesinin yüzeyine yapıştırılmıştır.



Şekil 6.23. VTA-1704 model veri toplama cihazı

Veri toplama cihazından,  $0^\circ$  strain gauge ile  $-x$  ekseninde ölçülen şekil değiştirme oranı(-) ile  $90^\circ$  strain gauge ile  $-y$  ekseninde ölçülen şekil değiştirme oranı(+) arasındaki değişim grafiği Şekil 6.24’de verilmiştir. Poisson oranı ( $\nu = -\frac{\epsilon_x}{\epsilon_y}$ ) grafiğin eğimi olarak hesaplanır.

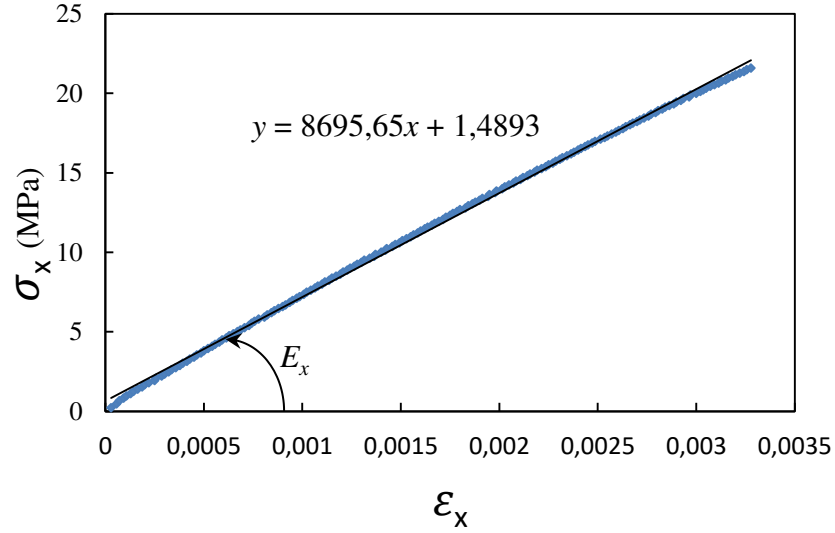


Şekil 6.24. Şekil değiştirme oranları arasındaki değişim grafiği ( $\epsilon_x - \epsilon_y$ )

### Kayma Modülünün Hesaplanması

ASTM 3039 standartlarında  $45^\circ$  fiber oryantasyon açısında kesilen numune *UTEST* 10000 N’luk universal çekme cihazına bağlanmış ve çekme testi uygulanmıştır. Çekme testi sonucunda Şekil 6.25’te verilen gerilme-şekil değiştirme( $\sigma_x - \epsilon_x$ ) grafiği elde edilir. Grafiğin eğimi  $E_x$ ’i

vermektedir. Bulunan  $E_1$  değeri kullanılan kumaş  $[0^0]_4$  tabaka diziliminde dokuma olduğundan  $E_1$  ve  $E_2$  değerleri birbirine eşittir.  $G_{12} = \frac{1}{\left(\frac{4}{E_x} + \frac{2\nu_{12}}{E_1} - \frac{1}{E_1} - \frac{1}{E_2}\right)}$  formülü kullanılarak kayma modülü elde edilmiştir.



Şekil 6.25. Numunenin çekmedeki gerilme-şekil değiştirme grafiği

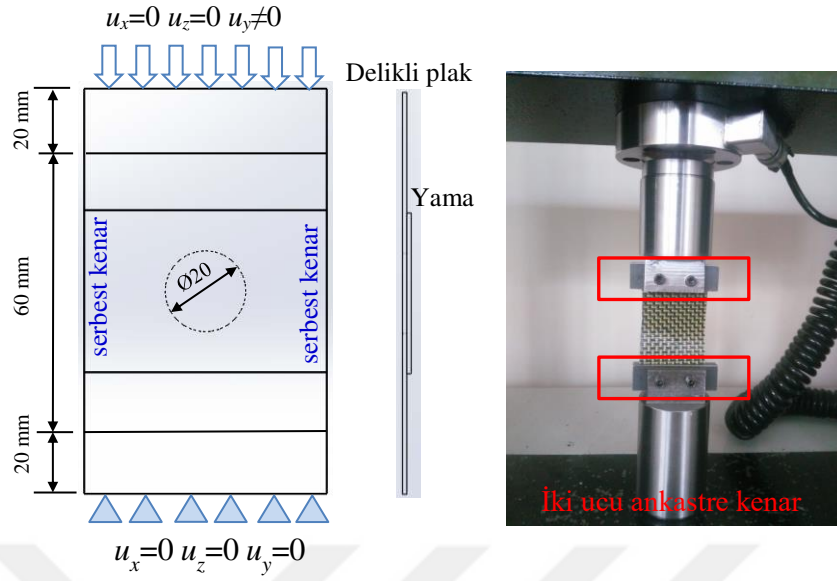
Elastisite modülü, kayma modülü ve Poisson oranlarının Nano-katkısız, %1-2 CNT katkılı ve %1-2 Grafen katkılı yama malzemesi için değerleri Tablo 6.4'te verilmiştir.

Tablo 6.4. Yama malzemelerinin mekanik özellikleri

| Mekanik özellikler | Kompozit plak | Nano-katkısız yama | %1 CNT katkılı yama | %2 CNT katkılı yama | %1 Grafen katkılı yama | %2 Grafen katkılı yama |
|--------------------|---------------|--------------------|---------------------|---------------------|------------------------|------------------------|
| $E_1$ (MPa)        | 21202         | 21785              | 21162               | 10838               | 20477                  | 21034                  |
| $E_2$ (MPa)        | 21202         | 21785              | 21162               | 10838               | 20477                  | 21034                  |
| $G_{12}$ (MPa)     | 2712          | 6537               | 6141                | 3717                | 5726                   | 4989                   |
| $\nu_{12}$         | 0.0320        | 0.0244             | 0.0509              | 0.2650              | 0.0209                 | 0.0321                 |

### 6.2.7. Sınır Şartları

Hasarlı ve yama yapılmış plak Şekil 6.26'da görüldüğü gibi iki ucu serbest iki ucu ankastre olarak çekme cihazına bağlanmış ve burkulma testi yapılmıştır.



**Şekil 6.26.** UTEST çekme test cihazına bağlanan deney numuneleri

Yamalı numunenin burkulma sonrası meydana gelen deformasyonları Şekil 6.27’de gösterilmiştir.



a) Numunelerin burkulma sonrası önden görünüşü



b) Numunelerin burkulma sonrası yandan görünüşü

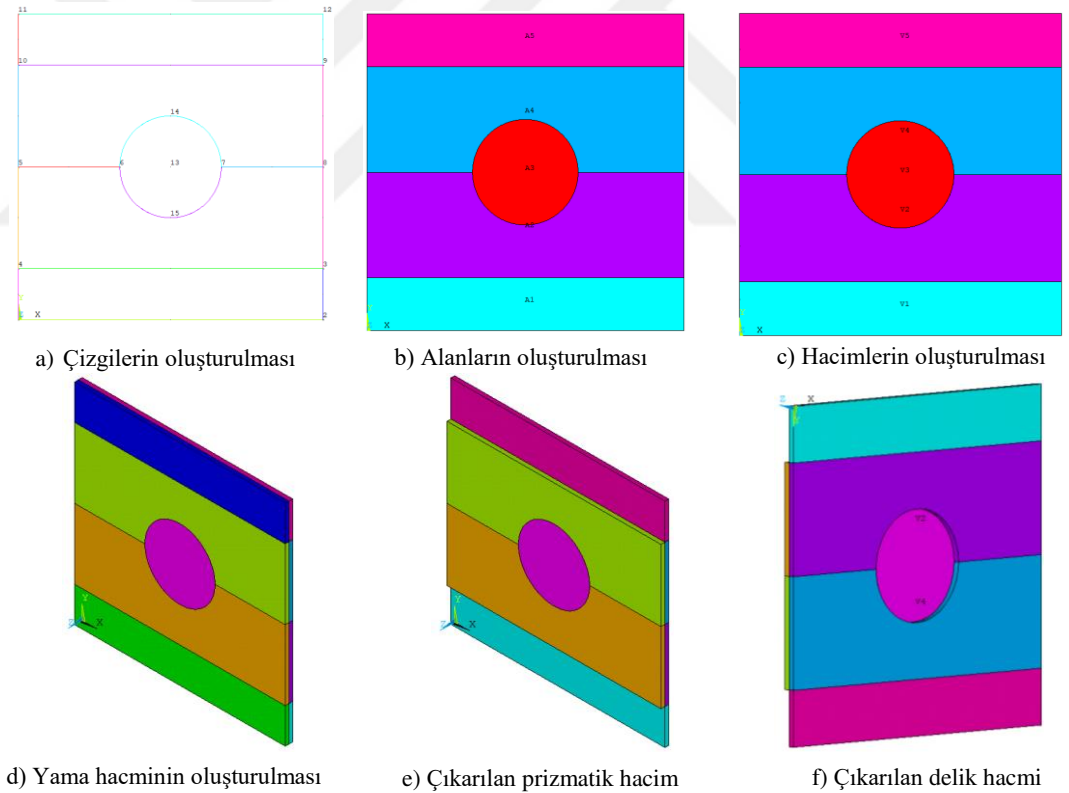
**Şekil 6.27.** Numunelerin deney sonrası burkulma durumlarında önden ve yandan görünüşleri

### 6.3. Sayısal Çalışma

Plakların deneysel burkulma davranışları elde edilmiş ve doğrulamasının yapılabilmesi için sayısal çözümü *ANSYS*'te yapılmıştır.

#### 6.3.1. Modelin Oluşturulması

Deney numunesinin sayısal modeli oluşturulurken öncelikle anahtar noktalar oluşturulmuş daha sonra bu anahtar noktalar birleştirilerek Şekil 6.28a'da görüldüğü gibi çizgiler elde edilmiştir. Bu çizgiler seçilerek Şekil 6.28b'de olduğu gibi beş alan oluşturulmuştur. Bu alanlardan Şekil 6.28c'deki 1.06 kalınlıkta hacim oluşturulmuştur. Oluşan hacmin yüzeyinden tekrar istenilen kalınlıkta yama hacmi Şekil 6.28d' de görüldüğü gibi oluşturulmuştur. Oluşturulan bu ikinci hacimden yamayı oluşturmak için en alt ve en üst hacimden Şekil 6.28e' deki gibi prizmatik hacimler ve Şekil 6.28f' deki gibi delik hacmi çıkarılmıştır.



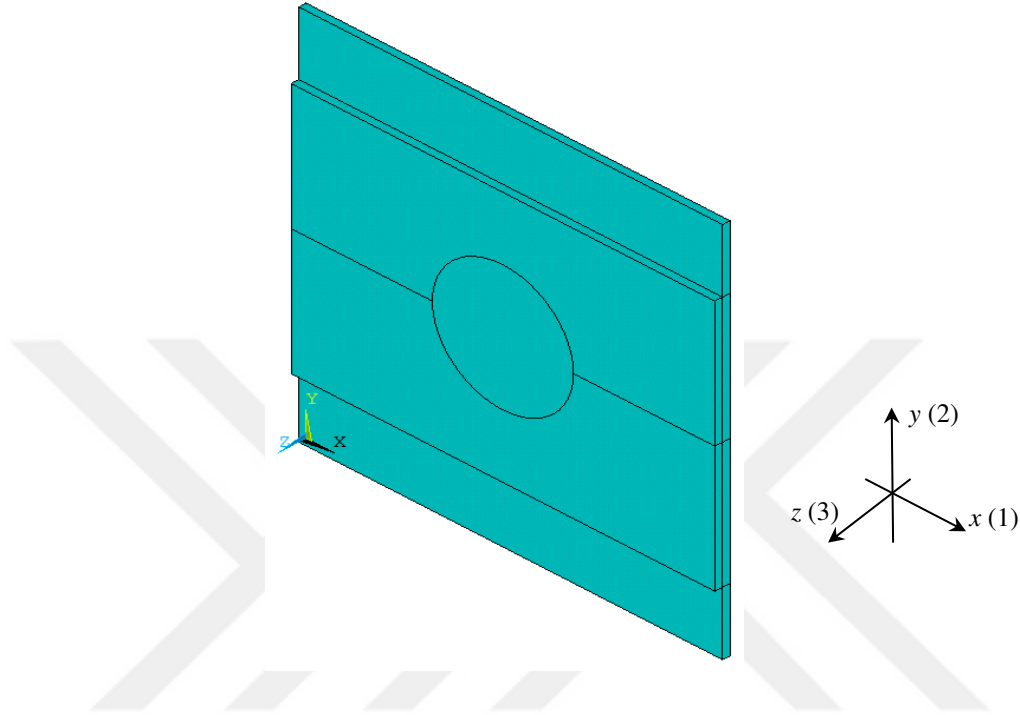
Şekil 6.28. Sayısal modelin oluşturulma adımları

#### 6.3.2. Malzemenin Özelliklerinin Programa Tanıtılması

Plaklar için Tablo 6.4' te verilen yama malzemelerinin mekanik özellikleri programa tanımlanır.

### 6.3.3. Sınır Şartlarının Belirlenmesi

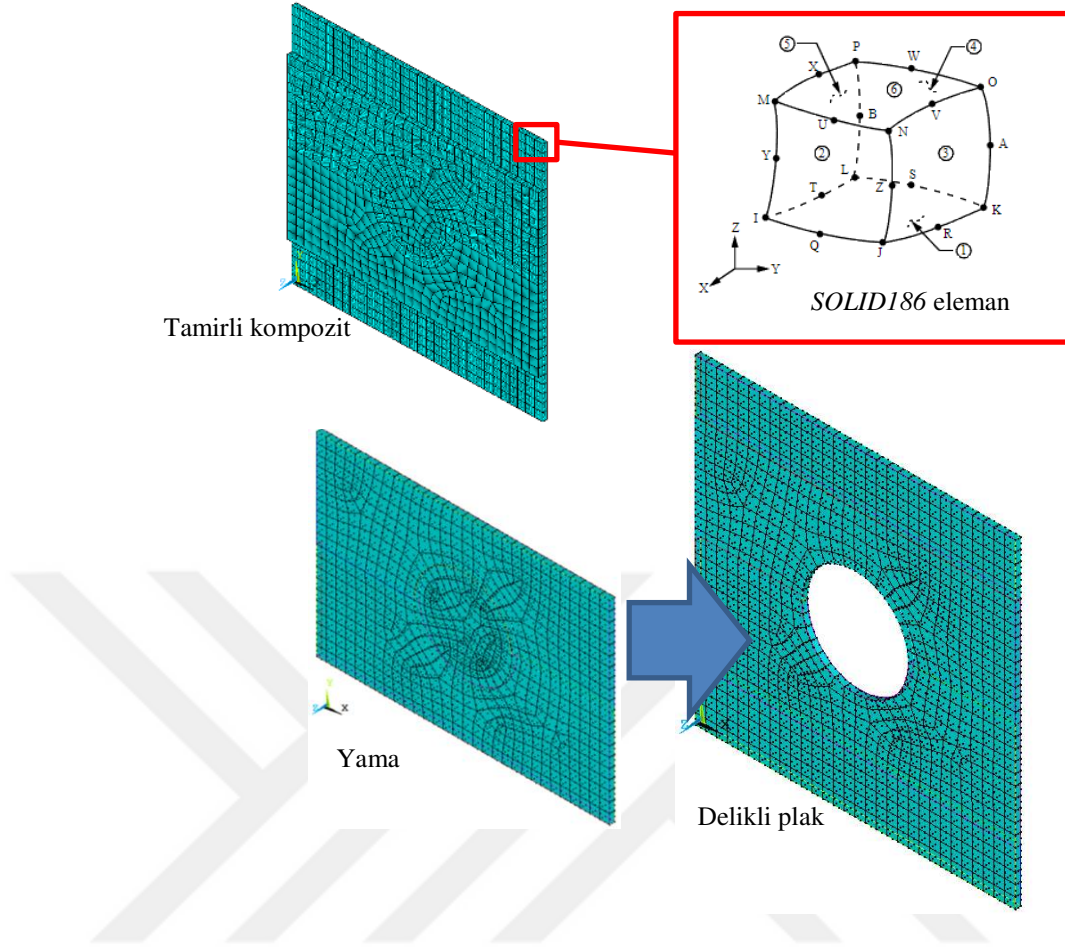
Plak  $x$ - $y$  düzleminde alan olarak modellenmiş ve  $-z$  ekseninde Şekil 6.29’da görüldüğü gibi kalınlık verilerek modellenmiştir.



Şekil 6.29.  $x$ - $y$  düzleminde oluşturulmuş plak

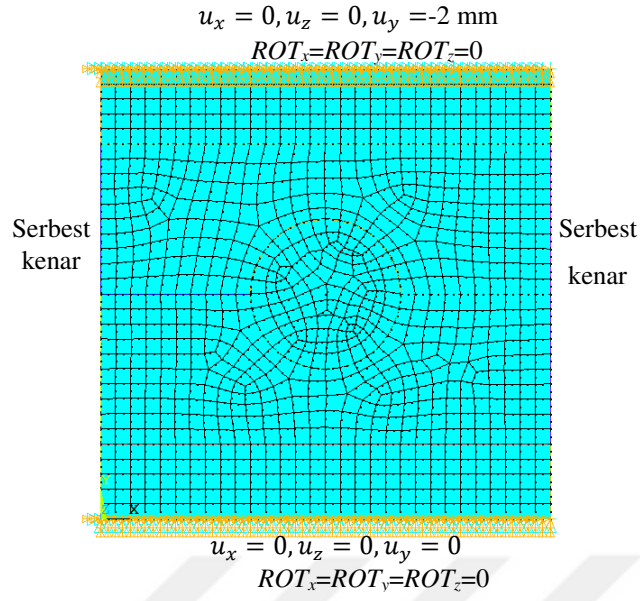
Çalışmada modelleri sonlu elemanlara bölme işleminde tetrahedron *SOLID186* eleman tipi kullanılmıştır (Şekil 6.30). *SOLID186* 20 düğümlü, düzgün dörtyüzlü, katı parçaların modellenmesinde kullanılan, izotropik ve ortotropik malzeme özelliklerinin kullanımına izin veren eleman tipidir [55].

Model oluşturulduktan sonra sonlu elemanlara ayırma işlemi yapılmıştır. Model ortalama 8975 düğüm ve 1428 elemandan oluşmuştur. İdeal eleman sayısı seçimi Bölüm 7’de incelenmiştir. Plak iki ucu serbest iki ucu ankastre olarak modellenmiştir. Plak alt yüzeyinden  $-x$ ,- $y$ ,- $z$  eksenlerin hareketi ( $u_x = 0, u_z = 0, u_y = 0$ ) ve dönmesi sabitlenmiş ( $ROT_x=ROT_y=ROT_z=0$ ) ve üst yüzeyinden  $-x$ ,- $z$  eksenlerinde hareketi ( $u_x = 0, u_z = 0$ ) ve  $-x$ ,- $y$ ,- $z$  eksenlerinde dönmesi ( $ROT_x=ROT_y=ROT_z=0$ ) sabitlenmiştir.



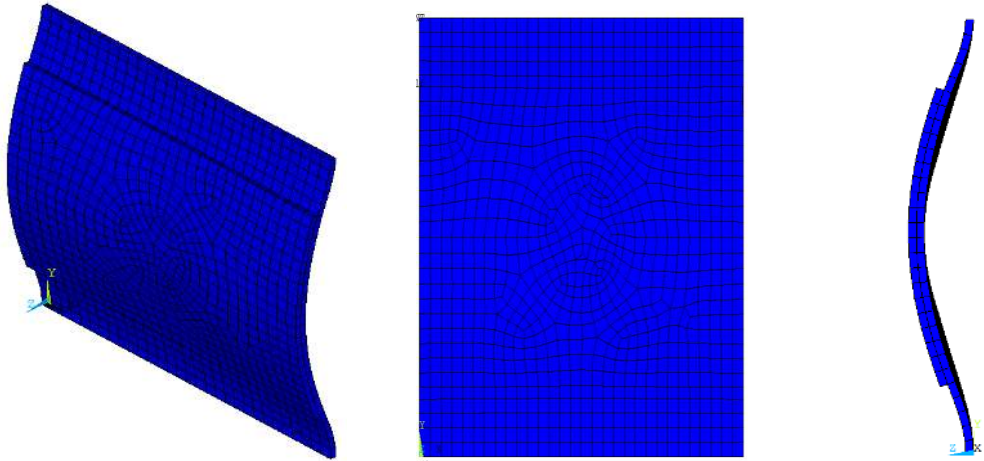
Şekil 6.30. Sonlu elemanlara ayrılan model

Üst yüzeydeki düğüm noktalarından  $u_y = -2$  mm aşağı doğru negatif deplasman verilmiştir (Şekil 6.31).



**Şekil 6.31.** Modelin sınır şartları

Sayısal çözümün sonunda Şekil 6.32’deki gibi burkulma sonrası plakta meydana gelen sehim elde edilmiştir.



a) Burkulma sonrası izometrik görünüş

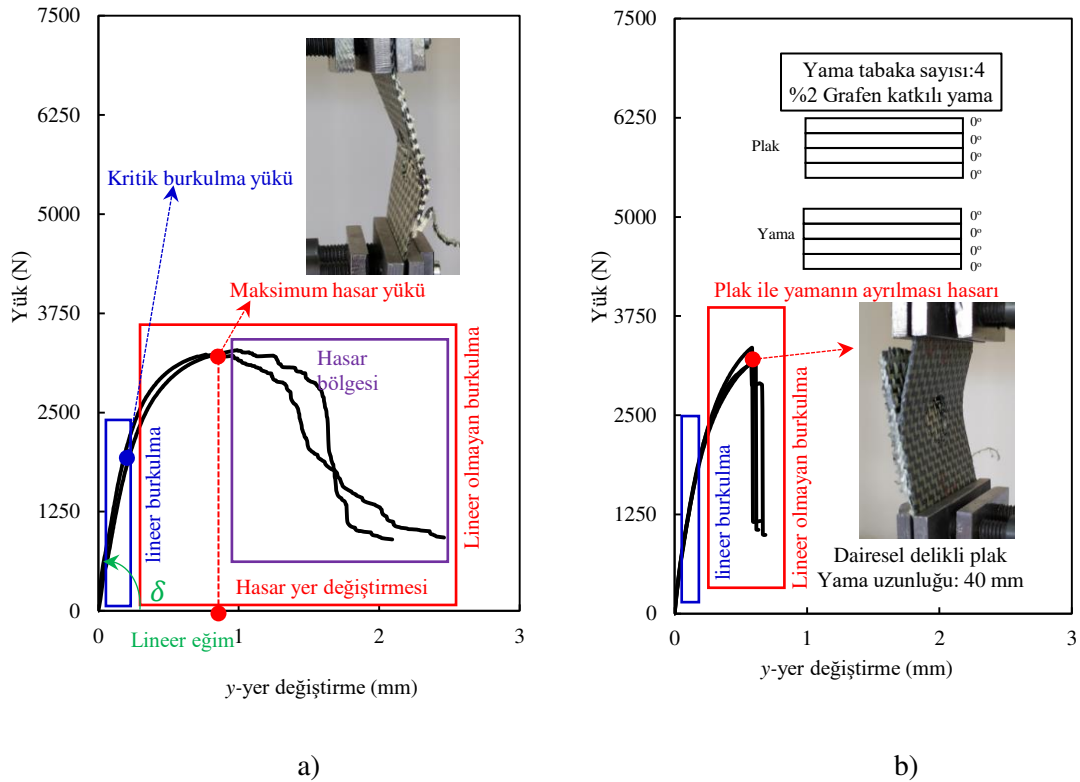
b) Burkulma sonrası ön görünüş

c) Burkulma sonrası yan görünüş

**Şekil 6.32.** Sayısal çalışmada burkulma sonrası durum

## 7. BULGULAR

Çalışmada 1 m<sup>2</sup> boyutunda 4 tabakalı 0° oryantasyon açısına sahip örgülü karbon ve aramid fiberden oluşan hibrid kumaş kullanılarak kompozit plak üretilmiş ve bu plaktan 60x100 mm boyutlarında burkulma deney numuneleri hazırlanmıştır. Numunelere freze tezgâhında 20 mm'lik dairesel delik açılmış ve yine aynı kumaş ile vakum infüzyon yöntemiyle ıslak yama uygulanmış ve burkulma davranışı sayısal ve deneysel olarak incelenmiştir.

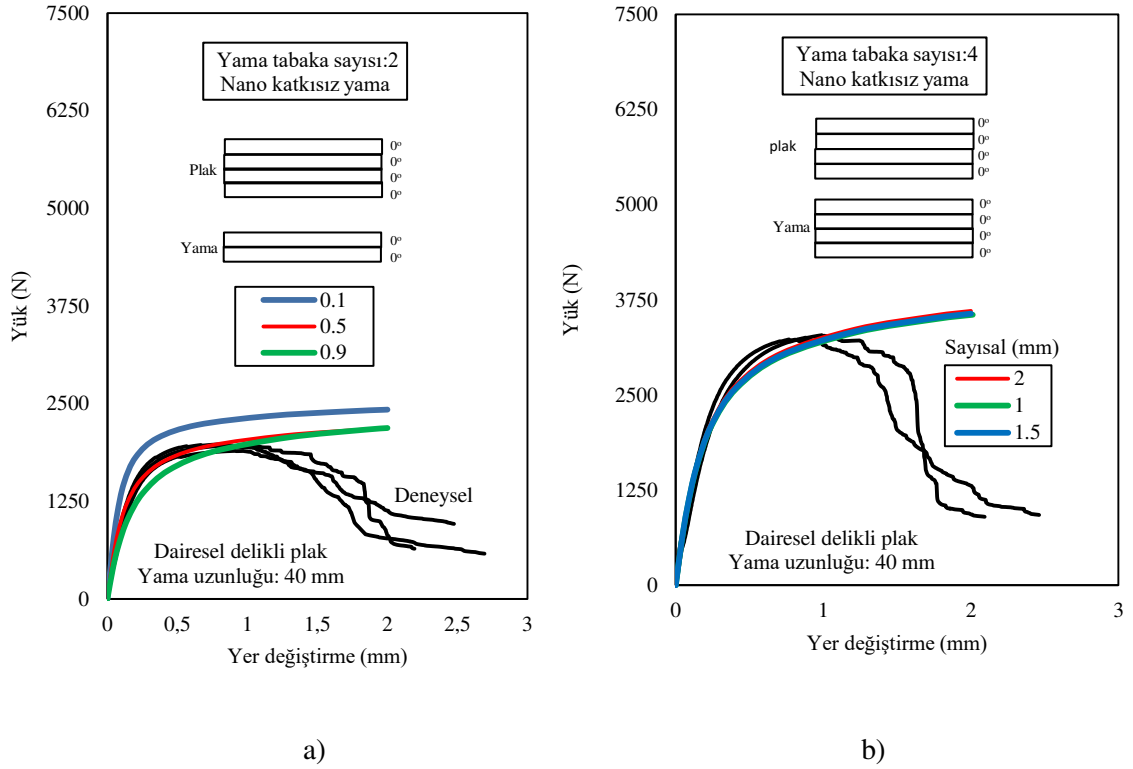


Şekil 7.1. Yamalı kompozit plaklar için tipik burkulma davranışı ve önemli bölgeler; a) Yama ayrılması olmayan numune, b) Yama ayrılması olan numune

Malzemelerin ideal burkulma davranışı Şekil 3.5'te verilmişti. Üretilen kompozitlere ait tipik deneysel burkulma davranışı ise Şekil 7.1a'da görüldüğü gibi elde edilmiştir. Bu tip bir grafik yamalı numuneler için geçerli olup iyi yapışma nedeniyle yamada ayrılma hasarı meydana gelmemiştir. Grafik incelendiğinde burkulma öncesi (lineer burkulma) ve burkulma sonrası (lineer olmayan burkulma) olmak üzere iki önemli bölgenin oluştuğu görülebilir. Ancak çok nadir olarak bazı numunelerde yapışma bölgesinden yama ayrılması meydana gelmiştir. Bu tip numunelere ait yük yer değiştirme grafiği ise Şekil 7.1b'de gösterilmiştir. Maksimum hasar yükü sonrasında ayrılma sonucu yükte ani düşme meydana gelmiştir. Lineer burkulmada kritik burkulma yükü ve yüke karşılık gelen eğim elde edilirken

lineer olmayan burkulmada maksimum yük ve bu yüke karşılık gelen maksimum yer değiştirme elde edilir. Bu sebeple parametrelerin değişimi irdelenirken grafiklerde bu değişimlere yer verilmiştir.

Lineer olmayan analiz yapılırken; lineer analiz için oluşturulan sayısal model programa çağrılır ve modele bir başlangıç sehim verilerek analize devam edilir. Bu sehim programda boyut faktörü (*Scale Factor*, SF) olarak tanımlanır [80]. Burkulma davranışı için sonlu eleman analizlerinde SF ve eleman sayısının değişiminin kuvvet-yer değiştirme grafiğine etkisi Şekil 7.2’de gösterilmiştir. Yapılan sayısal çalışmalarda, deneysel veriler de göz önüne alınarak SF 0.5 olarak seçilmiş ve analizler buna göre yapılmıştır. Sonlu eleman ağı optimizasyonu için yapılan analizlerde ise eleman boyutunun 1 mm ile 2 mm arasındaki değişiminin, sonuçları önemli ölçüde etkilemediği görülmüştür (Şekil 7.2b). Bu nedenle eleman boyutu 2 mm olarak belirlenmiştir.



**Şekil 7.2.** Sonlu elemanlar analizinde yük-yer değiştirme grafikleri; a) Boyut faktörü (SF), b) Eleman boyutunun değişiminin etkisi

Tamir yapılırken burkulma davranışını etkileyen birçok parametre vardır. Bu parametrelerden; çentik tipinin, yama kalınlığının (tabaka sayısı), yama uzunluğunun, plak fiber açısının, plak tabaka diziliminin, yama fiber açısının değişiminin ve yama içerisine nano malzeme (CNT veya grafen) katkısının değişimleri irdelenmiştir.

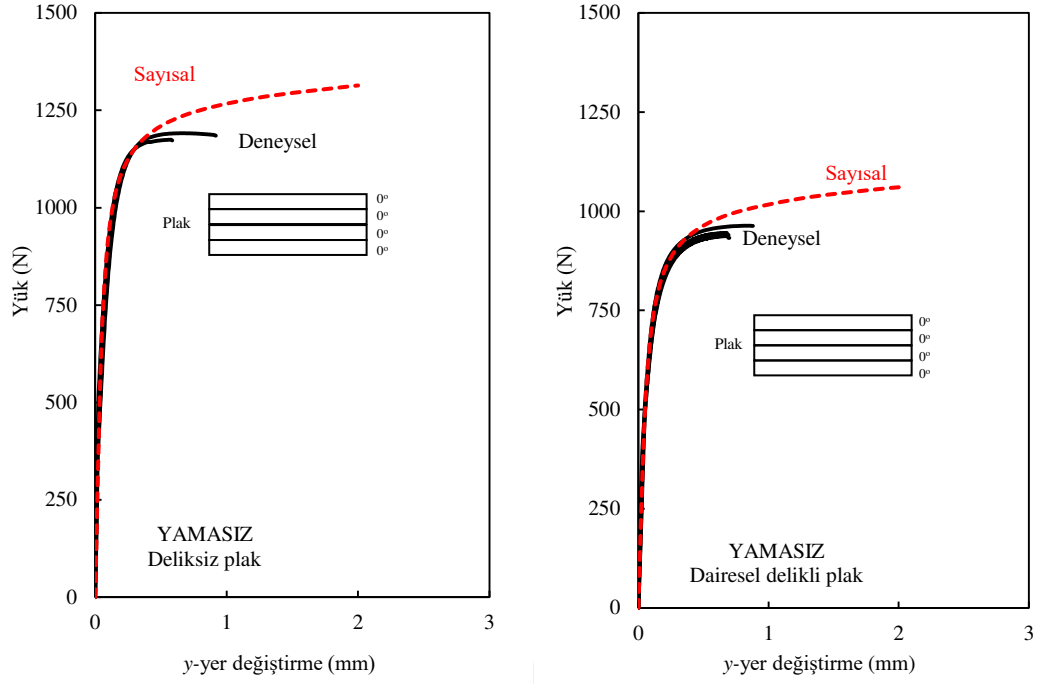
## 7.1. Çentik Tipinin Değişiminin Burkulma Davranışına Etkisi

Plaktaki çentik tipinin değişiminin burkulma davranışına olan etkisini gözlemlemek amacıyla Şekil 6.14’de verilen deliksiz, ortasında dairesel delikli, U tek kenar çentikli ve yarım daire çift kenar çentikli yamasız plaklar için burkulma davranışları araştırılmıştır.

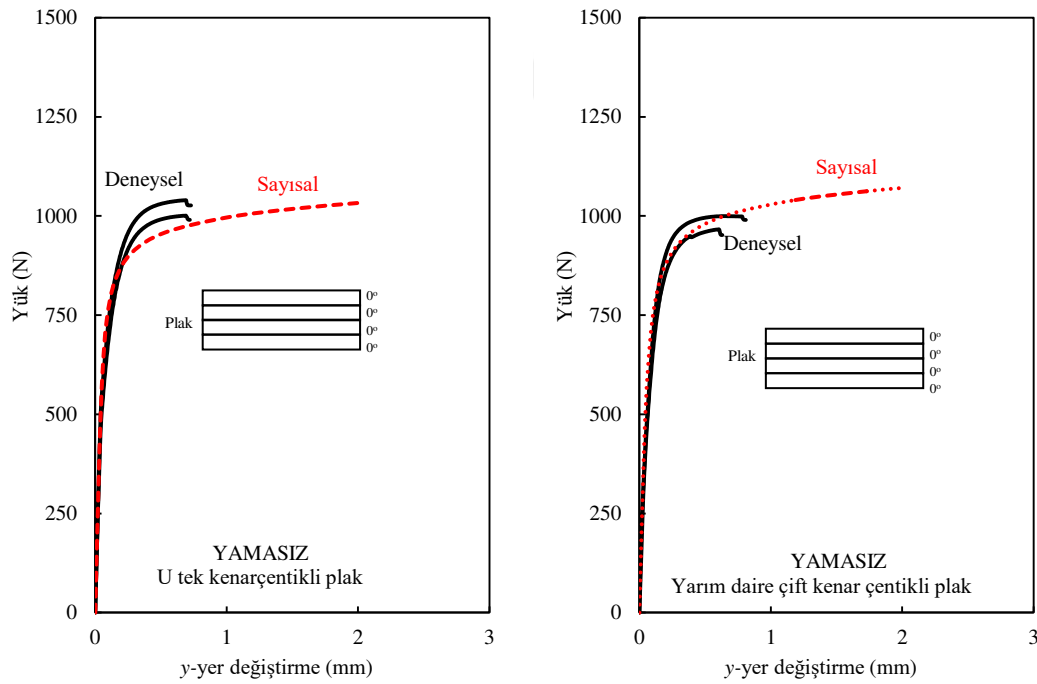
Sayısal çalışma için Tablo 6.4’te kompozit plak için verilen mekanik özellikler kullanılmıştır. Sınır şartları Şekil 6.31’de verilmiştir. Şekil 7.3-7.4’teki grafiklerde dört farklı çentik tipine ait numunelerin -y eksenı boyunca kuvvet-yer değıştirme grafikleri deneysel ve sayısal sonuçlar için verilmiştir. Siyah çizgiler deneysel, kesikli kırmızı çizgiler ise sayısal sonuçları göstermektedir. Deneyler Şekil 7.1’de tanımlandığı gibi maksimum hasar yükü sonrasında malzemede hasar artışına bağılı olarak yük düşüşü ile sonuçlanmaktadır. Sayısal burkulma analizinde hasar davranışı modellenmediğı için maksimum hasar yükünün elde edildiğı deney yüküne kadar (yaklaşık 2 mm plağın -y ekseninde yer değıştirmesi) analiz devam ettirilmiş ve daha sonrasında program sonlandırılmıştır. Bu çalışmada amaç plakların lineer olmayan burkulma davranışını incelemek olduğı için hasar davranış programına eklenmemiştir. Deneysel ve sayısal analizde kuvvet-yer değıştirme grafiklerinin maksimum hasar yüküne kadarki değışimlerinin birbiriyle uyum içinde olduğı görülmüştür (Şekil 7.3 ve Şekil 7.4).

Bu bölümde her bir çentik tipinin burkulma davranışını üzerindeki etkisi incelenmiştir. Şekil 7.3 ve Şekil 7.4’teki grafikler çentik tipinin maksimum burkulma hasar yükü üzerinde anlamlı bir etkisinin olmadığını göstermektedir. Çünkü oluşturulan çentiklerle her bir numune için plak kesitindeki yükü taşıyan net alanlar (Dairesel delikli plak için  $A_{net} = (W - D)t_1$ , U tek kenar çentikli plak için  $A_{net} = (W - f - R)t_1$  ve çift kenar çentikli plak için  $A_{net} = (W - 2R)t_1$ ’dir.) birbirine eşittir. Bu sebeple tamir yapılacak çentik tipi olarak dairesel delikli numuneler seçilmiş ve parametrelerin değışiminin etkisi bu tip plaklar için tekrar edilmiştir.

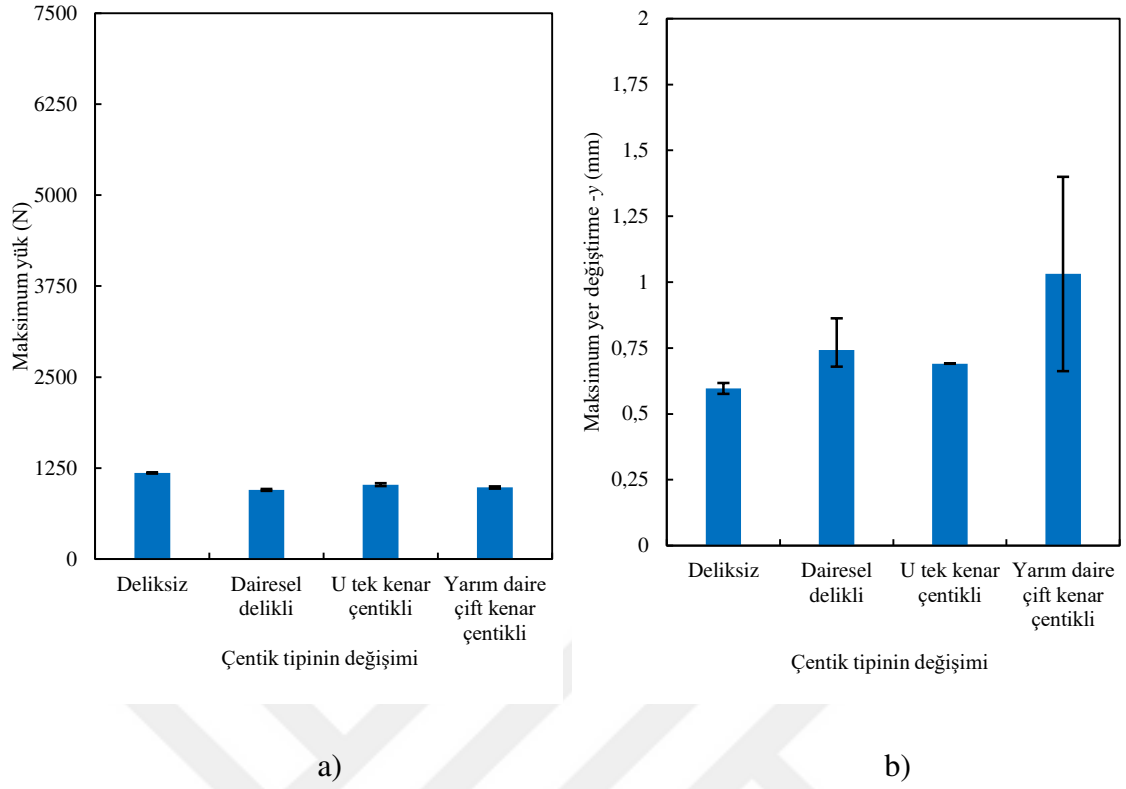
Şekil 7.5’te deliksiz, dairesel delikli, U tek kenar çentikli ve yarım daire çift kenar çentikli plaklar için maksimum yük ve buna karşılık yer değıştirmeler elde edilmiştir. Maksimum yük deliksiz plakta 1183 N iken dairesel deliklide 949 N, U tek kenar çentiklide 1020 N ve yarım daire çift kenar çentiklide 983 N olarak elde edilmiştir. Şekil 7.6’da deliksiz, dairesel delikli, U tek kenar çentikli ve yarım daire çift kenar çentikli plaklar için kritik burkulma yükü ve eğim verilmiştir. Kritik yük deliksiz plakta 1048 N, dairesel deliklide 825 N, U tek kenar çentiklide 907 N ve yarım daire çift kenar çentiklide 877 N olarak elde edilmiş böylece çentik tipinin anlamlı bir etkisi olmadığı görülmüştür. U tek kenar çentikli numune için kritik burkulma yükü sayısal ve deneysel sonuçlar arasındaki fark %1’in altında iken diğerk plaklarda fark %4 civarında elde edilmiştir. Buda sayısal ve deneysel sonuçların uyumlu olduğunu gösterir. Eğimde deliksiz ve U tek kenar çentikli plakta sayısal ve deneysel çözüm arasındaki fark %4’te kalmışken dairesel delikli ve çift kenar yarım daire çentikli numunelerde fark %23 civarında oluşmuştur.



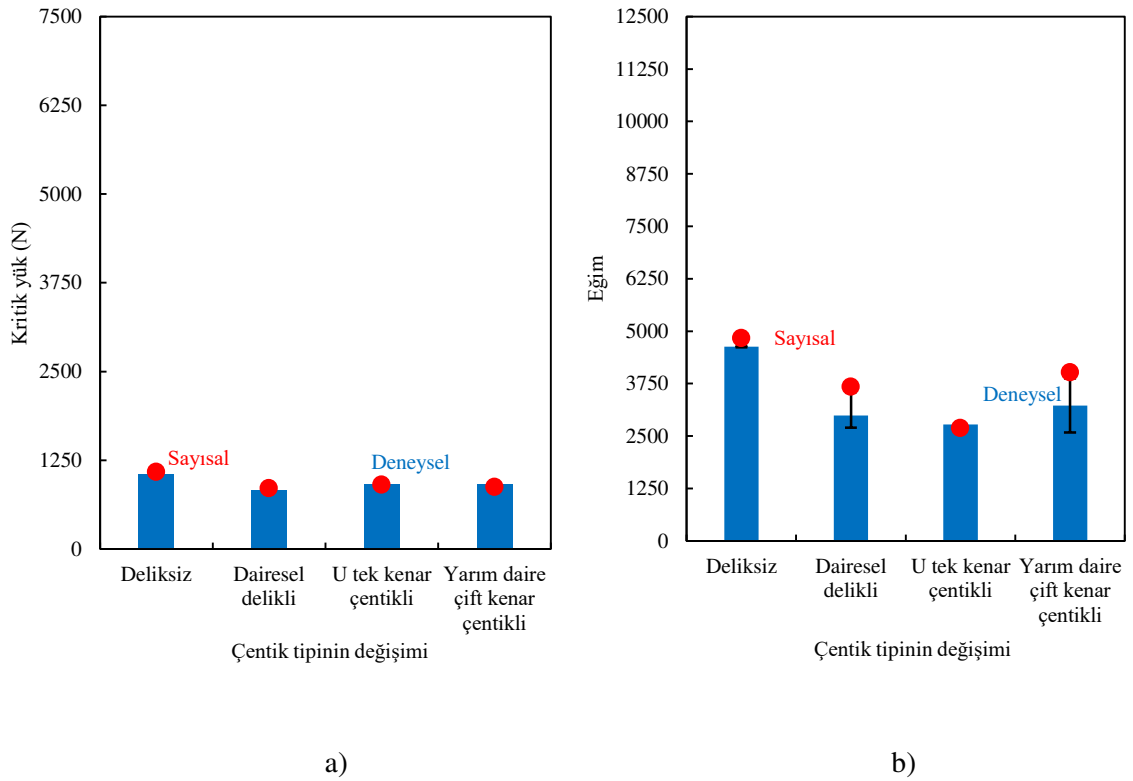
Şekil 7.3. Deliksiz ve dairesel delikli plaklar için sayısal ve deneysel sonuçlara göre -y eksenindeki yük-yer değiştirme grafikleri



Şekil 7.4. U tek kenar ve yarım daire çift kenar çentikli plaklar için sayısal ve deneysel sonuçlara göre -y eksenindeki yük-yer değiştirme grafikleri



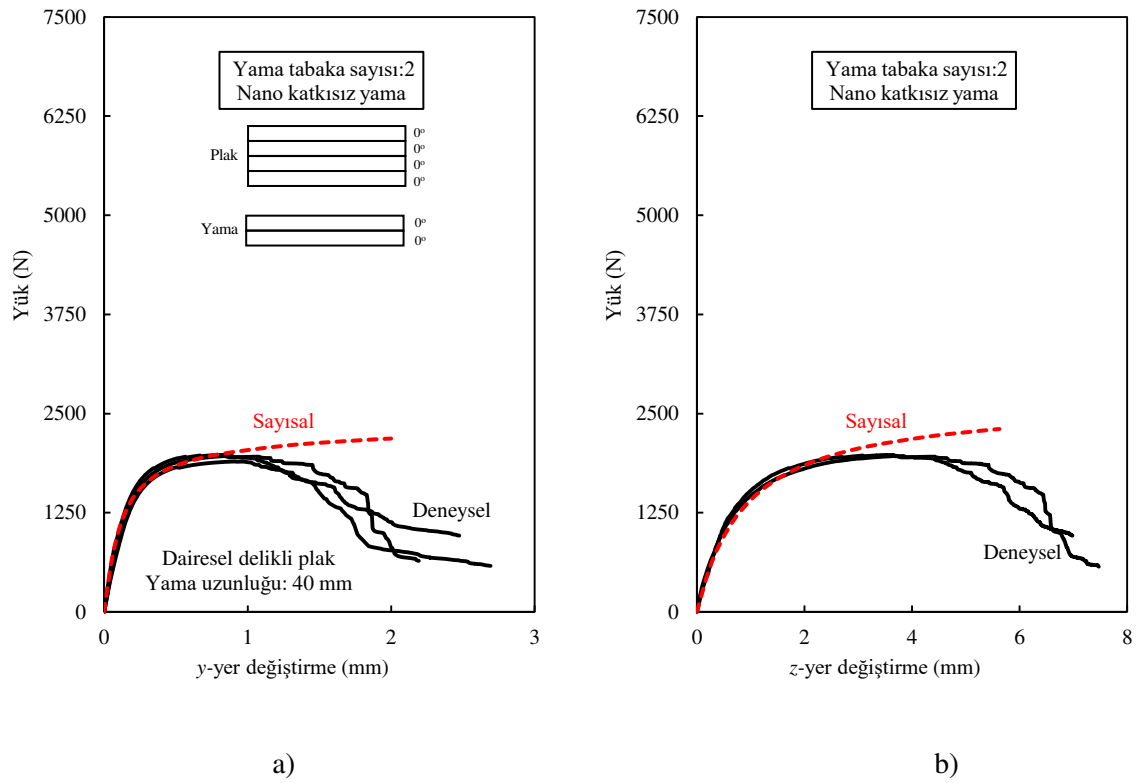
**Şekil 7.5.** Deliksiz, dairesel delikli ve tamirli numune için a) Maksimum yük, b) Maksimum yer değiştirme grafikleri



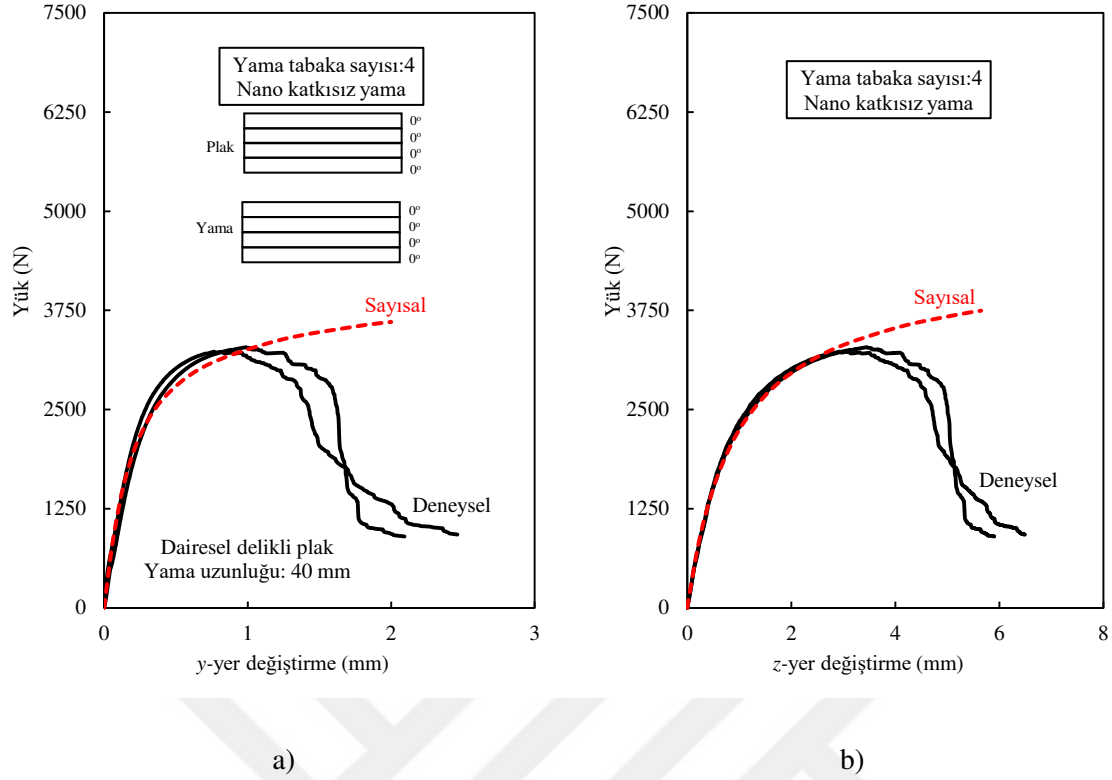
**Şekil 7.6.** Deliksiz, dairesel delikli ve tamirli numune için a) Kritik yük, b) Eğim değişim grafiği

## 7.2. Yama Kalınlığının (Tabaka Sayısı) Değişiminin Burkulma Davranışına Etkisi

Bu başlıkta 60x100 mm boyutunda, Ø20 mm dairesel delikli ve  $[0^\circ]_4$  tabaka dizilimli yamalı plağın yama tabaka sayısı değiştirilerek burkulma davranışı sayısal ve deneysel olarak incelenmiştir. 2, 4 ve 8 tabaka fiber kumaş tabakası ile üretilmiş yamalı plakların burkulma deneyi yapılmıştır. Sayısal çözümde değişken olarak Tablo 6.1’de verilen  $t_2$  değişkeni 2, 4 ve 8 tabaka için yama kalınlıkları dikkate alınarak tanımlanmıştır. Tablo 6.4’de verilen mekanik özelliklerden kompozit plak ve nano-katkısız yama değerleri alınmıştır. Deneylerde elde edilen sonuçlara göre numunelerin -y ve -z eksenindeki yük- yer değiştirme davranışları Şekil 7.7, Şekil 7.8 ve Şekil 7.9’da grafiklerde gösterilmiştir. Yamalarda nano partikül kullanılmamıştır. Hem -y eksenini için hem de -z eksenini için verilen yük-yer değiştirme grafiklerinde sayısal ve deneysel sonuçların uyum içerisinde olduğu görülmüştür. Ayrıca Tablo 7.1’de -z ekseninde ve yz düzleminde sayısal olarak meydana gelen gerilmeler üç boyutlu grafik olarak verilmiştir.

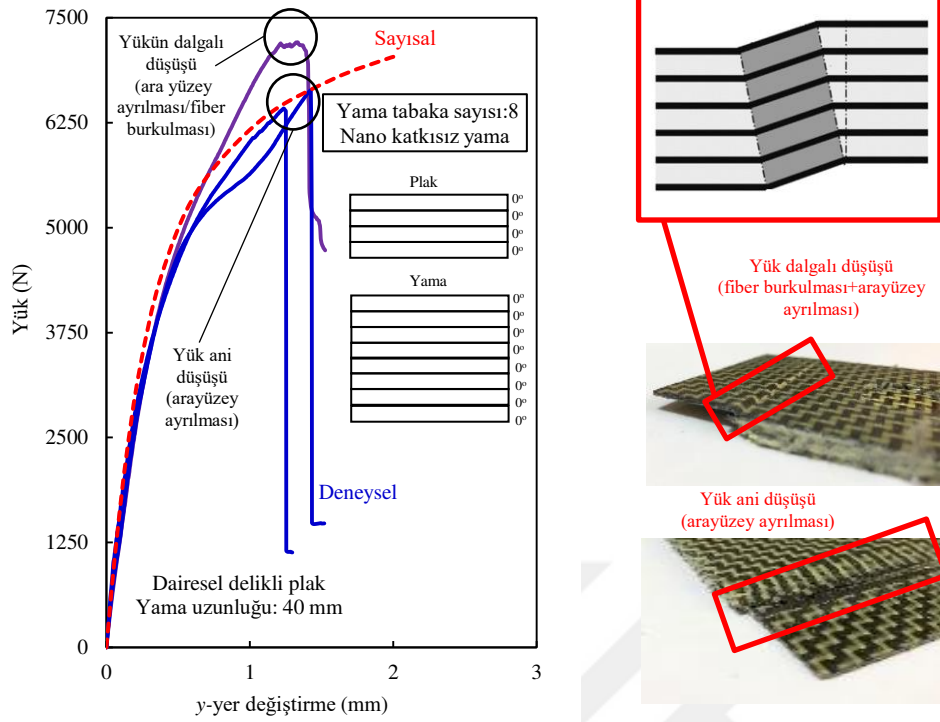


Şekil 7.7. 2 tabaka yama için a) -y eksenindeki yük-yer değiştirme, b) -z eksenindeki yük-yer değiştirme grafikleri



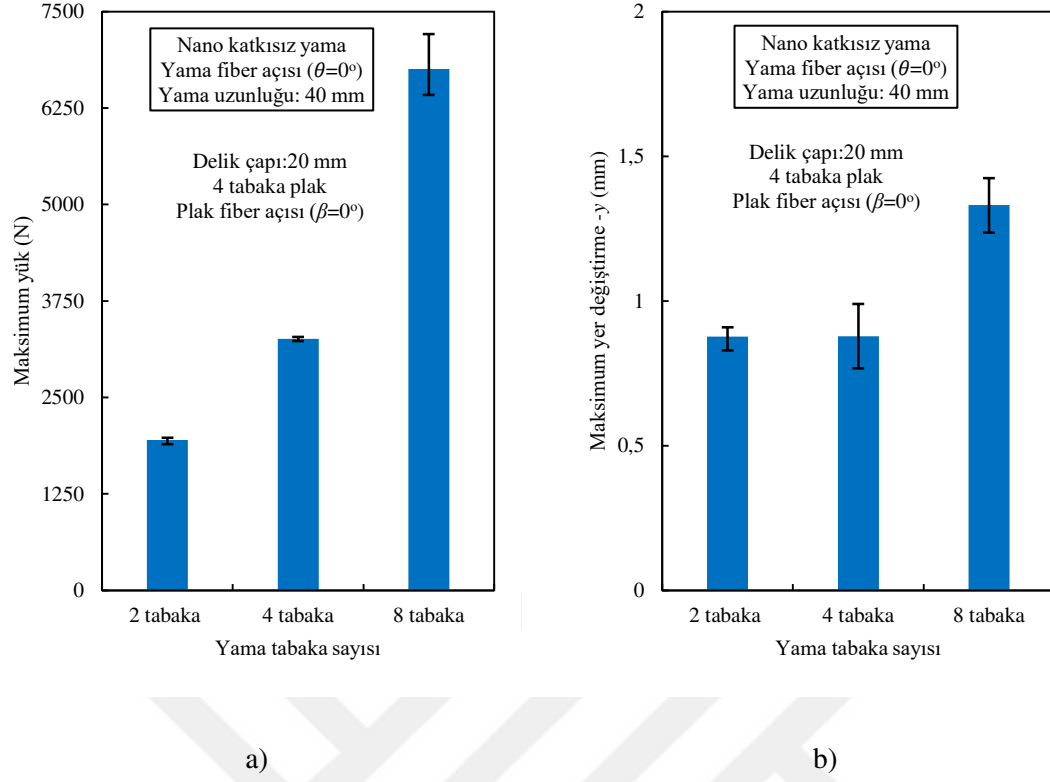
**Şekil 7.8.** 4 tabaka yama için a) -y eksenindeki yük-yer değiştirme, b) -z eksenindeki yük-yer değiştirme grafikleri

Şekil 7.9’da görüldüğü üzere 8 tabaka yamalı numunede burkulma deneylerinde ani kuvvet düşüşü olmuştur. Bu yamada hasar, yapışma ara yüzeyinde ek olarak plak kalınlığına göre çok daha kalın olan yama nedeniyle yamanın bittiği plak sınırında plakta fiber burkulması ile oluşmuştur. Şekil 7.10’da yama tabaka sayısı ile maksimum hasar yükü ve maksimum yer değiştirme arasındaki değişim grafikleri verilmiştir. Tabaka sayısının artışıyla maksimum hasar yükü artmaktadır. En büyük hasar yükü 8 tabakalı yamalı plakta 6755.91 N olarak elde edilirken en küçük hasar yükü 2 tabakalı yamalı numunede 1946.82 N’dir. 2 tabaka yerine 4 tabaka kullanıldığı zaman hasar yükündeki artış %67 iken, 4 tabaka yerine 8 tabaka kullanıldığı zaman hasar yükündeki artış %107’dir. Dolayısıyla 4 tabaka yerine 8 tabaka yama kullanımının daha etkili olduğu görülmektedir. Maksimum hasar yükünün elde edildiği yük değerine karşılık - y eksenindeki yer değiştirme farklı yama tabaka sayıları için değerlendirildiğinde ise (Şekil 7.10b), tabaka sayısının artışıyla da yer değiştirmeyi artırdığı görülmüştür. Maksimum yer değiştirme 2 tabakada 0.87 mm iken 8 tabakada 1.33 mm’dir. Maksimum hasar yüküne benzer olarak; 4 tabaka kullanımı sonrası 2 tabakalı yamalı numuneye göre maksimum yer değiştirmedeki artış %0.2 iken, 8 tabakalı numune kullanımı sonrası 4 tabakalı yamaya göre yer değiştirmedeki artış % 51’dir. Şekil 7.11’de kritik burkulma yükünün ve lineer burkulma bölgesindeki eğimin tabaka sayısı ile değişimi verilmiştir. Tabaka sayısının artışı kritik burkulma yükünü doğrusal olarak artırmaktadır. Bu doğrusal artış eğim değişimi için de vardır ve grafiklerde noktalı siyah çizgiler ile gösterilmiştir.

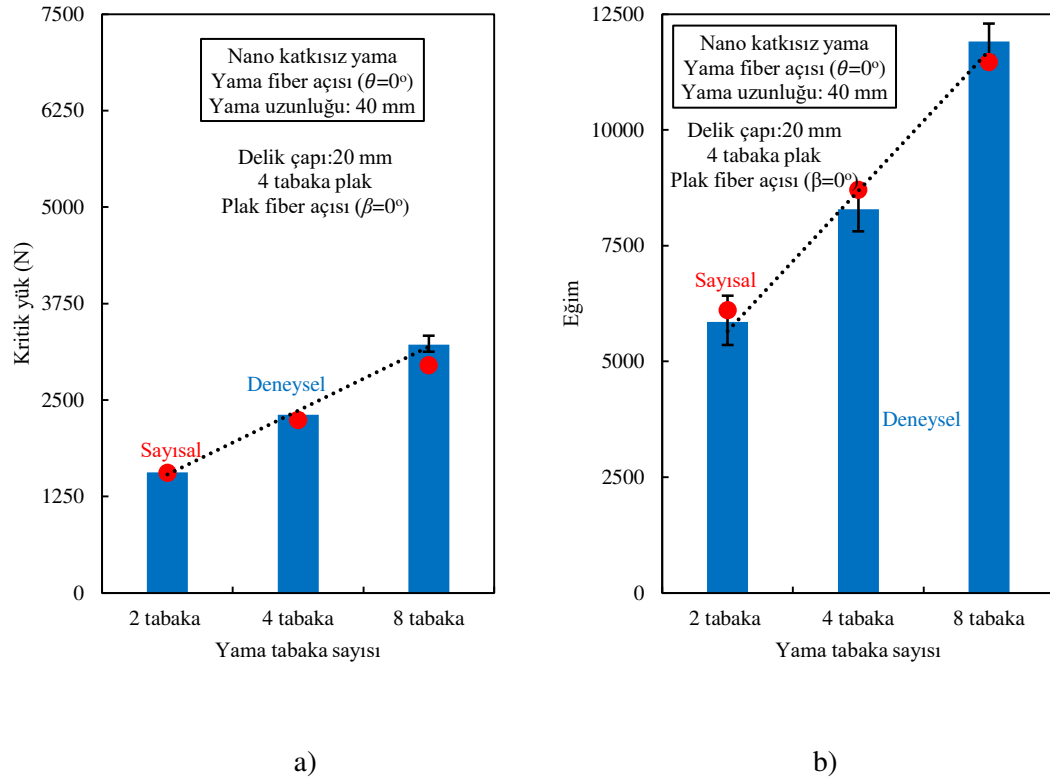


**Şekil 7.9.** 8 tabaka yama için -y eksenindeki yük-yer değiştirme grafiği

Kritik burkulma yükündeki ve eğimdeki artış her tabaka sayısı için ~%40'dır. Numunelerde kritik yük artarken eğimin de artması; yama kalınlığının hem hasar davranışına karşı tepkiyi hem de hasar yükünde oluşan sehimin artırdığını göstermektedir. Şekil 7.11'de aynı zamanda sayısal değerlere de yer verilmiştir. Kritik burkulma yükü için deneysel ve sayısal sonuçlar arasındaki maksimum fark 8 tabakalı numunede %9 iken minimum fark 2 tabakalı numunede %0.25 olarak elde edilmiştir. Bu fark yüzdeleri sayısal sonuçlar ile deney sonuçlarının ile uyum içinde olduğunu göstermiştir.

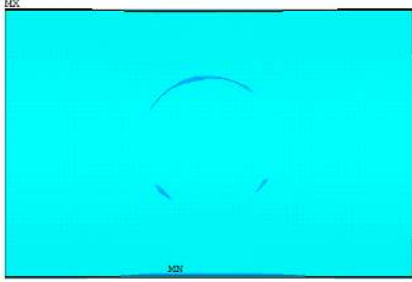
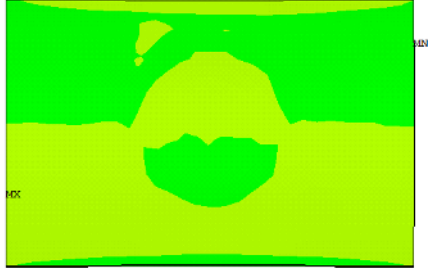
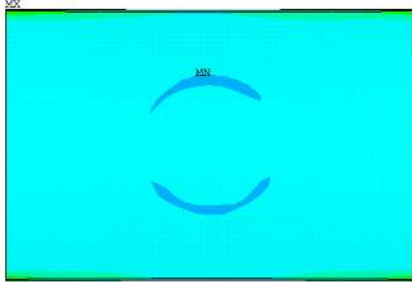
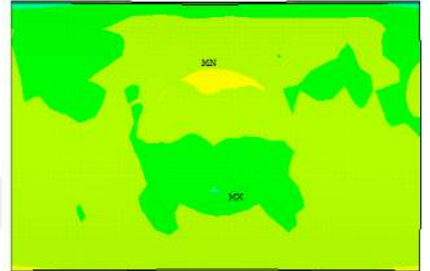
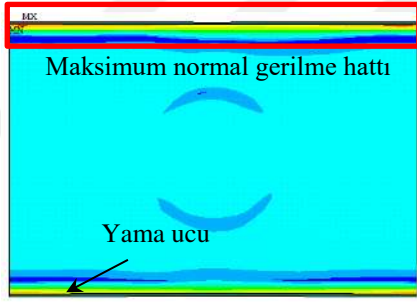
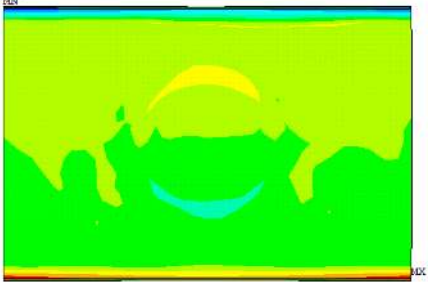


Şekil 7.10. Yama kalınlığının a) Maksimum yük ile değişim, b) Maksimum yer değiştirme ile değişim grafikleri



Şekil 7.11. Yama kalınlığının a) Kritik yük, b) Eğim ile değişim grafikleri

**Tablo 7.1.** Yama kalınlığının değişiminin gerilmelere olan etkisi

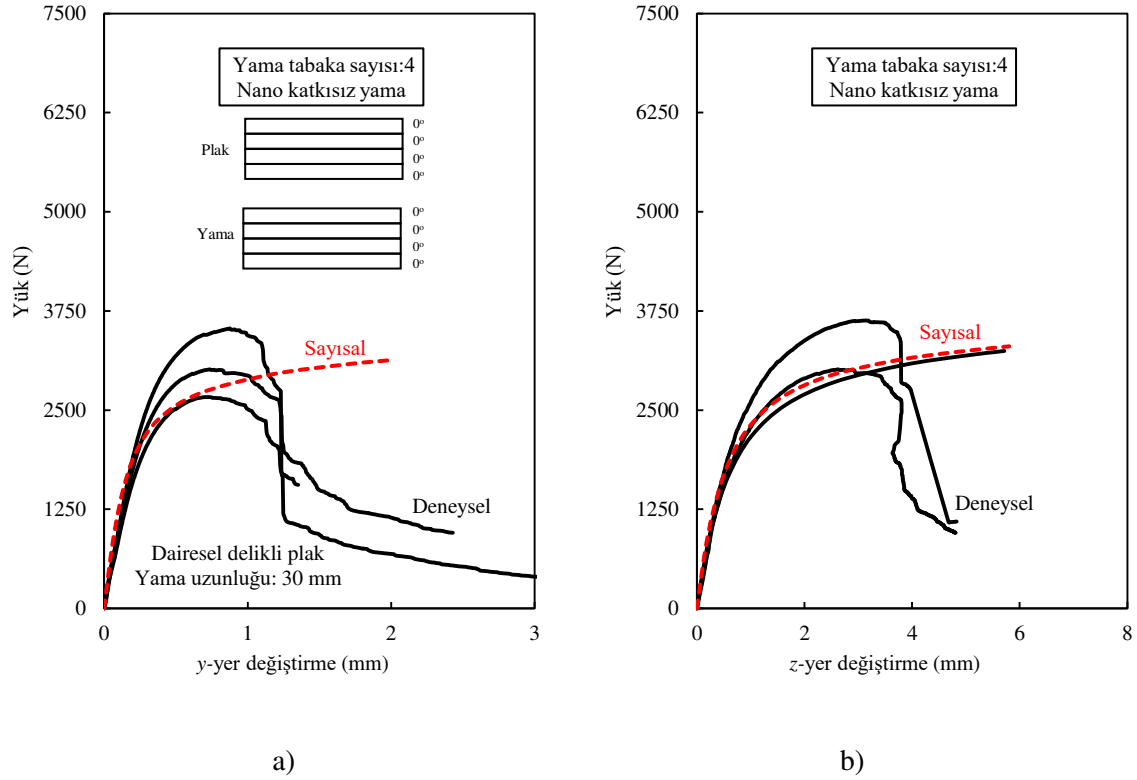
| Tabaka sayısı | $\sigma_z$ (MPa)                                                                    | $\tau_{yz}$ (MPa)                                                                    |
|---------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| 2             |    |    |
| 4             |    |    |
| 8             |  |  |
|               |  |  |

Tablo 7.1’de görüldüğü üzere sayısal çözümde de  $-z$  ekseninde yama ucunda meydana gelen gerilme, 2 tabakalı yama için  $\sim 20$  MPa, 4 tabakalı yama için  $\sim 60$  MPa olarak elde edilmişken 8 tabakalı yama için  $\sim 240$  MPa elde edilmiştir. Yamalı numunelerde burkulma yükünü taşıyan plak ve yamadır. Yama kalınlığı arttıkça, hasar yükü artmakta bu durum ise gerilmeyi artırmaktadır. Plaga göre yama kalınlığı çok fazla olan numunelerde, yama plağa göre daha rijit davranmakta ve hasar plakta fiber burkulmaları ve/veya plağın yamadan ayrılmasına sebep olmaktadır.

### 7.3. Yama Uzunluğunun Değişiminin Burkulma Davranışına Etkisi

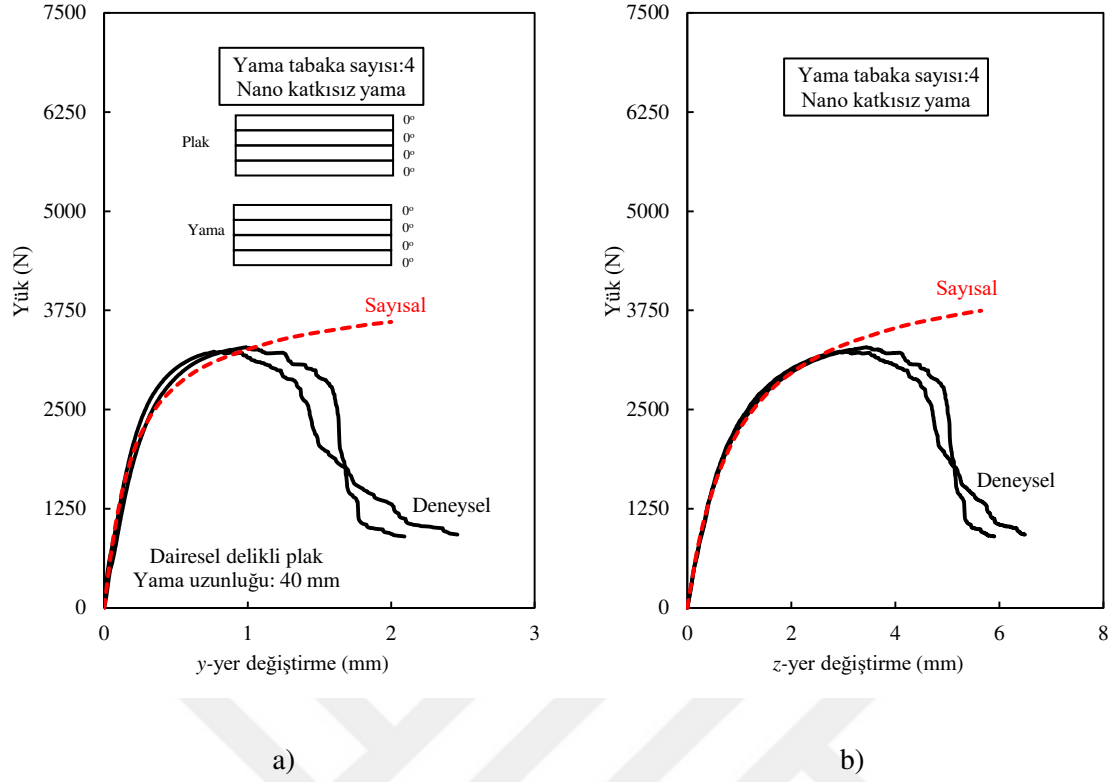
Bu bölümde ortası  $\varnothing 20$  mm delikli yamalı kompozit plağın burkulma deneyi yama uzunluğu değiştirilerek sayısal ve deneysel olarak tekrarlanmıştır. Tablo 6.1’de verilen değişkenlerden yama uzunluğu olan  $l_2$  değişkeni 30, 40 ve 50 mm olarak seçilerek sayısal ve deneysel modele uygulanmış ve

burkulma davranışı incelenmiştir. Tablo 6.4’te kompozit plak ve nano-katkısız yama için verilen mekanik özellikler programda kullanılmıştır. Deneylerde -y ve -z eksenindeki yer değiştirmeler ayrı ayrı elde edilmiş ve Şekil 7.12-7.14 arasındaki grafiklerde gösterilmiştir. Yamaya nano partikül eklenmemiş, yama uzunluğunun burkulma davranışına etkisini incelenmiştir. Yama uzunluğunun değişiminin -z ekseninde ve yz düzleminde oluşan gerilmelere etkisi Tablo 7.2’de verilmiştir.

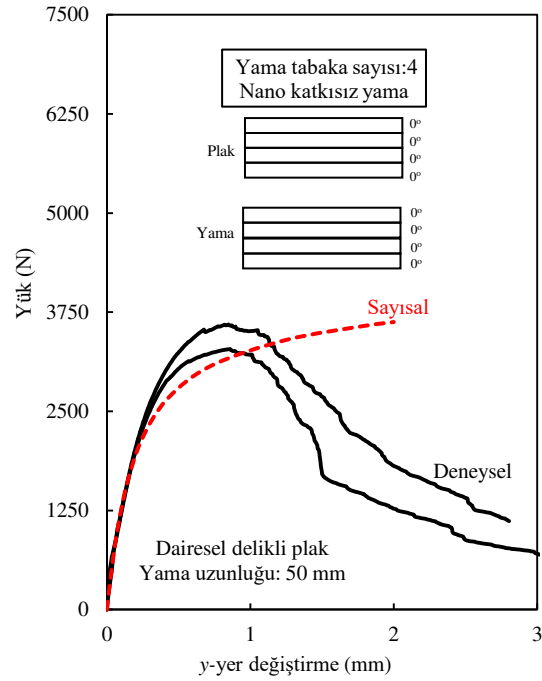


Şekil 7.12. 30 mm yama için a) -y eksenindeki yük-yer değiştirme, b) -z eksenindeki yük-yer değiştirme grafikleri

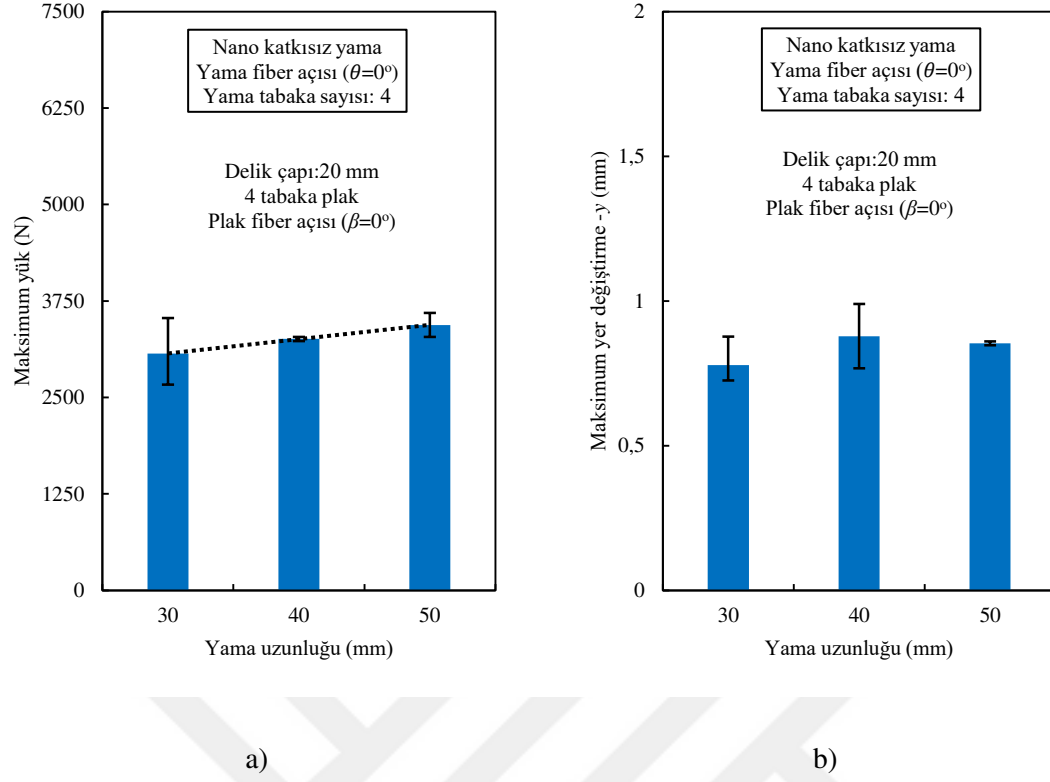
Yama uzunluğunun değişimine göre Şekil 7.12, Şekil 7.13 ve Şekil 7.14’te verilen -y ve -z eksenlerindeki yük yer değiştirme grafiklerinde deneysel ve sayısal sonuçların uyumlu olduğu görülmektedir. Şekil 7.15’te yama uzunluğu ile maksimum yük ve maksimum yer değiştirme değişim grafikleri gösterilmiştir. Yama uzunluğunun artışı kısmi olarak maksimum yükü artırmıştır. Maksimum hasar yükü 30 mm yama için 3069.23 N iken 50 mm yama için 3439.63 N elde edilmiştir. 40 mm yama uzunluğu için maksimum hasar yükü 3258.66 N olarak elde edilmiştir. Dolayısıyla 30 mm yerine 40 mm yama uzunluğu, 40 mm yerine 50 mm yama uzunluğu kullanmak maksimum hasar yükünü aynı oranda artırmıştır. Maksimum hasar yükü, yama tabaka uzunluğundaki artışla beraber doğrusal olarak %6 oranında artmıştır ve bu artış kesikli siyah çizgi ile Şekil 7.15a’da gösterilmiştir.



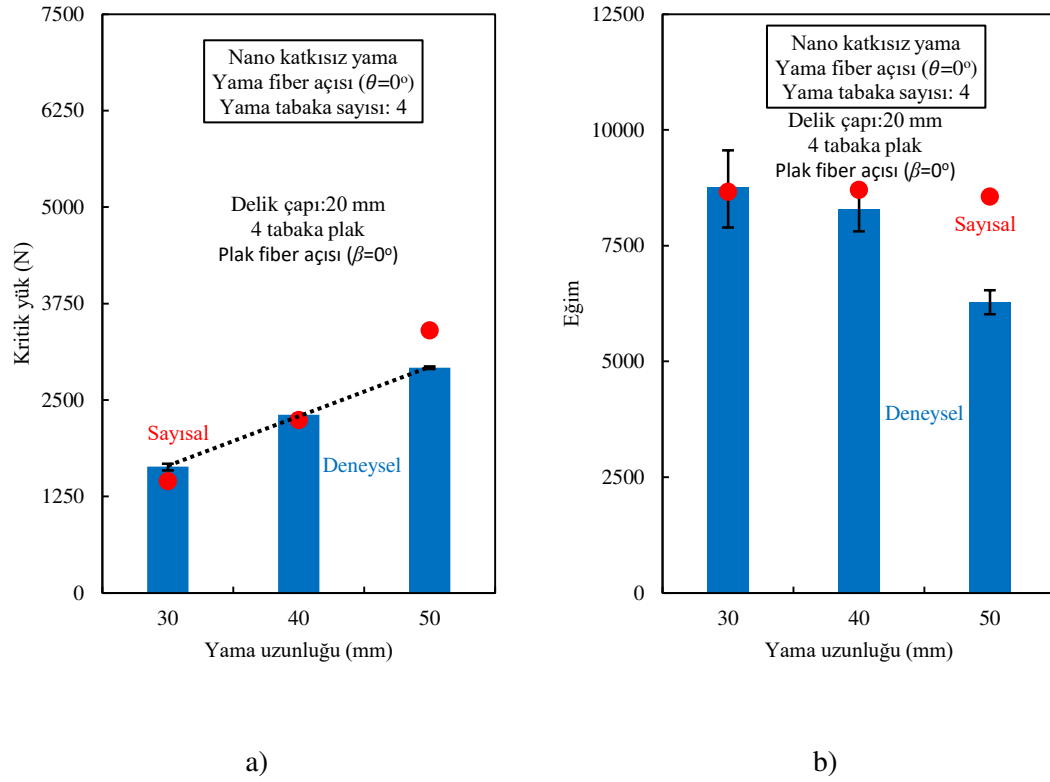
Şekil 7.13. 40 mm yama için a) -y eksenindeki yük-yer değiştirme, b) -z eksenindeki yük-yer değiştirme grafikleri



Şekil 7.14. 50 mm yama için -y eksenindeki yük-yer değiştirme grafiği

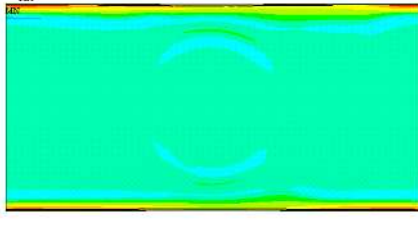
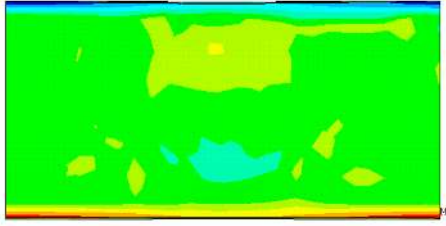
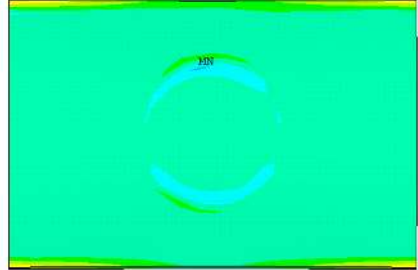
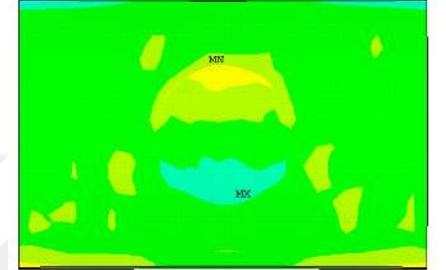
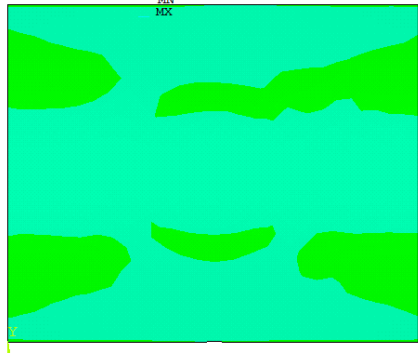
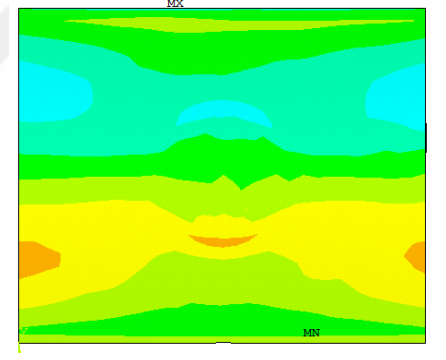
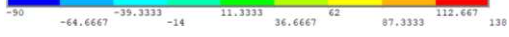


Şekil 7.15. Yama uzunluğunun a) Maksimum yük ile değişim, b) Maksimum yer değiştirme ile değişim grafikleri



Şekil 7.16. Yama uzunluğunun a) Kritik yük, b) Eğim grafikleri

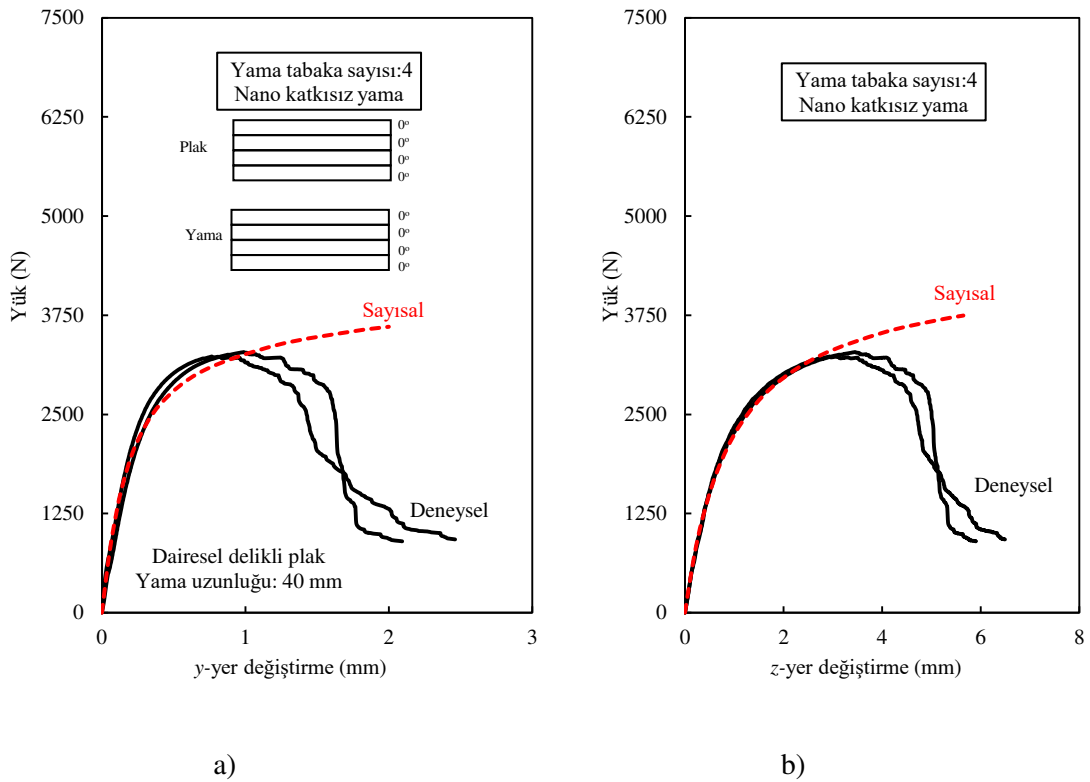
**Tablo 7.2.** Yama uzunluğunun değişiminin gerilmelere olan etkisi

| Yama uzunluğu | $\sigma_z$ (MPa)                                                                    | $\tau_{yz}$ (MPa)                                                                    |
|---------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| 30 mm         |    |    |
| 40 mm         |    |    |
| 50 mm         |  |  |
|               |  |  |

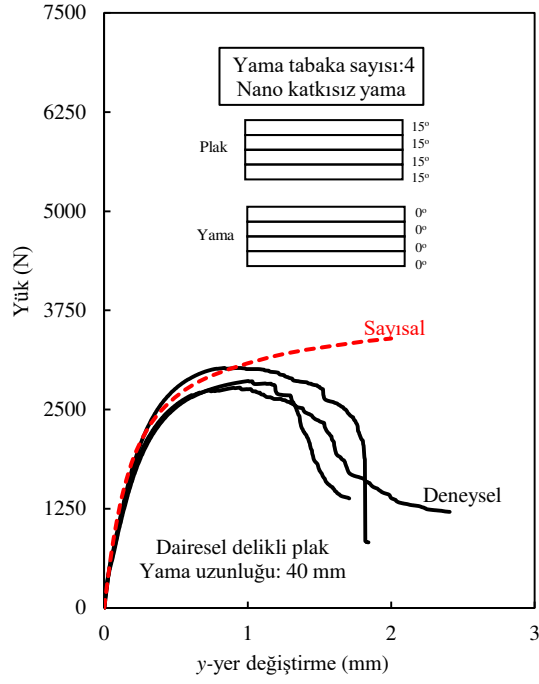
Hasar yükündeki bu doğrusal artış maksimum yer değiştirmede oluşmamıştır. Maksimum yer değiştirme 30 mm yama için 0.77 mm ve 40 mm yama için 0.87 mm olarak gerçekleşmişken 50 mm yama için 0.85 mm olarak elde edilmiştir. Şekil 7.16'da kritik burkulma yükü ve lineer burkulma bölgesindeki eğimin yama uzunluğu ile değişimi verilmiştir. Maksimum hasar yükünde oluşan lineer artış kritik burkulma yükünde de oluşmuştur. Eğimde ise düşüş meydana gelmiştir. Kritik burkulma yükünde deneysel ve sayısal sonuçlar arasındaki fark 50 mm yama için %16, 40 mm yama için %3 ve 30 mm yama için %13 olarak elde edilmiştir. Tablo 7.2'de verilen grafiklerde normal gerilmelerin yama uzunluğunun artmasına bağlı olarak düştüğü görülmektedir. Yama uzunluğunun artmasıyla birlikte yama ve plak birlikte çalışmak isteyecek ve gerilmeler düşecektir. Ancak yama uzunluğu azaldığında burkulmaya karşı direnç artacağından gerileme yükselecektir.

#### 7.4. Plak Fiber Açısının Değişiminin Burkulma Davranışına Etkisi

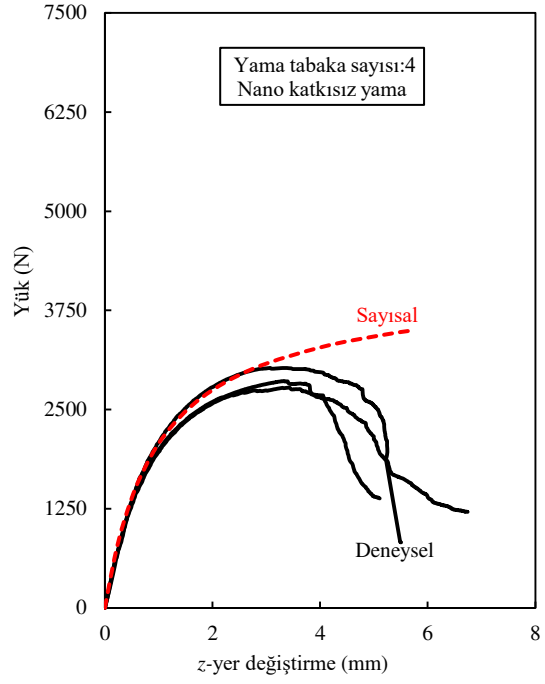
Bu aşamada ortasında dairesel delik bulunan yamalı numunede plak fiber açısının değişiminin burkulma davranışına etkisini incelemek için Tablo 6.1’de verilen değişkenlerden yalnızca  $\beta$  plak fiber açısı değiştirilmiştir. Yamada nano partikül kullanılmamıştır. Plak fiber açısı  $\beta = 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ$  ve  $45^\circ$ ’dir. Deneysel ve sayısal sonuçlara göre yük- yer değiştirme değişim grafikleri Şekil 7.17-20’de verilmiştir. Şekil 7.17-20’de deneysel ve sayısal sonuçlar için çizilen grafiklerin birbirleri ile uyum içerisinde olduğu görülmektedir.



Şekil 7.17. 0° plak fiber açısı için a) -y eksenindeki yük-yer değiştirme, b) -z eksenindeki yük-yer değiştirme grafikleri

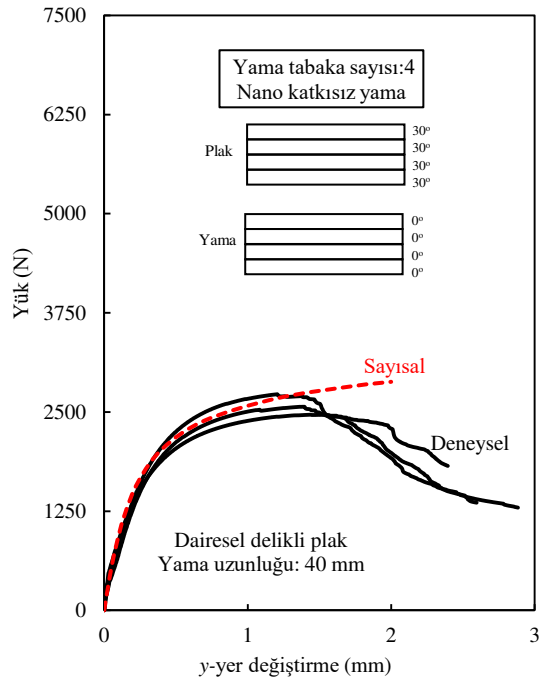


a)

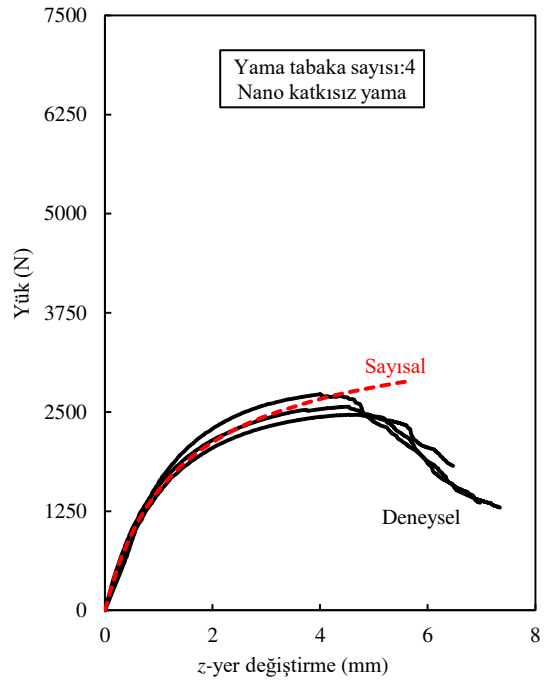


b)

**Şekil 7.18.** 15° plak fiber açısı için a) -y eksenindeki yük- yer değiştirme, b) -z eksenindeki yük- yer değiştirme grafikleri

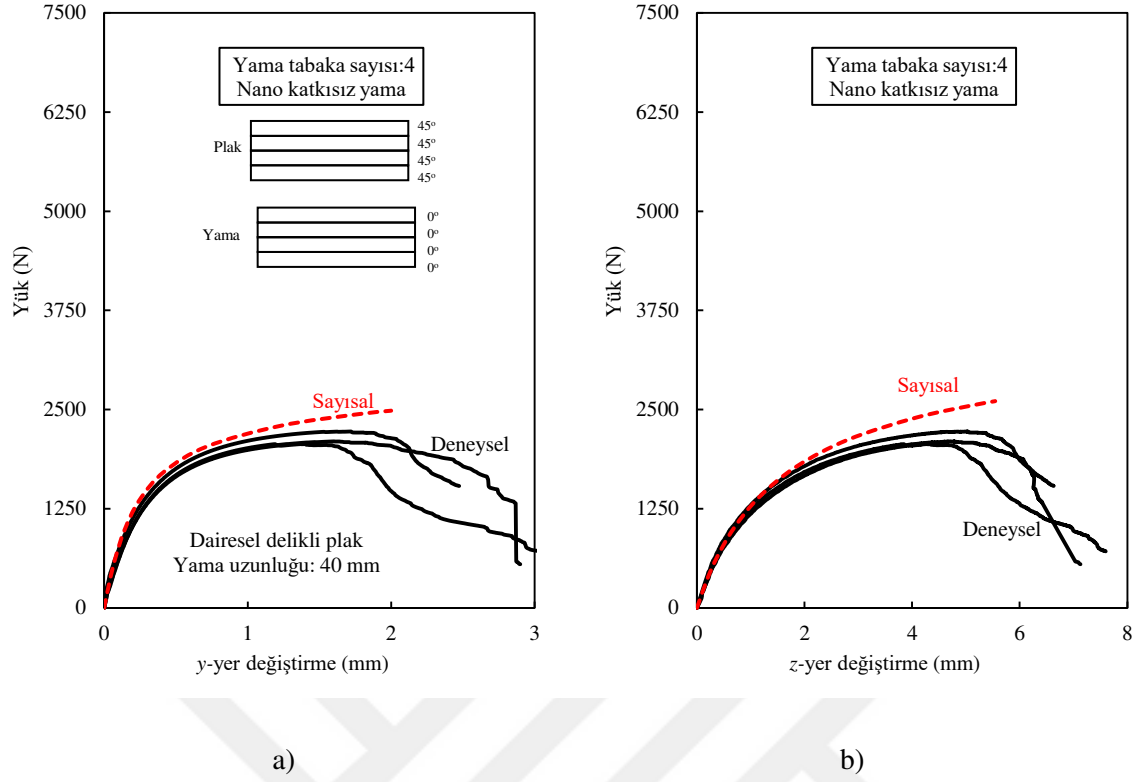


a)

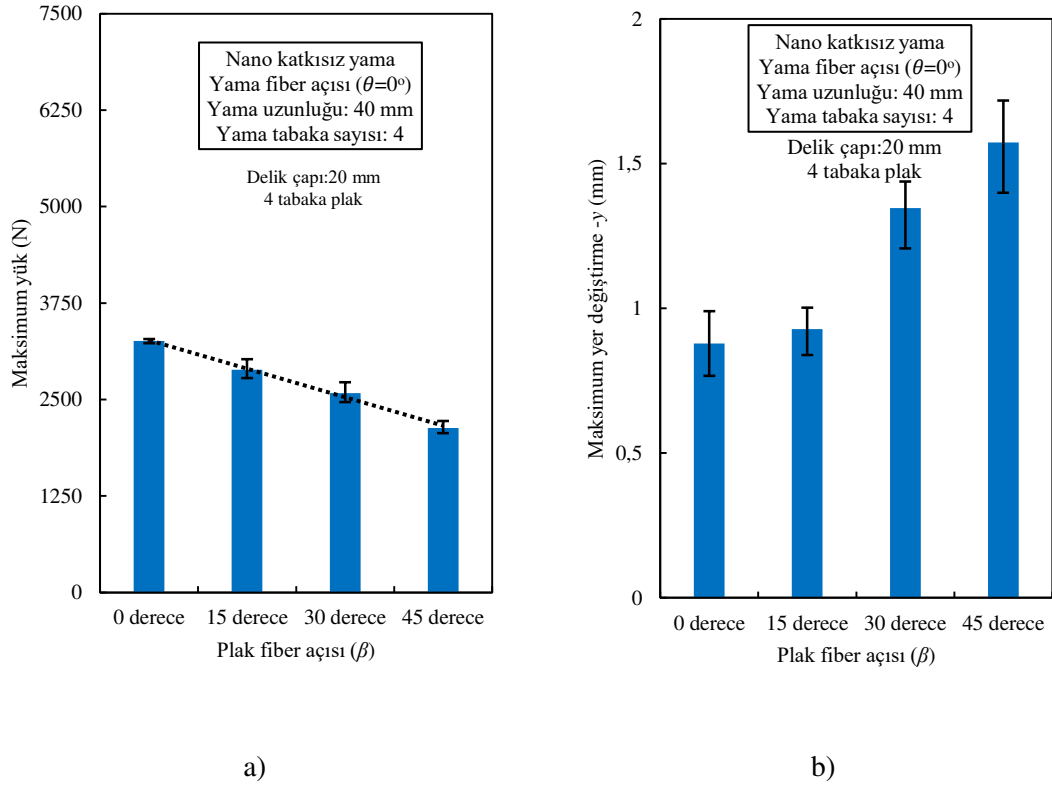


b)

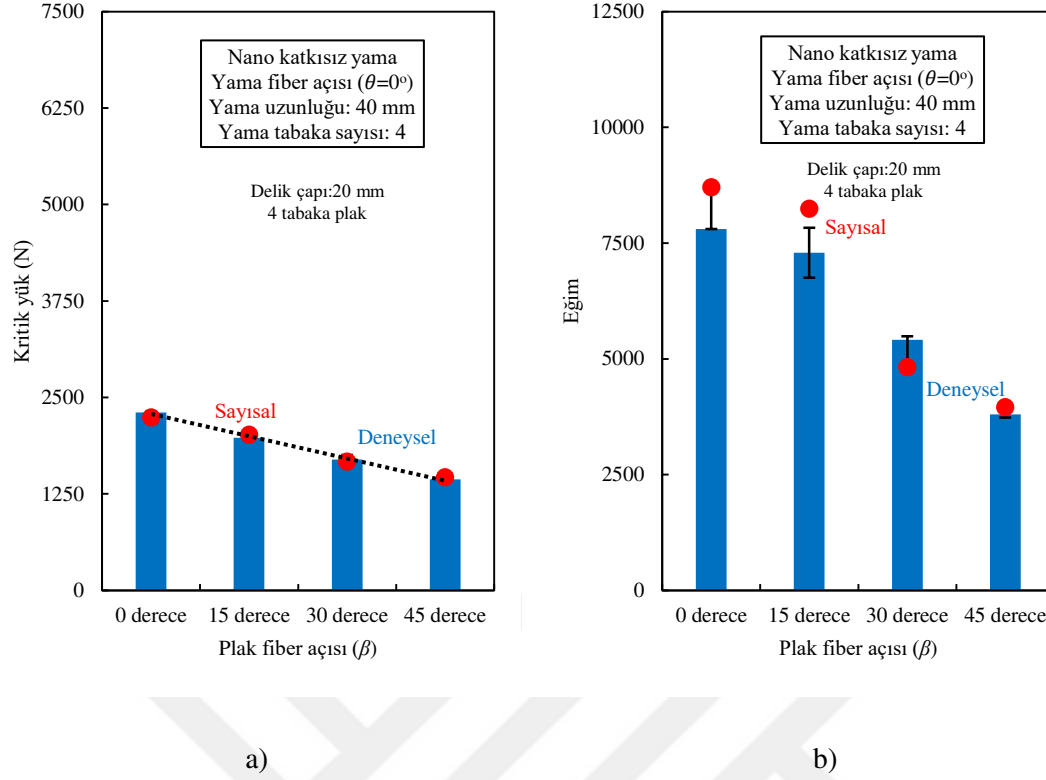
**Şekil 7.19.** 30° plak fiber açısı için a) -y eksenindeki yük- yer değiştirme, b) -z eksenindeki yük- yer değiştirme grafikleri



Şekil 7.20. 45° plak fiber açısı için a) -y eksenindeki yük-yer değiştirme, b) -z eksenindeki yük-yer değiştirme grafikleri



Şekil 7.21. Plak fiber açısının a) Maksimum yük ile değişim, b) Maksimum yer değiştirme ile değişim grafikleri



Şekil 7.22. Plak fiber açısının a) Kritik yük, b) Eğim ile değişim grafikleri

Maksimum yük Şekil 7.21’de plak fiber açısı 0°’den 45°’ye doğru lineer olarak %11 azalmıştır. En büyük maksimum hasar yükü 0°’de 3258.65 N iken en küçük ortalama maksimum hasar yükü 45°’de 2129.25 N dur. Şekil 7.21b’de maksimum yer değiştirme, maksimum hasar yükünün aksine artmıştır. Maksimum yer değiştirme 0° plak fiber açısı için 0.87 mm iken 45° plak fiber açısı için 1.57 mm olarak elde edilmiştir. Plak fiber açısı 0°’den 15°’ye çıktığında ortalama maksimum yer değiştirme %6 artarken 30°’den 45°’ye çıktığında %16 artmıştır. Plak fiber açısı arttıkça bu yükleme doğrultusunda plağın yük taşıma kapasitesi düşmüştür. Dolayısıyla kompozit plağın kullanıldığı yerde maruz kalacağı kuvvet dikkate alındığında, kuvvet doğrultusundaki fiber dizilimine sahip plak kullanımının burkulmaya karşı daha etkili olacağı görülmüştür. Şekil 7.22’de plak fiber açısının değişiminin kritik burkulma yüküne ve eğime olan etkisi gösterilmiştir. Plak fiber açısının artması maksimum hasar yükünü lineer olarak %11(Şekil 7.21) oranında, kritik burkulma yükünü ise %14 azaltmıştır(Şekil 7.22). Şekil 7.22b’ de ise plak fiber açısının artmasıyla eğim azalmıştır. Plak fiber açısının artmasıyla eğim azalması belirginleşmiştir. Plak fiber açısı 0°’den 15°’ye çıktığında lineer burkulma bölgesinde bulunan eğimdeki azalma %6 iken 30°’den 45°’ye çıktığında bu azalma %29 olmuştur. Tablo 7.3’de fiber açısının artışına bağlı olarak yama yüzeyindeki gerilme dağılımı artışı özellikle kayma gerilmelerinde görülmektedir. Dolayısıyla kayma gerilmelerinde fiber açılarının değişiminin etkili olduğu söylenebilir. Plaktaki fiber açısının artmasıyla birlikte plağın yük taşıma kabiliyeti azalmaktadır. Bu durum ise burkulma yükünün

yama tarafından taşınmasını zorunlu kılmaktadır. Dolayısıyla plaktaki fiber açısının artması yamada ki kayma gerilmesi yoğunluğunu azaltarak yama üzerindeki dağılımını kısmi olarak artırmıştır.

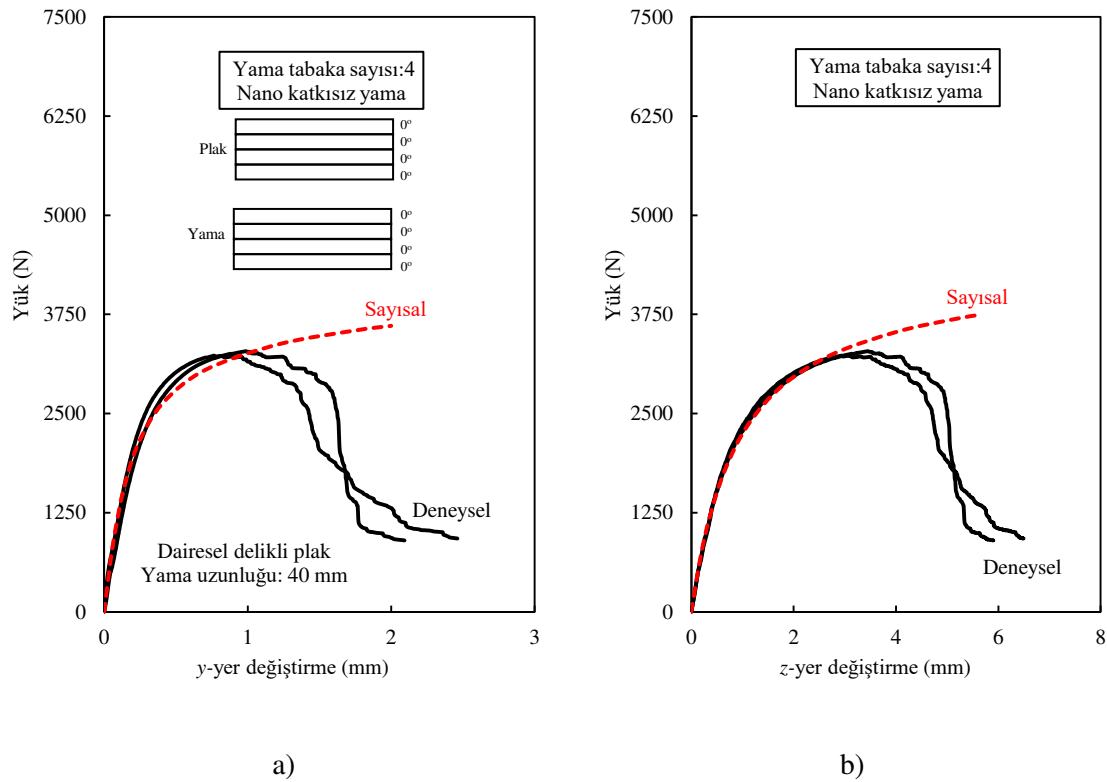
**Tablo 7.3.** Plak fiber açısının değişiminin gerilmelere olan etkisi

| Plak fiber açısı | $\sigma_z$ (MPa) | $\tau_{yz}$ (MPa) |
|------------------|------------------|-------------------|
| 0°               |                  |                   |
| 15°              |                  |                   |
| 30°              |                  |                   |
| 45°              |                  |                   |
|                  |                  |                   |

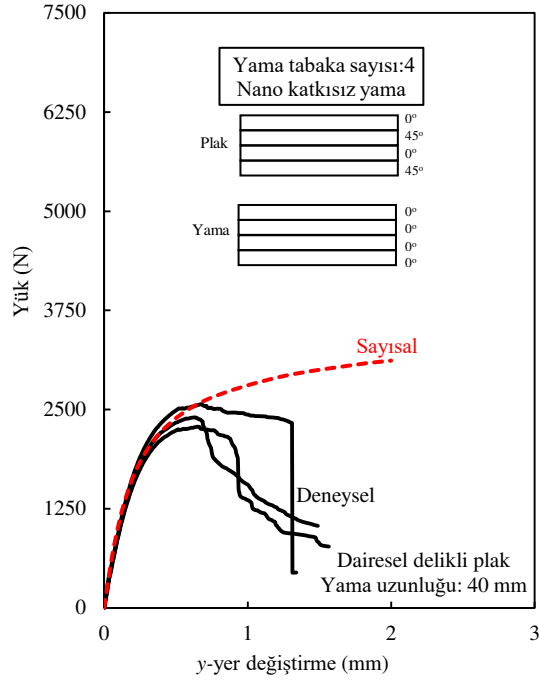
## 7.5. Plak Tabaka Diziliminin Değişiminin Burkulma Davranışına Etkisi

Bu bölümde yamalı dairesel delikli deney numunesinde plak tabaka diziliminin değişiminin etkisi sayısal ve deneysel olarak incelenmiştir. Plak tabaka dizilimi olarak  $[0^\circ]_4$ ,  $[0^\circ/45^\circ]_s$  ve  $[0^\circ/45^\circ]_2$  seçilmiştir. Tablo 6.4’te verilen kompozit plak ve nano-katkısız yamanın mekanik özellikleri sayısal modelde kullanılmıştır. Şekil 7.23-25 arasındaki grafiklerde deneysel ve sayısal yük-yer değiştirme grafikleri  $-y$  ve  $-z$  eksenleri için ayrı ayrı gösterilmiştir. Plak tabaka dizilimlerinin etkisi irdelendiğinden, çalışmanın bu bölümünde yamaya nano partikül eklenmemiştir. Tablo 7.4’te ise plak tabaka diziliminin değişiminin  $-z$  eksenindeki normal ve  $yz$  düzleminde oluşan kayma gerilmelerine etkisi üç boyutlu grafik şeklinde verilmiştir.

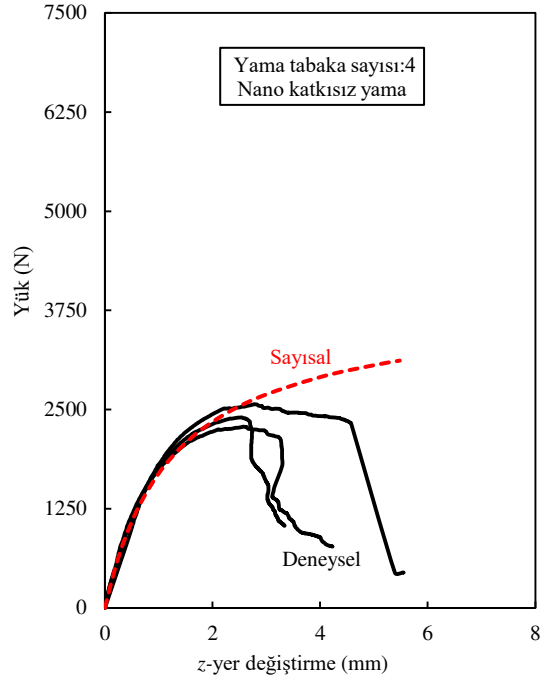
Plak tabaka diziliminin burkulma öncesi ve burkulma sonrası davranışına ait çizilen Şekil 7.23-25 arasındaki yük-yer değiştirme grafiklerinde deneysel ve sayısal sonuçların uyumlu olduğu görülmüştür.



**Şekil 7.23.**  $[0^\circ]_4$  Plak tabaka dizilimi için a)  $-y$  eksenindeki yük-yer değiştirme, b)  $-z$  eksenindeki yük-yer değiştirme grafikleri

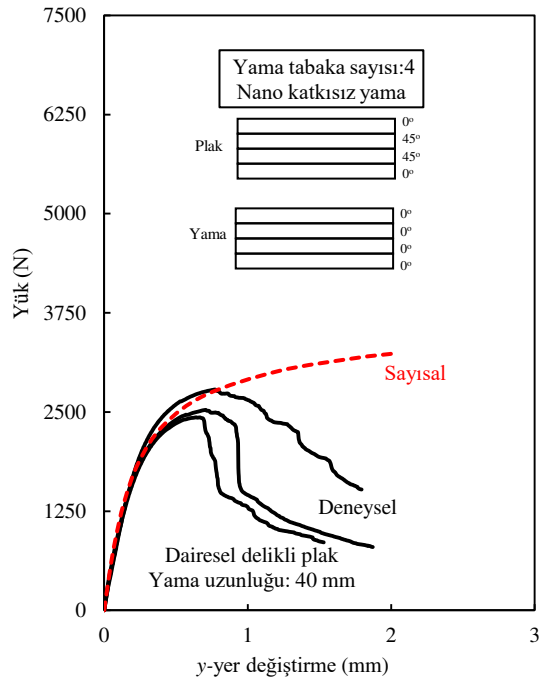


a)

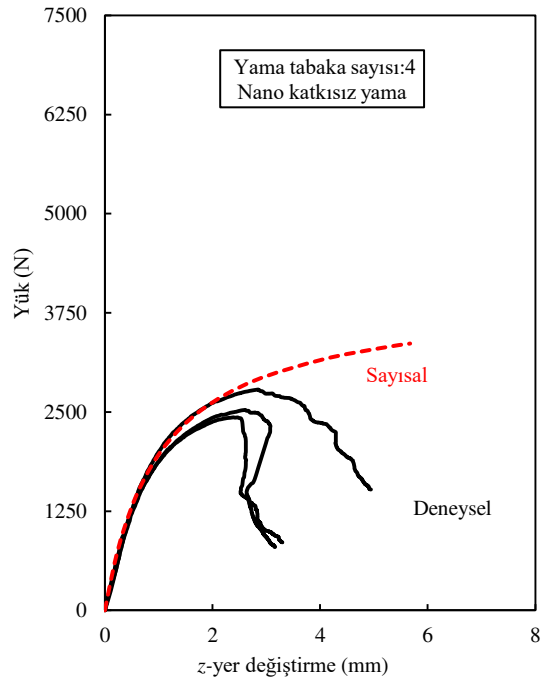


b)

**Şekil 7.24.**  $[0^\circ/45^\circ]_2$  plak tabaka dizilimi için a) -y eksenindeki yük-yer değiştirme, b) -z eksenindeki yük-yer değiştirme grafikleri

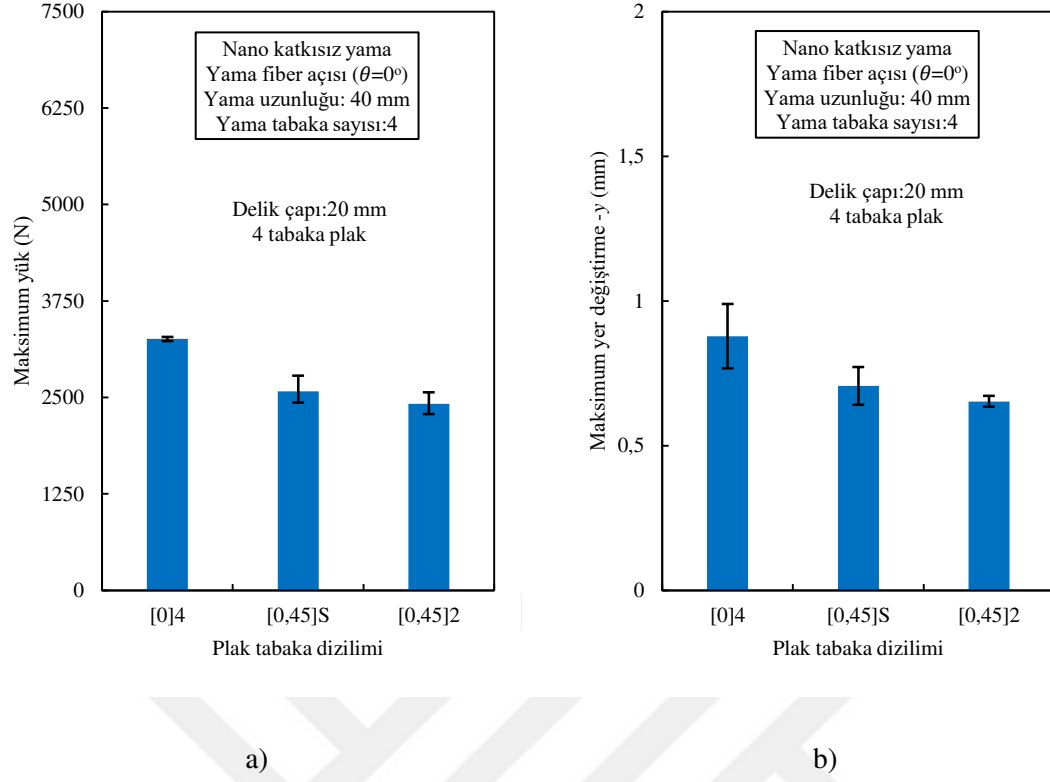


a)

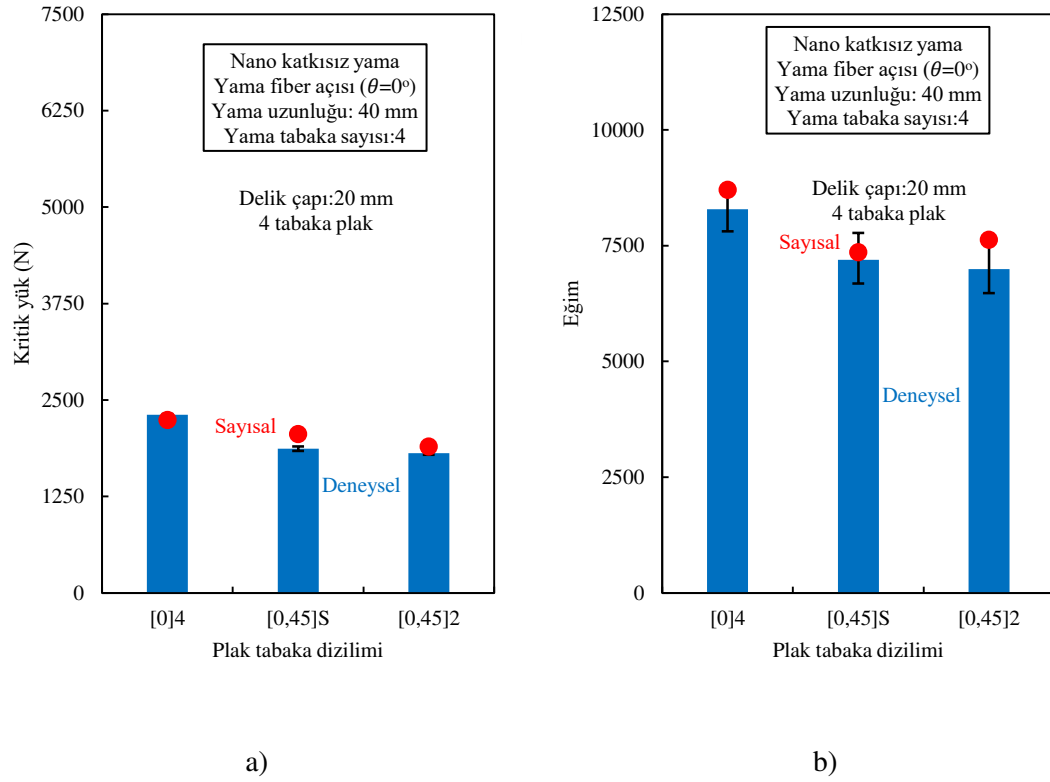


b)

**Şekil 7.25.**  $[0^\circ/45^\circ]_s$  plak tabaka dizilimi için a) -y eksenindeki yük-yer değiştirme, b) -z eksenindeki yük-yer değiştirme grafikleri



Şekil 7.26. Plak tabaka diziliminin a) Maksimum yük, b) Maksimum yer değiştirme ile değişiminin grafikleri



Şekil 7.27. Plak tabaka diziliminin a) Kritik yük, b) Eğim ile değişiminin grafikleri

Plak tabaka diziliminin değişiminin etkisi Şekil 7.26’da maksimum hasar yükü ve yer değiştirme grafiği için verilmiştir.  $[0^\circ]_4$  tabaka dizilimli plak için maksimum hasar yükü 3258.65 N iken  $[0^\circ/45^\circ]_s$  tabaka dizilimi için 2580.94 N ve  $[0^\circ/45^\circ]_2$  tabaka dizilimi için 2417.81 N olarak elde edilmiştir.  $[0_0]_4$  tabaka dizilimli plakta tabakalardaki fiber doğrultuları ve yük doğrultuları aynı olacak şekilde tasarlandığından maksimum hasar yükü artmıştır.

Bu durum aynı zamanda burkulmaya karşı direnci de artırmaktadır.  $[0^\circ/45^\circ]_s$  ve  $[0^\circ/45^\circ]_2$  tabaka dizilimi kendi arasında karşılaştırıldığında tabakaların diziliminin simetrik olduğu  $[0^\circ/45^\circ]_s$  durumda maksimum hasar yükünün kısmen daha yüksek çıktığı görölmüştür. Simetrik tabaka diziliminin simetrik olmayan tabaka dizilimine göre burkulma yükünü artırdığı görölmektedir. Simetrik dizilim sayesinde eğilmeye karşı direnç artmıştır. Şekil 7.26b’ de maksimum hasar yüküne benzer olarak maksimum yer değiştirme  $[0_0]_4$  tabaka diziliminde 0.88 mm,  $[0^\circ/45^\circ]_s$  tabaka diziliminde 0,70 mm ve  $[0^\circ/45^\circ]_2$  tabaka diziliminde 0.65 mm olarak tespit edilmiştir. En büyük yer değiştirmenin  $[0_0]_4$  tabaka diziliminde en küçük yer değiştirmenin ise  $[0^\circ/45^\circ]_2$  tabaka diziliminde meydana geldiği görölmektedir.

Şekil 7.27’de plak tabaka dizilimi ile kritik yük- yer değiştirme ve eğim için çizilen grafiklerdeki bulunan sonuçlar aşağıdaki gibi tespit edilmiştir. Kritik burkulma yükü  $[0_0]_4$  tabaka diziliminde 2311 N,  $[0^\circ/45^\circ]_s$  tabaka diziliminde 1867,9 N ve  $[0^\circ/45^\circ]_2$  tabaka diziliminde ise 1809.41 N olarak bulunmuştur. En büyük kritik yükün  $[0_0]_4$  tabaka diziliminde, en küçük kritik yükünde  $[0^\circ/45^\circ]_2$  tabaka dizilimli numunede meydana geldiği görölmektedir. Eğim için çizilen grafikte de (Şekil 7.27-b) bulgulardaki değişim benzer olmuştur. Yani  $[0_0]_4$  tabaka diziliminden  $[0^\circ/45^\circ]_2$  tabaka dizilime doğru azalma izlenmektedir.

Tablo 7.4’te  $[0^\circ]_4$ ,  $[0^\circ/45^\circ]_2$  ve  $[0^\circ/45^\circ]_s$  tabaka dizilimli plak kullanımı sonucu yamada oluşan normal ve kayma gerilmelerinin dağılımları gösterilmektedir. Her iki dizilimli plakta normal ve kayma gerilmelerinin yaklaşık aynı dağılımı gösterdiği izlenmektedir. Ancak  $[0^\circ]_4$  tabaka diziliminde delik etrafında kayma gerilmesi yoğunlaşması görölmüştür. Bu sonuç fiber doğrultusuyla kuvvet doğrultusunun çakışmasıyla izah edilebilir. Dolayısıyla  $[0^\circ]_4$  tabaka diziliminde plak kullanmak plağa daha büyük kuvvet uygulanabileceğini ve bu sebeple yama da ve delik kenarlarında lokal gerilme yoğunlaşmalarını artırdığını göstermiştir.

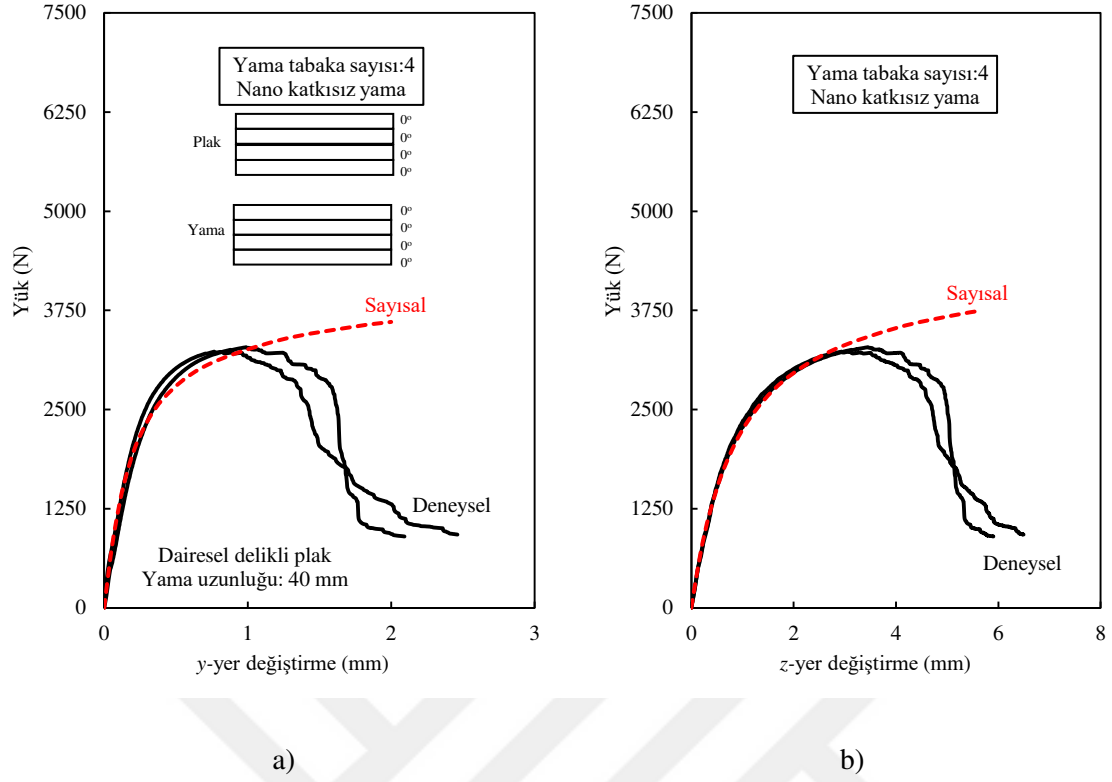
**Tablo 7.4.** Plak tabaka diziliminin değişiminin gerilmelere olan etkisi

| Plak tabaka dizilimi   | $\sigma_z$ (MPa) | $\tau_{yz}$ (MPa) |
|------------------------|------------------|-------------------|
| $[0^\circ]_4$          |                  |                   |
| $[0^\circ/45^\circ]_2$ |                  |                   |
| $[0^\circ/45^\circ]_s$ |                  |                   |
|                        |                  |                   |

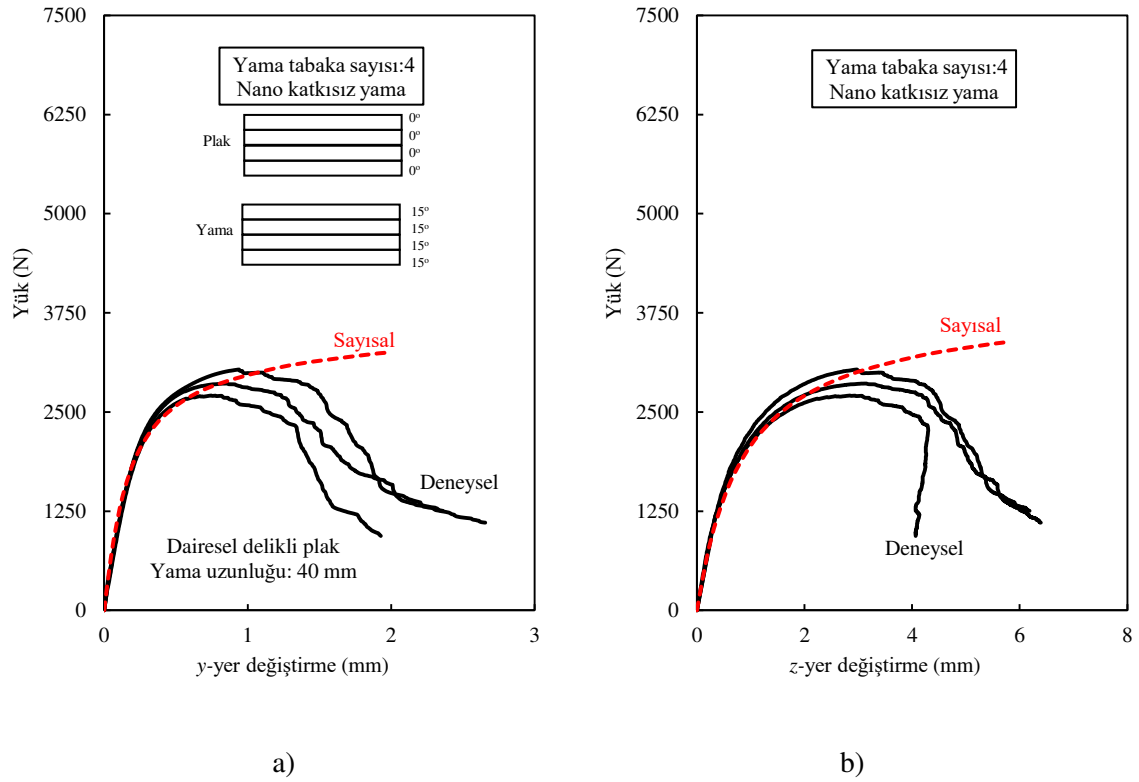
## 7.6. Yama Fiber Açısının Değişiminin Burkulma Davranışına Etkisi

Ortasında  $\varnothing 20$  mm delik açılmış  $60 \times 100$  mm boyutlu deney numunelerinde yama fiber açısının değişiminin etkisi deneysel ve sayısal olarak elde edilmiştir. Tablo 6.1’de plak ve yama boyut ve özellik değişkenlerinden yalnızca yama fiber açısına denk gelen  $\theta$  değiştirilerek burkulma davranışı incelenmiştir.  $\theta$  açısı  $0^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $30^\circ$  ve  $45^\circ$  alınarak deney numunelerine basma yükü uygulanmıştır. Sayısal çözümde Tablo 6.4’te verilen kompozit plak ve nano-katkısız yamanın mekanik özellikleri kullanılmıştır.

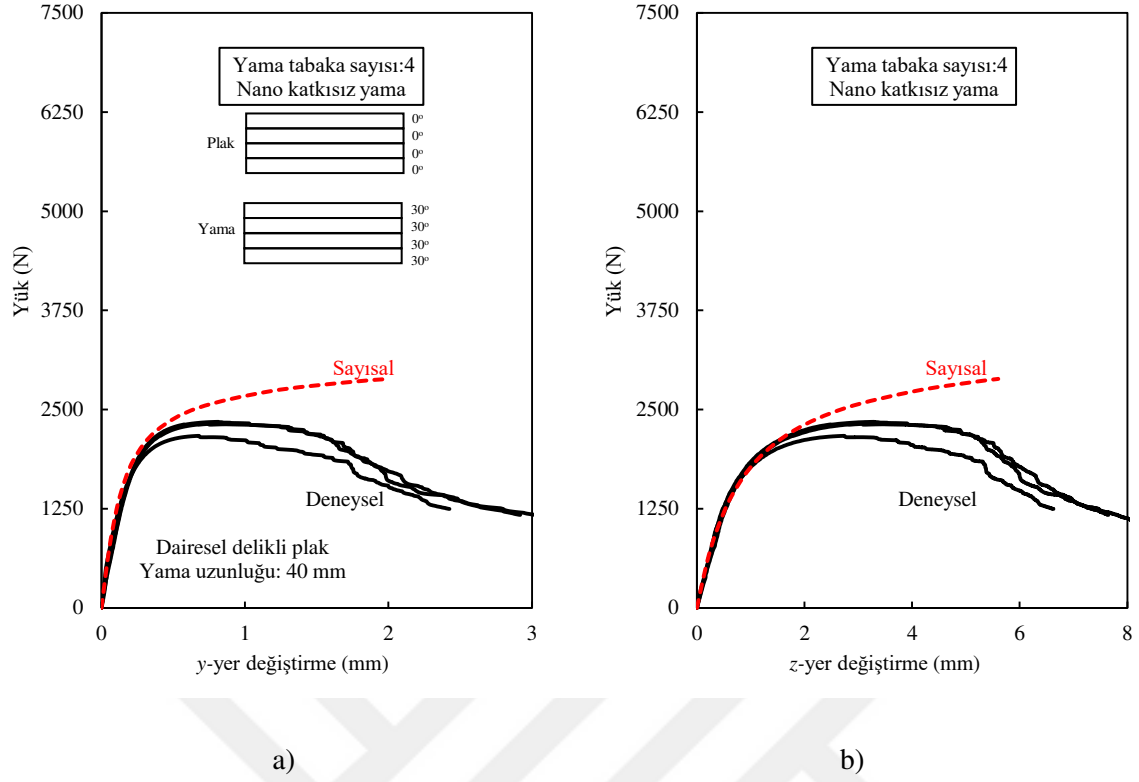
$\theta$ ’nın değişimine göre hem deneysel hem de sayısal sonuçlar için – y ve – z eksenindeki yük-yer değiştirmeler Şekil 7.28-31 arasındaki grafiklerde verilmiştir.



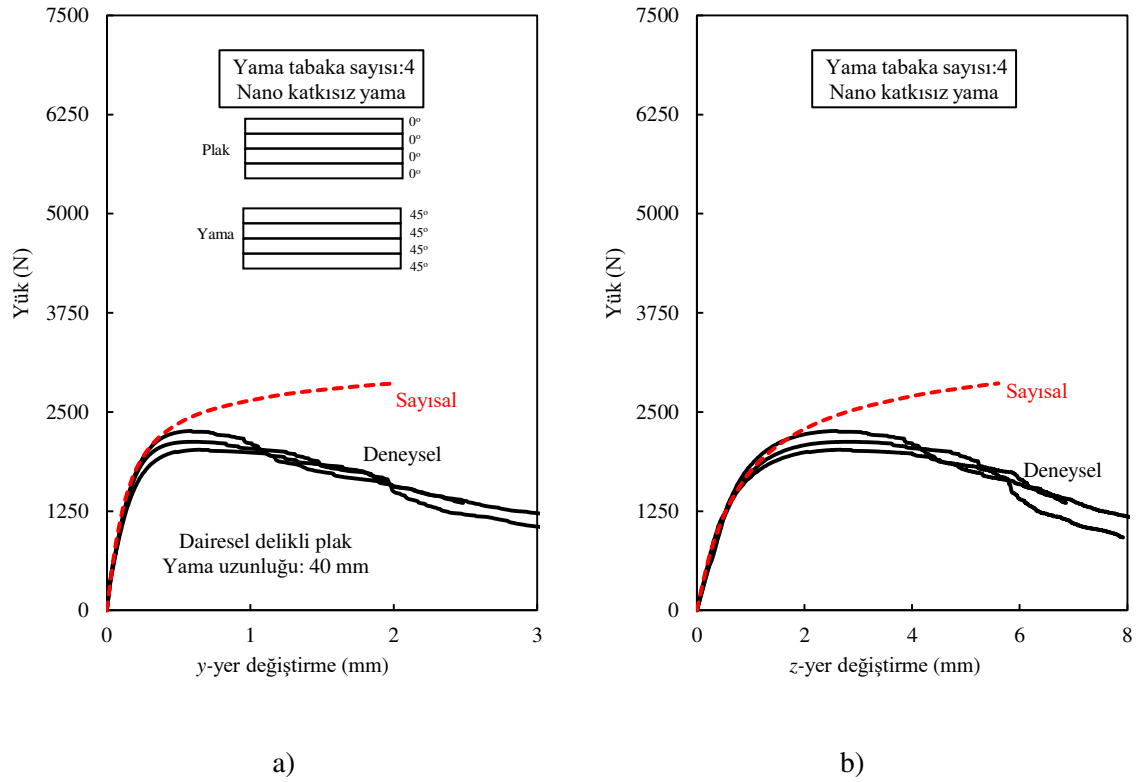
**Şekil 7.28.** Yama fiber açısı  $\theta = 0^\circ$  için a) -y eksenindeki yük-yer değiştirme, b) -z eksenindeki yük-yer değiştirme grafikleri



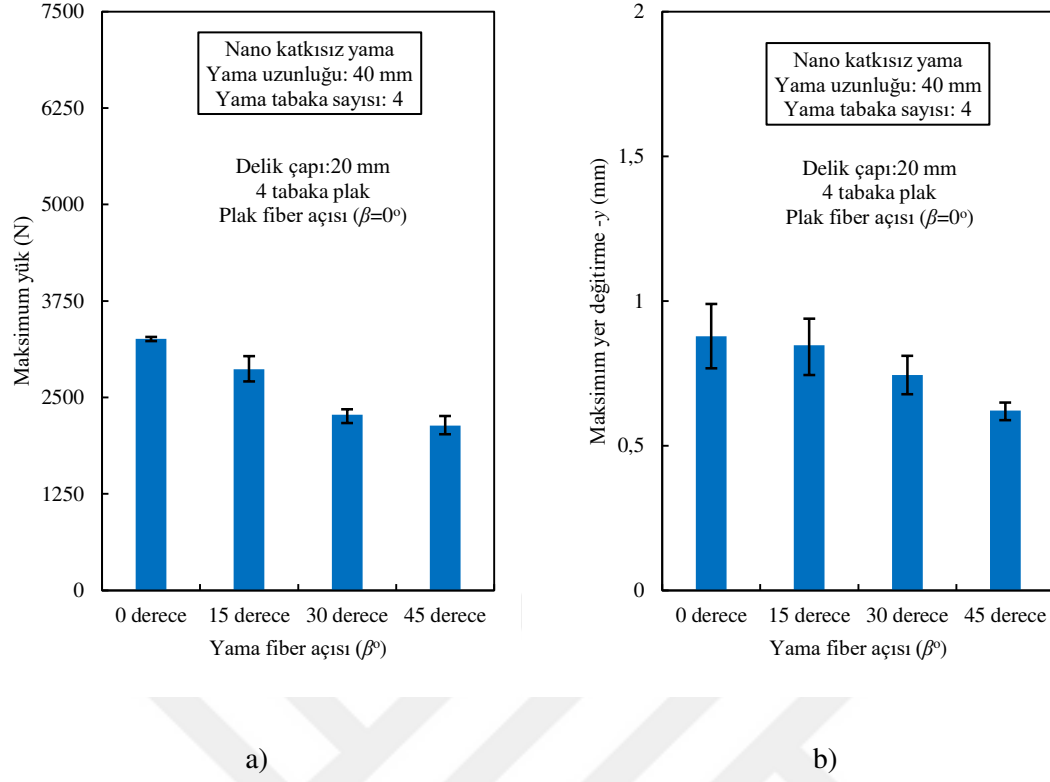
**Şekil 7.29.** Yama fiber açısı  $\theta = 15^\circ$  için a) -y eksenindeki yük-yer değiştirme, b) -z eksenindeki yük-yer değiştirme grafikleri



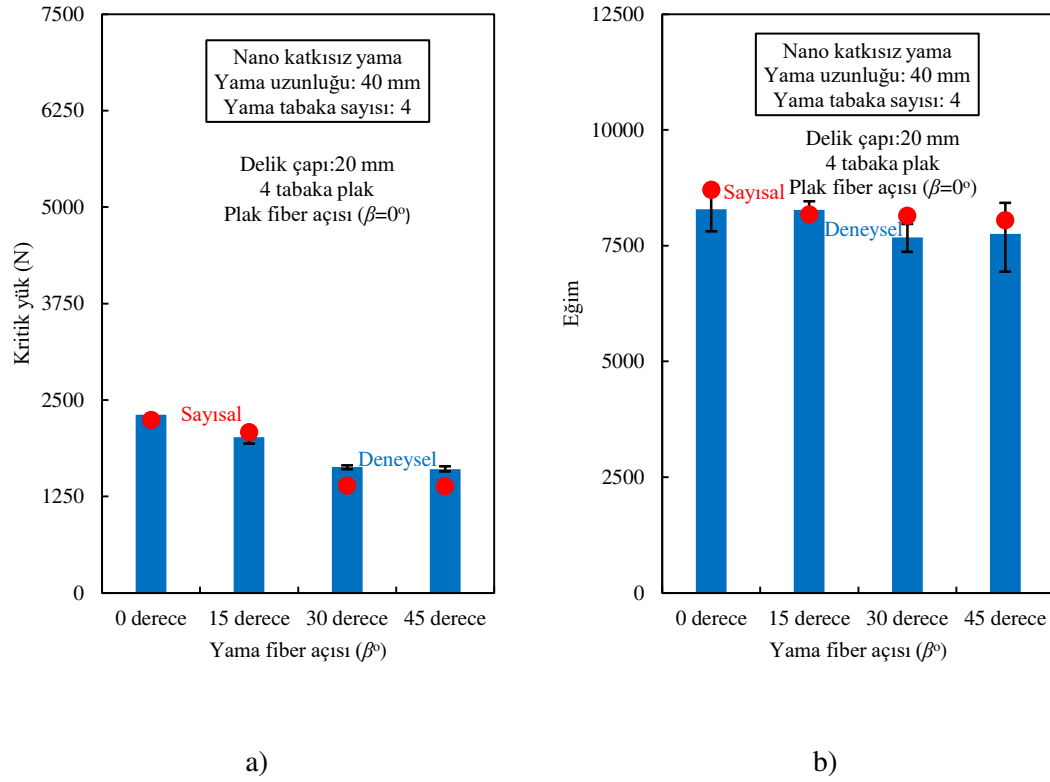
**Şekil 7.30.** Yama fiber açısı  $\theta = 30^\circ$  için a) -y eksenindeki yük-yer değiştirme, b) -z eksenindeki yük-yer değiştirme grafikleri



**Şekil 7.31.** Yama fiber açısı  $\theta = 45^\circ$  için a) -y eksenindeki yük-yer değiştirme, b) -z eksenindeki yük-yer değiştirme grafikleri



**Şekil 7.32.** Yama fiber açısının a) Maksimum yük, b) Maksimum yer değiştirme ile değişim grafiği



**Şekil 7.33.** Yama fiber a) Kritik yük, b) Eğim ile değişim grafikleri

Şekil 7.32’de yama fiber açısının ( $\theta$ ) değişiminin, maksimum yük ve yer değiştirmeye etkisi grafikler halinde verilmiştir. Ortalama maksimum hasar yükü  $0^\circ$  yama fiber açısı için maksimum 3258.66 N,  $45^\circ$  yama fiber açısı için 2136.65 N olarak elde edilmiştir. Yama fiber açısı  $0^\circ$ ’den  $15^\circ$ ’ye çıktığında maksimum hasar yükü %12 kadar  $30^\circ$ ’den  $45^\circ$ ’ye çıktığında maksimum hasar yükü %6 kadar azalmıştır.

**Tablo 7.5.** Yama fiber açısının değişiminin gerilmelere olan etkisi

| Yama fiber açısı | $\sigma_z$ (MPa) | $\tau_{yz}$ (MPa) |
|------------------|------------------|-------------------|
| $0^\circ$        |                  |                   |
| $15^\circ$       |                  |                   |
| $30^\circ$       |                  |                   |
| $45^\circ$       |                  |                   |
|                  |                  |                   |

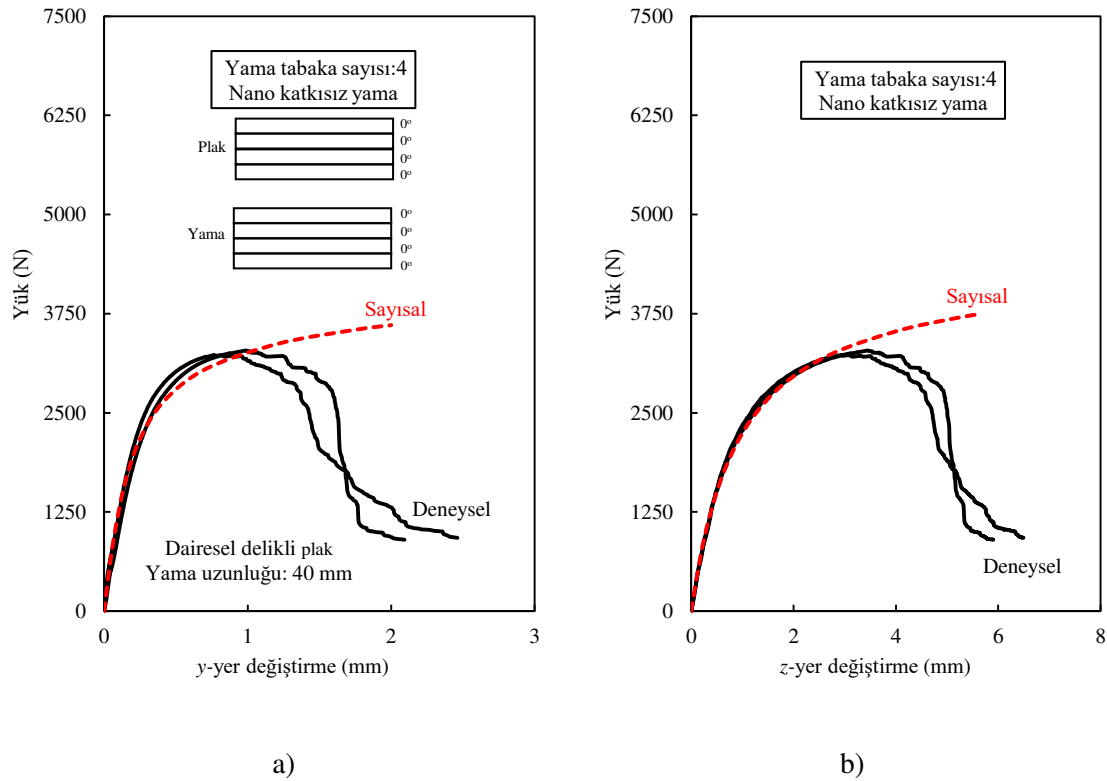
Tablo 7.5’te yama fiber açısının değişiminin -z eksenindeki normal ve yz düzlemindeki kayma gerilme dağılımları verilmiştir. Fiber takviye açısının artışına bağlı olarak hem normal gerilmede hem de kayma gerilmelerindeki gerilme yoğunluğu artışı yama kenarlarında ortaya çıkmaktadır.

## 7.7. Yama İçerisine Nano Malzeme Katkısının Burkula Davranışına Etkisi

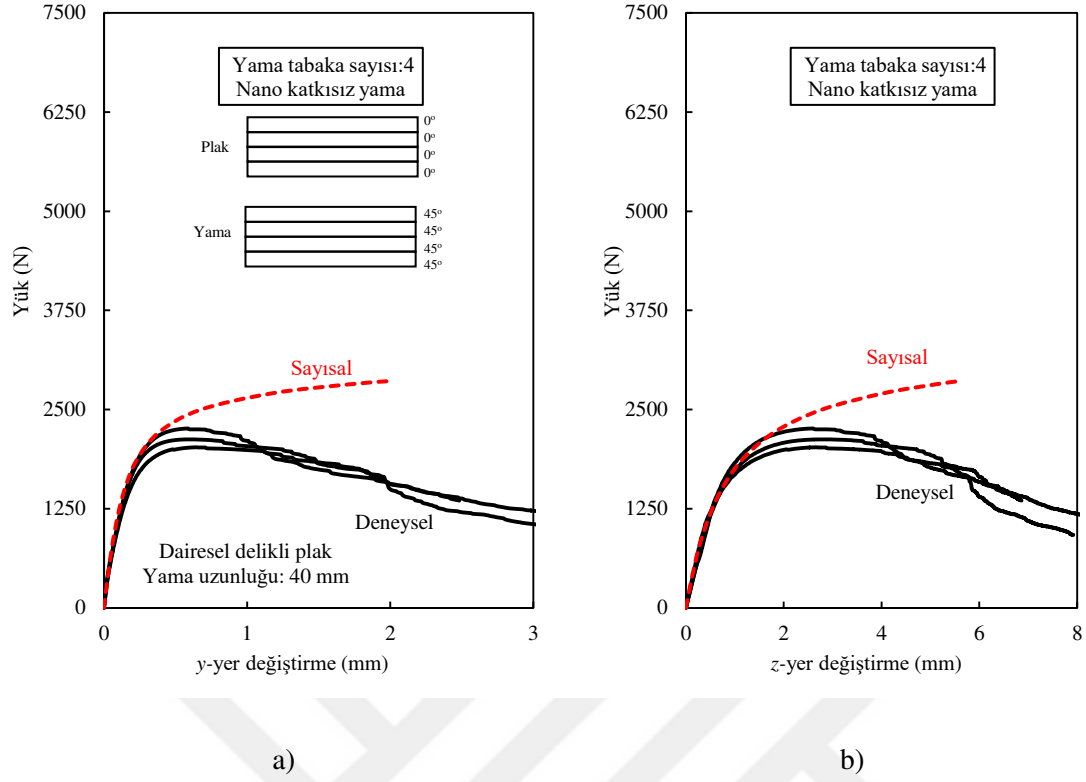
Dairesel delikli plakların yama ile yamanmasında yama içerisine nano partikül eklenmesinin burkulma davranışına etkisini gözlemlemek için yama reçinesine CNT ve grafen eklenmiştir.

### 7.7.1. Yama İçerisine Karbon Nanotüp (CNT) Eklenmesi

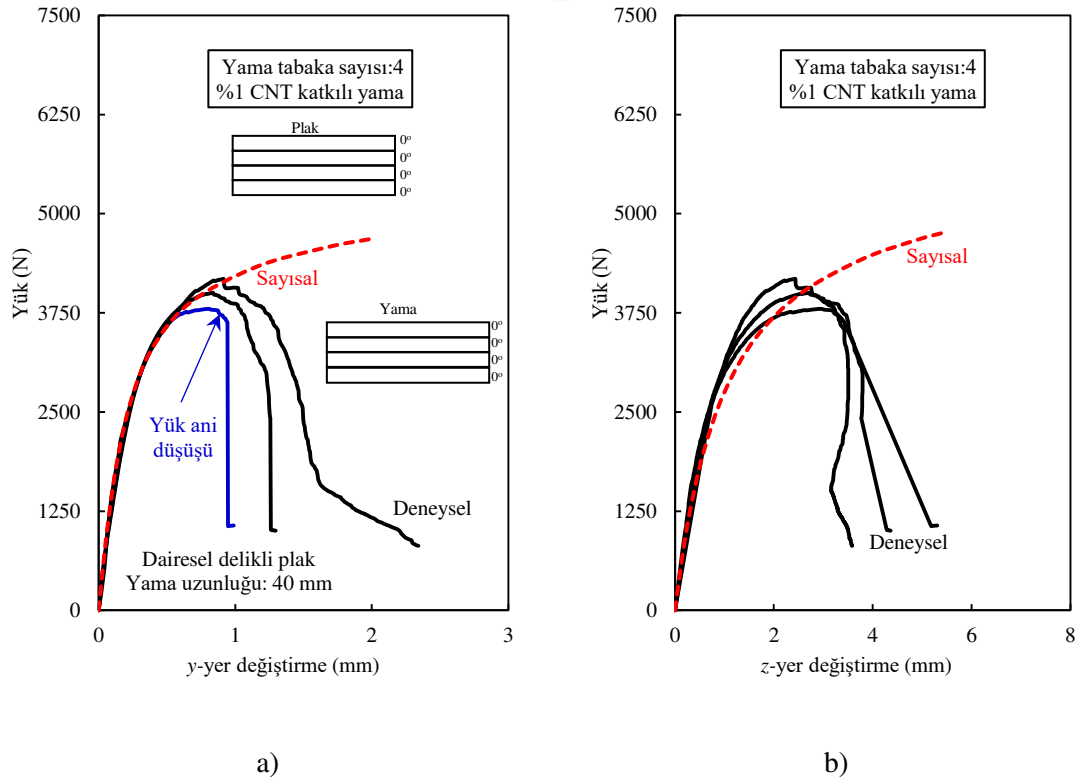
Ortasında delik bulunan deney numunelerinin yamanmasında yama içerisine nano partikül eklenerek burkulma davranışına olan etkisi incelenmiştir. İlk olarak ortası delikli plak,  $\theta = 0^\circ$  ve  $45^\circ$  fiber takviyeli nano-katkısız yama ile yamanmıştır. Daha sonra matris içerisine özellikleri Tablo 6.3'te verilen ağırlıkça %1 ve %2 oranlarında CNT eklenmiş kumaşlar  $0^\circ$  ve  $45^\circ$  doğrultularında delik üzerine yerleştirilerek, plaklar vakum infüzyon yöntemiyle yamanmıştır. Sayısal çözümde Tablo 6.4'te verilen mekanik özelliklerden; kompozit plak, nano-katkısız yama ve %1 ve %2 CNT katkılı yama mekanik özellikleri kullanılmıştır. Şekil 7.34 ve Şekil 7.35'deki grafiklerde  $0^\circ$  ve  $45^\circ$  fiber takviye açılı nano katkısız yama ile yamanmış plağın maksimum yük ve yer değiştirme davranışları sırasıyla verilmiştir. Şekil 7.36-Şekil 7.37'de  $\theta = 0^\circ$  ve  $45^\circ$  için %1 CNT katkılı yama ile yamanmış plağın, Şekil 7.38-Şekil 7.39'da ise  $\theta = 0^\circ$  ve  $45^\circ$  için %2 CNT katkılı yama ile yamanmış plağın maksimum yük-yer değiştirme grafikleri deneysel ve sayısal sonuçlara göre çizilmiştir.



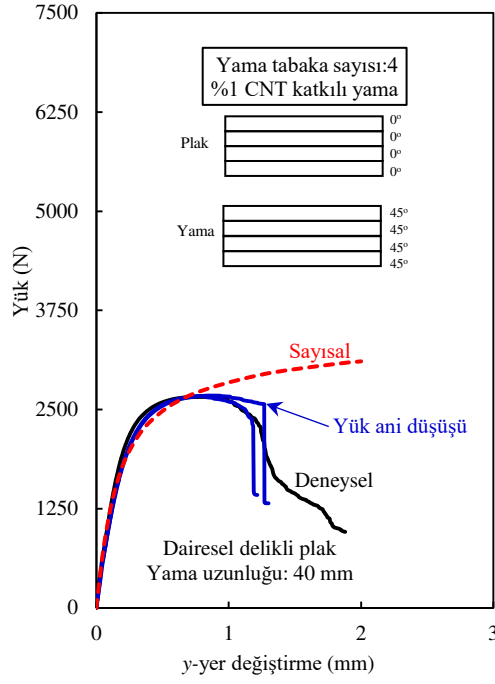
Şekil 7.34. Yama fiber açısı  $\theta = 0^\circ$  nano katkısız yama için a) -y eksenindeki yük-yer değiştirme, b) -z eksenindeki yük-yer değiştirme grafikleri



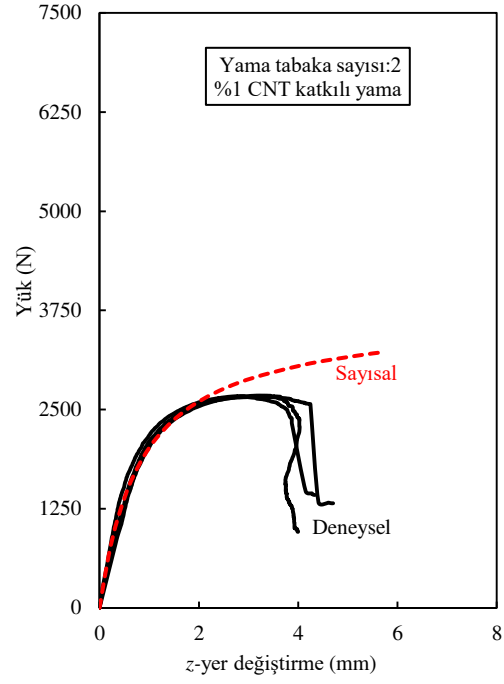
**Şekil 7.35.** Yama fiber açısı  $\theta = 45^\circ$  nano katkısız yama için a) -y eksenindeki yük-yer değiştirme, b) -z eksenindeki yük-yer değiştirme grafikleri



**Şekil 7.36.** Yama fiber açısı  $\theta = 0^\circ$  %1 CNT katkılı yama için a) -y eksenindeki yük-yer değiştirme, b) -z eksenindeki yük-yer değiştirme grafikleri

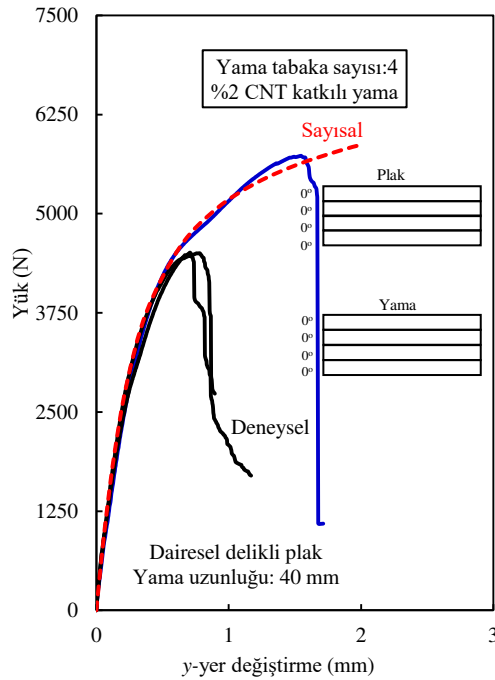


a)

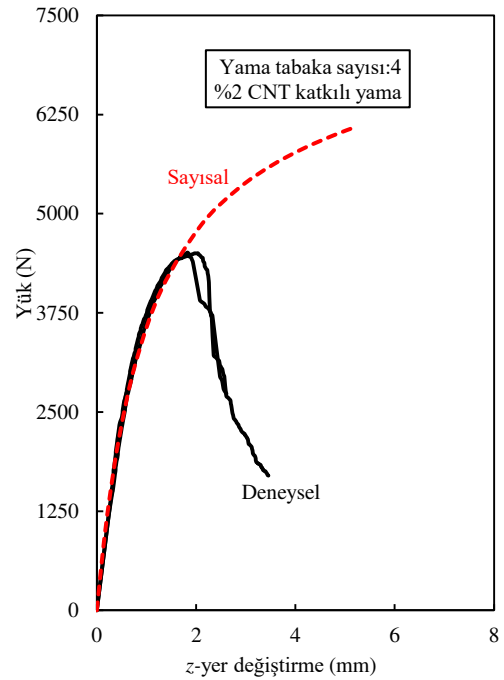


b)

**Şekil 7.37.** Yama fiber açısı  $\theta = 45^\circ$  %1 CNT katkılı yama için a) -y eksenindeki yük-yer değiştirme, b) -z eksenindeki yük-yer değiştirme grafikleri

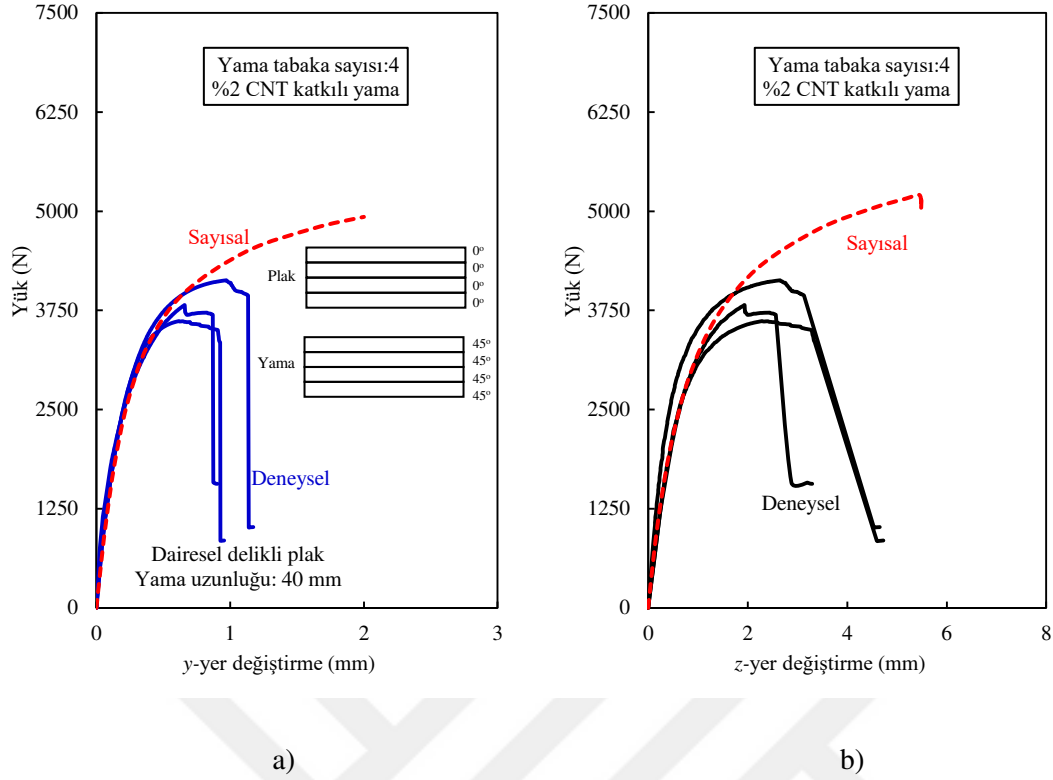


a)



b)

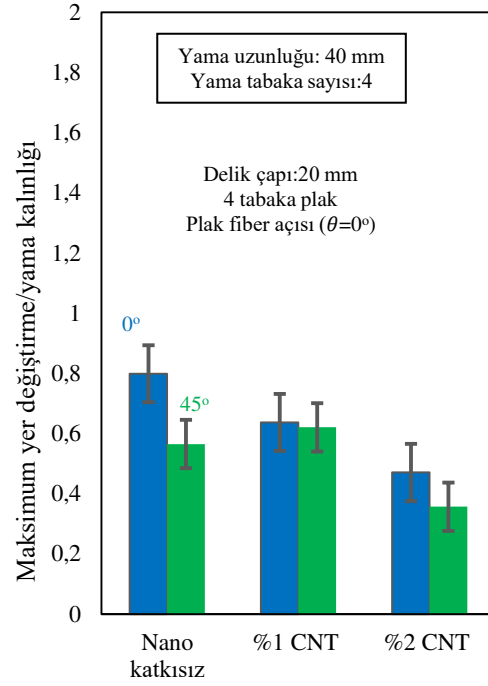
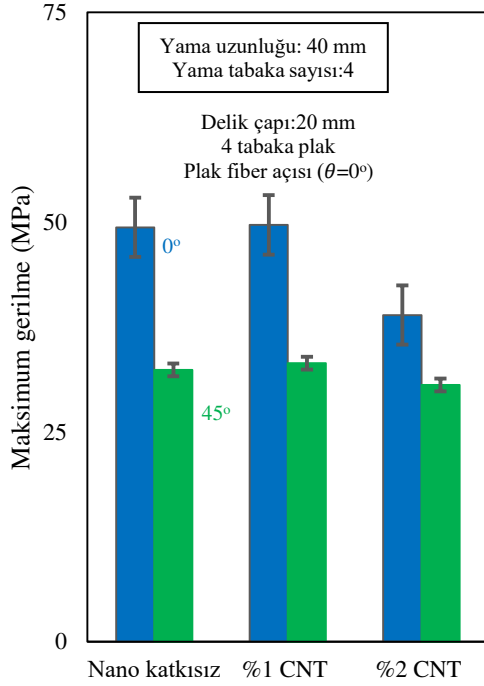
**Şekil 7.38.** Yama fiber açısı  $\theta = 0^\circ$  %2 CNT katkılı yama için a) -y eksenindeki yük-yer değiştirme, b) -z eksenindeki yük-yer değiştirme grafikleri



**Şekil 7.39.** Yama fiber açısı  $\theta = 45^\circ$  %2 CNT katkılı yama için a) -y eksenindeki yer değiştirme, b) -z eksenindeki yer değiştirme

Sayısal ve deneysel sonuçlar kendi aralarında birbiri ile uyum içerisinde olduklarını göstermektedir. Yamaya CNT eklenmesi yükte ani düşmelere neden olmuştur. Ani düşmelerin olması plak ve yama ara yüzeyinden ayrılmaların olduğunun göstergesidir.  $0^\circ$  ve  $45^\circ$  yama fiber açısında yamaya CNT eklenmesinin normal ve kayma gerilme dağılımlarına etkisi Tablo 7.6, Tablo 7.7’de verilmiştir.

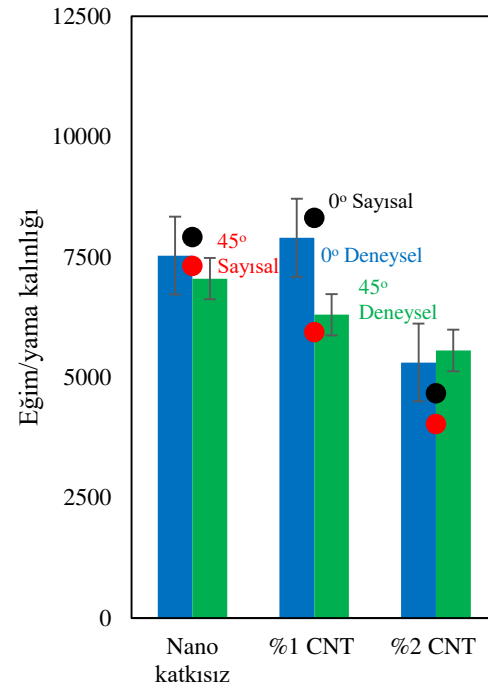
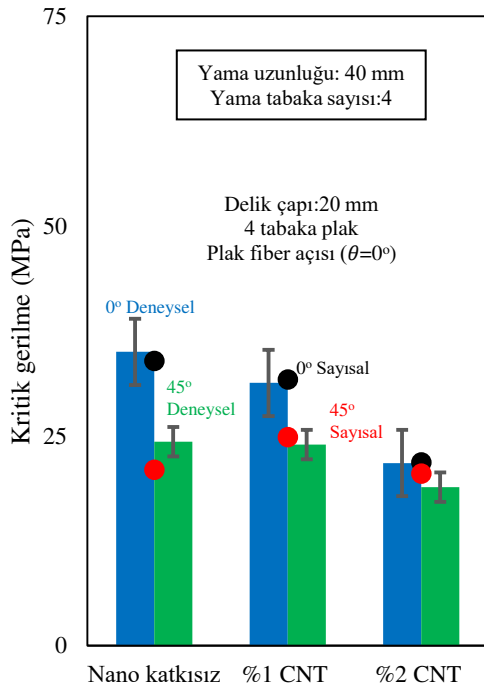
Çalışmanın bu safhasına kadar geometrik parametrelerin değişiminde maksimum yük ve yüke karşılık yer değiştirme ile kritik yük ve yükün eğiminin değişimi irdelenmiştir. Ancak yama reçinesine grafen eklenmesi yama kalınlığını değiştirmemiş, CNT eklenmesi yama kalınlığını Tablo 6.1’de verildiği gibi artırmıştır. Bu sebeple yama içerisine CNT ve grafen eklenmesinin burkulma davranışına etkisini irdellemek için kalınlığın etkisini ortadan kaldırmak gerekmektedir. Dolayısıyla maksimum yük ve kritik yük değerleri yama kesit alanına bölünmüş ve maksimum gerilme ve kritik gerilme değerleri elde edilmiştir. Ayrıca maksimum yer değiştirme ve eğim değeri yama kalınlığına bölünmüş böylelikle yama kalınlığının etkisi ortadan kaldırılmıştır. Şekil 7.40’da yama fiber açısı  $0^\circ$  ve  $45^\circ$  için yama içerisine CNT eklenmesinin maksimum gerilme ve maksimum yer değiştirme/yama kalınlığı ile değişim grafikleri verilmiştir. Nano-katkısız yama fiber açısı  $0^\circ$  için maksimum gerilme değeri 49.3 MPa iken  $45^\circ$  için maksimum gerilme değeri 32.3 MPa olmuştur.  $0^\circ$  ve  $45^\circ$  yama fiber açısında yamaya %1 CNT eklenmesi maksimum gerilmeyi %1 civarında artırmış ancak %2 CNT eklenmesi maksimum gerilmeyi  $0^\circ$  yamada %20,  $45^\circ$  yamada %8 düşürmüştür.



a)

b)

**Şekil 7.40.** Yamadaki CNT oranının a) Maksimum gerilme, b) Maksimum yer değiştirme/yama kalınlığı ile değişim grafikleri



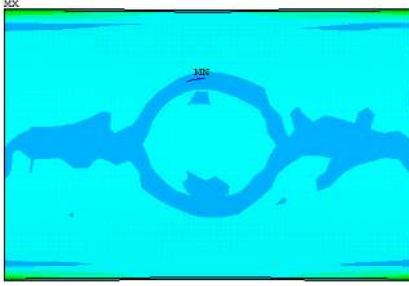
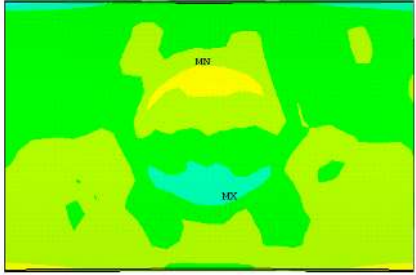
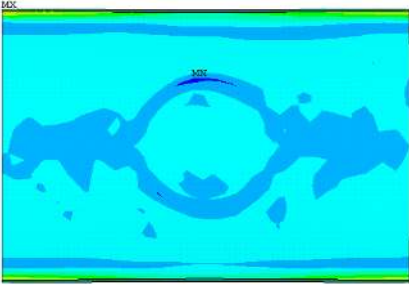
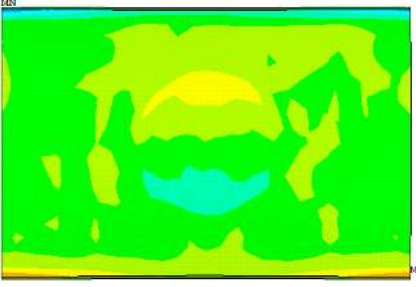
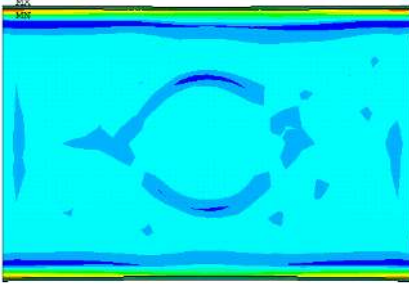
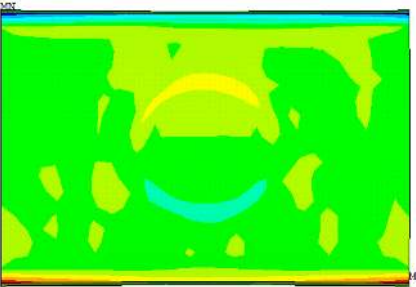
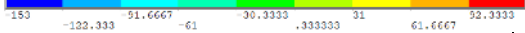
a)

b)

**Şekil 7.41.** Yamadaki CNT oranının a) Kritik gerilme, b) Eğim/yama kalınlığı ile değişim grafikleri

Sonuçlar yamaya CNT katkı oranının %1'den 2'ye çıkarılmasının maksimum gerilmeyi düşürdüğünü göstermiştir. Yama fiber açısı 0° için maksimum yer değiştirme/yama kalınlığı CNT oranı artışıyla azalırken, 45° yama fiber açısında %1 CNT eklenmesi ile artmış %2 CNT ile azalmıştır. Şekil 7.41'de CNT eklenmesinin kritik gerilme ve eğim/yama kalınlığı ile değişim grafikleri 0° ve 45° yama fiber açısı için sayısal ve deneysel olarak gösterilmiştir. Şekil 7.41'de 0° yama fiber açısı için kritik gerilme 35 MPa elde edilmişken %1 CNT eklenmesiyle kritik gerilme %11, %2 CNT eklenmesiyle %30 oranında düşmüştür. 45° nano katkısız yamada 24 MPa olan kritik gerilme %1 CNT eklenmesiyle kısmen, %2 CNT eklenmesiyle %25 oranında düşmüştür. 0° yama fiber açısında eğim/yama kalınlığı %1 CNT eklenmesiyle kısmen artarken %2 CNT eklenmesiyle %30 oranında düşmüş, 45° yama fiber açısında CNT oranının artışıyla eğim/yama kalınlığı sürekli azalmıştır. Sayısal ve deneysel sonuçlar arasında uyumlu sonuçlar elde edilmiştir.

**Tablo 7.6.** 0° yama fiber açısında yamaya CNT eklenmesinin gerilmelere olan etkisi

| 0° yama fiber açısı | $\sigma_z$ (MPa)                                                                    | $\tau_{yz}$ (MPa)                                                                    |
|---------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| Nano katkısız       |   |   |
| %1 CNT katkılı      |  |  |
| %2 CNT katkılı      |  |  |
|                     |  |  |

**Tablo 7.7.** 45° yama fiber açısında yamaya CNT eklenmesinin gerilmelere olan etkisi

| 45° yama fiber açısı | $\sigma_z$ (MPa) | $\tau_{yz}$ (MPa) |
|----------------------|------------------|-------------------|
| Nano-katkısız        |                  |                   |
| %1 CNT katkılı       |                  |                   |
| %2 CNT katkılı       |                  |                   |
|                      |                  |                   |

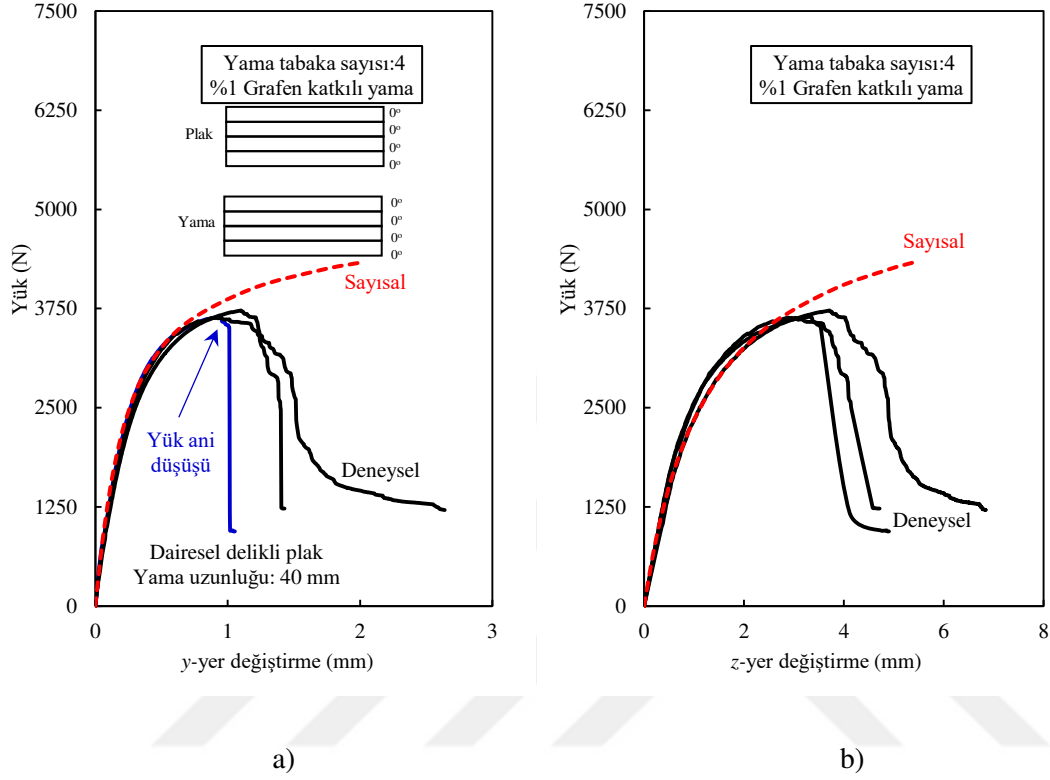
Tablo 7.6’da 0° yama fiber açısı için, Tablo 7.7’de ise 45° yama fiber açısı için yama üzerinde meydana gelen ara yüzey normal ve kayma gerilme dağılımları gösterilmiştir.

Sonuçta yamaya %2 CNT eklenmesi hem kritik burkulma gerilmesini hem de eğim/kalınlık değerini 0° ve 45° yama fiber açısı için azaltmıştır. 0°’de hasar yükünün artışına bağlı olarak yama kenarlarında normal ve kayma gerilme yoğunlaşmasında artış görülmektedir. 45° yama fiber açısında, kayma gerilmelerinin nano-katkısı artışı ile düştüğü görülmüştür.

### 7.7.2. Yama İçerisine Grafen Eklenmesinin Burkulma Davranışına Etkisi

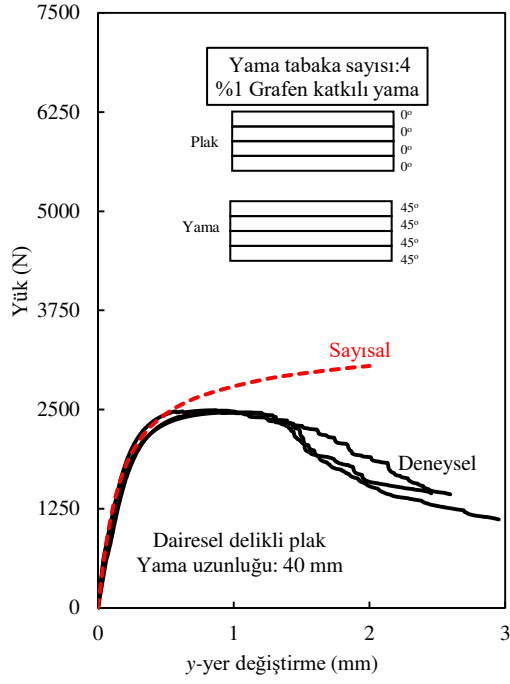
Delinmiş deney numunelerinin yamanmasında yama içerisine grafen eklenmesinin burkulma davranışına olan etkisi deneysel ve sayısal olarak bu kısımda incelenmiştir. Delinmiş numuneler öncelikle Tablo 6.1’de verilen değişkenlerden yama fiber açısı ( $\theta$ ) 0° ve 45° için nano-katkısız yamaya özellikleri Tablo 6.3’te verilen %1 ve %2 grafen eklenmiş burkulma davranışı sayısal ve deneysel olarak elde edilmiştir. Sayısal çözümde Tablo 6.4’de verilen mekanik özelliklerden kompozit plak, nano katkısız yama ve %1 ve %2 grafen katkılı yama özellikleri kullanılmıştır. 0° ve 45° takviye açısında %1

ve %2 grafen katkılı yama malzemeleri ile yamanmış deney numuneleri için deneysel ve sayısal göre maksimum yük ile -y ve -z eksenlerindeki yer değiştirmeler arasındaki değişim Şekil 7.42-7.45 arasındaki grafiklerde verilmiştir.

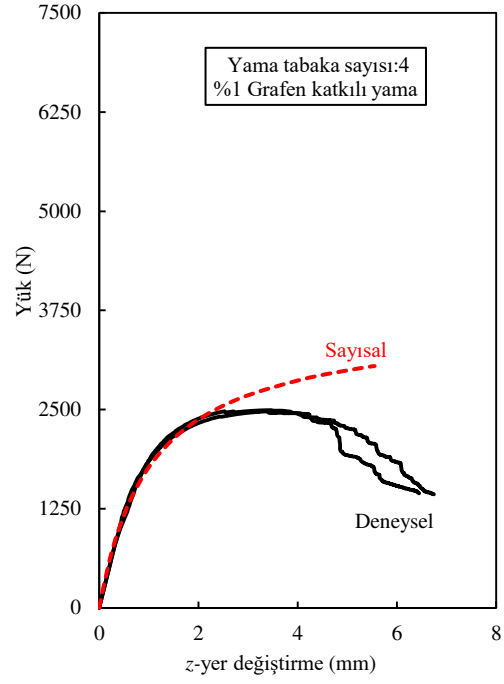


**Şekil 7.42.** Yama fiber açısı  $\theta = 0^\circ$  %1 Grafen katkılı yama için a) -y eksenindeki yük-yer değiştirme, b) -z eksenindeki yük-yer değiştirme grafikleri

Şekil 7.42-7.45'te deneysel ve sayısal sonuçlara göre çizilen grafiklerde kendi aralarında birbiri ile uyumlu oldukları görülmektedir.  $0^\circ$  plak ve  $0^\circ$  yama fiber açısı için %1 ve %2 grafen katkılı yamalı numunelerde yükte ani düşüş meydana gelmiştir (Şekil 7.42-Şekil 7.44). Bu durum yama ara yüzeyinden ayrılmanın gerçekleşmesi sonucu ortaya çıkmıştır.  $0^\circ$  plak ve  $45^\circ$  yama fiber takviye açılarında %1 ve %2 grafen katkılı yamalı numunelerde ise yükte ani düşüş görülmemiştir (Şekil 7.43-Şekil 7.45).

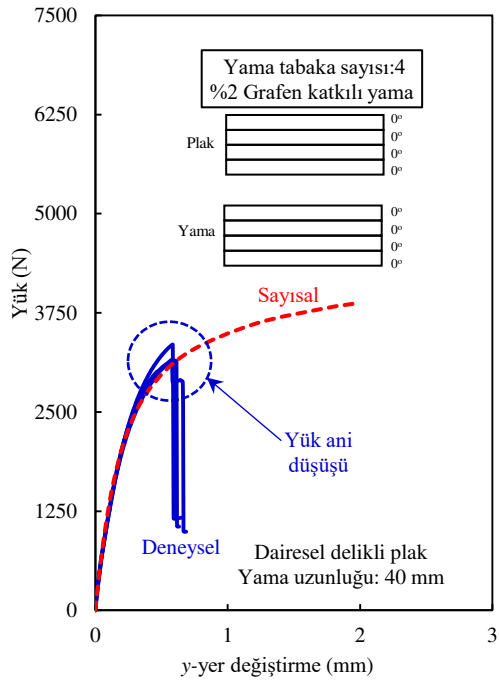


a)

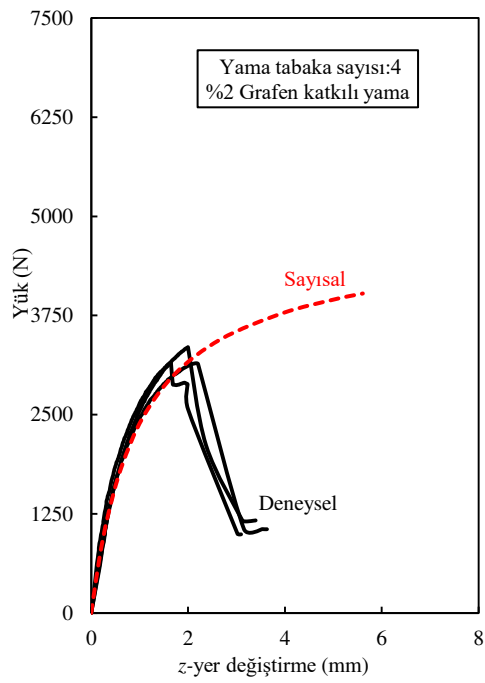


b)

**Şekil 7.43.** Yama fiber açısı  $\theta = 45^\circ$  %1 Grafen katkılı yama için a) -y eksenindeki yük-yer değiştirme, b) -z eksenindeki yük-yer değiştirme grafikleri

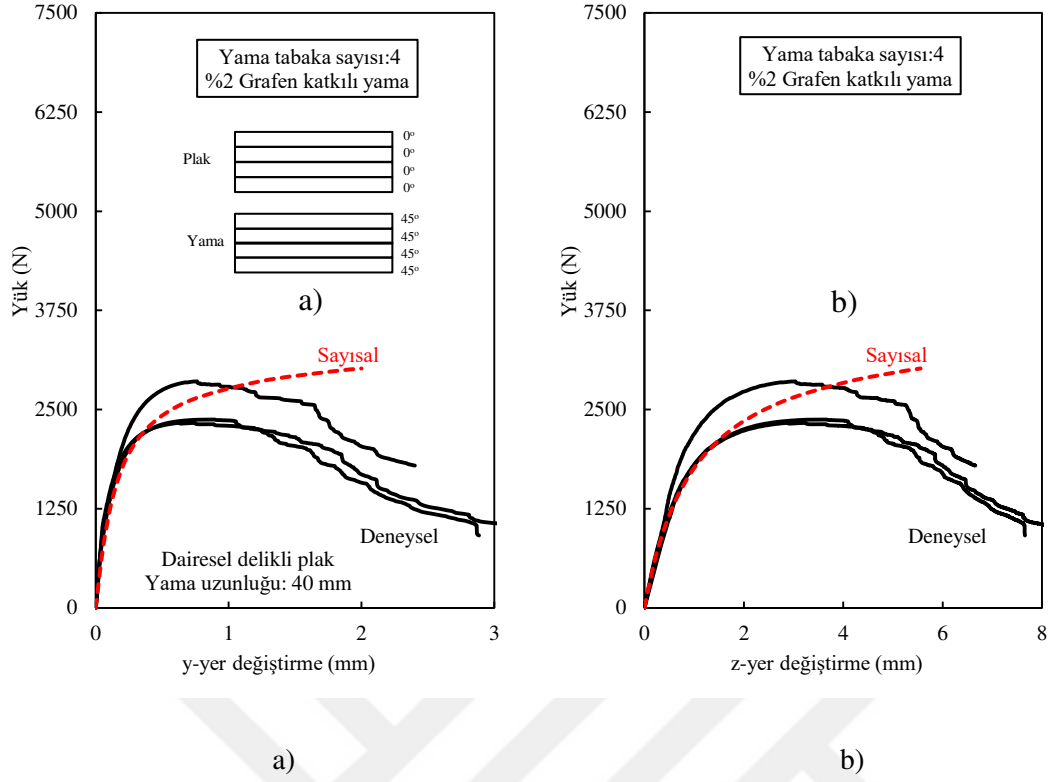


a)

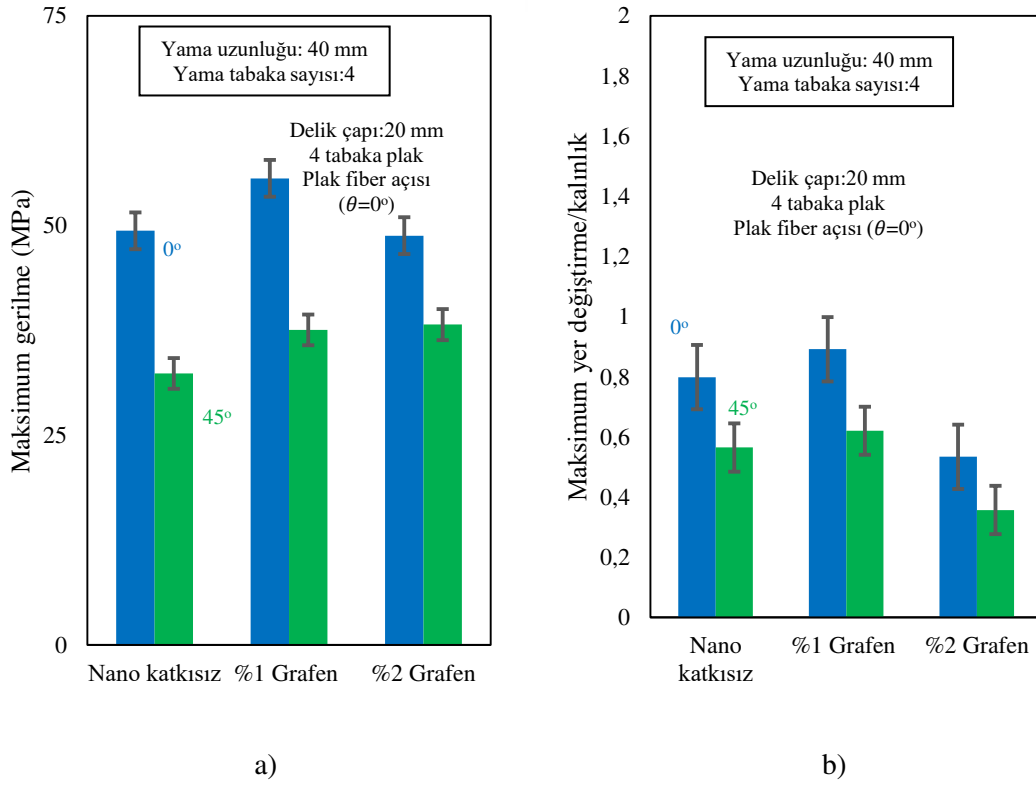


b)

**Şekil 7.44.** Yama fiber açısı  $\theta = 0^\circ$  %2 Grafen katkılı yama için a) -y eksenindeki yük-yer değiştirme, b) -z eksenindeki yük-yer değiştirme grafikleri

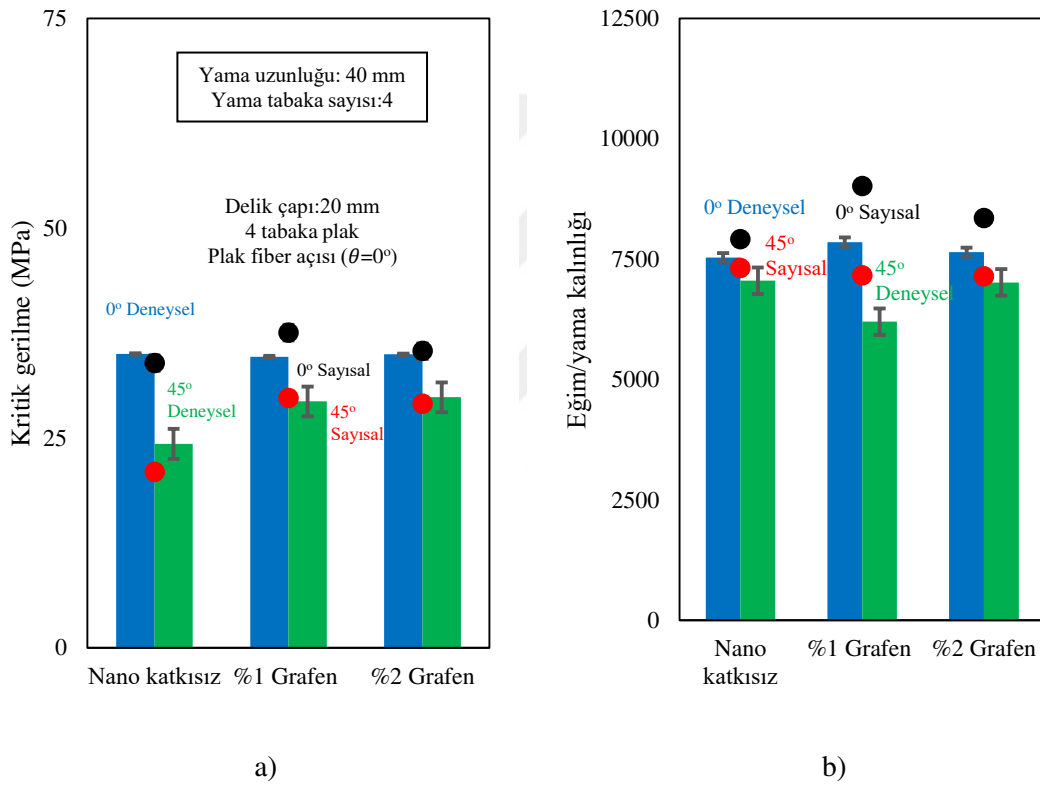


Şekil 7.45. Yama fiber açısı  $\theta = 45^\circ$  %2 Grafen katkılı yama için a) -y eksenindeki yük-yer değiştirme, b) -z eksenindeki yük-yer değiştirme grafikleri



Şekil 7.46. Yamadaki Grafen oranının a) Maksimum gerilme, b) Maksimum yer değiştirme/kalınlık ile değişim grafikleri

Şekil 7.46'da yama fiber açısı  $0^\circ$  ve  $45^\circ$  için nano katkısız yama ve yama içerisine grafen eklenmesinin maksimum gerilme, maksimum yer değiştirme/kalınlık ile değişim grafikleri verilmiştir.  $0^\circ$  yama fiber açısında yama malzemesine %1 grafen eklenmesi nano-katkısız yamanın maksimum gerilme değerini 49.3 MPa'dan 55.6 MPa'ya çıkarırken %2 grafen eklenmesi ise 48.8 MPa'a düşürmüştür.  $45^\circ$  yama fiber açısında yama malzemesine %1 grafen eklenmesi maksimum gerilmeyi %15 artırarak 37.5 MPa'a çıkarırken %2 grafen eklenmesi maksimum gerilmeyi değiştirmemiştir.  $0^\circ$  ve  $45^\circ$  her iki yama açısı için yamaya %1 grafen eklenmesi maksimum yer değiştirme/kalınlık oranını artırmış, %2 grafen katılması oranı düşürmüştür. Sonuçta  $0^\circ$  yama fiber açısı için yamaya grafen eklenmesi hem maksimum gerilme hem de maksimum yer değiştirme/kalınlık oranını %1 grafen eklenmesinde kısmen artırmış ancak %2 grafen eklenmesi azaltmıştır.

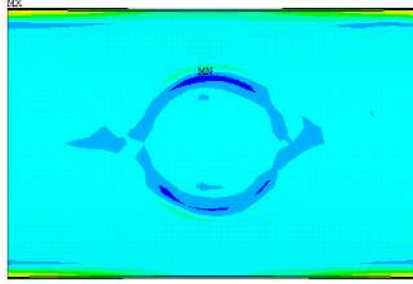
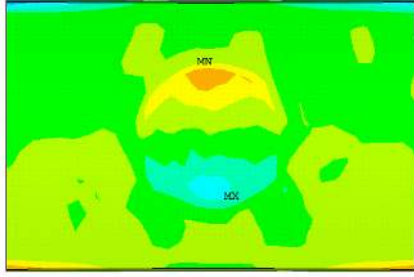
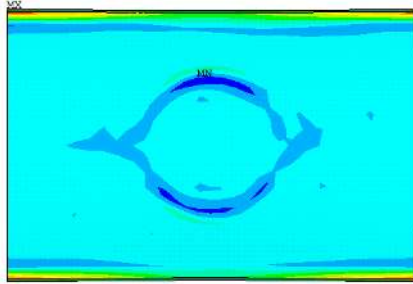
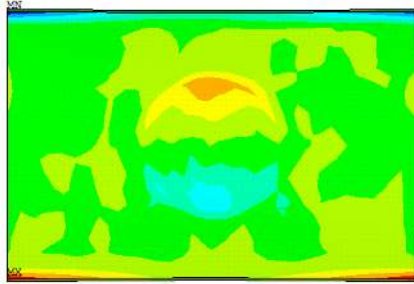
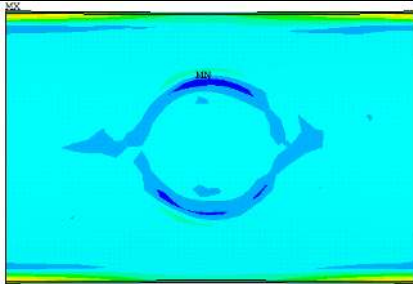
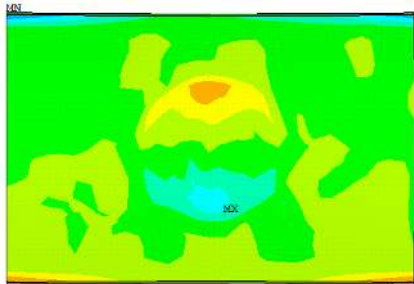


Şekil 7.47. Yamadaki grafen oranının a) Kritik gerilme, b) Eğim/yama kalınlığı ile değişim grafikleri

Şekil 7.47'de nano katkısız yamalı ve yama içerisine  $0^\circ$  ve  $45^\circ$  yama fiber açısı için grafen eklenmesinin kritik gerilme, eğim/yama kalınlığı ile değişim grafikleri deneysel ve sayısal sonuçlar için çizilmiştir.  $0^\circ$  yama fiber açısında nano katkısız yamalı, %1 ve %2 grafen katkılı yamalarda kritik gerilme 35 MPa olarak elde edilmiş, dolayısıyla grafen katkısının kritik gerilmeye etkisi olmamıştır.  $45^\circ$  yama fiber açısında %1 grafen katkısı kritik gerilmeyi %20 artırarak 29 MPa'a çıkarmış ancak %2 grafen katkısının %1 katkıya göre herhangi bir etkisi görülmemiştir.  $0^\circ$  ve  $45^\circ$  yama fiber açısında yamaya %1 grafen katkısının eğim/kalınlık oranını kısmi olarak  $0^\circ$  yama için artırmış  $45^\circ$  yama için

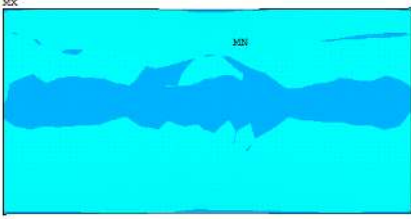
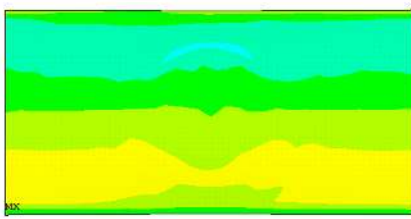
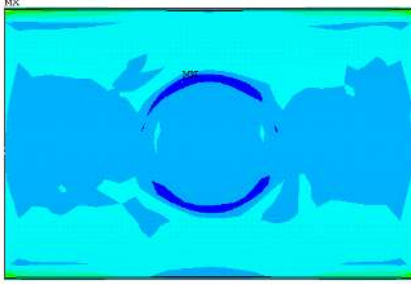
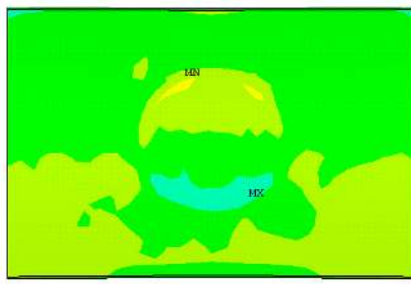
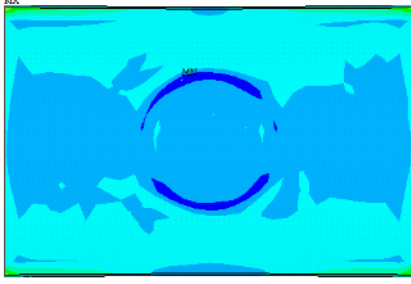
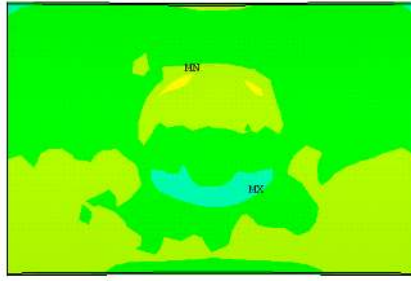
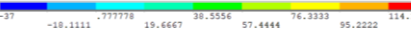
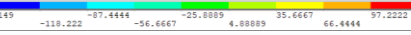
azaltmıştır. %2 grafen katkısının hem 0° hem de 45° yamada, nano katkısız yamaya göre bir etkisi gözlemlenmemiştir.

**Tablo 7.8.** 0° yama fiber açısında yamaya grafen eklenmesinin gerilmelere olan etkisi

| 0° yama<br>fiber açısı | $\sigma_z$ (MPa)                                                                    | $\tau_{yz}$ (MPa)                                                                    |
|------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| Nano<br>katkısız       |    |    |
| %1 Grafen<br>katkılı   |   |   |
| %2 Grafen<br>katkılı   |  |  |
|                        |  |  |

Tablo 7.8 ve Tablo 7.9’da 0° ve 45° yama fiber açısı için %1 ve %2 grafen katkılı yamada meydana gelen normal ve kayma gerilme dağılımları sırasıyla gösterilmiştir. 0° için normal ve kayma gerilmelerinin %1 grafen katkısı sonucu arttığı görülmektedir. Ancak %2 grafen katkısı sonucu ise gerilmeler azalmıştır. 0° fiber açısında grafen katkısı sonucu normal gerilme yoğunlaşmasının delik kenarında olduğu görülmektedir. Bu durum kayma gerilmelerinde de kısmi olarak gerçekleşmiştir.

**Tablo 7.9.** 45° yama fiber açısında yamaya grafen eklenmesinin gerilmelere olan etkisi

| 45° yama<br>fiber açısı | $\sigma_z$ (MPa)                                                                    | $\tau_{yz}$ (MPa)                                                                    |
|-------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| Nano<br>katkısız        |    |    |
| %1 Grafen<br>katkılı    |    |    |
| %2 Grafen<br>katkılı    |   |   |
|                         |  |  |

## 8. SONUÇLAR

Bu çalışmada dört tabakalı  $[0^\circ]_4$  dizilimine sahip dokuma hibrid (karbon ve aramid) fiber/epoksi kompozit plaklar sıcaklık kontrollü olarak vakum infüzyon yöntemiyle üretilmiştir. Üretilen plaklara dairesel delik, U tek kenar ve yarım daire çift kenar tipinde çentikler açılarak numuneler hazırlanmıştır. Geometrik düzensizlik içeren bu numunelerin burkulma davranışları test edildikten sonra, dairesel delikli plaklar ıslak yama ile vakum infüzyon tekniği kullanılarak yamanmıştır. Sonra bu plakların burkulma davranışı deneysel olarak incelenmiş ve sonuçlar deliksiz numunelerde elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Çalışmada; kompozit plakların lineer ve lineer olmayan burkulma davranışı üzerinde delik tipinin değişiminin, kompozit yama kalınlığının, kompozit yama yüksekliğinin, kompozit plaktaki fiber açısının, yine kompozit plakta tabaka diziliminin, kompozit yamada fiber oryantasyonunun değişiminin ve yamaya nanotüp katkısının etkisi incelenmiştir.

Yapılan tüm deneyler sonlu elemanlar yöntemi ile ayrıca analiz edilmiştir. Analizlerin lineer burkulma bölümünde kritik burkulma yükü ve yüke karşılık oluşan eğim elde edilirken lineer olmayan burkulmada maksimum yük ve bu yüke karşılık gelen maksimum yer değiştirme elde edilmiştir. Lineer olmayan analizde deneysel veriler de göz önüne alınarak ön sehim katsayısı (SF) 0.5 olarak seçilmiş ve analizler buna göre yapılmıştır. Sonlu eleman ağı optimizasyonu için yapılan analizlerde ise eleman boyutunun 1 mm ile 2 mm arasındaki değişimin, sonuçları önemli ölçüde etkilemediği görülmüştür. Bu nedenle eleman boyutu 2 mm olarak belirlenmiştir.

Elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir;

- Plaktaki çentik değişiminin etkisini incelemek amacıyla deliksiz, ortasında dairesel delikli, U tek kenar ve yarım daire çift kenar çentikli yamasız plakların burkulma testleri yapılmıştır. Deneysel ve sayısal sonuçlar birbiriyle uyumlu olarak elde edilmiştir. Her bir çentik tipinin maksimum hasar ve kritik yük üzerindeki etkisi incelendiğinde deneysel ve sayısal sonuçlar açısından büyük bir farkın olmadığı görülmüştür. Bu sebeple yama yapmak için dairesel delikli numuneler seçilmiş ve çeşitli parametrelerin değişiminin burkulma yükü ve davranışı üzerindeki etkisi incelenmiştir.
- Yama kalınlığının dolayısıyla tabaka sayısının değişimi incelendiğinde hem yük eksenini yani levha eksenini için hem de levha kesitine paralel eksen için verilen yük-yer değiştirme grafiklerinde sayısal ve deneysel sonuçların uyum içerisinde oldukları görülmüştür. 4 tabakalı plakta yama için 8 tabaka, yani yaklaşık iki kat daha kalın yama kullanılması burkulma halinde yamanın plağa göre daha rijit davranmasına yani burkulmaya karşı çok daha fazla direnç göstermesine sebep olmuştur. Bu nedenle yalnızca 8 tabakalı yamada ani kuvvet düşüşü olmuş, plak yama ara yüzeyinde ayrılma

ve yamanın bittiği plak sınırında ise fiber burkulması oluşmuştur. 4 tabaka yerine 8 tabaka yama kullanımının hasar yükü üzerinde pozitif yönde daha etkili olduğu görülmüştür. Benzer olarak tabaka sayısının artışının yer değiştirmeyi artırdığı görülmüştür. Tabaka sayısının artışı kritik burkulma yükünü doğrusal olarak artırmaktadır. Bu doğrusal artış eğim için de geçerli olup %40 oranında artmıştır. Yama kalınlığındaki artışın hem hasar davranışına karşı tepkiyi hem de hasar yükünde oluşan sehimini artırdığı görülmüştür. Kritik burkulma yükü için deneysel ve sayısal sonuçlar arasındaki maksimum fark 8 tabakalı numunede %9 iken, minimum fark 2 tabakalı numunede %0.25 olarak elde edilmiştir. Bu fark yüzdeleri sayısal sonuçların deney sonuçları ile uyum içinde oluşunun göstergesidir.

- Yama uzunluğunun değişimi dikkate alındığında hem yük eksenini için hem de levha kesitine paralel eksen için elde edilen yük-yer değiştirme grafiklerinde deneysel ve sayısal sonuçlar birbiriyle uyumlu oldukları görülmüştür. 30 mm yerine 40 mm yama uzunluğu, 40 mm yerine 50 mm yama uzunluğu kullanmak maksimum hasar yükünü aynı oranda artırmıştır. Dolayısıyla yama uzunluğunun artışı maksimum yükü lineer olarak %6 oranında artırmıştır (Şekil 7.15a). Maksimum hasar yükünde oluşan lineer artış kritik burkulma yükünde de oluşmuş ancak eğimde böyle bir doğrusal artış görülmemiştir. Yama uzunluğunun artmasıyla birlikte yama üzerindeki levha yüzeyine dik normal gerilme dağılımlarının yani soyulma gerilmelerinin azaldığı görülmüştür.
- Plak fiber takviye açısı  $0^\circ$ 'den  $45^\circ$ 'ye çıktıkça maksimum yükün lineer olarak %11 oranında azaldığı görülmüştür (Şekil 7.21a). Maksimum yer değiştirme maksimum yükün aksine artmıştır. Kuvvetin plak fiber takviye açısı doğrultusunda etki etmesi halinde burkulmaya karşı direnç artmaktadır. Plak fiber açısının artması kritik burkulma yükünü lineer olarak %14 azaltmıştır (Şekil 7.22a). Fiber açısının artışına bağlı olarak yama yüzeyindeki gerilme artışı özellikle kayma gerilmelerinde görülmüştür.
- Plakların burkulma öncesi ve burkulma sonrası analizlerde  $[0^\circ]_4$ ,  $[0^\circ/45^\circ]_s$  ve  $[0^\circ/45^\circ]_2$  tabaka dizilimleri için deneysel ve sayısal sonuçların uyumlu oldukları görülmüştür.  $[0^\circ]_4$  tabaka dizilimli plakta hasar yükü, yer değiştirme, kritik yük ve eğim maksimumdur.  $[0^\circ/45^\circ]_s$  ve  $[0^\circ/45^\circ]_2$  tabaka dizilimli plaklarda tabakaların diziliminin simetrik olduğu  $[0^\circ/45^\circ]_s$  durumun maksimum hasar yükü daha yüksek çıkmıştır. Simetrik tabaka diziliminin simetrik olmayan tabaka dizilimine göre burkulma yükünü artırdığı söylenebilir. Simetrik dizilim sayesinde eğilmeye karşı direncin artırılması sağlanır.  $[0^\circ]_4$  tabaka diziliminde plakta delik etrafında kısmi kayma gerilme yoğunlaşmalarının olduğu görülmüştür.  $[0^\circ]_4$  tabaka diziliminde plak

kullanmak plağın çok daha fazla yükü karşıladığını ve bu sebeple yamada ve delik kenarlarında gerilmenin arttığı görülmüştür.

- Yama fiber açısının değişimi incelendiğinde hem yük ekseninde hem de levha kesitine paralel eksenlerdeki yer değiştirme grafiklerinde deneysel ve sayısal sonuçlar arasında uyum yakalanmıştır. Yama fiber açısı  $0^\circ$ ’den  $15^\circ$ ’ye çıktığında maksimum hasar yükü %12 azalırken  $30^\circ$ ’den  $45^\circ$ ’ye çıktığında maksimum hasar yükü %6 azalmıştır. Fiber takviye açısının artışına bağlı olarak hem normal gerilmelerde hem de kayma gerilmelerindeki artış yama kenarlarında gerilme yoğunlaşması olarak ortaya çıkmaktadır.
- Yama içerisine karbon nanotüp (CNT) eklenmesi durumu için yapılan analizde deneysel ve sayısal sonuçların birbiri ile uyum içerisinde olduğu görülmüştür. Yama fiber açısı  $\theta=0^\circ$  için %1 CNT katkısında bir deneyde,  $\theta=45^\circ$  için iki deney sonucu elde edilen yük-yer değiştirme grafiklerinde maksimum yük sonrası ani düşme olmuştur. %2 CNT katkılı  $0^\circ$  yama fiber açısı için bir deneyde (Şekil 7.38a),  $45^\circ$  yama fiber açılı yamada ise tüm deneyler için elde edilen grafiklerde ani yük düşüşleri olmuştur (Şekil 7.39a). Bu durumda yamaya CNT eklenmesinin özellikle de yama fiber açısının  $45^\circ$  olduğu durumda yükte ani düşmelere neden olduğu söylenebilir. Ani düşmelerin olması plak ve yama ara yüzeyinden ayrılmaların olduğunun göstergesidir.  $0^\circ$  ve  $45^\circ$  yama fiber açısında yamaya %1 CNT eklenmesi maksimum gerilmeyi %1 civarında artırmış ancak %2 CNT eklenmesi maksimum gerilmeyi hem  $0^\circ$  yamada hem de  $45^\circ$  yamada düşürmüştür. Bu nedenle yamaya CNT katkı oranının %1’den 2’ye artırılmasının hasar yükünü düşürdüğü söylenebilir. Hem  $0^\circ$  hem de  $45^\circ$  yama fiber açısı için kritik gerilme %1 ve %2 CNT eklenmesiyle düşmüştür.  $0^\circ$  yama fiber açısında eğim/yama kalınlığı %1 CNT eklenmesiyle kısmen artarken %2 CNT eklenmesiyle azalmış,  $45^\circ$  yama fiber açısında CNT oranının artışıyla eğim/yama kalınlığı sürekli azalmıştır.  $45^\circ$  yama fiber açıları için %2 CNT katkısı sonucu yama kenarlarındaki kayma gerilme yoğunlaşmasının düştüğü görülmüştür.
- Yama içerisine grafen eklenmesinin burkulma yüküne etkisini incelemek için yapılan analizlerde deneysel ve sayısal sonuçların birbiriyle uyumlu olduğu görülmüştür.  $0^\circ$  yama fiber açısında %1 ve %2 grafen katkılı yama kullanılması sonucu üretilen bazı numuneler için yapılan deneylerden elde edilen yük-yer değiştirme grafiklerinde yükte ani düşüş meydana gelmiştir. Bu durum yama bölgesindeki ara yüzey ayrılmasından kaynaklıdır.  $0^\circ$  yama fiber açısında yama malzemesine %1 grafen eklenmesi nano-katkısız yamanın maksimum gerilme değerini artırmış %2 grafen eklenmesi ise düşürmüştür.  $45^\circ$  yama fiber açısında yama malzemesine %1 ve %2 grafen eklenmesi maksimum gerilmeyi artırmıştır.  $0^\circ$  ve  $45^\circ$  her iki yama açısı için

yamaya %1 grafen eklenmesi maksimum yer değiştirme/kalınlık oranını artırmış, %2 grafen katılması oranı dūřürmüřtür. 0° ve 45° yama fiber açısında nano katkısız yamalı, %1 ve %2 grafen katkılı yamalarda grafen katkısının kritik gerilmeye önemli bir etkisi olmamıştır. Sadece 45° yama fiber açısında %1 grafen katkısı kritik gerilmeyi %20 artırmıştır. 0° ve 45° yama fiber açısında yamaya %2 grafen katkısının eęim/kalınlık oranı değişiminde nano katkısız yamaya göre bir etkisi gözlemlenmemiştir.

- Yapılan alışma sonucunda geometrik süreksizlik içeren kompozit plakların ve bu süreksizliklerin ıslak yama ile onarımı sonucu elde edilen yeni numunelerin burkulma öncesi ve sonrası davranışları farklı parametreler için incelenmiştir. Deneysel alışma sonucunda yukarıda değinildiği üzere çok özel durumlar haricinde plak ile yama arasında bir ayrılma meydana gelmemiştir. Dolayısıyla da ıslak yama tekniğinin başarılı bir şekilde bu çalışmada uygulandığı görülmüştür.
- Sayısal çalışmada literatürdeki genel çalışmaların aksine kritik yük sonrası plakların burkulma yük-yer değiştirme grafikleri elde edilmiştir. Bu durum deney sonuçlarının sayısal sonuçlarla karşılaştırılmasına imkân sağlamıştır.
- Yama uzunluğunun ve yama kalınlığının artması hasar yükünü artırırken fiber açısının artması yükü dūřürmektedir. Nano malzeme katkısı ise ancak belirli oranlarda burkulma yüküne pozitif etki sağlayabilmektedir. Elde edilen veriler ve uygulama metodu sayesinde bu noktada tasarımcılar kendi problemlerinin modellenmesi ve tasarlanmasında bu değişkenlerden optimum durumu seçmeliler.
- Çalışmada amaç yamalı kompozitlerin lineer olamayan burkulma davranışını incelemek ve modellemek olduğundan dolayı, burkulma sonrası hasar davranışı sayısal olarak incelenmemiştir. Çalışma plak hasarını da kapsayacak şekilde genişletilebilir. Ancak bu noktada plağın farklı mekanik özelliklerine ve yama ile plak ara yüzey kırılma tokluğu değerlerine de ihtiyaç vardır.

## KAYNAKLAR

- [1] Potoğlu, U. (2012). *Sandviç Kompozit Plakların Darbe Davranışları*, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
- [2] Yıldız, Y.O. (2007). *Desteklenmiş Kompozit Plakların Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Burkulma Analizi*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
- [3] Yeter, E., Erkiğ, A., Bulut, M. (2014). “Hybridization Effects On The Buckling Behavior Of Laminated Composite Plates”, *Composite Structures*, 118, 19-27
- [4] Valenca, S. L., Griza, S., Gomes De Oliveira, V., Sussuchi, E. M., Carvalho De Cunha, F. G. (2015). “Evaluation Of The Mechanical Behavior Of Epoxy Composite Reinforced With Kevlar Plain Fabric And Glass/Kevlar Hybrid Fabric”, *Compos. Part B Eng.*, vol. 70, pp. 1–8
- [5] Zhu, S., Yan, J., Chen, Z., Tong, M., Wang, Y. (2014). “Effect Of The Stiffener Stiffness On The Buckling And Post-Buckling Behavior Of Stiffened Composite Panels- Experimental Investigation”, *Composite Structures*, 120, 334 -345
- [6] Whittingham, B., Baker, A.A., Harman, A., Bitton, D. (2009). “Micrographic Studies On Adhesively Bonded Scarf Repairs To Thick Composite Aircraft Structure”, *Composites: Part A*, 40 1419–1432
- [7] Mariam, M., Afendi, M., Abdul Majid, M.S., Ridzuan, M.J.M., Gibson, A.G. (2018). “Tensile and Fatigue Properties Of Single Lap Joints Of Aluminium Alloy/Glass Fibre Reinforced Composites Fabricated with Different Joining Methods”, *Composite Structures*, 200, 647–658
- [8] Zhai, Y., Li, D., Li, X., Wang, L. (2015). “An Experimental Study On The Effect Of Joining Interface Condition On Bearing Response Of Single-Lap, Countersunk Composite-Aluminum Bolted Joints”, *Composite Structures*, 134, 190–198
- [9] Armentani, E., Laiso, M., Caputo, F., Sepe, R. (2017). “Numerical FEM Evaluation For The Structural Behavior Of A Hybrid (Bonded/Bolted) Single-Lap Composite Joint”, *Procedia Structural Integrity*, 8 137-153
- [10] Kim, K.-S., Yoo, J.S., Yi, Y.-M. Kim, C.-G. (2006). “Failure Mode And Strength Of Uni-Directional Composite Single Lap Bonded Joints With Different Bonding Methods”, *Composite Structures*, Vol. 72, pp. 477-485
- [11] Çetkin, E., Temiz, Ş., Ergün, R.K. (2016). “Farklı Çentik Geometrisine Sahip Alüminyum Levhaların Alüminyum Yamalarla Tamirinin Araştırılması”, *Journal of Life Sciences*, Volume 6 Number 2/2
- [12] Albedah, A., Khan, S.M.A., Benyahia, F., Bachir Bouiadjra, B. (2015). “Experimental Analysis Of The Fatigue Life Of Repaired Cracked Plate In Aluminum Alloy 7075 With Bonded Composite Patch”, *Eng. Fract. Mech.*, vol. 145, pp. 210–220.
- [13] Albedah, A., Khan, S.M.A., Benyahia, F., Bachir Bouiadjra, B. (2016). “Effect Of Load Amplitude Change On The Fatigue Life Of Cracked Al Plate Repaired With Composite Patch”, *Int. J. Fatigue*, vol. 88, pp. 1–9.
- [14] Park, H. ve Kong, C. (2011). “A Study On Low Velocity Impact Damage Evaluation And Repair Technique Of Small Aircraft Composite Structure”, *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 42, no. 9, pp. 1179–1188.
- [15] Jian-Bin, H., Xu-Dong, L., Zhi-Tao, M. (2015). “Fatigue Behavior Of Thick Center Cracked Aluminum Plates Repaired By Two-Sided Composite Patching”, *Mater. Des.*, vol. 88, pp. 331–335.

- [16] Rezgani, L., Madani, K., Feaugas, X., Touzain, S., Cohendoz, S., Valette, J. (2016). "Influence Of Water İngress Onto The Crack Propagation Rate İn A Aa2024-T3 Plate Repaired By A Carbon/Epoxy Patch", *Aerosp. Sci. Technol.*, vol. 55, pp. 359–365.
- [17] Osnes, H., McGeorge, D., Weitzenböck, J. R., Guthu, G.O. (2012). "Predicting Failure Of Bonded Patches Using A Fracture Mechanics Approach", *Int. J. Adhes. Adhes.*, vol. 37, pp. 102–111.
- [18] Jefferson Andrew, J. ve Arumugam, V. (2016). "Effect Of Patch Hybridization On The Compression Behavior Of Patch Repaired Glass/Epoxy Composite Laminates Using Acoustic Emission Monitoring", *Polym. Compos.*, vol. 74, pp. 155–166.
- [19] Ergun, E., Taşgetiren, S., Topçu, M. (2010). "Fatigue And Fracture Analysis Of Aluminum Plate With Composite Patches Under The Hygrothermal Effect", *Compos. Struct.*, vol. 92, no. 11, pp. 2622–2631.
- [20] Cheng, P., Gong, X. J., Hearn, D., Aivazzadeh, S. (2011). "Tensile Behaviour Of Patch-Repaired Cfrp Laminates", *Compos. Struct.*, vol. 93, no. 2, pp. 582–589.
- [21] Aggelopoulos, E.S., Righiniotis, T.D., Chryssanthopoulos, M.K. (2014). "Composite Patch Repair Of Steel Plates With Fatigue Cracks Growing İn The Thickness Direction", *Compos. Struct.*, vol. 108, no. 1, pp. 729–735.
- [22] Aakula, J. ve Saarela, O. (2014). "An Experimental Study On The Fatigue Performance Of Cfrp And Bfrp Repaired Aluminium Plates", *Compos. Struct.*, vol. 118, no. 1, pp. 589–599.
- [23] Gong, X.J., Cheng, P., Aivazzadeh, S., Xiao, X. (2015). "Design And Optimization Of Bonded Patch Repairs Of Laminated Composite Structures", *Compos. Struct.*, vol. 123, pp. 292–300.
- [24] Schubbe, J.J., Bolstad, S.H., Reyes, S. (2016). "Fatigue Crack Growth Behavior Of Aerospace And Ship-Grade Aluminum Repaired With Composite Patches İn A Corrosive Environment", *Compos. Struct.*, vol. 144, pp. 44–56.
- [25] Coelho, S.R.M., Reis, P.N.B., Ferreira, J.A., Pereira, A.M. (2017). "Effects Of External Patch Configuration On Repaired Composite Laminates Subjected To Multi-İmpacts", *Compos. Struct.*, vol. 168, pp. 259–265.
- [26] Park, H. ve Kong, C. (2013). "Experimental Study On Barely Visible İmpact Damage And Visible İmpact Damage For Repair Of Small Aircraft Composite Structure", *Aerosp. Sci. Technol.*, vol. 29, no. 1, pp. 363–372.
- [27] Caminero, M.A., Lopez-Pedrosa, M., Pinna, C., Soutis, C. (2013). "Damage Monitoring And Analysis Of Composite Laminates With An Open Hole And Adhesively Bonded Repairs Using Digital İmage Correlation", *Compos. Part B Eng.*, vol. 53, pp. 76–91.
- [28] Manalo, A., Sirimanna, C., Karunasena, W., McGarva, L., Falzon, P. (2016). "Pre-İmpregnated Carbon Fibre Reinforced Composite System For Patch Repair Of Steel İ-Beams", *Constr. Build. Mater.*, vol. 105, pp. 365–376.
- [29] Gan, Y.X. (2009). "Effect Of İnterface Structure On Mechanical Properties Of Advanced Composite Materials", *Int. J. Mol. Sci.*, vol. 10, no. 12, pp. 5115–5134.
- [30] Erden, S., Sarıkanat, M., Yıldız, H. (2009). "Karbon Fiber Takviyeli Termoplastik Kompozitlerde Ara Yüzey Dayanımının Arttırılmasında Kullanılan Yöntemler", *Tekstil Teknolojileri Elektronik Dergisi*, Cilt: 3, No: 1, (39-56)
- [31] Erden, S. ve Yıldız, H. (2009). "Karbon Lif İslanabilirliği Ve Yüzey Enerjisinin Plazma Oksidasyonu Yoluyla Değiştirilmesi", *Tekstil Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 3(2), 11-19.

- [32] Acar, V., Akbulut, H., Sarıkanat, M., Seydibeyoğlu, M.Ö., Yoldaş, S., Erden, S. (2014). “Karbon Elyaf Takviyeli Prepreg Kompozitlerde Arayüzey Mekanizmasının Karbon Nanoyapı Katkısıyla İyileştirilmesi”, *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, Cilt:10, No:3, (43-51).
- [33] Rafiee, M.A., Rafiee, J., Wang, Z., Song, H., Yu, Z.Z., Koratkar, N. (2009). “Enhanced Mechanical Properties Of Nanocomposites At Low Graphene Content”, *ACS Nano*, vol. 3, no. 12, pp. 3884–3890.
- [34] Zaman, I., Phan, T.T., Kuan, H.C., Meng, Q., Bao La, L.T., Luong, L., Youssf, O., Ma, J. (2011). “Epoxy/Graphene Platelets Nanocomposites With Two Levels Of Interface Strength”, *Polymer (Guildf.)*, vol. 52, no. 7, pp. 1603–1611.
- [35] Li, W., Dichiaro, A., Bai, J. (2013). “Carbon Nanotube-Graphene Nanoplatelet Hybrids As High-Performance Multifunctional Reinforcements In Epoxy Composites”, *Compos. Sci. Technol.*, vol. 74, no. January, pp. 221–227.
- [36] Ávila, A.F. Peixoto, L.G.Z. de O., Silva Neto, A., de Ávila Jr, J., Carvalho, M.G.R. (2012). “Bending Investigation On Carbon Fiber / Epoxy Composites Nano- Modified By Graphene”, *J. Brazilian Soc. Mech. Sci. Eng.*, vol. XXXIV, no. 3, pp. 269–275.
- [37] Shishevan, F.A., Acar, V., Akbulut, H., Seydibeyoğlu, M.Ö. “Reçinesine Grafen Ve Karbon Nanotüp Eklenmesinin Karbon Elyaf Takviyeli Kompozitlerin Mekanik Özellikleri Ve Darbe Davranışları Üzerindeki Etkileri”, pp. 1–8.
- [38] Xu, Y. ve Van Hoa, S. (2008). “Mechanical Properties Of Carbon Fiber Reinforced Epoxy/Clay Nanocomposites”, *Composites Science and Technology*, 68, 854-861.
- [39] Kim, K.S., Zhao, Y., Jang, H., Lee, S.Y., Kim, J.M., Kim, K.S., Ahn, J.H., Kim, P., Choi, J.Y., Hong, B.H. (2009). “Large-Scale Pattern Growth Of Graphene Films For Stretchable Transparent Electrodes”, *Nature*, 457, 706-710.
- [40] Hao, L.C. ve Yu, W.D. (2010). “Comparison Of The Morphological Structure And Thermal Properties Of Basalt Fiber And Glass Fiber”, *Proceedings of 2009 International Textile Science and Technology Forum*, Xian, China.
- [41] Üçüncü, H. (2005). *Plaklarda Delik Bulunması Halinde Burkulma Yükünün İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
- [42] Ovesy, H.R., Taghizadeh, M., Kharazi, M. (2012). “Post-Buckling Analysis Of Composite Plates Containing Embedded Delaminations With Arbitrary Shape By Using Higher Order Shear Deformation Theory”, *Composite Structures*, 92, 1243-1249.
- [43] Kharazi, M., Ovesy, H.R., Taghizadeh, M. (2010). “Buckling Of The Composite Laminates Containing Through-The-Width Delaminations Using Different Plate Theories”, *Composite Structures*, 92, 1176-1183.
- [44] Czapski, P. ve Kubiak, T. (2015). “Numerical And Experimental Investigations Of The Post-Buckling Behavior Of Square Cross-Section Composite Tubes”, *Composite Structures*, 132, 1160-1167.
- [45] Yaman, M. (2005). *İzotrop Dikdörtgen Levhaların Burkulma Analizi*, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü
- [46] Eryiğit, E. (2006). *Tabakalı Kompozit Çubuklarda Yanal Yük Etkisi İle Oluşan Burkulma Davranışlarının İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü

- [47] Labeas, G., Belesis, S., Stamatelos, D. (2008). "Interaction Of Damage Failure And Post-Buckling Behaviour Of Composite Plates With Cut-Outs By Progressive Damage Modelling", *Compos. Part B Eng.*, vol. 39, no. 2, pp. 304-315.
- [48] Bingöl, M.F. (2011). *Dairesel Plakların Burkulma Analizi*, Yüksek Lisans Tezi, Erzurum Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
- [49] Baba, A.B. (2013). *Delaminasyonlu Tabakali Kompozit Plakaların Burkulma Analizi*, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
- [50] Turan, K. (2013). "Buckling behavior of adhesively patch-repaired composite plates", *Journal of Composite Materials*, vol. 48 no. 26 pp. 3253-3261
- [51] Erdem, S., Yıldız, A., Kaman, M.O., Gür, M. (2019). "Wet Patch Application For Hybrid Composites By Using Vacuum Infusion Method", *8th International Conference on Advanced Technologies (ICAT'19)* 235-240
- [52] Erdem, S., Gür, M., Kaman, M.O., Orcen, G. (2017). "Effect of Hole Geometry on Buckling Behavior for Steel Plates", *International Conference on Advances and Innovations in Engineering (ICAIE)* 567-572
- [53] Szilard, R. (1974). *Theory And Analysis Of Plates*, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1-5, 374-377
- [54] Strain, J. (2003). *Buckling And The Arc-Lenght Method*, The Focus, 14:23
- [55] "Help Files" (2014). ANSYS® Inc.,
- [56] Ruggiero, E. J. (2005). *Modeling And Control Of Spider Satellite Components*, PhD thesis, Mechanical Engineering, 87-90
- [57] Ugural, A. C. (1986). *Stresses In Plates And Shells 2nd Ed.*, McGraw-Hill, New York, 71-84, 305-318
- [58] Timoshenko, S.P. ve Gere, J.M. (1988). *Theory Of Elastic Stability*, McGraw-Hill, New York, 319-429
- [59] Von Karman, T. (1910). *Festigkeitsprobleme Im Maschinenbau*, In *Encyclopadieder Mathematischen Wissenschaften*, 4:311-385
- [60] Timoshenko, S.P. ve Woinowsky-Krieger, S. (1959). *Theory Of Plates And Shells*, McGraw-Hill, London, 79-104, 396-425
- [61] Jones, R.M. (1999). *Mechanics Of Composite Materials*, Taylor&Francis, Inc., Philadelphia, USA, 55-87, 187-201
- [62] Agarwal, B.D., Broutman, L.J., Chandrashekhara, K. (2006). *Analysis And Performance Of Fiber Composites*, *John Wiley & Sons, Inc.*, New Jersey
- [63] Wake W.C. (1986). "Adhesion And The Formulation Of Adhesives, Stuctural Adhesives In Engineering, Proceedings Of The Institution Of Machanichal Engineers", *IMechE*, 151/86, 161/168
- [64] Houwink R. ve Salomon, G. (1965). *Adhesion And Adhesives* , 2nd Edition, Elsevier publishing Co.
- [65] Clarke, S. (2002). *Field Repair Of Composite Plates Using Fibre Metal Laminates*, M.S. Thesis. Carleton University, Ottawa, Ontario.
- [66] Gunaydin, B. (2010). *Kompozit Yama İle Onarılmış Yüzey Çentikli Filaman Sarım Borularda Yorulma Davranışları*, Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
- [67] Abrate, S. (1998). *Impact On Composite Structures*, Cambridge University Press, Cambridge.
- [68] Dağdelen, O. (2010). *Hasarlı Kompozit Plaklarda Onarım Optimizasyonu*, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

- [69] Akgün, Y. (2010). *Onarılmış Kompozit Plakların Darbe Davranışları*, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
- [70] Sennet, M.S. (1989). *Field Repair Of Composite Materials In Army Service: Planning For The Future*, US Army Materials Technology Laboratory, MTL TR 89-45.
- [71] Hoskin, B. ve Baker, A. (1986). *Composite Materials For Aircraft Structures*, AIAA Education Series, AIAA, New York.
- [72] Baker, A. (1997). *Joining And Repair Of Aircraft Composite Structures*. In: *Composites Engineering Handbook*. P.K. Mallick, ed. Marcel Dekker, New York. pp. 671-776.
- [73] Armstrong, K.B. ve Barrett, R.T. (1998). *Care And Repair Of Advanced Composites*. SAE Press, Warrendale, PA.
- [74] Niu, M.C.Y. (1992). *Composite Airframe Structures: Practical Design Information And Data*, Conmilt Press, Hong Kong.
- [75] Chicken, S.H., Welburn, S., Reed, S. (1997). "Repairing Composite Aircraft Structures-Raf Experience Of Peacetime And Battle Damage Techniques", *Aeronautical Journal* 101 (1006), 277-285.
- [76] Yücel, S.B. (2015). *Kompozit Onarım Bölgesinin Kirilma Davranışları Üzerindeki Etkileri*, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
- [77] <http://www.kompozitsan.com/tr/epoksi-ve-polyester-recineler/400-f-3487-epoxy-sertlestirici.html>.2019
- [78] Gültekin. K. (2018). *Havacılık Alanında Kullanılan Nanoyapı Katkılı Yapısal Yapıştırıcıların Mekanik Özelliklerinin DeneySEL Olarak İncelenmesi*, Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Atatürk Üniversitesi, Erzurum.
- [79] <https://nanografi.com/graphene/graphene-nanoplatelets/>.2019
- [80] Erdem. S, KAMAN. M.O., GUR, M. (2019). "Post-Buckling Behavior Of Carbon Fiber Epoxy Composite Plates", *Journal of Mechanical Science and Technology* 33 (4) 1723~1730

# ÖZGEÇMİŞ

**Serkan ERDEM**

## KİŞİSEL BİLGİLER

**Doğum Yeri** : Selim/KARS  
**Doğum Yılı** : 20.05.1983  
**Uyruğu** : T.C.  
**Adres** : Çayda Çıra Mah. Akçay Sok. DG 13 B 16  
**E-posta** : serdem@firat.edu.tr  
**Yabancı Diller** : İngilizce (Düzey: Orta)

## EĞİTİM BİLGİLERİ

**Yüksek Lisans** : “İç Sabitlemeyle Birleştirilmiş İnsan Bacağı Uzun Kemik Kırıklarının Dinamik Analizi”  
Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine mühendisliği Anabilim Dalı, 2013  
Danışman: Dr. Öğr. Üy. Mustafa GÜR  
**Lisans** : Selçuk Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 2006  
**Lise** : Kadri Yılmaz Lisesi, ZONGULDAK, 2001

## ARAŞTIRMA DENEYİMİ

- ✓ UTEST 1-40 ton universal çekme cihazı, Sıcaklık kontrollü vakum infüzyon tezgahı, Ultrasonik karıştırıcı, Sulu mermer kesme tezgahı
- ✓ ANSYS, Solidworks

## AKADEMİK FAALİYETLER

### Makaleler:

1. Post-buckling behavior of carbon fiber epoxy composite plates
2. Static and dynamic analyses of fracture fixation bone-plate systems for different plate materials and dimensions.

### Bildiriler:

1. Wet patch application for hybrid composites by using vacuum infusion method
2. Investigation of the Changes of the Screw Parameters Used in the Treatment of Tibial Fractures
3. Stress Analysis Of Long Fractures on Human Leg Bone Combined With Internal Fixation
4. Production Of Glass Fiber Reinforced Photovoltaic Composite Panel And Investigation Of Its Electrical Properties
5. Effect of Hole Geometry on Buckling Behavior for Steel Plates

### Projeler:

1. Nanotüp Takviyeli Islak Yama İle Tamir Edilmiş Kompozitlerin Lineer Olmayan Burkulma Analizi(217M140)
2. Vakum infüzyon yöntemiyle yama yapılmış hibrit kompozit plaklarda lineer olmayan burkulma analizi(MF.16.43)