
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

# KOMPOZİT PLAKALARDA HAFİFLETME DELİĞİ ETRAFINDAKİ GÜÇLENDİRMENİN, ÇEKME VE KAYMA YÜKÜ ALTINDA İNCELENMESİ

**Arif Emre ÖRÜN**

**DOKTORA TEZİ**
**MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ**
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**TEMMUZ 2023**

## ETİK BEYAN

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

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

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

Arif Emre ÖRÜN

20/07/2023

# KOMPOZİT PLAKALARDA HAFİFLETME DELİĞİ ETRAFINDAKİ GÜÇLENDİRMENİN, ÇEKME VE KAYMA YÜKÜ ALTINDA İNCELENMESİ

(Doktora Tezi)

Arif Emre ÖRÜN

GAZİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Temmuz 2023

## ÖZET

Havacılık yapılarında kullanılan metal ya da kompozit parçalarda çeşitli sebeplerden ötürü hafifletme delikleri açılmaktadır. Açılan bu delikler, yapının mukavemetini düşürdüğünden gerilmenin en kritik olduğu delik etrafına güçlendirme tasarımı yapılması gerekmektedir. Delikli kompozit levhalarda zayıflayan yapının güçlendirilmesi için farklı yöntemler uygulanabilmektedir. Bu çalışmada, delik etrafındaki dört güçlendirme modelinin (yüzük, papatya, kare ve elips) yalın çekme, yalın kayma ve birleşik (hem çekme hem de kayma yükleri) yükler altında Tsai-Wu bozulma modu kriterine göre karşılaştırması sunulmaktadır. Sonlu elemanlar analizi yöntemi ile yapılan bu karşılaştırma öncesinde 12 adet çekme ve 6 adet kayma kumaş tipi karbon epoksi prepreg test numunesi ile çekme testleri yapılmıştır. Kayma testi numunelerinin testleri sırasında, dijital görüntü korelasyonu (DIC) yöntemi kullanılarak gerinim dağılımı elde edilmiştir. Hem çekme testinden elde edilen uygulanan kuvvet-deformasyon eğrisi hem de DIC tekniği ile elde edilen gerinim dağılımı ile sonlu elemanlar doğrulaması yapılmıştır. Oluşturulan hafifletme deliği hacminin %38'ine sahip dört farklı güçlendirme modelinin, güçlendirmesiz yapıya kıyasla çekme ve kayma yükleri altında en az %30 oranında mukavemet artışı sağladığı görülmüştür. Birleşik yükler altında çekme/kayma yükü oranına göre güçlendirme tiplerinde farklı oranlarda iyileştirmeler sağlanmaktadır.

| | | |
|---|---|---|
| Bilim Kodu | : | 91417 |
| Anahtar Kelimeler | : | Karbon Epoksi Prepreg, Hafifletme Deliği, Çekme Testi, Kompozit Bozulma Modu, Dijital Görüntü Korelasyonu (DIC) |
| Sayfa Adedi | : | 99 |
| Danışman | : | Doç. Dr. Elmas SALAMCI |

# INVESTIGATION OF REINFORCEMENT AROUND THE LIGHTENING HOLE IN COMPOSITE PLATES UNDER TENSION AND SHEAR LOADS

(Ph. D. Thesis)

Arif Emre ÖRÜN

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

July 2023

## ABSTRACT

Lightening holes are made in metal or composite parts used in aviation structures for various reasons. Since these holes reduce the strength of the structure, it is necessary to design a reinforcement around the hole where the stress is most critical. Different methods can be applied to strengthen the weakened structure in perforated composite plates. In this study, a comparison of the four reinforcement models around the hole (ring, daisy, square and ellipse) under pure tension, pure shear and combined loadings (both tensile and shear loads) is presented according to the Tsai-Wu failure criteria. Before this comparison, which was carried out with the finite element analysis method, tensile tests were performed with 12 tensile and 6 shear woven carbon epoxy prepreg test specimens. During the tests of shear test specimens, the strain distribution was obtained using the digital image correlation (DIC) method. Finite element verification was performed with both the applied force-deformation curve obtained from the tensile test and the strain distribution obtained by the DIC technique. It has been observed that four different reinforcement models, which have 38% volume of the created lightening hole, provide at least by 30% strength improvement to the unreinforced structure under tensile and shear loadings. Under combined loadings, according to the tensile/shear load ratio, the reinforcement types provide improvements at different rates.

| | | |
|---|---|---|
| Science Code | : | 91417 |
| Key Words | : | Digital Image Correlation (DIC), Woven Carbon Epoxy Prepreg, Lightening Hole, Mechanical Testing, Composite Failure Mode |
| Page Number | : | 99 |
| Supervisor | : | Assoc. Prof. Dr. Elmas SALAMCI |

# TEŞEKKÜR

Tez çalışması sürecinde beni yönlendiren, bilgi ve tecrübeleriyle karşılaştığım zorlukları aşmamda yardımcı olan kıymetli danışman hocam Doç. Dr. Elmas SALAMCI 'ya, değerli görüş ve tavsiyeleriyle tez çalışmamın kalitesinin artırılmasında çok önemli katkıları bulunan tez izleme komitesi üyeleri Prof. Dr. Demirkan ÇÖKER ve Doç. Dr. Tunç APATAY hocalarıma saygılarımı sunarım.

Doktora çalışmam boyunca desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen göz aydınlığım sevgili eşim Hümeyra Betül, evlatlarım Bahaddin ile Hanne ve bütün aile fertlerime gösterdikleri fedakârlık ve sabır sebebiyle şükranlarımı sunarım.

Bu çalışma kapsamında testlerin icra edilmesinde sağladıkları destek ve önemli katkılarından dolayı TÜBİTAK SAGE ve ODTÜ Havacılık ve Uzay Fakültesi çalışanlarına teşekkür ediyorum.

# İÇİNDEKİLER

**Sayfa**

ÖZET ..... iv

ABSTRACT ..... v

TEŞEKKÜR ..... vi

İÇİNDEKİLER ..... vii

ÇİZELGELERİN LİSTESİ ..... ix

ŞEKİLLERİN LİSTESİ ..... x

RESİMLERİN LİSTESİ ..... xv

SİMGELER VE KISALTMALAR ..... xvi

1. GİRİŞ ..... 1

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI ..... 5

3. MALZEME VE TEST DÜZENEĞİ ..... 31

3.1. Çekme Testi Numune Üretimi ..... 32

3.1.1. Deliksiz plaka çekme testi ..... 32

3.1.2. Güçlendirmesiz delikli çekme testi ..... 35

3.1.3. Güçlendirmeli test numunesi üretimi ..... 36

3.1.4. Papatya güçlendirmeli çekme testi ..... 38

3.1.5. Yüzük güçlendirme çekme testi ..... 40

3.2. Kayma Testi Numune Üretimi ..... 41

3.3. Test Düzenekleri ..... 44

3.3.1. Çekme testi düzeneği ..... 44

3.3.2. Kayma numuneleri için çekme testi düzeneği ..... 45

4. SONLU ELEMANLAR MODELLEMESİ ..... 47

5. TEST SONUÇLARI ..... 53

**Sayfa**

5.1. Deliksiz Çekme Testi Sonuçları ..... 53

5.2. Delikli Çekme Testi Sonuçları..... 54

5.3. Kayma Numuneleri için Çekme Testi Sonuçları..... 57

5.4. Dijital Görüntü Korelasyonu İşlemi ..... 62

6. TEORİK HESAP İLE KIYASLAMA..... 73

7. SONLU ELEMANLAR DOĞRULAMA ÇALIŞMASI ..... 75

8. GÜÇLENDİRME MODELİ KARŞILAŞTIRMASI..... 81

8.1. Yalın Çekme Yükü Altında Analiz ..... 81

8.2. Yalın Kayma Yükü Altında Analiz..... 85

8.2. Birleşik Yükleme Altında Analiz ..... 88

9. SONUÇ VE ÖNERİLER..... 93

KAYNAKLAR ..... 95

ÖZGEÇMİŞ ..... 99

# ÇİZELGELERİN LİSTESİ

**Çizelge** **Sayfa**

Çizelge 3.1. Hexply 8552 AGP193-PW kumaş tipi karbon epoksi prepreg malzemesinin mekanik özellikleri ..... 31

Çizelge 3.2. TS-1, TS-2 ve TS-3 numuneleri üretim sonrası geometrik ölçümleri ..... 33

Çizelge 3.3. TS-4, TS-5 ve TS-6 numuneleri üretim sonrası geometrik ölçümleri ..... 36

Çizelge 3.4. TS-7, TS-8 ve TS-9 numuneleri üretim sonrası geometrik ölçümleri ..... 39

Çizelge 3.5. TS-10, TS-11 ve TS-12 numuneleri üretim sonrası geometrik ölçümleri ..... 40

Çizelge 3.6. TS-13 – TS-18 numuneleri üretim sonrası geometrik ölçümleri ..... 42

Çizelge 5.1. TS-01, TS-02 ve TS-03 için maksimum ve ortalama çekme yükü..... 54

Çizelge 5.2. TS-04 – TS-12 için maksimum ve ortalama çekme yükü ..... 56

Çizelge 5.3. Güçlendirmesiz ve güçlendirmeli numuneler için t-test sonuçları ..... 57

Çizelge 5.4. TS-13, TS-14 ve TS-15 için maksimum ve ortalama çekme yükü..... 60

Çizelge 5.5. TS-16, TS-17 ve TS-18 için maksimum ve ortalama çekme yükü..... 61

Çizelge 8.1. Farklı çekme/kayma yük oranları için hata oranı değerleri ..... 90

# ŞEKİLLERİN LİSTESİ

**Şekil** **Sayfa**

Şekil 1.1. Airbus A380 Uçağı Al-Li alaşımı ve CFRP zemin kirişleri ..... 2

Şekil 2.1. Pyl ve diğerleri (2018) tarafından tasarlanan dikdörtgen test geometrisi ..... 5

Şekil 2.2. Pyl ve diğerleri (2018) tarafından tasarlanan dambıl test geometrisi ..... 6

Şekil 2.3. Pyl ve diğerleri (2018) tarafından yürütülen çekme test görüntüleri ..... 6

Şekil 2.4. Pyl ve diğerleri (2018) tarafından yürütülen DIC çalışması görselleri ..... 7

Şekil 2.5. Pyl ve diğerleri (2018) tarafından yürütülen sonlu elemanlar analiz sonuçları ..... 8

Şekil 2.6. Akbarpour ve Hallström (2019) tarafından tasarlanan plaka geometrisi ve burç yerleşim modelleri ..... 9

Şekil 2.7. Akbarpour ve Hallström (2019) tarafından gerçekleştirilen dairesel burca sahip plakalar için çekme testi görselleri ..... 9

Şekil 2.8. Akbarpour ve Hallström (2019) tarafından gerçekleştirilen dairesel burca sahip plakalar için DIC görselleri ..... 10

Şekil 2.9. Han ve diğerleri (2019) tarafından tasarlanan numune geometrisi ..... 11

Şekil 2.10. Han ve diğerleri (2019) tarafından kurulan çekme testi düzeneği ..... 11

Şekil 2.11. Han ve diğerleri (2019) tarafından tasarlanan karbon nano tüp takviyeli ve takviyesiz modelin SE gerilme sonuçları ..... 12

Şekil 2.12. Han ve diğerleri (2019) tarafından gerçekleştirilen testler sırasında elde edilen çekme yüküne bağlı uzama eğrileri ..... 12

Şekil 2.13. Zappino ve diğerleri (2020) tarafından tasarlanan numune geometrik parametreler ..... 13

Şekil 2.14. Zappino ve diğerleri (2020) tarafından tasarlanan kompozit katman dizilimi ..... 14

Şekil 2.15. Zappino ve diğerleri (2020) tarafından kurulan test düzeneği ..... 15

Şekil 2.16. Zappino ve diğerleri (2020) tarafından gerçekleştirilen DIC ile SEA karşılaştırması ..... 15

Şekil 2.17. Zappino ve diğerleri (2020) tarafından sunulan Kε eğri karşılaştırması ..... 16

**Şekil** **Sayfa**

Şekil 2.18. Botzkowski ve diğerleri (2016) tarafından sunulan plaka geometrisi ve takviye ipliği yerleşimi ..... 17

Şekil 2.19. Botzkowski ve diğerleri (2016) tarafından üretimi yapılan plakaya uygulanmış takviye ipliği görseli ..... 17

Şekil 2.20. Botzkowski ve diğerleri (2016) tarafından kurulan test düzeneği ..... 18

Şekil 2.21. Botzkowski ve diğerleri (2016) tarafından oluşturulan sonlu elemanlar modellemesi ..... 18

Şekil 2.22. Botzkowski ve diğerleri (2016) tarafından tasarlanan takviye ipliğe kesit parametreleri ..... 19

Şekil 2.23. Botzkowski ve diğerleri (2016) tarafından yürütülen takviye ipliği tasarım karşılaştırma eğrileri ..... 19

Şekil 2.24. Han ve diğerleri (2008) tarafından tasarlanan plaka geometrisi ve dikiş yerleşimi ..... 20

Şekil 2.25. Han ve diğerleri (2008) tarafından gerçekleştirilen testlerin sonuçları ..... 21

Şekil 2.26. Humberto ve diğerleri (2020) tarafından tasarım ve üretimi yapılan fiber dizilim modelleri ve test numuneleri ..... 22

Şekil 2.27. Humberto ve diğerleri (2020) tarafından kurulan test düzeneği ..... 22

Şekil 2.28. Humberto ve diğerleri (2020) tarafından gerçekleştirilen testlerin gerinme-yükleme eğrileri ..... 23

Şekil 2.29. Humberto ve diğerleri (2020) tarafından oluşturulan sonlu elemanlar modellemesi detayları ..... 24

Şekil 2.30. Humberto ve diğerleri (2020) tarafından gerçekleştirilen testlerde %50 ve %95 yüklemeler altında DIC ve kırılma görselleri ..... 24

Şekil 2.31. Muc ve Ulatowska (2012) tarafından tasarlanan plaka ve güçlendirme geometrisi ..... 25

Şekil 2.32. Muc ve Ulatowska (2012) tarafından yürütülen çalışmalarda plaka dizilim açısının gerilmeye ve güçlendirmenin yapı dayanımına etkisinin karşılaştırması ..... 26

Şekil 2.33. Zhu ve diğerleri (2018) tarafından tasarlanan plaka geometrisi ..... 27

Şekil 2.34. Zhu ve diğerleri (2018) tarafından tasarlanan güçlendirme şekilleri ve plakaya yerleşimleri ..... 28

**Şekil** **Sayfa**

Şekil 2.35. Zhu ve diğerleri (2018) tarafından yürütülen testlerden elde edilen karşılaştırma verileri ..... 28

Şekil 3.1. ASTM D3039 çekme testi numune geometrisi ..... 32

Şekil 3.2. Su jeti yöntemi alt parçaları ve parametreleri ..... 34

Şekil 3.3. ASTM D5766 delikli çekme plaka numune geometrisi ..... 35

Şekil 3.4. Papatya ve yüzük tipi güçlendirme geometrileri ..... 36

Şekil 4.1. Sonlu elemanlar modelleme akışı ..... 47

Şekil 4.2. Örnek sonlu elemanlar çözüm ağı görseli ..... 48

Şekil 4.3. 1 mm ve 0,8 mm eleman boyutları için elde edilen gerinme dağılımları ..... 49

Şekil 4.4. 0,7 mm ve 0,6 mm eleman boyutları için elde edilen gerinme dağılımları ..... 50

Şekil 4.5. Eleman sayısına bağlı gerinme değeri eğrisi ..... 50

Şekil 4.6. Delikli kayma numunesi için sınır şartı modellemesi ..... 51

Şekil 4.7. ANSYS ACP (Post) hata kriteri seçimi ekranı ..... 51

Şekil 5.1. ASTM D3039 çekme testi ve üretici datası yükleme-uzama eğrileri ..... 54

Şekil 5.2. TS-04 – TS-12 delikli çekme testleri yükleme-uzama eğrileri ..... 56

Şekil 5.3. TS-13 – TS-15 için çekme test cihazı ve DIC işlemi yükleme-uzama eğrileri ..... 60

Şekil 5.4. TS-16 – TS-18 için test cihazı ve DIC işlemi yükleme-uzama eğrileri ..... 61

Şekil 5.5. ASTM3518 gerilme-gerinme eğrisi görseli ..... 62

Şekil 5.6. DIC metodu işlem akışı ..... 63

Şekil 5.7. Ncorr – referans ve takip edilecek görsellerin eklenmesi ..... 64

Şekil 5.8. Ncorr – ilgili bölgenin seçimi ..... 64

Şekil 5.9. Ncorr – DIC parametre seçimi ..... 65

Şekil 5.10. Ncorr – deplasman ayarları seçimi ..... 65

**Şekil** **Sayfa**

Şekil 5.11. Ncorr – gerinme gösterim ayarları seçimi ..... 66

Şekil 5.12. TS14 numunesi için DIC işlemi sonrası gerilme dağılımları ve ham fotoğraflar ..... 67

Şekil 5.13. TS15 numunesi için DIC işlemi sonrası gerilme dağılımları ve ham fotoğraflar ..... 68

Şekil 5.14. TS16 numunesi için DIC işlemi sonrası gerilme dağılımları ve ham fotoğraflar ..... 69

Şekil 5.15. TS17 numunesi için DIC işlemi sonrası gerilme dağılımları ve ham fotoğraflar ..... 70

Şekil 5.16. TS18 numunesi için DIC işlemi sonrası gerilme dağılımları ve ham fotoğraflar ..... 71

Şekil 6.1. Duan ve diğerleri (2020) tarafından hazırlanan gerilme yoğunluğu eğrisi..... 73

Şekil 7.1. ASTM D3039 çekme testi ve SE analiz sonucu yükleme-uzama eğrileri..... 75

Şekil 7.2. Çekme yükleri altında delikli numuneler için SE analizi deformasyon dağılımları ..... 76

Şekil 7.3. Yüzük ve Papatya modelleri için detaylı SE analiz görseli ..... 77

Şekil 7.4. TS-04 – TS-12 çekme testi ve SEA sonucu yükleme-uzama eğrileri ..... 78

Şekil 7.5. [$45_{15}$] dizilimli delikli numuneler için 40 ve 50. saniyelerdeki ve DIC ve SE analizi gerinim dağılımları ..... 79

Şekil 7.6. [$45_{15}$] dizilimli delikli numuneler için 70 ve 80. saniyelerdeki DIC ve SE analizi gerinim dağılımları ..... 80

Şekil 8.1. Yalın çekme yükü altındaki analizlerde kullanılan geometri ..... 81

Şekil 8.2. Farkı güçlendirme alanına sahip yüzük güçlendirmeli plaka için hata oranı eğrisi ..... 82

Şekil 8.3. Dört güçlendirme modelinin geometrik ölçüleri ..... 83

Şekil 8.4. 117 MPa yalın çekme yüklemesi altında Tsai-Wu hata oranı dağılımları..... 85

Şekil 8.5. Yalın kayma yükü altındaki analizlerde kullanılan geometri ve sınır şartı .... 86

Şekil 8.6. 51 MPa yalın kayma yüklemesi altında Tsai-Wu hata oranı dağılımları ..... 88

Şekil 8.7. Birleşik yükleme altındaki analizlerde kullanılan geometri ve sınır şartı ..... 89

**Şekil** **Sayfa**

Şekil 8.8. Çekme/Kayma yük oranına bağlı hata oranı eğrileri ..... 90

Şekil 8.9. Çekme/kayma yük oranı bir koşulu için hata oranın ve kesit görüntüleri ..... 92

# RESİMLERİN LİSTESİ

**Resim** **Sayfa**

Resim 3.1. Üretimi yapılan TS-1, TS-2 ve TS-3 numuneleri ..... 33

Resim 3.2. Üretimi yapılan TS-4, TS-5 ve TS-6 numuneleri..... 35

Resim 3.3. TS-7 – TS-12 güçlendirme uygulanacak delikli plakalar ..... 37

Resim 3.4. Cıvatalara kalıp ayırıcı uygulaması ..... 37

Resim 3.5. Güçlendirme yapıştırma işlemi ..... 38

Resim 3.6. Güçlendirmeli numunelerin fırında kürleme işlemi ..... 38

Resim 3.7. TS-7, TS-8 ve TS-9 Papatya güçlendirmeli test numuneleri ..... 39

Resim 3.8. TS-10, TS-11 ve TS-12 Yüzük güçlendirmeli test numuneleri ..... 40

Resim 3.9. TS-13 – TS-18 kayma test numunesi plakaları..... 41

Resim 3.10. Kayma test numuneleri maskeleme işlemi..... 42

Resim 3.11. Kayma test numuneleri boyama işlemi ..... 43

Resim 3.12. Noktalı boyanma işlemi tamamlanmış test numuneleri ..... 43

Resim 3.13. Çekme test cihazı ve test düzeneği ..... 44

Resim 3.14. DIC kamera yerleşimi ve çekme test düzeneği..... 45

Resim 5.1. TS-04 - 06 numunelerinin test anında kırılma ve sonrasındaki detaylı görselleri ..... 55

Resim 5.2. TS-13 - 15 numunelerinin test sonrası kırılma görselleri..... 58

Resim 5.3. TS-16 - 18 numunelerinin test sonrası kırılma görselleri..... 59

# SİMGELER VE KISALTMALAR

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

| **Simgeler** | **Açıklamalar** |
|---|---|
| **%** | Yüzde |
| **°** | Derece |
| **°C** | Santigrat derece |
| **σ** | Gerilme |
| **τ** | Kayma gerilmesi |
| **GPa** | Gigapaskal |
| **g** | gram |
| **hz** | Hertz |
| **Kε** | Gerilme yoğunluk katsayısı |
| **kN** | Kilonewton |
| **mm** | Milimetre |
| **mm²** | Milimetrekare |
| **mm³** | Milimetreküp |
| **MPa** | Megapaskal |
| **N** | Newton |

| **Kısaltmalar** | **Açıklamalar** |
|---|---|
| **3D** | 3 Boyutlu |
| **AE** | Akustik emisyon |
| **ASTM** | The American Society for Testing and Materials |
| **CFRP** | Karbon elyaf takviyeli polimer |
| **CNC** | Computer Numerical Control |
| **DIC** | Dijital görüntü korelasyonu (Digital Image Correlation) |

| Kısaltmalar | Açıklamalar |
|---|---|
| **FDM** | Eriyik Yığma Modelleme (Fused Deposition Modeling) |
| **GB** | Gigabayt |
| **HTS** | Yüksek çekme mukavemetli (high tensile strength) |
| **İng.** | İngilizce |
| **MWCNT** | Çok duvarlı karbon nano tüp (multi-walled carbon nanotube) |
| **ODTÜ** | Orta Doğu Teknik Üniversitesi |
| **OHT** | Açık delik çekme testi (open hole tension) |
| **SAGE** | Savunma Sanayii Araştırma ve Geliştirme Enstitüsü |
| **SEA** | Sonlu elemanlar analizi |
| **SEM** | Sonlu elemanlar modeli |
| **TS** | Test Numunesi (Test Specimen) |

# 1. GİRİŞ

Havacılık yapılarında ağırlık hafifletme, erişim/servis kapakları, kablo-konektör yerleşimi, yakıt, hidrolik, temiz su veya oksijen boruları geçirme gibi nedenlerden ötürü plaka yüzeylerinde hafifletme deliği açılmaktadır. Bu delikler plaka üzerinde dairesel, elips, kare, üçgen veya dikdörtgen gibi farklı şekillerde ve çeşitli sayılarda olabilir. Oluşturulan deliklerin çevresinde gerilme yoğunlaşması meydana gelir ve levhanın mukavemetini azalır, zayıflayan yapı ağırlık ve mukavemet açısından en optimum şekilde güçlendirilmesi gerekmektedir (Örün ve Güler, 2017).

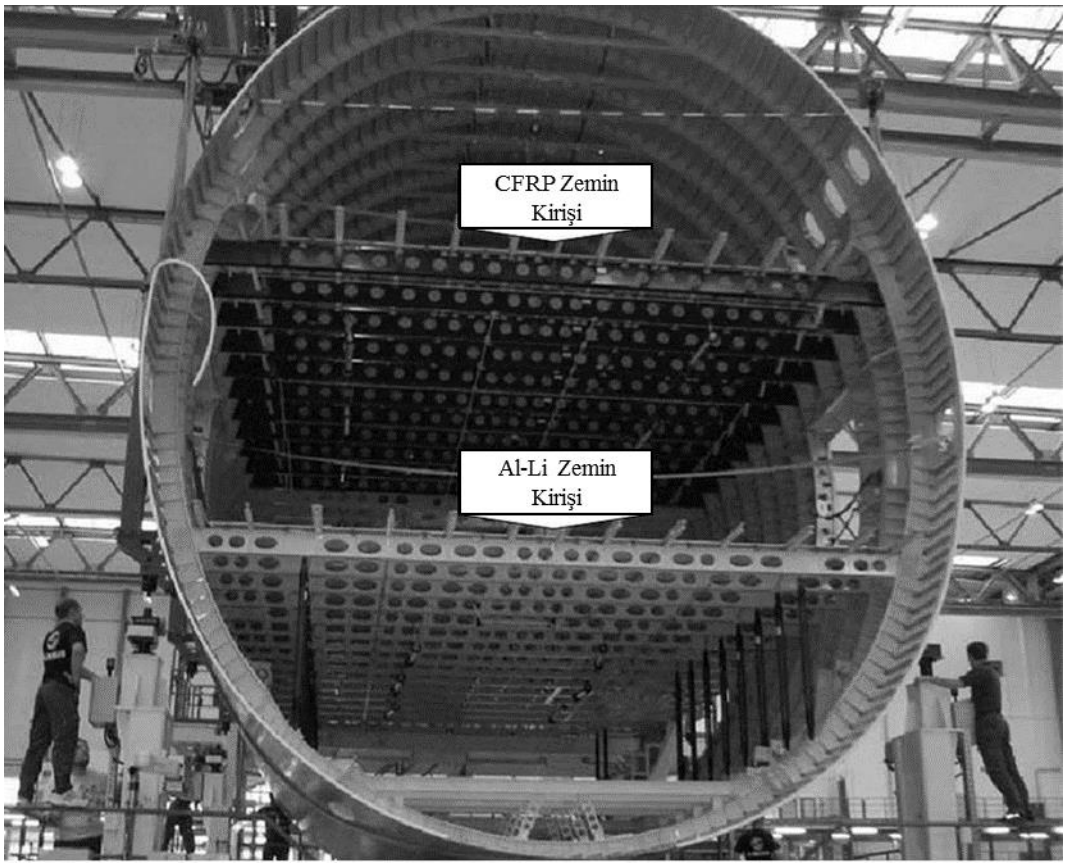
Yapılacak güçlendirme işlemi, parçanın üretim yöntemi ile doğrudan ilgilidir. Metal malzemelerde, sac büküm yöntemi kullanılması halinde parçaların delik etrafı eğilerek güçlendirme sağlanabilir. CNC yöntemi ile üretilen parçalarda ise delik etrafında ilave parça bırakılarak güçlendirme sağlanabilir. Güçlendirme sürecinde üç temel parametre dikkate alınır:

i. Yapının mukavemetinde önemli bir artış sağlamak
ii. Kullanılan yöntemin maliyeti,
iii. Ağırlık optimizasyonu (eklenen parça ile ağırlık azaltılmak yerine artırılabilir)

Kompozitler havacılık alanında ilk olarak Rafieipour, Setoodeh ve Lau (2021) çalışmasında belirtildiği üzere radar geçirgenlik özelliğinden ötürü uçak radomlarında ve ısı ile korozyona direncinden ötürü hava karşılama yüzeylerinde kullanılmaya başlanmıştır. 1980'li yıllarda ise savaş uçaklarının dış gövdelerinde ağırlık azaltılarak manevra kabiliyeti kazanmak ve görünmezliğe (ing. stealth) katkısından ötürü (Taj ve diğerleri, 2023) kompozit tasarımlar devreye alınmıştır. Daha sonra malzeme tecrübesinin kazanılması ile yüklü kiriş yapılarında tercih edilmeye başlanmıştır. Airbus A350 ve Boeing B787 tipi yolcu uçaklarında kompozit oranı, George Marsh (2007) tarafından bildirilen çalışmaya göre uçağın toplam ağırlığının %50'sine kadar ulaşmaktadır.

Şekil 1.1 ile Airbus A380 uçağının iç gövdesinde gösterildiği üzere sadece yüzey parçaları değil yük taşıyan kiriş parçalarında da CFRP malzemesi tercih edilmektedir (Prasad, Gokhale ve Wanhill, 2013). Bu kiriş yapılarına tıpkı metallerde olduğu gibi çeşitli sebeplerden ötürü delikler açılabilmektedir. Şekil 1.1 ile sunulan zemin kirişi yapısında

açılan deliğin çapı, kiriş gövdesi (web) yüksekliğinin yaklaşık yüzde 60 oranındadır. Bu değer, tez çalışmasının Güçlendirme Modeli Karşılaştırma Bölümünde plaka geometri tasarımına yansıtılmıştır.




Şekil 1.1. Airbus A380 Uçağı Al-Li alaşımı ve CFRP zemin kirişleri

Şekil 1.1'de gösterilen A380 uçaklarında da tercih edildiği üzere aynı hacimle açılan deliklerde hem ideal kullanım hem de en az mukavemet kaybı açısından değerlendirildiğinde Shafighfard, Demir ve Yıldız (2019) tarafından en uygun şeklin yuvarlak ya da elips olduğu ifade edilmektedir. Açılan deliğin kenarlarında oluşan gerilme yoğunlaşmasını azaltmak adına Qi ve diğerleri (2020) tarafından önerildiği şekilde delik etrafına takviye iplik ya da Pyl, Kalteremidou ve Hemelrijck (2018) çalışmasında denendiği gibi güçlendirme yöntemleri tercih edilebilir. Yapılan çalışmalarda levhalara çekme/basma ya da kayma yükleri uygulanmaktadır. Duan ve diğerleri (2020) tarafından belirtildiği üzere tasarım parametresi olarak delik etrafındaki gerilme konsantrasyonuna bağlı yapının dayanımı referans alınmaktadır. Yine Şekil 1.1 ile sunulan yolcu uçağı zemin kirişi dikkate alındığında, bu tarz parçalar tek başına yalın çekme/basma ya da yalın kayma yüklerinden

ziyade rüzgar, itki, manevra ve platform içeresindeki yük dağılımı (yolcu, kargo, koltuklar) gibi yük koşulları dikkate alındığında eksenel ve kayma yönlü yüklemelere aynı anda maruz kalabilirler.

Kompozit malzemelerin mukavemet değeri, elyaf veya dokuma üretim kalitesine, serme ve prepreg kürleme işlemlerine göre farklılık gösterebilmektedir. Son yıllarda ticari sonlu elemanlar yazılımlarının oldukça gelişmesine rağmen, üretim prosedürlerine bağlı olarak kompozitlerin mukavemet değerlerinde farklılık oluşabilmesi nedeniyle; numuneler ile test icra edilerek hem elde edilen katmanlı bütünün (lamina) mekanik özellikleri elde edilebilir hem de sonlu eleman modelleme (SEM) doğrulaması yapılması gerekmektedir (Botzkowski ve diğerleri, 2016 ve Humberto, Bittrich ve Spickenheuer, 2020).

Tez çalışmasında iç içe geçmiş dört elipsin bir araya gelmesi ile elde edilen ve papatya tipi olarak adlandırılan güçlendirme modeli ile yeni bir güçlendirme tasarımı denemesi ve karşılaştırması planlanmaktadır. Papatya modeli ve üç farklı model (yüzük, kare ve elips) için yalın çekme yüklemesi, yalın kayma yüklemesi ve birleşik yükleme (hem çekme hem de kayma) altında hangi güçlendirme tasarımının dayanım açısından daha verimli olacağının araştırılması amaçlanmaktadır. Sonlu elemanlar tabanlı yürütülen bu karşılaştırma çalışmasına geçmeden on ikisi $[0_{15}]$ ve altısı $[45_{15}]$ diziliminde olmak üzere toplam on sekiz dokuma karbon takviyeli epoksi prepreg (CFRP) malzemeden test numunesi üretilmiştir. Bu numuneler ile yürütülen çekme testi hazırlığı ve kullanılan malzemenin özellikleri Bölüm 3 ile sunulmaktadır.

ANSYS programı ile modellenen sonlu elemanlar çalışmasını doğrulamak için ASTM standartları referans alınarak çekme testleri icra edilmiştir. Son yıllarda, Humberto ve diğerleri (2020), Caminero ve diğerleri (2013) tarafından yürütülen çalışmalarda olduğu gibi testler sırasında alınan görüntülerden dijital görüntü korelasyon (Digital Image Coorelation, DIC) yöntemi kullanılarak numune üzerindeki gerinim dağılımı elde edilmektedir. Testlerde elde edilen çekme yüküne bağlı uzama eğrileri ve DIC işlemi sonucunda elde edilen gerinim dağılımları ile sonlu elemanlar analiz sonuçlarının karşılaştırması yapılmaktadır. Bölüm 4 ile sonlu elemanlar modelleme işlemlerinin detayları sunulmuştur. 18 numune ile yürütülen çekme test sonuçlarının derlenmesine ise Bölüm 5'de yer verilmiştir.

Testlerden elde edilen sonuç ile teorik hesap ve sonlu elemanlar analiz sonucu karşılaştırması ve model doğrulama çalışmaları sırasıyla Bölüm 6 ve Bölüm 7 ile anlatılmaktadır.

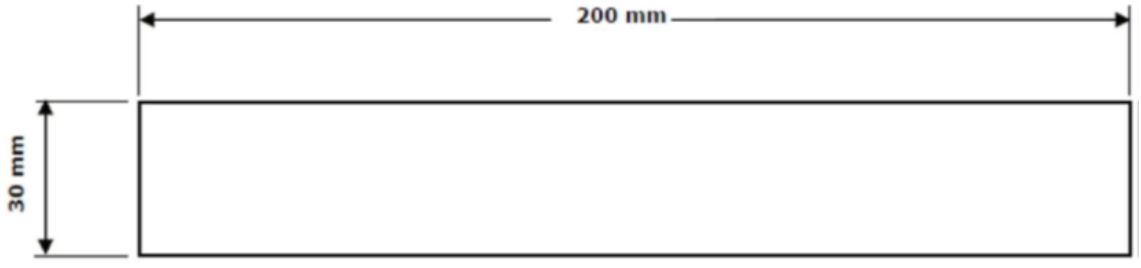
Sonuç ve Öneriler bölümünden önceki son bölümde ise önerilen geniş deliğe sahip plaka modeli ile öncelikle yalın çekme ve yalın kayma yüklemesi altında sonlu elemanlar analizleri gerçekleştirilmiş ve dört farklı güçlendirme tasarımı için Tsai-Wu hata oranı değerleri elde edilmiştir. Daha sonra birleşik yükleme koşulu altında farklı çekme/kayma yük oranlarında güçlendirme modellerinin karşılaştırması ve değerlendirmesi sunulmaktadır.

# 2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

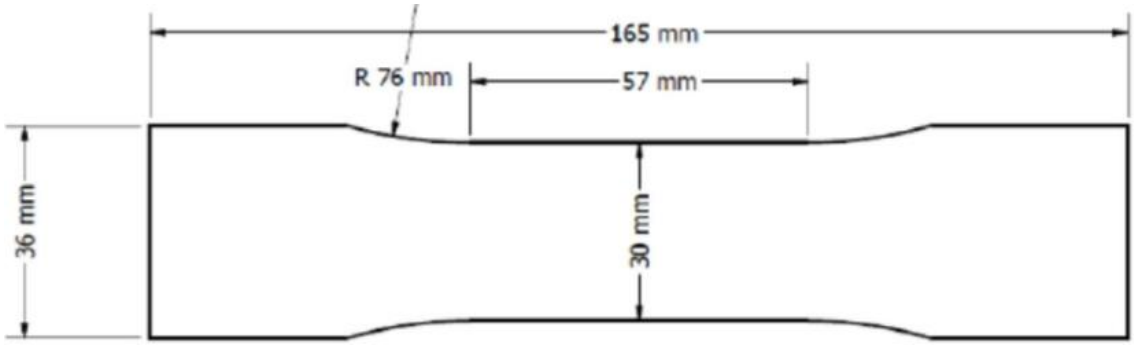
Bu bölümde, literatür taraması kapsamında metallerde ya da kompozitlerde hafifletme delikleri neden açılır gibi genel konulardan ziyade; özel olarak kompozit yapılarda delik etrafı güçlendirmesinde ne tür yöntemler kullanılmış ve elde edilen sonuçların neler olduğuna değinilmektedir. Ardından literatürde sunulan çalışmaların değerlendirmesi ve bu araştırmalar ile tez kapsamında yürütülen çalışma arasındaki farklı yönlerin neler olduğundan bahsedilmektedir. Makale veya tez değerlendirmeleri sırasında, çalışma sırasında temel alınan geometri, malzeme, analiz yöntemi, test metodu ve çıktılar gibi detaylara tek tek yer verilmektedir.

Pyl, Kalteremidou ve Hemelrijck (2018) çekme yüklemesi altında fiber takviyesinin etkisini ele almışlardır. Plaka için karbon fiber, güçlendirme için ise özel olarak MarkForged's Nylon malzeme tercihi yapılmıştır. 0.125 mm kalınlığında 0° açılar ile toplam 8 katman olarak dizilerek lamina modellenmiştir. Malzeme özelliklerini çıkarmak için ayrıca bir test faaliyeti yürütülmeyip üretici şirket ve literatürde yer alan veriler kullanılmıştır.

Test doğulama çalışmaları için Şekil 2.1 ve Şekil 2.2 ile sunulan iki geometri tasarlanmıştır. İlki 200x30 mm ebatlarında dikdörtgen, ikinci test kuponu tasarımı ise 165 mm uzunluğa sahip dambıl (dumbbell) şeklindedir. Her iki geometri için üzerine 3 katmanlı naylon takviyesi yapılan (printed) ve takviyesiz (drilled) model ile çekme deneyi yürütülerek karşılaştırma sunulmuştur.




Şekil 2.1. Pyl ve diğerleri (2018) tarafından tasarlanan dikdörtgen test geometrisi




Şekil 2.2. Pyl ve diğerleri (2018) tarafından tasarlanan dambıl test geometrisi

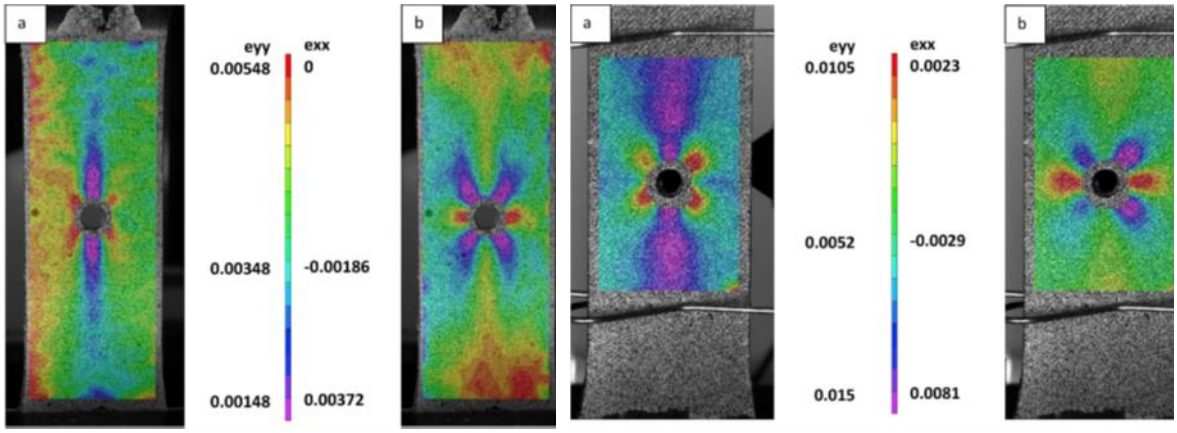
Instron 5885 H test cihazı kullanılarak delikli çekme testi icra edilmiştir. VIC-3D cihazı ile alınan görüntünler üzerine DIC işlemi uygulanarak uzunlamasına ve yanlamasına yönlü gerinme değerleri incelenmiştir. Şekil 2.3 ile soldan sağa dikdörtgen takviyesiz delik, dikdörtgen takviyesiz delik, dambıl takviyesiz delik ve dambıl takviyeli delik test sonuçları gösterilmektedir.



Şekil 2.3. Pyl ve diğerleri (2018) tarafından yürütülen çekme test görüntüleri

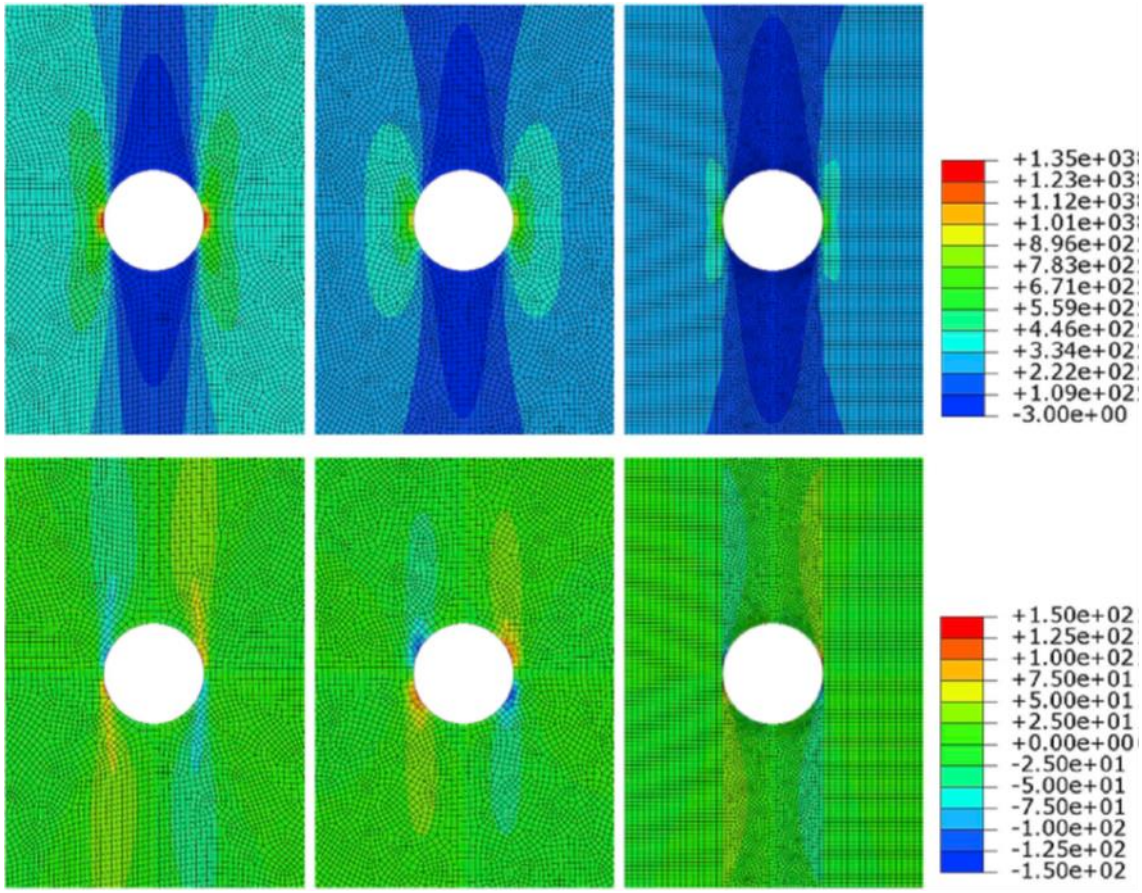
Şekil 2.4 ile dambıl takviyeli ve takviyesiz delik modelleri için DIC gerinme sonuç görselleri sunulmaktadır. Her iki şekilde ve elde edilen test sonuçlarına bakıldığında naylonun zayıf

olmasından ötürü takviyesiz modellerin, takviyeli tasarıma oranla daha mukavim olduğunun görüldüğü makalede belirtilmiştir.




Şekil 2.4. Pyl ve diğerleri (2018) tarafından yürütülen DIC çalışması görselleri

Pyl ve diğerleri (2018) çekme testi çalışmalarının ardından çeşitli güçlendirme etkilerini incelemek adına sonlu elemanlar modelleme aşamasına geçmişlerdir. Burada delik etrafına dairesel, dikdörtgen ve elmas şekilli fiber katmanlar ilave edilerek karşılaştırmaları yapılmıştır. Şekil 2.5 ile güçlendirmesiz, dairesel ve dikdörtgen güçlendirmeli modeller için sonlu elemanlar analiz sonuçları gösterilmektedir. Analiz sonuçları karşılaştırıldığında; uzunlamasına gerilme açısından dikdörtgen güçlendirmenin, yanal ve kayma yönünde ise dairesel güçlendirmenin delik etrafı gerileme konsantrasyonunu daha fazla indirdiği görülmüştür.

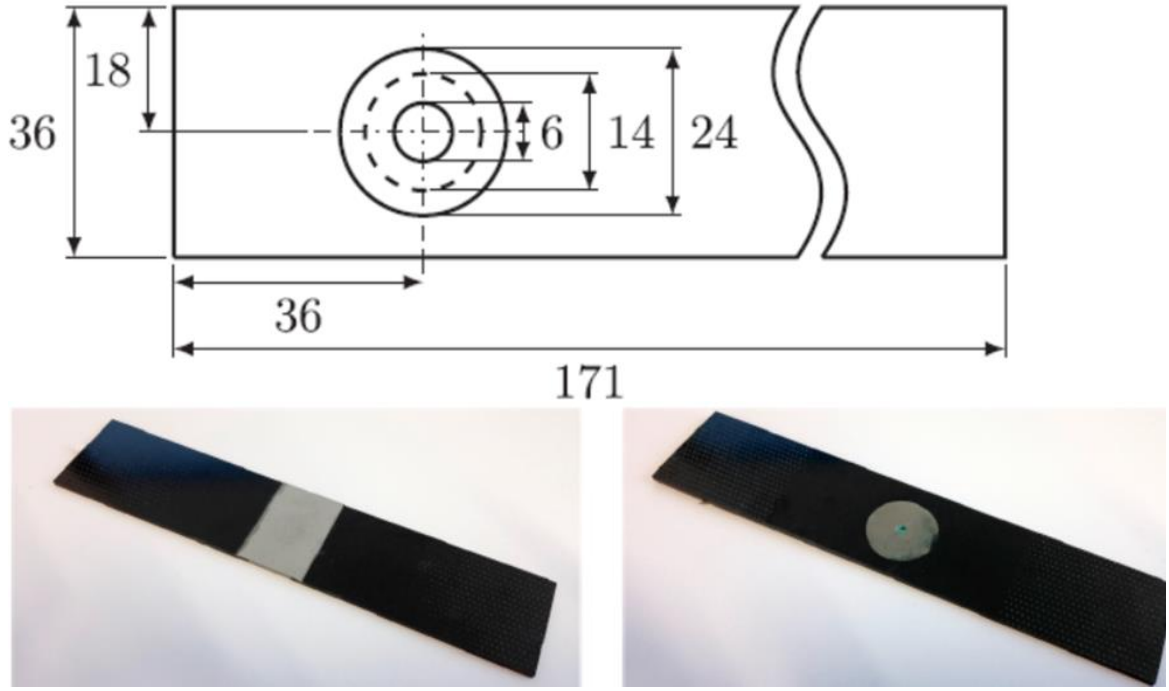



Şekil 2.5. Pyl ve diğerleri (2018) tarafından yürütülen sonlu elemanlar analiz sonuçları

Pyl ve diğerleri (2018) tarafından kaleme alınan makale güçlendirme geometrisi denemesi ve ele alınan test yöntemi açısından yürütülen tez çalışmasına ışık tutmaktadır. Fakat üretimin 3D yazıcı ile yapılmış olması ve sadece 0° dizilimli numene ile yürütülmesi çalışmamızdan farklılık göstermektedir.

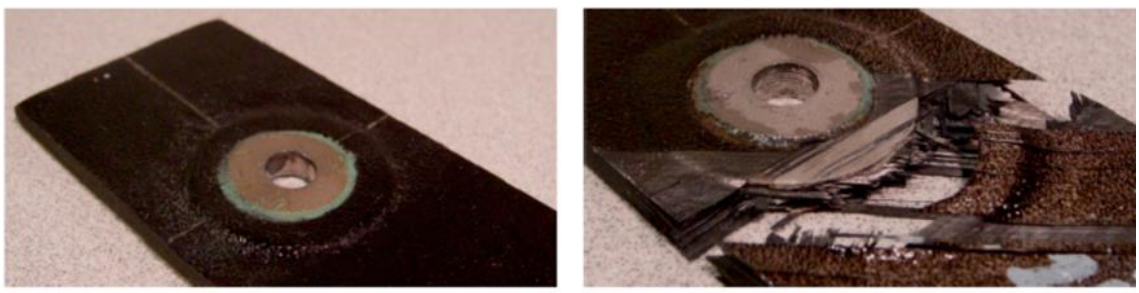
Akbarpour ve Hallström (2019) tarafından kompozit plaklarda delik bölgesine yerleştirilen ve dayanım iyileştirmesi için oldukça verimli bir yöntem olan metal burç (ing. insert) (Kumar, Singh ve Zitoune, 2018) üzerine bir çalışma yürütmüştür. HexPly 6376 matris malzeme içerisine Toho Tenax firmasın tarafından üretilen yüksek çekme mukavemetli (HTS) karbon fiber takviye eklenerek elde edilen HTS/6367 prepreg malzemesi tercih edilmiştir. Metal burçlar ise AISI301 paslanmaz çelik malzemeden üretilmektedir. Test karşılaştırması için $[45/0/-45/90]_{3s}$ ve $[-45/90/45/0]_{3s}$ olmak üzere iki dizilim tasarlanmış ve bunlar sırasıyla güçlü ve zayıf dizilim olarak sınıflandırılmıştır.

Şekil 2.6 ile Akbarpour ve Hallström (2019) tarafından tasarlanan 171x36 mm ebatlarındaki plaka geometrisi ve iki farklı burç yerleşim modeli sunulmaktadır. Kompozit dikdörtgen plaka üzerine açılan delik etrafındaki gerilmeyi azaltmak için dairesel ve şerit şekline sahip burçlar tasarlanış ve karşılaştırmaları yapılmıştır.

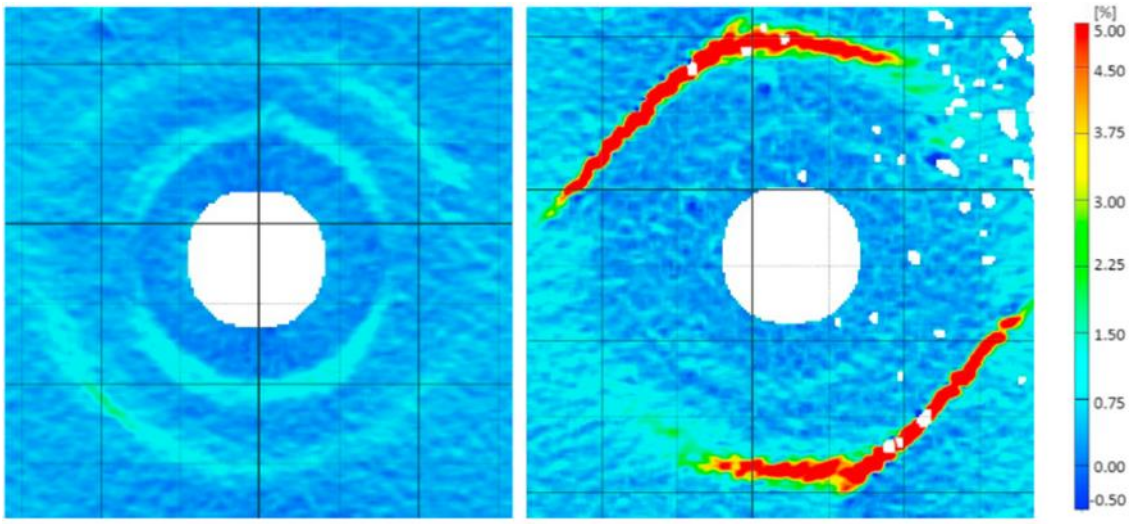



Şekil 2.6. Akbarpour ve Hallström (2019) tarafından tasarlanan plaka geometrisi ve burç yerleşim modelleri

Şekil 2.7 ile gösterildiği üzere dairesel burç modelinde güçlü ve zayıf dizilimli plakalar için çekme testi gerçekleştirilmiştir. Testler sırasında alınan görseller GOM Aramis 5M cihazı ile DIC işlemine tabi tutulmuştur. DIC işlemi sonrası elde edilen gerinme dağılımları da Şekil 2.8 ile sunulmaktadır.



Şekil 2.7. Akbarpour ve Hallström (2019) tarafından gerçekleştirilen dairesel burca sahip plakalar için çekme testi görselleri



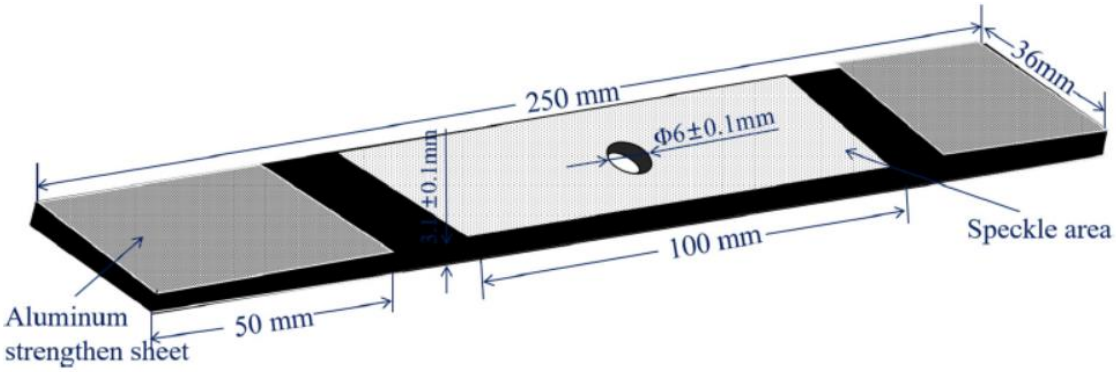

Şekil 2.8. Akbarpour ve Hallström (2019) tarafından gerçekleştirilen dairesel burca sahip plakalar için DIC görselleri

Yürütülen çalışmalarla metal burç eklemenin, kompozit plaka dayanımını ortalama %60 oranında artırdığı ve şerit takviyesinin dairesele oranla birçok dizilimde daha iyi sonuç verdiği gösterilmiştir.

Akbarpour ve Hallström (2019) tarafından gerçekleştirilen çalışma özellikle kompozit parçaların bir araya getirilmesinde kullanılan vida/cıvata bağlantılarında oldukça kritik öneme sahiptir. Fakat önerilen tez konusu bağlayıcından ziyade daha geniş hafifletme deliklerini ele almaktadır.

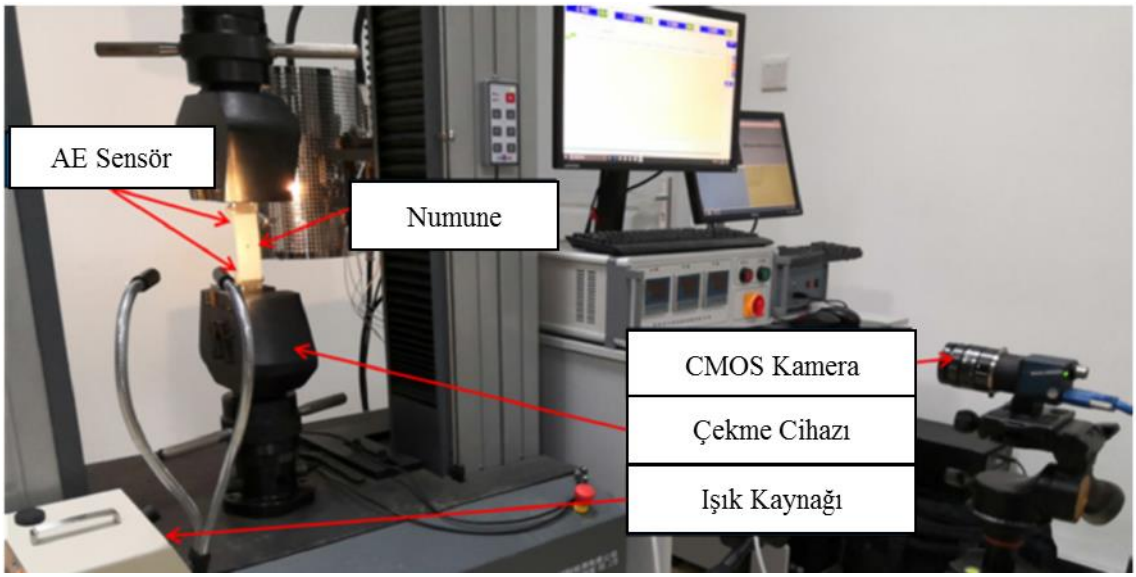
Han ve diğerleri (2020) tarafından A ve B kodlu olmak üzere iki farklı numune tasarımı sunulmuştur. A numunesinin malzemesi Grammatikos, Kordatos, Matikas ve Paipetis (2018) çalışmasından referans ile T300-3k karbon fiber, B numunesi ise bu malzemenin içerisine %0.5 ağırlık oranında çok duvarlı karbon nano tüpler (MWCNT) ilave edilip el ile serilerek üretilmektedir.

Şekil 2.9 ile 250 mm uzunluğa, 36 mm genişliğe ve plaka ortasında 6 mm deliğe sahip numune geometrisi sunulmaktadır. Numune üst ve alt bölgelerine 50 mm uzunluğunda alüminyum plaka yerleştirilerek tutma alanı oluşturulmuştur.




Şekil 2.9. Han ve diğerleri (2019) tarafından tasarlanan numune geometrisi

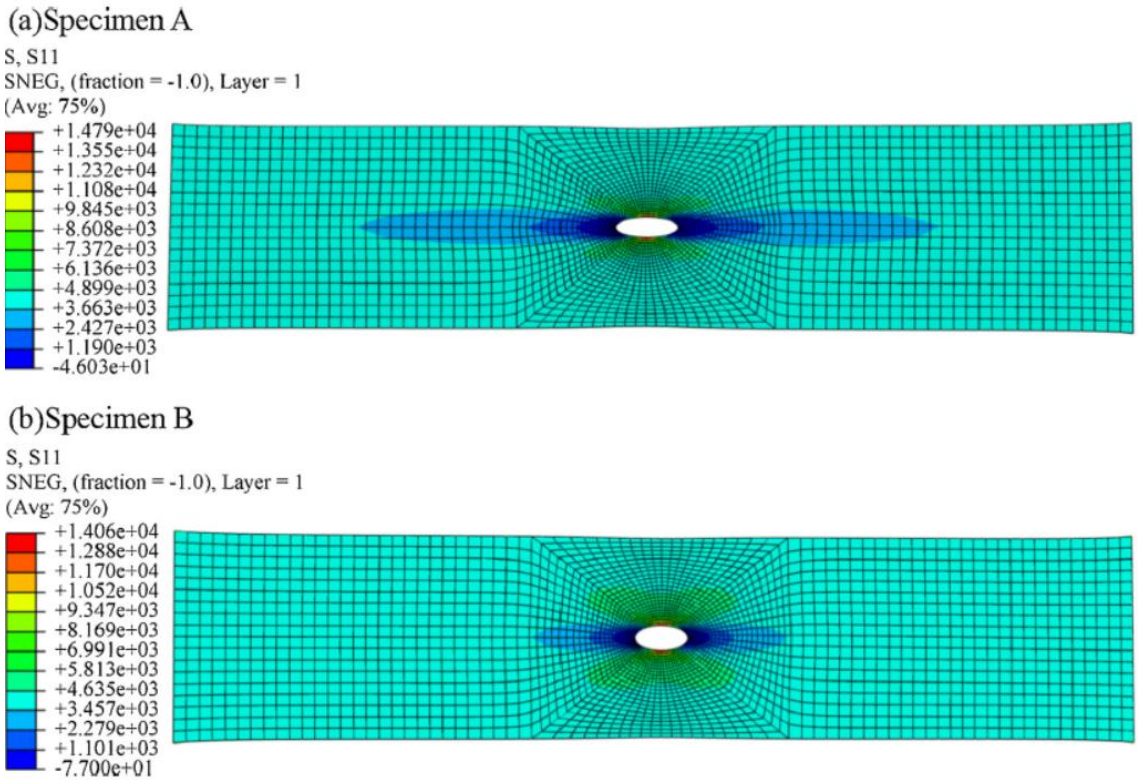
Şekil 2.10 ile Han ve diğerleri (2019) tarafından kurulan çekme testi test düzeneği gösterilmektedir. Diğer örnek tez çalışmalarında olduğu gibi DIC işlemi ile gerinme sonuçların alınmasının yanı sıra DS2-8A cihazı ile kompozit malzeme hasar tespitinde kullanılan akustik emisyon (AE) metodu da kullanılmıştır (Grammatikos, Kordatos, Matikas ve Paipetis, 2014 ve Brenken Barocio, Favaloro, Kunc ve Pipes, 2018).



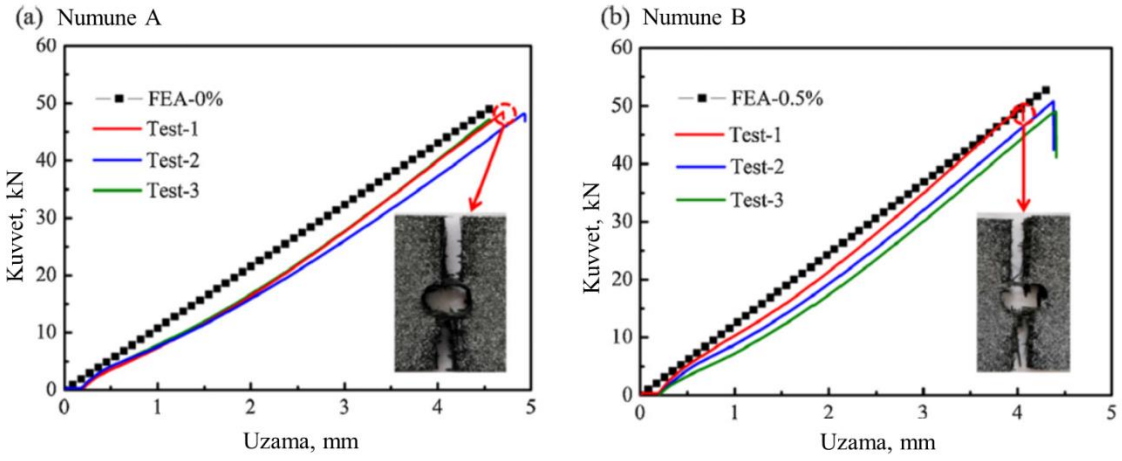

Şekil 2.10. Han ve diğerleri (2019) tarafından kurulan çekme testi düzeneği

Şekil 2.10 ile gösterilen çekme testi sonuçları ile sonlu elemanlar analiz sonucu karşılaştırması yapılmıştır. Şekil 2.11 ile karbon nano tüp takviyesiz (Numune A) ve takviyeli (Numune B) plakaların SE analizi sonrası elde edilen gerilme dağılım sonuçları verilmiştir. Şekil 2.12'de ise her iki numune için test ve SE sonuçlarının çekme yüküne bağlı uzama eğrilerinin karşılaştırması sunulmuştur. Her iki görselde de görüldüğü üzere takviyeli

olan plaka delik etrafı gerilme yoğunlaşması ve kopma dayanımı açısından daha iyi sonuç vermektedir.




Şekil 2.11. Han ve diğerleri (2019) tarafından tasarlanan karbon nano tüp takviyeli ve takviyesiz modelin SE gerilme sonuçları




Şekil 2.12. Han ve diğerleri (2019) tarafından gerçekleştirilen testler sırasında elde edilen çekme yüküne bağlı uzama eğrileri

Han ve diğerleri (2019) tarafından gerçekleştirilen makale çalışmasında kompozit malzeme içerisine nano tüp ekleyerek parça dayanımında güçlendirmeye odaklanılmıştır. Önerilen tez çalışmasında ise üretim geliştirmesinden ziyade kullanıcıya, ideal tasarım yaklaşımı sunmak hedeflenmektedir. Ayrıca çalışma, sadece çekme yönünde ele alınarak sunulmuştur.

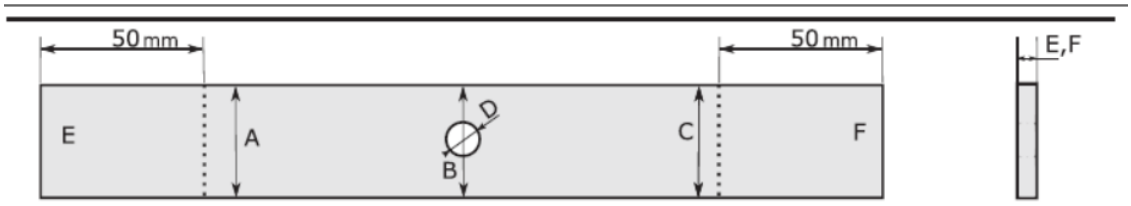
Zappino ve diğerleri (2020), delik etrafına uygulanan karbon fiber takviye üzerine çalışma yürütmüşlerdir. Kompozit numune plakaları, Eriyik Yığma Modelleme (Fused Deposition Modeling, FDM) tekniği (Brenken, Barocio, Favaloro, Kunc ve Pipes, 2018) ile oluşturulmaktadır. Şekil 2.13 ile önerilen test plakasının geometrik parametreleri sunulmuştur. Katman dizilimi takviye yerleşim detayı ise Şekil 2.14 ile gösterilmektedir. Aşağıda sunulduğu üzere dört farklı tasarım için karşılaştırma yapılmaktadır.

• Delikli izometrik plaka (ISO)

• Delik etrafı takviyeli izometrik plaka (ISO-R)

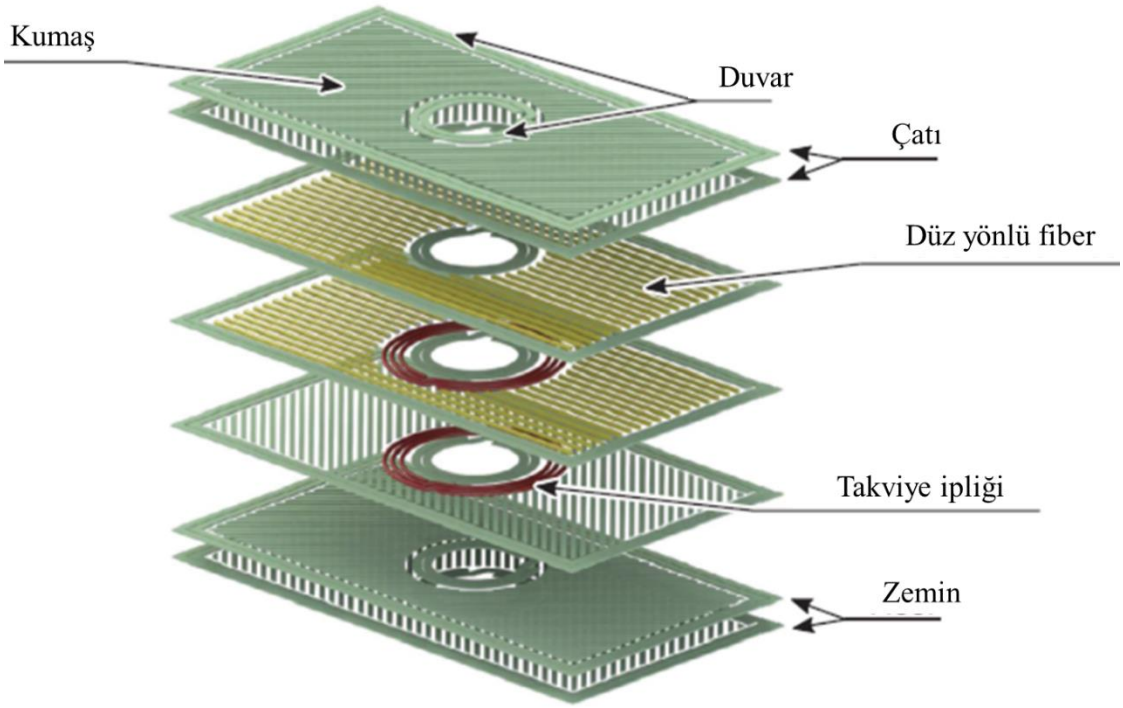
• Delikli kompozit plaka (COMP)

• Delik etrafı takviyeli kompozit plaka (COMP- R)



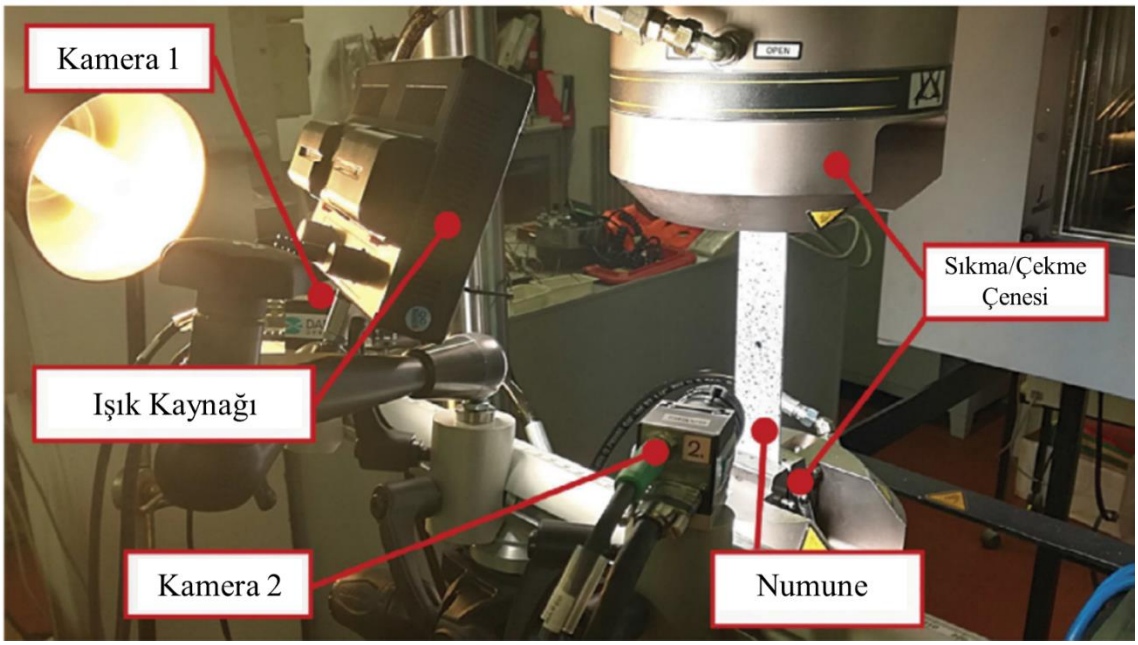

| Specimen | A [mm] | B [mm] | C [mm] | D [mm] | E [mm] | F [mm] |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Design | 36.00 | 36.00 | 36.00 | 6.00 | 2.50 | 2.50 |

Şekil 2.13. Zappino ve diğerleri (2020) tarafından tasarlanan numune geometrik parametreleri

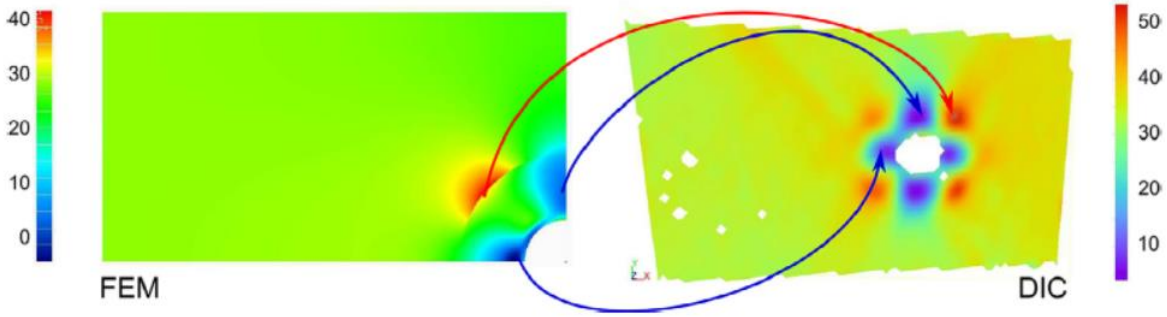



Şekil 2.14. Zappino ve diğerleri (2020) tarafından tasarlanan kompozit katman dizilimi

Şekil 2.15 ile Zappino ve diğerleri (2020) tarafından Instron 8516 cihazı ile kurulan test düzeneği sunulmaktadır. Test sonuçlarının okunmasında Q-400 DIC cihazı kullanılmıştır. Şekil 2.16'da sonlu elemanlar analiz sonucu ile DIC çalışmasından elde edilen gerinme dağılım görselleri kıyaslama amacıyla sunulmuştur.

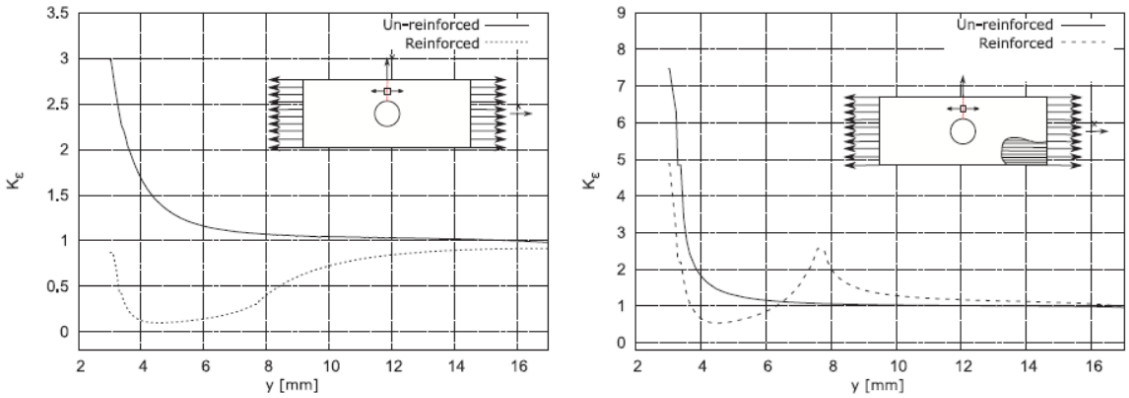



Şekil 2.15. Zappino ve diğerleri (2020) tarafından kurulan test düzeneği




Şekil 2.16. Zappino ve diğerleri (2020) tarafından gerçekleştirilen DIC ile SEA karşılaştırması

Takviyeli ve takviyesiz COMP ve ISO tasarımları için gerilme yoğunluk katsayısı, Kε (Peterson, 1997) açısından değerlendirmesi yapılmış ve Şekil 2.17 ile bunların karşılaştırma eğrileri sunulmuştur. COMP tasarımında deliğe yaklaştıkça gerilme yoğunluğunun daha fazla artığı görülmektedir.



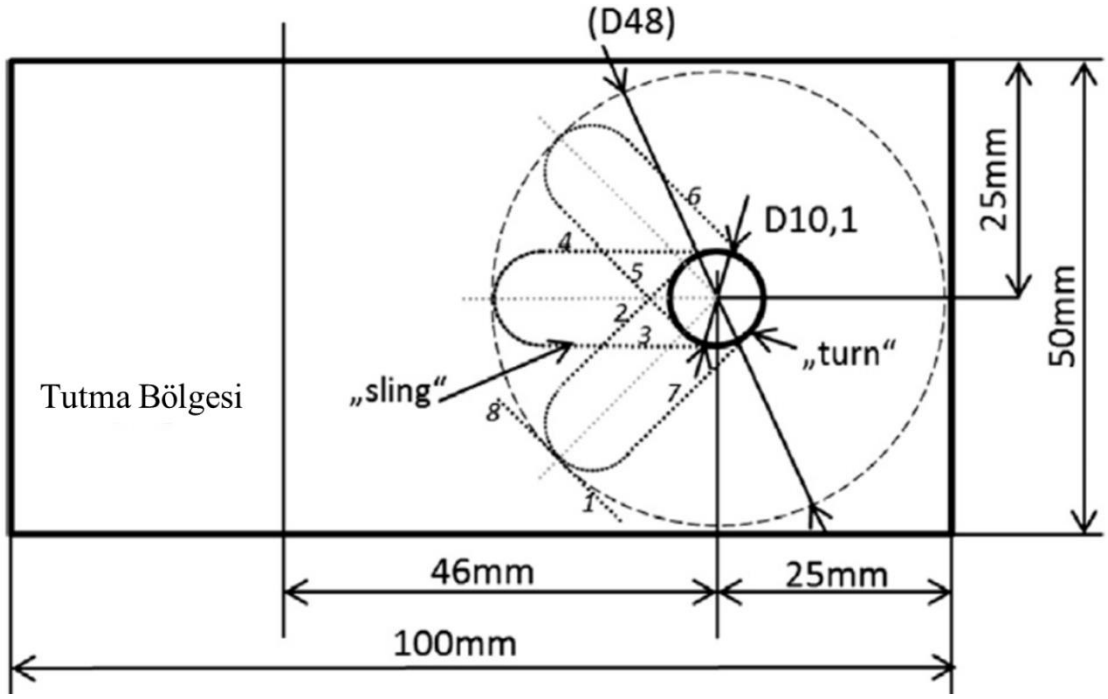

(a) Isotropic plate (b) Composite plate

Şekil 2.17. Zappino ve diğerleri (2020) tarafından sunulan Kε eğri karşılaştırması

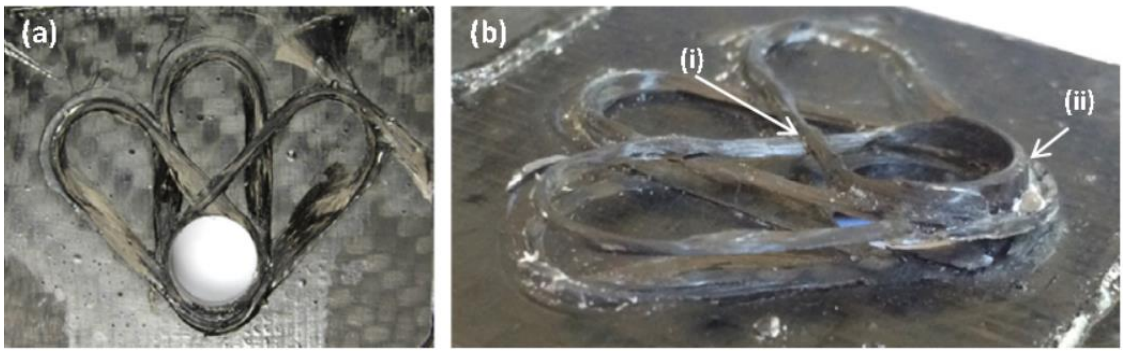
Zappino ve diğerleri (2020) tarafından yürütülen çalışmada Pyl ve diğerlerinin (2018) makalesinde olduğu gibi 3 boyutlu yazıcı tekniği kullanılmış ve delik etrafına yerleştirilen dairesel yüzük tipi fiber güçlendirme metodu ele alınmıştır. Önermiş olduğumuz çalışmadan farklı olarak sadece çekme yükü altında ve sadece tek bir güçlendirme tasarımı dikkate alınmıştır.

Botzkowski ve diğerleri (2016) delikli plaka etrafına yerleştirilen iplik (roving) güçlendirmesinin delik yüklemesi (bearing load) altında deneysel ve nümerik hesaplar ile analiz edilmesi konusunu ele almışlardır (Warren, Lopez-Anido ve Goering, 2015). Kompozit kumaş malzemesi olarak 200 g/m$^2$ öz kütleli CE8201-200-45S, fiber olarak ise 310 g/m$^2$ öz kütleye sahip CE1007-310-37 kullanılarak plaka oluşturulmaktadır. Takviye ipliği olarak Tenax HTS40 12k seçilmiştir. Plakanın serimi, [0/90,0,90,0] simetrik şeklinde yapılmıştır.

Şekil 2.18 ile 100 mm uzunluk ve 50 m genişliğe sahip test plakası geometrik parametreleri ve takviye ipliğinin yerleşimi sunulmuştur. Şekil 2.19'da ise üretimi yapılan ipliklerin delik etrafına uygulanma görselleri sunulmuştur.

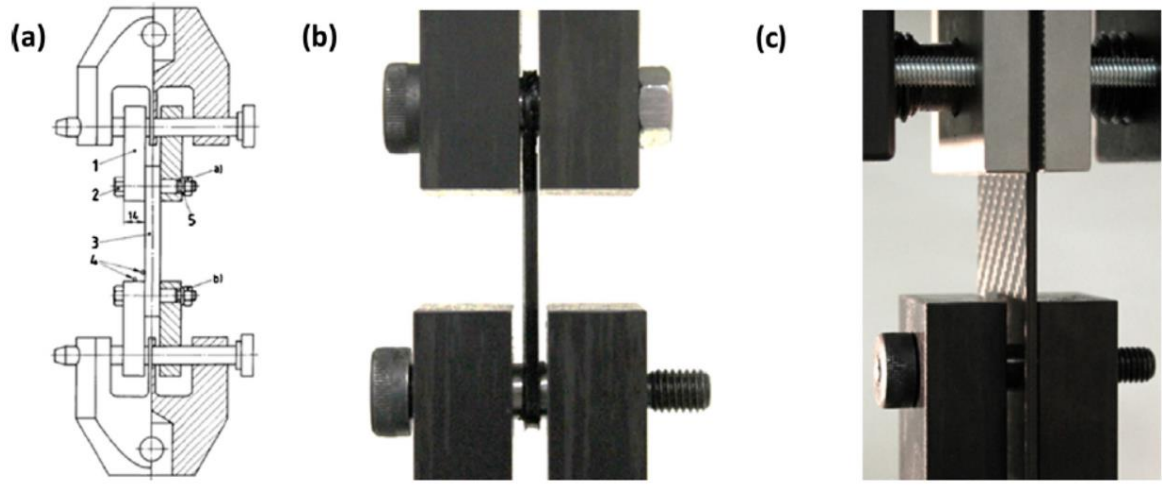



Şekil 2.18. Botzkowski ve diğerleri (2016) tarafından sunulan plaka geometrisi ve takviye ipliği yerleşimi



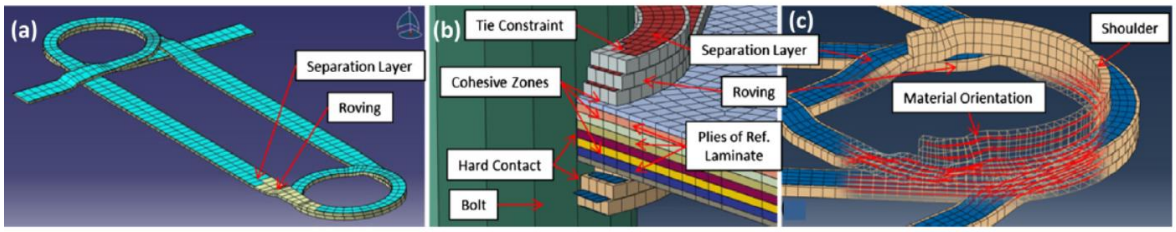

Şekil 2.19. Botzkowski ve diğerleri (2016) tarafından üretimi yapılan plakaya uygulanmış takviye ipliği görseli

Şekil 2.20 ile DIN 65562 standardına uygun şekilde Zwick Z020 cihazı ile kurulan test düzeneği sunulmaktadır. Görselin b bölümüne tekil takviye ipliği halkası, c bölümüne düz plaka teste tabi tutulmuştur.



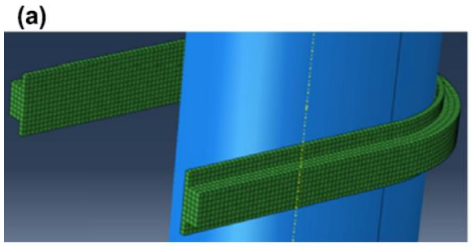

Şekil 2.20. Botzkowski ve diğerleri (2016) tarafından kurulan test düzeneği

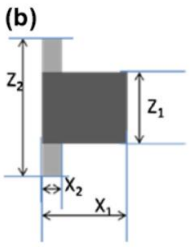
Botzkowski ve diğerleri (2016) tarafından tekil takviye ipliği ile yapılan test sonuçları kullanılarak sonlu elemanlar modelleme ve doğrulama çalışması yapılmıştır (Şekil 2.21). Doğrulama çalışmasının ardından Şekil 2.19 ile gösterilen takviye ipliği tasarımı için analiz çalışmaları yürütülmüştür.




Şekil 2.21. Botzkowski ve diğerleri (2016) tarafından oluşturulan sonlu elemanlar modellemesi

Şekil 2.22'de sunulduğu üzere kesit alanı aynı olmak üzere 5 farklı takviye ipliği modellemesi yapılmıştır. Şekil 2.23'de ise oluşturulan tasarımların çekme yüklemesi altında uzama eğrileri karşılaştırması sunulmuştur. İplik tasarımın oldukça önemli olduğu ve D modelinde Hashin bozulma katsayısının (Hashin, 1980) 1.96 gibi kritik bir değerde arttığı söylenilmiştir.

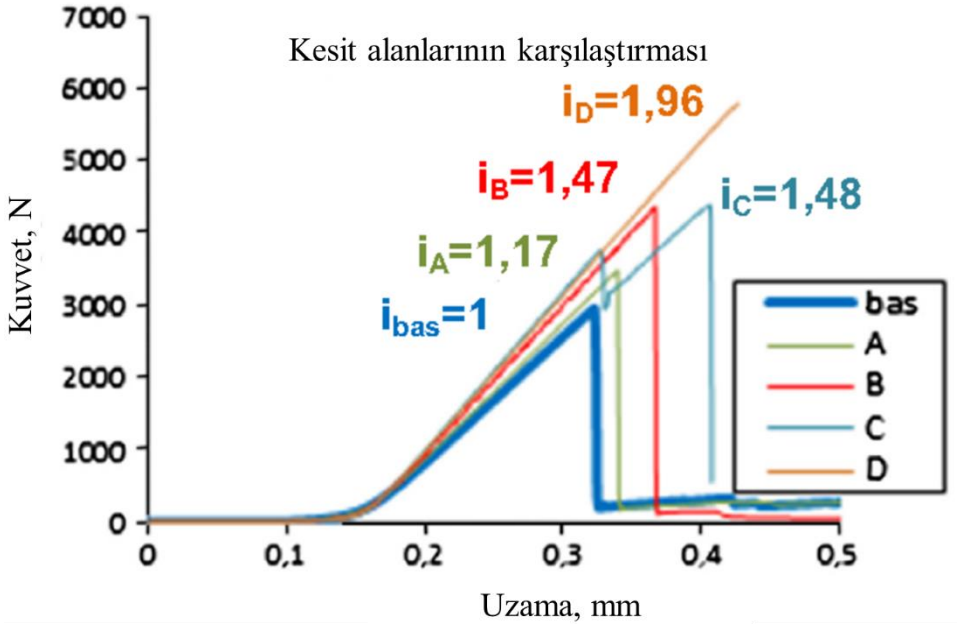



(c)

| | bas | A | B | C | D |
|---|---|---|---|---|---|
| $X_1$ [mm] | 1,65 | 1,51 | 1,26 | 1,01 | 0,92 |
| $Z_1$ [mm] | 0,93 | 0,93 | 0,93 | 0,93 | 1,39 |
| $X_2$ [mm] | 0,00 | 0,23 | 0,23 | 0,23 | 0,23 |
| $Z_2$ [mm] | 0,93 | 1,50 | 2,50 | 3,50 | 2,50 |
| Atotal | 1,53 | 1,53 | 1,53 | 1,53 | 1,53 |

Şekil 2.22. Botzkowski ve diğerleri (2016) tarafından tasarlanan takviye ipliğe kesit parametreleri

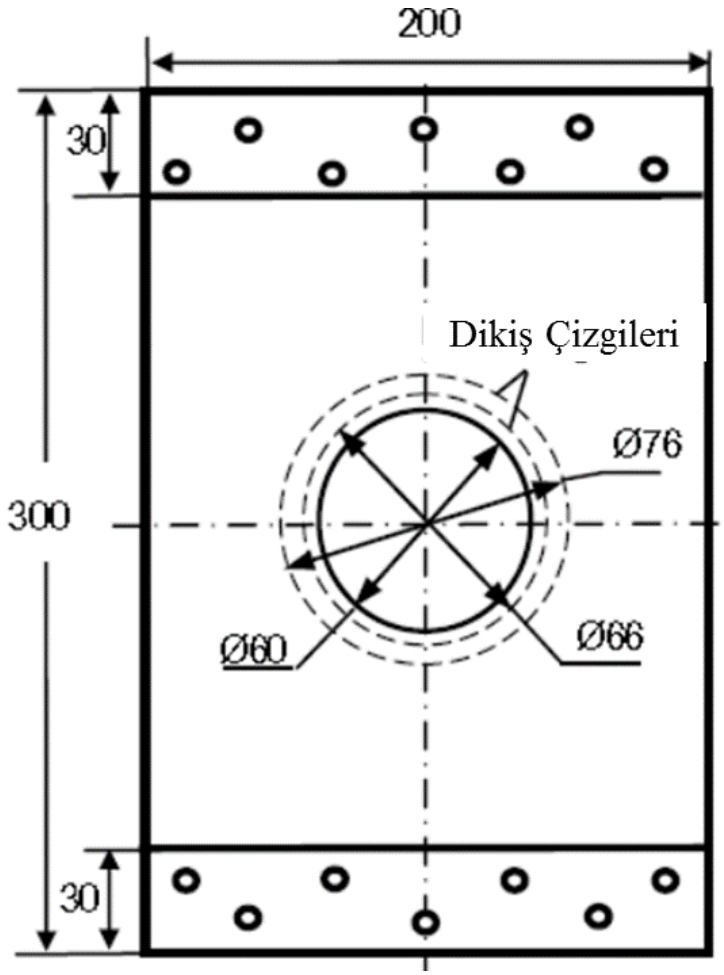



Şekil 2.23. Botzkowski ve diğerleri (2016) tarafından yürütülen takviye ipliği tasarım karşılaştırma eğrileri

Botzkowski ve diğerleri (2016) tarafından kaleme alınan makalede önerilen iplik yerleşim prensibi, mantık olarak önerilen papatya modeli yaklaşımı ile benzerlik göstermektedir. Botzkowski ve diğerlerinin (2016) çalışmasında ipliklerin kalıptan çıkarılarak üretiliyor olması ve ipliğin plakaya yerleşiminin oldukça titiz bir işçilik gereksinimi gerektirmesi ciddi bir handikap oluşturmaktadır.

Han ve diğerleri (2008) dikiş ipliği (ing. sitching) yöntemi (Jain ve Mai, 1994) ile delik etrafı güçlendirme çalışmasına odaklanmıştır. Plaka malzemesi olarak T300/Epoxy ve dikiş ipliği malzemesi olarak Kevlar-49 tercih edilmiştir. Plakanın serimi açısı $[45/-45/0/90/0/0/90/-45/45]_{2S}$ şeklinde yapılmıştır. Kevlar iplikler, delik kenarına çapraz dikiş yöntemi (ing. lockstitch) ile işlenmektedir (Sankey ve Zhu, 2000).

Şekil 2.24 ile 60 mm çapında deliğe sahip 200x300 mm ebatlarında plaka geometrisi, alüminyum malzemeden üretilen tutma bölümü ve takviye dikiş yerleşimleri sunulmuştur. Dikişlerin delikten uzaklığına ve tek/çift sıra olma duruma göre 5 tasarım yapılmıştır (tasarımların isimleri: Tekil-1, Tekil-2, Tekil-3, Çift-1 ve Çift-2).




Şekil 2.24. Han ve diğerleri (2008) tarafından tasarlanan plaka geometrisi ve dikiş yerleşimi

MTS 880-10 servo hidrolik çekme test cihazı ile düzenek kurulmuş ve delik etrafına gerinim ölçerler yerleştirilmiştir. Beş dikişli model ve bir takviyesiz olmak üzere toplam altı tasarım için beşer adet numune ile testler icra edilip ve elde ettikleri ortalama gerilme dayanım değerleri Şekil 2.25'deki tabloda sunulmuştur. Tekil-2 ve Çift-1 tasarımlarının en iyi sonuç verdiği belirtilmiştir. Gerinim-gerilme değerlerinin yanı sıra gerilme yoğunluk katsayısı, Kε açısında da karşılaştırmalar verilmiştir.

Kritik Gerilme Değerleri, MPa

| Number | Unstitching | Single-1 | Single-2 | Single-3 | Double-1 | Double-2 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 204.76 | 201.19 | 240.24 | 232.86 | 241.67 | 238.10 |
| 2 | 223.81 | 251.19 | 239.52 | 214.29 | 258.33 | 226.19 |
| 3 | 182.86 | 223.10 | 220.24 | 220.24 | 233.33 | 203.57 |
| 4 | | 195.24 | 240.05 | | 204.29 | 214.29 |
| 5 | | 209.52 | 209.45 | | 226.19 | 216.19 |
| Average value | 203.81 | 216.05 | 229.90 | 222.46 | 232.76 | 219.67 |

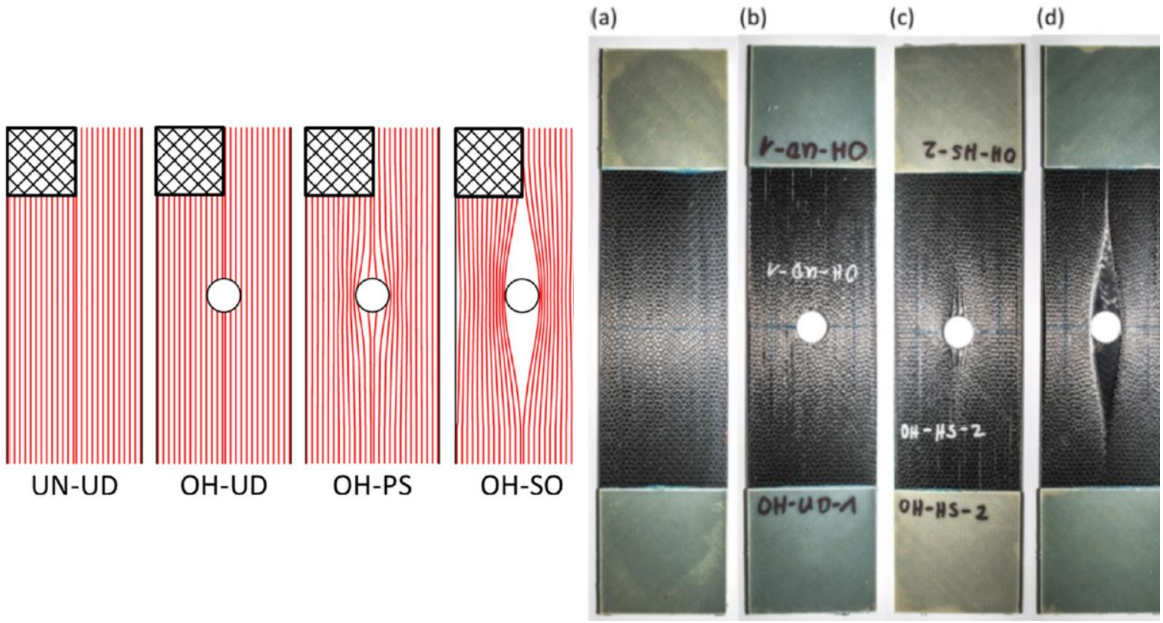
Şekil 2.25. Han ve diğerleri (2008) tarafından gerçekleştirilen testlerin sonuçları

Han ve diğerleri (2008) tarafından yürütülen makale çalışması, delikli yapıların güçlendirilmesi adına kompozitler için kullanışlı bir yöntem olduğu söylenebilir. Fakat çalışmada sadece çekme yönlü dayanım göz önünü alınmıştır.

Humberto ve diğerleri (2020) tarafından yürütülen çalışmada, daha önce yürütülen çalışmalar dikkate alınarak (Mattheij, Gliesche ve Feltin, 2000 ve Tosh ve Kelly, 2000) delikli kompozit plakaların düz yönlü takviye fiberlerinin serimine bağlı iyileşmesinin testler ve sonlu elemanlar modelleri ile karşılaştırması sunulmaktadır.

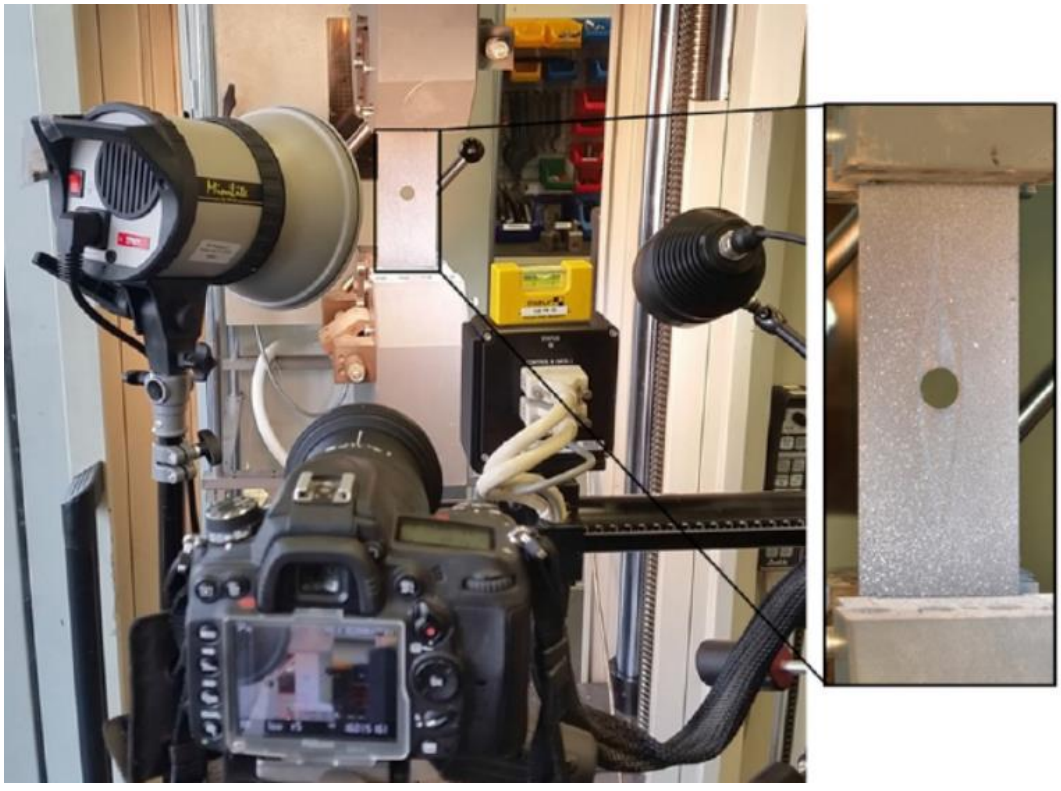
256 g/m$^2$ yoğunluğa sahip Tenax HTS 12k2 üretici kodlu karbon fiber matris ve EPH 161 ile güçlendirilmiş EPR L20 epoksi reçine birleşimi ile plaka malzemesi elde edilmiştir. Takviye ipliği olarak ise yüksek mukavemetli karbon fiber HTA 6K, 400 tex tercih edilmiştir.

Humberto ve diğerleri (2020) tarafından üç delikli ve bir deliksiz olmak üzere toplam dört farklı model tasarlanıp üretilmiştir. Şekil 2.26 ile delik etrafını güçlendirmek üzere yapılan çeşitli fiber takviye modelleri ve bunların karşılaştırması için üretilen numuneler sunulmaktadır.



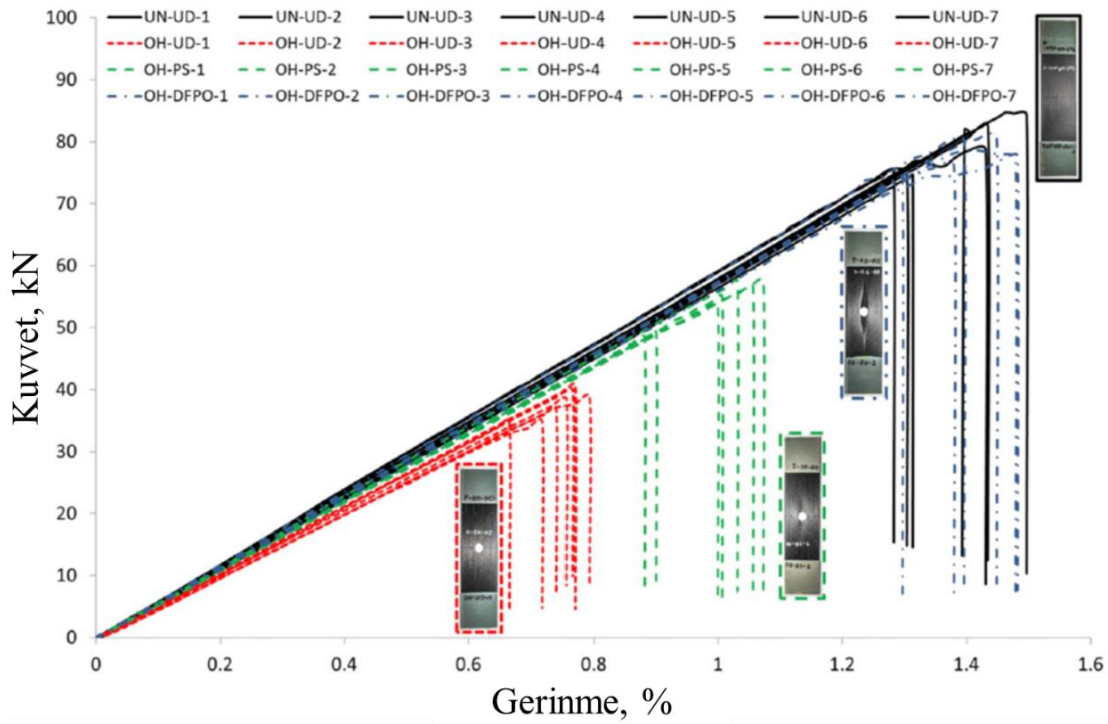

Şekil 2.26. Humberto ve diğerleri (2020) tarafından tasarım ve üretimi yapılan fiber dizilim modelleri ve test numuneleri

Zwick Universal Z250 cihazı ile DIN EN ISO 527-4 standardına uygun olarak hazırlanan çekme testi düzeneği ve sonuçları okumak için yerleştirilen GOM ARAMIS 5M DIC sistemi Şekil 2.27 ile sunulmuştur.



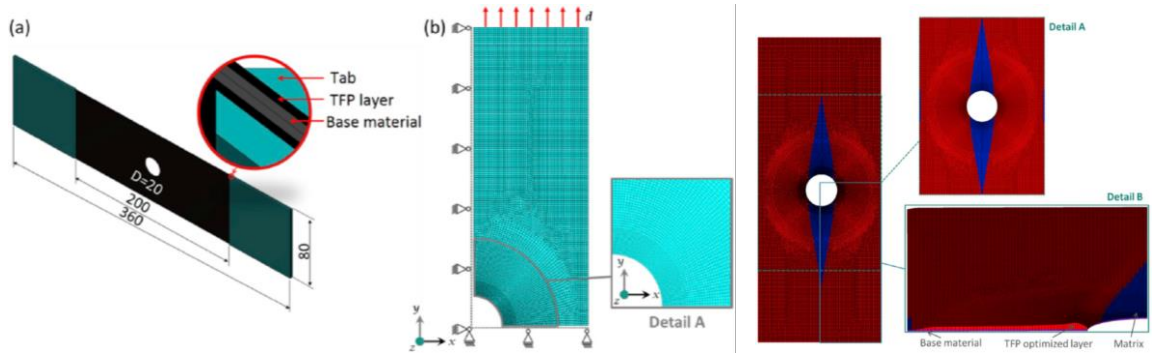
Şekil 2.27. Humberto ve diğerleri (2020) tarafından kurulan test düzeneği

Şekil 2.28 ile Humberto ve diğerleri (2020) tarafından dört farklı numune tasarımı ile gerçekleştirilen çekme testlerin yüklemeye bağlı gerinme değişim eğrileri verilmiştir. Takviye fiberinin yerleşiminin oldukça etkili olduğu ve en iyi sonucun daha önce Falcao ve diğerleri (2014) tarafından yürütülen çalışmada olduğu gibi OH-SO modeli ile elde edildiği gösterilmiştir.



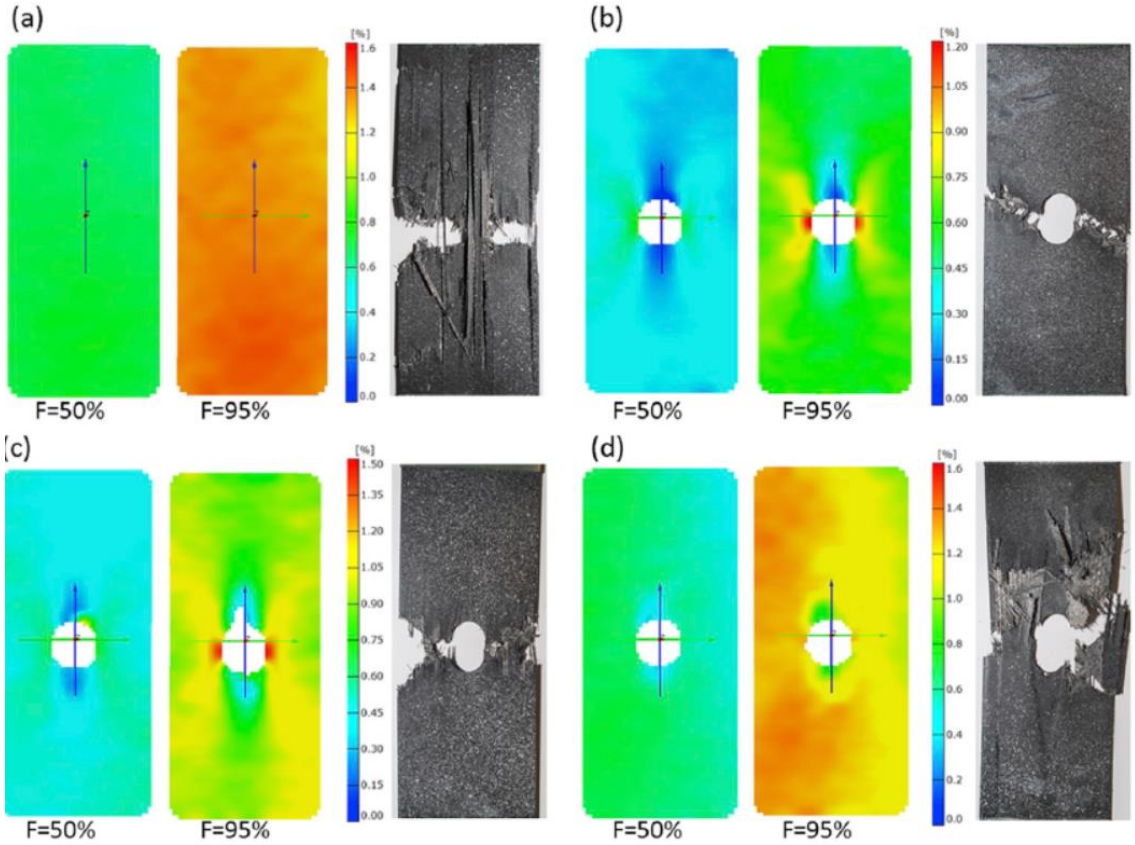

Şekil 2.28. Humberto ve diğerleri (2020) tarafından gerçekleştirilen testlerin gerinme-yükleme eğrileri

Şekil 2.29'da fiber takviye modelleme detayları ve delik etrafındaki düzenli çözüm ağı dağılımının da sunulduğu sonlu elemanlar modelleme çalışması ve sınır şartı görselleri gösterilmektedir.




Şekil 2.29. Humberto ve diğerleri (2020) tarafından oluşturulan sonlu elemanlar modellemesi detayları

Şekil 2.30 ile Humberto ve diğerleri (2020) tarafından gerçekleştirilen çekme testlerinde %50 ve %95 yükleme altında DIC işlemi ile elde edilen gerinme dağılımı ve kırılma (fracture) görselleri sunulmuştur. Ayrıca, önerilen tasarımlar için delik etrafı hasarlarına sonlu elemanlar ve numerik hesap metotları ile değinilmiştir.

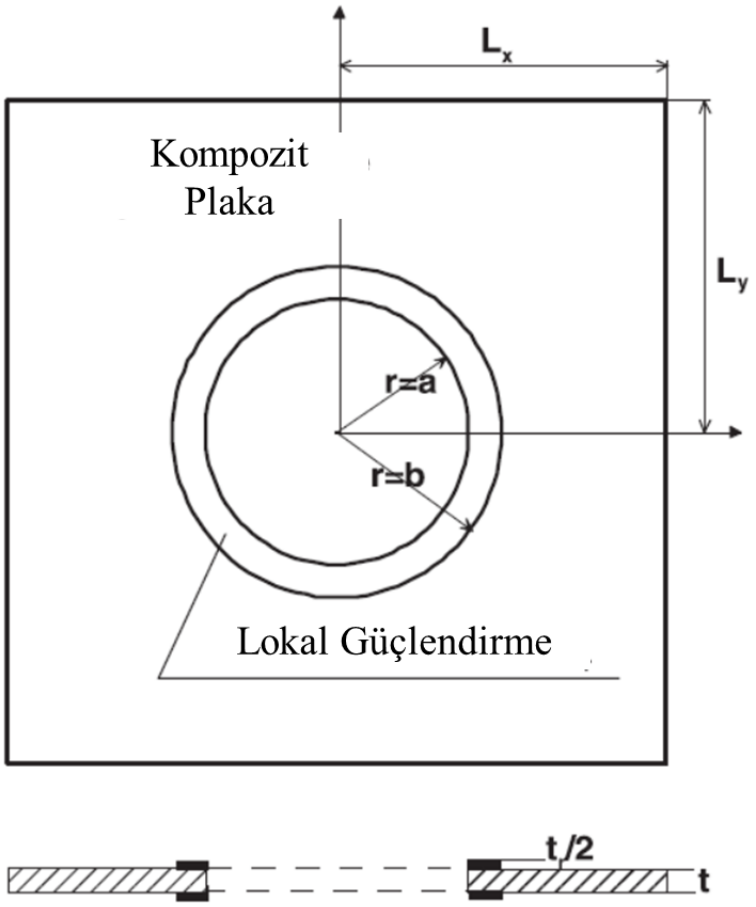



Şekil 2.30. Humberto ve diğerleri (2020) tarafından gerçekleştirilen testlerde %50 ve %95 yüklemeler altında DIC ve kırılma görselleri

Humberto ve diğerleri (2020) tarafından kaleme alınan makalede takviye fiber dizilimlerinin kıyaslaması yapılmıştır. Kompozitlerde iplik serimi açısından kıymetli bir çalışma olması rağmen sadece çekme yüklemesinin dikkate alınması ve uygulama yönteminin zorluğu nedeniyle tez çalışmamızdan farklılık oluşturmaktadır.

Muc ve Ulatowska (2012) tarafından kompozitlerde delik etrafı lokal fiber güçlendirme metodu ele alınmıştır. Çalışma özel bir malzemeden bağımsız genel bir yaklaşım sunulması hedeflenmiştir. Plaka üzerindeki güçlendirme halkası, plaka eksenine değil delik boyunca dairesel olarak serildiği varsayılmaktadır.

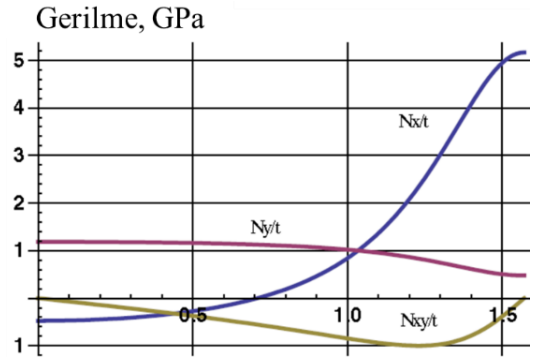
Şekil 2.31 ile kompozit plaka ve güçlendirme halkasının geometrik parametreleri ile plaka üzerindeki yerleşimi sunulmuştur. Güçlendirme yerleşimi sırasında işlemin uygulanabilirliği ve maliyeti üzerine de vurgu yapılmıştır (Galletly ve Muc, 1988).



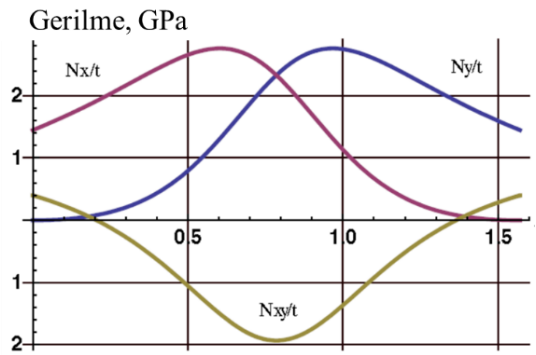

Şekil 2.31. Muc ve Ulatowska (2012) tarafından tasarlanan plaka ve güçlendirme geometrisi

Çekme yüklemesi altında Rayleigh–Ritz metodu (Muc ve Ulatowska, 2010) ve sonlu elemanlar yaklaşımı ile güçlendirmenin etkisi incelenmiştir. Numerik hesaplarda katman dizilim açıları da hesaba katılarak delik etrafı gerilme değerleri formülleri çıkarılmıştır.

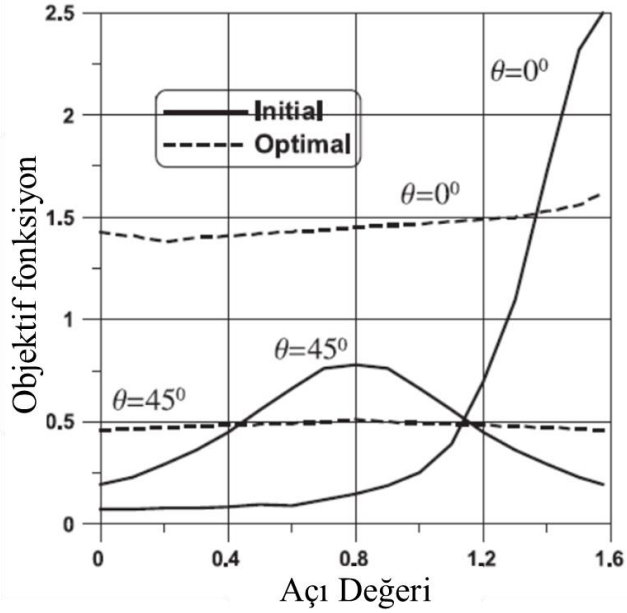
Şekil 2.32.a ve Şekil 2.32.b grafiklerinde; plakanın 0° ve 45° dizilime sahip olması halinde x, y ve xy eksenleri için delik etrafı gerilme değişimi sunulmuştur. Şekil 2.32.c grafiğinde ise 0° ve 45° açılarında güçlendirmenin katkısına yer verilmiştir. Güçlendirmesiz plakaya oranla 0°'lik dizilimde yüzde 37; 45°'lik de ise yüzde 49 oranında iyileşme sağladığı vurgulanmıştır.




a) plakanın 0° dizilimde delik etrafı gerilme dağılımı




b) plakanın 45° dizilimde delik etrafı gerilme dağılımı



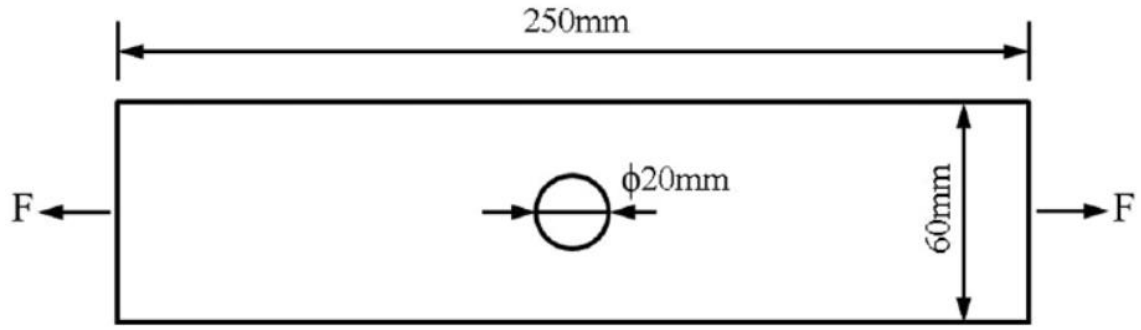

c) farklı dizilimlerde güçlendirmeli ve güçlendirmesiz plakanın karşılaştırması

Şekil 2.32. Muc ve Ulatowska (2012) tarafından yürütülen çalışmalarda plaka dizilim açısının gerilmeye ve güçlendirmenin yapı dayanımına etkisinin karşılaştırması

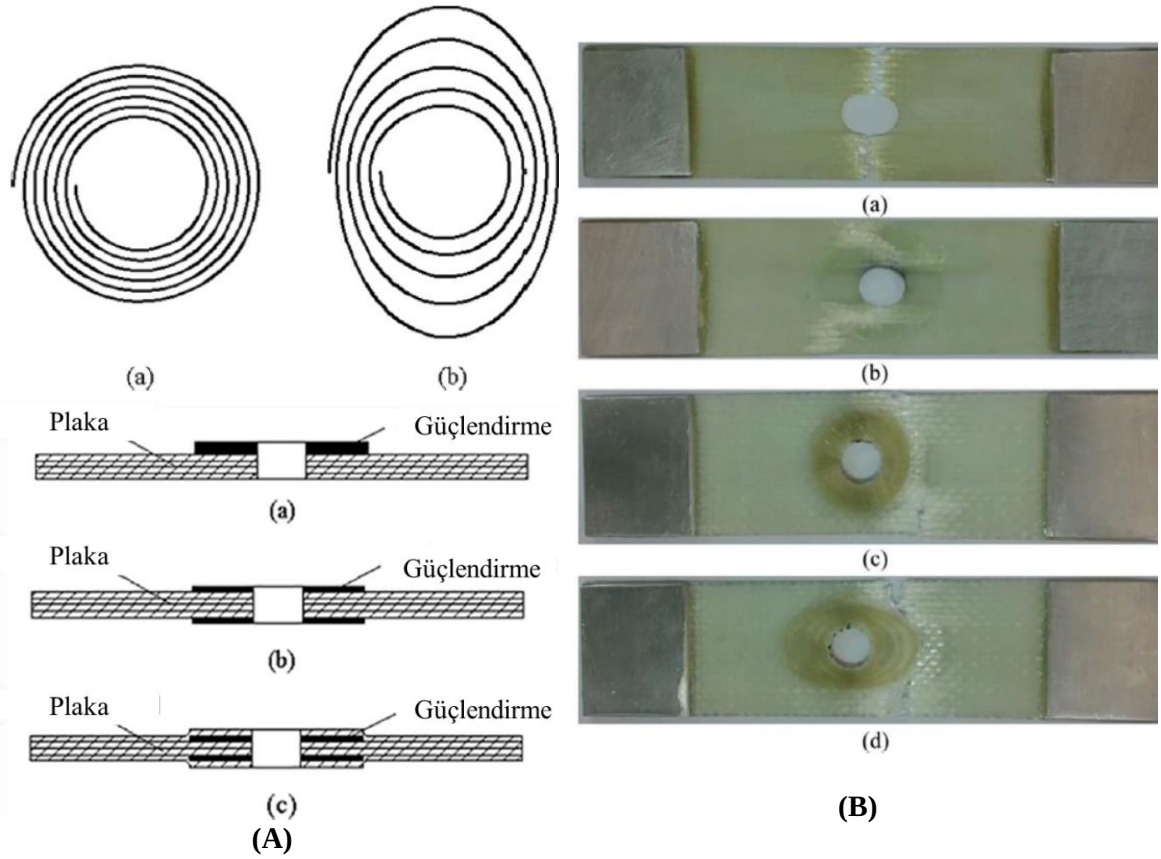
Muc ve Ulatowska (2012) tarafından yürütülen makale çalışmasında delik etrafı güçlendirme geometri tasarımında ziyade dizilim açısı ön planda tutulmuştur. Yürütmüş olduğumuz çalışmada ise sadece halka tipi değil toplam dört farklı güçlendirme modeli incelenmektedir.

Zhu ve diğerleri (2018) tarafından kompozit plaklar için "Variable Angle Tow" yöntemi ile delik etrafı güçlendirme yöntemi çalışması yürütülmüştür. Plaka malzemesi olarak cam fiber (30 g/m$^2$) ve epoksi reçine (AEP312A) birleşimi tercih edilmiştir. Takviye ipliği (tow) malzemesi ise SC11-2400W üretici kodlu cam fiber olarak belirlenmiştir.

Şekil 2.33 ile 250 mm uzunluk, 60 mm genişlik ve 20 mm deliğe sahip plaka geometrisi sunulmaktadır. Şekil 2.34.A ile Zhu ve diğerleri (2018) tarafından tasarlanan dairesel, eliptik halka ve kumaş güçlendirme tipleri ve bu tasarımların plaka üzerine yerleşimi gösterilmektedir. Şekil 2.34.B'de ise üretilen numuneler sunulmuştur. Farklı dizilim ve güçlendirme şekillerinde 17 konfigürasyon test numunesi tasarlanmıştır.

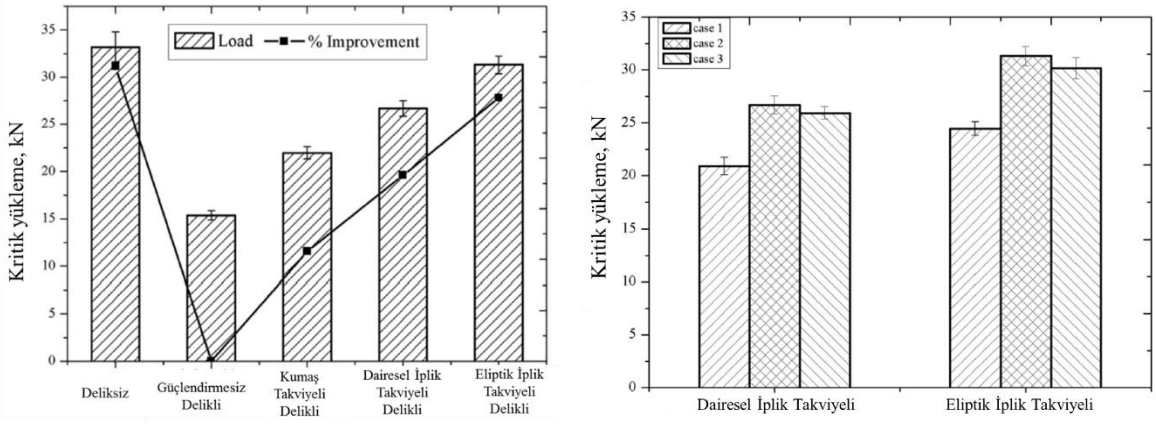



Şekil 2.33. Zhu ve diğerleri (2018) tarafından tasarlanan plaka geometrisi




Şekil 2.34. Zhu ve diğerleri (2018) tarafından tasarlanan güçlendirme şekilleri ve plakaya yerleşimleri

INSTRON 5985 test cihazı ile ASTM D 3039/D 3039M (2017) standardına göre çekme testleri icra edilmiştir. Testlerden elde edilen sonuçlar ile Şekil 2.35 ile sunulan karşılaştırma grafikleri elde edilmiştir. Grafiklerde güçlendirme şekli ve yerleşiminin plaka dayanımına etkisine değinilmektedir.




Şekil 2.35. Zhu ve diğerleri (2018) tarafından yürütülen testlerden elde edilen karşılaştırma verileri

Güçlendirmesiz plakaya oranla; kumaş, dairesel iplik ve eliptik iplik eklemenin yapı dayanımını sırasıyla yüzde 43, yüzde 74 ve yüzde 104 oranında iyileştirildiği vurgulanmıştır. Güçlendirmenin hem üstten hem alttan yapılması (case) diğer dizilimlere göre daha iyi sonuç verdiği görülmüştür. Ayrıca sonlu elemanlar analizleri yürütülerek test sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Zhu ve diğerleri (2018) tarafından yürütülen makalede hem güçlendirmenin şeklini hem de plaka üzerine yerleşim metodunu dikkate almıştır. Takviye geometrisi üzerine çalışması ile yöntem olarak esinlenebilecek bir çalışma olmak ile birlikte kayma dayanımının dikkate alınmaması farklı yön olarak görülmektedir.

# 3. MALZEME VE TEST DÜZENEĞİ

Malzeme olarak, hava yapılarında sıklıkla tercih edilen karbon epoksi prepreg seçilmiştir. Hexcel firması tarafından üretimi yapılan HexPly 8552 Epoksi matrisi ve yine aynı firmanın ticari ürünü olan AGP193-PW karbon fiber takviyesi kullanılmıştır (193 eki metrekarede 193 gram karbon kullanıldığı ifade etmektedir). Kompozit malzeme içerisindeki fiber oranı, %55,3 civarındadır (Hexcel, 2023).

Çizelge 3.1'de, oluşturulan prepreg malzemenin Hexcel firması tarafından Hexply-8552 ürün kodu ile sunulan mekanik özellikleri listelenmiştir.

Çizelge 3.1. Hexply 8552 AGP193-PW kumaş tipi karbon epoksi prepreg malzemesinin mekanik özellikleri

| Özellik | Değer | Birim |
|---|---|---|
| Lamine yoğunluğu | 1,57 | $g/cm^3$ |
| 0° Çekme Mukavemeti | 828 | MPa |
| 90° Çekme Mukavemeti | 793 | MPa |
| 0° Basma Mukavemeti | 883 | MPa |
| 0° Kısa Kiriş Kayma Mukavemeti | 84 | MPa |
| 0° Çekme Modülü | 68 | GPa |
| 90° Çekme Modülü | 66 | GPa |
| 0° Basma Modülü | 60 | GPa |
| Poisson Oranı* | 0,33 | - |
| * *Poisson oranı AGP193-PW kataloğunda yer almamakta olup karbon epoksi prepregleri için genel bir değer referans alınmıştır (Cuartas ve diğerleri, 2014 ve Jin, Zhang, Chen ve Du, 2023).* | | |

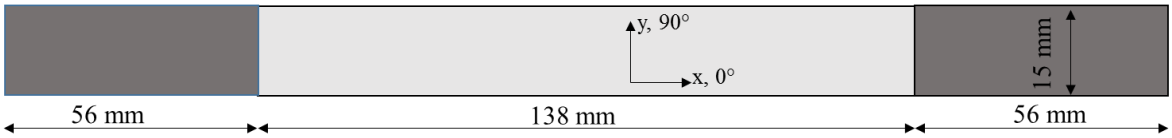
Çizelge 3.1 ile sunulan değerler 1 katman için 25 °C ortam koşulunda elde edilen verilerdir. Üretici firma tarafından -55°C ile +91°C aralığında değerler de verilmiş ve en fazla yüzde 10 fark olduğu görülmektedir. Bir katmanın kalınlığı 0,195±0,01 mm olup çalışmada 0 derecelik serimler ile 15 katman kullanılmış ve toplam numune kalınlığının 3,0±0,1 mm olarak elde edilmiştir.

## 3.1. Çekme Testi Numune Üretimi

Deliksiz, delikli, papatya güçlendirmeli ve yüzük güçlendirmeli olmak üzere dört farklı tasarım için çekme testleri icra edilmiştir. The American Society for Testing and Materials (ASTM) standardı referans alınarak tasarlanan numunelere ait parametreler ve üretim sonrası elde edilen geometrik değerler bu bölümde verilmektedir.

### 3.1.1. Deliksiz plaka çekme testi

İlk olarak Çizelge 3.1'de üretici firma tarafından verilen malzeme özelliklerinin doğrulanmasına yönelik, ASTM D3039 (2017) standardına uygun olarak çekme testi uygulanmıştır. Bu testin uygulanması için Şekil 3.1 ile sunulan $[0_{15}]$ dizilimli 3 mm kalınlığında (h), 15 mm genişlik (w) ve toplam 250 mm uzunluğunda (L) aynı ebatta üç numune üretimi yapılmaktadır.




Şekil 3.1. ASTM D3039 çekme testi numune geometrisi

Plakanın her iki ucundan, belirli bir mesafede tutma bölgesi (tab) oluşturulmaktadır. Test standardının (ASTM D3039, 2017) 8.2.2.6 başlığında, Eş. 3.1 ile sunulan formülden minimum tutma genişliği hesaplanmaktadır. Aynı dokümanın önerilen geometri kısmında, tutma bölgesi uzunluğu 56 mm olarak önerildiğinden bu değer baz alınmıştır. Bu durumda da tutma bölgeleri hariç etkili numune uzunluğu, 250-2*56= 138 mm olarak bulunmuş ve analitik hesaplarda bu değer referans alınmıştır.

$$L_{min} = \frac{F^{tu} h}{2F^{su}} \qquad (3.1)$$

$L_{min}$ = Minimum Tutma Bölgesi Genişliği, mm

$F^{tu}$ = Çekme Mukavemeti, MPa

$F^{su}$ = Kayma Mukavemeti, MPa

h = Plaka Kalınlığı, mm

$$L_{min} = \frac{828 * 3}{2 * 84} = 15\ mm$$

Çalışma boyunca birçok test numunesi üretildiğinden takibi kolay olması adına isimlendirme yapılmıştır. Test Specimen (numune) kısaltması olarak TS ön ifadesi kullanılmıştır. Çekme test için üretilen numunelerin kodları, TS-1, TS-2 ve TS-3 şeklindedir. Resim 3.1 ile üretilen çekme test numuneleri görselleri, Çizelge 3.2'de de bu parçaların kumpas ile ölçümleri sonrası elde edilen ebatları sunulmaktadır.

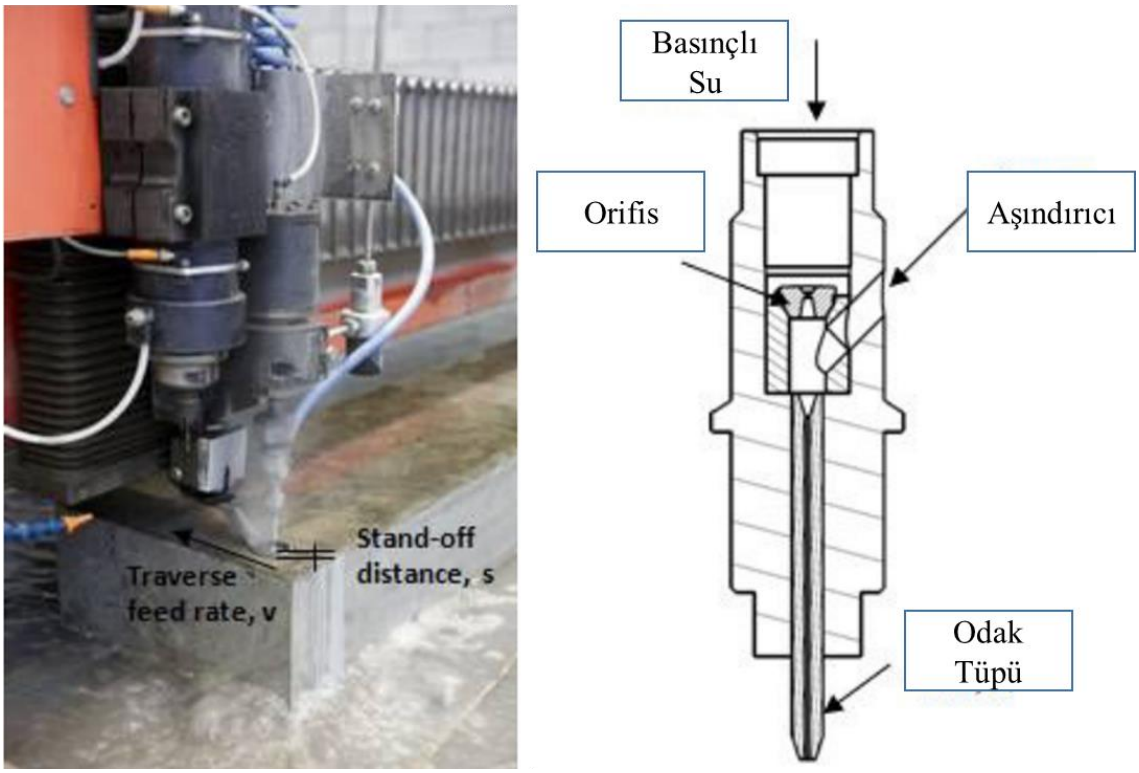


Resim 3.1. Üretimi yapılan TS-1, TS-2 ve TS-3 numuneleri

Çizelge 3.2. TS-1, TS-2 ve TS-3 numuneleri üretim sonrası geometrik ölçümleri

| Numune Kodu | Kalınlık (mm) | Genişlik (mm) | Uzunluk (mm) |
|---|---|---|---|
| TS-1 | 3,06 | 15,2 | 250,3 |
| TS-2 | 3,07 | 15,2 | 250,0 |
| TS-3 | 3,05 | 15,1 | 250,5 |

Geometrik hassasiyetin sağlanması ve kesim esnasında katmanlar arası ayrılma (deleminasyon) oluşmaması adına Alberdi ve diğerleri (2013) tarafından yürütülen çalışmada da önerildiği üzere kompozit kesme metodu olarak su jeti yöntemi tercih edilmiştir. Referans çalışmada sunulan su jeti yönteminin kesici bölgesindeki bileşenler ve parametreler, Şekil 3.2 ile gösterilmektedir.




Şekil 3.2. Su jeti yöntemi alt parçaları ve parametreleri

ASTM D3039 Çekme Testi sonucunda, dokümanın 12.1 bölümünde verilen ve Eş. 3.2 ve Eş. 3.3 ile sunulan formüller ile çekme dayanımı hesaplanmaktadır. Üretici firma verileri referans alındığında, çekme testi sonrası numunelerin ortalama çekme yük dayanımı 37260 N olması beklenmektedir.

$$F^{tu} = \frac{P^{\max}}{A} \quad (3.2)$$

$$\sigma_i = \frac{P_i}{A} \quad (3.3)$$

$F^{tu}$ = Çekme Mukavemeti, MPa: Malzeme verisine göre 828 MPa

$P^{max}$ = Test kuponu kırılma esnasındaki kuvvet, N

$\sigma_i$ = Test kuponları için gerilme değeri, MPa

$P_i$ = Test kuponları için kuvvet değeri, N

A = Ortalama Kesit alanı, $mm^2$

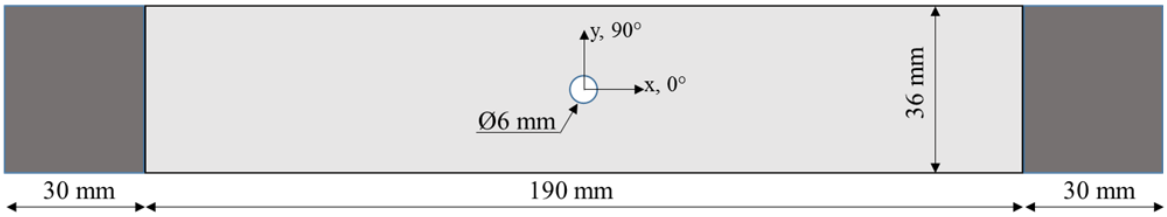
$$A = w * h = 15 * 3 = 45\ mm^2$$

$$P_{max} = F^{tu}A = 828 * 45 = 37260\ N$$

### 3.1.2. Güçlendirmesiz delikli çekme testi

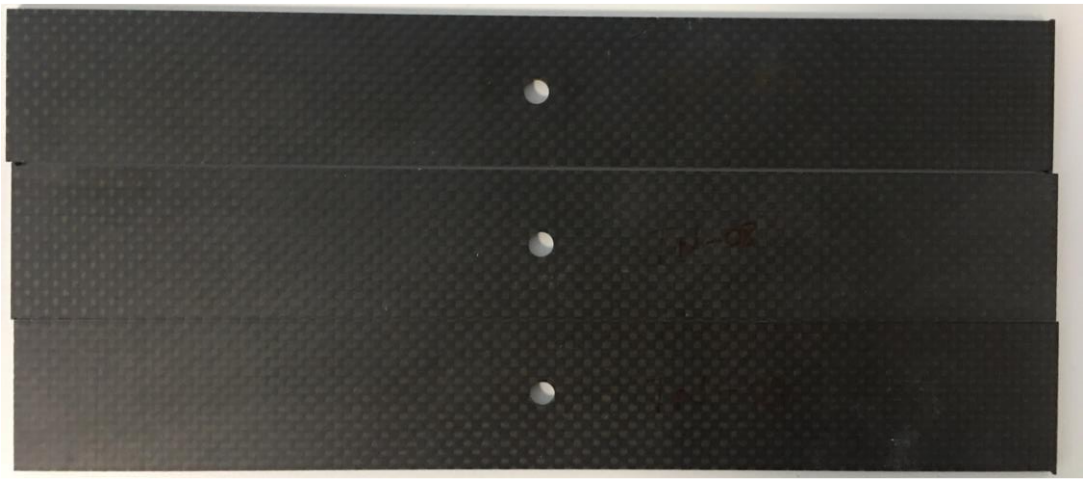
Güçlendirme eklemesi uygulamadan önce güçlendirmeye sahip olmayan delikli plakalar ile ASTM D5766 (2011) açık delik çekme testi (Open Hole Tension, OHT) uygulanmıştır. Bu test için test standardının 8. Bölümünde tanımlandığı ve Şekil 3.3 ile sunulduğu gibi [$0_{15}$] dizilimli 3 mm kalınlığında (h), 36 mm genişlik (w) ve 250 mm uzunluğunda (L) aynı ebatta 3 numune üretimi (TS-4, TS-5 ve TS-6) yapılacaktır. Delikli plakalar ile yapılan testler esnasında alt ve üstte 30 mm uzunluğunda bölgeden tutma gerçekleştirilir. Bu nedenle yürütülecek analizlerde toplam uzunluk 190 mm (250 – 30*2) alınır.

Plaka merkezlerine 6 mm çapında (D) delik açılarak test metodunda yer alan w/D oranının altı olması sağlanır.




Şekil 3.3. ASTM D5766 delikli çekme plaka numune geometrisi

Resim 3.2 ile su jeti yöntemi ile üretilen ve delikleri açılan güçlendirmesiz TS-04, TS-05 ve TS-06 çekme test numuneleri görselleri, Çizelge 3.3 ile de bu parçaların kumpas ile ölçümleri sonrası elde edilen geometrik özellikleri sunulmaktadır.



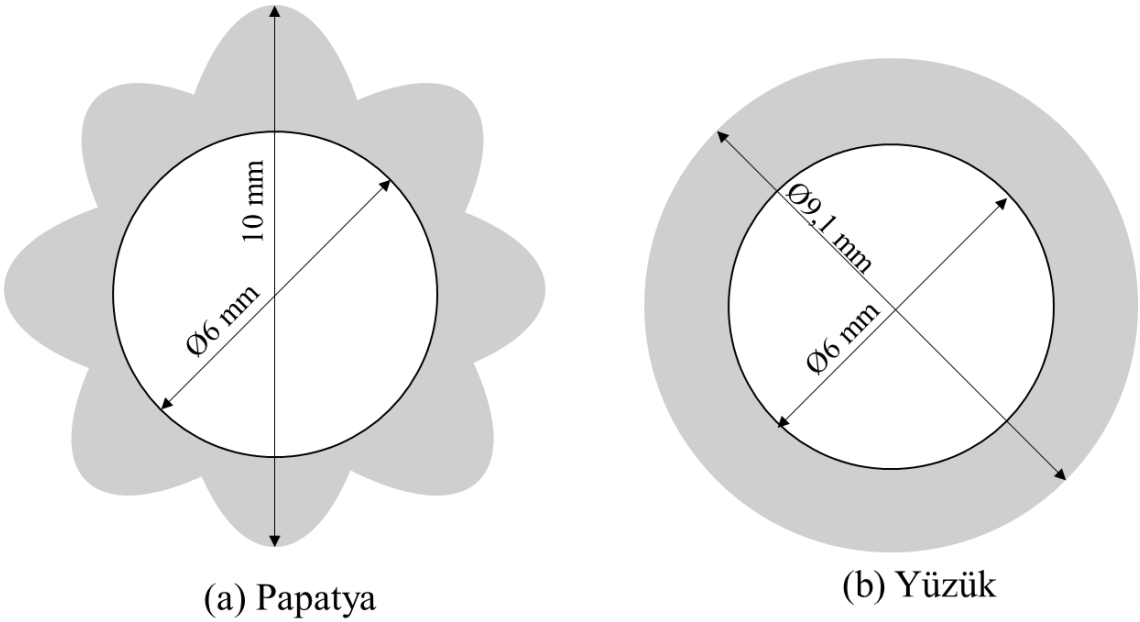
Resim 3.2. Üretimi yapılan TS-4, TS-5 ve TS-6 numuneleri

Çizelge 3.3. TS-4, TS-5 ve TS-6 numuneleri üretim sonrası geometrik ölçümleri

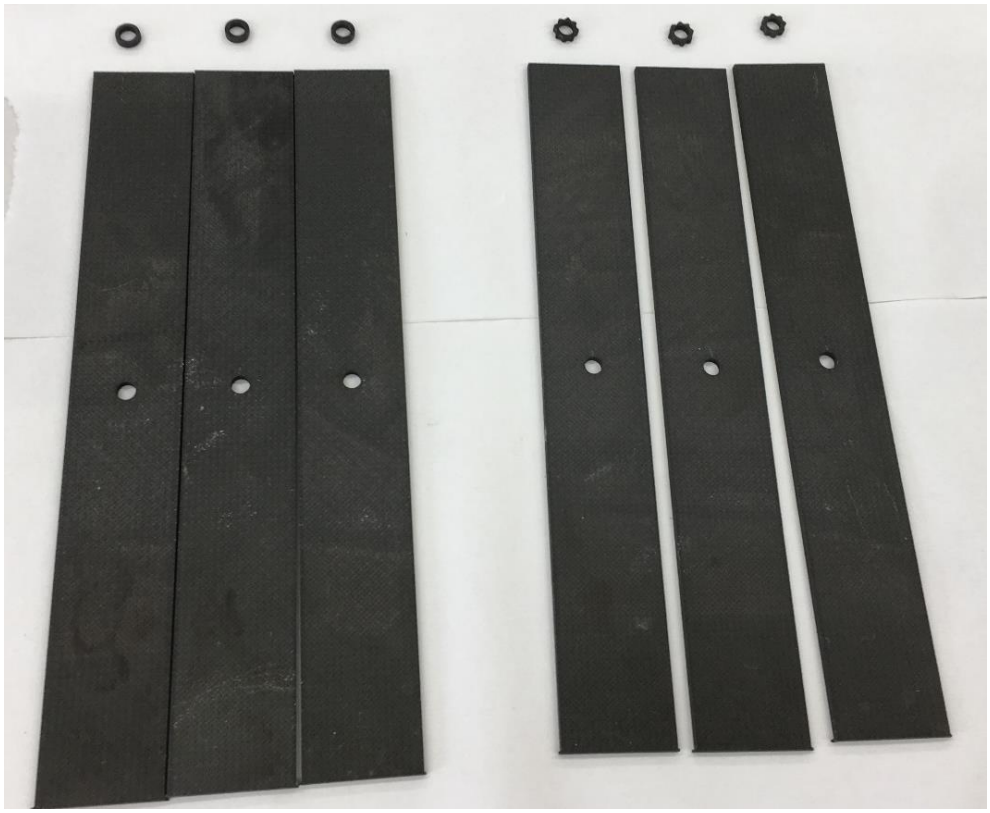
| Numune Kodu | Kalınlık (mm) | Genişlik (mm) | Uzunluk (mm) | Delik Çapı (mm) |
|---|---|---|---|---|
| TS-4 | 3,04 | 36,1 | 250,5 | 5,95 |
| TS-5 | 3,06 | 36,1 | 250,5 | 5,90 |
| TS-6 | 3,05 | 36,1 | 250,4 | 5,92 |

### 3.1.3. Güçlendirmeli test numunesi üretimi

Güçlendirmeli testlerde delik etrafına Şekil 3.4 ile sunulduğu üzere eş yüzey alanına sahip papatya ve yüzük olmak üzere iki farklı güçlendirme uygulanmaktadır. Güçlendirmeli numunelerin (TS-7 – TS-12) sonuçlarına geçmeden önce bu ilave parçaların Resim 3.3 ile sunulan delikli plakalara nasıl uygulandığına değinilecektir.




Şekil 3.4. Papatya ve yüzük tipi güçlendirme geometrileri



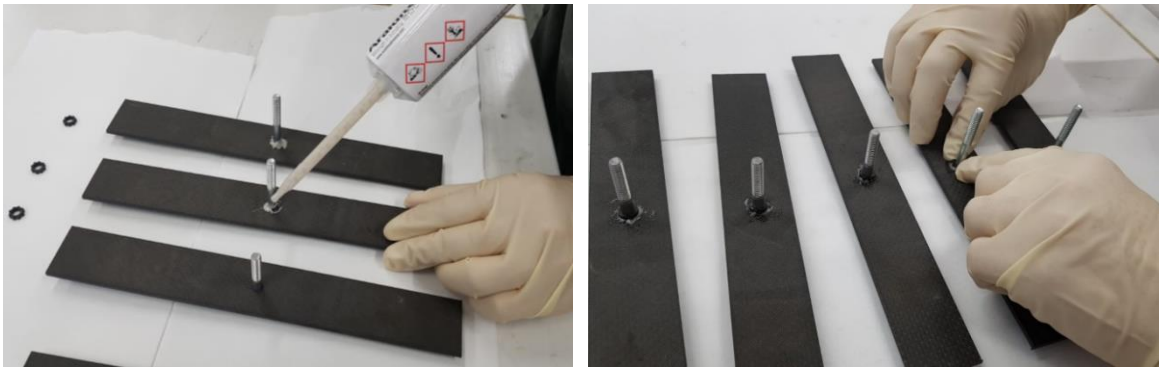
Resim 3.3. TS-7 – TS-12 güçlendirme uygulanacak delikli plakalar

Güçlendirme yapıştırma işlemleri esnasında, kompozitlerde tercih edilen Araldite 2015-1 Epoksi yapıştırıcı kullanılmıştır. Güçlendirmeyi, delik çapı ile konumlandırmak için M6 dibi dişsiz cıvata kullanılmıştır. Cıvatanın, kompozite yapışmaması için Loctite Frekote 770NC kalıp ayırıcı uygulanmıştır. Cıvatalara kalıp ayırıcı uygulama işlemi, Resim 3.4 ile gösterilmektedir.



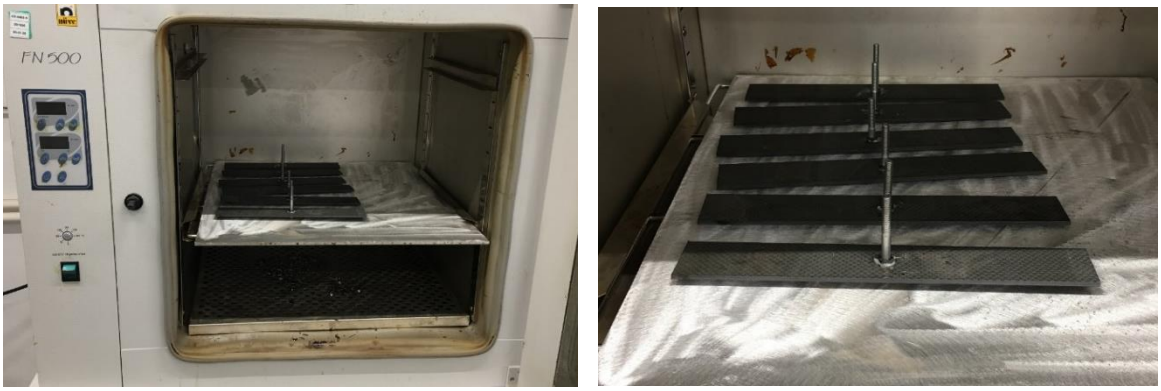

Resim 3.4. Cıvatalara kalıp ayırıcı uygulaması

Plaka ve güçlendirme parçası hava tabancası ile üzerinde toz kalmayacak şekilde temizlenir ve Araldite 2015-1 yapıştırıcısı, özel tabancası ile vidanın etrafına dairesel olarak uygulanır. Yapıştırıcı uygulaması sonrası vakit kaybetmeden güçlendirmeler cıvata deliğinden geçirilerek plaka üzerine yerleştirilir ve boşluk kalmaması adına tırnak ile üzerine 5-10 saniye bastırılır. Yapıştırma uygulama işlemi, Resim 3.5 ile sunulmaktadır.



Resim 3.5. Güçlendirme yapıştırma işlemi

Yapıştırıcının uygun şekilde kürlenmesi için 40 dereceye ayarlı fırında 16 saat bekletilmiştir. Yapıştırıcı datasında kürlemenin bu şekilde yapılması halinde oda sıcaklığında yapılan testlerde yapıştırıcının yüzde 4 oranına kadar kırılmaya dayanıklı olacağı belirtilmektedir. Resim 3.6'da güçlendirme yapıştırma işlemi yapılıp 40 derece ayarlı fırına yerleştirilen numune görselleri sunulmaktadır.



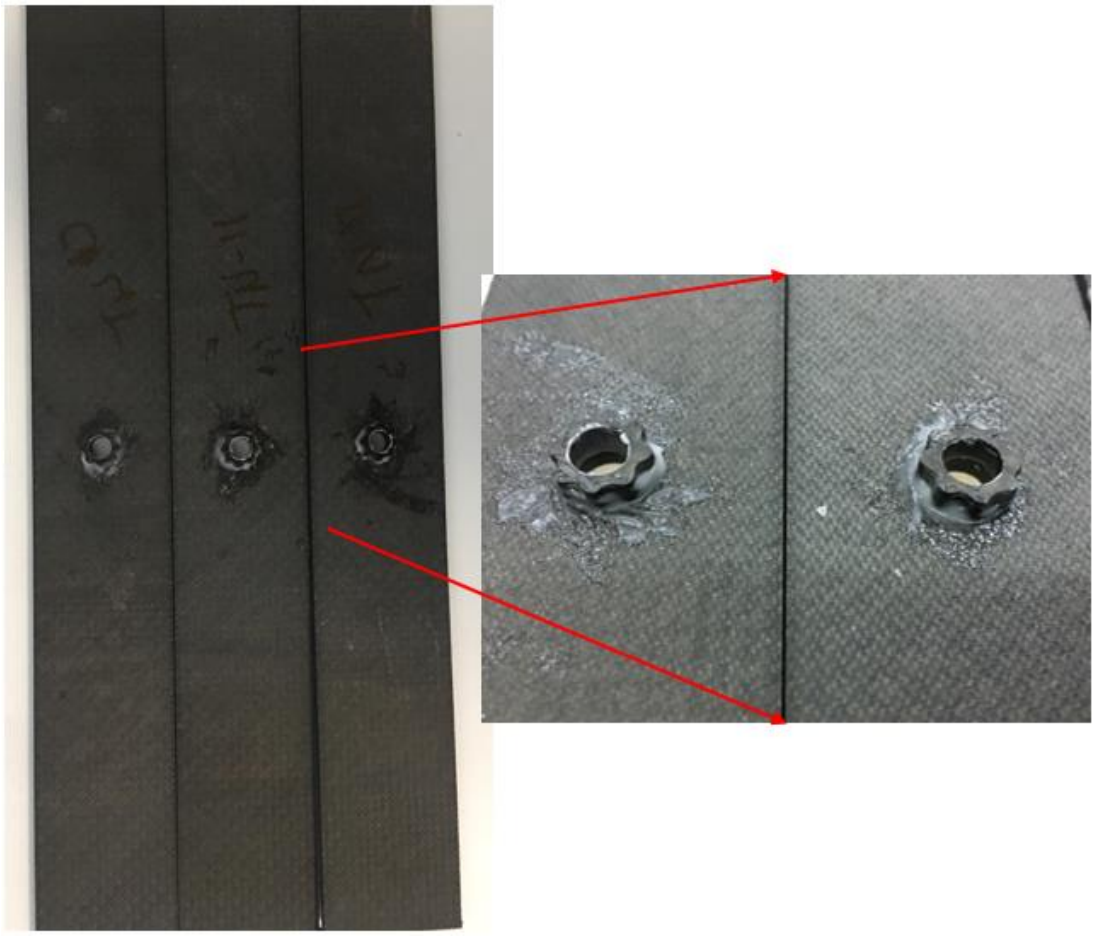

Resim 3.6. Güçlendirmeli numunelerin fırında kürleme işlemi

### 3.1.4. Papatya güçlendirmeli çekme testi

Şekil 3.3 ile 3 mm kalınlığa sahip papatya güçlendirmenin detay geometrisi sunulmuştur.

Oluşturulan elipslerin majör çapı 10 mm, minör çapı 4 mm olarak belirlenmiştir. Diğer testlerde olduğu gibi bu numune de 3 adet olarak üretilmiştir (TS-7, TS-8 ve TS-9).

Resim 3.7 ile üretilen ve yapıştırma işlemi yapılan papatya güçlendirmeli çekme test numuneleri görselleri, Çizelge 3.4'te delikli plakaların kumpas ile ölçümleri sonrası elde edilen ebatları sunulmaktadır.



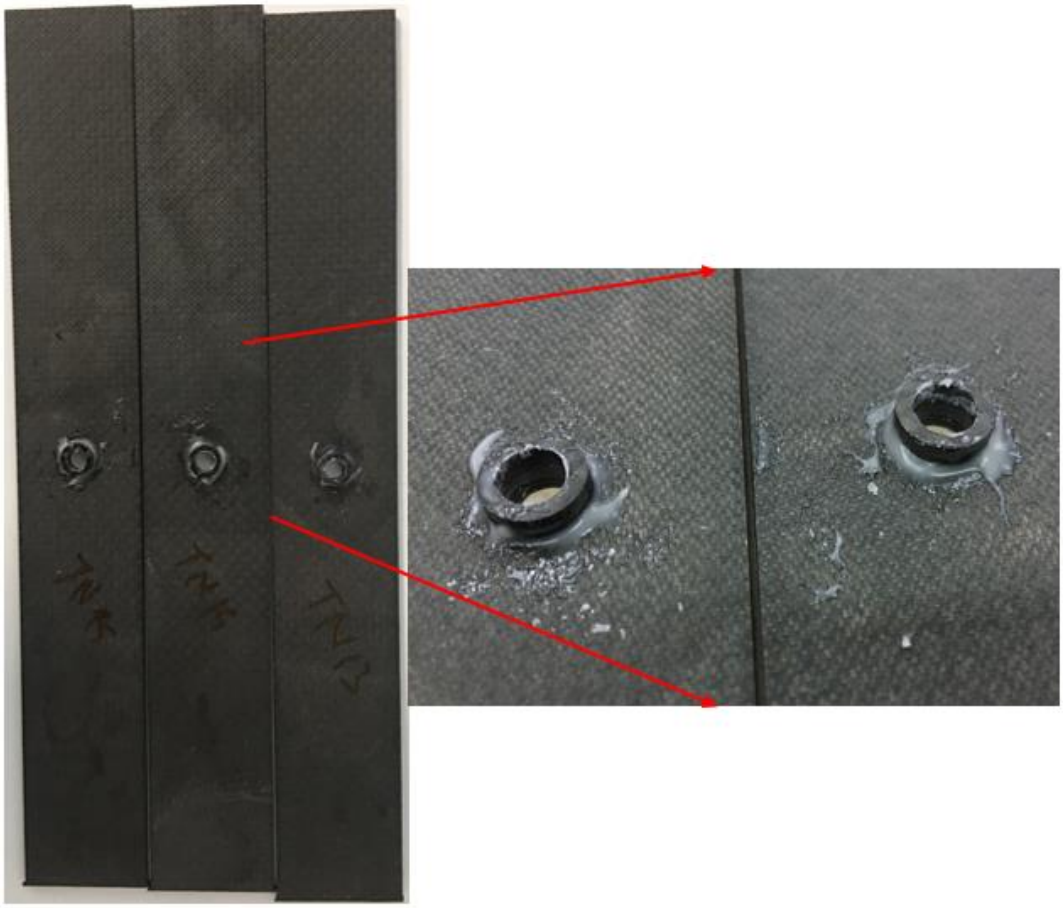
Resim 3.7. TS-7, TS-8 ve TS-9 Papatya güçlendirmeli test numuneleri

Çizelge 3.4. TS-7, TS-8 ve TS-9 numuneleri üretim sonrası geometrik ölçümleri

| Numune Kodu | Kalınlık (mm) | Genişlik (mm) | Uzunluk (mm) | Delik Çapı (mm) |
|---|---|---|---|---|
| TS-7 | 3,10 | 36,1 | 250,4 | 5,95 |
| TS-8 | 3,11 | 36,0 | 250,4 | 5,94 |
| TS-9 | 3,11 | 36,1 | 250,3 | 5,97 |

### 3.1.5. Yüzük güçlendirme çekme testi

Papatya modeli ile karşılaştırma yapmak için yüzük güçlendirme tasarım ve üretimi yapılmıştır (TS-10, TS-11 ve TS-12). Papatya tasarımı ile aynı hacmi elde etmek adına iç çapı 6 mm olan yüzük modelinin, dış çapı 9,12 mm olmalıdır. Resim 3.8 ile üretilen ve delikli plakaya yapıştırma işlemi yapılan yüzük güçlendirmeli çekme test numuneleri ve Çizelge 3.5'te ise plakaların kumpas ile ölçümleri sonrası elde edilen geometrik özellikleri sunulmaktadır.



Resim 3.8. TS-10, TS-11 ve TS-12 Yüzük güçlendirmeli test numuneleri

Çizelge 3.5. TS-10, TS-11 ve TS-12 numuneleri üretim sonrası geometrik ölçümleri

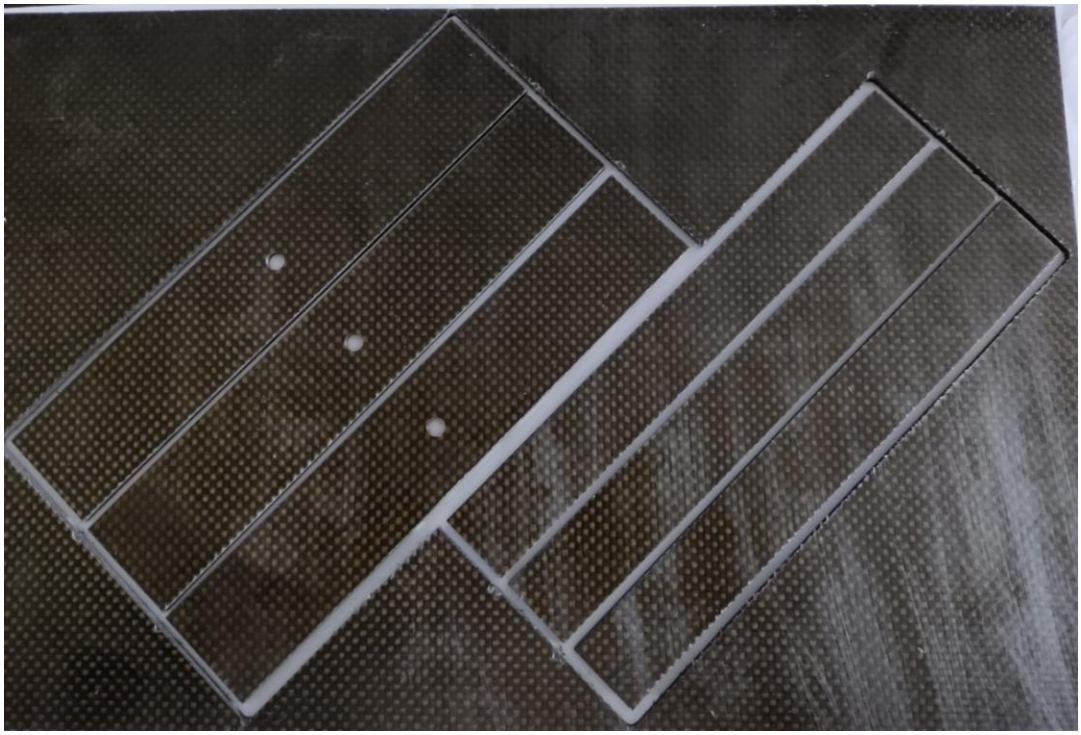
| Numune Kodu | Kalınlık (mm) | Genişlik (mm) | Uzunluk (mm) | Delik Çapı (mm) |
|---|---|---|---|---|
| TS-10 | 3,12 | 36,0 | 250,4 | 5,95 |
| TS-11 | 3,09 | 36,1 | 250,4 | 5,97 |
| TS-12 | 3,11 | 36,0 | 250,4 | 5,96 |

## 3.2. Kayma Testi Numune Üretimi

$[45_{15}]$ dizilimli deliksiz ve delikli olmak üzere iki farklı tasarım için çekme testleri icra edilmiştir. Bu bölümde, ASTM D3518 (2001) standardı referans alınarak tasarlanan numunelere ait parametreler sunulmaktadır.

Resim 3.9 ile kayma testlerinde kullanılan test numunelerinin, 0-90 derece serimli kumaş tipi plakadaki yerleşimi sunulmaktadır. 200 mm uzunluk ve 25 mm genişliğe sahip üç adet ±45° serime sahip deliksiz plaka elde edilmiştir. Bu test numuneleri TS-13, TS-14 ve TN-15 olarak adlandırılmaktadır. Üç adet de 200 mm uzunluk, 36 mm genişlik ve merkezinde 6 mm delik çapına (W/d= 6) sahip TS-16, TS-17 ve TS-18 olarak kodlandırılan delikli numune çıkarılmıştır. Üretim sonrası elde edilen geometrik ölçüler Çizelge 3.6 ile sunulmaktadır.

200 mm optimum uzunluktaki $[45_{15}]$ dizilimli CFRP numunelerin üst ve alt bölgelerinden 30 mm'lik kısımları tutma bölgesi olarak kullanılmıştır. Bu nedenle analizler sırasında aktif uzunluk, 140 mm olarak alınmıştır.



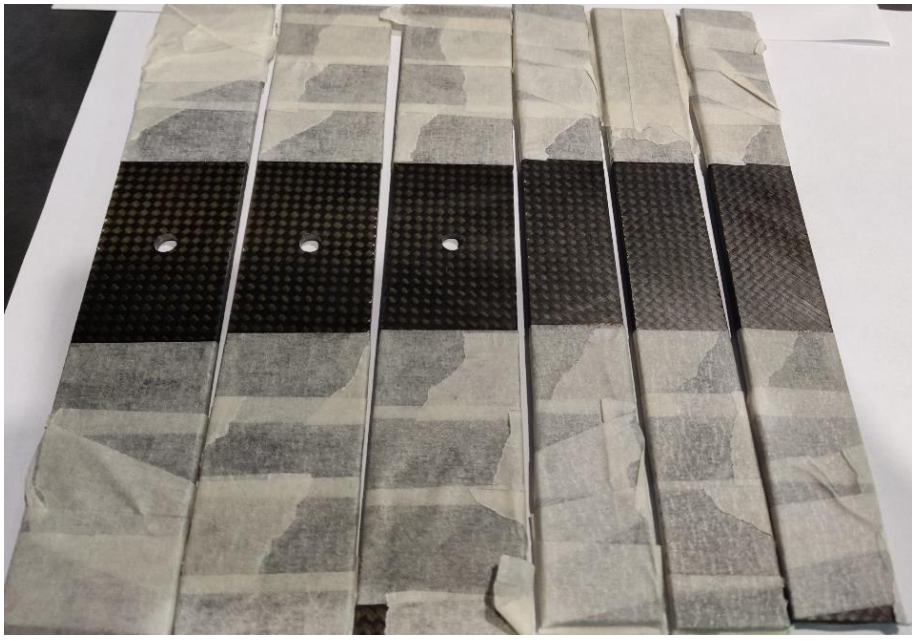
Resim 3.9. TS-13 – TS-18 kayma test numunesi plakaları

Çizelge 3.6. TS-13 – TS-18 numuneleri üretim sonrası geometrik ölçümleri

| Numune Kodu | Kalınlık (mm) | Genişlik (mm) | Uzunluk (mm) | Delik Çapı (mm) |
|---|---|---|---|---|
| TS-13 | 3,11 | 25,0 | 200,2 | - |
| TS-14 | 3,09 | 25,1 | 200,1 | - |
| TS-15 | 3,10 | 25,0 | 200,3 | - |
| TS-16 | 3,09 | 36,1 | 200,1 | 5,94 |
| TS-17 | 3,12 | 36,0 | 200,4 | 5,97 |
| TS-18 | 3,10 | 36,1 | 200,3 | 5,96 |

DIC yöntemi için numune işlemleri

Altı adet numune ile yürütülen kayma testleri esnasında DIC yöntemi kullanılarak test sırasındaki plaka üzerinde oluşan gerinme dağılımının gözlenmesi hedeflenmiştir. Bu amaçla kırılmanın görülmesi muhtemel olan bölgeye, gerinme değişiminin takibi için boyama işlemi uygulanmaktadır. Resim 3.10 ile muhtemel kırılma/ayrılmanın gözleneceği orta kısım haricindeki alt ve üst bölgelerin maskelenmiş görseli sunulmaktadır.



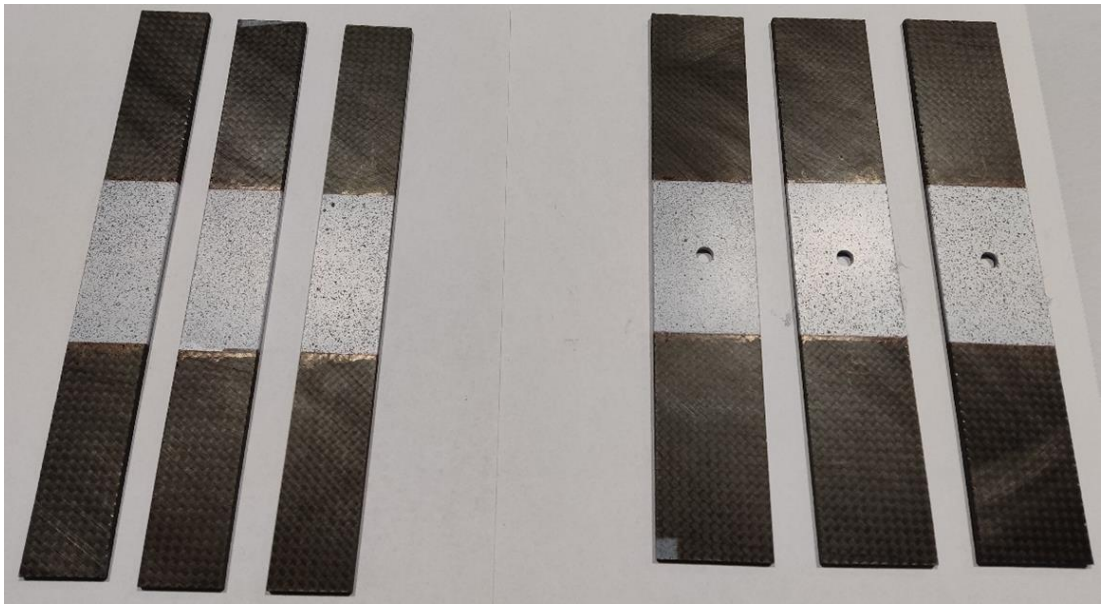
Resim 3.10. Kayma test numuneleri maskeleme işlemi

Resim 3.11'de ilk olarak beyaz renkli sprey boya ile numunelerin boyanma işlemi gösterilmektedir. Sprey boyama sırasında ortam havalandırması sağlanmasına ve maske kullanımına özen gösterilmiştir.

Çekme testi sırasında numune uzamasının takip edilebilmesi adına sprey ile plaka boyama işlemi sonrası numune üzerine fırça yardımı ile siyah renkli puntolar oluşturulması sağlanır. İşlem sonrası, Resim 3.12 ile gösterilen boyanmış ve maske bantları çıkarılmış hali elde edilir.



Resim 3.11. Kayma test numuneleri boyama işlemi



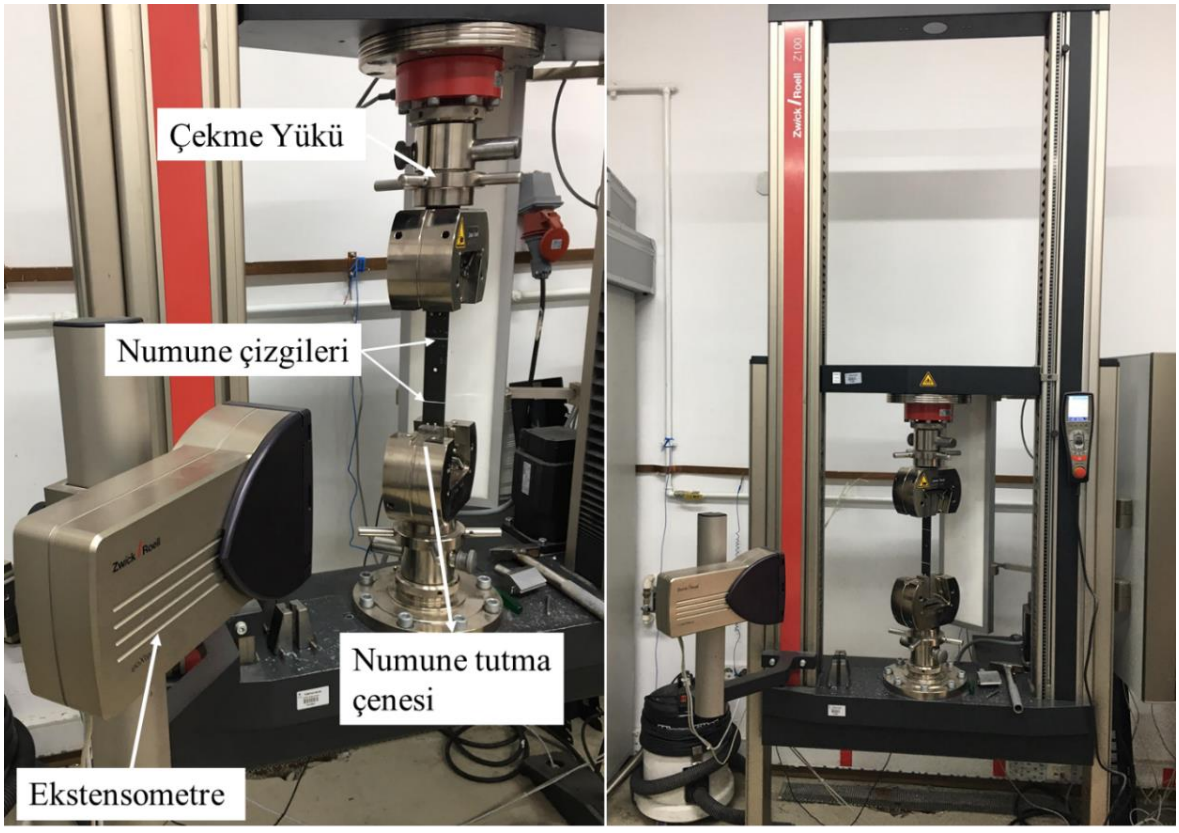
Resim 3.12. Noktalı boyanma işlemi tamamlanmış test numuneleri

## 3.3. Test Düzenekleri

Bu bölümde TÜBİTAK SAGE ve ODTÜ Havacılık ve Uzay Fakültesi Test Laboratuvarlarında gerçekleştirilen çekme testlerinde kullanılan test cihazı ve test düzenekleri hakkında bilgiler sunulmaktadır.

### 3.3.1. Çekme testi düzeneği

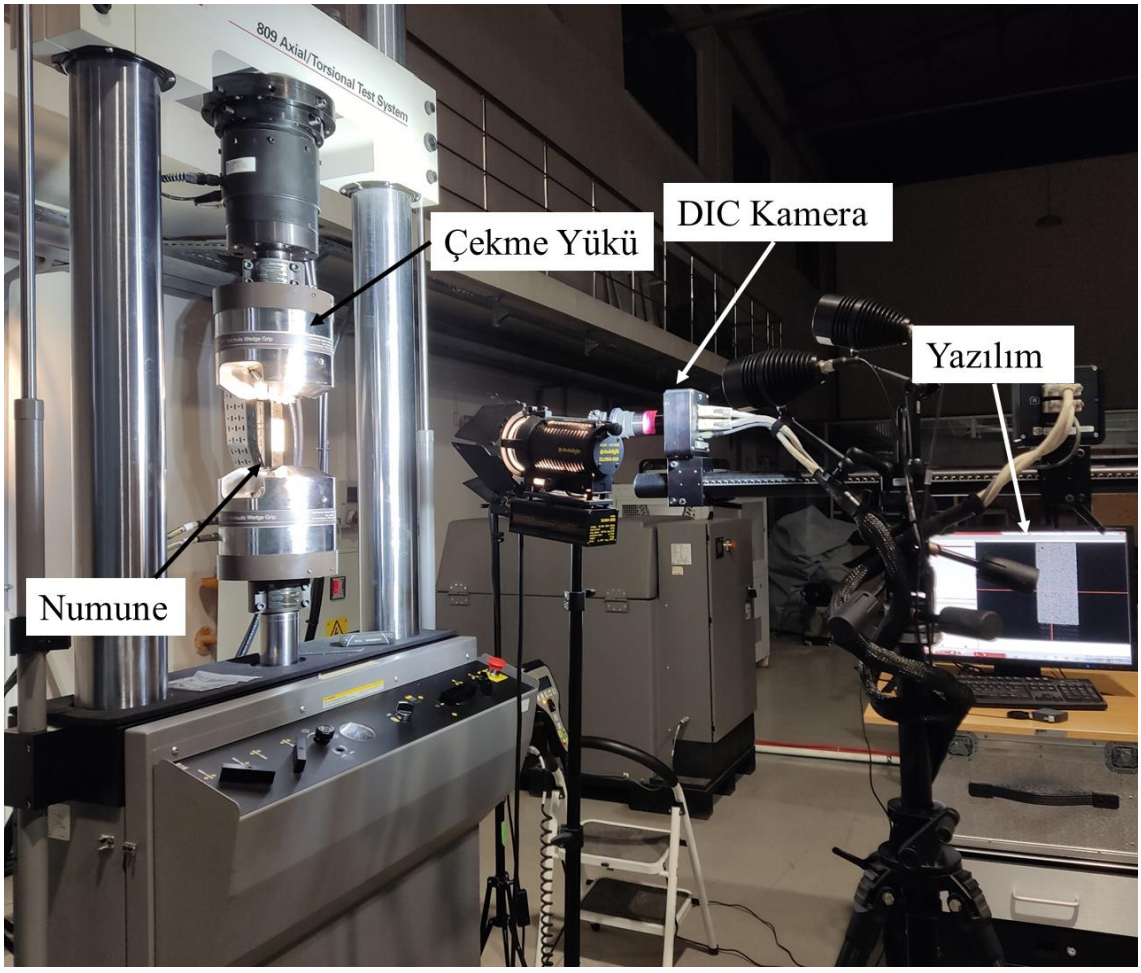
$[0_{15}]$ dizilimli kumaş tipi CFRP TS 1-12 laminalar ile yapılan çekme testleri sırasında 100 kN çekme yükü kapasiteli Zwick Roell Z100 test cihazı kullanılmış ve test düzeneğine ait bileşenler Resim 3.13 ile gösterilmiştir. Çekme yük hızı dakikada 2 mm olarak ayarlanmıştır. Test numunesinin uzaması, cihaz tutma çenesinin hareketi ile değil, numune üzerinde işaretlenen iki çizginin ekstansometre cihazı ile izlenmesiyle elde edilir. Bu nedenle, test cihazından gelen deformasyon değeri, DIC yöntemi gibi sonradan işleme gerek duyulmadan kullanılabilmektedir.




Resim 3.13. Çekme test cihazı ve test düzeneği

### 3.3.2. Kayma numuneleri için çekme testi düzeneği

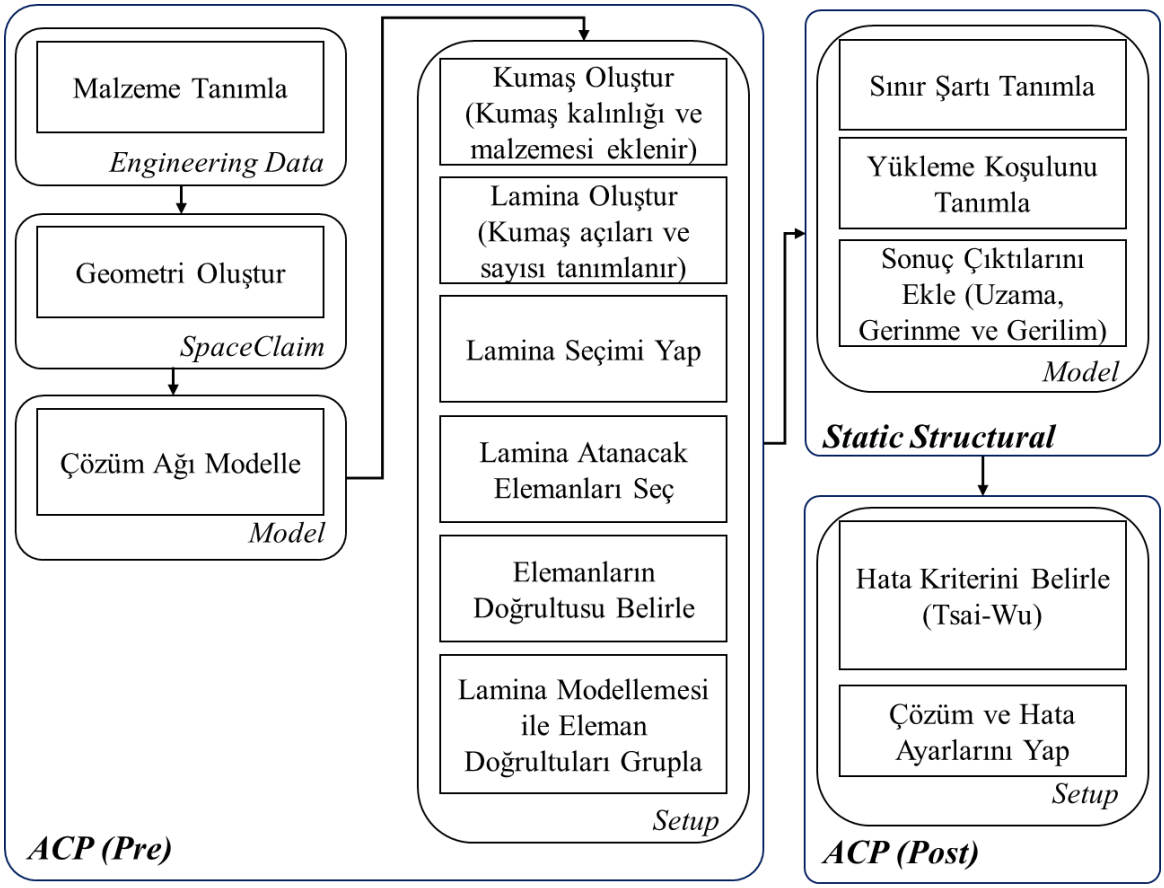
[$45_{15}$] deliksiz ve delikli CFRP kayma numuneleri için yürütülen çekme testleri esnasında MTS 809 axial/torsional cihazı ve DIC için yavaş çekim kamera sistemi kullanılmıştır. Test esnasında 1 saniyede 5 görüntü (5 Hz) alınmıştır. Ayrıca 30 saniyede 1 mm çekme uygulanmıştır (2 mm/dk). Resim 3.14 ile test numunesi yerleştirilmiş test ve DIC düzeneği kurulumu sunulmaktadır.




Resim 3.14. DIC kamera yerleşimi ve çekme test düzeneği

# 4. SONLU ELEMANLAR MODELLEMESİ

Sonlu elemanlar (SE) analiz programı kullanılarak çeşitli güçlendirme tiplerinin farklı yüklemeler altında karşılaştırılması yapılabilir. Ancak bunun uygulanabilmesi için test sonuçları ile sonlu elemanlar analizinden (SEA) elde edilen verilerin yüzde ondan fazla olmayacak şekilde tutarlı olması gerekmektedir. SE modelleme ve analiz programı olarak ANSYS ticari yazılımı tercih edilmiştir (ANSYS Composite PrepPost User's Guide, 2016 ve Baykan ve diğerleri, 2020). Şekil 4.1 ile sonlu elemanlar modelleme akışı sunulmaktadır.



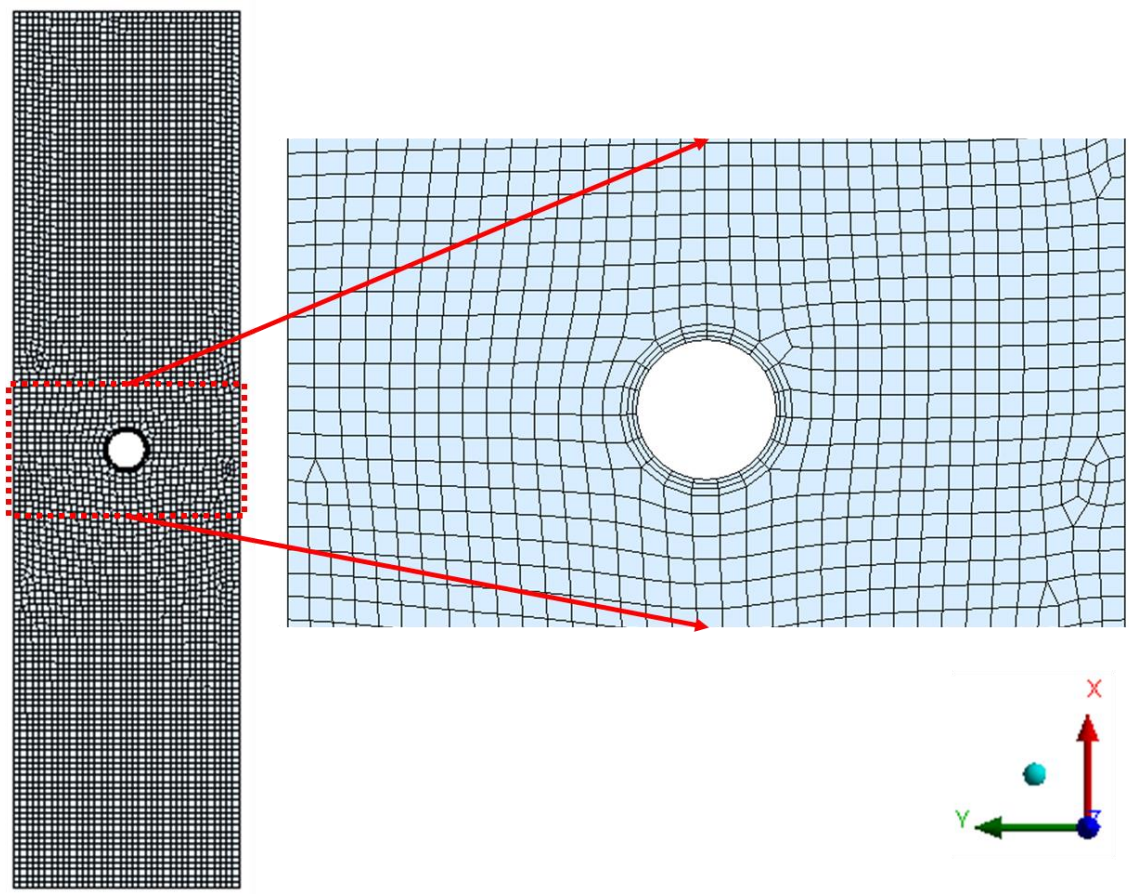

Şekil 4.1. Sonlu elemanlar modelleme akışı

Deliksiz numune ile yapılan çekme testlerinde elde edilen ortalama değerlerin, üretici verilerine göre elastik modül için %7,8, mukavemet değeri için %9,1 daha düşük elde edilmektedir. Bu nedenle, programın 'mühendislik verileri' bölümünde 0/90° malzeme mukavemet özellikleri bu oranlar uyarlanarak düzenlenmiştir.

Poisson oranı değeri Hexcel firması üretici data listesinde yer almamaktadır. Cuartas ve diğerleri (2014) tarafından yürütülen çalışmada ve diğer literatür çalışmalarında genel olarak

karbon fiber takviyeli kompozit malzemeler için 0,30-0,35 değerlerine ulaşılmaktadır. Bu nedenle ortalama değer olarak yürütülen çalışmada Poisson oranı 0,33 olarak kullanılmaktadır.

Delik etrafında programın inflation komutu ile <washer> metodu kullanılarak delik kenarı boyunca en az 3 sıra düzenli eleman dizisi oluşturulması sağlanmıştır. Bu sayede delik etrafı gerilme/gerinim dağılımları ve yoğunlaşması daha düzenli izlenebilmektedir. 45° dizilimli delikli test numune tasarımı için oluşturulan örnek çözüm ağı/mesh modeli Şekil 4.2 ile gösterilmektedir. Test için üretilen numune tasarımlarının sonlu elemanlar analiz modelleri için optimum eleman sayısının tespitine yönelik çözüm ağı yakınsama çalışması yürütülmüştür.

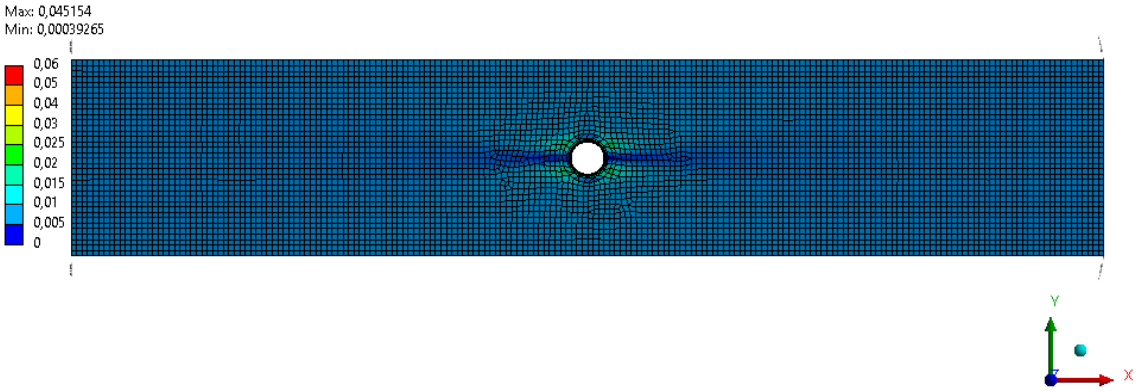



Şekil 4.2. Örnek sonlu elemanlar çözüm ağı görseli

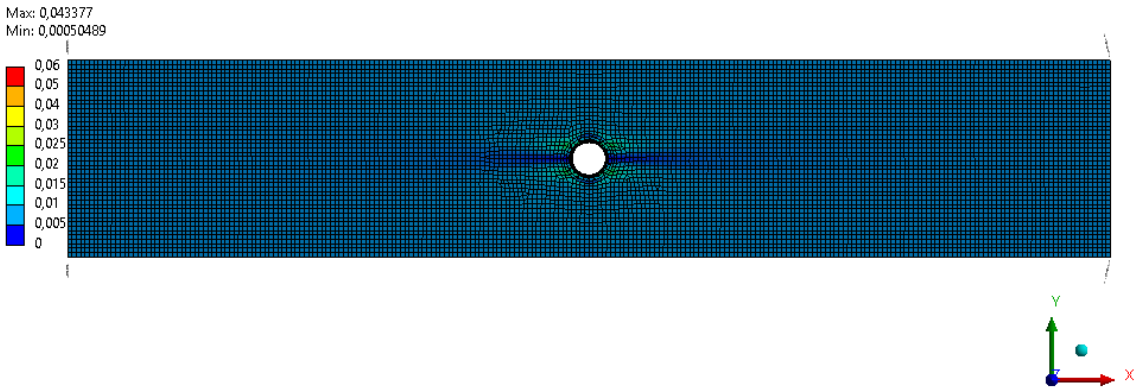
Çözüm ağı modellemesi sırasında güçlendirme etrafında en az üç sıra eleman bulunması adına eleman boyutu ilk olarak 1 mm olarak belirlenmiş ardından 0,8 mm, 0,7 mm ve 0,6 mm elaman boyutları için ayrı ayrı analizler yürütülmüştür. Çözüm ağı modellemeleri

sırasında bu dört farklı eleman boyutu için sırasıyla 6926, 10815, 13965, 19108 adet toplam eleman sayısı elde edilmiştir. Şekil 4.3 ve Şekil 4.4 ile farklı eleman boyutlarında çekme yükü altında yürütülen analizler sonrası ortaya çıkan plaka üzerindeki gerinme dağılımları gösterilmektedir. Görsellerden gerinmenin beklenildiği gibi delik etrafında yoğunlaştığı görülmektedir.

Şekil 4.5'te ise toplam eleman sayısına bağlı elde edilen maksimum gerinme değerinin değişim eğrisi sunulmaktadır. Eleman sayısının 14 bin adedi geçmesiyle gerinme değerinde 0,0415 mertebesinde yakınsama başlamaktadır. Yürütülen bu çalışma sonrasında, delikli numune tasarımı için sonlu elemanlar analizi sırasında ideal eleman boyutu 0,7 mm olarak belirlenmiştir.

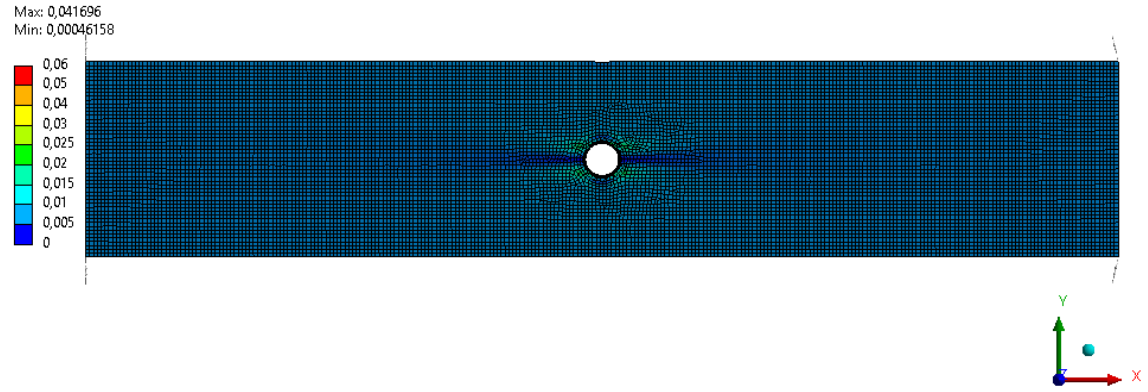



a) Eleman boyutu: 1 mm

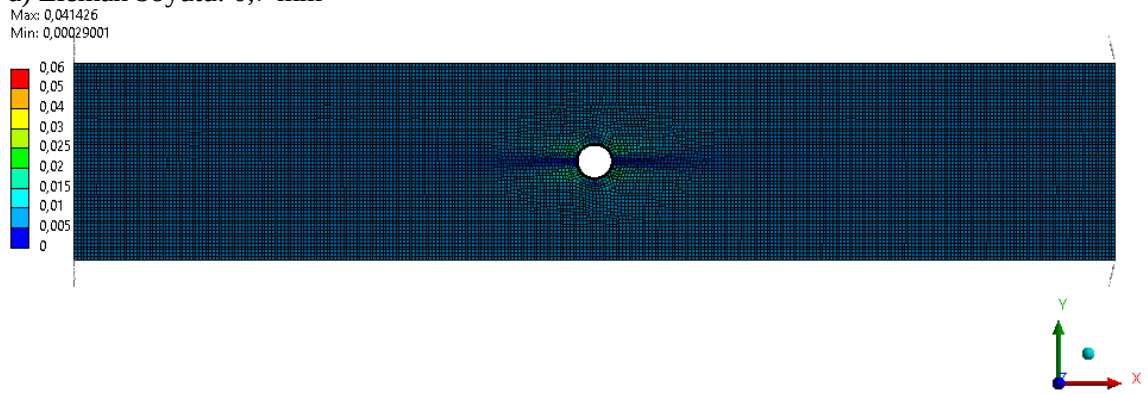



b) Eleman boyutu: 0,8 mm

Şekil 4.3 1 mm ve 0,8 mm eleman boyutları için elde edilen gerinme dağılımları

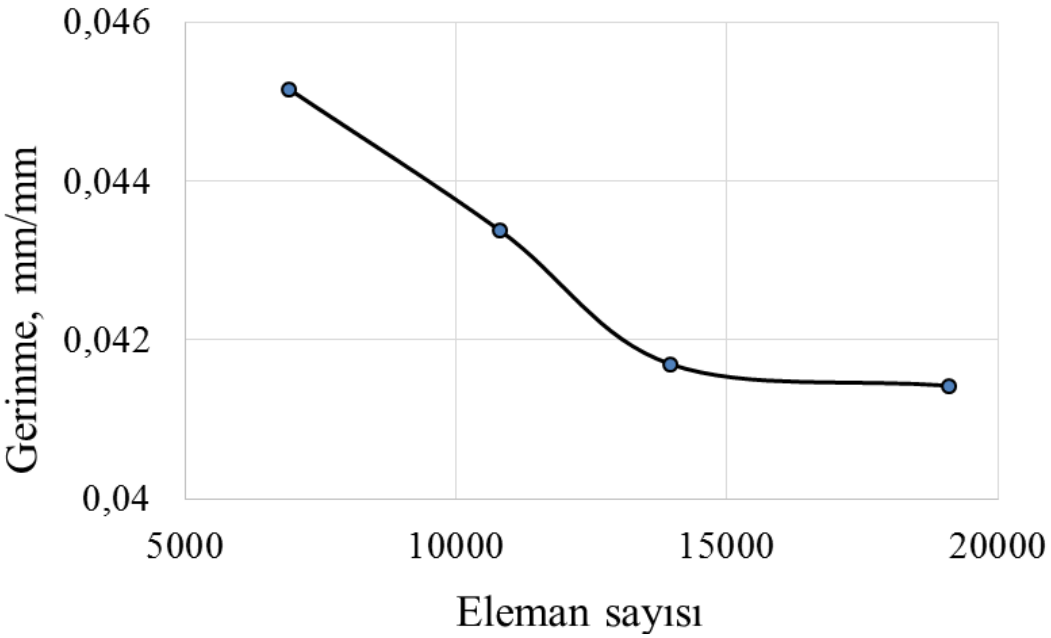



a) Eleman boyutu: 0,7 mm




b) Eleman boyutu: 0,6 mm

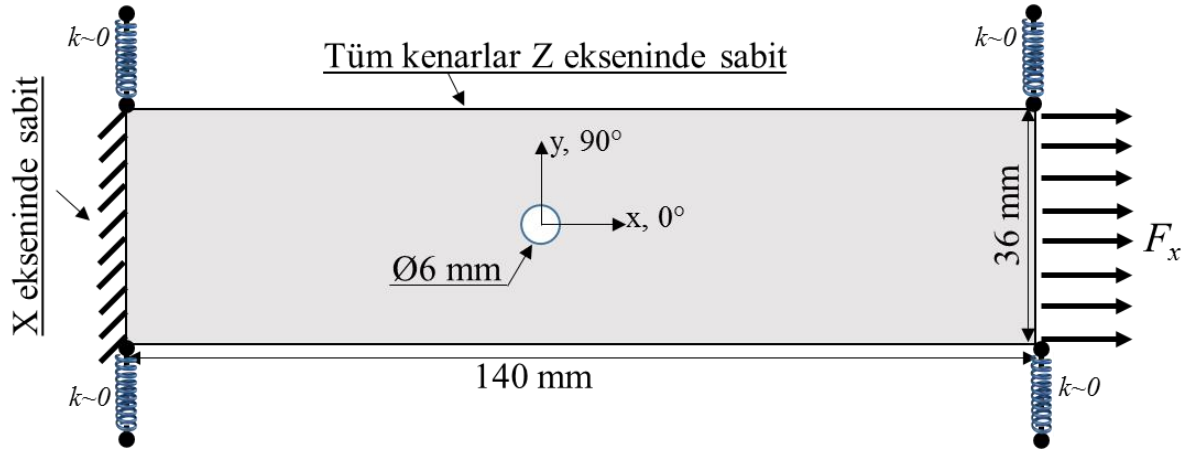
Şekil 4.4 0,7 mm ve 0,6 mm eleman boyutları için elde edilen gerinme dağılımları




Şekil 4.5. Eleman sayısına bağlı gerinme değeri eğrisi

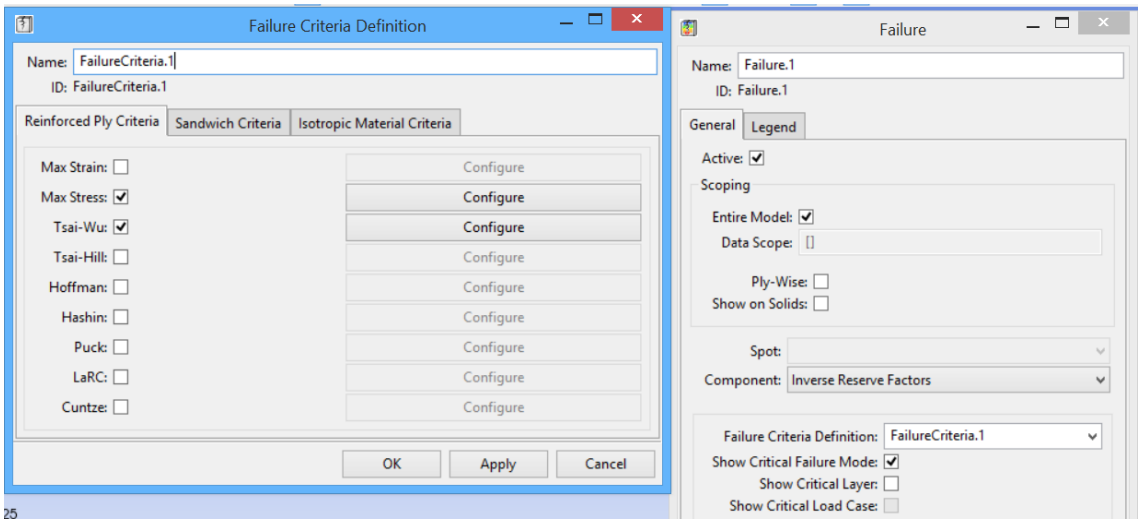
ANSYS ACP (Pre) modülünde oluşturulan elemanlar için kumaş kalınlığı, serim açısı, kat sayısı gibi atamalara karar verilir. Sınır koşulu modellemesi, Şekil 4.6 ile gösterildiği gibi z

eksenindeki (düzlem dışı yön) tüm plaka kenarlarının ve x eksenindeki alt kısa kenarın sınırlandırılması ve üst kenardan çekme yüklemesi uygulanmasıyla gerçekleştirilir. Ek olarak, plaka köşelerine y ekseninde çok düşük sertlik değerlerine (~$10^{-6}$) sahip yaylar atanarak çözüm matrisinde y ekseninin sınırlandırılması sağlanır.




Şekil 4.6. Delikli kayma numunesi için sınır şartı modellemesi

<Static Structure> bölümünde sınır koşulları tanımlandıktan sonra; gerilme ve gerinim alanı çıktılarını elde etmek için analiz yürütülür. Hata kriterinin belirlenmesi ve hata kriteri dağılım ayarlaması ANSYS ACP (post) modülünde gerçekleştirilir. Şekil 4.7 ile gösterildiği üzere hata kriteri olarak Tsai-Wu ve Max. Stress tercih edilmiştir. Hata dağılımı gösterim ayarlarında tüm sonuçların bir biri ile kıyası için aynı alt/üst limit ayarlaması yapılmıştır. Hata dağılımlarında Tsai-Wu değeri daha kritik geldiğinden sonuçlar bu kriter temel alınarak sunulmaktadır.




Şekil 4.7. ANSYS ACP (Post) hata kriteri seçimi ekranı

Tsai-Wu kriteri, kompozit malzemelerin tasarım ve dayanım hesapları için en sık kullanılan bozulma modu hesaplarından biridir (Chen ve diğerleri, 2021). Tsai-Wu kriteri formülü ve denklem içerisinde yer alan katsayılar, Tsai (1992) kaynağından alınarak Eş.4.1 ile sunulmaktadır. Sistemin maruz kaldığı yüklemeye bağlı olarak elde edilen Tsai-Wu katsayısının, $F_{TW}$ değerinin birin altında olması tasarımın güvenli olduğunu göstermektedir.

$$F_{TW} = F_1\sigma_1 + F_2\sigma_2 + F_{11}\sigma_1^2 + F_{22}\sigma_2^2 + 2F_{12}\sigma_1\sigma_2 + F_{66}\sigma_3 \quad (4.1)$$

$$F_1 = \frac{1}{X_T} + \frac{1}{X_C}$$

$$F_2 = \frac{1}{Y_T} + \frac{1}{Y_C}$$

$$F_{11} = \frac{-1}{X_T X_C}$$

$$F_{22} = \frac{-1}{Y_T Y_C}$$

$$F_{12} = \frac{-0{,}5}{\sqrt{X_T * X_C * Y_T * Y_C}}$$

$$F_{66} = \frac{1}{S_{XY}^2}$$

*$X_T$: 0° yönünde çekme mukavemeti*

*$Y_T$: 90° yönünde çekme mukavemeti*

*$X_C$: 0° yönünde basma mukavemeti*

*$Y_C$: 90° yönünde basma mukavemeti*

*$S_{XY}$: Plaka yönünde kayma mukavemeti*

# 5. TEST SONUÇLARI

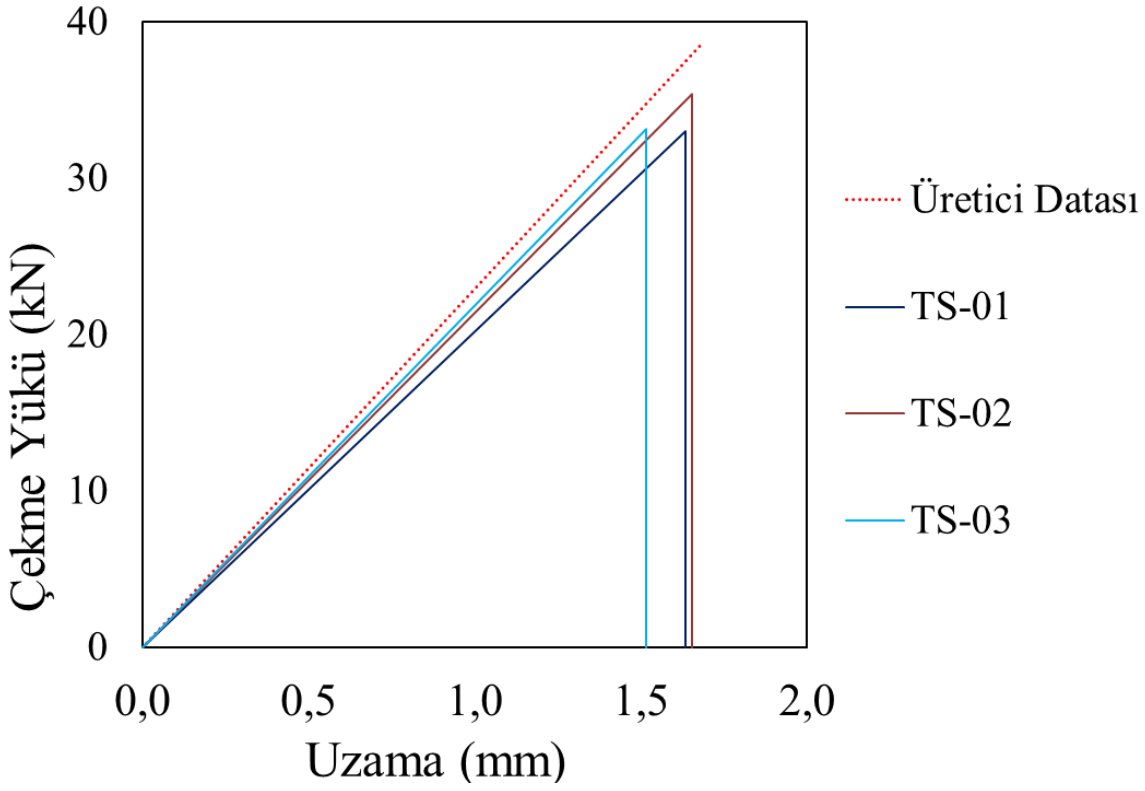
Bu bölümde, kumaş tipi CFRP laminatlar ile gerçekleştirilen çekme testleri sonucunda elde edilen veriler sunulmaktadır.

## 5.1. Deliksiz Çekme Testi Sonuçları

Şekil 5.1'de TS-01, TS-02 ve TS-03 test sonuçları ve üretici tarafından verilen malzeme verileri (Hexcel) için uygulanan kuvvete bağlı yer değiştirme eğrileri birlikte sunulmaktadır. Üç numune ile yapılan testler sonucunda elde edilen ortalama 0° elastik modül, Ex değeri 62,7 GPa'dır. Çizelge 3.1 ile verilen malzeme verilerinden %7,8 daha düşük elde edilmiştir. Üç numunenin ortalama maksimum çekme yükü 33,87 kN ve kesiti 45 $mm^2$ olduğundan 0° çekme dayanımı, $\sigma_x$ 752,7 MPa olarak hesaplanmıştır. Malzeme verilerinde çekme dayanımı 828 MPa olup %9,1 daha fazladır.

Üçer numune ile yürütülen testlerin her birinde sonuçların tutarlı olduğu göstermek adına Eş.5.1 ile sunulan formül kullanılarak standart sapma değeri elde edilmiştir. Çizelge 5.1 ile sunulan deliksiz çekme testi sonuçlarının standart sapma değeri 0,63 elde edilmektedir.

$$\text{standart sapma} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})^2}{n-1}} \qquad (5.1)$$



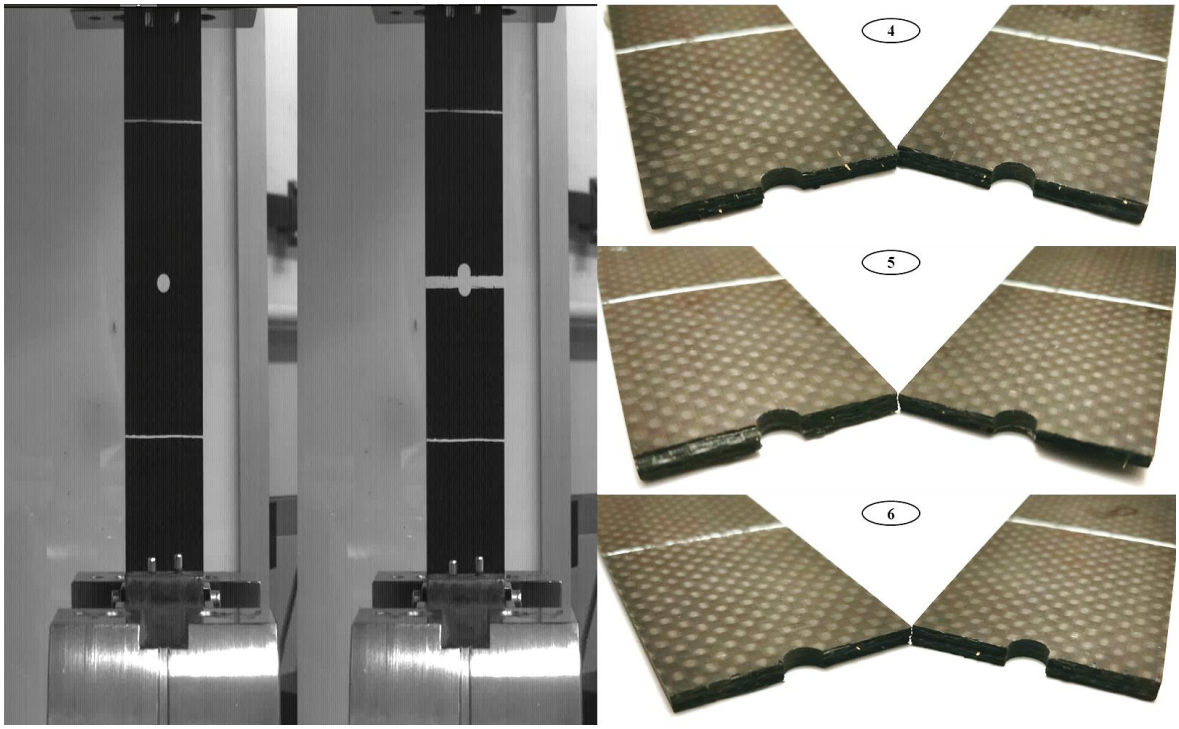

Şekil 5.1. ASTM D3039 çekme testi ve üretici datası yükleme-uzama eğrileri

Çizelge 5.1. TS-01, TS-02 ve TS-03 için maksimum ve ortalama çekme yükü

| Numene Kodu | Maksimum Çekme yükü (kN) | Ortalama Değer (kN) |
|---|---|---|
| TS-01 | 33,0 | 33,87 |
| TS-02 | 35,4 | |
| TS-03 | 33,2 | |

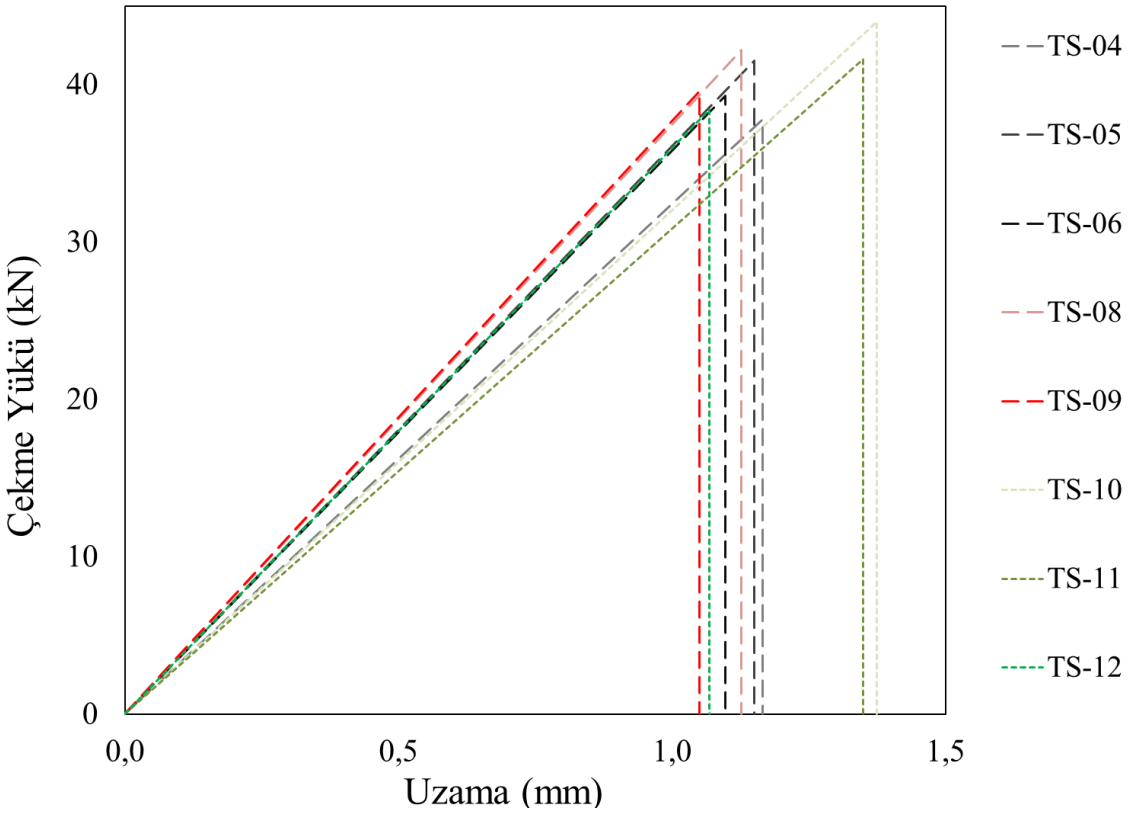
## 5.2. Delikli Çekme Testi Sonuçları

Bu bölümde takviyeli ve takviyesiz delikli levhalar ile yapılan çekme testi sonuçları birlikte ele alınacaktır. Resim 5.1 ile delikli plaka için çekme testi sırasında kırılmadan hemen önceki ve sonraki görüntüleri gösterilmektedir. Detaylı görseller incelendiğinde üç numunenin de plakanın tam ortasından ve kısa kenara paralel eksende kırıldığı görülmektedir.




Resim 5.1. TS-04 - 06 numunelerinin test anında kırılma ve sonrasındaki detaylı görselleri

Şekil 5.2'de, [$0_{15}$] dizilimli CFRP TS-04 – TS-12 numuneleri için test sonuçlarının uygulanan kuvvete bağlı olarak uzama değişimini gösteren eğriler sunulmaktadır. TS-07 örneği ile yapılan test başarılı olmadığı için grafiğe dahil edilmemiştir. Eğrilerin eğimlerine bakıldığında, takviyesiz, papatya ve yüzük takviyeli için ortalama değerlerin 0° elastik modülü, Ex sırasıyla 59.6 GPa, 63.7 GPa ve 55.9 GPa elde edilmiştir. Çizelge 5.2 ile sunulan dayanabilecekleri ortalama maksimum çekme kuvveti ise sırasıyla 39,5 kN, 40,9 kN ve 41,3 kN olarak görünmektedir. Ortalama değerler dikkate alındığında papatya güçlendirmenin yüzde 3,5; yüzük güçlendirmenin yüzde 4,5 oranında kritik çekme yükü açısından iyileştirme sağlandığı görülmektedir. Çizelge 5.2 ile ayrıca her bir test konfigürasyonun kendi içerisinde tutarlılığı göstermek amacıyla Eş.5.1 kullanılarak standart sapma değeri hesaplanarak sunulmuştur.




Şekil 5.2. TS-04 – TS-12 delikli çekme testleri yükleme-uzama eğrileri

Çizelge 5.2. TS-04 – TS-12 için maksimum ve ortalama çekme yükü

| Numene Kodu | Maksimum Çekme yükü (kN) | Ortalama Değer (kN) | Standart Sapma |
|---|---|---|---|
| TS-04 | 37,8 | 39,53 | 0,88 |
| TS-05 | 41,5 | | |
| TS-06 | 39,3 | | |
| TS-07 | - | 40,90 | 0,92 |
| TS-08 | 42,2 | | |
| TS-09 | 39,6 | | |
| TS-10 | 44,0 | 41,33 | 1,32 |
| TS-11 | 41,6 | | |
| TS-12 | 38,4 | | |

15 katmanlı bir kompozit malzemenin testler sırasında farklı davranışlar sergileme olasılığı göz önüne alındığında, açık delikli çekme numuneleri ile yapılan çekme testi sonuçlarına göre kayda değer bir fark olmadığı söylenebilir. Bu farklılığı sunmak adına t-test istatistik yöntemi kullanılmıştır. Microsoft Excel <T.test> komutu kullanılarak hesaplama yapılmıştır. Parametre olarak ortalama eğrinin her iki tarafını da dikkate alan “two-tailed”

dağılımı ve numuneler arası gruplama yapıldığı için eşleştirme (paired) yöntemi tercih edilmiştir. Güçlendirmesiz ve güçlendirmeli çekme testi numunelerinin kıyaslaması Çizelge 5.4 ile sunulmuştur. Üç farklı karşılaştırma sonucu da 1'den düşük gelmiştir.

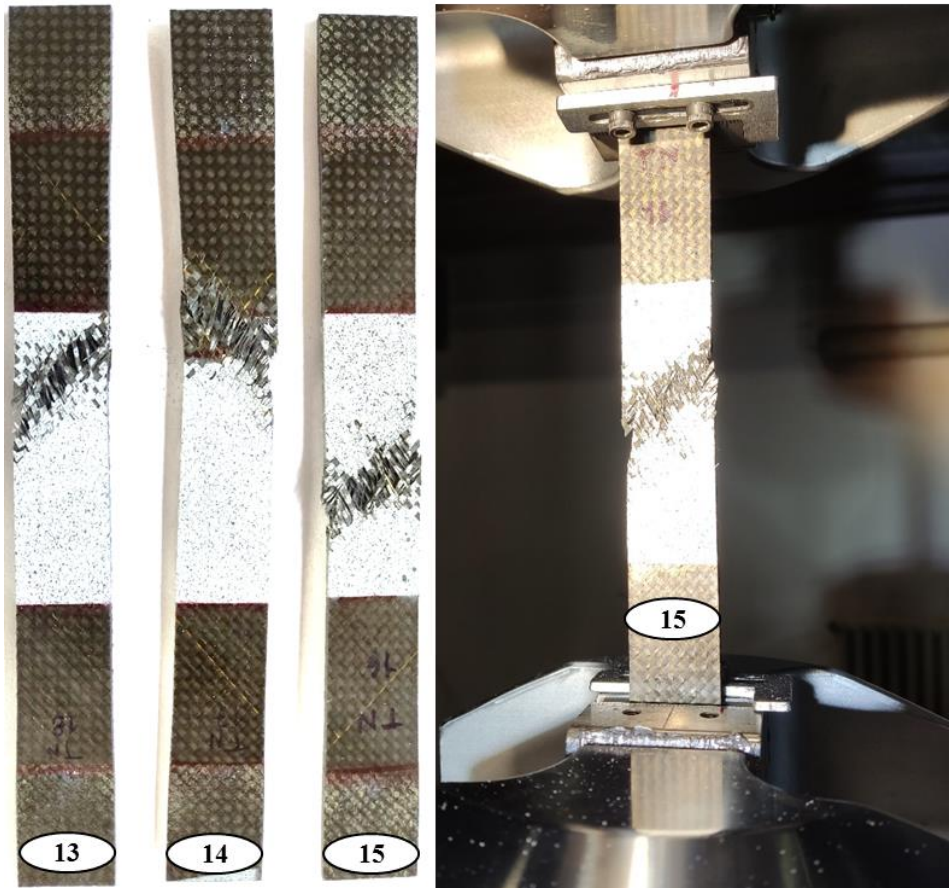
Çizelge 5.3. Güçlendirmesiz ve güçlendirmeli numuneler için t-test sonuçları

| Güçlendirmesiz ile Papatya güçlendirmeli | Güçlendirmesiz ile Yüzük güçlendirmeli | Papatya ile yüzük güçlendirmeli |
|---|---|---|
| 0,24 | 0,50 | 0,20 |

## 5.3. Kayma Numuneleri için Çekme Testi Sonuçları

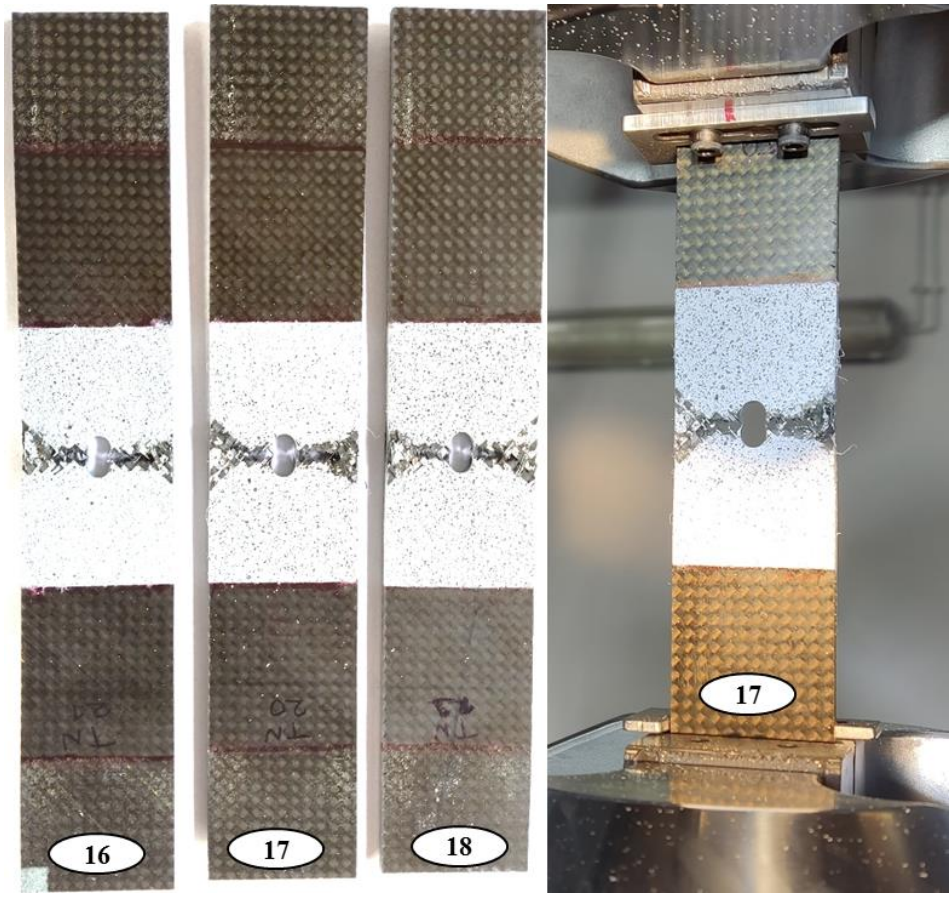
Kayma numuneleri ile yapılan çekme testleri sırasında ekstansometre kullanılmadığından test cihazından okunan uzama değeri, numune tutucusundan elde edildiğinden olduğu gibi kullanılamamaktadır. Bu çalışmada, numuneler üzerindeki gerinim dağılımı DIC tekniği kullanılarak belirlenmiştir. Resim 5.2 ve Resim 5.3 ile sırasıyla deliksiz (TS-13, TS-14 ve TS-15) ve delikli (TS-16, TS-17 ve TS-18) ±45° dizilimli kayma test numunelerinin test sonrası kırılma görselleri sunulmaktadır.

TS-13, TS-14 ve TS-15 numunelerinin levhanın orta bölgesinden 45 derecelik bir eksenle ayrıldığı görülmektedir. Deliksiz numunelerinin kırılması yaklaşık 500 saniye sürmüştür. TS-13 numunesi, numune tutma çenesinin sıkma ayarını sağlamak amacıyla birkaç defa çekme işlemine tabi tutulmuştur. TS-13 için elde edilen değerler Resim 5.2'deki görsel ve grafikte sunulmakla birlikte sonucu DIC çalışmalarında/karşılaştırmalarında yer almamaktadır.




Resim 5.2. TS-13 - 15 numunelerinin test sonrası kırılma görselleri

Resim 5.3 ile sunulan TS-16, TS-17 ve TS-18 kuponlarının çekme testi sonrası çatlak görüntülerine bakıldığında delik kenarında gerilmenin en kritik olduğu noktadan uzun kenara doğru 45 derecelik bir ayrılma olduğu görülmektedir. Delikli kesme numunelerinin kırılma süreleri, yaklaşık 145 saniye sürmüştür.

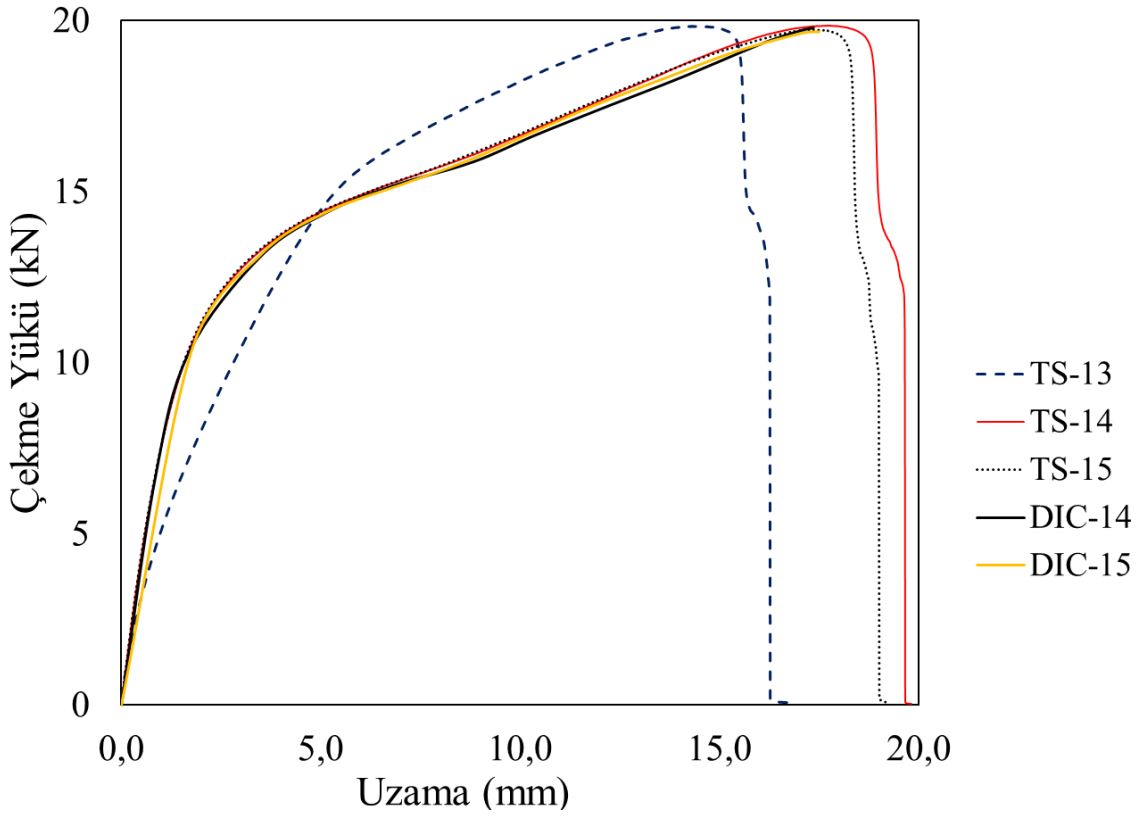



Resim 5.3. TS-16 - 18 numunelerinin test sonrası kırılma görselleri

Şekil 5.3 ile deliksiz [$45_{15}$] dizilimli CFRP laminatların test makinesinden alınan ve DIC yönteminden elde edilen çekme yükü – uzama eğrileri birlikte sunulmaktadır. Çizelge 5.4 ile ise testler sırasında elde edilen maksimum kuvvet, ortalama kritik kuvvet ve standart sapma değerleri listelenmiştir. Maksimum kuvvet ve standart sapma değerleri incelendiğinde test sonuçlarının oldukça tutarlı olduğu söylenebilir. Kayma numuneleri için uzama, DIC işlemlerinden sonra elde edilen gerinim dağılım görüntülerinin alt kenarındaki gerinim değeri, etkin uzunluk (140 mm) ile çarpılarak elde edilmiştir.

Eğriler incelendiğinde, 5 kN yüklemeye kadar elastik/lineer bir davranış gözlemlenirken, bir sonraki aşamada alüminyum malzemelerin lineer olmayan bölgeye geçişinde yaşanan boyun verme etkisine benzer bir davranış gözlemlenmektedir. Bunun nedeni kompozit malzemenin plastik özelliği değil, liflerin açısının ayrılma ile birlikte 45°'den daha dayanıklı olan 0° yönüne yavaş yavaş değişmesidir. Elde edilen sonuç grafiğinin davranışı, ASTM Standard 3518 (2001) Figure 4 ile verilen 45 derece lamina kesme numuneleri için gerilme-gerinim eğrisi (bakınız Şekil 5.5) ile oldukça benzerlik göstermektedir. 0-5 kN aralığındaki

numunelerin ortalama kayma modülü, Gxy değerleri 15-16 GPa'dır. En yüksek çekme mukavemeti ise üç numune için de yaklaşık 20 kN olarak elde edilmiştir.

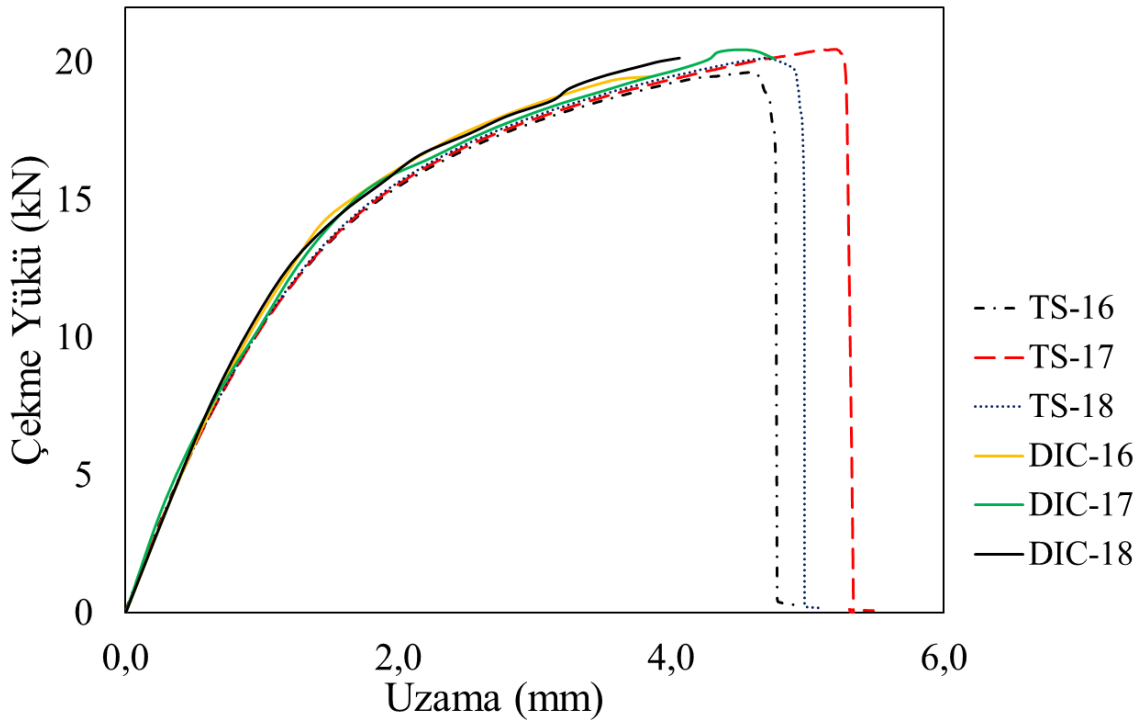



Şekil 5.3. TS-13 – TS-15 için çekme test cihazı ve DIC işlemi yükleme-uzama eğrileri

Çizelge 5.4. TS-13, TS-14 ve TS-15 için maksimum ve ortalama çekme yükü

| Numene Kodu | Maksimum Çekme yükü (kN) | Ortalama Değer (kN) | Standart Sapma |
|---|---|---|---|
| TS-13 | 19,8 | 19,80 | 0,05 |
| TS-14 | 19,9 | | |
| TS-15 | 19,7 | | |

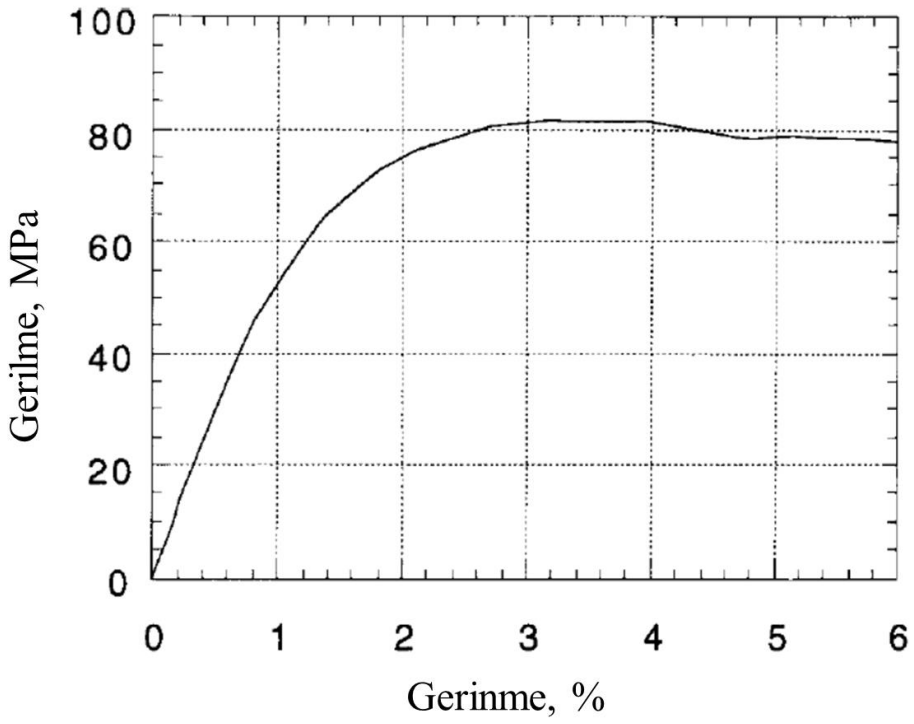
Delikli [$45_{15}$] dizilimli CFRP laminat numuneleri (TS-16, TS-17 ve TS-18) için çekme makinesi çenesinden ve DIC yönteminden elde edilen çekme yüküne bağlı uzama eğrileri Şekil 5.4 ile sunulmaktadır. Üç numune de son kırılma aşamasına kadar oldukça yakın davranış sergilemektedir. Ayrıca deliksiz kayma numunelerinde olduğu gibi, 5 kN yükleme sonrası eğrilerde boyun verme etkisi başlamaktadır. TS-16, TS-17 ve TS-18 numunelerinin maksimum çekme kuvveti değerleri sırasıyla; 19,6 kN, 20,5 kN ve 20,2 kN elde edilmektedir (Çizelge 5.5). 0-5 kN aralığındaki delikli numunelerin ortalama kayma modülü, Gxy ise deliksiz numunelerde olduğu gibi 15-16 GPa civarı elde edilmiştir.




Şekil 5.4. TS-16 – TS-18 için test cihazı ve DIC işlemi yükleme-uzama eğrileri

Çizelge 5.5. TS-16, TS-17 ve TS-18 için maksimum ve ortalama çekme yükü

| Numene Kodu | Maksimum Çekme yükü (kN) | Ortalama Değer (kN) | Standart Sapma |
|---|---|---|---|
| TS-16 | 19,6 | 20,10 | 0,22 |
| TS-17 | 20,5 | | |
| TS-18 | 20,2 | | |

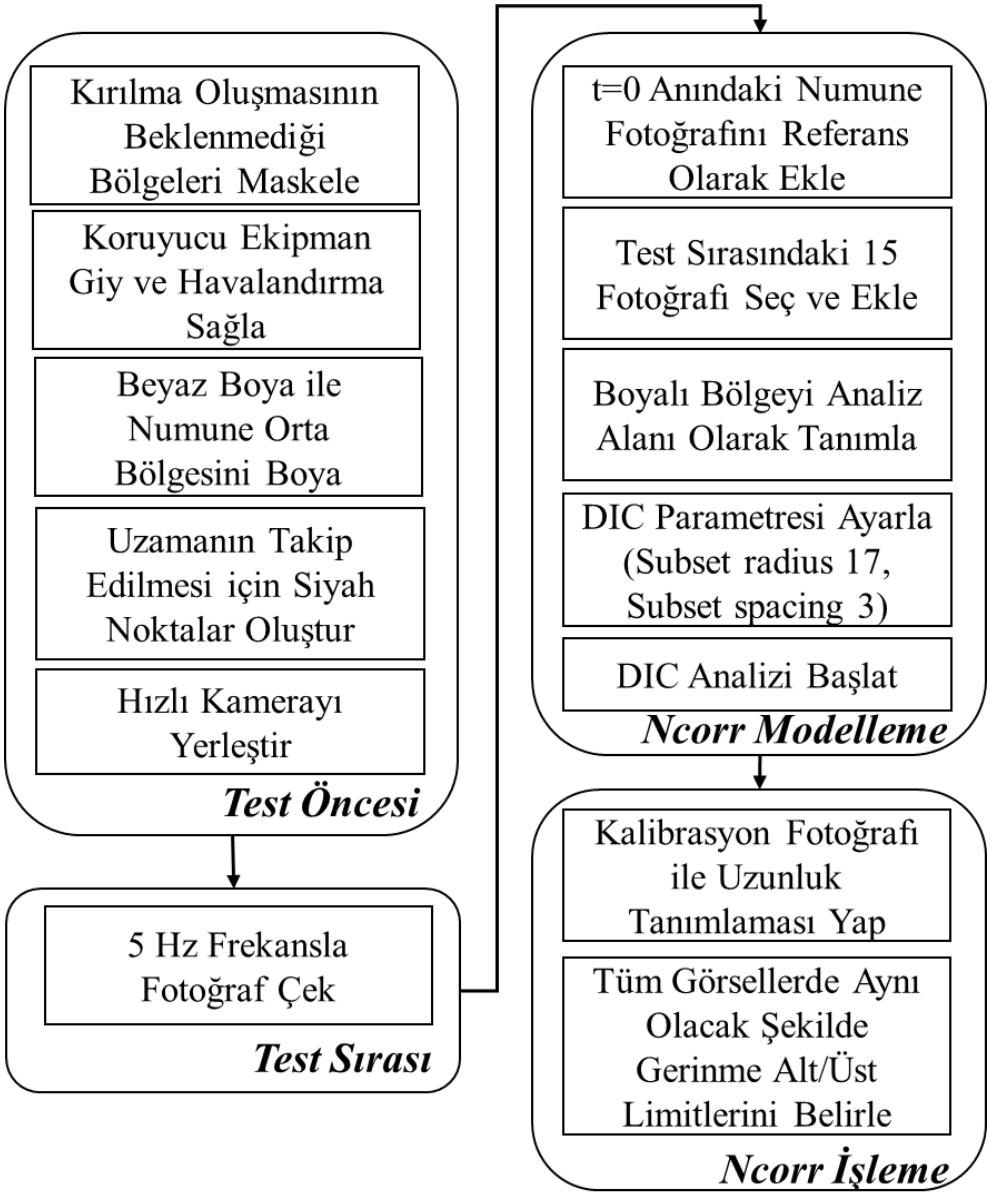



Şekil 5.5. ASTM3518 gerilme-gerinme eğrisi görseli

Delikli ve deliksiz kayma numuneleri arasındaki istatiksel farklılığı sunmak adına t-test metodu kullanılmıştır. TS-12 – TS-18 numuneleri arasında uygulanan t-test hesaplama sonucu 0,355 elde edilmiştir.

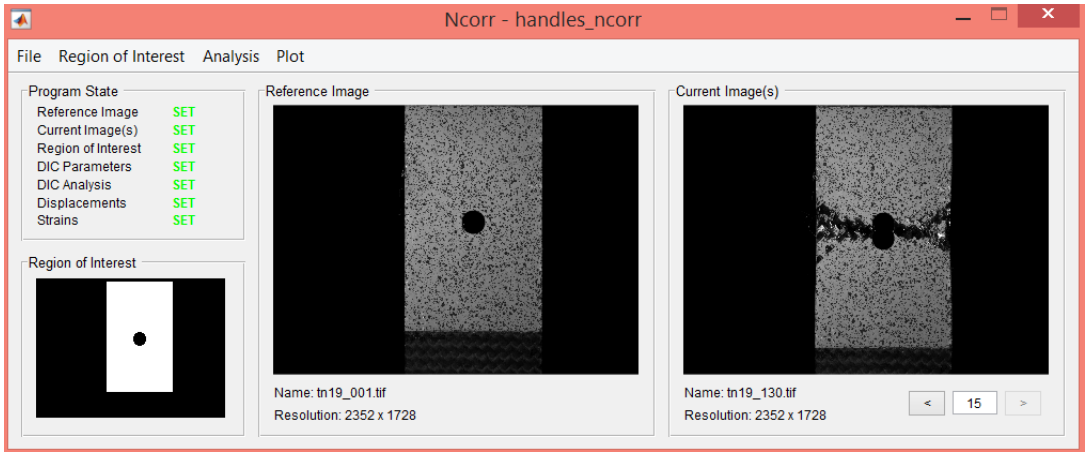
## 5.4. Dijital Görüntü Korelasyonu İşlemi

Bu bölümde, Dijital Görüntü Korelasyonu, DIC işlemi ve $[45_{15}]$ dizilimli numunelere uygulanan DIC yöntemi ile elde edilen gerinim dağılımı alanı sonucu sunulmaktadır. DIC süreci, MATLAB yazılım ortamında Ncorr kodu ile gerçekleştirilmektedir. Test işleminden önce numunelerin olası kırılma bölgesi olan 60 mm uzunluğundaki orta kısmının boyanması gerektiği için numunelerin kritik olmayan bölgeleri maskelenir. Ardından orta bölge beyaz renkli sprey ile boyanır ve test boyunca plakanın uzamasını izlemek için siyah noktalar işlenir. Kamera, test örneğinden yaklaşık bir metre uzağa yerleştirilir ve test sırasında 5 Hz frekansta fotoğraf kaydedilir. Şekil 5.6 ile DIC işleminin genel aşamaları sunulmaktadır.



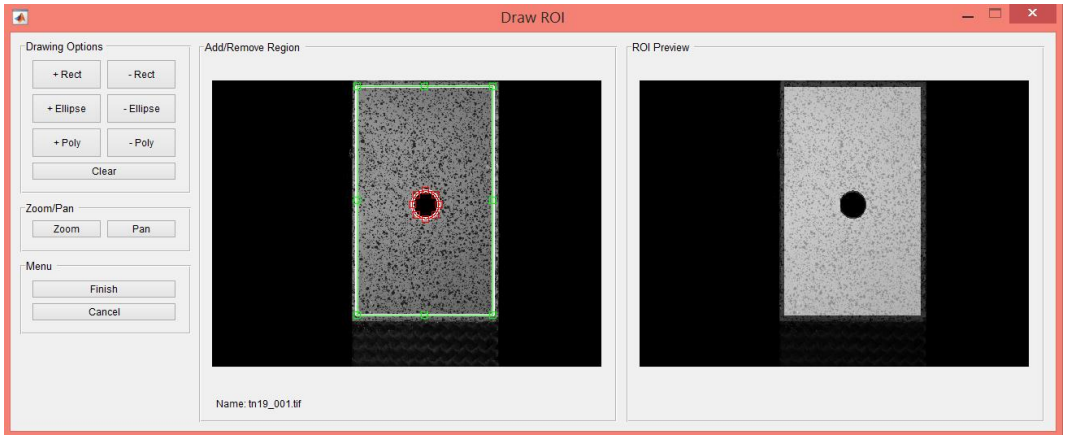

Şekil 5.6. DIC metodu işlem akışı

Ncorr grafik kullanıcı arayüzüne (GUI), test numunesinin t=0 zamanındaki görüntüsü referans olarak yüklenir. Gerilme dağılımlarının takip edilmesi amaçlanan belirli zaman aralıklarındaki 15 adet test görseli ise <current image> olarak seçilir. Programın bu aşamasına ait örnek bir seçim ekranı Şekil 5.7 ile sunulmuştur.



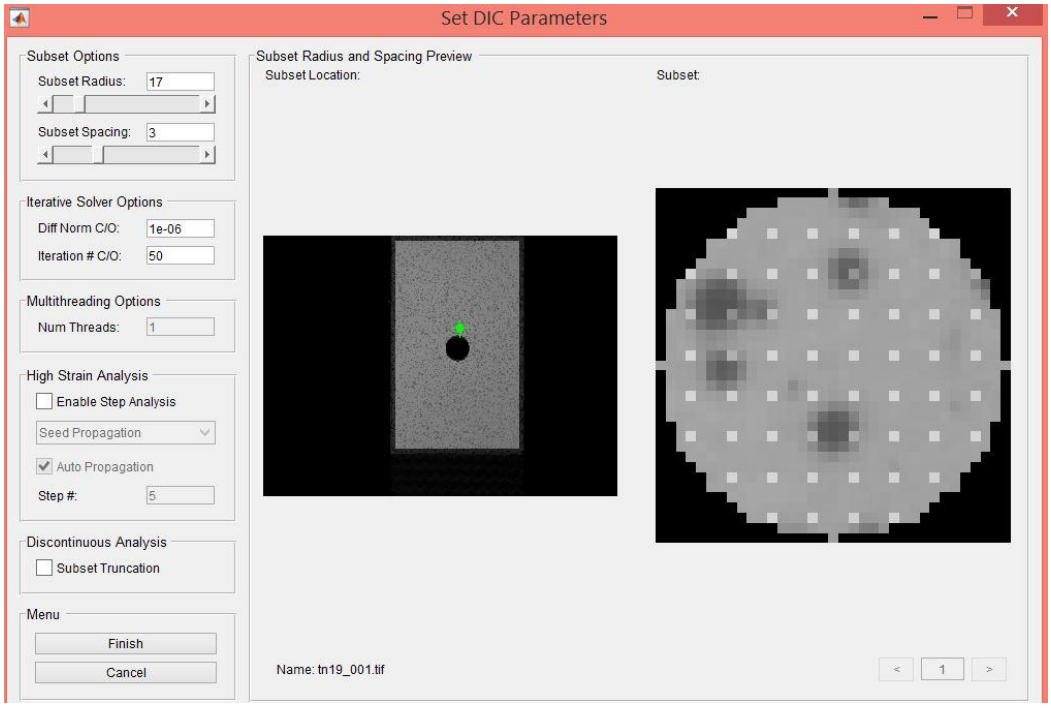

Şekil 5.7. Ncorr – referans ve takip edilecek görsellerin eklenmesi

«Region of interest» olarak plaka kenar bölgelerden bir miktar içeride kalacak şekilde boyalı bölge seçilir. Daha sonra ortadaki delik olan kısım çıkarılır (bakınız Şekil 5.8). Bu işlem sırasında delik bölgesi çıkarılmaz ise orta bölümde uygun olmayan bir gerinme dağılımı ortaya çıkmaktadır.



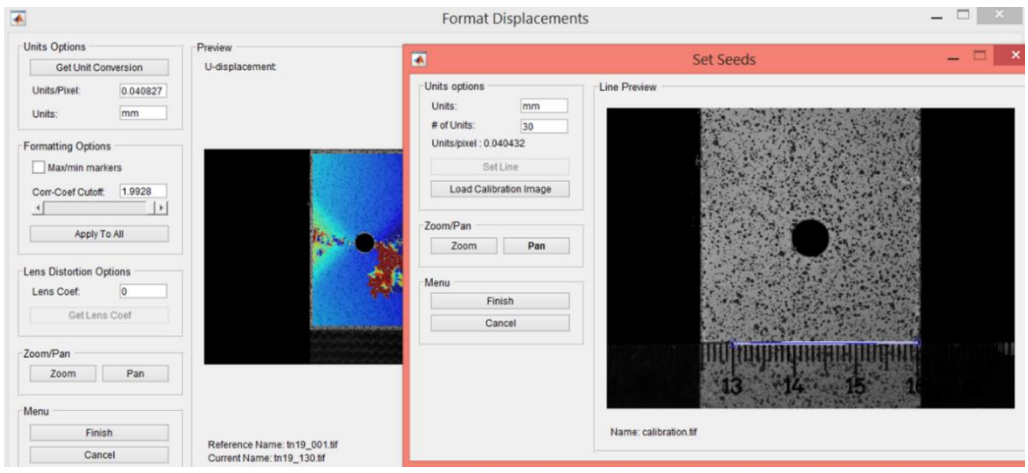

Şekil 5.8. Ncorr – ilgili bölgenin seçimi

Şekil 5.9 ile gösterildiği üzere DIC parametre ayarları kısmında <Subset Radius> değeri 17-18 ve <Subset Spacing> ise 3 yapılarak daha detaylı tarama yapılması hedeflenmiştir. Belirtilen ayarlar uygulandıktan sonra i7 işlemcili 12 GB RAM'e sahip bir bilgisayarda 15 görselin işlenmesi yaklaşık 20 dakika sürmektedir.



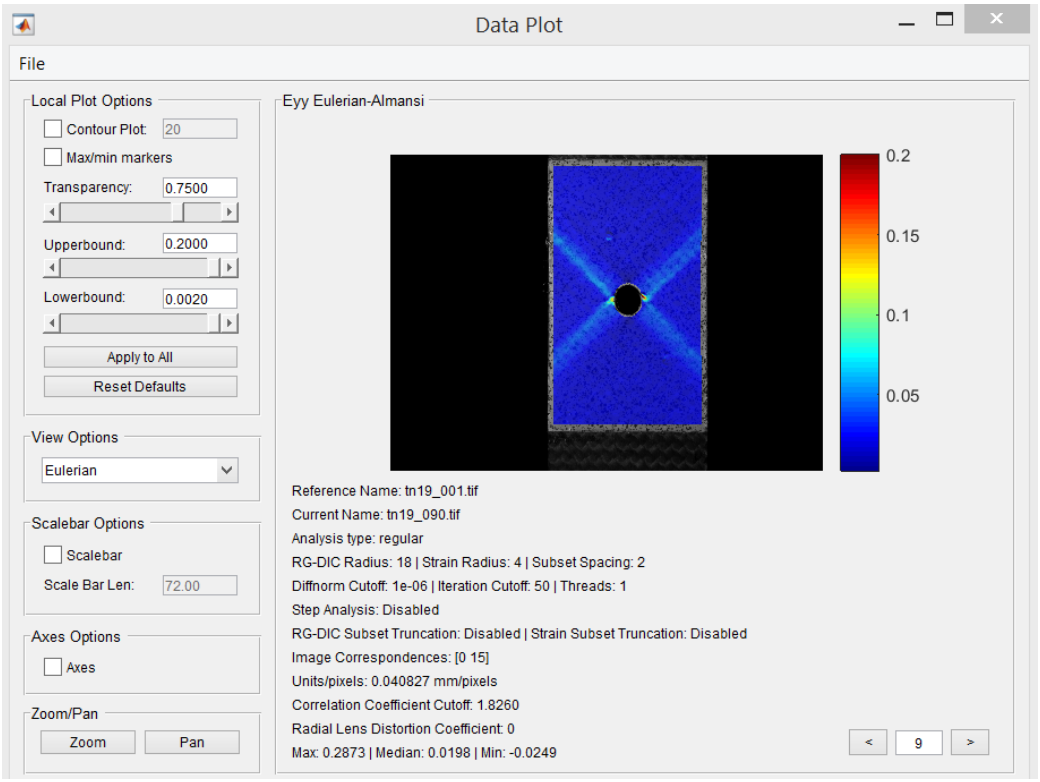

Şekil 5.9. Ncorr – DIC parametre seçimi

Deplasman ayarları bölümünde birim olarak milimetre belirlenir ve referans plaka seçilerek Ncorr programına uzunluk tanıtılması yapılır (Şekil 5.10). Akabinde Strain parametresi bölümünde dağılımın daha detaylı izlenebilmesi amacı ile <Strain Radius> değeri 3'e düşürülür.



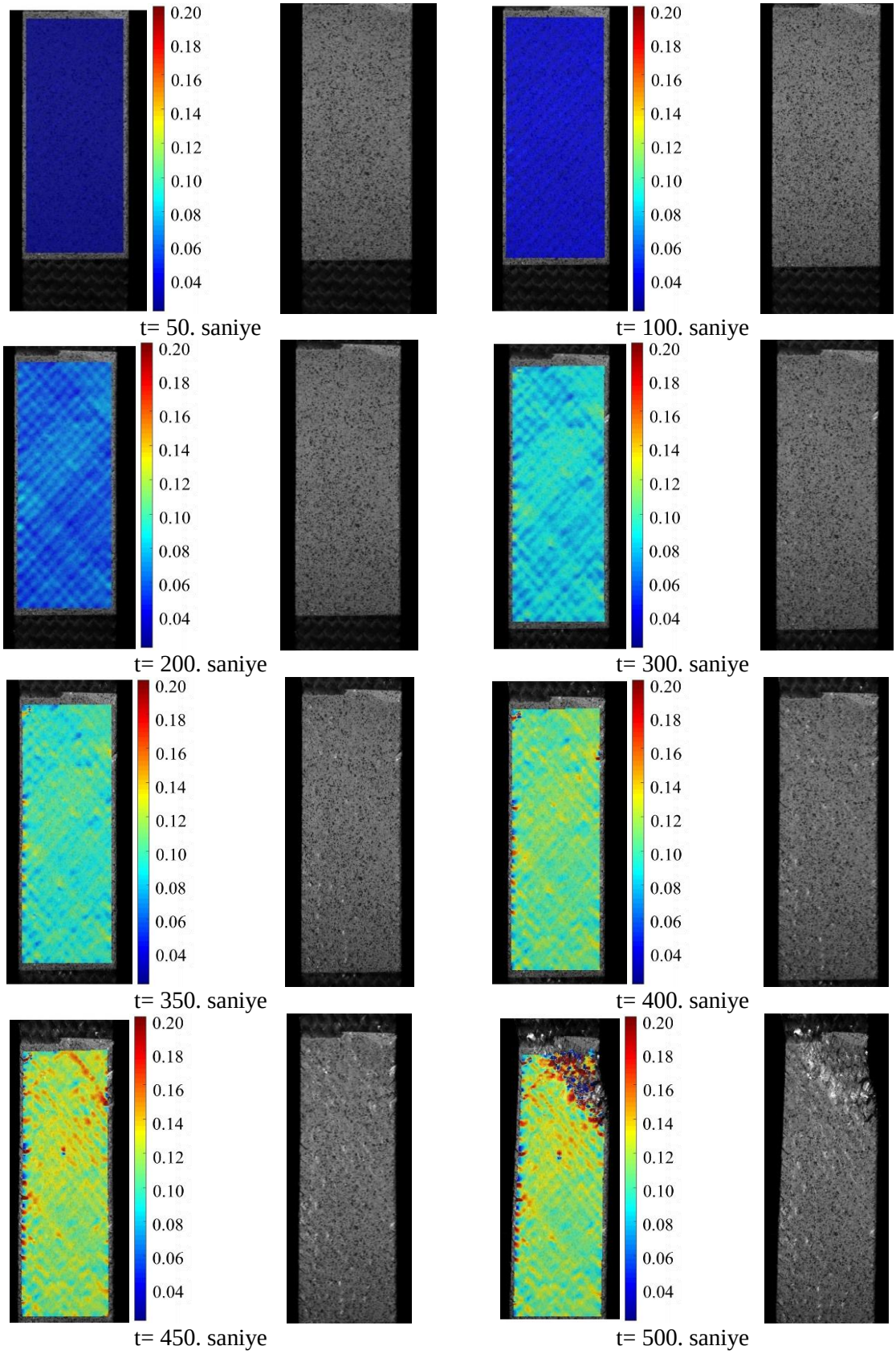

Şekil 5.10. Ncorr – deplasman ayarları seçimi

Son olarak Şekil 5.11 ile sunulan Strain Plot bölümünde, belirli zaman aralıklarında seçilen on beş görsel için gerinim alt ve üst limitleri aynı değer olacak şekilde ayarlanır. Bu sayede yüklemeye ve zamana bağlı gerinim değişimi gözlenebilmektedir.

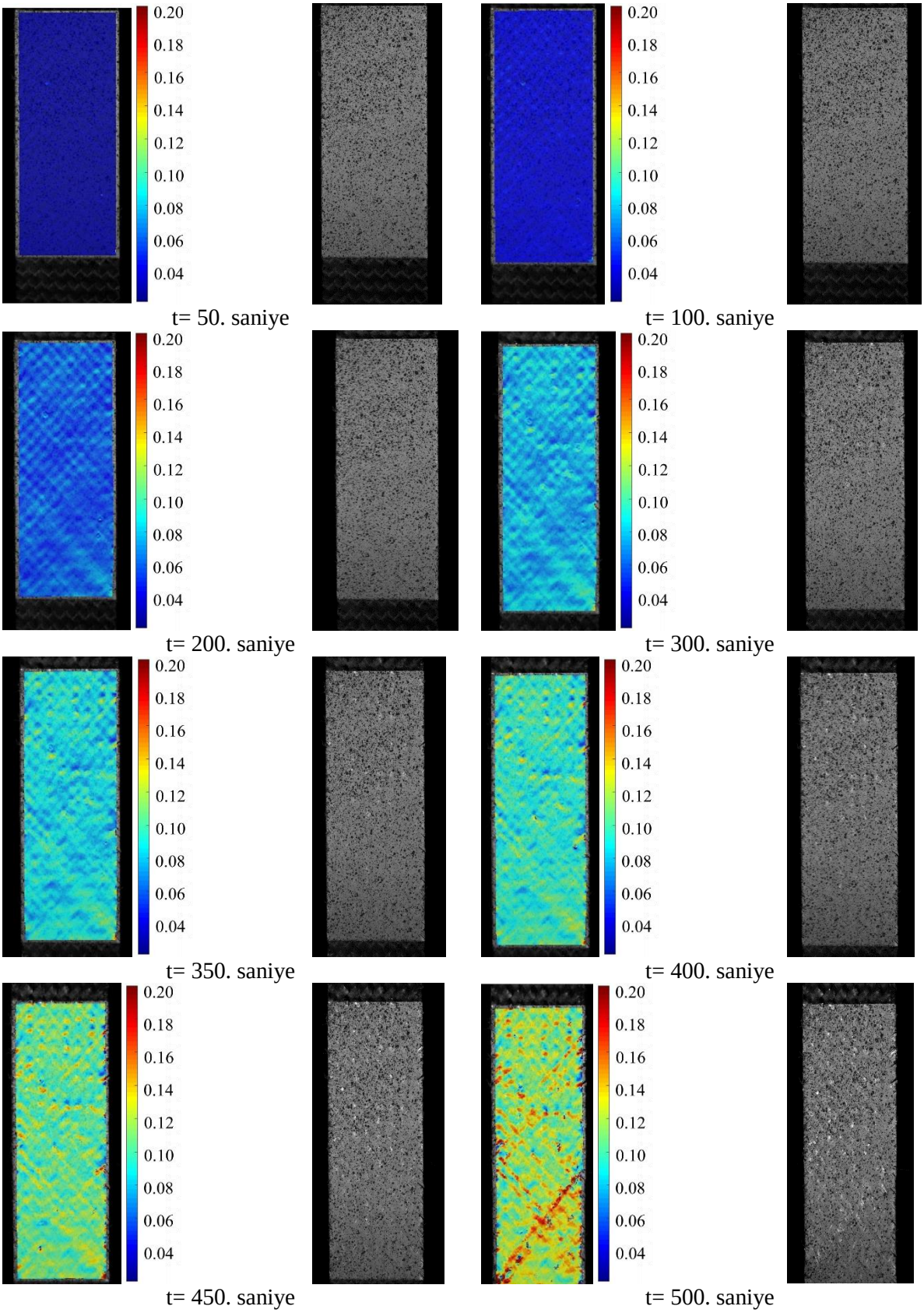



Şekil 5.11. Ncorr – gerinme gösterim ayarları seçimi

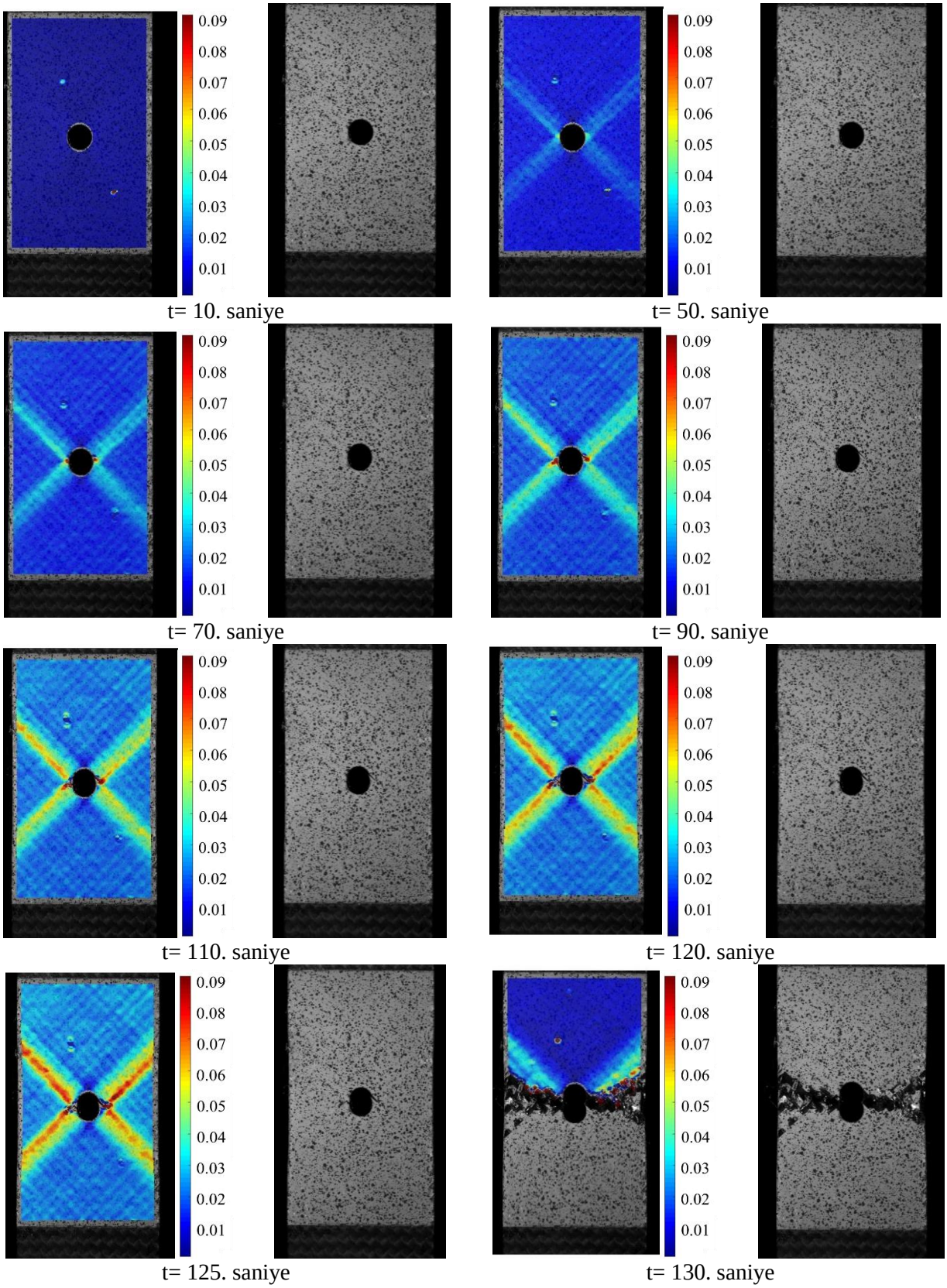
$[45_{15}]$ dizilimi deliksiz ve delikli TS-14, TS-15, TS-16, TS-17 ve TS-18 numuneleri ile yapılan DIC çalışmaları sonucunda çekme testleri sırasında farklı zaman aralıklarında toplam 70 adet gerinim dağılımı elde edilmiştir. Numuneler ile yapılan çalışmaların gerinme dağılım görüntüleri, testler sırasında alınan ham görüntülerle karşılaştırmalı olarak sırasıyla Şekil 5.12 – Şekil 5.16 ile gösterilmektedir. Zamana bağlı uzama ile oluşan gerinim dağılımları görsellerden takip edilebilir. Kırılmanın takip edilebilmesi adına kırılmaya yaklaştıkça daha kısa aralıklar ile görüntüler alınmıştır.



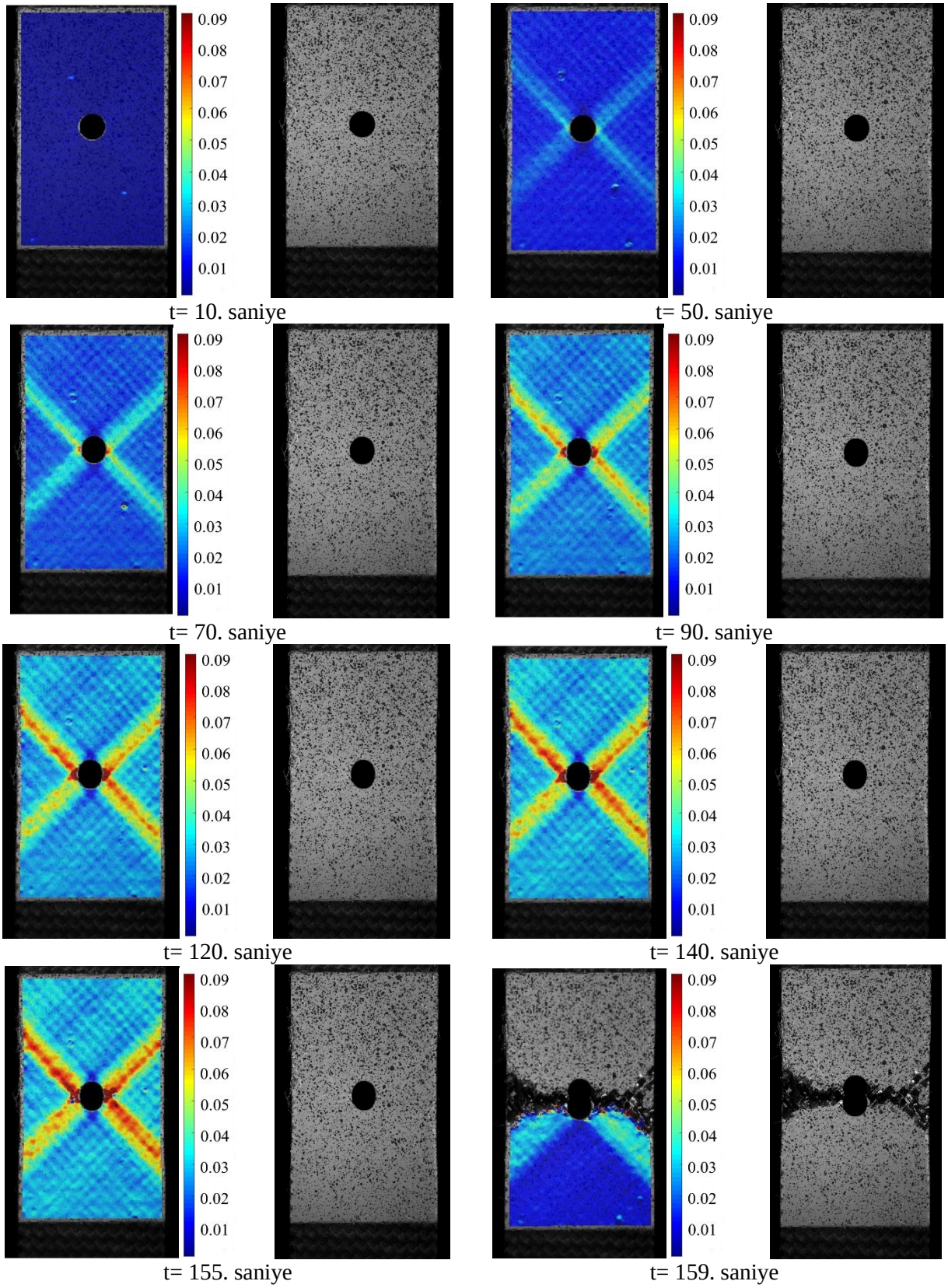

Şekil 5.12. TS14 numunesi için DIC işlemi sonrası gerilme dağılımları ve ham fotoğraflar



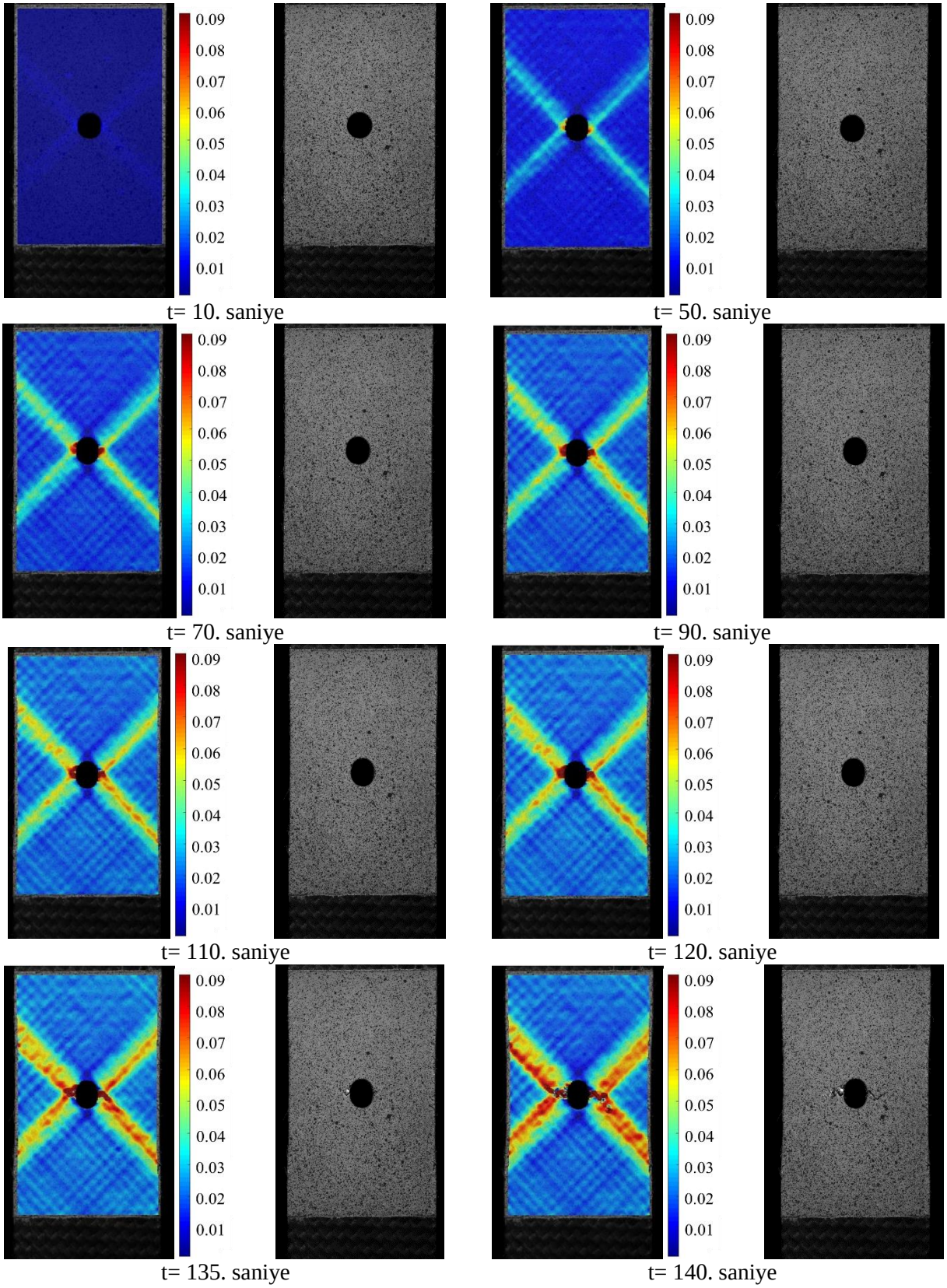

Şekil 5.13. TS15 numunesi için DIC işlemi sonrası gerilme dağılımları ve ham fotoğraflar




Şekil 5.14. TS16 numunesi için DIC işlemi sonrası gerilme dağılımları ve ham fotoğraflar




Şekil 5.15. TS17 numunesi için DIC işlemi sonrası gerilme dağılımları ve ham fotoğraflar




Şekil 5.16. TS18 numunesi için DIC işlemi sonrası gerilme dağılımları ve ham fotoğraflar

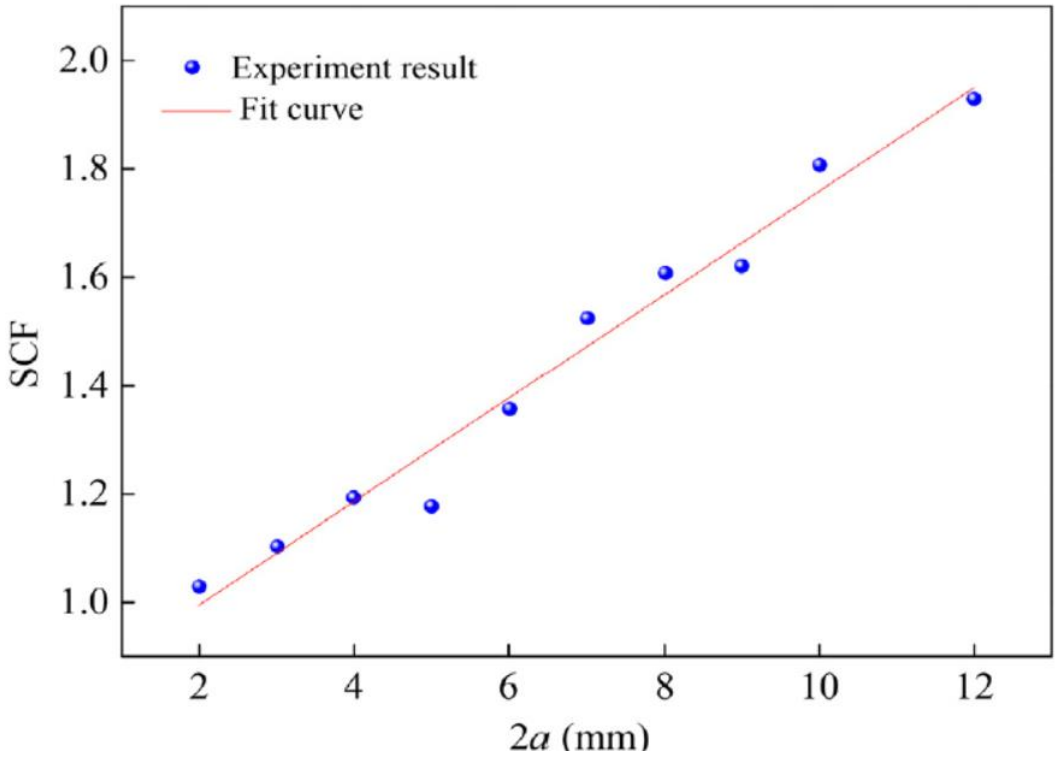
Şekil 5.12 ve Şekil 5.13 görselleri incelendiğinde TS14 numunesinin 500. saniyede çekme yönüne göre orta-üst bölgeden, TS15 numunesinin ise yine aynı zaman diliminde bu kez tutma bölgesine yakın orta-alt kısımdan kırılmaya başladığı görülmektedir. Deliksiz düz plaka numunelerinin tutma bölgesi yerine bu deneylerde olduğu gibi tutma haricindeki bölgelerden kırılması, plaka tutma/sıkma uygulamasının olması gerektiği gibi yapıldığını göstermektedir.

Şekil 5.14, Şekil 5.15 ve Şekil 5.16 ile sunulan delikli çekme testi sonuçları irdelendiğinde, TS16 – TS18 numunelerinin sırasıyla 130., 159. ve 140. saniyelerde kırılmaya başladığı gözlemlenmiştir.

# 6. TEORİK HESAP İLE KIYASLAMA

TS-01, TS-02 ve TS-03 numuneleri ile yapılan testler sonucunda çekme kuvveti altındaki ortalama kritik gerilme, $\sigma_{max}$ değeri 752,7 MPa olarak bulunmuştur. TS-04, TS-05 ve TS-06 numuneleri ile yapılan testlerde ortalama 39,5 kN maksimum çekme kuvveti elde edilmiştir. Gerilme konsantrasyon faktörü $K_c$, numune kalınlığı ve çap/genişlik oranına bağlı olarak deliğin etrafından kenara doğru farklılık gösterir.

Duan ve diğerleri (2020) tarafından yürütülen çalışmada Figure 8'de delik çapına bağlı gerilme yoğunluğu faktörü (SCF) eğrisi sunulmaktadır (bakınız Şekil 6.1). Duan ve diğerlerinin (2020) çalışmasında plaka genişliği 50 mm olarak alınmıştır. Bu durumda w/D oranı altı olması için delik çapının 8.33 mm olması gerekmektedir. Şekil 6.1'de "2a" delik çapını temsil etmektedir. Bu değer 8.33 olarak alındığında, eğriden $K_c$ değeri yaklaşık 1,63 olarak elde edilmektedir.




Şekil 6.1. Duan ve diğerleri (2020) tarafından hazırlanan gerilme yoğunluğu eğrisi

Grafikten elde edilen $K_c$ değeri kullanılarak teorik çekme yükü 41,6 kN olarak hesaplanmıştır. Elde edilen $K_c$'den hesaplanan kritik kuvvet değeri ile güçlendirmesiz delikli $[0_{15}]$ test numunesi sonucu arasında yaklaşık yüzde beş oranında bir fark vardır. Çekme testi

sonuçları ile karşılaştırıldığında Duan ve diğerlerinin (2020) yürütmüş olduğu çalışma ile tutarlı gelmektedir.

$$K_c\sigma_{avg} = \sigma_{max} = 752{,}7\ MPa$$

$$\sigma_{avg} = \frac{752{,}7}{1{,}63} = 461{,}8\ MPa$$

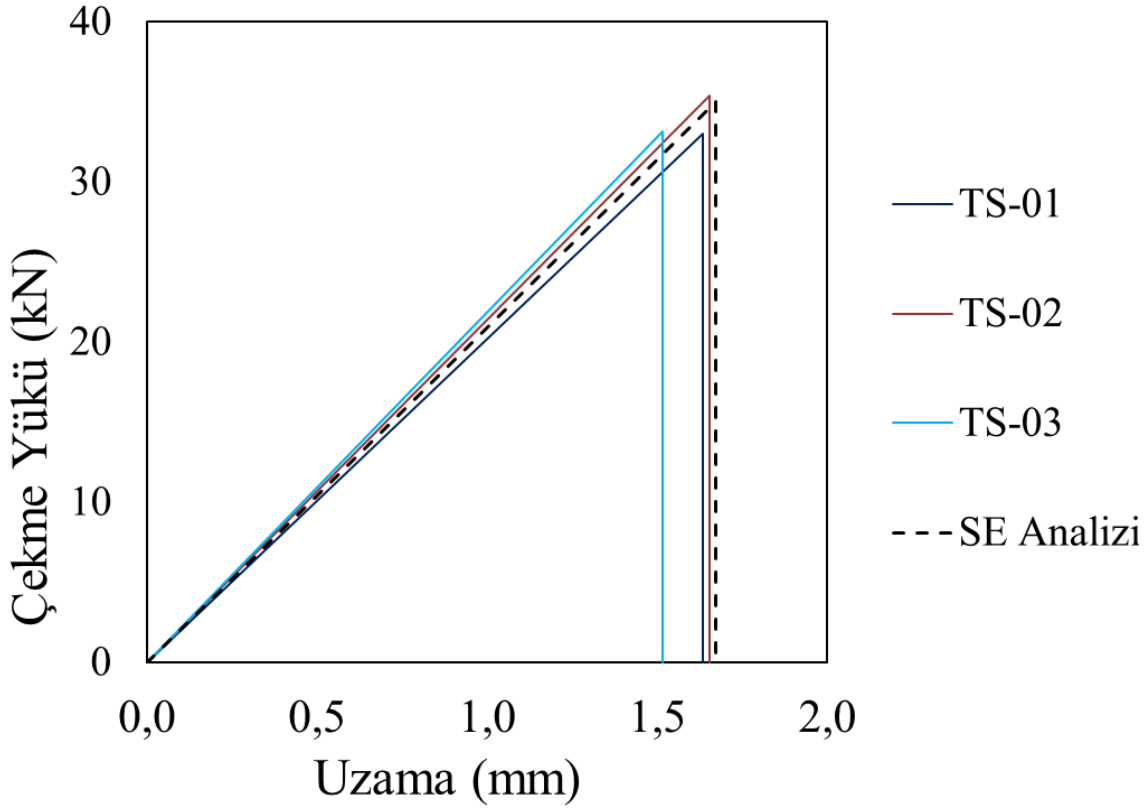
$$P = \sigma_{avg}(b - d)h = 462(36 - 6)3$$

$$P = 41560\ N$$

$$\frac{P_{teroik} - P_{test}}{P_{test}} = \frac{41560N - 39530N}{39530\ N} = \%5$$

# 7. SONLU ELEMANLAR DOĞRULAMA ÇALIŞMASI

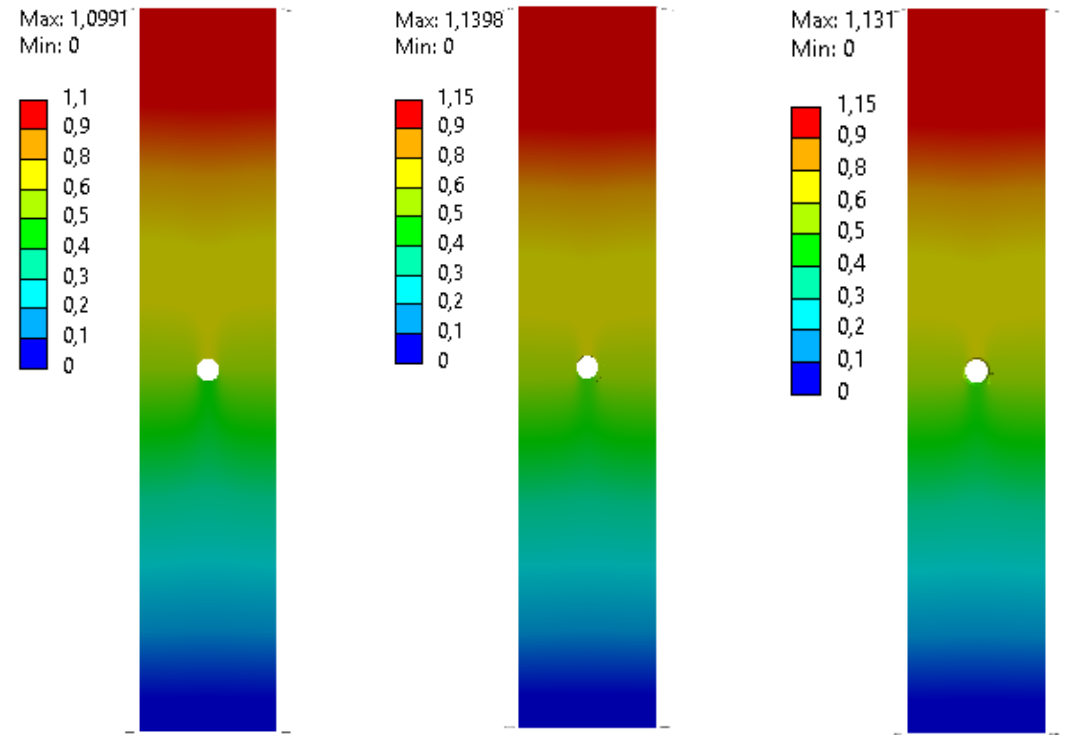
[$0_{15}$] dizilimi CFRP ASTM D3039 çekme testi numuneleri için ayrı ayrı 10 kN, 20 kN, 30 kN ve 35 kN yüklemeler altında sonlu elemanlar analizi yapılmıştır. Daha sonra uygulanan kuvvete bağlı olarak uzama eğrisi oluşturulmuş TS-01, TS-02 ve TS-03 çekme testi sonuçları ile birlikte Şekil 7.1 ile sunulmuştur. Eğriler incelendiğinde SEA ile elde edilen uzama sonucunun test sonuçlarına oldukça yakın bir davranış sergilediği görülmektedir.




Şekil 7.1. ASTM D3039 çekme testi ve SE analiz sonucu yükleme-uzama eğrileri

Şekil 7.2 ile [$0_{15}$] dizilimli delikli numuneler ile yürütülen sonlu elemanlar analizi sonrası elde edilen deformasyon dağılımları sunulmaktadır. Analizler sırasında modellen plakalara, Çizelge 4.2 ile belirtilen testler sırasında elde edilen ortalama kritik çekme yükleri uygulanmıştır. Şekil 7.3'de ise yüzük ve papatya güçlendirmeli modeller ile kritik yükleme koşuları olan 41,3 kN ve 40,9 kN çekme yükleri altındaki sonlu elemanlar analizi ile elde edilen detaylı gerinim dağılımları gösterilmektedir. Görsellerde gerinim değerlerinin beklenildiği üzere delik çevresinde yoğunlaştığı görülmektedir. Analiz çalışmasında ortaya çıkan çekme yüküne bağlı uzama değerleri, test sonuçlarıyla birlikte Şekil 7.4 ile gösterilmektedir. Üç tasarım için yapılan analizler sonucunda elde edilen elastik modül

değerleri sırasıyla 63,2 GPa, 63,6 GPa ve 63,8 GPa şeklindedir. Şekil 7.4 grafiğindeki test sonuçları ile karşılaştırıldığında, delikli modeller için modellenen sonlu elemanlar çalışması sonuçlarının oldukça tutarlı olduğu söylenebilir.

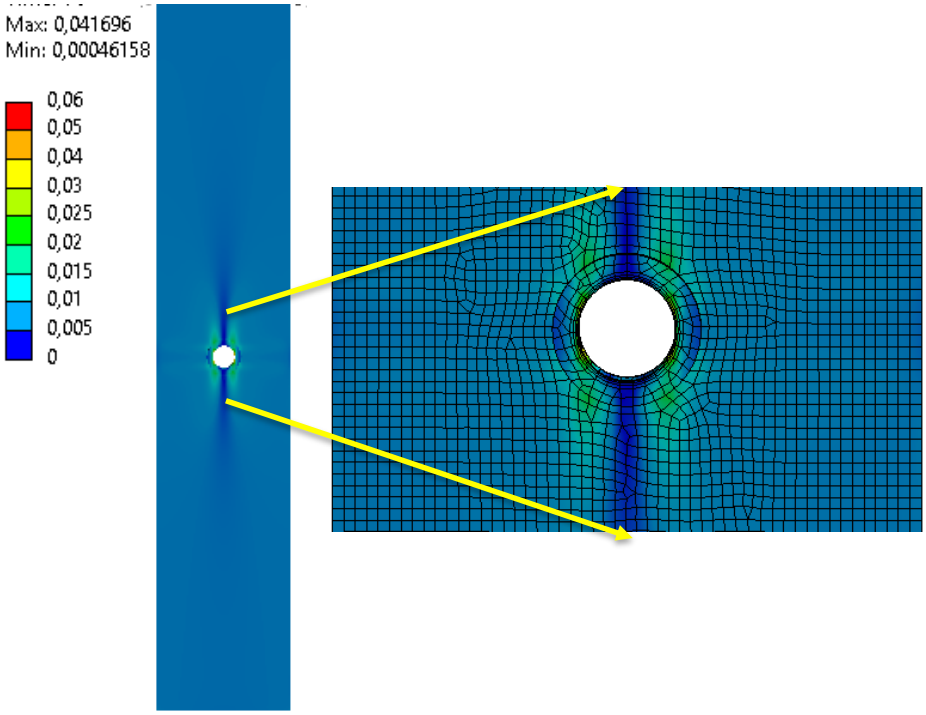



a) Güçlendirmesiz, 39.53 kN çekme yükü

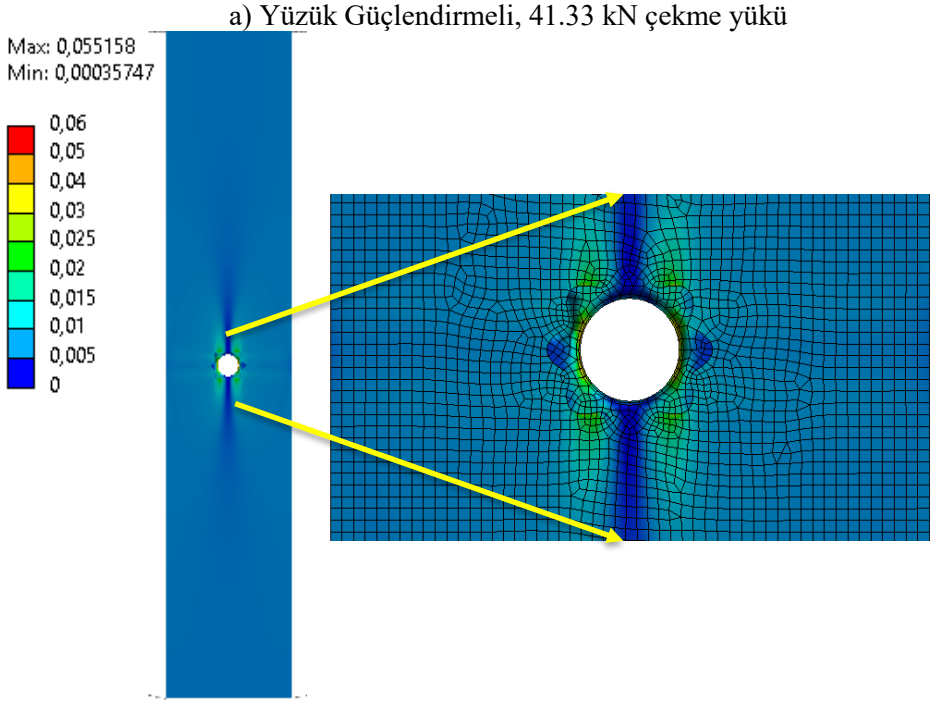
b) Yüzük Güçlendirmeli, 41.33 kN çekme yükü

c) Papatya Güçlendirmeli, 40.9 kN çekme yükü

Şekil 7.2. Çekme yükleri altında delikli numuneler için SE analizi deformasyon dağılımları

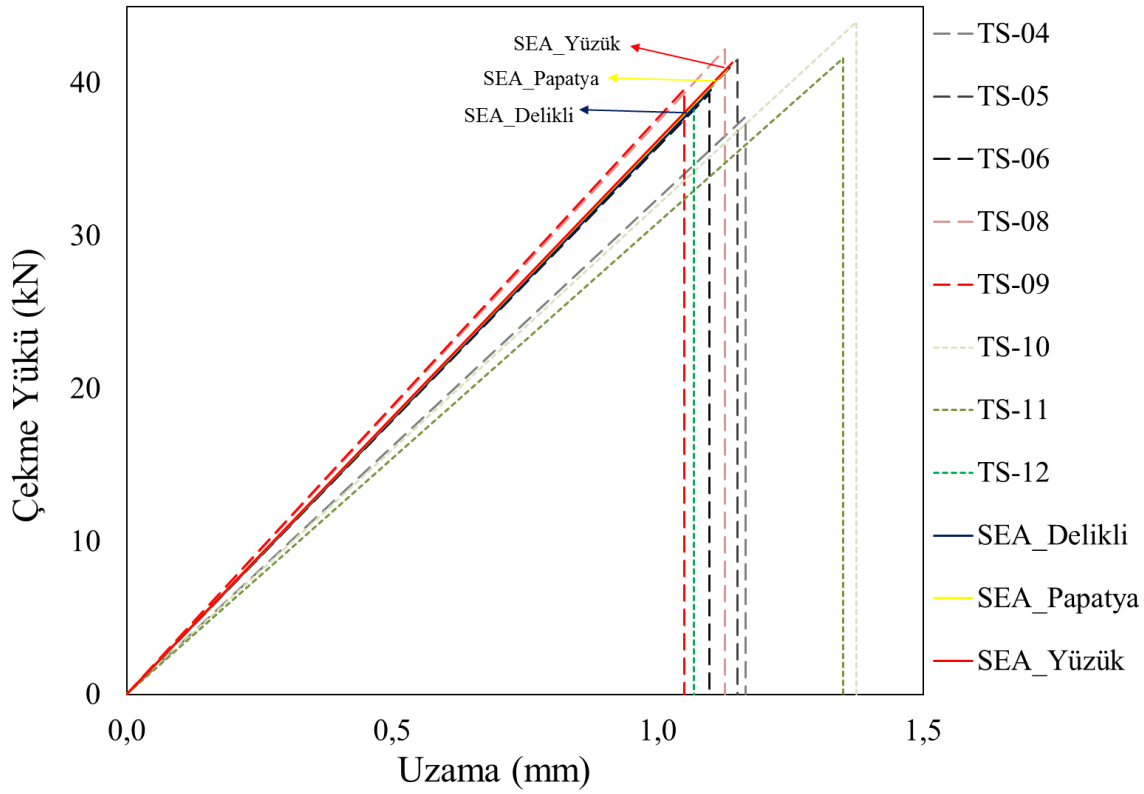



a) Yüzük Güçlendirmeli, 41.33 kN çekme yükü



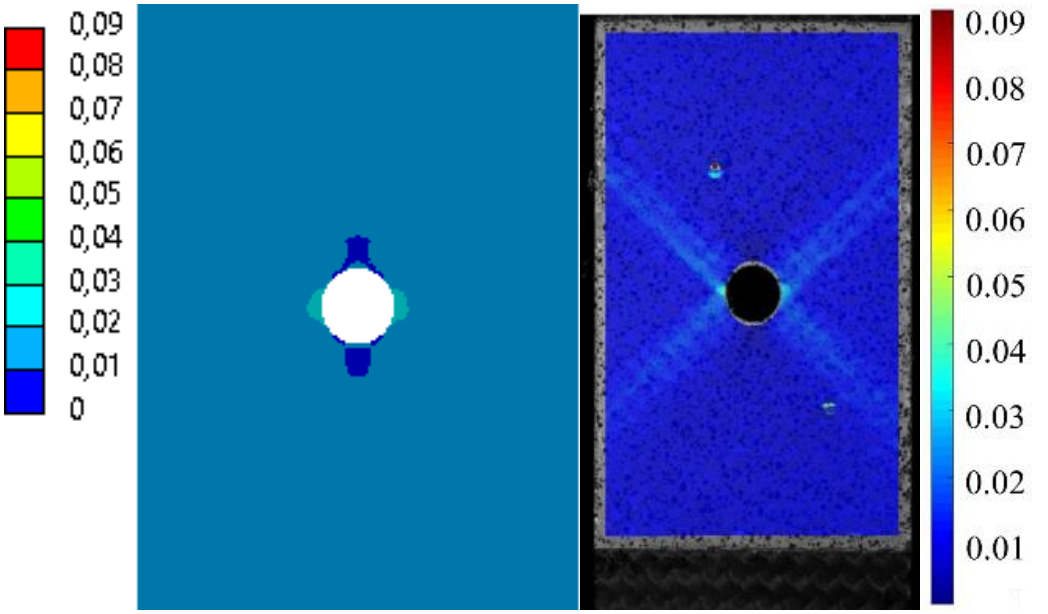

b) Papatya Güçlendirmeli, 40.9 kN çekme yükü

Şekil 7.3. Yüzük ve Papatya modelleri için detaylı SE analiz görseli

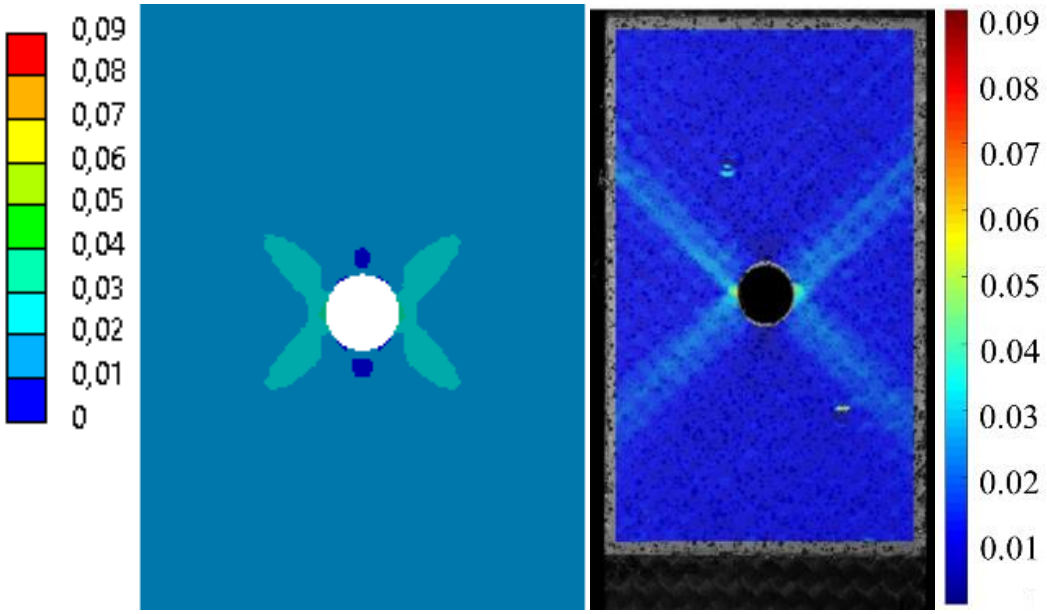



Şekil 7.4. TS-04 – TS-12 çekme testi ve SEA sonucu yükleme-uzama eğrileri

Şekil 7.5 ve 7.6 ile $[45_{15}]$ dizilimli CFRP delikli numuneler ile yürütülen DIC işlemi sonrası elde edilen 40, 50, 70 ve 80. saniyelerdeki dört gerinim dağılımı görüntüsü gösterilmektedir. Yine aynı şekilde bu süreler esnasında plakanın maruz kaldığı yükleme koşulu altında gerçekleştirilen sonlu elemanlar analiziyle elde edilen gerinim görüntüsüne de yer verilmiştir. Görseller incelendiğinde yüklemeye bağlı olarak adım adım 45 derecelik eksenli gerinim konsantrasyonlarının oluştuğu ve delik kenarındaki kritik bölgelerde gerinim yoğunluğunun benzer şekilde dağıldığı görülmektedir. Sonlu elemanlar analizi doğrulama çalışmaları, deliksiz çekme test numunesi için yer değiştirmeye dayalı ve $[45_{15}]$ dizilimli delikli test numunesi için ise gerinim dağılımına referansla sunulmuştur. Bu aşamadan sonra, çekme ve kayma yükleri altında aynı hacimde farklı güçlendirme tiplerine sahip modellerin karşılaştırılması için ANSYS sonlu elemanlar programının kullanılabileceği söylenebilir.

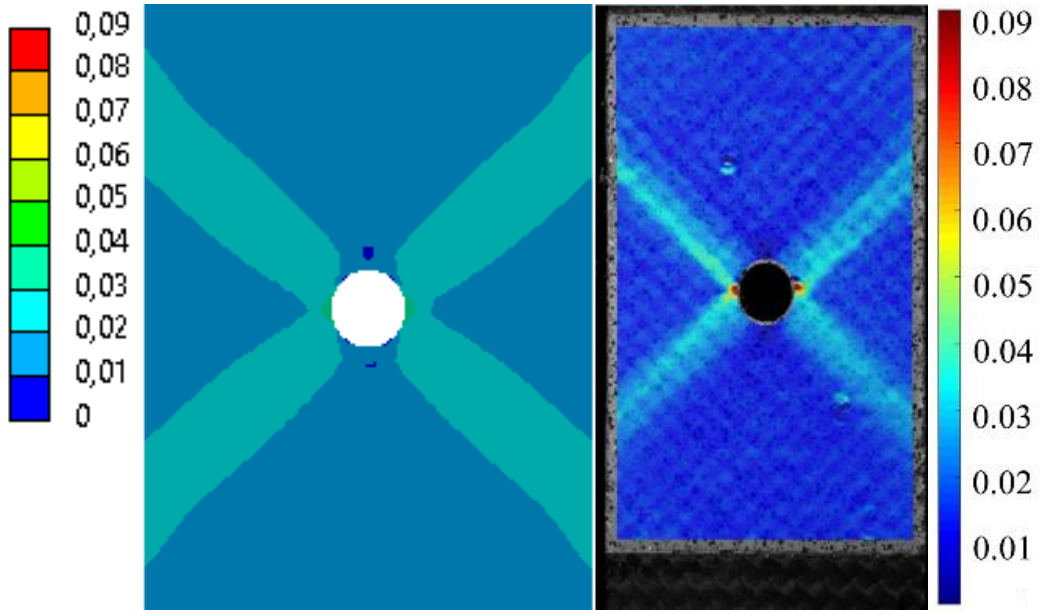



a) t= 40s, F= 12572N

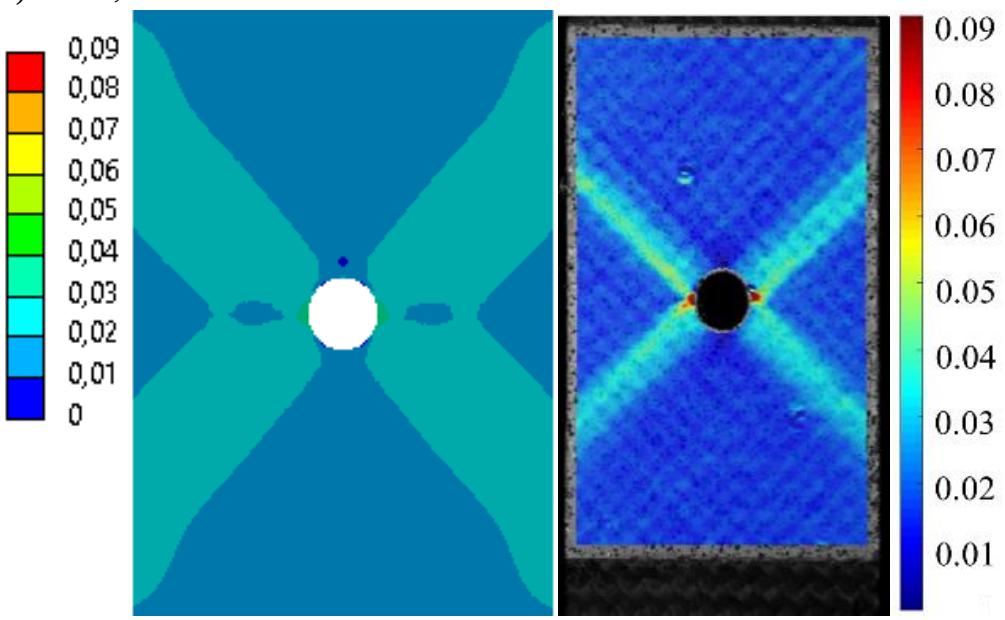



b) t= 50s, F= 14240N

Şekil 7.5. [$45_{15}$] dizilimli delikli numuneler için 40 ve 50. saniyelerdeki DIC ve SE analizi gerinim dağılımları




a) t= 70s, F= 16434N




b) t= 80s, F= 17204N

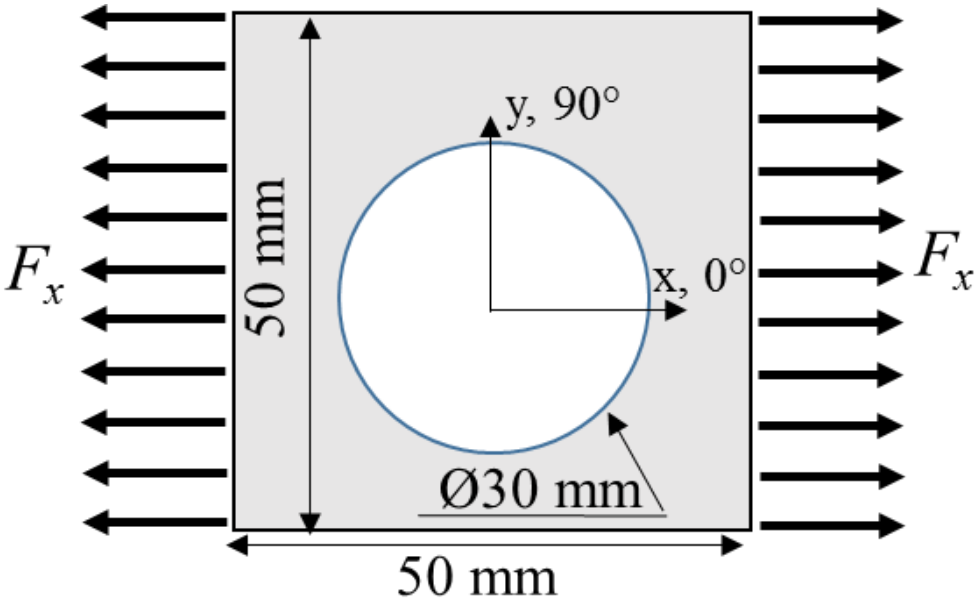
Şekil 7.6. [$45_{15}$] dizilimli delikli numuneler için 70 ve 80. saniyelerdeki DIC ve SE analizi gerinim dağılımları

# 8. GÜÇLENDİRME MODELİ KARŞILAŞTIRMASI

Bu bölümde; yalın çekme, yalın kayma ve birleşik yükleme (çekme ve kayma) koşulları altında ayrı ayrı yürütülen Tsai-Wu hata analizi çalışmaları ve güçlendirme kıyaslaması sunulmaktadır. Ayrıca tasarlanan güçlendirme modeli için hacme bağlı hata oranı karşılaştırması ile bir optimizasyon çalışması yer almaktadır.

## 8.1. Yalın Çekme Yükü Altında Analiz

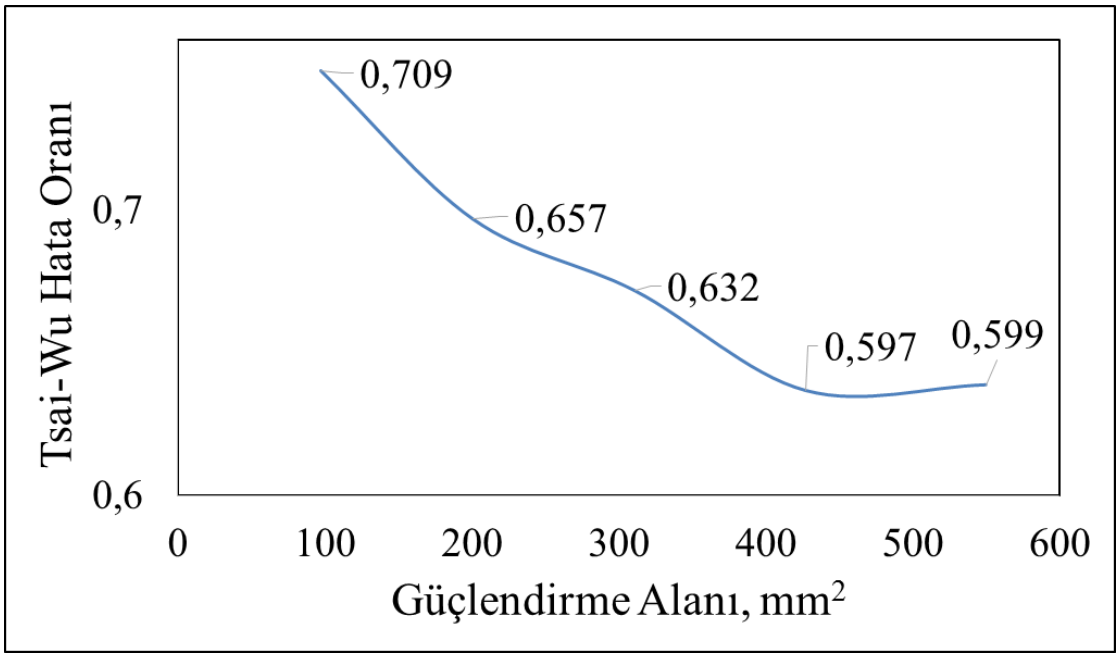
Bu bölümde, aynı hacme sahip yüzük, kare, elips ve papatya güçlendirme tipli delikli levhalar için her iki uçtan 117 MPa çekme yükü altında yapılan analiz sonuçları sunulmaktadır. Şekil 8.1 ile çekme analizinde kullanılacak 50x50 mm boyutlarında ve 3 mm kalınlığında [$0_{15}$] dizilimli CFRP laminat plaka geometrisi gösterilmektedir. Havacılık uygulamalarında borulama ve kablolama gibi amaçlarla kullanılmak ve mümkün olduğunca fazla hafifletme sağlamak için plakanın ortasına çap/genişlik oranı yüzde 60 olacak şekilde 30 mm çapında bir delik açılmıştır. ANSYS ACP Post modülünde Tsai-Wu başarısızlık oranı değerleri ile güçlendirme tipleri arasında karşılaştırma yapılmaktadır. Takviyesiz levha modeli için en kritik Tsai-Wu oranı değeri 1.00 olması için yapıya her iki kenarından 117 MPa çekme yükü uygulanması gerekmektedir. Ayrıca sınır şartı olarak tüm plaka kenarları z ekseninde (düzlem yönü dışında) tutulmuştur.




Şekil 8.1. Yalın çekme yükü altındaki analizlerde kullanılan geometri

Şekil 8.1 ile sunulan [$0_{15}$] dizilimli CFRP plakaya açılan deliğin hacmi yaklaşık 2120 $mm^3$ civarındadır. Oluşturulacak güçlendirme yapısının, hafifletme prensibine hizmet etmesi adına boşaltılan hacmin oldukça altında olması gerekmektedir. Bu nedenle güçlendirme modellenirken ilk olarak 15 kat yerine 10 kat [$0_{10}$] dizilim yapılarak kalınlık 2 mm alınmıştır. İç çapı 30 mm olan donatının en ideal ölçüsüne karar verebilmek için farklı dış çaplara sahip yüzük modelleri ile analizler yapılmıştır.

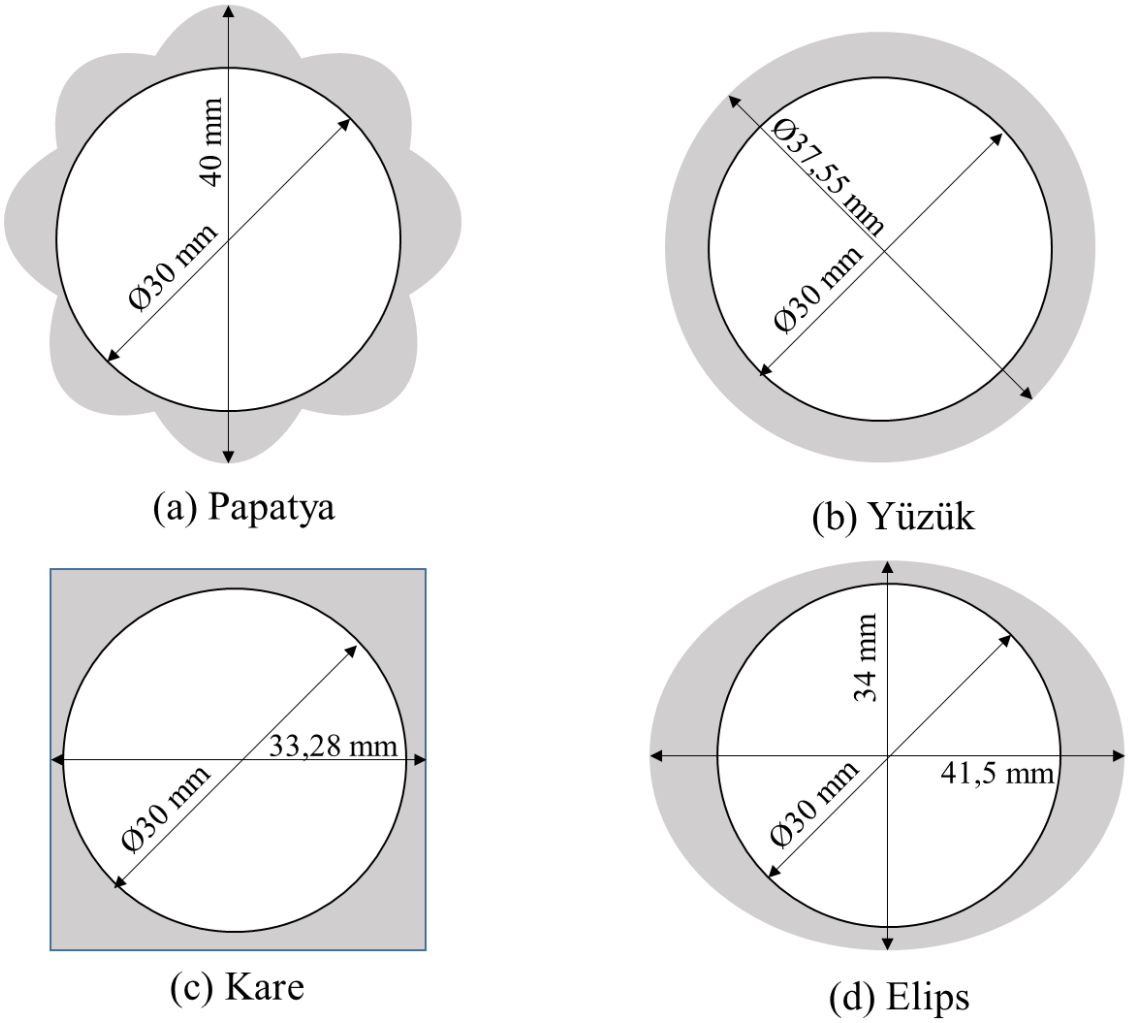
Belli bir seviyeden sonra dış çapı artırmanın hata oranını aynı oranda iyileştirmeyeceği beklenmektedir. Şekil 8.2 ile sunulduğu üzere dış çapı 32, 34, 36, 38 ve 40 mm olan yüzük takviyeli levhalar için 37,17 MPa çekme ve 37,17 MPa kesme yükleri altında Tsai-Wu hata oranları çıkarılmıştır. Eğri incelendiğinde güçlendirme alanının 400 $mm^2$'nin üzerine çıkarılmasının plakanın mukavemetini olumlu yönde etkilemediği görülmektedir. Şekil 8.1 ile gösterilen geometride ideal bir iyileştirme tasarımı için güçlendirme alanı 400 $mm^2$, hacim ise 800 $mm^3$ olarak belirlenmiştir. Bu değer ayrıca takviye parçasının boşaltılan deliğine göre %38 ağırlığa sahip olacağı anlamına gelmektedir.




Şekil 8.2. Farkı güçlendirme alanına sahip yüzük güçlendirmeli plaka için hata oranı eğrisi

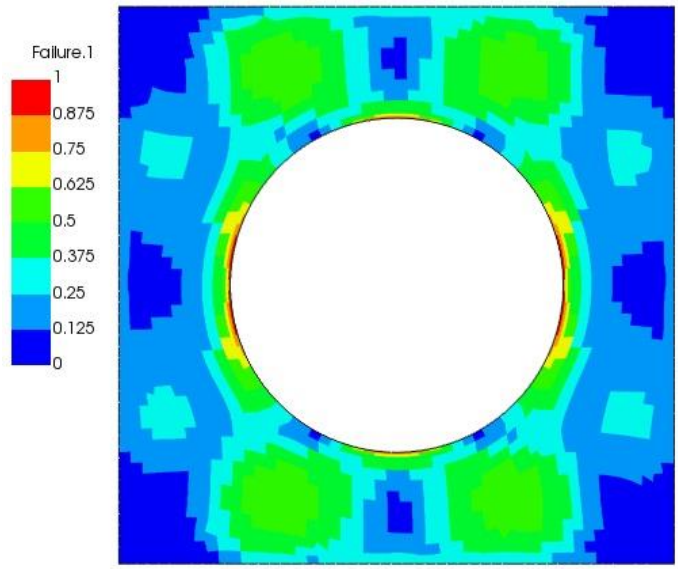
Uzun çapı 40 mm ve kısa çapı 20 mm olan 4 elipsin birleşimden elde edilen papatya modelinin alanı yaklaşık 400 $mm^2$ olmaktadır (tasarım sırasında elips birleşim noktalarında 2 mm'lik radiyuslar oluşturulmuştur). Papatya modeli ile aynı alana sahip iç çapı 30 mm olan yüzük modelinin dış çapı 37,55 mm gelmektedir. Kare tipi güçlendirmenin ise bir kenar

uzunluğu 33,28 mm olmaktadır. Kısa çapı 34 mm olan tek elips modelinin uzun kenarı 41,5 mm olarak hesaplanmıştır. Şekil 8.3 ile eş alana sahip olarak tasarlanan dört güçlendirme modelinin geometrik ölçüleri sunulmaktadır.

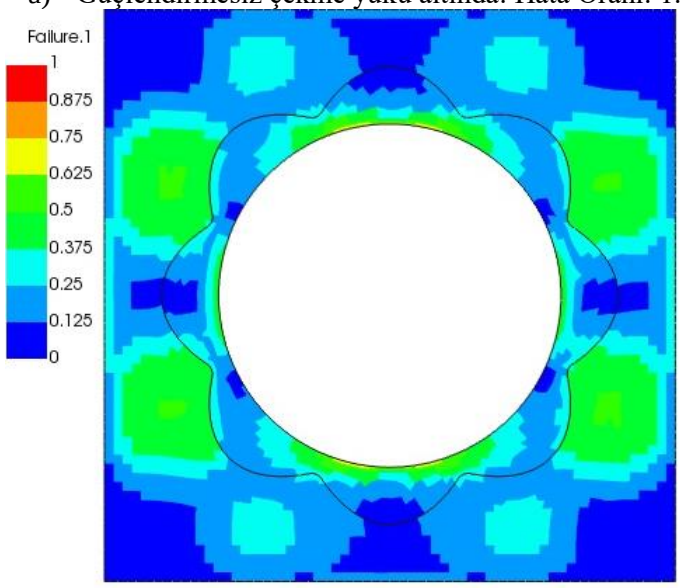



Şekil 8.3. Dört güçlendirme modelinin geometrik ölçüleri

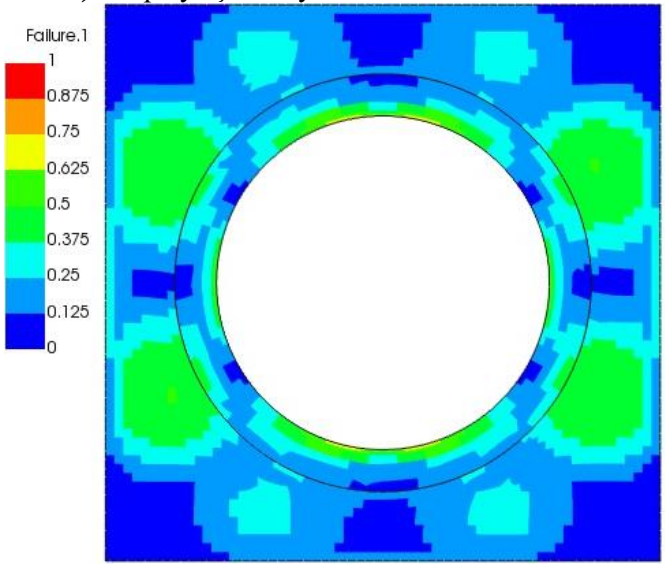
Şekil 8.4 ile güçlendirmesiz ve papatya, yüzük, kare ve elips güçlendirmeye sahip tasarımların 117 MPa yalın çekme yüklemesi altında sonlu elemanlar analizinden elde edilen Tsai-Wu hata oranı dağılımlarını gösterilmektedir. Çekme yüklemesi altında elips ve yüzük modelleri için en iyi sonuç olan 0.74 hata oranını elde edilmiştir. Bu değerin anlamı, güçlendirmesiz plaka 117 MPa yüklemeye dayanabilirken; oluşturulan hafifletme deliğinin yüzde 38 hacmine sahip elips veya yüzük güçlendirme eklenmesi halinde yapı 158 MPa (117/0,74) çekme yüküne dayanabilmektedir. Bu sayede de Şekil 8.1'de sunulan model için mukavemet değeri %35 oranında artırılmış olmaktadır.



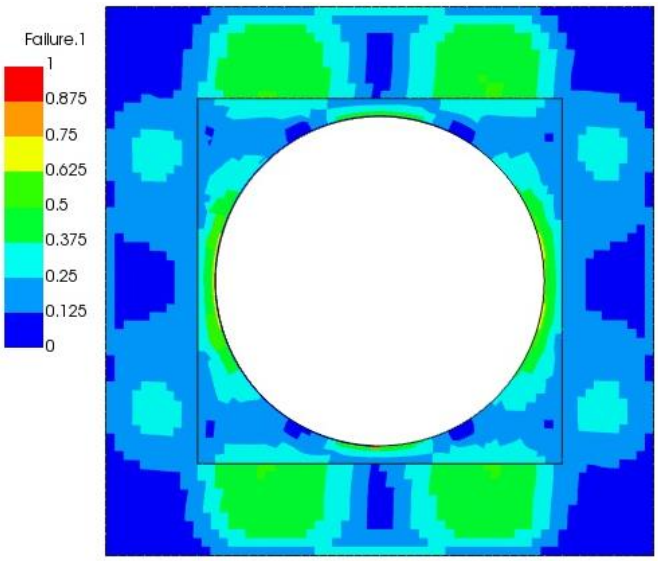

a) Güçlendirmesiz çekme yükü altında: Hata Oranı: 1.00



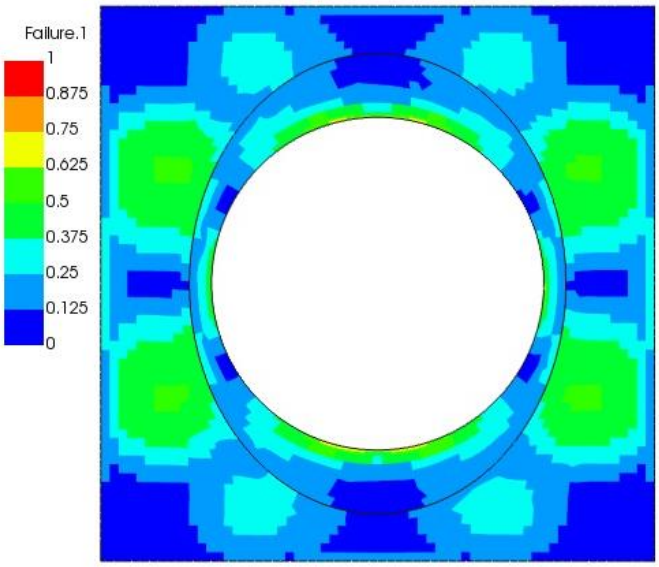

b) Papatya çekme yükü altında: Hata Oranı: 0.75




c) Yüzük çekme yükü altında: Hata Oranı: 0.74




d) Kare çekme yükü altında: Hata Oranı: 0.80




e) Elips çekme yükü altında: Hata Oranı: 0.74

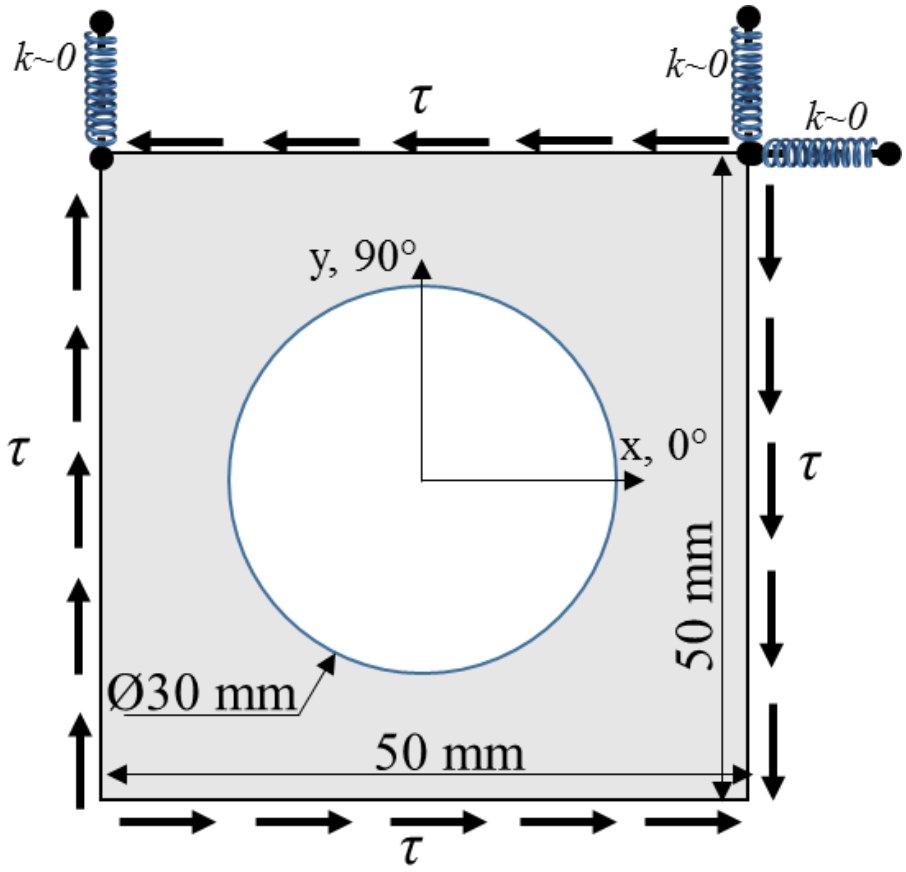
Şekil 8.4 117 MPa yalın çekme yüklemesi altında Tsai-Wu hata oranı dağılımları

## 8.2. Yalın Kayma Yükü Altında Analiz

Yalın kayma yüklemesi altında $[0_{15}]$ dizilimli CFRP delikli plakanın hata oranı analiz karşılaştırması kullanılan geometri ve sınır koşulu yaklaşımı Şekil 8.5 ile sunulmaktadır. Takviyesiz levhanın kritik hata oranının bir olması için her bir kenardan uygulanması gereken kesme yükü 51 MPa olarak belirlenmiştir.

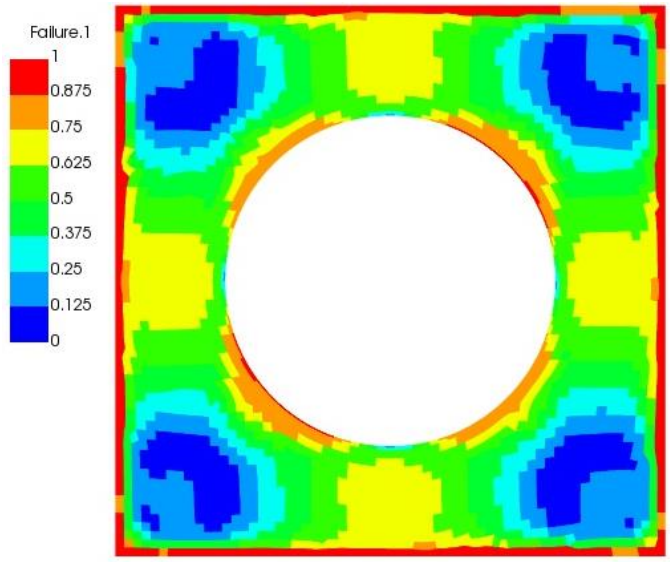
Sonlu elemanlar analizi sırasında çözüm matrisinin hataya düşmemesi adına plakanın sağ üst köşesine x ve y eksenlerimde ihmal edilebilecek seviyede yaylar (katılık değeri yaklaşık $10^{-6}$) modellenmiştir. Ayrıca, z ekseninde dönüşün kısıtlanması için sol köşeye sadece y

yönünde aynı özelliğe sahip bir yay daha eklenmiştir. Son olarak, tüm plaka kenarları z ekseninde (düzlem yönü dışında) sınırlandırmaktadır. Çekme yükü için tanımlanan CFRP dizilim prensibi kayma yükü analiz modelinde de kullanılmıştır.

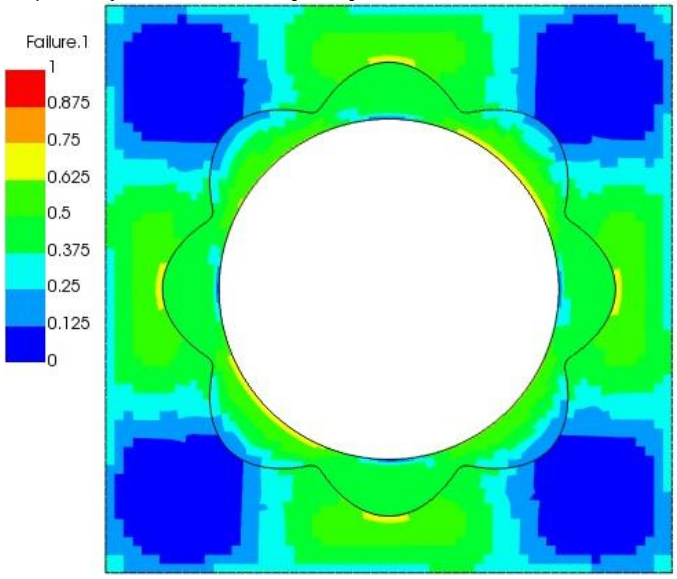



Şekil 8.5. Yalın kayma yükü altındaki analizlerde kullanılan geometri ve sınır şartı

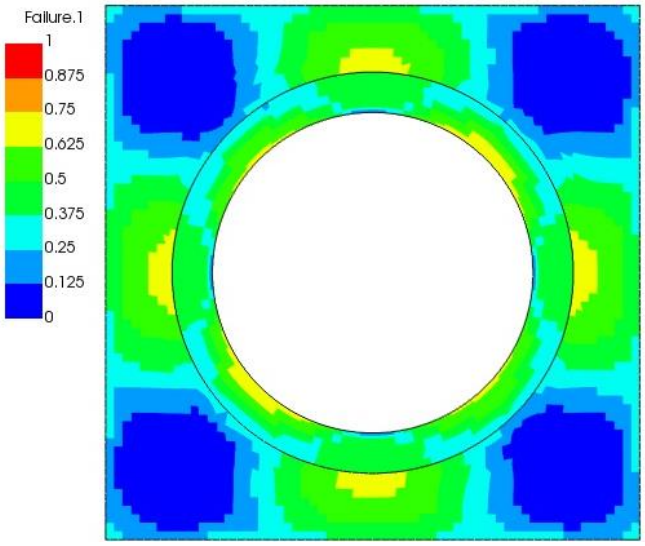
Şekil 8.6 ile güçlendirmesiz ve papatya, yüzük, kare ve elips güçlendirmeli tasarımların plakanın her kenarından uygulanan 51 MPa yalın kayma yüklemesi altında sonlu elemanlar analizinden elde edilen Tsai-Wu hata oranı dağılımlarını gösterilmektedir. Şekil 8.2 ile sunulan model için kayma yüklemesi altında en ideal güçlendirme kare modeli ile 0,68 hata oranı (kritik yükleme 75 MPa) şeklinde elde edilmiştir. Kare model plaka köşegen bölgelerinde daha fazla hacim barındırdığından, önerilen diğer güçlendirmelere oranla kayma yüklemesinde oldukça avantaj sağlamaktadır. İki farklı yalın yükleme koşulu altında Tsai-Wu hata oranları incelendiğinde papatya, yüzük, kare ve elips modellerinin güçlendirmesiz yapıya oranla mukavemeti ortalama en az %30 artırdığı görülmüştür.



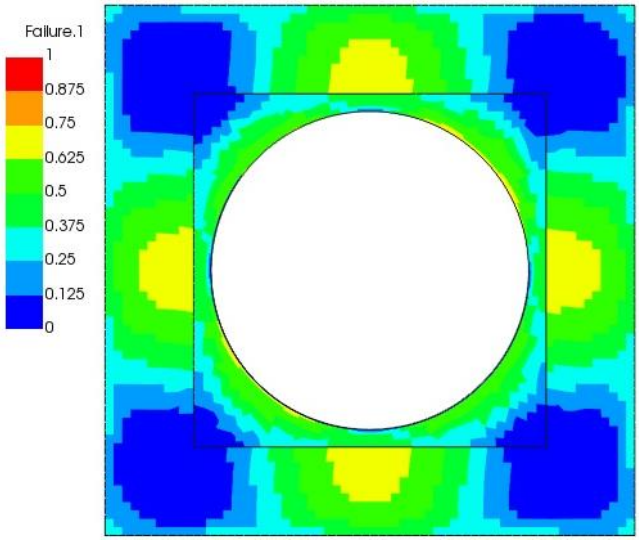

a) Güçlendirmesiz kayma yükü altında: Hata Oranı: 1.00



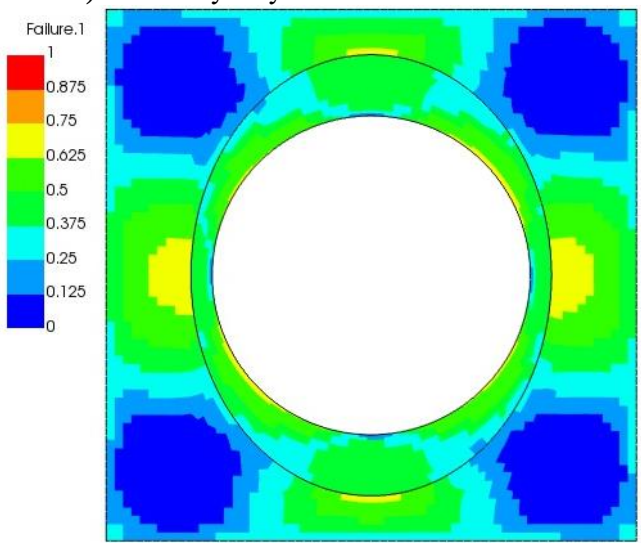

b) Papatya kayma yükü altında: Hata Oranı: 0.75




c) Yüzük kayma yükü altında: Hata Oranı: 0.73




d) Kare kayma yükü altında: Hata Oranı: 0.68

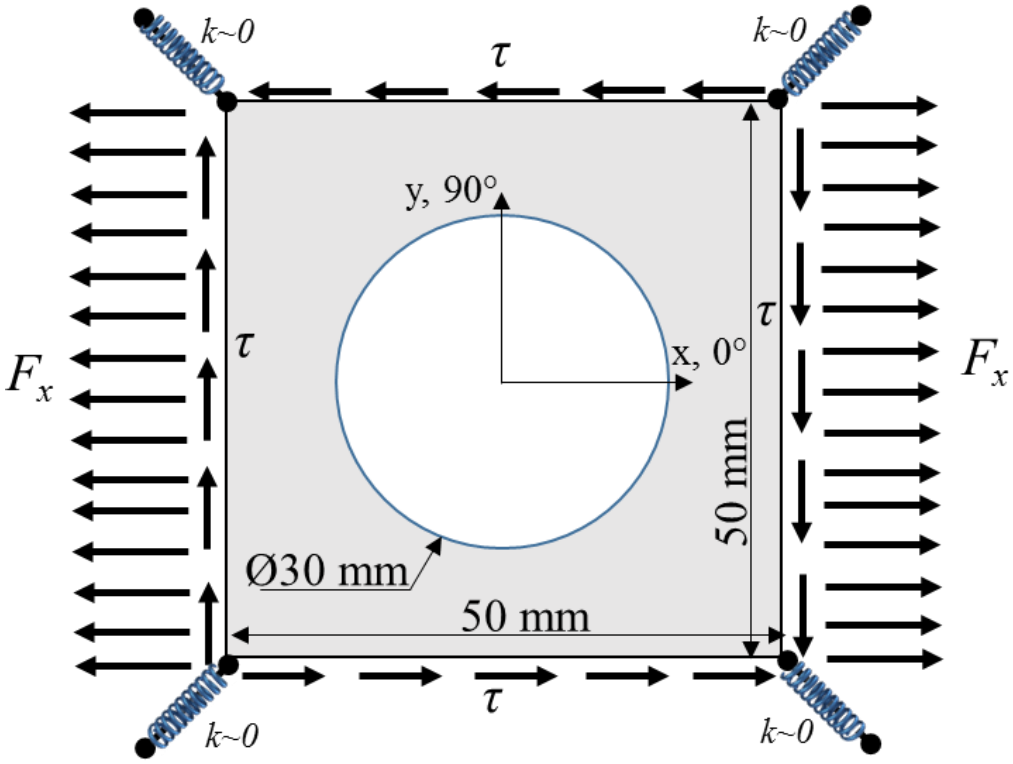



e) Elips kayma yükü altında: Hata Oranı: 0.74

Şekil 8.6. 51 MPa yalın kayma yüklemesi altında Tsai-Wu hata oranı dağılımları

## 8.3. Birleşik Yükleme Altında Analiz

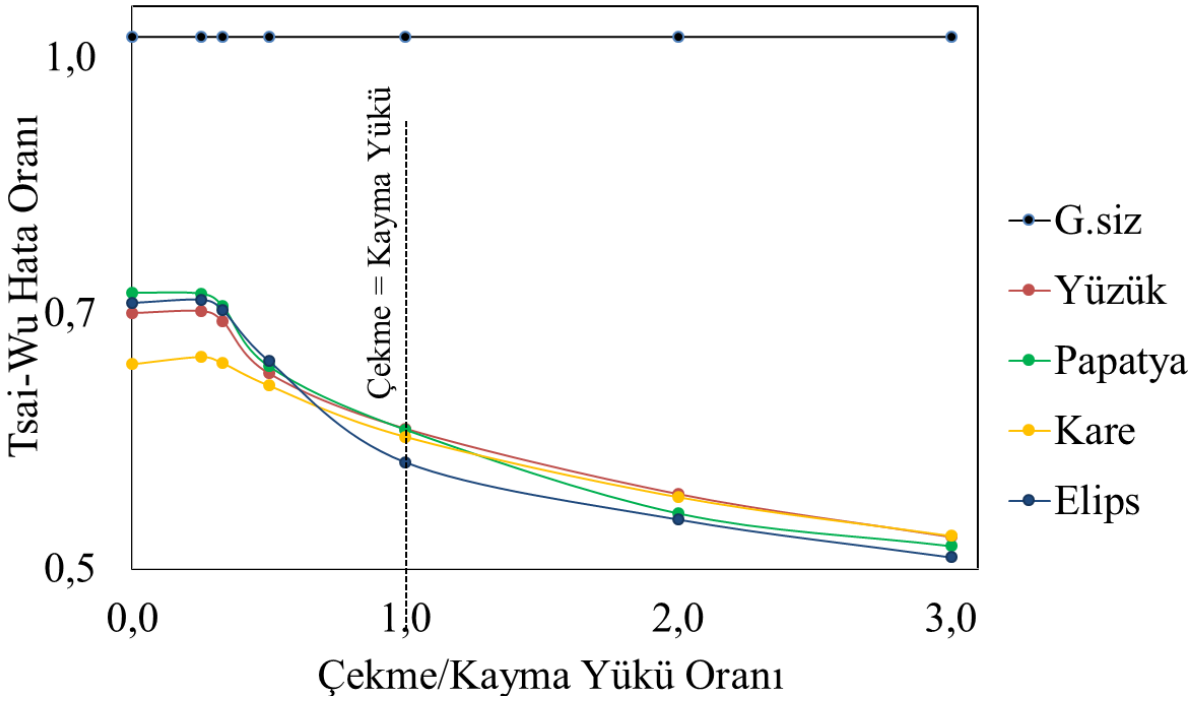
Ayrı ayrı uygulanan iki yalın yükleme koşulunda her iki koşul için ortak bir güçlendirme modeli belirlenememiştir. Bu nedenle farklı oranlarda kayma ve çekme yükleri birleştirilerek hangi yükleme daha baskın ise o yükleme koşulu için ideal güçlendirme çözümüne gidilmesi hedeflenmektedir. Bu kapsamda oluşturulan modelin geometri, yükleme ve sınır koşulları Şekil 8.7 ile sunulmuştur. Her bir kenar plaka ekseni dik yönünde (z ekseni) tutulmuştur. Yapının sonlu elemanlar çözüm matrisinde tekillik (singulartiy) oluşmaması adına her bir köşeden köşegen boyunca katılık değeri sıfıra yakın ($10^{-6}$) yaylar modellenmiştir.




Şekil 8.7. Birleşik yükleme altındaki analizlerde kullanılan geometri ve sınır şartı

Farklı çekme ve kayma yükleme oranlarında toplam yedi farklı yükleme koşulu belirlenmiştir. Oluşturulan çekme/kayma yükleme oranlarında uygulanacak yükleme değeri yalın yüklemelerde olduğu gibi güçlendirmesiz model (G.siz) için bir Tsai-Wu hata oranı elde edilecek şekilde belirlenmiştir. $[0_{15}]$ dizilimli plaka üzerine eklenen $[0_{10}]$ dizilimli farklı tasarımlardaki takviye parçalarının sonlu elemanlar analizleri ile elde edilen Tsai-Wu hata oranı eğrileri Şekil 8.8 ile hata oranı değerleri ise Çizelge 8.1 ile sunulmaktadır. Çekme/kayma yük oranın bir olduğu 37.17 MPa çekme ve kayma yükü altındaki Tsai-Wu hata oranı dağılımları ve yapının kesit görüntüsü Şekil 8.9 ile gösterilmektedir.

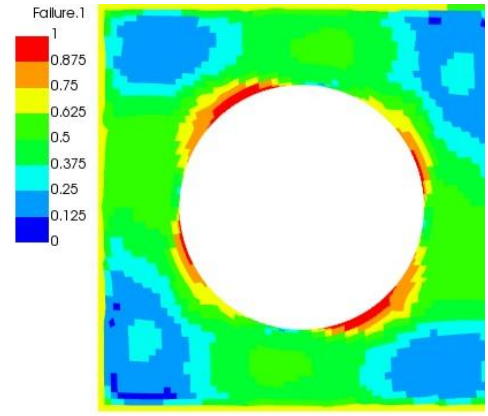
Tüm yükleme koşulları için güçlendirme tiplerinin çekme/kayma yükü oranına göre Tsai-Wu hata oranı eğrileri oldukça benzer davranış sergilemektedir. Kayma yüklemesinin ağırlıklı olduğu durumda, kare güçlendirmenin daha etkili bir çözüm olacağı görünmektedir. Çekme yükünün baskın olduğu koşullarda ise elips modelinin kırılma oranının diğerlerine nazaran biraz daha iyi olduğu söylenebilir. Ancak elips tasarımı sırasında uzun kenar, yükleme yönüne dik eksen üzerinde olmalıdır. Aksi halde başarım değeri oldukça düşecektir.



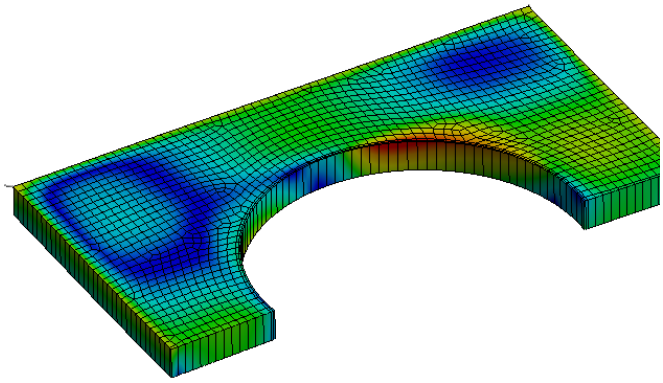

Şekil 8.8. Çekme/Kayma yük oranına bağlı hata oranı eğrileri

Çizelge 8.1 Farklı çekme/kayma yük oranları için hata oranı değerleri

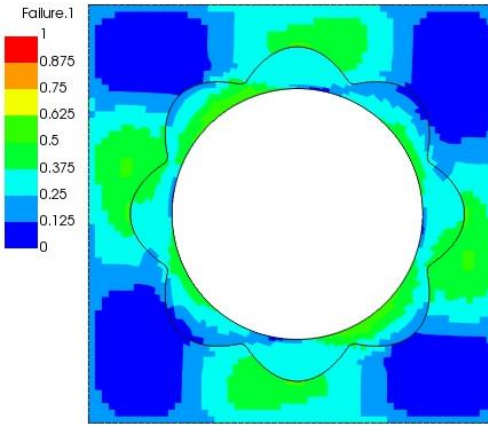
| Çekme Yükü (MPa) | Kayma Yükü (MPa) | Çekme/Kayma Oranı (Ç/K) | G.siz | Yüzük | Papatya | Kare | Elips |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0,00 | 51,00 | 0 | 1,00 | 0,730 | 0,750 | 0,680 | 0,740 |
| 12,80 | 51,20 | 0,25 | 1,00 | 0,732 | 0,749 | 0,687 | 0,743 |
| 16,64 | 50,42 | 0,33 | 1,00 | 0,722 | 0,737 | 0,681 | 0,733 |
| 23,20 | 46,40 | 0,50 | 1,00 | 0,671 | 0,678 | 0,659 | 0,683 |
| 37,17 | 37,17 | 1,00 | 1,00 | 0,617 | 0,616 | 0,609 | 0,586 |
| 51,28 | 25,64 | 2,00 | 1,00 | 0,553 | 0,534 | 0,550 | 0,528 |
| 56,50 | 18,83 | 3,00 | 1,00 | 0,511 | 0,502 | 0,512 | 0,491 |



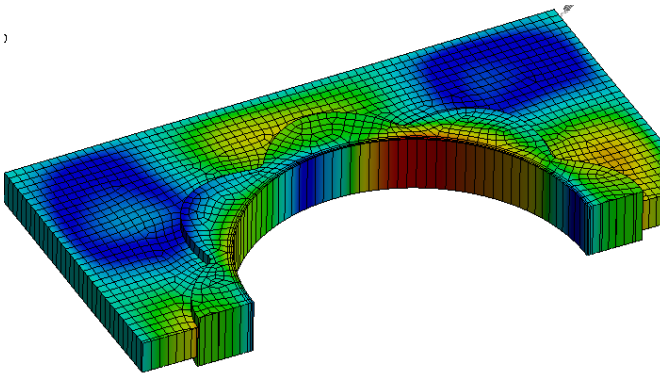

Güçlendirmesiz birleşik yük altında
Hata Oranı: 1.00



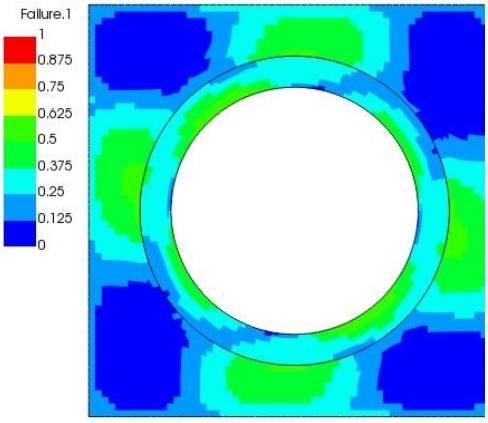
Kesit görüntüsü



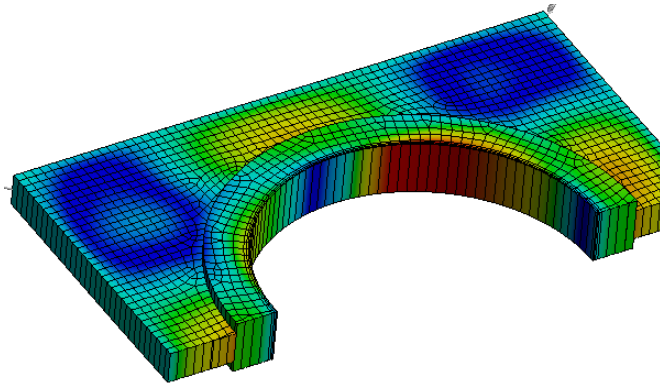

Papatya birleşik yük altında
Hata Oranı: 0.62



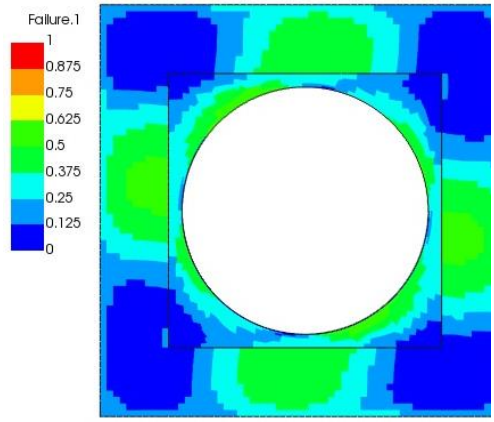
Kesit görüntüsü

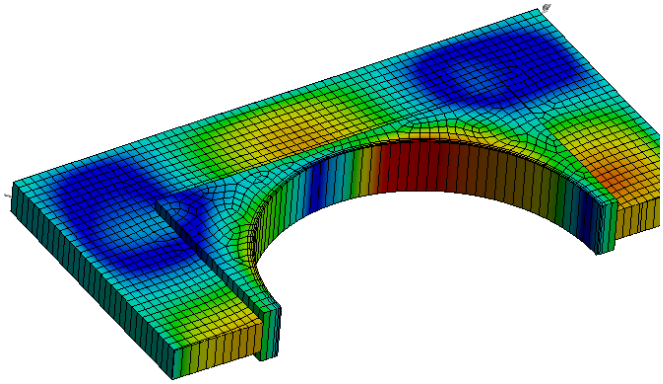



Yüzük birleşik yük altında
Hata Oranı: 0.62



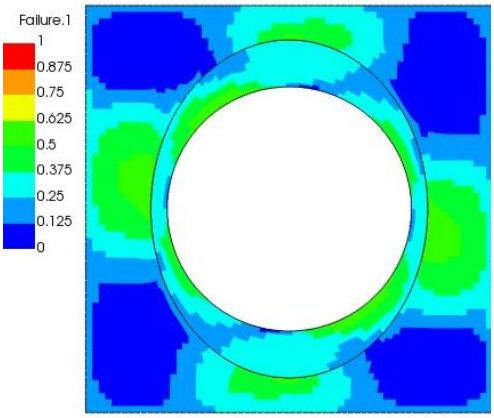
Kesit görüntüsü

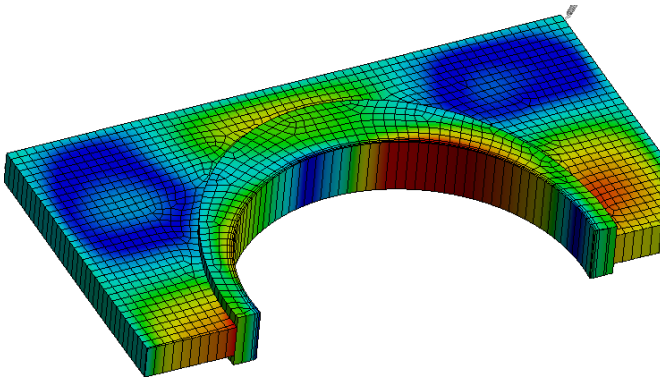


Kare birleşik yük altında
Hata Oranı: 0.61

Kesit görüntüsü



Elips birleşik yük altında
Hata Oranı: 0.59

Kesit görüntüsü

Şekil 8.9. Çekme/kayma yük oranı bir koşulu için hata oranın ve kesit görüntüleri

# 9. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışması ile kompozit malzeme tasarımcısına farklı yükleme koşuları altında güçlendirme metodu konusunda yol göstermek hedeflenmektedir. Bu kapsamda ilk olarak, $[0_{15}]$ dizilimli 12 numune ve $[45_{15}]$ dizilimli 6 numune olmak üzere toplamda 18 adet CFRP malzemeden numune ile çekme test deneyleri icra edilmiştir. Testler referans alınan standartlar, kullanılan malzemenin özellikleri, test düzenekleri ve numune üretim aşamaları Bölüm 3 ile sunulmuştur. Testlerden elde edilen sonuçlar ile sonlu elemanlar analiz sonuçlarının doğrulama çalışması yapılması amaçlanmış bu doğrultuda yürütülen sonlu elemanlar modelleme metodolojisi Bölüm 4 ile izah edilmiştir. Bölüm 5'te ise test sonuçlarından elde edilen çekme yüküne bağlı yer değiştirme eğrileri ve $[45_{15}]$ dizilimli numuneler için yürütülen DIC çalışması ve DIC yöntemi ile oluşturulan numune üzerlerindeki gerinim dağılımları sunulmuştur. Bölüm 6 ile test sonuç eğrileri ve gerinim dağılımları ile sonlu elemanlar modelleme doğrulaması gerçekleştirilmiştir. Oluşturulan sonlu eleman modelinin kullanılabilirliği gösterildikten sonra, kompozit malzemelerin dayanımı için en önemli referans modlardan birisi olan Tsai-Wu hata oranına bağlı dört farklı güçlendirme tasarımları için analizler yürütülmüştür. Güçlendirme modellerinin hacminin belirlenebilmesi adına da birleşik yükler altında hacme bağlı yakınma çalışması yürütülmüştür.

Çekme ve kayma olmak üzere iki farklı yalın yükleme altında farklı güçlendirmeye sahip modeller ile yürütülen analiz sonucu elde edilen Tsai-Wu hata oranı sonuçları incelendiğinde, belirli bir tasarımın her iki yükleme koşulu için ortak en ideal sonuca varılamamaktadır. Bu nedenle yükleme oranına bağlı takviye tipinin belirlenebilmesi için analiz çalışması ortaya koyulmuştur. Takviyesiz ve dört farklı güçlendirmeli model için yedi farklı çekme ve kayma yükü altında toplamda 35 analiz yürütülmüştür. Bu çalışmalar sonucunda kare güçlendirme tipinin birden küçük çekme/kayma yükü oranları için etkili bir tasarım olduğu söylenebilir. Çekme yükünün baskın olduğu yükleme durumlarında ise tüm güçlendirme tiplerinin hemen hemen benzer iyileşme gösterdiği görülmektedir. Çekme/kesme yükü oranı bir, iki ve üç için delik hacminin yüzde 38 oranındaki hacme denk gelen takviye parçası sayesinde güçlendirmesiz delikli model ile karşılaştırıldığında sırasıyla ortalama yüzde 65, yüzde 85 ve yüzde 98 oranında mukavemet artışı sağlanmıştır.

Hava uzay yapılarında kullanım eğilimli her geçen dönem daha da artmakta olan kompozit malzemeler için bozulma modlarına bağlı ağırlığı en az etkileyecek şekilde tasarım prensipleri ortaya koymak oldukça önemlidir. Bunu yaparken de tekil yüklemelerden ziyade ideal koşulda sistemin maruz kalacağı gibi farklı oranlardaki birleşik yükleme şartları mutlaka dikkate alınmalıdır.

# KAYNAKLAR


Akbarpour S. and Hallström S. (2019). Reinforcement around holes in composite materials by use of patched metal inserts. *Composite Structures*. 225, 111084

Alberdi A., Suárez A., Artaza T., Escobar-Palafox G. A. and Ridgway A. (2013). Composite Cutting with Abrasive Water Jet. *Procedia Engineering.* 63, 421–429.

*ANSYS Composite PrepPost User's Guide* (2016). Amerika Birleşik Devletleri: ANSYS, Inc.

ASTM D3039/D3039M-17. (2017). *Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials.* Amerika Birleşik Devletleri: ASTM International.

ASTM Standard D3518/D3518M – 94. (2001). *Standard test method for in-plane shear response of polymer matrix composite materials by tensile test of a ±45° laminate.* Amerika Birleşik Devletleri: Annual Book of ASTM Standards.

ASTM Standard D5766/D5766M-11. (2011). *Standard Test Method for Open-Hole Tensile Strength of Polymer Matrix Composite.* Amerika Birleşik Devletleri: ASTM International. 1–7.

Baykan B. M., Yolum U., Özaslan E., Güler M. A. and Yıldırım B. (2020). Failure Prediction of Composite Open Hole Tensile Test Specimens Using Bond Based Peridynamic Theory. *Procedia Structural Integrity.* 28, 2055-2064.

Botzkowski T., Galkin S., Wagner S., Sikora S.P. and Kärger L. (2016). Experimental and numerical analysis of bolt-loaded open-hole laminates reinforced by winded carbon rovings. *Composites Structures*. 141,194–202.

Brenken B., Barocio E., Favaloro A., Kunc V. and Pipes R. B. (2018). Fused filament fabrication of fiber-reinforced polymers: A review. *Additive Manufacturing.* 21, 1–16.

Camanho P. P. and Lambert M. (2006). A design methodology for mechanically fastened joints in laminated composite materials. *Composites Science and Technology*. 66, 3004–3020.

Caminero M. A., Lopez-Pedrosa M., Pinna C. and Soutis C. (2013). Damage monitoring and analysis of composite laminates with an open hole and adhesively bonded repairs using digital image correlation. *Composites: Part B*. 53, 76-91.

Chen X., Sun X., Chen P., Wang B., Gu J., Wang W., Chai Y. and Zhao Y. (2021). Rationalized improvement of Tsai–Wu failure criterion considering different failure modes of composite materials. *Composite Structure*. 256, 113120.

Cuartas V., Perrin M., Pastor M., Welemane H., Cantarel A. and Karama M. (2014). Determination of the elastic properties in CFRP composites: comparison of different approaches based on tensile tests and ultrasonic characterization. *Advances in Aircraft and Spacecraft Science*. 2, 249-260.

Duan S., Zhang Z., Wei K., Wang F. and Han Xu. (2020). Theoretical study and physical tests of circular hole-edge stress concentration in long glass fiber reinforced polypropylene composite. *Composite Structures.* 236, 111884.

Falcao O., Mayugo J. A., Lopes C. S., Gascons N. and Costa J. (2014). Variable-stiffness composite panels: defect tolerance under in-plane tensile loading. *Composite Part A: Applied Science and Manufacturing.* 63, 21–31.

Galletly G.D. and Muc A. (1988). Buckling of fibre-reinforced plastic-steel torispherical shells under external pressure. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers.* 202(C6), 409–20.

Grammatikos S. A., Kordatos E. Z., Matikas T. E. and Paipetis A. S. (2018). On the fatigue response of a bonded repaired aerospace composite using thermography. *Composite Structures.*188, 461-469.

Grammatikos S. A., Kordatos E. Z., Matikas T. E. and Paipetis A. S. (2014). Real-Time Debonding Monitoring of Composite Repaired Materials via Electrical, Acoustic, and Thermographic Methods. *Journal of Materials Engineering and Performance.* 23, 169–180.

Han X. P., Li L.X., Zhu X.P. and Yue Z. F. (2008). Experimental study on the stitching reinforcement of composite laminates with a circular hole. *Composites Science and Technology*. 68, 1649–1653.

Han K., Zhou W., Qina R., Wang G. and Maa L. (2020). Effects of carbon nanotubes on open-hole carbon fiber reinforced polymer composites. *Materials Today Communications*. 24, 101106.

Hashin Z. (1980). Failure criteria for unidirectional fiber composites. *Journal of Applied Mechanics.* 47, 329–34.

Humberto J., Bittrich L. and Spickenheuer A. (2020). Improving the open-hole tension characteristics with variable-axial composite laminates: Optimization, progressive damage modeling and experimental observations. *Composites Science and Technology*. 185, 107889.

Internet: HexPly8552 DataSheet. URL: https://www.hexcel.com/user_area/content_ media/raw/HexPly_8552_eu_DataSheet.pdf, Son Erişim Tarihi: 03.05.2023.

Jain L.K. and Mai Y.W. (1994). Analysis of stitched laminated ENF specimens for interlaminar mode fracture toughness. *International Journal of Fracture*. 68, 219–44.

Jin L., Zhang B., Chen F. and Du X. (2023). Dynamic contribution of CFRP strips to CFRP-strengthened RC shear walls. *International Journal of Mechanical Sciences.* 255, 108479.

Kumar D., Singh K. K. and Zitoune R. (2018). Impact of the carbon nanotube reinforcement in glass/epoxy polymeric nanocomposite on the quality of fiber laser drilling. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B-Journal of Engineering Manufacture.* 232, 2533–2546.

Marsh G. (2007). Airbus takes on Boeing with reinforced plastic A350 XWB. *Reinforced Plastics*; 51(11), 26–9.

Mattheij P., Gliesche K. and Feltin D. (2000). 3D reinforced stitched carbon/epoxy laminates made by tailored fibre placement. *Composite Part A: Applied Science and Manufacturing*. 31(6), 571–581.

Muc A. and Ulatowska A. (2010). Design of plates with curved fibre format. *Composite Structure*. 92, 1728–33.

Muc A. and Ulatowska A. (2012). Local fibre reinforcement of holes in composite multilayered plates. *Composites Structures*. 94, 1413–1419.

Orun A.E. and Guler M.A. (2017). Effect of hole reinforcement on the buckling behavior of thin-walled beams subjected to combined loading. *Thin-Walled Structure*, 118, 12-22.

Peterson H. (1997). *Stress Concentration Factors* (İkinci Baskı). Amerika Birleşik Devletleri: John Wiley & Sons.

Prasad N.E., Gokhale A. and Wanhill R.J.H., (2013). *Aluminum - Lithium Alloys. Processing, Properties, and Applications* (Birinci Baskı). İngiltere: Butterworth-Heinemann.

Pyl L., Kalteremidou K. and Hemelrijck D. (2018). Exploration of the design freedom of 3D printed continuous fibre-reinforced polymers in open-hole tensile strength tests. *Composites Science and Technology*. 171, 135-151.

Qi S., Shia P., Yana S., Imran A., Liua D., Zhua Y. and Herrmannc A. S. (2020). Damage model based on gradient property method for simulating the tensile behavior of composite laminates with Variable Angle Tow reinforcement. *Structures*. 23, 152–163.

Rafieipour H., Setoodeh A. and Lau A-K-T. (2021). Mechanical and electromagnetic behavior of fabricated hybrid composite sandwich radome with a new optimized frequency-selective surface. *Composite Structure*. 273, 114256.

Sankey B.V. and Zhu H. (2000). The effect of stitching on the low-velocity impact response of delaminated composite beams. *Composites Science and Technology*. 60, 2681–91.

Shafighfard T., Demir E. and Yildiz M. (2019). Design of fiber-reinforced variable-stiffness composites for different open-hole geometries with fiber continuity and curvature constraints. *Composite Structure*. 226, 111280.

Taj Z., Bilal A., Awais M., Salamat S., Abbas M. and Maqsood A. (2023). Design exploration and optimization of aerodynamics and radar cross section for a fighter aircraft. *Aerospace Science and Technology*, 133, 108114.

Tosh M. V. and Kelly D. W. (2000) On the design, manufacture and testing of trajectorial fibre steering for carbon fibre composite laminates. *Composite Part A: Applied Science and Manufacturing*. 31(10), 1047–1060.

Tsai, S. W. (1992). *Theory of Composites Design*. Amerika Birleşik Devletleri: Think Composites.

Warren K. C., Lopez-Anido R. A., Goering J. (2015). Behavior of three-dimensional woven carbon composites in single-bolt bearing. *Composite Structures.* 127, 175–84.

Zappino E., Filippi M., Pagani A., Petiti M. and Carrera E. (2020). Experimental and numerical analysis of 3D printed open-hole plates reinforced with carbon fibers. *Composites Part C: Open Access*. 2, 100007.

Zhu Y., Qin Y., Qi S., Xu H., Liu D. and Yan C. (2018). Variable Angle Tow reinforcement design for locally reinforcing an open-hole composite plate. *Composites Structures*. 202, 162–169.



*Gazili olmak ayrıcalıktır*