

**T.C.  
MANİSA CELAL BAYAR ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI  
KONSTRÜKSİYON ve İMALAT BİLİM DALI**

**KOMPOZİT MALZEMELERDE HASAR ELEMINASYONU VE  
MEKANİK ÖZELLİKLERİN İNCELENMESİ**

**Mümin KILINÇ**

**Danışman  
Dr. Öğr. Üyesi HALİT DOĞAN**



**MANİSA-2019**

## TEZ ONAYI

**Mümin KILINÇ** tarafından hazırlanan "**Kompozit Malzemelerde Hasar Eliminasyonu ve Mekanik Özelliklerin İncelenmesi**" adlı tez çalışması 12/06/2019 tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri önünde Manisa Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Konstrüksiyon ve İmalat Bilim Dalı**'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak başarı ile savunulmuştur.

**Danışman**

**Dr. Öğr. Üyesi Halit DOĞAN**

Manisa Celal Bayar Üniversitesi

**Jüri Üyesi**

**Dr. Öğr. Üyesi Mustafa KARAMOLLA**

Manisa Celal Bayar Üniversitesi

**Jüri Üyesi**

**Doç. Dr. FetHullah GÜNEŞ**

İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi

## **TAAHHÜTNAME**

Bu tezin Manisa Celal Bayar Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde, akademik ve etik kurallara uygun olarak yazıldığını ve kullanılan tüm literatür bilgilerinin referans gösterilerek tezde yer aldığını beyan ederim.

**Mümin KILINÇ**



## İÇİNDEKİLER

	<b>Sayfa</b>
İÇİNDEKİLER .....	I
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	VI
TABLO DİZİNİ .....	X
TEŞEKKÜR.....	XII
ÖZET .....	XIII
ABSTRACT .....	XIV
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Araştırmalar .....	2
2. GENEL BİLGİLER.....	10
2.1. Kompozit Malzemeler.....	10
2.1.1. Tarihçe.....	10
2.1.2. Kompozit Malzemelerin Avantajları.....	11
2.1.3. Kompozit Malzemelerin Dezavantajları .....	12
2.1.4. Kompozit Malzemelerin Yapıları .....	12
2.1.5. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması.....	12
2.1.6. Matris Yapılarına Göre;.....	13
2.1.6.1. Metal Matrisli Kompozitler .....	14
2.1.6.2. Seramik Matrisli Kompozitler .....	14
2.1.6.3. Polimer Matrisli Kompozitler .....	15
2.1.7. Takviye Elemanının Şekil ve Yerleşimine Göre; .....	15
2.1.7.1. Elyafli Kompozitler .....	16
2.1.7.2. Parçacıklı Kompozitler .....	16
2.1.7.3. Tabakalı Kompozitler .....	17
2.1.7.4. Karma (Hibrit) Kompozitler .....	18
2.2. Hasar Tipleri .....	18
2.2.1. Yüzey Hasarı.....	18
2.2.2. Tabaka Hasarı .....	19

2.2.3. Matris Hasarı.....	20
2.2.4. Bağlantı Deleminasyonu .....	21
2.2.5. Elyaf Hasarı .....	23
2.3. Onarım Amaçları.....	23
2.3.1. Yorulma İyileştirilmesi.....	24
2.3.2. Çatlağın Yamalanması .....	24
2.3.3. Korozyonun Onarılması .....	24
2.4. Onarım Aşamaları .....	25
2.4.1. Yapısal Tespit .....	26
2.4.2. Onarım Tasarımı .....	26
2.4.3. Onarım Malzemesi Seçimi .....	27
2.4.4. Yapıştırıcı Seçimi.....	28
2.5. Onarım Metodları.....	28
2.5.1. Koruyucu Bant Metodu.....	28
2.5.2. Reçine ile Kapatma (Tıkama) Metodu.....	29
2.5.3. Doldurma Onarımı Metodu .....	29
2.5.4. Civatalanmış Çiftler ile Mekanik Onarım .....	30
2.5.5. Oda Sıcaklığında El Yatırması Metodu.....	31
2.5.6. Yüksek Sıcaklıklarda El Yatırması Metodu.....	32
2.5.7. Pre-Preg Onarımı .....	32
2.5.8. Dolgu ve Basamaklı Yama Onarımı .....	32
2.5.8.1. Dolgu Yama Onarımı .....	32
2.5.8.2. Basamaklı Yama Onarımı.....	33
2.6. Onarım İşlemini Etkileyen Faktörler.....	34
2.6.1. Yama Bindirme Uzunluğu.....	34
2.6.2. Yama Kalınlığı.....	34
2.6.3. Yüzey Hazırlama.....	35

2.6.4. Yama Malzemesinin Seçimi .....	35
2.6.5. Yapıştırıcı Etkisi .....	36
3. MATERYAL VE YÖNTEMLER.....	38
3.1. Materyal.....	38
3.2. Yöntemler .....	42
3.2.1. Çekme Deneyi.....	43
3.2.2. Üç Nokta Eğme Deneyi.....	45
3.2.3. Charpy Darbe Testi .....	46
3.2.4. Scanning Electron Microscope (SEM).....	49
3.3. Deney Numunelerinin Hazırlanışı .....	51
4. DENEYSEL VERİLER.....	54
4.1. Hasarsız (Dolu Numune) ve Hasarlı (Kanallı Numune) Malzeme Deney Sonuçları.....	54
4.1.1. Charpy Darbe Deney Sonuçları .....	54
4.1.2. Çekme Deney Sonuçları.....	54
4.1.2.1. Hasarsız (Dolu) Numune Çekme Deneyi .....	54
4.1.2.2. Hasarlı (Kanallı) Numune Çekme Deneyi.....	55
4.1.3. Eğme Deney Sonuçları.....	56
4.1.3.1. Hasarsız (Dolu) Numune Deneyi .....	56
4.1.3.2. Hasarlı (Kanallı) Numune Deneyi.....	57
4.1.3.3. Tıkama Metodunda Hasarlı (Kanallı) Numune Sonuçları.....	57
4.2. Yama Uygulanmış Numune Deney Sonuçları.....	58
4.2.1. Charpy Darbe Deney Sonuçları .....	58
4.2.2. Çekme Deney Sonuçları.....	59
4.2.2.1. Epoxy Yapıştırıcı ile Yama Sonrası Çekme Deneyi .....	59
4.2.2.1.1. 10x20 Basamaklı Yama .....	59
4.2.2.1.2. 10x30 Basamaklı Yama .....	60

4.2.2.1.3. 30° Dolgu Yama .....	61
4.2.2.1.4. 45° Dolgu Yama .....	62
4.2.2.1.5. 60° Dolgu Yama .....	62
4.2.2.2. Montage Klebstoff Yapıştırıcı ile Yama Sonrası Çekme Deneyi.....	63
4.2.2.2.1. 10x20 Basamaklı Yama .....	63
4.2.2.2.2. 10x30 Basamaklı Yama .....	64
4.2.2.2.3. 30° Dolgu Yama .....	65
4.2.2.2.4. 45° Dolgu Yama .....	66
4.2.2.2.5. 60° Dolgu Yama .....	66
4.2.3. Eğme Deney Sonuçları.....	67
4.2.3.1. Epoxy Yapıştırıcı ile Yama Sonrası Eğme Deneyi.....	67
4.2.3.1.1. 10x20 Basamaklı Yama .....	67
4.2.3.1.2. 10x30 Basamaklı Yama .....	68
4.2.3.1.3. 30° Dolgu Yama .....	69
4.2.3.1.4. 45° Dolgu Yama .....	69
4.2.3.1.5. 60° Dolgu Yama .....	70
4.2.3.2. Montage Klebstoff Yapıştırıcı ile Yama Sonrası Eğme Deneyi.....	71
4.2.3.2.1. 10x20 Basamaklı Yama .....	71
4.2.3.2.2. 10x30 Basamaklı Yama .....	71
4.2.3.2.3. 30° Dolgu Yama .....	72
4.2.3.2.4. 45° Dolgu Yama .....	73
4.2.3.2.5. 60° Dolgu Yama .....	74
4.2.3.2.6. Tıkama Metodunda Onarım .....	74
4.2.3.2.7. Tıkama+0,018 mm Al Bant Yama .....	75
4.2.3.2.8. Tıkama+0,050 mm Al Bant Yama .....	76
4.3. SEM Analizi .....	77

4.3.1. Ara Yüzey Görüntüleri;.....	77
4.3.2. Kırık Yüzey Görüntüleri.....	83
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	85
6. KAYNAKLAR.....	87
ÖZGEÇMİŞ .....	97





## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil.2.1. Kompozit Malzemenin İç Yapısı.....	12
Şekil.2.2. Matris yapılarına göre sınıflandırma.....	13
Şekil.2.3.a) Elyafli Kompozitler b) Parçacıklı Kompozitler c) Tabakalı Kompozitler d) Karma Kompozitler .....	15
Şekil.2.4. a) Kesikli Rasgele Yerleşim b) Sürekli Tek Yönlü c) Sürekli Düzlemsel İki Yönlü d) Sürekli Düzlemsel Üç Yönlü e) Üç Boyutlu (Oklar mekanik dayanımın iyi olduğu yönü gösterir).....	16
Şekil.2.5. Parçacık Takviyeli Kompozitler .....	17
Şekil.2.6. Tabakalı Kompozitler.....	18
Şekil.2.7. Başlıca hasarlar a) çatlama, b) aşınma, c) kabartı.....	19
Şekil.2.8. Tabaka çatlakları, kırılmalar, küçük delinmeler, delaminasyonlar a) kalınlık boyunca kısmi hasar, b) kalınlık boyunca hasar.....	20
Şekil.2.9. Matris Kırılması.....	21
Şekil.2.10. Matris Çatlakları .....	21
Şekil.2.11. Darbeye Bağlı Oluşan Delaminasyon .....	22
Şekil.2.12. Delaminasyon Alanlarının Elyaf Açıklarına Göre Şekilleri.....	22
Şekil.2.13. Darbe Uygulanan Yüzeğe Göre Hasar Yayılışı a) Cam Yüzeyden b) Aramid Yüzeyden.....	23
Şekil.2.14. Yapıştırırmalı Birleşimlerde Yorulma Hasar Biçimleri .....	24
Şekil.2.15. Korozyon Onarımı .....	25
Şekil.2.16. Koruyucu Bant Metodu.....	29
Şekil.2.17. Doldurma Onarımı Metodu .....	30
Şekil.2.18. a) Oluşan Hasar b) Dolgu Yama ile Onarımı c) Civatalı Çift ile Onarım...31	
Şekil.2.19. Dolgu yama ve dolgu açısı modelleri.....	33
Şekil.2.20. Basamaklı yama onarımı .....	34
Şekil.2.21. Deneylerde Kullanılacak Model .....	34
Şekil.3.1. Cam Elyafli Epoksi Fiber Üretimi .....	39
Şekil.3.2. İşlenmemiş Hammadde (Cam Elyafli Epoksi Fiber).....	39
Şekil.3.3. a) Montage Klebstoff b) epoxy transparent .....	40
Şekil.3.4. Shimadzu AG-IS ( 100 kN ) - (Çekme-Üç Nokta Eğme) .....	40
Şekil.3.5. Jeol JSM-6060 (SEM).....	41
Şekil.3.6. Polaran Range sc7620 (Sputter Coater) .....	41
Şekil.3.7. Dolu (Hasarsız) Çekme Deney Numunesi .....	44

Şekil.3.8. 10x20 Basamaklı Yama Çekme Deney Numunesi.....	44
Şekil.3.9. 10x30 Basamaklı Yama Çekme Deney Numunesi.....	44
Şekil.3.10. 30° Dolgu Yama Çekme Deney Numunesi.....	44
Şekil.3.11. 45° Dolgu Yama Çekme Deney Numunesi.....	44
Şekil.3.12. 60° Dolgu Yama Çekme Deney Numunesi.....	44
Şekil.3.13. Dolu (Hasarsız) Üç Nokta Eğme Deney Numunesi.....	45
Şekil.3.14. 10x20 Basamaklı Yama Üç Nokta Eğme Deney Numunesi .....	45
Şekil.3.15. 10x30 Basamaklı Yama Üç Nokta Eğme Deney Numunesi .....	45
Şekil.3.16. 30° Dolgu Yama Üç Nokta Eğme Deney Numunesi.....	45
Şekil.3.17. 45° Dolgu Yama Üç Nokta Eğme Deney Numunesi.....	46
Şekil.3.18. 60° Dolgu Yama Üç Nokta Eğme Deney Numunesi.....	46
Şekil.3.19. Kapatma Metodu Eğme Deney Numunesi.....	46
Şekil.3.20. Kapatma Metodu ve Al Bant Eğme Deney Numunesi .....	46
Şekil.3.21. a ) Charpy Darbe Deneyi b ) İzod Darbe Deneyi.....	47
Şekil.3.22. Dolu (Hasarsız) Charpy Darbe Deney Numunesi.....	47
Şekil.3.23. 10x20 Basamaklı Yama Charpy Darbe Deney Numunesi .....	47
Şekil.3.24. 10x30 Basamaklı Yama Charpy Darbe Deney Numunesi .....	47
Şekil.3.25. 30° Dolgu Yama Charpy Darbe Deney Numunesi.....	48
Şekil.3.26. 45° Dolgu Yama Charpy Darbe Deney Numunesi.....	48
Şekil.3.27. 60° Dolgu Yama Charpy Darbe Deney Numunesi.....	48
Şekil.3.28. Kapatma Metodu Charpy Darbe Deney Numunesi .....	48
Şekil.3.29. Kapatma Metodu ve Al Bant Charpy Darbe Deney Numunesi.....	48
Şekil.3.30. Numunelerin Kaplama Cihazına Yerleşimi.....	49
Şekil.3.31. a) Kaplama Öncesi b) Kaplama Sonrası.....	50
Şekil.3.32. SEM Cihazına Numune Yerleşimi.....	50
Şekil.3.33. CNC Freze ile Numunelerin Hazırlanması.....	51
Şekil. 3.34. CNC Freze ile Numunelerin Hazırlanması.....	51
Şekil.3.35. Talaşlı İmalat Sonrası Numune ve Yama.....	52
Şekil.3.36. Numune ile Yamanın Birleşimi .....	52
Şekil.3.37. Talaşlı İmalat Sonrası Numune ve Yama.....	52
Şekil.3.38. Numune ile Yamanın Birleşimi .....	53
Şekil.3.39. Talaşlı İmalat Sonrası Numune ve Yama.....	53
Şekil.3.40. Numune ile Yamanın Birleşimi .....	53
Şekil.4.1. Hasarsız (Dolu) Numune Çekme Deney Grafiği.....	55

<b>Şekil.4.2.</b> Hasarlı (Kanallı) Numune Çekme Deney Grafiği .....	55
<b>Şekil.4.3.</b> Hasarsız (Dolu) Numune Eğme Deney Grafiği.....	56
<b>Şekil.4.4.</b> Hasarlı (Kanallı) Numune Eğme Deney Grafiği .....	57
<b>Şekil.4.5.</b> Tıkama Metodu Hasarlı (Kanallı) Numune Eğme Deney Grafiği.....	58
<b>Şekil.4.6.</b> 10x20 Basamaklı Yama Epoxy Numunesi Çekme Deney Grafiği.....	60
<b>Şekil.4.7.</b> 10x30 Basamaklı Yama Epoxy Numunesi Çekme Deney Grafiği.....	61
<b>Şekil.4.8.</b> 30° Dolgu Yama Epoxy Numunesi Çekme Deney Grafiği.....	61
<b>Şekil.4.9.</b> 45° Dolgu Yama Epoxy Numunesi Çekme Deney Grafiği.....	62
<b>Şekil.4.10.</b> 60° Dolgu Yama Epoxy Numunesi Çekme Deney Grafiği.....	63
<b>Şekil.4.11.</b> 10x20 Basamaklı Yama Montage Klebbstoff Numunesi Çekme Deney Grafiği .....	64
<b>Şekil.4.12.</b> 10x30 Basamaklı Yama Montage Klebbstoff Numunesi Çekme Deney Grafiği .....	65
<b>Şekil.4.13.</b> 30° Dolgu Yama Montage Klebbstoff Numunesi Çekme Deney Grafiği.....	65
<b>Şekil.4.14.</b> 45° Dolgu Yama Montage Klebbstoff Numunesi Çekme Deney Grafiği.....	66
<b>Şekil.4.15.</b> 60° Dolgu Yama Montage Klebbstoff Numunesi Çekme Deney Grafiği.....	67
<b>Şekil.4.16.</b> 10x20 Basamaklı Yama Epoxy Numunesi Eğme Deney Grafiği.....	68
<b>Şekil.4.17.</b> 10x30 Basamaklı Yama Epoxy Numunesi Eğme Deney Grafiği.....	68
<b>Şekil.4.18.</b> 30° Dolgu Yama Epoxy Numunesi Eğme Deney Grafiği.....	69
<b>Şekil.4.19.</b> 45° Dolgu Yama Epoxy Numunesi Eğme Deney Grafiği.....	70
<b>Şekil.4.20.</b> 60° Dolgu Yama Epoxy Numunesi Eğme Deney Grafiği.....	70
<b>Şekil.4.21.</b> 10x20 Basamaklı Yama Montage Klebbstoff Numunesi Eğme Deney Grafiği .....	71
<b>Şekil.4.22.</b> 10x30 Basamaklı Yama Montage Klebbstoff Numunesi Eğme Deney Grafiği .....	72
<b>Şekil.4.23.</b> 30° Dolgu Yama Montage Klebbstoff Numunesi Eğme Deney Grafiği.....	73
<b>Şekil.4.24.</b> 45° Dolgu Yama Montage Klebbstoff Numunesi Eğme Deney Grafiği.....	73
<b>Şekil.4.25.</b> 60° Dolgu Yama Montage Klebbstoff Numunesi Eğme Deney Grafiği.....	74
<b>Şekil.4.26.</b> Tıkama Yama Montage Klebbstoff Numunesi Eğme Deney Grafiği.....	75
<b>Şekil.4.27.</b> Tıkama+0.018 mm Al Bant Yama Montage Klebbstoff Numunesi Eğme Deney Grafiği .....	76
<b>Şekil.4.28.</b> Tıkama+0.050 mm Al Bant Yama Montage Klebbstoff Numunesi Eğme Deney Grafiği .....	77
<b>Şekil.4.29.</b> Montage Klebbstoff Yapıştırıcı Ara Yüzey.....	78

<b>Şekil.4.30.</b> Montage Klebstoff Yapıştırıcı Ara Yüzey.....	78
<b>Şekil.4.31.</b> Montage Klebstoff Yapıştırıcı Ara Yüzey.....	79
<b>Şekil.4.32.</b> Montage Klebstoff Yapıştırıcı Ara Yüzey.....	79
<b>Şekil.4.33.</b> Montage Klebstoff Yapıştırıcı Ara Yüzey.....	80
<b>Şekil.4.34.</b> Epoxy Yapıştırıcı Ara Yüzey.....	80
<b>Şekil.4.35.</b> Epoxy Yapıştırıcı Ara Yüzey.....	81
<b>Şekil.4.36.</b> Epoxy Yapıştırıcı Ara Yüzey.....	81
<b>Şekil.4.37.</b> Epoxy Yapıştırıcı Ara Yüzey.....	82
<b>Şekil.4.38.</b> Epoxy Yapıştırıcı Ara Yüzey.....	82
<b>Şekil.4.39.</b> Çekme Deneyi Kırık Yüzey Görüntüsü .....	83
<b>Şekil.4.40.</b> Charpy Darbe Deneyi Kırık Yüzey Görüntüsü.....	83
<b>Şekil.4.41.</b> Eğme Deneyi Kırık Yüzey Görüntüsü .....	84

## TABLO DİZİNİ

<b>Tablo.3.1.</b> Cam Elyafı Epoksi Fiber Özellikleri .....	38
<b>Tablo.3.2.</b> Çekme Deney Tablosu.....	42
<b>Tablo.3.3.</b> Üç Nokta Eğme Deney Tablosu.....	42
<b>Tablo.3.4.</b> Charpy Darbe Deneyi Tablosu .....	43
<b>Tablo.4.1.</b> Hasarsız (Dolu) Numune Çekme Deney Tablosu .....	54
<b>Tablo.4.2.</b> Hasarlı (Kanallı) Numune Çekme Deney Tablosu.....	55
<b>Tablo.4.3.</b> Hasarsız (Dolu) Numune Eğme Deney Tablosu .....	56
<b>Tablo.4.4.</b> Hasarlı (Kanallı) Numune Eğme Deney Tablosu .....	57
<b>Tablo.4.5.</b> Tıkama Metodu Hasarlı (Kanallı) Numune Eğme Deney Tablosu.....	57
<b>Tablo.4.6.</b> Onarılmış Numune Charpy Deney Sonuç Tablosu .....	59
<b>Tablo.4.7.</b> 10x20 Basamaklı Yama Epoxy Numunesi Çekme Deney Tablosu .....	60
<b>Tablo.4.8.</b> 10x30 Basamaklı Yama Epoxy Numunesi Çekme Deney Tablosu .....	60
<b>Tablo.4.9.</b> 30° Dolgu Yama Epoxy Numunesi Çekme Deney Tablosu .....	61
<b>Tablo.4.10.</b> 45° Dolgu Yama Epoxy Numunesi Çekme Deney Tablosu .....	62
<b>Tablo.4.11.</b> 60° Dolgu Yama Epoxy Numunesi Çekme Deney Tablosu .....	62
<b>Tablo.4.12.</b> 10x20 Basamaklı Yama Montage Klebbstoff Numunesi Çekme Deney Tablosu .....	63
<b>Tablo.4.13.</b> 10x30 Basamaklı Yama Montage Klebbstoff Numunesi Çekme Deney Tablosu .....	64
<b>Tablo.4.14.</b> 30° Dolgu Yama Montage Klebbstoff Numunesi Çekme Deney Tablosu .....	65
<b>Tablo.4.15.</b> 45° Dolgu Yama Montage Klebbstoff Numunesi Çekme Deney Tablosu .....	66
<b>Tablo.4.16.</b> 60° Dolgu Yama Montage Klebbstoff Numunesi Çekme Deney Tablosu .....	66
<b>Tablo.4.17.</b> 10x20 Basamaklı Yama Epoxy Numunesi Eğme Deney Tablosu .....	67
<b>Tablo.4.18.</b> 10x30 Basamaklı Yama Epoxy Numunesi Eğme Deney Tablosu .....	68
<b>Tablo.4.19.</b> 30° Dolgu Yama Epoxy Numunesi Eğme Deney Tablosu .....	69
<b>Tablo.4.20.</b> 45° Dolgu Yama Epoxy Numunesi Eğme Deney Tablosu .....	69
<b>Tablo.4.21.</b> 60° Dolgu Yama Epoxy Numunesi Eğme Deney Tablosu .....	70
<b>Tablo.4.22.</b> 10x20 Basamaklı Yama Montage Klebbstoff Numunesi Eğme Deney Tablosu .....	71

<b>Tablo.4.23.</b> 10x30 Basamaklı Yama Montage Klebstoff Numunesi Eğme Deney Tablosu .....	72
<b>Tablo.4.24.</b> 30° Dolgu Yama Montage Klebstoff Numunesi Eğme Deney Tablosu .....	72
<b>Tablo.4.25.</b> 45° Dolgu Yama Montage Klebstoff Numunesi Eğme Deney Tablosu .....	73
<b>Tablo.4.26.</b> 60° Dolgu Yama Montage Klebstoff Numunesi Eğme Deney Tablosu .....	74
<b>Tablo.4.27.</b> Tıkama Yama Montage Klebstoff Numunesi Eğme Deney Tablosu ...	74
<b>Tablo.4.28.</b> Tıkama+0.018 mm Al Bant Yama Montage Klebstoff Numunesi Eğme Deney Tablosu .....	75
<b>Tablo.4.29.</b> Tıkama+0.050 mm Al Bant Yama Montage Klebstoff Numunesi Eğme Deney Tablosu .....	76

## TEŞEKKÜR

Çalışmamın her aşamasında bana destek olan, bilgi ve deneyimleri ile yol gösteren danışman hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi HALİT DOĞAN' a, yüksek lisans eğitimim sırasında desteği ve çalışmalarım konusunda gerekli imkânı veren SKP Makine ve Kalıp ailesine, öğrenim hayatım boyunca beni maddi ve manevi olarak destekleyen ve daima yanımda olan aileme, çalışmam boyunca hep yanımda yer alan eşim Gizem Kılınç'a yürekten teşekkür ederim.

Mümin KILINÇ  
Manisa, 2019



## ÖZET

### Yüksek Lisans Tezi

### Kompozit Malzemelerde Hasar Eliminasyonu ve Mekanik Özelliklerin İncelenmesi

Mümin KILINÇ

Manisa Celal Bayar Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Konstrüksiyon ve İmalat Bilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Halit DOĞAN

Bu çalışmanın kapsamı; kompozit malzemelerde oluşan hasarlar sonrasında uygulanan onarım metodlarına yöneliktir. Kompozit malzemelerde oluşan hasarlar, yüzey hasarı, tabaka hasarı, bağlantı delaminasyonudur. Oluşan bu hasarları onarmak için farklı metodlar uygulanır. Bunlardan bazıları, koruyucu bant metodu, reçine ile tıkkama metodu, doldurma onarım metodu, oda sıcaklığında el yatırması metodu, Pre-Preg metodu, dolgu ve basamaklı yama metodudur.

Gerçekleştirilen çalışmada cam elyaf epoksi kompozit malzeme üzerine uygulanan onarım metodlarının birbiri ile karşılaştırılması deneysel olarak gerçekleştirilmiştir. Bu karşılaştırma, reçine ile kapatma metodunda reçineyle onarılacak deneyler yapılmış ve sonra reçinelerin üzerine 0.018 mm ve 0.050 mm Al folyo yapıştırılarak yapılmıştır. Dolgu yama metodunda dolgu açısı üzerinden gözlemler yapılmış ve 30<sup>0</sup>,45<sup>0</sup>,60<sup>0</sup> lik açılarla yama gerçekleştirilip performansları takip edilmiştir. Basamaklı yama metodunda ise iki kademeli basamak oluşturularak, ilk deneyde bu basamak yüzeyleri 5 mm ikincisinde 10 mm olarak işlem görmüştür. Bahsi geçen yamalarda iki farklı tipte yapıştırıcı kullanılmış ve yapıştırıcı performansları da karşılaştırılmıştır.

Onarımı yapılmış malzemelerde çekme, 3 nokta eğme ve çentik darbe deneyleri uygulanmıştır. Deney sonuçları incelendiğinde Al bant uygulamasının sızdırmazlık dışında etkili olmadığı belirlenmiştir. Genel olarak tüm verilerin ortak bir şekilde değerlendirilmesi sonucunda onarım tipi olarak, çekme ve darbe kuvvetlerinde basamaklı yama, eğme kuvvetinde ise dolgu yama metodu uygulanmasının en uygun tercihler olduğu belirlenmiştir. Epoxy yapıştırıcı ile yapılan onarımlar daha fazla dayanım göstermişlerdir.

**Anahtar Kelimeler: Kompozitlerde Hasar, Mekanik Özellikler, Onarım Metodları, Kompozit Yama, Yapıştırıcı Etkisi**

2019, 114 sayfa



## **ABSTRACT**

**M.Sc. Thesis**

### **Elimination of Damage in Composite Materials and Examination of The Mechanical Properties**

**Mümin KILINÇ**

**Manisa Celal Bayar University  
Graduate School of Applied and Natural Sciences  
Department of Construction and Manufacturing**

**Supervisor: Assist. Prof. Dr. Halit DOĞAN**

The scope of this study; is used for the repair methods applied after the damages on the composite materials. Damage to composite materials are surface damage, layer damage, connection delamination. Different methods applies to repair these damages. Some of these methods are protective band method, with the resin filling method, filling repair method, hand lay-up method at room temperature, Pre-Preg method, fill and step patch method.

In this study, the comparison of the repair methods applied on glass fiber epoxy composite material was carried out experimentally. This comparison was carried out by resin-repairing with resin capping method and then made of 0.018 mm and 0.050 mm Al foil on the resins In the filling patch method, observations were made over the filling angle and 30°,45°,60° angles of the patch were performed and their performances were monitored. In the cascading patch method, two-stage steps were created, and in the first experiment, these step surfaces were treated as 10 mm in the second 5 mm. Two different types of adhesives were used in these patches and adhesive performances were compared.

In the repaired materials, tensile, 3 point bending and notch impact tests were applied. When the results of the experiment were examined, it was determined that Al coating was not effective except for sealing. In general, as a result of the joint evaluation of all data, it has been determined that it is best to apply a cascading patch in the tensile and impact forces and a filling patch method in the bending force. Repairs made with epoxy adhesive have shown more resistance.

**Keywords: Damage in Composites, Mechanical Properties, Repair Methods, Composite Patch, Adhesive Effect**

**2019, 114 pages**

## 1. GİRİŞ

20. yüzyılın ikinci yarısından sonra teknolojik ilerlemenin hızlanması ile birlikte, sanayide ana hammadde olarak ihtiyaç duyulan malzemeler ve bu malzemelerdeki gelişmelerin de giderek hızlanmasını sağlamıştır. Bunun sonucunda yeryüzünde sınırlı olarak bulunan ana malzemelerden dolayı, bu malzemeler ve bunların sahip oldukları özellikler teknolojinin gelişim hızına yeteri kadar uyum sağlayamamıştır. Yakın geçmişte yapımına başlanılan uzay araçlarındaki ihtiyaçları karşılayabilmek için, bilim insanları günümüzdeki gelişmelerle birlikte var olan malzemelerin özelliklerinden, bilimin ilerlemesine bağlı olarak günün gerekli şartlarını karşılayacak biçimde teknik ve ekonomik yönden daha cazip olan malzemeler bulma ve üretme yolunu seçmişlerdir [1].

Bundan dolayı ekonomiklik, yüksek mukavemetlilik ve hafiflik gibi özelliklerin tümünü içinde barındıran malzemelerin oluşumu için yapılan çalışmalar hızlandırılarak, ortaya çıkan ihtiyacın karşılanması adına hızlı bir süreç içine girilmiştir. Bu süreç içerisinde malzemeyi oluşturan bileşenler, farklı özellikleri olan kombinasyonlar oluşturularak ortaya çıkarılmıştır. Yapılan çalışmalar ile birlikte kompozit malzemelerin önemi artmıştır [1].

Günümüzde uçak ve uzay sektörü gibi ağırlığın önemli bir kriter olduğu ve bu konuda hassas olan dallarda, yüksek Mukavemet/Ağırlık, Rijitlik (katılık)/Ağırlık oranlarına sahip olmasından dolayı fiber takviyeli reçine kompozitler kullanılmaktadır. Çok yakın tarihe kadar yapımında sac ve tahta kullanılan tekneler, yatlar artık polyester-cam elyaf vb. kompozit malzemelerden yapılmaktadırlar. Bunun en belirgin özelliklerinden biri de bakım-onarım açısından kompozit malzemelerin daha avantajlı olmasıdır. Kompozit malzemedeki tekneler aynı zamanda daha hafif ve buna bağlı olarak süratlidir. Kullanım ömrü ise daha uzundur. Bahsedilen bu sebepler tekne ve yatlarda kompozit malzeme tercih edilmesinde başlıca rol almaktadır. Artık günümüzde bu ve buna benzer birçok avantajlardan dolayı imalat sanayisinde birçok parça yapımında kompozit malzeme kullanılmaktadır [1].

Gerçekleştirilen bu çalışmada farklı onarım metodları arasındaki mekanik özellikler incelenmiş, metodlar arası karşılaştırma yapılmış ve birbirlerine karşı mekanik olarak üstünlükleri belirlenmiştir. Hasarlı cam elyaf epoksi kompozit malzemedeki yüksek dayanım elde edilen ve buna uygun olan onarım metodunu seçmek.

Seçilen bu metot sayesinde onarım sonrasında ortaya bir problem çıkma riskinin azalması, onarım ömrünün yüksek dayanım ile birlikte uzaması da yapılan çalışmadan beklenen yararlar içerisinde yer almaktadır.

### **1.1. Araştırmalar**

Rao ve ark. (1999) tek kenarında çatlak oluşumu bulunan alüminyum kompozit malzemelerde [2], Goertzen ve Kessler (2007) çelik takviyeli borularda oluşan hasarların onarım işleminde [3], Soutis ve ark. (1999) ise delikli yapıda olan karbon/epoksi prepreg kompozit levhalarda onarım işlemi için yapıştırıcı kullanımında epoksi yapıştırıcıyı tercih etmişlerdir [4].

Sayman (2005) simetrik ve anti-simetrik yapıda sıralanmış olan kalın ve ince fiber takviyeli tabakalı kompozit malzemelerde, düzlem şekil değiştirme koşullarında hygrothermal yüklemeye etkisinde gerilme dağılımında oluşan değişimi incelemiştir. Termal yüklemeye sıcaklık dağılımını parabolik ve düzgün olarak kullanmıştır [5].

Aktaş ve Karakuzu (2008) kompozit malzemelerin mekanik özelliklerinin sıcaklık ile değişkenliği konusunda çalışmışlardır. Kullanmış oldukları kompozit malzeme cam-elyaf takviye ile güçlendirilmiş ve çalışma esnasında farklı sıcaklıklarda deneyler gerçekleştirmişlerdir. Deneyler sonucunda yüksek sıcaklıkların kompozit malzemelerde mekanik özellikleri zayıflattığını tespit etmişlerdir [6].

Topçu vd (2007) cam-elyaf takviyeli kompozit malzemelerde farklı yapıdaki kelebek bağlantıları ile yapılan birleştirmelerin yorulma ve çekme deneylerini gerçekleştirirken [7], Karakuzu vd (2008) yine aynı yapıdaki kompozit malzemelerin birleştirme işleminde kullanılan pim bağlantılarının, parametrelerdeki değişikliğe bağlı olarak görülen gerilme ve deplasman dağılımının pim deliği etrafındaki yapısını incelemiştir [8, 9].

Camanho ve Lambert (2006) mekanik bir şekilde bağlanan birleştirmelerin tabakalı kompozit malzemelerdeki hasar modu, son hasar ve hasar başlangıcını tespit edebilmek için yeni bir on hasar ve hasar başlangıcını tespit edebilmek için yeni bir yöntem üzerinde çalışmışlardır. Tabakalarda oluşan gerilme dağılımını tek tek nümerik veya yarı analitik metotlar ile belirlemişlerdir. Birleştirme işleminin elastik limitini saptayabilmek için gerilme dağılımını ve kat kuvvetlerini kullanmışlardır.

Hasar modu ve son hasarı ortalama veya nokta gerilme modellerini uygulayarak elde etmişlerdir [10].

Xiao (2003) gerçekleştirdiği çalışmada, tekli ve çiftli yapılan mekanik birleştirilen kompozit malzemelerin davranışlarını deneysel olarak incelemiştir. Statik olarak gerçekleştirdiği gerilme testi uygulanmasında, kırılma sürecini çözebilmek için yük-deplasman reaksiyonlarını ve akustik emisyon ölçümlerini gerçekleştirmiştir. Çoklu bağlanan birleştirmelerde, yükleme oranının non-lineer bir davranış gösterdiğini ispatlamıştır [11].

Kweon vd (2006) çiftli birleştirme yapılan alüminyum-kompozitin üç farklı tip birleştirmede hasar modlarını ve yüklerini incelemiştir. Bu birleştirme tipleri ise yapıştırıcı ile birleştirme, civata ile birleştirme ve civata-yapıştırıcı birleştirmedir. Civata ile yapılan birleştirme mukavemetinin yapıştırıcı ile yapılandan daha düşük olduğunu belirlemiştir. Tek başına yapıştırıcı kullanılan birleştirme mekanik birleştirme ile yapılan birleştirmeden daha zayıf olduğundan hibrit birleştirmenin mukavemetini arttırdığını tespit etmişlerdir [12].

Adams ve Comyn (2000) yapıştırıcı ile yapılan birleştirme işlemlerinin başarılı bir şekilde gerçekleşmesi için mühim olan etkenlerin neler olduğunu araştırmışlardır. Gelişmiş yapıştırıcıların kuvvetli bir bağlantı oluşturduğunu, fakat bunun için iyi bir yüzey temizleme işlemi yapılması gerektiğini belirtmişlerdir [13].

Kinloch (1997) mühendislik alanında uygulanan yapıştırma işlemi ile yapılan birleştirmelerin diğer birleştirme metodlarına göre olumlu yönlerinin daha fazla olduğunu belirten bir çalışma gerçekleştirmiştir. Bu çalışmada yapıştırma ile yapılan birleştirmelerin uygulama alanlarını, ortaya çıkan hasarları araştırmıştır. Buna ek olarak gelişen kırılma mekaniği ile yapıştırma uygulamasının önemini arttığını ve mühendislik yöntemleri ile birleştirme bağlantılarının esas yönlerinin açıklanabileceğini belirtmiştir [14].

Hojjati vd (2004) FM73 yapıştırıcının viskoelastik yönlerini belirlemeye yönelik bir çalışma ortaya koymuşlardır. Bunun yanında yapıştırıcı için gerekli kürlenme sıcaklığının yapışmaya ve elastisite modülü üzerindeki etkilerini incelemiştir. Kürlenmenin rastgele yapılmaması gerekliliğini açıklamışlardır [15].

Baker ve Jones (1988) kompozit yama ile tamir edilen çatlak parçalar üzerine araştırmalar yapmışlardır. Bu araştırmalar esnasında toplama, sonlu farklar ve sonlu elemanlar metotlarını kullanarak yapı analizlerini gerçekteştirmişlerdir. Çatlak yapıların birleştirilmesinde gerilme şiddet faktörünün mühim bir değişken olduğunu bulmuşlardır. Sonlu elemanlar metodunun diğer metotlara göre kırılma ve gerilmede daha doğru bir sonuç verdiğini belirtmişlerdir [16].

Seo ve Lee (2002) onarım işleminin uygulanan plakalarda yüzey boyunca düzgün olmayan çatlak ilerlemesi hakkında çalışmalar gerçekteştirmişlerdir. Onarımı yapılan levhalara uygulanan tekrarlı yük gibi gerçekte uygulamaların çatlak oluşturduğunu ve bu çatlağın yüzeyinde bir eğrilik bulunduğunu açıklamışlardır. Onarım işleminin için tek yönlü takviye edilmiş kompozit yama kullanmışlardır. Bunun yanında sonlu elemanlar metoduna bağlı çözümler yapmışlardır [17].

Toudeshky vd (2006), Toudeshky ve Mohammadi (2007) gerçekteştirmiş oldukları çalışmada, kompozit yama ile güçlendirilmiş olan içerisinde bileşik Mode'lu (Mode I + Mode II) bir halde çatlak bulunan alüminyum plakada oluşan gerilme şiddeti faktörünü ve yorulma çatlağının ilerlemesini incelemişlerdir [18].

Duong vd (2006) Kompozit yama uygulamalarında yorulma ömrü konusunda deneysel ve analitik olarak çalışmışlardır. Bu esnada ABD hava kuvvetlerine ait olan laboratuvarları kullanmışlardır. Alüminyum levha üzerine çift taraflı olacak şekilde birbirinden farklı geometrilerde kompozit yama uygulanmıştır. Tek yönlü olarak kompozit yama uygulandığında oryantasyon açısı sebebi ile oluşan ikinci eğilmenin ortadan kaldırılabilmesi için kompozit yamanın simetrik olarak yapılması gerekliliğini açıklamışlardır [19].

Sabelkin vd (2007) alüminyum levhada meydana gelmiş olan hasarın tek taraflı bir şekilde kompozit yama yapıştırılarak onarılması sonrasında içinde çatlak bulunan alüminyum levhada oluşan düzlem dışı yer değiştirme, şekil değiştirme, artık gerilme etkilerini ve kırılma mekaniği parametrelerinin değişkenliğini araştırmışlardır [20].

Ahn ve Springer (1998), hasarlı bir halde bulunan fiber takviyeli tabakalı kompozitlerin onarım işleminde uygulanan tekniklerin verimliliğini belirlemek amacıyla deneysel çalışmalar yapmışlardır. Gerçekteştirmiş oldukları çalışmada hasarlı malzeme ve yama malzemesi tipi, dolgu açısı, test sıcaklığı, yüzey işlemede

kullanılanın takımlar gibi parametreleri dikkate almışlardır. Farklı bir çalışmalarında ise dış yama ve dolgu yama tekniklerinde onarımı yapılmış olan hasarlı kompozit malzemelerin hasar yüklerinin tespiti için matematiksel modeller geliştirmişlerdir. Geliştirmiş oldukları bu formül ile deneysel veriler arasında yüksek bir uyum gözlemlenmiştir [21].

Tzetzis ve Hogg (2006-2008), vakum destekli infüzyon ile yapılan onarımlar üzerine çalışma gerçekleştirmişlerdir. Bu yöntemde karbon fiber kompozit malzeme kullanmışlar ve yapışma ara yüzey tokluğunun iyileştirilmesine yönelik araştırmalarda bulunmuşlardır. Yapışma tokluğunu belirlemek için; yama malzemesi ile ana malzeme arasına üretim sırasında teflon filimler yerleştirmişlerdir. Bu şekilde başlangıç çatlaklarını oluşturmuşlardır. Sonraki aşamada onarım uygulanan bölgeden ön çatlak içeren numuneler çıkarılmış ve tabakalar arasında kırılma tokluğunu incelemişlerdir. Buna ek olarak daha ince lifler kullanılarak oluşturulan perdenin yapışma tokluğuna etkisini araştırmışlardır. Ayrıca vakum destekli infüzyonun olumlu yönlerinden de çalışmalarında bahsetmişlerdir [22, 23].

Bleay ve diğer araştırmacılar (2001), kompozit malzemede bulunan fiberler koptuğunda hasarlı bölgede serbest şekilde bulunan reçine ve delikli fiberler sebebiyle ortaya çıkan delaminasyonlara karşı onarım işleminin uygulanmasında bir teknik geliştirmişlerdir [24].

Pang ve Bond (2005), fiber takviyeli kompozit malzemelerde “yayılma” (bleeding) isminde özel bir onarım şekli bulmuşlar ve geliştirmişlerdir. Yayılmanın mekanik dayanımı arttırdığını gözlemlemişler ve görünmeyen hasarlar için kullanmışlardır [25].

Odi ve Friend yakın zamanda kompozitlerin yapışma onarımı üzerine bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmalarında sonlu elemanlar modellerin karşılaştırmalı bir şekilde sunmuşlardır. Çalışmalarında, kompozitlerin onarım işlemi ve onarım şemalarının belirlenmesi için iyileştirilen analitik yöntemlere ihtiyaç olduğu vurgulanması nedeniyle yeniden araştırma yapmışlardır [26].

Gama ve arkadaşları (2003), dolgu yöntemi ile onarılmış olan kalın kesite sahip kompozit plakalardaki statik ve dinamik aksenal kuvvetler etkisindeki dayanımı incelemişlerdir. Dinamik kuvvetlerde aksenal hasarların dolgu açısı ve kuvvetin

uygulanma hızı ile bağlantılı olduğunu göstermişlerdir. Farklı malzemeler, dolgu açısı ve kuvvet uygulama koşulları altındaki akma/kırılma gerilme sonuçlarını tespit etmişlerdir [27].

Soutis ve Hu (1997) yama ile tamir edilmiş kompozit levhaların basma yükü altında mekanik davranışlarını incelemişlerdir. Kritik bağlantı parametrelerini belirlemek için çift tesirli bağlantı üzerinde lineer olamayan gerilme analizi uygulamışlardır. Yama uzunluğunu arttırmanın yapı ağırlığını arttırdığı ve gerilme yoğunlaşmalarına yol açtığını tespit etmişlerdir. Yamanın uç kısımlarında yama kalınlığının düşürülmesi ve yerel yapıştırıcı kalınlığı artışıyla hem soyulma hem de kesme gerilmelerinde gerilme yoğunlaşmasının düşürülebileceğini ifade etmişlerdir [28].

Tomita ve ark. (1997) yapmış oldukları çalışmada T300 ve T800H karbon–epoksi kompozitleri kullanmışlar ve çentik burulma hasar davranışları üzerine fiber mukavemet etkisini deneysel yöntemlerle incelemişlerdir. Üç-nokta yavaş eğilme ve hasar tokluğu testleri uygulamışlardır.  $0^0$  ve  $10^0$  arası fiber takviye açılı T300 ve T800H kompozitlerini kıyasladıklarında; T800H kompozitlerin daha yüksek hasar enerjisine sahip olduğunu görmüşlerdir. Bununla beraber kompozitlerin yavaş burulma ve charpy hasar enerjileri 22,50 ve üzeri derecelerde düştüğünü gözlemlenmiştir. Genel olarak T800H kompozitleri T300 kompozitlerine kıyasla hasar enerjisinde çok yüksek anizotropi özelliği sergilediği belirtilmiştir [29].

Tomita ve Tempaku (1997) epoksi reçineli tek yönlü karbon fiberlerle takviye edilmiş kompozit levhalarda fiber hacim oranının çekme hasar davranışı üzerine etkisini araştırmışlardır. Polycrylanitrile karbon fiberleri olan T300 ve T800H kullanılmıştır. Kullanılan numuneler 18 katmanlı levhalardır. Çentikli ve çentiksiz levhalarda fiberlere paralel yönde yük uygulanmıştır. T800H çentiksiz kompozitlerin en yüksek çekme hasar gerilmesi özelliği gösterdiğini tespit etmişler fakat anlamlı bir şekilde T300 çentikli numunelere kıyasla mukavemet oranının düştüğünü gözlemlenmişlerdir. Hasarların genelde yük yönüne paralel olduğunu söylemişlerdir [30].

Achour ve ark. (2003) yanal yarım daire çentikli kompozitlerin boron epoksi yama ile tamirini gerilme yığılmalarını azaltmaya yönelik çalışmışlardır. Yapıştırıcı özelliklerinin çentik uç kısımlarında gerilme yığılmaları üzerindeki etkileri

incelenmiştir. Yapıştırıcı özelliklerinin yama tamirinin performansını arttırmada büyük bir etken olduğu belirtilmiştir. Tamir edilmiş çentikli levhalarda yapıştırıcı kalınlığı ve yapıştırıcı kayma modülünün etkileri çalışılmıştır. Yüksek kaliteli yapıştırıcıların düşük kayma modülüne sahip olduğu, yapıştırıcı kayma modülünün yükselmesiyle gerilme yoğunluk faktörünün düştüğü yani yapıştırıcı kayma modülünün yükselmesinin, mukavemeti azaltıp bunun sonucunda yapışma hasarına sebep olduğu belirtilmiştir [31].

Campilho ve ark. (2005) yama ile tek ve çift yüzünden tamir edilen kompozit malzemelerin çekme yükü altındaki gerilme dağılımlarını, artık gerilmelerini ABAQUSE programını kullanarak sonlu elemanlar yöntemiyle incelemiştir. Direk olarak hasar mekaniği üzerine temellendirilmiş kohezif karışık-mod hasar modelini sonlu eleman yöntemi olarak seçmişlerdir. Numuneler karbon fiber kompozitlerdir. Yama kalınlığının, istifleme sırasının ve numune geometrilerinin mekanik davranışı çok fazla etkileyen parametreler oldukları belirtilmiştir. Yapışan/yapıştırıcı ve yapıştırıcı/yama parametreleri hasar modları için değerlendirilmiştir. Maksimum artık gerilmenin en uygun geometri seçimiyle sağlanacağı vurgulanmıştır [32].

Khojin ve ark. (2006) 6.125 mm boyutunda çentik içeren Al7075-T6 levhalarının tamir uygulanmamış tiplerini ve değişik geometrilere sahip dört tabakalı boron/epoksi kompozit yamayla tamir edilmiş tiplerini statik ve yorulma yükleri altında çalışmışlardır. Deneysel çalışmalara tamir etkinliğiyle alakalı yeni bir tanımlama yapmışlar ve tamir edilmiş yapının statik gerilme ve yorulma davranışları üzerine yama geometrisini deneysel olarak çalışmışlardır. Statik gerilme ve yorulma testlerinin birlikte incelenmesi sayesinde tamir edilmiş yapıların özellikleriyle alakalı yama geometrisinin etkilerine daha rahat ulaşılabileceğini söylemişlerdir [33].

Toudeshky (2006) tek tarafından tamir edilmiş alüminyum panellerde çatlak ön şeklinin çatlak ilerleyişi üzerine etkilerini incelemiştir. Deneysel ve sayısal sonuçlarla çatlak büyümesinin eşdeğer olmadığı ve çatlak ön şeklinin gerilme yoğunluk faktörü ve ilerleme oranı üzerine büyük bir etkisinin olduğu sonucuna varmışlardır [34].

Bouiadjra ve ark. (2007) çatlak yapıların çift tarafından tamirini sonlu eleman yöntemiyle çalışmışlar ve tek tarafından tamirle kıyaslamışlardır. Araştırmalarında çatlak ucundaki yoğunluk faktörünü esas almışlardır. Tabaka, yama ve yapıştırıcı



özelliklerinin çift yamaya etkileri üzerinde çalışmışlardır. Çift yamanın avantajını arttırabilmek ve yapıştırıcı hasarından uzak tutabilmek için uygun özellikte yapıştırıcı ve yama seçilmesi gerektiğini söylemişlerdir. Alüminyum levha ve boron epoksi yama kullanmışlardır. Yapıştırıcı kayma modülünün yapıştırıcı kalınlığına bağlı olarak faydalı etkiye sahip olacağı ve levha özelliklerinin (kalınlık ve kesme modülü) artışı çift yama kullanım avantajlarını düşüreceği söylenmiştir. Yapıştırıcı kalınlığı düşüşünün çift taraflı yamalarda avantaj olacağı düşük yapıştırıcı kalınlığının iyi gerilme transferi demek olduğu ve yapıştırıcı hasarı riskini arttırdığı vurgulanmıştır [35].

Tsouvalis ve ark. (2008) karbon/epoksi yamayla tamir edilmiş ortasında delik bulunan çelik levhaların verimliliğini statik çekme yükü altında araştırmışlardır. Yamalar tek tarafından elle yatırma konvensiyonel yöntemiyle yapıştırılmıştır. Yama işlemini yapmadan önce yüzey hazırlama metodları uygulanmış ve pürüzlülük ölçümleri yapılmıştır. Yamaların düşük katılık özelliklerine rağmen deney numunelerin lineer uzadığı, plastisiteye düzgün bir geçiş olduğu ve hasar yükü oranının %30 dan %50 ye yükseldiği sonucuna varmışlardır [36].

Ouinias ve ark. (2009) kompozit yamayla tamir edilmiş ince alüminyum levhaların çatlak ilerleme davranışlarını araştırmışlardır. Kenarında yarım daire çentik bulunan levhaların gerilme yoğunluğunu düşürmek için tamir işlemi uygulamıştır. Çatlak ucundaki gerilme yoğunluk faktörü değişimi üzerine yapıştırıcı ve yama boyutu etkileri irdelenmiştir [37].

Her ve Chao (2011) yama ile tamir edilmiş hasarlı kompozit levhaları çalışmışlardır. Levhanın yapışma bölgesindeki gerilme dağılımını çalışabilmek için özel bir yapıştırıcı geliştirmişlerdir. Yapıştırıcıyı desteklemek için levha ve yamaya düzenli elementler eklenmiştir. Hasarlı bölge delikle temsil edilmiştir. Tamir yeterliliği tamir öncesi ve sonrasındaki gerilme yoğunluğu faktörüyle değerlendirilmiştir. Yapıştırıcı ve yamanın malzeme özellikleri, boyutu ve kalınlığının gerilme dağılımı üzerindeki etkileri çalışılmıştır. Sayısal sonuçlara göre daha kalın yama daha fazla yük taşımış ve delik çevresinde daha az gerilme yığılması olduğunu gözlemlemişlerdir [38].

Luo ve Tong (2009) onarım işlemi yapıştırılarak gerçekleştirilmiş olan tek bindirmeli kompozit malzemeler için analitik ve nümerik olarak non-linear çözümler konusunda çalışmalar yapmışlardır [39].

Bouiadjra vd (2007) ve Fekirini vd (2008) tek ve çift yönlü olarak cam-elyaf takviyeli kompozit yama uygulanmış kenar çatlağı bulunan alüminyum levhada yama ve levha kalınlığı ile bağlantılı olarak gerilme şiddet faktöründe oluşan şiddet değişimini nümerik olarak incelemiştir. Gerçekleştirilmiş oldukları çalışma sonucunda çift yönlü yamada tek yönlü yamaya göre şiddet faktörünün daha az olduğunu gözlemlemiştir [40].

Madani vd (2008) tek ve çift yönlü grafit-epoksi kompozit yama kullanılarak onarılmış hasarlı alüminyum levhanın değişken yama ve yapıştırıcı kalınlıklarında gerilme şiddet faktöründe meydana gelen değişimi nümerik olarak incelemiştir. Kompozit yamayı 12 ve 14 katlı olacak şekilde kullanmışlardır. Gerçekleştirilmiş oldukları incelemeler sonucunda, değişken kompozit malzeme ve yapıştırıcı kalınlığının çatlaktaki deplasmanları ve kırılma mekaniği parametrelerini belirgin biçimde değiştirdiğini belirlemiştir [41].

Günümüzde kompozit malzemeler birçok sektörde etkin bir şekilde kullanılmaya başlamıştır. Bu durum giderek daha etkin bir hale gelecektir. Kompozit malzemeler hakkında hala cevabı tam olarak bulunamayan birçok konu vardır. Bu sebeple kompozit malzemeler hakkında birçok araştırma yapılmaktadır. Yapılan bu araştırmalar ile kompozit malzemelerin daha verimli bir şekilde kullanılmasını amaçlanmaktadır. Artarak devam eden kompozit eğilimi, bu malzemenin onarım ihtiyacını da ortaya çıkarmaktadır. Yapılan literatür araştırması sonucunda kompozit malzemelerde yapılan onarımların genellikle sıcaklık etkisi, nem etkisi, yüzey etkisi, yapıştırıcı etkisi gibi konularda incelendiği görülmüştür [42].

## 2. GENEL BİLGİLER

Ekonomide gerçekleştirilen faaliyetlerin tamamına girdi oluşturan ana ve yaygın olan alanlardan biri de malzeme sektörüdür. Gösterdiği bu özellik sebebiyle biyoteknoloji, nanoteknoloji ve mikro-elektronik ile birlikte üretimde değişime yol açabilecek temel teknolojik dallardan biridir. İletişim, havacılık, savunma, otomotiv ve mikro elektronik alanlarında kullanılacak ileri seviye teknolojik malzemelerin bulunuşu, malzeme biliminin bu ihtiyaçlara cevap verebilecek düzeyde çok disiplinli, süreç üzerinde durulan bir alana dönüşmesiyle birlikte ilerlemektedir. Bu bağlamda kompozit malzemeler, polimerik malzemeler, akıllı ve işlevsel malzemeler, optoelektronik malzemeler gibi günümüzde ve önümüzdeki yıllarda önemli destek alanları oluşturacak ileri teknoloji malzemeler, ülkemiz için de önemli fırsat alanlarıdır [43].

### 2.1. Kompozit Malzemeler

İstenilen amaç için farklı özelliklerdeki iki veya daha fazla malzemenin istenilen özellikleri sağlaması için belirli koşullar ve belirli seviyelerde fiziki olarak, makro yapıda birleştirilmesi ile oluşturulan malzemelere Kompozit Malzemeler denir. Doğada var olan malzemelerin birçoğu "kompozit" olarak adlandırılan bileşik maddelerden oluşur. Bu malzemelerin ortak özelliği, kendini oluşturan maddelerin sahip olduğu özelliklerinden daha üstün olması ve kendini oluşturan maddelerin özelliklerine ortak bir şekilde sahip olmasıdır [44, 45].

Buna en uygun örnek, günümüzde geleneksel bir hâl almaya başlayan ve "fiberglas" olarak isimlendirilen polyester esaslı reçinelerin cam elyaf ile takviye edilmesiyle elde edilen malzemelerdir. Sürekli gelişmesi ile ileri kompozitler olarak adlandırılan grup oluşmuştur. Bu grupta bulunan kompozitler, standart kompozitlere göre daha üstün kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikler göstermektedirler. Bahsedilen bu malzemeler yüksek çekme ve basma dayanımı, yüksek tokluk ve yüksek elastik modüle sahiptirler. Bunlar da kullanıcıya cazip gelen yönlerden bazılarıdır [43].

#### 2.1.1. Tarihçe

İlk modern sentetik plastikler hakkında 1900'lerin başında çalışmalar gerçekleştirilmesinin ardından, 1930'ların sonuna doğru plastik malzemelerin sahip olduğu özellikler diğer malzeme türleri ile yarışabilecek seviyede gelişmeye başlamıştır. Kolay şekil alabilmesi, metaller ile karşılaştırıldığında daha düşük

yoğunluğa sahip olması, gösterdikleri üstün yüzey kalitesi ve korozyona karşı yüksek dayanımı plastiğin önemli bir hâl almasındaki temel özelliklerdir. Bilinen tüm bu üstün özelliklerine karşın düşük sertlik ve düşük dayanım göstermeleri plastik malzemelerin güçlendirilmesi ihtiyacını oluşturmuştur. Zaman içinde ortaya çıkan bu ihtiyaçları gidermek amacıyla 1950'lilerde polimer esaslı kompozit malzemeler geliştirilmiştir [43].

Kompozit malzemeler, özellikle polimer esaslı kompozitler yüksek mukavemet, boyut ve termal kararlılık, sertlik, aşınmaya karşı dayanıklılık gibi özellikleriyle pek çok avantaj sunmaktadırlar. Ayrıca plastiklere oranla kompozit malzemeler sertlik ve dayanım açısından metallerle yarışabilecek durumdadırlar. Bunun yanında düşük yoğunluk sebebiyle çok hafiftirler [43].

### **2.1.2. Kompozit Malzemelerin Avantajları**

Kompozit malzemeler genellikle düşük ağırlık ve yüksek mukavemete ihtiyaç duyulan durumlar için tasarlanıp üretilirler. Kompozitlerin diğer malzemelerle karşılaştırıldığında birçok avantajları vardır. Bunlar şöyle sıralanabilir [46, 47];

- Metal kullanılarak üretilmesi mümkün olmayan karmaşık parçalar perçinleme veya kaynak işlemi olmadan kompozit bir yapı olarak üretilerler.
- Kompozit malzemeler yüksek sertliğe sahip olmasına rağmen alüminyum ve çeliğe kıyasla oldukça düşük bir yoğunluğa sahiptirler.
- Kompozit malzemelerin yorulma dayanımları oldukça yüksektir.
- Yüksek darbe dayanımına sahiptirler ve ses, titreşim gibi özellikleri metallerden daha üstündür.
- Kompozit malzemeler yüksek mukavemet / yoğunluk oranına sahiptirler.
- Kompozit yapılar yüksek korozyon dayanımı sergilerler. Alüminyum ve demir ortamda bulunan su ve havadan dolayı korozyona uğramakta ve özel kaplamalar veya alaşımlar ile bu engellenebilmektedir. Kompozit malzemeler ise dış kısmı plastik malzemeden oluştuğunda korozyon ve kimyasallara karşı yüksek bir dayanım gösterirler [46, 47].

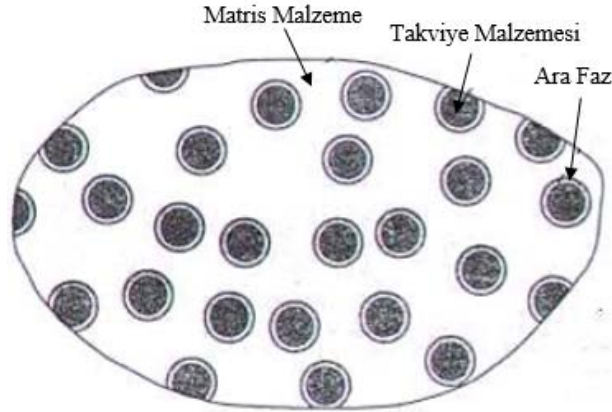
### 2.1.3. Kompozit Malzemelerin Dezavantajları

Kompozit malzemelerin birçok avantajına rağmen dezavantajları da bulunmaktadır. Bunlar aşağıdaki gibidir;

- İşlenme maliyetinin yüksek olması ve yüzey pürüzlülüğünde karşılaşılan problemler
- Geri dönüşümünün olmaması
- Kırılma uzamasının az olması
- Üretim zorluğu
- Üretiminin yüksek maliyet oluşturması [46, 47]

### 2.1.4. Kompozit Malzemelerin Yapıları

Kompozit malzemeler en az bir ana malzeme ve yine en az bir takviye fazından oluşacak şekilde imal edilmektedirler. Kompoziti oluşturan takviye ve ana malzeme, kompozitin üretimi esnasında kullanılan yöntem ve tasarlanan şekle bağlı olarak fiziki birliktelik göstermektedir. Çeşitli yöntemlerle bir araya getirilmiş olan ana malzeme ve takviye elemanı, kendi özelliklerini tamamı ile kaybetmeden sergilemek üzere, aralarında arayüzey olarak isimlendirilen bağlantı bölgesi oluşturarak, tasarlanan formlarını korumaktadırlar [48].



Şekil.2.1. Kompozit Malzemenin İç Yapısı [44]

### 2.1.5. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

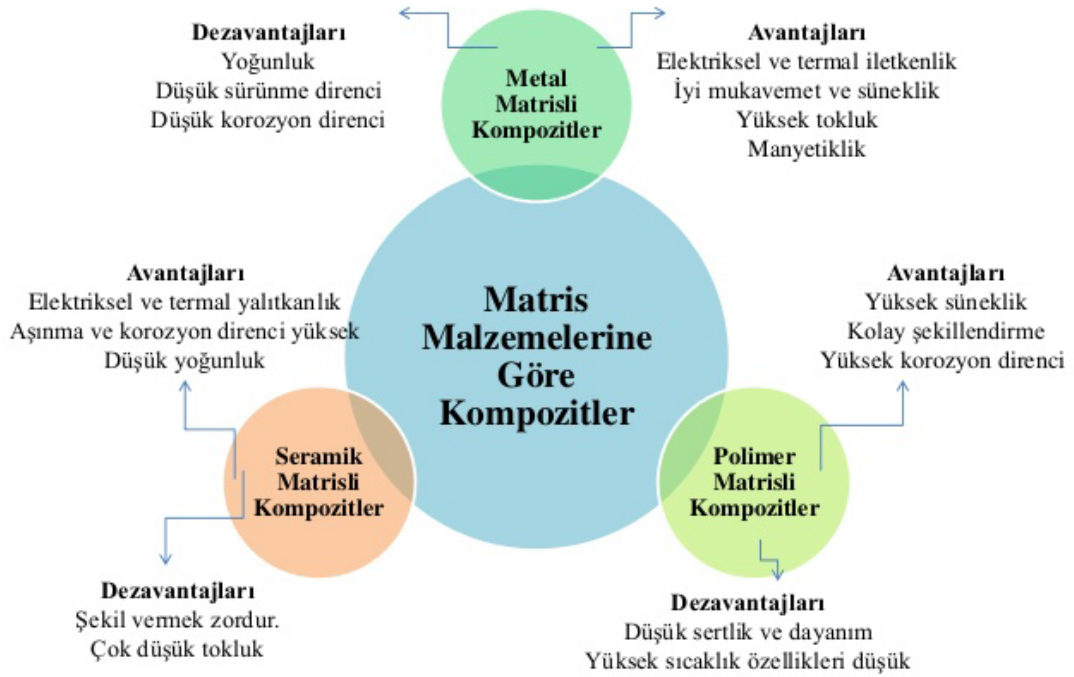
Kompozit malzeme elde ederken kullanılacak bileşim seçenekleri sonsuz sayıda denebilecek kadar fazladır. İç yapılarında çok sayıda farklı bileşen barındırabilen kompozit malzemelerin sınıflandırılmasında kesin hatlar çizilmesinin mümkün olmaması ile birlikte, kompozit malzemeleri, yapılarını oluşturan

malzemeler ve yapı bileşenlerinin geometrilerine göre iki şekilde sınıflandırılabilir [49].

### 2.1.6. Matris Yapılarına Göre;

Kompozit malzeme üretimi genellikle matris olarak adlandırılan ana faz ile fiber ismi ile bilinen ikincil fazların istenilen seviyede ve düzende fiziki karışımı ile yapılır. Kompozit malzemenin mukavemet ve dayanım özelliğini bu iki gruptan fiber malzeme belirler. Matris ise plastik deformasyona geçiş esnasında ortaya çıkabilecek olan çatlak ilerlemelerini engelleyici görev üstlenmekte ve kompozit malzemede oluşacak olan kopmayı geciktirmektedir. Matris malzemesinin diğer bir amacı da yük altındaki fiber malzemeleri bir arada tutmak ve bu yükün lifler arasında homojen bir şekilde dağılmasını sağlamaktır. Bu sayede fiber malzemede plastik deformasyondan kaynaklı oluşan çatlak ilerlemesi engellenmiş olacaktır [50].

Kompozit malzemelerde yük taşıma amacı ile bulunan fiberlerin görevlerini yerine getirmeleri açısından matrislerin sahip olduğu mekanik özelliklerin önemli bir rolü bulunmaktadır. Örneğin matrisler olmaksızın bir fiber demeti düşünüldüğünde yük bir ya da birkaç fiber tarafından taşınacaktır. Matrislerin varlığı ise yükün yapıdaki fiberlere eşit bir şekilde dağılımını sağlayacaktır [51].



Şekil.2.2. Matris yapılarına göre sınıflandırma [49]

### **2.1.6.1.Metal Matrisli Kompozitler**

İki veya daha fazla farklı metal malzemenin düzenli bir şekilde bileşimiyle elde edilen yeni türdeki malzemelerdir. Metal matrisli kompozitler tek bileşenli alaşımlarla elde edilemeyen özellikleri sağlamak üzere üretilirler. Yapılarında bir metal matris içinde sürekli veya kısa fiber, whisker veya partikül şeklinde takviye fazı içerirler [52].

Metal malzemelere yük uygulandığı zaman aniden kırılmazlar, sadece akıp uygulanan bu yükü bütün yapıya dağıtırlar. Bu da kullanımın daha güvenli bir hâl almasını sağlar. Tokluk ve mukavemet özelliklerinin en uygun olduğu grup olan metaller, makine ve metalürji mühendisliği alanlarında sıklıkla kullanılan malzemelerdir. Bazı metaller liflerle veya taneciklerle takviye edilerek kompozit olabilirler. Örnek olarak tungsten alaşımından yapılan liflerle takviye edilmiş metal alaşım kompozitleri 1000<sup>0</sup> C gibi yüksek sıcaklıklara dayanabilmektedir ve bu kompozitler jet motorlarında kullanılmaktadır [53].

Araştırmacılar, metal matrisli kompozitlerin yaygın olarak kullanılmasının önünde, üretimlerinde ortaya çıkan problemler, kullanıma hazır hale getirmek için talaşlı imalat ihtiyacını ve bunun maliyetinin yüksek olmasını engel olarak görmektedirler [54].

### **2.1.6.2.Seramik Matrisli Kompozitler**

Seramik malzemelerin en belirgin özellikleri yüksek sıcaklığa karşı dayanıklı ve hafif olmalarıdır. Bu özellikleri ile oldukça önemlidirler. Seramik esaslı kompozit malzemeler yüksek sıcaklık dayanımları sebebi ile genellikle yüksek sıcaklıktaki bölgelerde kullanılırlar. Seramik malzemeler ısıl şok direnci ve tokluğu düşük malzemelerdir. Sert ve kırılman malzemeler olan seramikler, çok düşük süneklik gösterirler, düşük tokluk oranları ve termal şoklara karşı dayanıksızlık göstermeleri olumsuz yönleridir. Bu sebeple liflerle takviye edilerek dayanımları artırılır. Seramik matrisli kompozitlerin yük taşıma kapasitesi, üretim sırasında meydana gelen, çatlaklarla önemli ölçüde azalmaktadır. Standart çalışma koşullarında bu çatlaklar ilerleyerek önemli hasarlara yol açmaktadırlar [49].

Seramik matrisli kompozitlerin performansını etkileyen unsurlar; seçilen bileşenler yanı sıra üretiminde izlenecek yol ve üretilen ürünün kimyasal, mekanik, ısıl özellikleridir [55].

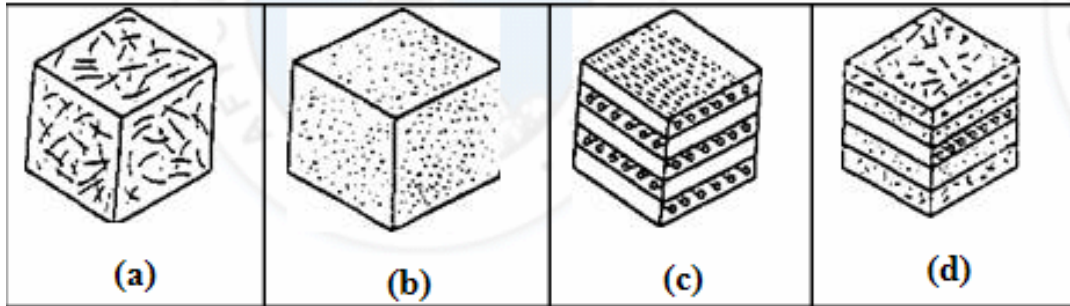
### 2.1.6.3. Polimer Matrisli Kompozitler

Polimerler matrisli kompozitler düşük sertliğe sahip olan oldukça zayıf kompozitlerdir. Yapısal kullanım şartlarına uygun bir hâle getirebilmek için mekanik özellikler kazanmaya ihtiyacı vardır. Bu mekanik özelliklerin eklenmesi için de sürekli veya süreksiz fiberlerle takviye edilip kuvvetlendirilmesi gerekir [56]. Yaygın olarak kullanılan polimer matrisli kompozitler termoplastikler ve termosetler olarak adlandırılan iki gruba ayrılırlar. Termosetler ve termoplastikler sürekli fiber takviyeli bir yapıdadırlar. Bu tür kompozit malzemelerin sürekli fiberlerle takviye edilmiş olan polyester ve epoksi reçine matrisli grupları en önemlileri olarak görülmektedir. Polimer matrisli kompozitlerin kullanımında çokça tercih edilen alanlar; sahip oldukları yüksek korozyon dayanımı sebebiyle denizcilik uygulamaları, hafif olmaları sebebiyle spor malzemeleri ve otomotiv gibi diğer taşımacılık endüstrileri, yanmazlık özelliğine ihtiyaç duyulan otomotiv iç dekorasyonu gibi alanlar olarak bahsedilebilir [49].

### 2.1.7. Takviye Elemanın Şekil ve Yerleşimine Göre;

Takviye elemanın şekil ve yerleşimine göre kompozitler 4 grupta sınıflandırılabilir. Bunlar şekil 2.4'te görüleceği gibi;

- Elyaflı Kompozitler
- Parçacıklı Kompozitler
- Tabakalı Kompozitler
- Karma Kompozitler [48]

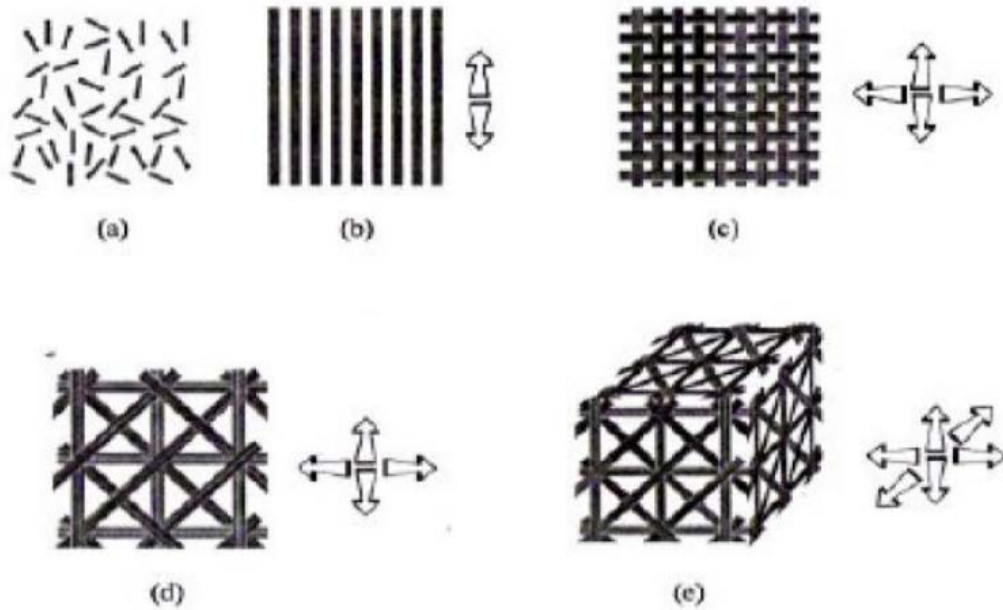


Şekil.2.3.a) Elyaflı Kompozitler b) Parçacıklı Kompozitler c) Tabakalı Kompozitler d) Karma Kompozitler [48]



### 2.1.7.1.Elyafli Kompozitler

Elyafli kompozitler, ince elyafların matriste yer almasıyla oluşur. Bu kompozitler genellikle basınç dayanımına oranla çekme, eğilme, çarpma dayanımları düşük seviyede olan veya narin yapılı, kırılğan malzemenin iyileştirilmesi, malzemenin sünekleştirilmesi, kırılğanlığın azaltılması gibi amaçlarla bu düşük olan özellikleri iyileştirecek seviyede elyaflar yerleştirilerek üretilen kompozitlerdir. Elyaf takviyeli kompozitlerde dışarıdan gelen yüklemeleri karşılayan ana bileşen elyaftır. Polimer matrisin görevi ise elyafları istenilen geometride bir arada tutmaktır. Elyafın matristeki dağılımı, kompozit malzemenin mukavemetini etkileyen önemli bir etkidir. Uzun elyafların matriste birbirine paralel olarak bulunmaları ile elyaflar doğrultusunda yüksek mukavemet elde edilirken, elyaflara dik doğrultuda ise oldukça düşük mukavemet ortaya çıkar. Elyafın kompozit yapı içinde uzunluk/çap oranları arttıkça matris yapı tarafından elyaflara iletilen yük miktarı da artar [53, 57].

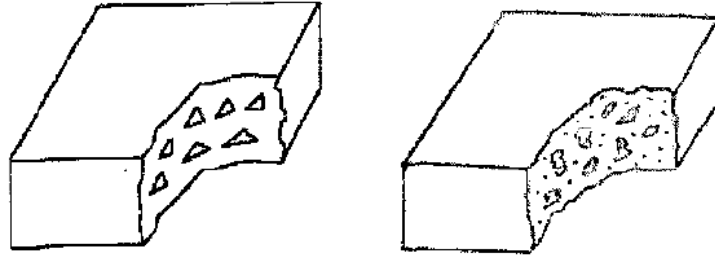


**Şekil.2.4.** a) Parçacıklı Rasgele Yerleşim b) Sürekli Tek Yönlü c) Sürekli Düzlemsel İki Yönlü d) Sürekli Düzlemsel Üç Yönlü e) Üç Boyutlu (Oklar mekanik dayanımın iyi olduğu yönü gösterir) [58]

### 2.1.7.2.Parçacıklı Kompozitler

Matris malzeme yapısının içinde farklı bir türde malzemenin parçacık şeklinde bulunması sonucu elde edilirler. İzotrop bir yapılarıdır ve tüm yönlerde aynı tip malzeme davranışı ortaya koyarlar. Parçacıklı kompozitlerin mukavemeti parçacıkların sertliğine göre değişiklik gösterir. Matris ve partikül birbiri içinde

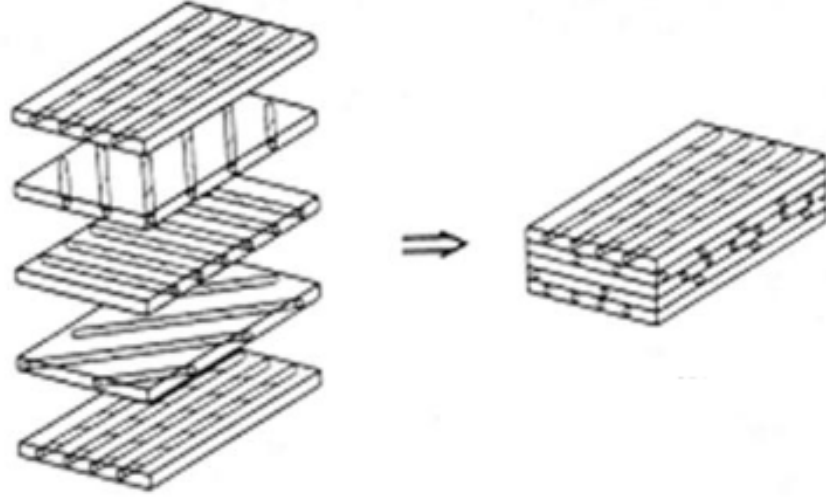
çözülmez (makro bağlantı). En yaygın kullanılanı plastik matris içinde bulunan metal parçacıklardır [59]. Yapı içinde bulunan metal parçacıklar elektriksel ve ısı iletkenlik sağlarlar. Metal matris içinde yer alan seramik parçacıklar bulunan yapıların, sıcaklık dayanımları ve sertlikleri yüksektir. Döküm yöntemi ile üretilen bu kompozitlerde, sıkça karşılaşılan problem ise parçacık ilavesi esnasında tozların karıştırılmasında oluşan zorluk ve eriyik viskozitenin düşmesi veya sıvı metalin seramik parçacıkları ıslatamamasıdır [53].



Şekil.2.5. Parçacık Takviyeli Kompozitler [59]

### 2.1.7.3.Tabakalı Kompozitler

Tabakalı kompozit yapılar en eski ve yaygın kullanılan kompozit tipidir. Farklı elyaf yönelmeleri olan tabakaların bileşimi ile yüksek mukavemet değerleri elde edilir. Tabakalar levhalar ve ince filmlerden oluşurlar. Tabakaların uyumu düşünüldüğünde farklı özellikler ve yönlerde kompozit yapılar elde edilebilir. Korozyon direnci düşük olan metallerin üzerine, daha yüksek dirençli plastikler veya metaller kaplanarak korozyon özelliği artırılır. Yumuşak olan metaller sert malzemelerle bir araya getirilerek sertlik ve aşınma direnci, farklı fiber yönelmesi bulunan tek tabakaların birleştirilmesiyle ise çok yönlü yük taşıma özelliği iyileştirilebilir. Tek yönlü kompozitler bu doğrultuda daha üstün mekanik özellikler barındırır ve anizotropik (farklı doğrultularda farklı özellikler gösteren malzeme) özellik gösterirken, izotropik (tüm doğrultularda aynı özellikler gösteren malzeme) kompozit malzemeler ise bütün yönlerde eşit özellikler gösterir [60].



**Şekil.2.6.** Tabakalı Kompozitler [60]

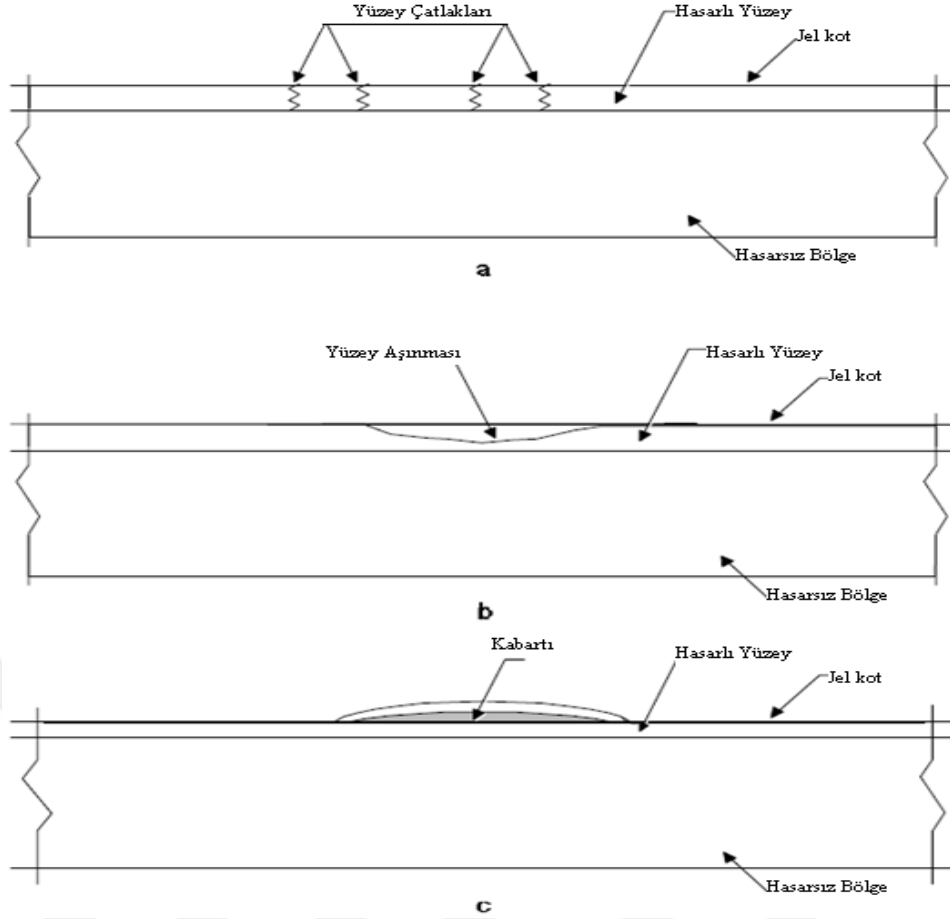
#### **2.1.7.4.Karma (Hibrit) Kompozitler**

Hibrit kompozit yapılar iki veya daha fazla fiber türünün bir arada uygulanması ile meydana gelen kompozit malzemelerdir. Bu alan yeni nesil kompozit malzemelerin keşfi için ideal bir alandır. Buna en iyi örnek, keklar tok ve ucuz bir elyafıdır fakat basma mukavemeti yüksek değildir. Grafit ise pahalı, tokluğu düşük olan bunun aksine basma mukavemeti yüksek olan bir elyafıdır. Bu iki elyafın kompozit malzeme içerisinde bulunmasıyla, karma kompozitin tokluğu grafit kompozitten daha iyi, maliyeti düşük ve basma mukavemetinde ise keklar elyafı kompozitten daha yüksek olmaktadır [61].

## **2.2. Hasar Tipleri**

### **2.2.1. Yüzey Hasarı**

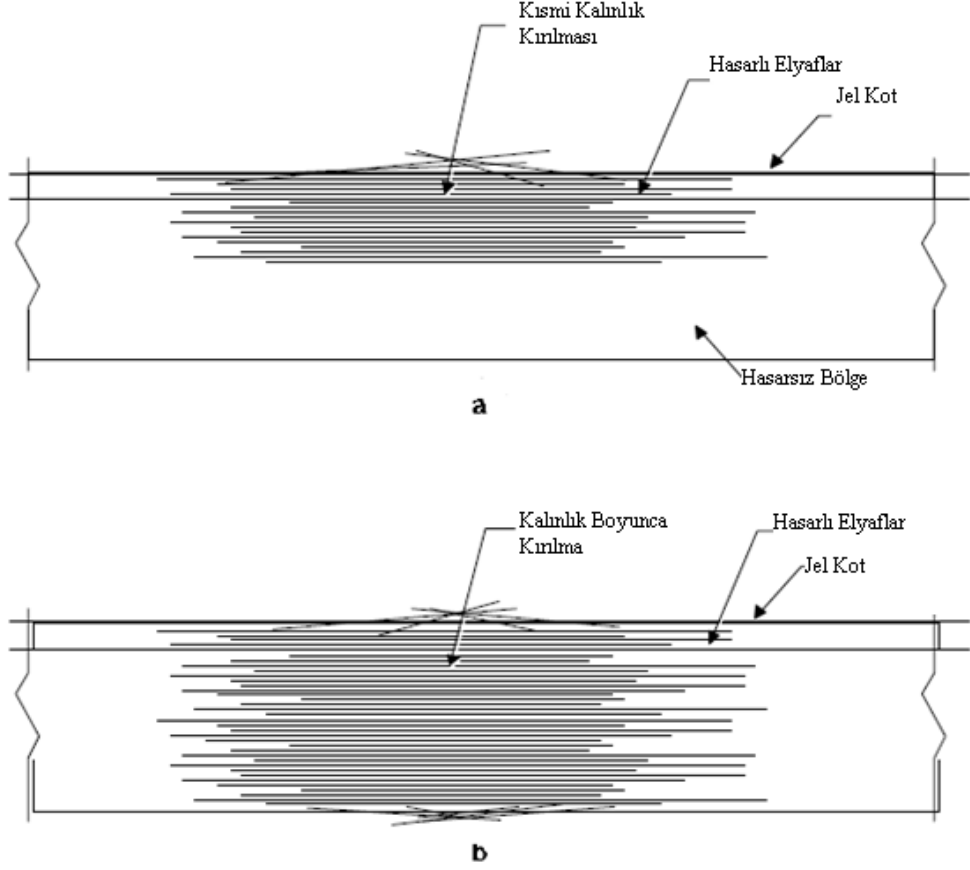
Aşınmalar, kabartılar ve çatlamlar cam fiber takviyeli kompozitlerde yaygın olarak karşılaşılan hasarlardır. Yüzey hasarları genellikle 2mm'den az olan kalınlıklarda oluşur ve hasarsız bölgeye yayılmazlar. Bu hasarlar tek başına bir anlam oluşturmazlar fakat dikkate alınmazlarsa fiber bağlantılarının arasına sıvı sızması sonucunda tabakalar arasında ayrılmalar görülebilir. Yapılarda oluşan çatlak bölgelerinde yüksek gerilmeler ve yüzey altında bulunan bölgelerde de tabaka hasarları gösterebilirler [62].



Şekil.2.7. Başlıca hasarlar a) çatlama, b) aşınma, c) kabartı [62]

### 2.2.2. Tabaka Hasarı

Malzemeye gelecek aşırı yüklemeler çatlaklar, ezilmeler, küçük delikler ve tabakalar arası kaymalar gibi hasarlara sebep olabilir. Hasarların ortaya çıkacağı ilk bölge cam fiber takviyeli kompozitlerde bulunan cam fiberlerdir. Oluşan tabakalar arası kayma ise düzlem dışı gerilmeler nedeniyle ilk olarak süreksiz bölgelerde ortaya çıkar. Bu hasar tipi onarım prosedürüne göre ikiye ayrılır. Bunlar “kalınlık boyunca hasar” ve “kalınlık boyunca kısmi hasar” dır [63].



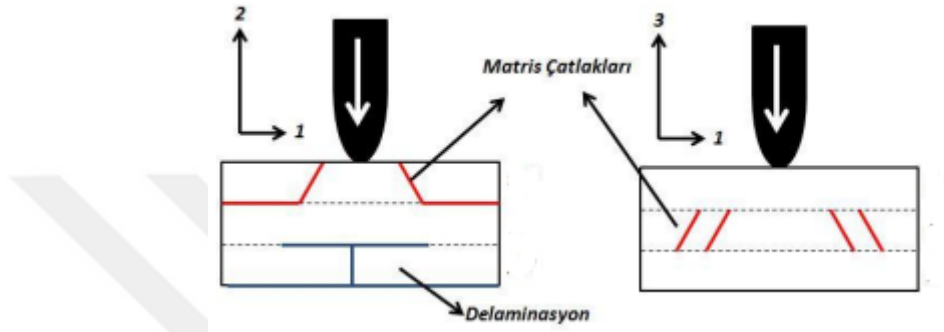
Şekil.2.8. a) kalınlık boyunca kısmi hasar, b) kalınlık boyunca hasar [63]

### 2.2.3. Matris Hasarı

Düşük hızda darbe etkisinde kalan kompozit malzemede ilk olarak matris hasarı görülür ve matris çatlama şekline gözlemlenir. Bu çatlamlar, tek yönlü bir şekilde sıralanmış elyaflardan oluşan tabakalarda ve çoğunlukla bu elyafların doğrultusuna paralel olan düzlemlerde oluşur. Düşük hızdaki darbeden sonra, tahmin edilmesi zor olan ve belli bir düzende oluşmayan, rastgele oluşum içerisinde bulunan matris çatlakları vardır. Uygulanan darbe sonrası oluşan matris çatlakları tabakalı kompozitin özelliklerinde belirgin bir etki göstermez. Bu sebeple bunların belirlenmesi çok önemli bir konu değildir. Fakat bu önemsiz gibi görünen matris çatlakları hasar sürecinin başlangıcıdır. Başlangıcın ardından bu çatlaklar ilerleyen süreçlerde tabaka ara yüzlerinde ayrılmalara (delaminasyon) neden olur [64].



Şekil.2.9. Matris Kırılması [65]



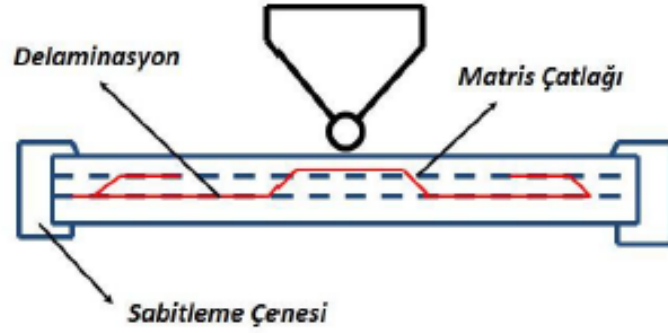
Şekil.2.10. Matris Çatlakları [66]

#### 2.2.4. Bağlantı Deleminasyonu

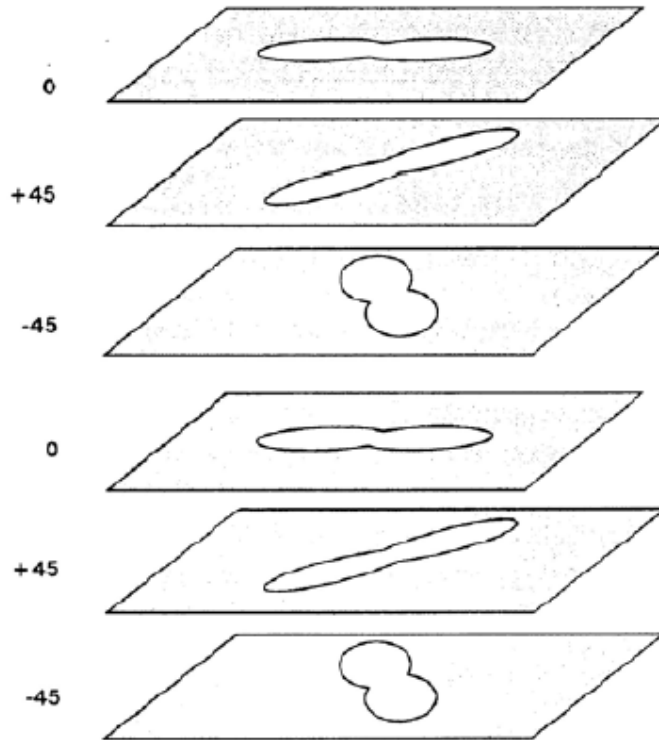
Çoğunlukla gemilerde kullanılan panel bağlantıları, içeriğinde üst üste sıralı cam fiberler bulunduran tabakalı bağlantılı yapılar ile gerçekleştirilir. Bu formlar bağlanacak olan yapısal bileşenlerin birleştirilmesinde kullanılır. Birleştirme işlemi gerçekleştirilirken, bileşenlerin bütün bölgelerine kür işlemi uygulanması gereklidir. Bu gerekliliğin sebebi ise tabakalı bağlantı elemanlarının sahip olduğu geometri gerilme konsantrasyonunun oluşmasına müsait olmasıdır. Bu elemanlar delaminasyon ve sıyrılmalara elverişlidirler [67, 68].

En çok görülen hasar türleri darbeye bağlı olarak oluşan hasarlardır. Kompozit malzemeler kalınlık doğrultusunda düşük dayanıma sahiptirler. Bunun sonucunda, düşük hızda uygulanan darbe yüklemelerinden sonra mekanik mukavemetlerinde önemli düşüşler görülür ve bu gözle görülebilecek seviyede hasarların oluşmasına neden olur. Düşük hızdaki darbe yüklemeleri, matris çatlama, delaminasyon ve fiber kırılmalarının etkisiyle malzeme dayanımı ve yorulma ömründe belirgin düşüşlere neden olabilir. Kompozit malzemeler oluşan hasarların, yapının dayanım ve yorulma ömürlerine etkilerini ortaya koymak ve kritik hasar boyutunu belirlemek için birçok bilimsel çalışma gerçekleştirilmiştir [67, 68].

Delaminasyon, farklı dizilimlerde bulunan fiber tabakaları arasında reçine yönünden zengin olan kısımda meydana gelen çatlak hasar türüdür. Aynı tabakada bulunan katlar arasında oluşmaz. Delaminasyon büyüme süreci; delaminasyona uğramış olan ara yüzeyin altında bulunan katmanda, tabakalar arasında boyuna kayma gerilmeleri ve enine düzlemsel gerilmelerle yönetilirken; ara yüzeyin üzerinde bulunan katmanda tabaka içi kayma gerilmesi tarafından yönetilir [69, 70, 71, 72].



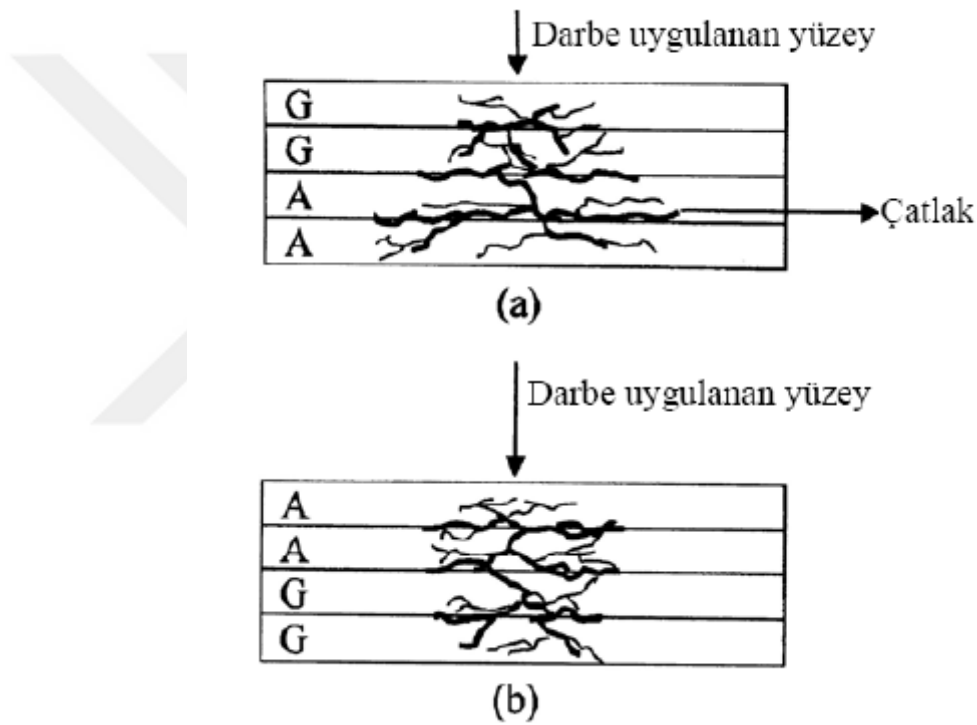
Şekil.2.11. Darbeye Bağlı Oluşan Delaminasyon [73]



Şekil.2.12. Delaminasyon Alanlarının Elyaf Açıklarına Göre Şekilleri [64]

### 2.2.5. Elyaf Hasarı

Kompozit malzemelerde elyaf hasarı, çoğunlukla delaminasyon ve matris çatlamasından daha sonraki süreçlerde ortaya çıkar. Elyaf hasarı, çarpan cismin batmasına bağlı olarak darbe yüzeyinde oluşabilir. Bunun yanında yüksek eğilme gerilmeleri sebebiyle darbeye maruz kalmayan yüzeyde de oluşabilmesi mümkündür. Yapılan araştırmalar sonucunda elyaf tipinin delaminasyonların ve matris çatlağının başlamasında ana etken olmadığı belirlenmiştir. Fakat yüksek darbe enerjisine ulaşılan seviyelerde elyafın sahip olduğu özellikler ve elyafın dizilim sırası önemli bir faktör olarak açıklanmıştır [75].



Şekil.2.13. Hasar Yayılışı a) Cam Yüzeyden b) Aramid Yüzeyden [75]

### 2.3. Onarım Amaçları

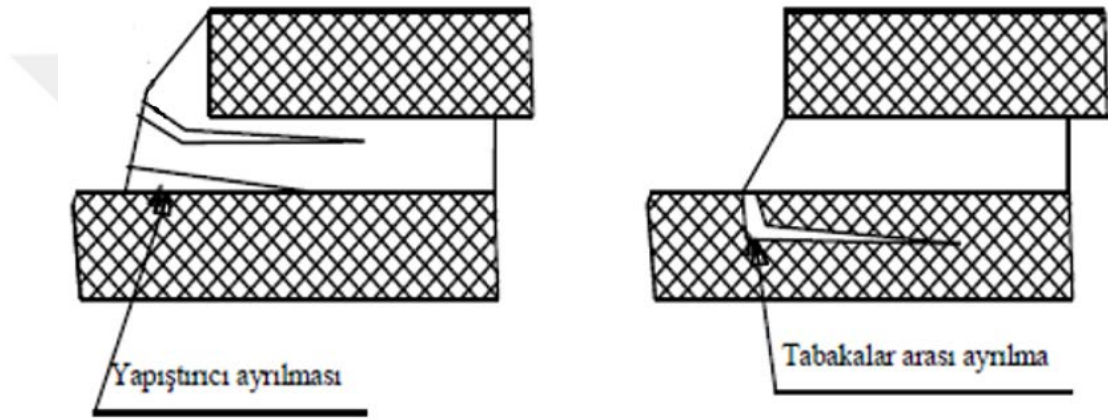
Onarım, hatalı üretilen yapıların veya yapılardaki hasarlı bileşenlerin ömrünün uzatılması ve yapının dayanımını arttırmak için düşük maliyetlerde uygulanan işlemdir. Onarımın uygulamasının amaçları şunlardır [76];

- Yorulma iyileştirmesi
- Çatlağın yamalanması
- Korozyonun onarılması



### 2.3.1. Yorulma İyileştirilmesi

Onarım işleminde gözle görülebilen hasarlar dışında da gereklilik göstermektedir. Gözle belirlenemeyen çok küçük çatlakların yorulma nedeniyle ilerleyip, büyümesi de birçok büyük hasarlara sebep olabilmektedir. Bunun sonucunda da tekrar tasarlama, panellerin değiştirilmesi ve yüksek maliyetli kontroller ve buna benzer zorunluluklar beklenen zaman diliminden daha sık periyotlarda gerçekleşebilir. Yorulma iyileştirilmesi amacıyla uygulanan onarımlar, hatalı tasarlanmış olan yapıdaki gerilme yoğunluğunu düşürmek, yorulma ömrünü uzatmak ve sık sık tekrarlanması gereken kontrolleri en aza indirmek amacı ile yapılmaktadır [76].



Şekil.2.14. Yapıştırırmalı Birleşimlerde Yorulma Hasar Biçimleri [77]

### 2.3.2. Çatlağın Yamalanması

Çatlak bulunan hasarlı yapının onarımı işleminde yapıya dıştan yama yapılması ile gerçekleştirilebilir. Yapılan bu yama da çatlağın ilerlemesini durdurur ya da ilerleme hızını düşürür [78].

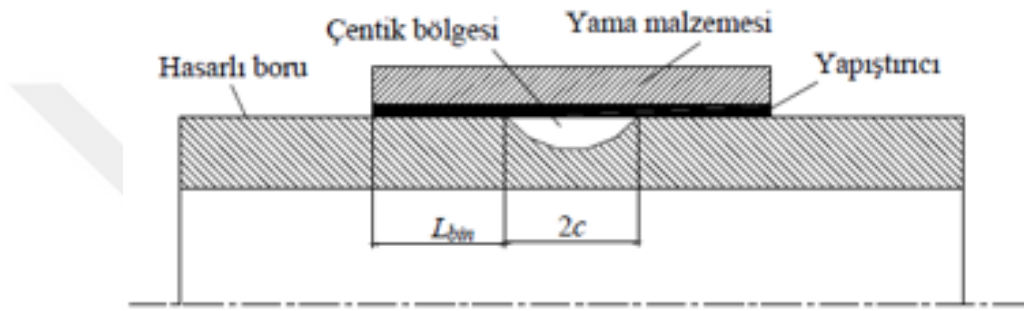
Örneğin, yorulma çatlağı şeklinde oluşan bir hasar tabakalarda ya da ara yüzeyde meydana gelir. Genellikle tabakalarda meydana gelmesi beklenir. Çift bindirmeli olarak yapılmış olan birleşimlerde yorulma çatlağı her iki yapışma yüzeyinde de meydana gelir. Yapışma bölgesinin birinde oluşan çatlak, gerilme sebebi ile diğer yapışma bölgesinde çatlak başlangıcına da sebep olabilir. Bu gibi durumlarda da çatlak yamalama işlemi uygulanır [79].

### 2.3.3. Korozyonun Onarılması

Korozyon nedeni ile oluşan hasarı gidermek için hasarlı bölgenin yapıdan kaldırılması yeterli olabilecek bir işlemdir. Yapılan bu işlem sonrası geriye kalan

girintili bölgeye dolgu malzemesi ekleme ve yama yapma işlemi ile yapının ilk halindeki yük taşıma değerleri sağlanmaya çalışılır [80].

Kompozitler son zamanlarda doğalgaz ve petrol boru hatlarının onarımı için de kullanılmaktadır. Bu tür korozyona uğramış olan ya da hasarlanmış boru hatlarının onarımı amacıyla her yıl yüksek harcamalar yapılmaktadır. Boruda bulunan hasarlı kısmının çıkarılıp yenisi ile değiştirilmesi sistemin zorunlu olarak devre dışı bırakılmasını gerektirmektedir, bu durum da mali açıdan kayba sebep vermektedir [81, 82].



Şekil.2.15. Korozyon Onarımı [74]

#### 2.4. Onarım Aşamaları

Onarımda önemli olan 3 temel bilgi bulunmaktadır. Bunlar:

1)Uygulanan tüm onarım işlemleri, yapıya sonradan ilave edilen bağlantılardır ve bu sebeple dayanımları büyük oranda reçinenin gösterdiği yapışma yeteneğine bağlıdır.

2)Yama yüzey alanının artırılması onarım mukavemeti ve sürekliliği doğru arttıracaktır. Azaltılan yüzey alanı ise mukavemeti ve sürekliliği düşürecektir. Bu durumda yüzey alanı ile onarım mukavemeti ve sürekliliği doğru orantılıdır.

3)Ana gövdenin yoğunluk, kalınlık ve katman oryantasyonunu parçanın işlevselliğini değiştirmeyecek biçimde arttırmak dayanımda büyük oranlarda olumlu etkiler sağlar [80, 83].

Hasara uğramış olan kompozit yapılara uygulanan onarım işlemi üç aşamada yapılır. Bunlar; yapıda oluşan hasar tespiti, onarımın tasarımı ve analizi, onarımın yapılması ve muayenesidir [80, 83].

### 2.4.1. Yapısal Tespit

Onarım tasarımının başlangıcında; yapı üzerindeki yüklemeler, geometri, gerilme dağılımı, çevresel faktörler gibi yapının sahip olduğu belirleyici özelliklerin saptanmasıdır. Doğru ve uygun bir onarım işleminin uygulanabilmesi için gerekli olabilecek özellikler şunlardır [84];

- Onarım işlemi uygulanacak yapının malzeme tipi ve geometrisi
- Aerodinamik ve/veya elektromanyetik sınırlamalar
- Kolay yanabilme
- Ağırlık ve denge bilgileri
- Termodinamik sınırlamalar
- Yüzey hazırlık sınırlamaları
- Elektronik sınırlamalar
- Gerilme değerleri
- Çevresel faktörler
- Yapıdaki yüklemeler
- Onarım malzemesi, ekipmanların uygunluğu ve bütünlüğü
- Boyut sınırlaması
- Ek yapı veya hazır sistem
- Bölge sınırlamaları

Yapısal kusurlar genel olarak hatalı tasarım, üretim koşulları veya standart çalışma koşullarında oluşabilirler. Hatalı tasarlanmış olan yapı ömür kriterini sağlamak için daha sık olarak muayene, tekrar tasarlama veya onarım gerektirebilir [84].

### 2.4.2. Onarım Tasarımı

Tasarımı gerçekleştirilen yamanın şekli, kalınlığı ve boyutu onarım işleminde en mühim parametrelerdendir. Bunlara ek olarak onarım işleminde önem gösterilmesi

gereken bazı hassas ve detay bilgiler bulunmaktadır. Örneğin; yamanın kenarları, yük aktarmasından dolayı kenarlarda oluşacak olan gerilme yığılması sebebi ile inceltir. Kompozit yapıların onarımında yama tasarımı için bazı önemli kriterler vardır [85];

- Tabaka dizilimleri; yükleme doğrultusunda ve çatlığa dik olmalıdır.
- Tabakaların bir kısmı kayma gerilmelerini ve eksenel yükleri taşıyabilmesi için yükleme doğrultusuna göre  $\pm 45^\circ$  ve  $90^\circ$  açıları ile dizilebilirler.
- Yamadan ana yapıya veya ana yapıdan yamaya yük iletilirken yamada kullanılan basamak sayısı, basamakların derinliği ve bindirme uzunluğu gibi parametreler büyük gerilme yığılmalarının oluşmasına sebep olmayacak biçimde seçilmelidir [85].

Onarımın basamaklı yama şeklinde uygulanması, özellikle gerilme geçişinin azalmasını ve azalarak ilerlemesini sağlar. Bu yöntem kullanılarak yapışma yüzeyine geçen gerilmeler azaltılmış ve sıyrılma engellenmiş olacaktır. Buna ek olarak istenmeyen gerilme yığılmalarının da oluşmasından kaçınılmış olacaktır [85].

### **2.4.3. Onarım Malzemesi Seçimi**

Yapışma ve yama dayanımları belirlenen yama için daha sonra uygun malzeme seçimi yapılır. Yama malzemesinin seçiminde dikkat edilmesi gereken unsurlar; uygun rijitliği elde etmek için gerekli yama kalınlığı, kullanım esnasındaki sıcaklık ve çevre faktörleri, malzemenin kimyasal yapısı ve maliyetleridir. Tercih edilen malzemenin hasarlı bölgede beklenen koşullara, yorulma gerilmeleri ve maksimum gerilmelere dayanması gerekir [86].

Sıklıkla kullanılan yama malzemeleri; boron/epoksi ve karbon/epoksi prepreglerdir. Boron/epoksinin, karbon/epoksiye göre mekanik özellikleri daha iyidir fakat karbonun onarım işleminin uygulanmasından sonra ortaya çıkan artık gerilmelerin düşük seviyede olmasına sebep olan termal genleşme katsayısı daha yüksektir. Boronun kesimi karbondan daha zordur ve ek olarak boronun serilmesi de zordur çünkü kolay şekil verilemezler. Ayrıca az bulunurlar ve bu nedenle de pahalıdırlar. Öte yandan karbon prepregleri ucuzdur ve rahatlıkla bulunurlar. Yeterli seviyede mekanik özellikleri bulunan karbon prepregler kolay kesilebilir ve onarılan yapının şeklini rahatlıkla alabilirler. Belirtilen bu nedenlerle karbon yama kullanımı

boron yamaya göre daha yaygındır. Olumsuz bir yönü ise alüminyum ile birleştiklerinde korozyon oluşur [86].

#### **2.4.4. Yapıştırıcı Seçimi**

Onarım işleminin tokluk ve dayanımı yapıştırıcının modülü ve kayma dayanımı ile bağlantılıdır. Yapışma dayanımı gerekliliğine, kullanım çevre şartlarına ve kürleşmesine göre değişiklik gösterir. Çoğunlukla epoksi bazlı yapıştırıcılar kullanılır ve bunun sebebi de epoksinin yüksek sıcaklıklarda kullanılabilmesidir. Ayrıca darbe yükleri ve yorulma açısından toklukta iyi bir davranış gösterir. Yüksek kayma modülüne sahip yapıştırıcılar gerilme şiddet faktörlerini azaltırlar. Düşük kayma modüllü olanlar ise yapıştırıcı tabakasındaki deformasyonun daha fazla olmasına neden olurlar. Bunun yanında levhadaki çatlak açılma miktarı ve gerilme, çatlak ilerleme hızının da artmasına sebep olurlar [87].

Bir onarım işleminin başarılı bir şekilde uygulanabilmesi için iyi yüzey hazırlamaya, iyi bir birleşim tasarımına, ihtiyaca uygun bir yapıştırıcı seçimine ve uygun kürleşmesine ihtiyaç vardır. Yapıştırıcı seçimi için yapıştırılacak malzemelerin belirlenmesine, dayanıklılık ve diğer ihtiyaçların saptanmasına gereksinim vardır [88].

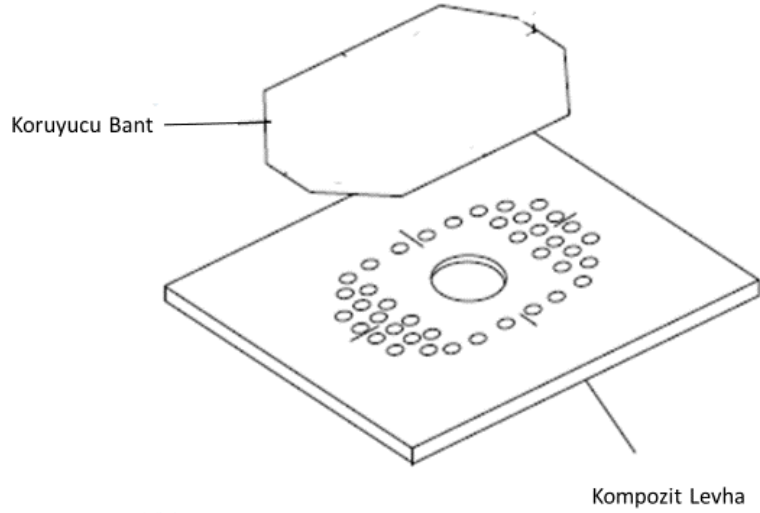
#### **2.5. Onarım Metodları**

Farklı çeşitlerde onarım metodları bulunmaktadır. Bu seçenekler arasında en önemli detay doğru yama tipini seçmektir. Birinci aşamada hasarın tipi incelenmeli, sonrasında hangi düzeyde olduğu belirlenmelidir. Bu düzeyler geçici, kalıcı veya onarılmayacak seviyede şeklinde açıklanabilir. Belirlenen düzeye göre hangi çözümün daha uygun olacağı seçilmelidir. Küçük boyutlardaki çatlaklar veya kozmetik hasarlar, hasar bölgesinin reçine ile doldurulması şeklinde onarılabılırken, yama ile gerçekleştirilen onarımlar büyük hasar bölgeleri için uygulanmalıdır. Yapılan yamalar hasara uğramış ve tabakalı olan yapıyı iyileştirmeye çalışırlar. Ekipmanların yeterliliği, metodun sağlayacağı olumlu ve olumsuz yönler düşünülerek en uygun seçim yapılmalıdır [89].

##### **2.5.1. Koruyucu Bant Metodu**

Bu onarım bant metodunda onarım işlemi için kullanılan bant ince alüminyum folyodur. 0,018 mm ila 0,050 mm arasında farklı kalınlıklarda bulunabilirler. Folyonun arka yüzeyinde ince bir kâğıt yer alır ve bu kâğıdın altında basınca karşı hassas olan yapışkan bulunur. Kâğıdın çıkarılması ile folyo, yapışma yüzeyi

temizlendikten sonra üzerine yapıştırılır. Folyo serbest kalmış fiberlerin dağılmasını ve sıvı girişini engeller. Kalıcı olmayan geçici bir onarım metodudur. Dayanım açısından bir katkısı beklenmez fakat küçük hasarların büyüüp kötüleşmesini engeller ve böylelikle yapılacak olan kalıcı yama boyutlarının daha küçük olmasını sağlar [90].



**Şekil.2.16.** Koruyucu Bant Metodu [91]

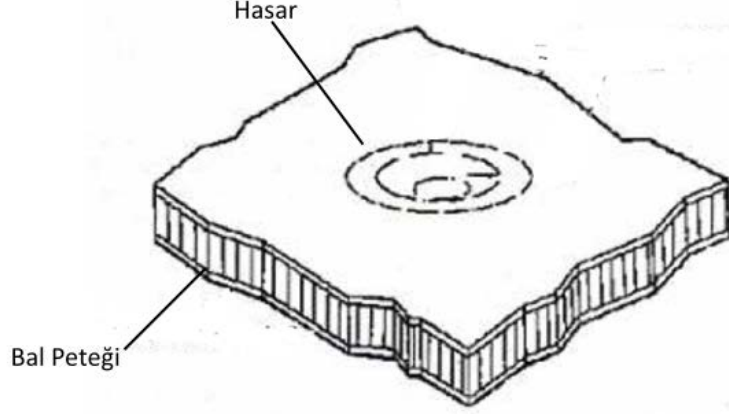
### **2.5.2. Reçine ile Kapatma (Tıkama) Metodu**

Reçine ile kapatma koruyucu bant metoduna benzer şekilde geçici olarak yapılan onarım yöntemidir. Bu yöntemde hasarlı bölgede, serbest olarak bulunan fiberleri sabitlemek ve hasar alanındaki boyutunun büyümesini durdurmak için onarım reçinesi kullanılır [85].

Tabaka içinde kopmalar olması halinde de bu bölgelere reçine enjekte edilir, böylece tabakalar arası dayanım artırılır. Bu uygulama, tabaka kopmasının kullanım sırasında ortaya çıkması halinde yapılır. Tabaka kopması olan bölgenin kenarına delik açılarak bu alandan hasarlı bölgeye reçine enjekte edilir [92].

### **2.5.3. Doldurma Onarımı Metodu**

Bu metot, içerisinde uygun hasar boyutlarında küçük delikler barındıran bal peteği yapısındaki paneller için kullanılır. Yapıda bulunan delikler, oda sıcaklığında ve onarıma uygun doldurma bileşiği ile doldurulmalıdır. Bu metot ile kalıcı yama gerçekleştirilene kadar su girişi engellenmiş olur [85].



**Şekil.2.17.** Doldurma Onarımı Metodu [93]

#### **2.5.4. Civatalanmış Çiftler ile Mekanik Onarım**

Civatalanmış çiftler ile onarım metodu iki farklı tipte uygulanabilir;

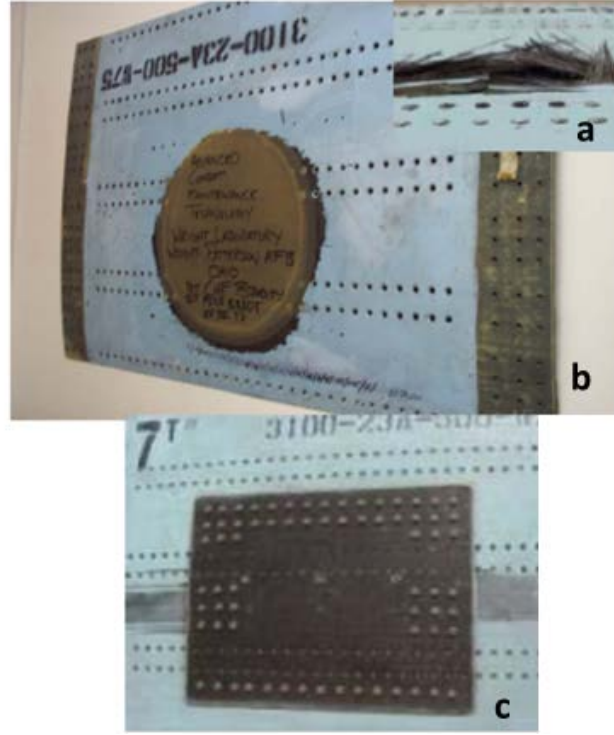
a) Bu metot geçici bir onarım işlemi olarak uygulanır. Onarım işleminde kullanılan cıvata dış kısmında metal kabuk ve iç kısmında büyük çaplı rondelalardan oluşur. Hasara uğramış büyük boyutlarda bir kanat veya sıyrılmış olan dış kaplamanın bal peteği iç bölgesinin ve panellerinin civatalanarak birleştirilmesi ile onarım işlemi uygulanır. Uygulanan bu metotta uçağın tüm panelini onarmak karmaşaya sebep olmakla birlikte olası bir sonucu parçanın hurda hale gelmesi gibi bir sonuç ile karşılaşılma ihtimali vardır. Hurda haline gelmemiş olsa bile pahalı ve kapsamlı bir onarım ihtiyacı oluşturur [94].

b) Kalıcı bir onarım uygulaması olarak gerçekleştirilen bu metotta; eğer onarım katı, tabakalı olan bir kanat kabuğuna veya buna benzer yapıdaki panellere uygulanacaksa kalıcı bir onarım olması mümkündür. Kalıcı bir onarım için plaka üzerinde bütün deliklerin açılması ve son hale getirilmesinden sonra anot işlemi yapılması ya da diğer uygun işlemlerin gerçekleştirilmesi gereklidir. Kalıcı civatalama onarımı çoğunlukla 2 mm'den kalın olan panellere uygulanır. Cıvata onarımı sahip olduğu bu yönüyle, kalın panel onarımı sırasında geniş dolgu bağlantısı yapılması gerektiren yapışmalı yama onarımı uygulamasından daha hafif ve ucuz olur [94].

Genel olarak mekanik onarımda;

Kompozit elemanların onarımında pek çok durum için mekanik bağlantılı onarım kullanılabilir. Bu uygulama yapıştırıcı ve kürleme gerektirmez. Yama malzemesi seçiminde önemli bir etken olarak termal genleşme katsayısı görülür.

Çünkü yama ve hasarlı elemanın birbirinden farklı olarak genişmesi ya da büzülmesi kalıcı şekil değişimine neden olur. Bunların yanında mekanik bağlantılı onarım, yapıştırılmalı onarımda ihtiyaç duyulan kimyasallarla yüzey hazırlama işlemini de gerektirmez. Bu yöntemi son derece basit olup, düşük seviyede işçilik ve ekipman ile uygulanabilir. Mekanik bağlantılı onarım kalın tabakalar için uygundur [95].



**Şekil.2.18.** a) Oluşan Hasar b) Dolgu Yama ile Onarımı c) Civatalı Çift ile Onarımı [96]

### 2.5.5. Oda Sıcaklığında El Yatırması Metodu

Onarım koşullarına karşı gösterdiği uygunluk ve sahip olduğu avantajlarından dolayı sıkça başvurulmuş bir metottür. Bu metodun avantajlarını ise aşağıdaki gibidir:

- Kullanılan bant veya kumaş onarım uygulanan yüzeyin şekline rahatlıkla uyum sağlar.
- Hızlı kürleşme ihtiyacı olmadıkça ısıtmaya gerek yoktur.
- Sağlam bir yapışma gerçekleşmesi için vakum basıncı yeterlidir.
- Ortaya çıkan herhangi bir performans kaybını azaltmak için ek kumaş tabakaları kullanılır [97].



### **2.5.6. Yüksek Sıcaklıklarda El Yatırması Metodu**

Bu metot, oda sıcaklığında el yatırması metodunda belirtilen bütün avantajları kapsar. Buna ilave olarak daha büyük boyutlardaki parçalarda da kullanılması mümkündür. Sahip olduğu bir tek dezavantajı bulunmaktadır ve bu da ısıya olan ihtiyacıdır. Isıl çiftler doğru olarak yerleştirilmeli ve kürleme işlemi esnasında yama alanındaki işlem sıcaklığının minimum seviyede tutulması gereklidir. Bu sistemler için ideal kür sıcaklığı yaklaşık 95°C seviyeleridir [98].

### **2.5.7. Pre-Preg Onarımı**

Pre-preg İngilizceden gelmektedir ve açılımı “preimpregnated” şeklindedir ve anlam olarak “önceden emdirilmiş” manasındadır. Önceden reçine emdirilmiş olan kumaşlar manasında bu tabir kullanılır [99].

Pre-preg onarımı aşağıdaki gibi farklı şekillerde gerçekleştirilebilir;

- Düşük sıcaklık pre-preg kürleşmesi: sıcak kürleşen el yatırması metodu ile benzerlik gösterir ve yaklaşık olarak 95°C de gerçekleşir.
- 120°C’ de kürleşen pre-pregler: yaklaşık olarak 120°C-180°C aralığında çalışacak olan yapılarda ihtiyaç duyulan onarım parçası olarak kullanılabilirler.
- 180°C’ de kürleşen pre-pregler: 180°C’ de çalışacak olan yapılar için onarım parçası olarak kullanılabilirler. 120°C den düşük sıcaklıklarda kullanılmaları uygun değildir. Genel olarak yüksek sıcaklıklar için tercih edilirler.

Yapılacak olan onarım işlemi büyük boyutlarda ise pre-preg onarım yöntemi ile yapılmalıdır. Üretimi gerçekleştirenler genelde pre-preg onarım metodunu tercih ederler. Bunun sebebi ise reçine karıştırma işlemine gerek yoktur çünkü pre-preg onarımı metodu gerçekleştirilen onarımlar kolay ve temiz olur [99].

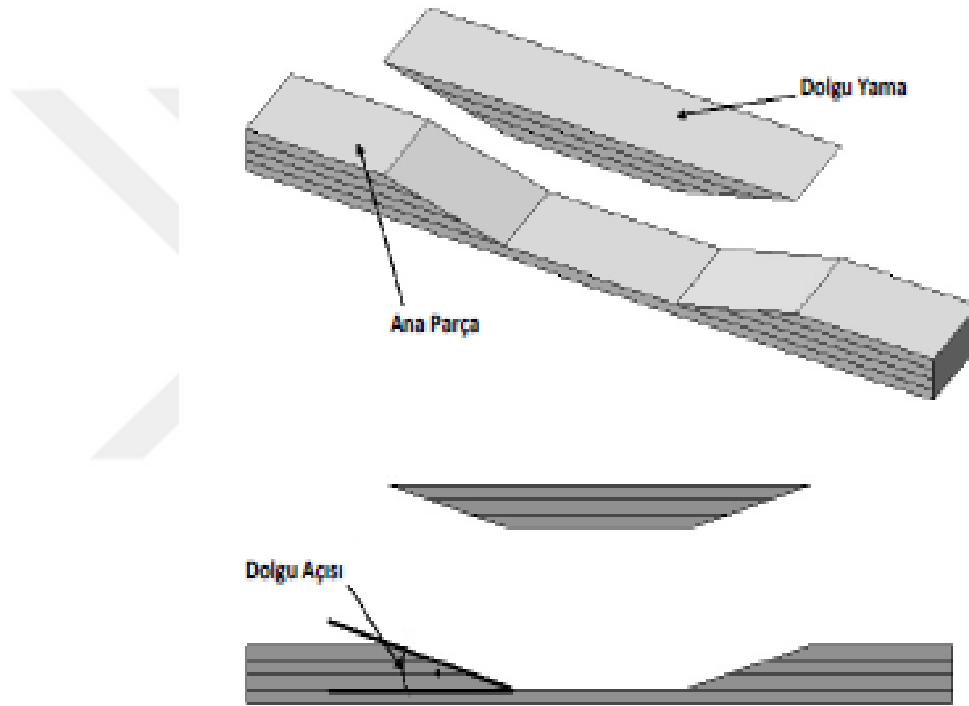
### **2.5.8. Dolgu ve Basamaklı Yama Onarımı**

Bu onarım metodu ile yapılan uygulamalar en çok tercih edilen onarım metotlardır.

#### **2.5.8.1. Dolgu Yama Onarımı**

Dolgu yamalar yüksek bağlantı dayanımı istenilen bölgelerde kullanılır. Onarım işlemi hassas bir şekilde gerçekleştirilmelidir. Genelde dolgu yamalar panel şeklinde bulunan düz olan parçalara uygulanır. Bu yöntemin sahip olduğu avantajlar

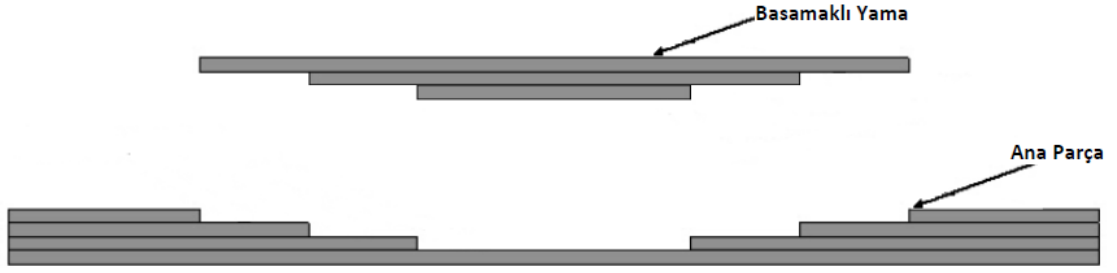
şöyledir; yapışma yüzeyinde oluşan kayma gerilmeleri dağılımının daha düzgün olduğu gözlenir ve bu sayede de delaminasyon etkisini azaltarak sıyırılmanın oluşmasını engeller. Bindirme şeklinde ek yamalar da uygulanarak, yama bölgesi dışına taşma gerçekleştirilir ve bu işlemde sıyırılma etkisini azaltır. Bu yöntemin dezavantajları ise; onarımın zor ve bu sebeple de uzun zaman alan bir işlem gerektirmesidir. Yamayı yerleştirebilmek amacıyla yapılan yüzey boşaltma işleminde ihtiyaç duyulan dolgu açısını yakalamak için hasarsız olan bölgeden beklenenden daha fazla malzeme kaldırılır [100].



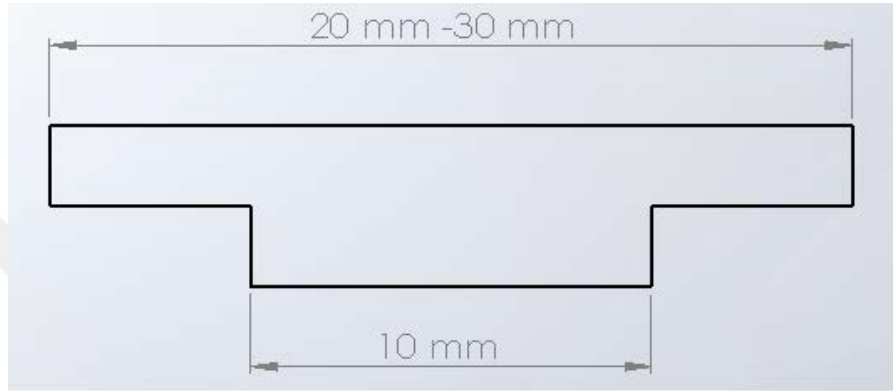
Şekil.2.19. Dolgu yama ve dolgu açısı modelleri [100]

#### 2.5.8.2. Basamaklı Yama Onarımı

Basamaklı yama ile onarım sıklıkla uygulanan bir yöntemdir. Hassas bir şekilde uygulanmaları gereklidir. Cam fiber ve aramid kumaşlarında rahat bir şekilde uygulanan bu metodun karbon fiberlerde uygulanması ise oldukça zordur. Bunun sebebi ayırık tabakaların düzenlenmesi esnasında, kesim işleminde birbirini üzerinde düzgün bir konumda bulunmasını sağlamak çok fazla hassasiyet gerektirir [100].



Şekil.2.20. Basamaklı yama onarımı [100]



Şekil.2.21. Deneilerde Kullanılacak Model

## 2.6. Onarım İşlemini Etkileyen Faktörler

### 2.6.1. Yama Bindirme Uzunluğu

Yama bindirme uzunluğu kısa seçilmiş olan bir yama kullanılması halinde, yapıştırıcı tabaka plastik kayma gerilmesi etkisi altında olur. Yama bindirme işleminde uzunluk arttıkça, yapıştırıcı tabakadaki kayma gerilmelerinin daha geniş alana yayılmaları sağlanır. Yama ile levha arasında yer alan yapışma yüzeyinin merkezinde oluşan kayma gerilmeleri minimum düzeyde bulunur. Bunun sebebi ise yapışma merkezinde yama ve levhanın deplasman uyumsuzluğunun en az seviyede bulunmasıdır. Bu sebeple yapışma merkezinde elastik kayma gerilmesi etkin bir şekilde görülürken, plastik kayma gerilmesi yama kenarlarında etkili olur. Yama bindirme uzunluğu arttırılırsa, plastik kayma gerilmeleri arasında yer alan elastik kayma bölgesinin genişlemesi sağlanmış olunur [101].

### 2.6.2. Yama Kalınlığı

Yama tasarımında, yamada kullanılan malzemenin çekme rijitliği önemli bir unsurdur. Onarım işlemi uygulanan malzemeye yapıştırılan yama, malzemedeki hasar ilerlemesini azaltır, hasarlı malzemedeki yükü taşır ve hasar bölgesinin kapanmasını

sağlayarak destek oluşturur. Yamanın son haldeki dayanımı da tasarımı belirleme aşamasında önemli bir unsurdur. Yamadan beklenen ise çekme veya kayma yükü altında çok kolay hasara uğramamasıdır [101].

Kalınlığı ince olan bir yama kullanarak yapılan onarım işlemlerinde çatlak üzerinde bulunan fiberlerde ve yapıştırıcı tabakasında yüksek gerilme konsantrasyonu ortaya çıkar. Bu gerilmelerin azalması için yama kalınlığının artırılması problemin çözümü için bir seçenek olarak değerlendirilir [102].

### **2.6.3. Yüzey Hazırlama**

Yapıştırma işlemi uygulanarak gerçekleştirilen birleşimlerde, yapışma yüzeylerinin kalitesi yapışma dayanımı üzerinde etkin bir rol üstlenir. Bu nedenle yapıştırma işleminin iyi bir şekilde gerçekleşmesi için yüzey hazırlama işlemlerinin yapılması gereklidir. Yüzey hazırlama işlemleri yüzeyin ıslanabilirliğini artırmasının yanında yüzeyde bulunan zayıf tabakaların yok olmasını sağlar. Yüzey hazırlama operasyonlarına ihtiyaç duyulmasının sebebi, kompozit malzeme yüzeylerinin katkı maddeleri ve kalıp ayırıcı maddeler gibi kimyasallar ile etkileşim halinde bulunmasıdır. Yapışma yüzeyini kirletici maddeler olarak adlandırılan bu gruptan temizlemek için zımpara kâğıdı ile mekanik aşındırma ya da kimyasallarla temizlenmesi işlemlerine ihtiyaç vardır [46].

Yapılan mekanik aşındırma işlemi sonrası kompozit malzemenin yüzeylerinin pürüzlü bir halde olmasını sağlar. Bu pürüzler sonucunda malzemenin yapışma yüzeyi artar ve yüzeyde bulunan kirletici maddeler olarak adlandırılan grup ve partiküller atılır. Yapılan bu aşındırma işleminde tel fırça, zımpara ve zımpara kâğıdı gibi aşındırıcılar kullanılır [46].

Kimyasallarla temizleme işleminde metal ve metal olmayan malzemelerin yüzeylerinde bulunan kirletici maddeler çeşitli kimyasallar yardımıyla malzeme yüzeyinden atılır [46].

### **2.6.4. Yama Malzemesinin Seçimi**

Yama malzemesinin seçiminde dikkate alınan hususlar şöyledir;

- Malzemenin kullanımı ve temin kolaylığı
- İşlenebilirliği,
- Performansı [87]

Yamanın sahip olduğu rijitlik onarım işlemini üç farklı biçimde etkiler. Bunlardan birincisi, onarımda kullanılan yama malzemesinin seçiminde daha rijit yama kullanılmasıyla, yamanın yük taşıma kapasitesi arttırılır. Bu şekilde hasarlı malzeme üzerinde oluşan yükler azaltılmış olur. İkincisi, daha rijit yama malzemesi kullanılarak onarımı yapılan kompozit elemanın çatlak açılma seviyesi daha da azalır. Yapılan bu uygulama ile çatlak ucunda oluşan gerilmelerin azalması sağlanır. Üçüncüsü ise daha da rijit yama malzemesi kullanarak onarım uygulanan eleman ile yama arasında oluşan ayrılma etkisi artar. Bunun nedeni de yama malzemesi ne kadar rijit kullanılırsa yama ile onarılan elemanın oluşan deplasman farkları birbirinden uzaklaşır. Bu olay da eleman ile yama arasında bulunan yapıştırıcı tabakasında kayma gerilmelerinin oluşmasına sebebiyet verir ve bu sonucunda da ayrılmalar ortaya çıkar. Bahsedilen bu nedenlerden dolayı onarım malzemesinin çok fazla rijit seçilmemesi gereklidir [101].

#### **2.6.5. Yapıştırıcı Etkisi**

Yapıştırıcıların kullanımı günümüzde makine, yapı elemanlarının bağlantılarında ve onarım işlemlerinde artan bir önem göstermektedir. Özellikle uzun zamanlı çalışmalarda bağlantı güvenilirliğinin istendiği uzay, otomotiv, havacılık, elektronik paketleme altyapı sistemi, spor, tıp, inşaat ve deniz gibi endüstrilerde yapıştırıcılar, zaman geçtikçe geleneksel bağlantı yöntemlerinden olan perçin, lehim, civata ve kaynağın yerini almaktadır [103].

Yapıştırıcı ile birleştirme işlemi kırılan, kopan hasarlı malzemelerin onarımı ve tekrar kullanımını için, mekanik birleştirme metotlarından biridir. Yapıştırıcı ile yapılan birleştirmeler daha kolay uygulanır ve diğer metotlara göre daha uzun ömürlüdür. Yapıştırıcılarla yalnızca kopan, kırılan ve hasara uğrayan malzemeler değil, endüstride yeni kullanıma açılacak olan birçok malzemede de yapıştırıcı ile birleştirme işlemini kolay ve daha kısa sürede uygulamak mümkündür [104].

- A. Basınç duyarlı yapıştırıcılar:** Akrilik, kauçuk türünde yapıştırıcılardır. Isıtılarak sertleştirilmektedir. Sertleştirme ısıları önemli bir etkendir [105].
- B. Yapısal yapıştırıcılar:** İki bileşenli ve tek bileşenden oluşan yapıştırıcılar olarak kullanılır. İki bileşenden oluşan yapıştırıcılar belirli bir bekleme süresine gereksinim duyarlar ve bu süre dayanımını belirler. Tek bileşenli

yapıştırıcılar yalnızca yüksek sıcaklıklarda katılaşır ve en önemli etkendir [105].

**C. Hot melt yapıştırıcılar:** Eriyik bir halde yüzeye uygulanırlar. Soğuduğunda yapışma işlemi gerçekleşir. Çoğunlukla şasi ve kapı uygulamalarında kullanılırlar. Termoplastik reçineler ve polyamid esaslı yapıştırıcılar sahip oldukları avantajlarından dolayı sıklıkla tercih edilirler [105].

**D. Çözücü bazlı yapıştırıcılar:** Sıklıkla sağlam yapışmaya ihtiyaç duyulmayan ve yüksek dayanım beklenmeyen yerlerde kullanılırlar. Çözücünün buharlaşmasıyla yapışma işlemi gerçekleşmiş olur. Yapıştırıcı içeriğinde kolay çözünebilen nitril, neopren ve SBR gibi kauçuk çeşitleri vardır. Yüzeye püskürtme şeklinde uygulanır. Bu özelliklerinden dolayı plastik, kauçuk gibi malzemelerin metallere yapıştırılması mümkündür. Genel olarak otomotiv sektöründe kullanılırlar ve araçların iç dekorasyonunda yer alırlar [106].

Yapıştırımalı birleşim uygulamalarında kullanılan yapıştırıcılar macun, köpük ve film şeklindedirler [87]. En çok tercih edilen yapıştırıcılar akrilikler, silikonlar, polyolefinler ve üretanlardır [46].

### 3. MATERYAL VE YÖNTEMLER

#### 3.1. Materyal

Araştırmada kullanılan materyaller aşağıdaki gibidir;

- Cam elyaflı epoksi fiber: 40 kV elektriksel değere sahiptir. Mekanik aşınma direnci yüksek ve talaş kaldırma işlemi zordur. + 110° C ısı dayanımı, mükemmel seviyede elektrik ve ısı izolasyonu dayanımından dolayı birçok alanda kullanıma uygundur. Aşağıda bulunan şekilde FR-4 sütununda malzemeye ait özellikler verilmiştir.

**Tablo.3.1.** Cam Elyafı Epoksi Fiber Özellikleri

Engineering (Epoxy) Laminates Typical Properties					
Epoksi Levhaların Özellikleri					
Properties Özellikler	Test Method Test Metodu	Unit Birim	G10 EPGC 201 Hgw 2372	FR-4 EPGC 202 Hgw 2372.1	G11 EPGC 203 Hgw 2372.4
Physical properties Fiziksel Özellikler					
Specific gravity Özgöl Ağırlık	ISO 1183-A	g/cm <sup>3</sup>	1,8 - 2,0	1,8 - 2,0	1,8 - 2,0
Water absorption Su Emme	ISO 62/1	Mg	15	10	15
Temperature index Sıcaklık Dayanımı	IEC 216	T.I	155	180	180
Flammability Alevlenebilirlik	UL 94	-	-	FV0	-
Electrical properties Elektriksel Özellikler					
Elec. Strength in oil at 90°C 90°C Yağda Elek. Dayanımı	IEC 243-1	Kv/mm	18	13	18
Dissipation factor 50 Hz Dağılım Faktörü	IEC 250		0,008	0,005	0,008
Permittivity 50 Hz Geçirgenlik	IEC 250		5	4,5	5



**Şekil.3.1.** Cam Elyafı Epoksi Fiber Üretimi



**Şekil.3.2.** İşlenmemiş Hammadde (Cam Elyafı Epoksi Fiber)

- Wiko Montage Klebstoff yapıştırıcı ve dolgu maddesi olarak kullanılmıştır.
  - Kür süresi 24-48 saat
  - Kesme mukavemeti 10 N/mm<sup>2</sup>
  - Hava direnci yüksektir
- Wiko 05 epoxy transparent yapıştırıcı kullanılmıştır.
  - Sıcaklık direnci yaklaşık 120°C ye kadardır
  - Su,gaz ve yağa karşı dirençlidir
  - Yüksek gerilme mukavemetine sahiptir





Şekil.3.3. a) Montage Klebstoff b) epoxy transparent

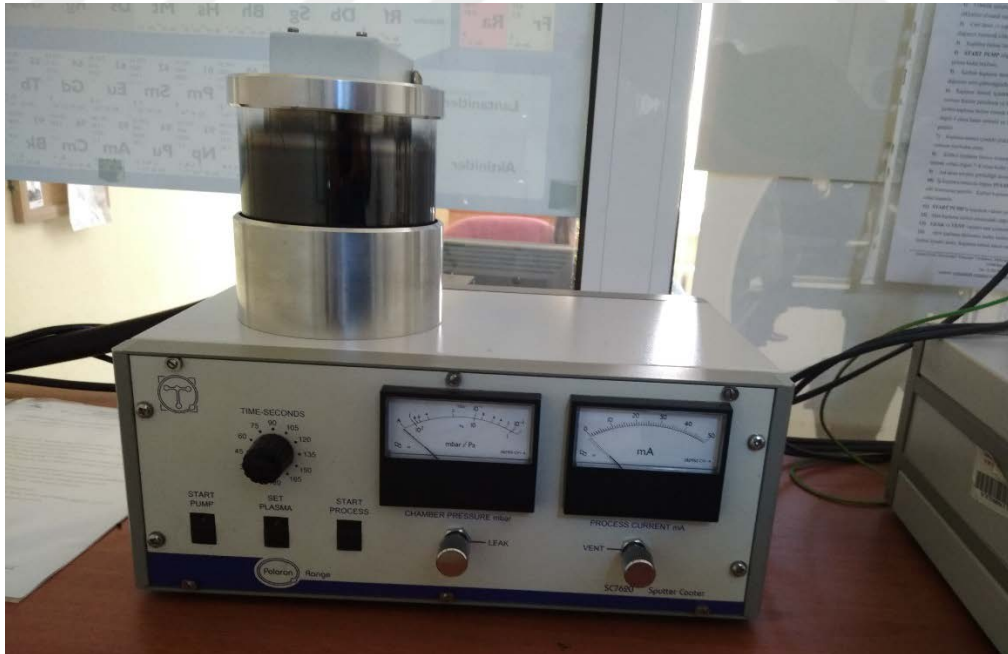
- Kalınlıkları 0,018 mm ve 0,050 mm olan Al folyo bantlar kullanılmıştır.
- Çekme Deney Cihazı: Shimadzu AG-IS (100 kN)
- Çentik Darbe Deney Cihazı
- Püskürtmeli Kaplama (Sputter Coater ) Cihazı : Polaran Range sc7620
- Scanning Electron Microscope (SEM): Jeol JSM-6060



Şekil.3.4. Shimadzu AG-IS ( 100 kN ) - (Çekme-Üç Nokta Eğme)



Şekil.3.5. Jeol JSM-6060 (SEM)



Şekil.3.6. Polaran Range sc7620 (Sputter Coater)

### 3.2. Yöntemler

Yapılan deneysel çalışmalar aşağıdaki tablolarda belirtilmiştir;

**Tablo.3.2.** Çekme Deney Tablosu

<b>Çekme Deneyi</b>	
1. Deney	10x20 Basamaklı Yama (Epoxy Yapıştırıcı)
2. Deney	10x30 Basamaklı Yama (Epoxy Yapıştırıcı)
3. Deney	30° Dolgu Yama (Epoxy Yapıştırıcı)
4. Deney	45° Dolgu Yama (Epoxy Yapıştırıcı)
5. Deney	60° Dolgu Yama (Epoxy Yapıştırıcı)
6. Deney	10x20 Basamaklı Yama (Montage Klebstoff)
7. Deney	10x30 Basamaklı Yama (Montage Klebstoff)
8. Deney	30° Dolgu Yama (Montage Klebstoff)
9. Deney	45° Dolgu Yama (Montage Klebstoff)
10. Deney	60° Dolgu Yama (Montage Klebstoff)

**Tablo.3.3.** Üç Nokta Eğme Deney Tablosu

<b>Üç Nokta Eğme Deneyi</b>	
1. Deney	10x20 Basamaklı Yama (Epoxy Yapıştırıcı)
2. Deney	10x30 Basamaklı Yama (Epoxy Yapıştırıcı)
3. Deney	30° Dolgu Yama (Epoxy Yapıştırıcı)
4. Deney	45° Dolgu Yama (Epoxy Yapıştırıcı)
5. Deney	60° Dolgu Yama (Epoxy Yapıştırıcı)
6. Deney	10x20 Basamaklı Yama (Montage Klebstoff)
7. Deney	10x30 Basamaklı Yama (Montage Klebstoff)
8. Deney	30° Dolgu Yama (Montage Klebstoff)
9. Deney	45° Dolgu Yama (Montage Klebstoff)
10. Deney	60° Dolgu Yama (Montage Klebstoff)
11. Deney	Tıkama Metodu (Montage Klebstoff)
12. Deney	Tıkama Metodu+Al Bant 0.018 mm (Montage Klebstoff)
13. Deney	Tıkama Metodu+Al Bant 0.050 mm (Montage Klebstoff)

**Tablo.3.4.** Charpy Darbe Deneyi Tablosu

<b>Charpy Darbe Deneyi</b>	
1. Deney	10x20 Basamaklı Yama (Epoxy Yapıştırıcı)
2. Deney	10x30 Basamaklı Yama (Epoxy Yapıştırıcı)
3. Deney	30° Dolgu Yama (Epoxy Yapıştırıcı)
4. Deney	45° Dolgu Yama (Epoxy Yapıştırıcı)
5. Deney	60° Dolgu Yama (Epoxy Yapıştırıcı)
6. Deney	10x20 Basamaklı Yama (Montage Klebstoff)
7. Deney	10x30 Basamaklı Yama (Montage Klebstoff)
8. Deney	30° Dolgu Yama (Montage Klebstoff)
9. Deney	45° Dolgu Yama (Montage Klebstoff)
10. Deney	60° Dolgu Yama (Montage Klebstoff)
11. Deney	Tıkama Metodu (Montage Klebstoff)
12. Deney	Tıkama Metodu+Al Bant 0.018 mm (Montage Klebstoff)
13. Deney	Tıkama Metodu+Al Bant 0.050 mm (Montage Klebstoff)

### 3.2.1. Çekme Deneyi

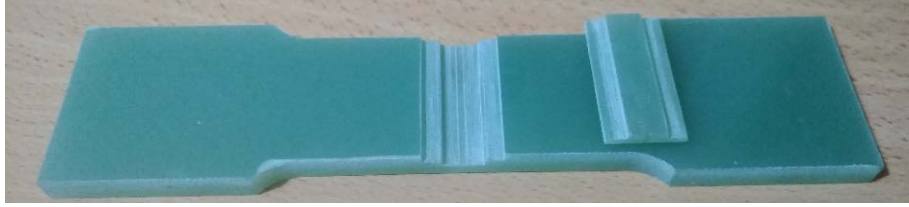
Çekme deneyi; statik yük etkisindeki malzemelerin gösterdikleri plastik ve elastik davranışlarının belirlenmesi, gösterdikleri mekanik davranışlara göre sınıflandırma yapabilmek amacı ile gerçekleştirilir. Çekme deneyinde standart çekme numunelerine ait mukavemet değerleri gözlemlenir. Elde edilen değerler yorumlanarak, malzemelerin sahip olduğu mekanik özellikler belirlenir [107].

Çekme deney cihazı; birbirine paralel olarak konumlanmış olan ve aşağı-yukarı hareket edebilen alt üst gövde, deney parçasının bağlanması için bulunan iki çene ve bunlara hareket veren, bu iki büyüklüğü ölçme görevi üstlenen ünitelerden oluşur. Çenelerden birisi sabit kalırken diğer çenenin sabit bir hızda hareket ettirilmesi ile deney parçasına değişken miktarlarda çekme kuvveti uygulanır [107].

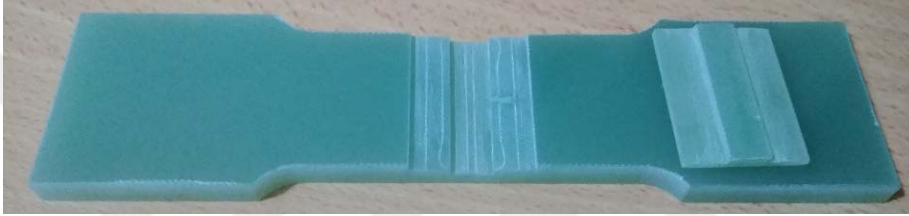
Deneyler ASTM D 638 standardında hazırlanan numuneler üzerinde ve Shimadzu AG- IS (100 kN) marka çekme deney cihazında, oda sıcaklığında, 1 mm/dk çekme hızında gerçekleştirilmiştir. Deneylerde kullanılan numunelere ait görseller aşağıda belirtilmiştir.



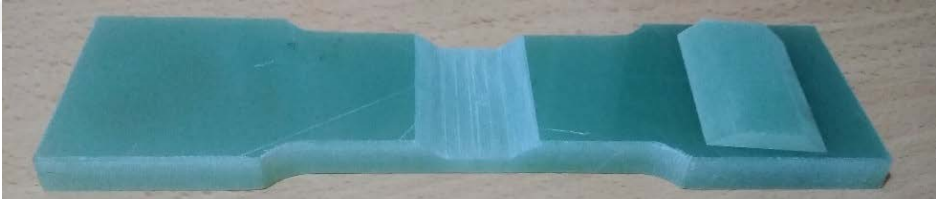
**Şekil.3.7.** Dolu (Hasarsız) Çekme Deney Numunesi



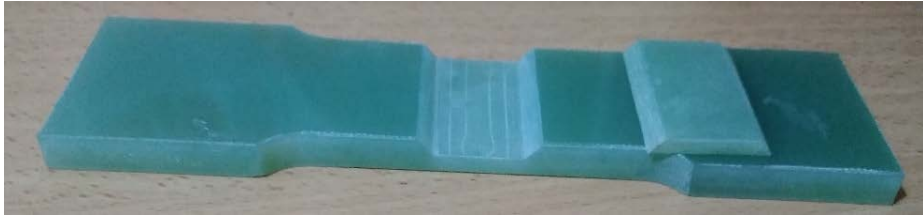
**Şekil.3.8.** 10x20 Basamaklı Yama Çekme Deney Numunesi



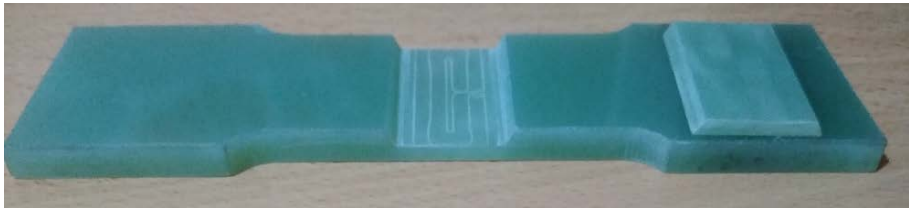
**Şekil.3.9.** 10x30 Basamaklı Yama Çekme Deney Numunesi



**Şekil.3.10.** 30° Dolgu Yama Çekme Deney Numunesi



**Şekil.3.11.** 45° Dolgu Yama Çekme Deney Numunesi



**Şekil.3.12.** 60° Dolgu Yama Çekme Deney Numunesi

### 3.2.2. Üç Nokta Eğme Deneyi

Eğme deneyinin yapılış amacı, malzemenin dayanımı ile ilgili tasarım bilgilerini saptamak ve malzemenin eğilmeye karşı gösterdiği mekanik özellikleri belirlemektir. Kiriş vb. elemanlar enine yük taşırlar ve eğilme etkisi altındadırlar. Bu yüzden kirişin tüm bölgelerinde eğilme momentleri oluşur. Bu durum da eğilme gerilmesi ile ilgilidir [108].

Deneyler ISO 178 standardında hazırlanan numuneler üzerinde ve Shimadzu AG- IS (100 kN) marka çekme deney cihazında, oda sıcaklığında, 1 mm/dk çekme hızında gerçekleştirilmiştir. Deneylerde kullanılan numunelere ait görseller aşağıda belirtilmiştir.



Şekil.3.13. Dolu (Hasarsız) Üç Nokta Eğme Deney Numunesi



Şekil.3.14. 10x20 Basamaklı Yama Üç Nokta Eğme Deney Numunesi



Şekil.3.15. 10x30 Basamaklı Yama Üç Nokta Eğme Deney Numunesi



Şekil.3.16. 30° Dolgu Yama Üç Nokta Eğme Deney Numunesi



**Şekil.3.17.** 45° Dolgu Yama Üç Nokta Eğme Deney Numunesi



**Şekil.3.18.** 60° Dolgu Yama Üç Nokta Eğme Deney Numunesi



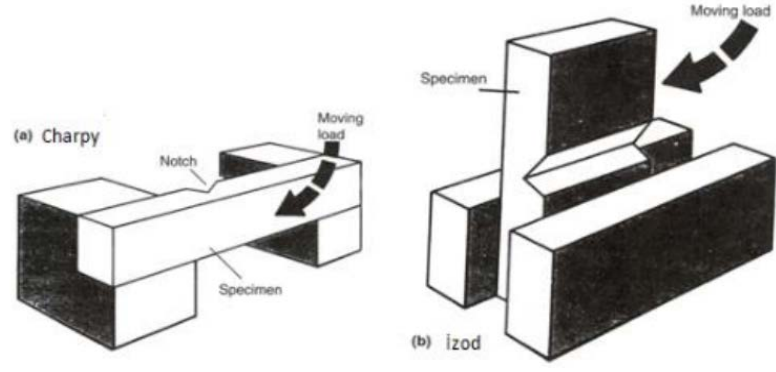
**Şekil.3.19.** Tıkama Metodu Eğme Deney Numunesi



**Şekil.3.20.** Tıkama Metodu ve Al Bant Eğme Deney Numunesi

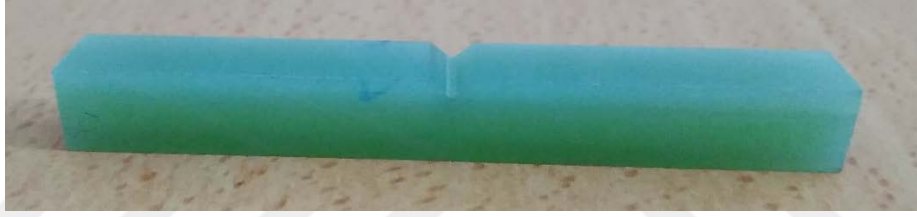
### **3.2.3. Charpy Darbe Testi**

Charpy ve Izod darbe deneylerinde çentik açılmış olan deney numunesi, standart bir yükseklikten serbest bırakılan sarkaç ile darbe etkisine maruz bırakılır. Darbeden sonra sarkacın çıkmış olduğu yükseklik belirlenerek sarkacın ilk ve son hareket konumlarındaki enerji farkı numune tarafından soğurulan darbe enerjisi olarak ölçülür. Bu iki yöntemde de numuneye uygulanacak darbenin limiti bellidir ve bu iki test yönteminin birbirlerinden birkaç farklılıkları vardır. Bu farklar şekil 3.20 de görüldüğü gibi desteklerin dikey ve yatay olmasıdır. Izod darbe deneyi yaygın olarak polimer malzemelerin deneyinde kullanılırken Charpy darbe deneyi kompozit malzemelerin deneyinde kullanılmıştır [109, 110].



**Şekil.3.21.** a ) Charpy Darbe Deneyi b ) İzod Darbe Deneyi [110]

Deneyel çalışmada kullanılan numuneler ISO 179 standardına göre hazırlanmıştır. BMS charpy darbe cihazı kullanılarak oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Deneylerde kullanılan numunelere ait görseller aşağıda belirtilmiştir.



**Şekil.3.22.** Dolu (Hasarsız) Charpy Darbe Deney Numunesi



**Şekil.3.23.** 10x20 Basamaklı Yama Charpy Darbe Deney Numunesi



**Şekil.3.24.** 10x30 Basamaklı Yama Charpy Darbe Deney Numunesi





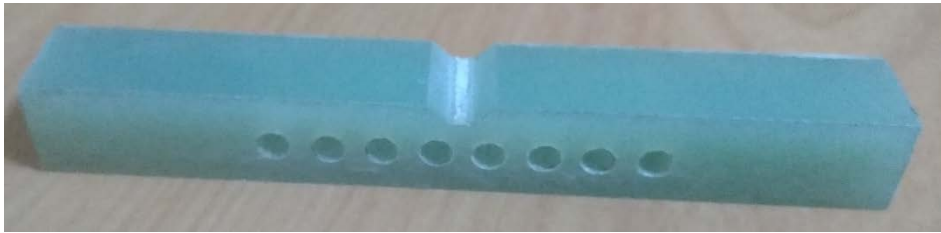
**Şekil.3.25.** 30° Dolgu Yama Charpy Darbe Deney Numunesi



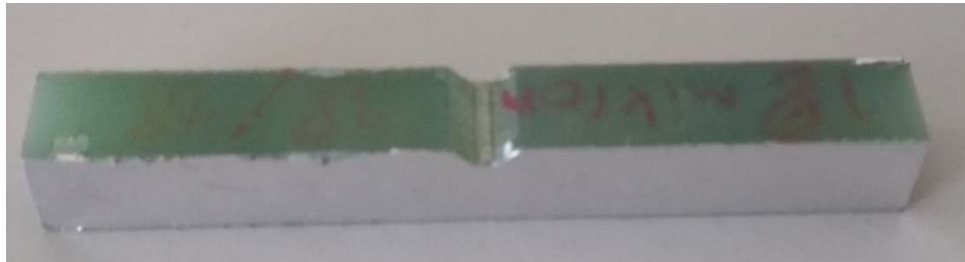
**Şekil.3.26.** 45° Dolgu Yama Charpy Darbe Deney Numunesi



**Şekil.3.27.** 60° Dolgu Yama Charpy Darbe Deney Numunesi



**Şekil.3.28.** Tikama Metodu Charpy Darbe Deney Numunesi



**Şekil.3.29.** Tikama Metodu ve Al Bant Charpy Darbe Deney Numunesi

### 3.2.4. Scanning Electron Microscope (SEM)

SEM ile görüntüleme işlemi, objektif mercekler arasına yerleştirilen iki adet elektromanyetik sarım çifti ile gerçekleştirilir. Bu çiftlerden biri, demetin numune üzerinde (x) yönünde hareket etmesini sağlarken, kalan çift (y) yönünde hareket etmesini sağlar. Tarama işleminin yapılabilmesi için sarımlardan birine elektrik sinyali verilir ve elektron demetinin mercek sisteminin merkez ekseninin bir yönünden numuneye çarpması sağlanır. Bu x sarımlarına verilen elektrik sinyalinin zamanın bir fonksiyonu olarak değiştirmesiyle elektron demetinin numune üzerinde düz bir doğru boyunca hareket etmesi ve daha sonra tekrar başlangıç (orijinal) konumuna dönmesi sağlanır. Çizgi taraması bittikten sonra y sarımları kullanılarak demet y yönünde kaydırılır ve sonra x sarımlarını kullanarak x yönünde demet kaydırması tekrarlanır [111, 112].

Numunelerin deneyler sonrası ortaya çıkan yapılarını incelemek için SEM taraması yapılmıştır. Numunelerin yalıtkan olması görüntü alınmasına engel olmaktadır. Bunun önüne geçmek için Polaran Range sc7620 marka cihaz ile vakumlu ortamda püskürtmeli kaplama yapılmıştır. Kaplama içeriği altın-paladyum (%20-%80) alaşımından oluşmaktadır.



Şekil.3.30. Numunelerin Kaplama Cihazına Yerleşimi



Şekil.3.31. a) Kaplama Öncesi b) Kaplama Sonrası



Şekil.3.32. SEM Cihazına Numune Yerleşimi

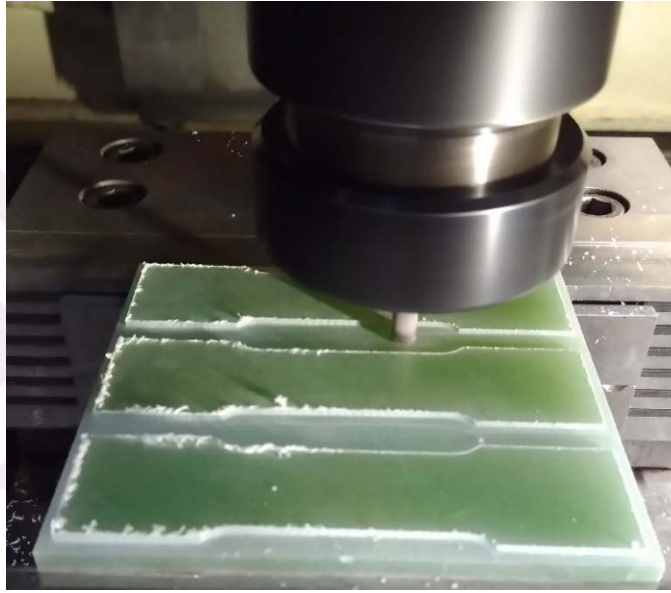
### 3.3. Deney Numunelerinin Hazırlanışı

Önceki bölümlerde detaylı bilgileri verilen cam elyafli epoksi fiber levha satıcı firmadan temin edilmiştir. Deneyler için gerekli numuneler bu levhaya yapılan talaşlı imalat işlemi sonrası, aşağıda belirtilen standartlara uygun olarak hazırlanmıştır.

Çekme deneyi için ASTM D 638 standardı,

Eğme deneyi için ISO 178 standardı,

Darbe deneyi için ISO 179 standardı.

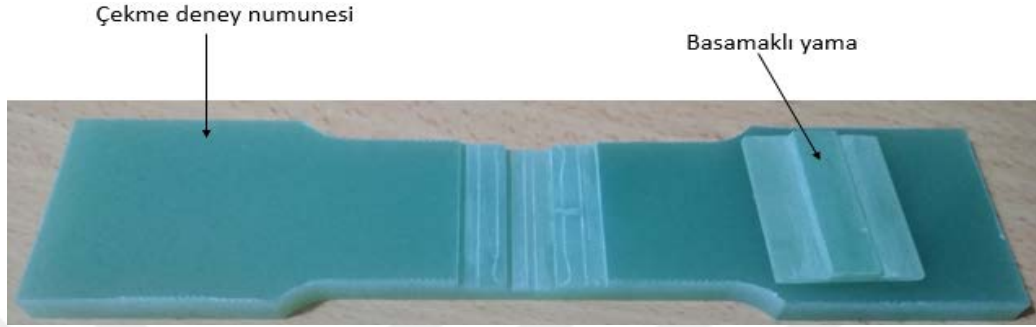


Şekil.3.33. CNC Freze ile Numunelerin Hazırlanması

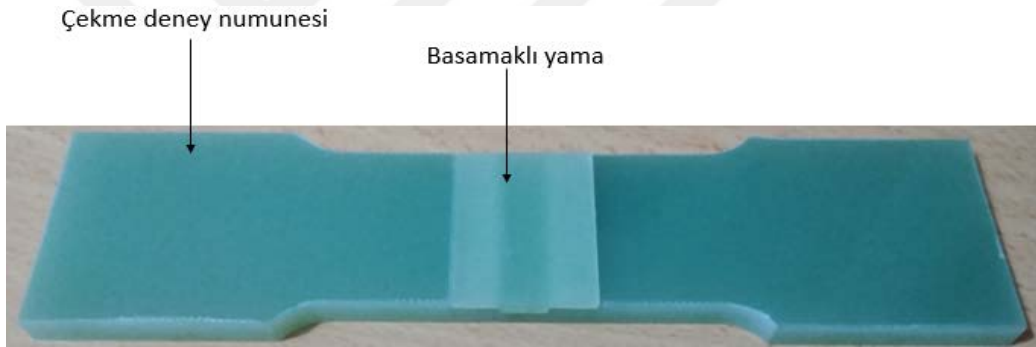


Şekil. 3.34. CNC Freze ile Numunelerin Hazırlanması

Talaşlı imalat işlemi sonrasında hazır hale gelen numuneler ve yamalarda sonraki adım olan birleştirme işlemine geçilmiştir. Çekme, eğme ve darbe deneylerinde kullanılan numunelerin yamalar ile onarım işleminde gruplama aşağıdaki görsellerdeki gibi gerçekleştirilmiştir. Yama ve gövdenin birleşimi yapıştırıcı ile yapılarak kürtleme süresi tamamlandıktan sonra deneysel çalışmalara başlanmıştır.



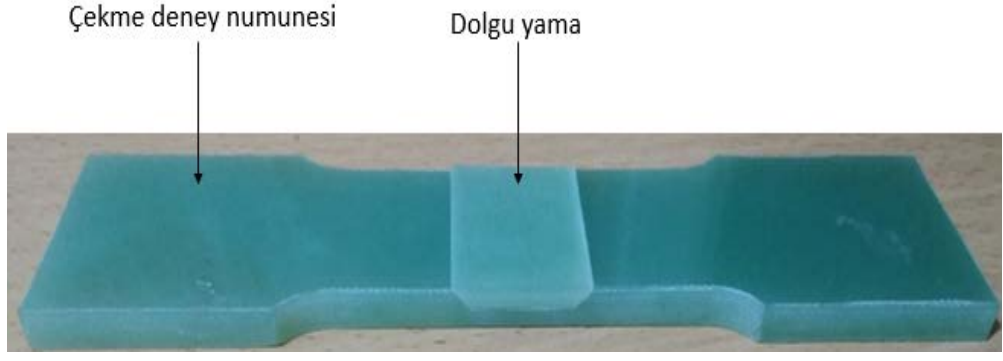
**Şekil.3.35.** Talaşlı İmalat Sonrası Numune ve Yama



**Şekil.3.36.** Numune ile Yamanın Birleşimi



**Şekil.3.37.** Talaşlı İmalat Sonrası Numune ve Yama



**Şekil.3.38.** Numune ile Yamanın Birleşimi



**Şekil.3.39.** Talaşlı İmalat Sonrası Numune ve Yama



**Şekil.3.40.** Numune ile Yamanın Birleşimi

#### 4. DENEYSEL VERİLER

Bu bölümde yapılan deney sonuçları grafikler ve tablolar halinde sunulmuş, SEM görüntüleri verilmiştir. Elde edilen bilgiler doğrultusunda yorumlanarak sonuçlandırılmıştır.

##### 4.1. Hasarsız (Dolu Numune) ve Hasarlı (Kanallı Numune) Malzeme Deney Sonuçları

Uygulanan yamaların ve kullanılan yapıştırıcının etkilerini karşılaştırabilmek amacıyla hasarsız ve hasarlı malzeme deneyleri yapılmıştır. Hasarlı malzemeye herhangi bir yama işlemi uygulanmamıştır.

##### 4.1.1. Charpy Darbe Deney Sonuçları

ISO 179 standardına uygun olarak hazırlanan numuneler üzerinde yapılan deneyler sonucunda;

- Hasarsız (dolu) malzemede ortaya çıkan kırılma enerjisi 26 Joule'dür.
- Hasarlı (kanallı) malzemede ortaya çıkan kırılma enerjisi ise 10 Joule'dür.

##### 4.1.2. Çekme Deney Sonuçları

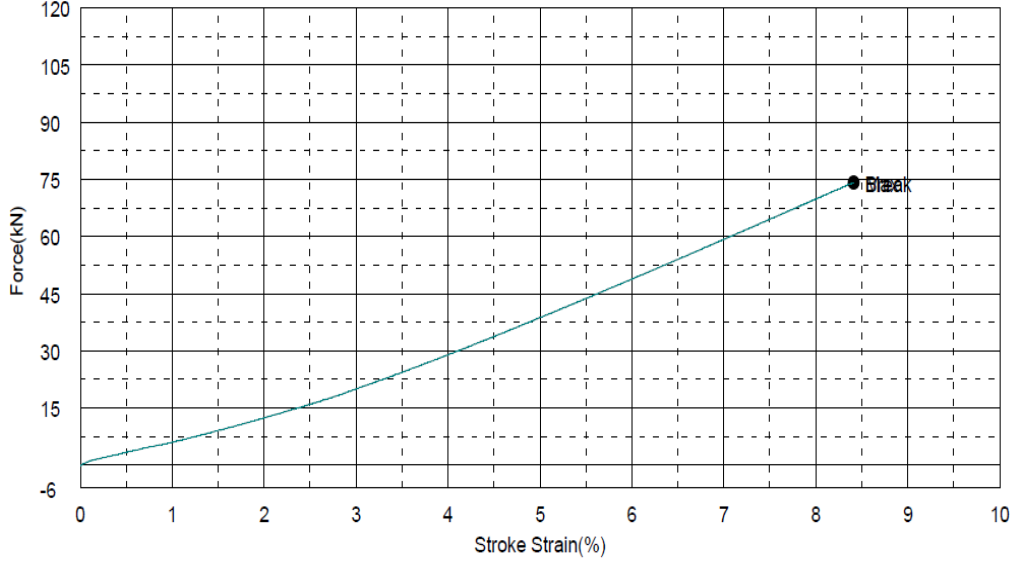
ASTM D 638 standardına uygun olarak hazırlanan numuneler üzerinde yapılan, hasarsız ve hasarlı malzemelere ait sonuçlar aşağıda belirtilmiştir;

##### 4.1.2.1. Hasarsız (Dolu) Numune Çekme Deneyi

Aşağıda bulunan tablo 4.1 ve şekil 4.1 de görüldüğü üzere hasarsız (dolu) numunede kopma anında oluşan maksimum kuvvet 74.13 kN, maksimum gerilme ise 231.66 N/mm<sup>2</sup> dir.

**Tablo.4.1.** Hasarsız (Dolu) Numune Çekme Deney Tablosu

Name	YP Strain	Max Force	Max Disp	Max Stress	Max Strain
Parameter	0,1 %/FS				
Units	%	kN	mm	N/mm <sup>2</sup>	%
1 - 1	-.-	74,1312	6,72800	231,660	8,41000



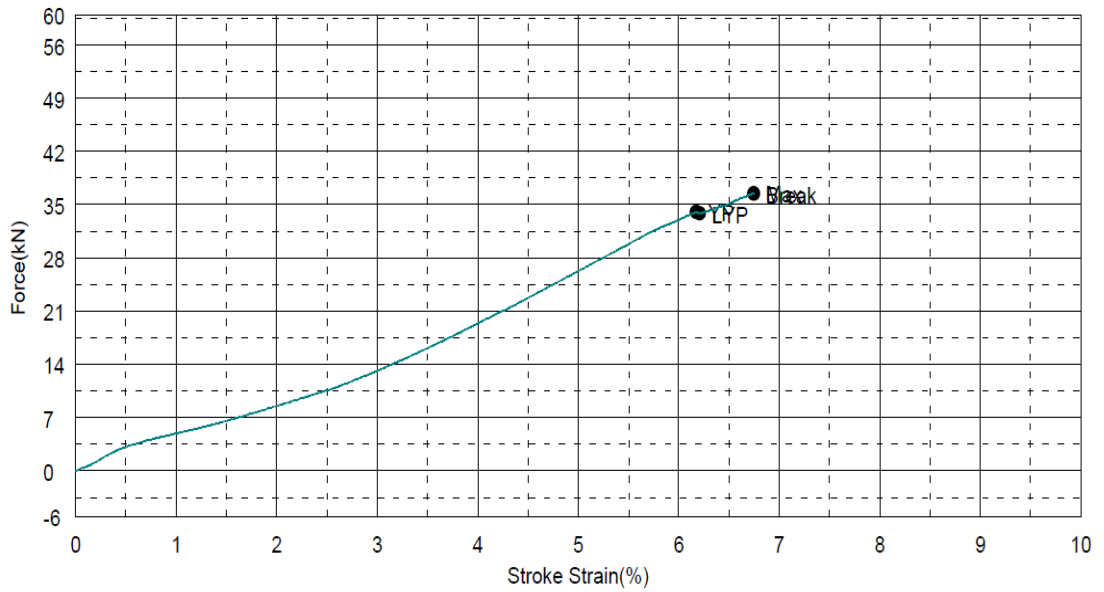
**Şekil.4.1.** Hasarsız (Dolu) Numune Çekme Deney Grafiği

#### 4.1.2.2. Hasarlı (Kanallı) Numune Çekme Deneyi

Aşağıda bulunan tablo 4.2 ve şekil 4.2 de görüldüğü üzere hasarlı numunede kopma anında oluşan maksimum kuvvet 36.53 kN, maksimum gerilme ise 114.17 N/mm<sup>2</sup> dir.

**Tablo.4.2.** Hasarlı (Kanallı) Numune Çekme Deney Tablosu

Name	YP Strain	Max_Force	Max_Disp	Max_Stress	Max_Strain
Parameter	0,1 %/FS				
Units	%	kN	mm	N/mm2	%
1 - 1	6,17250	36,5344	5,39400	114,170	6,74250



**Şekil.4.2.** Hasarlı (Kanallı) Numune Çekme Deney Grafiği



### 4.1.3. Eğme Deney Sonuçları

ISO 178 standardına uygun olarak hazırlanan numuneler üzerinde yapılan, hasarsız ve hasarlı malzemelere ait sonuçlar aşağıda belirtilmiştir;

#### 4.1.3.1. Hasarsız (Dolu) Numune Deneyi

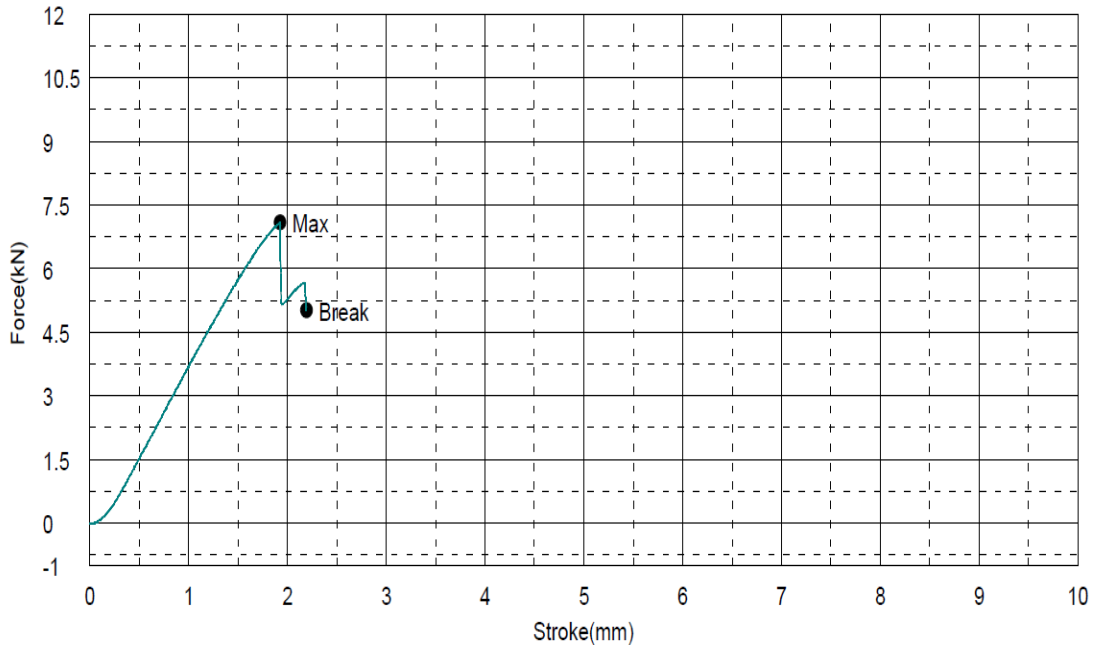
Aşağıda bulunan tablo 4.3 ve şekil 4.3 te görüldüğü üzere hasarsız numunede oluşan maksimum kuvvet 7.09 kN, bağlar arası kopmalar başladıktan sonra kırılma anında oluşan kuvvet ise 5.02 kN dur. Oluşan maksimum gerilme 638.15 N/mm<sup>2</sup> dir.

**Tablo.4.3.** Hasarsız (Dolu) Numune Eğme Deney Tablosu

Name	LYP_Force	LYP_Displacement	LYP_Stress	LYP_Strain	Max_Force
Units	kN	mm	N/mm <sup>2</sup>	%	kN
1 - 1	--	--	--	--	7,09062

Name	Max_Displacement	Max_Stress	Max_Strain	Break_Force	Break_Displacement
Units	mm	N/mm <sup>2</sup>	%	kN	mm
1 - 1	1,92700	638,156	3,21167	5,02187	2,19300



**Şekil.4.3.** Hasarsız (Dolu) Numune Eğme Deney Grafiği

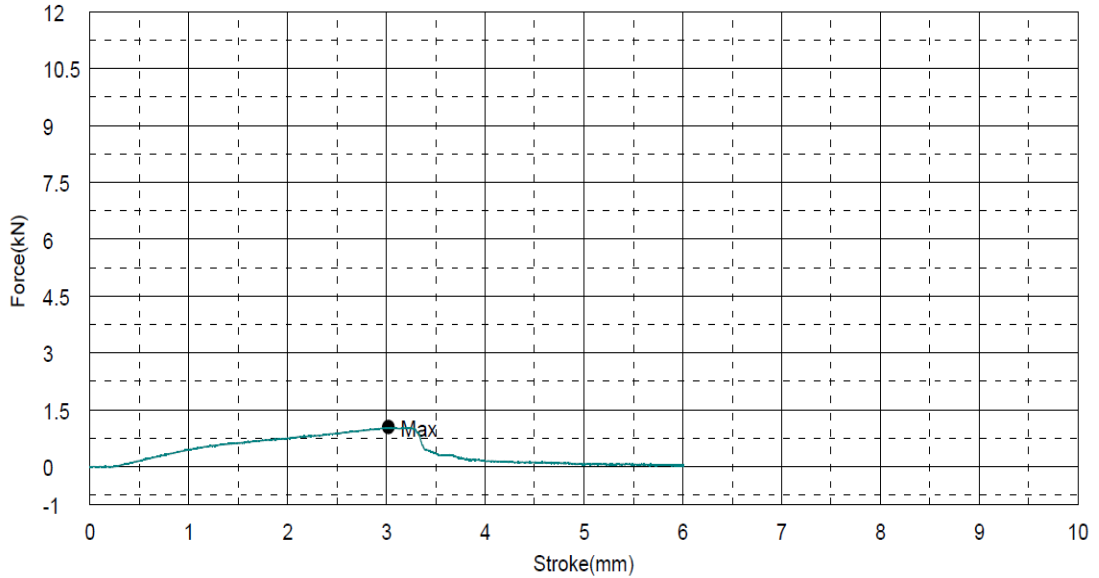
#### 4.1.3.2.Hasarlı (Kanallı) Numune Deneyi

Aşağıda bulunan tablo 4.4 ve şekil 4.4 te görüldüğü üzere hasarlı numunede kopma anında oluşan maksimum kuvvet 1.04 kN dur ve kuvvet maksimumuna ulaştığında kırılma gerçekleşmiştir. Oluşan maksimum gerilme ise 93.93 N/mm<sup>2</sup> dir.

**Tablo.4.4.** Hasarlı (Kanallı) Numune Eğme Deney Tablosu

Name	LYP_Force	LYP_Disp	LYP_Stress	LYP_Strain	Max_Force
Units	kN	mm	N/mm2	%	kN
1 - 1	--	--	--	--	1,04375

Name	Max_Disp	Max_Stress	Max_Strain	Break_Force	Break_Disp
Units	mm	N/mm2	%	kN	mm
1 - 1	3,02000	93,9375	5,03333	--	--



**Şekil.4.4.** Hasarlı (Kanallı) Numune Eğme Deney Grafiği

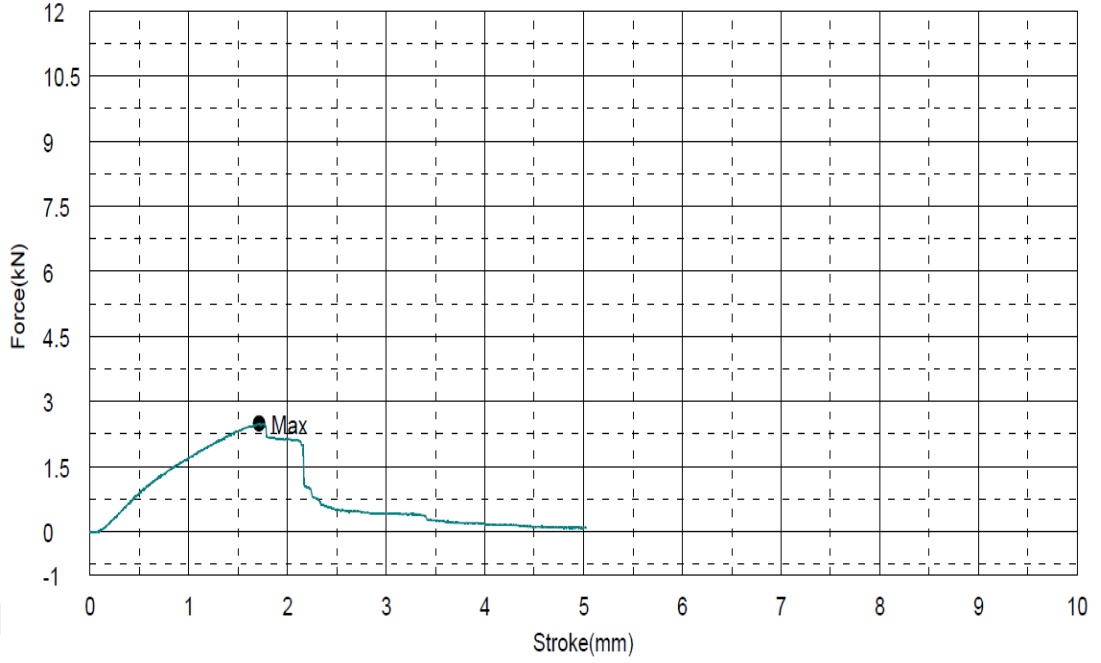
#### 4.1.3.3.Tıkama Metodunda Hasarlı (Kanallı) Numune Sonuçları

Aşağıda bulunan tablo 4.5 ve şekil 4.5'te görüldüğü üzere tıkama metodu için hazırlanan hasarlı numunede oluşan maksimum kuvvet 2.49 kN, maksimum gerilme 224.43 N/mm<sup>2</sup> dir.

**Tablo.4.5.** Tıkama Metodu Hasarlı (Kanallı) Numune Eğme Deney Tablosu

Name	LYP_Force	LYP_Disp	LYP_Stress	LYP_Strain	Max_Force
Units	kN	mm	N/mm2	%	kN
1 - 1	--	--	--	--	2,49375

Name	Max_Disp	Max_Stress	Max_Strain	Break_Force	Break_Disp
Units	mm	N/mm2	%	kN	mm
1 - 1	1,71200	224,438	2,85333	--	--



**Şekil.4.5.** Tıkama Metodu Hasarlı (Kanallı) Numune Eğme Deney Grafiği

#### **4.2. Yama Uygulanmış Numune Deney Sonuçları**

Hasarlı numuneler üzerine uygulanan yama işlemleri sonrasında deneyler gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneylerden elde edilen veriler doğrultusunda, yama tipleri ve yapıştırıcılar arasında karşılaştırmalar yapılacaktır.

##### **4.2.1. Charpy Darbe Deney Sonuçları**

ISO 179 standardına uygun olarak hazırlanan numunelere yapılan yama işlemi sonrası darbe deneyine ait sonuçlar aşağıdaki tabloda verilmiştir;

Tablo 4.6 da yer alan deney verileri doğrultusunda, en yüksek verim 10x30 basamaklı yama tipinde elde edilmiştir. Yapıştırıcı olarak ise Epoxy yapıştırıcı Montage Klebstoff yapıştırıcıya göre daha fazla dayanım sağlamıştır. Tıkama metodunda Montage Klebstoff yapıştırıcı kullanıştır. Bu yapıştırıcı üzerine yapılan Al bant takviyesi ise darbe karşısında herhangi bir etki göstermemiştir.

**Tablo.4.6.** Onarılmış Numune Charpy Deney Sonuç Tablosu

<b>Charpy Darbe Deneyi</b>		
<b>Yama Tipi</b>	<b>Yapıştırıcı</b>	<b>Kırılma Enerjisi (Joule)</b>
10x20 Basamaklı Yama	Epoxy Yapıştırıcı	22 Joule
	Montage Klebstoff	20 Joule
10x30 Basamaklı Yama	Epoxy Yapıştırıcı	24 Joule
	Montage Klebstoff	22 Joule
30° Dolgu Yama	Epoxy Yapıştırıcı	18 Joule
	Montage Klebstoff	16 Joule
45° Dolgu Yama	Epoxy Yapıştırıcı	20 Joule
	Montage Klebstoff	18 Joule
60° Dolgu Yama	Epoxy Yapıştırıcı	16 Joule
	Montage Klebstoff	14 Joule
Tıkama Metodu	Montage Klebstoff	18 Joule
Tıkama Metodu+Al Bant	Montage Klebstoff + Al	18 Joule (0.018mm)
	Bant (0.018-0.050 mm)	18 Joule (0.050mm)

#### **4.2.2. Çekme Deney Sonuçları**

ASTM D 638 standardına uygun olarak hazırlanan numunelere yapılan yama işlemi sonrası çekme deneylerine ait sonuçlar, yapıştırıcılara göre gruplanarak alt başlıklarda verilmiştir.

##### **4.2.2.1.Epoxy Yapıştırıcı ile Yama Sonrası Çekme Deneyi**

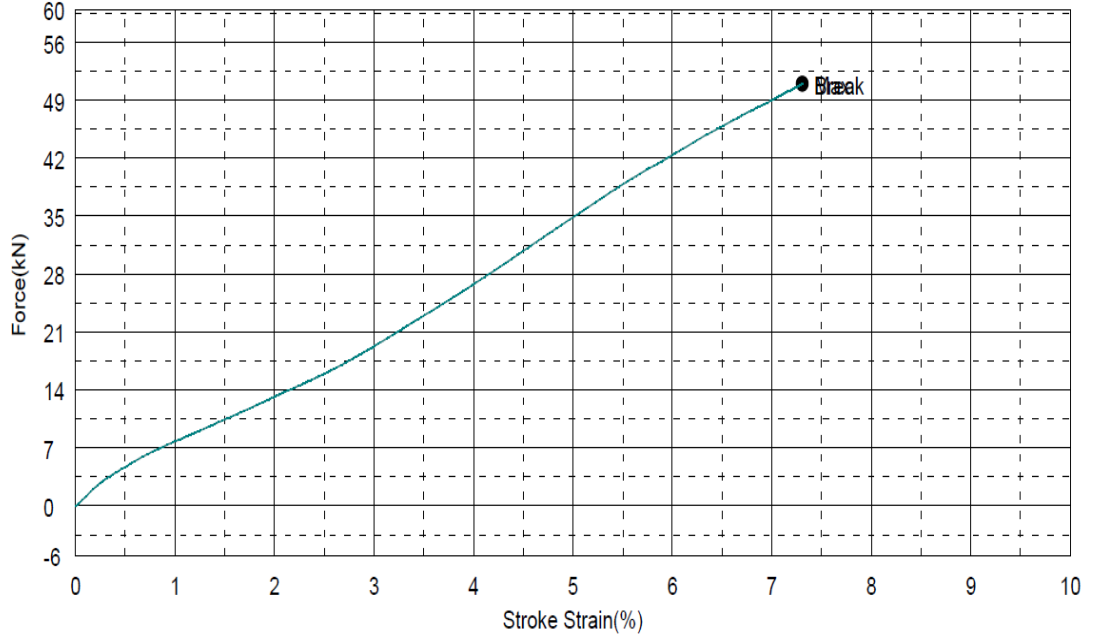
Epoxy yapıştırıcı kullanılarak gerçekleştirilen onarım işlemleri sonrası yapılan çekme deney sonuçları aşağıdaki gibidir;

###### **4.2.2.1.1. 10x20 Basamaklı Yama**

Hasarlı numune üzerine, Epoxy yapıştırıcı kullanılarak yapılan 10x20 yama işlemi sonrası, aşağıdaki tablo 4.7 ve şekil 4.6 da görüleceği gibi maksimum kuvvet 51.02 kN, maksimum gerilme ise 159.44 N/mm<sup>2</sup> olmuştur.

**Tablo.4.7.** 10x20 Basamaklı Yama Epoxy Numunesi Çekme Deney Tablosu

Name	YP Strain	Max Force	Max Disp	Max Stress	Max Strain
Parameter	0,1 %/FS				
Units	%	kN	mm	N/mm2	%
1 - 1	--	51,0219	5,84350	159,443	7,30438



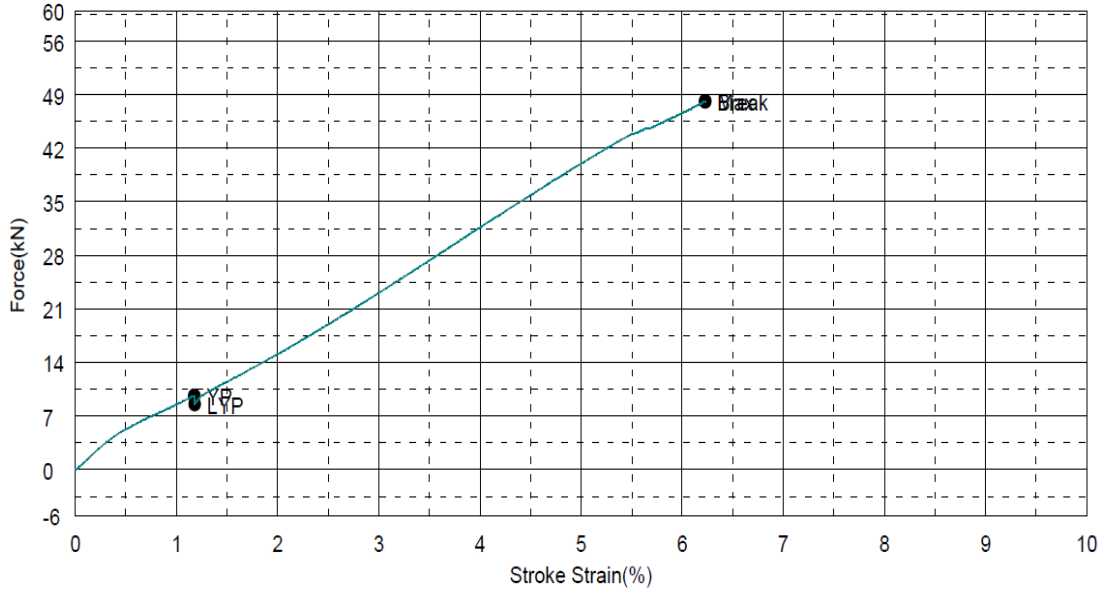
**Şekil.4.6.** 10x20 Basamaklı Yama Epoxy Numunesi Çekme Deney Grafiği

#### 4.2.2.1.2. 10x30 Basamaklı Yama

Hasarlı numune üzerine, Epoxy yapıştırıcı kullanılarak yapılan 10x30 yama işlemi sonrası, aşağıdaki tablo 4.8 ve şekil 4.7 de görüleceği gibi maksimum kuvvet 48.15 kN, maksimum gerilme ise 150.48 N/mm<sup>2</sup> olmuştur.

**Tablo.4.8.** 10x30 Basamaklı Yama Epoxy Numunesi Çekme Deney Tablosu

Name	YP Strain	Max Force	Max Disp	Max Stress	Max Strain
Parameter	0,1 %/FS				
Units	%	kN	mm	N/mm2	%
1 - 1	1,17500	48,1563	4,98200	150,488	6,22750



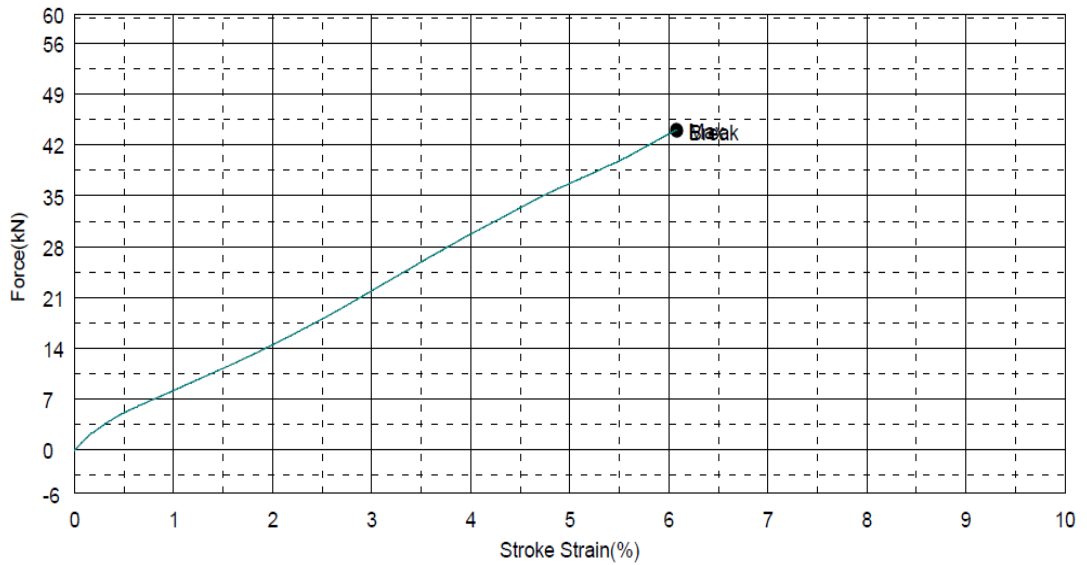
**Şekil.4.7.** 10x30 Basamaklı Yama Epoxy Numunesi Çekme Deney Grafiği

#### 4.2.2.1.3. 30° Dolgu Yama

Hasarlı numune üzerine, Epoxy yapıştırıcı kullanılarak yapılan 30° dolgu yama işlemi sonrası, aşağıdaki tablo 4.9 ve şekil 4.8 de görüleceği gibi maksimum kuvvet 44.10 kN, maksimum gerilme ise 137.82 N/mm<sup>2</sup> olmuştur.

**Tablo.4.9.** 30° Dolgu Yama Epoxy Numunesi Çekme Deney Tablosu

Name	YP Strain	Max_Force	Max_Disp	Max_Stress	Max_Strain
Parameter	0,1 %/FS				
Units	%	kN	mm	N/mm2	%
1 - 1	--	44,1031	4,86100	137,822	6,07625



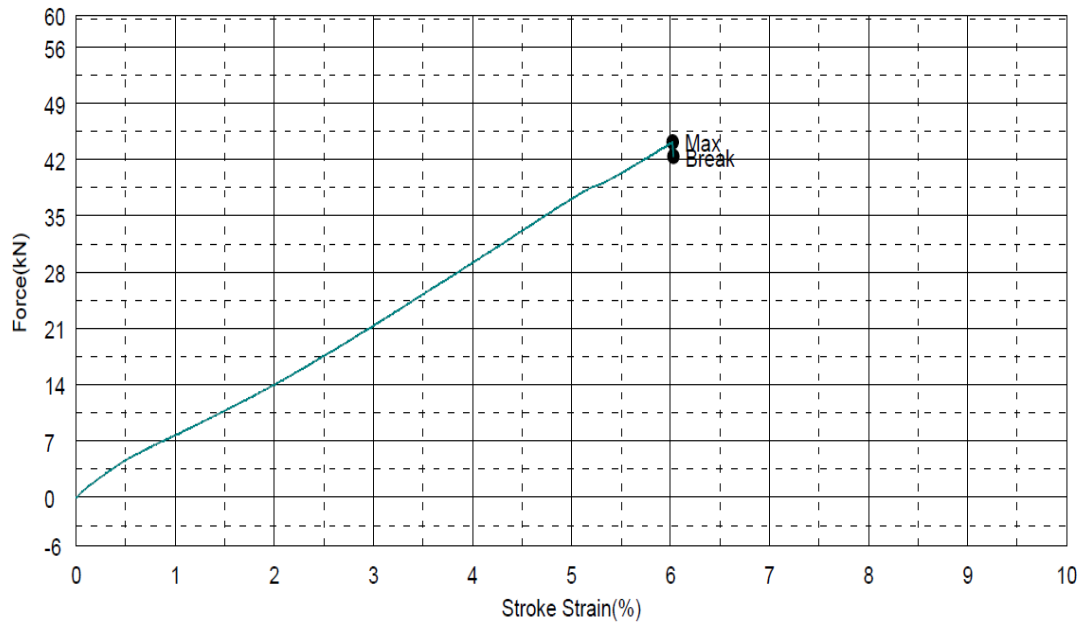
**Şekil.4.8.** 30° Dolgu Yama Epoxy Numunesi Çekme Deney Grafiği

#### 4.2.2.1.4. 45° Dolgu Yama

Hasarlı numune üzerine, Epoxy yapıştırıcı kullanılarak yapılan 45° dolgu yama işlemi sonrası, aşağıdaki tablo 4.10 ve şekil 4.9 da görüleceği gibi maksimum kuvvet 44.20 kN, maksimum gerilme ise 138.13 N/mm<sup>2</sup> olmuştur.

**Tablo.4.10.** 45° Dolgu Yama Epoxy Numunesi Çekme Deney Tablosu

Name	YP_Strain	Max_Force	Max_Disp	Max_Stress	Max_Strain
Parameter	0,1 %/FS				
Units	%	kN	mm	N/mm2	%
1 - 1	--	44,2031	4,81600	138,135	6,02000



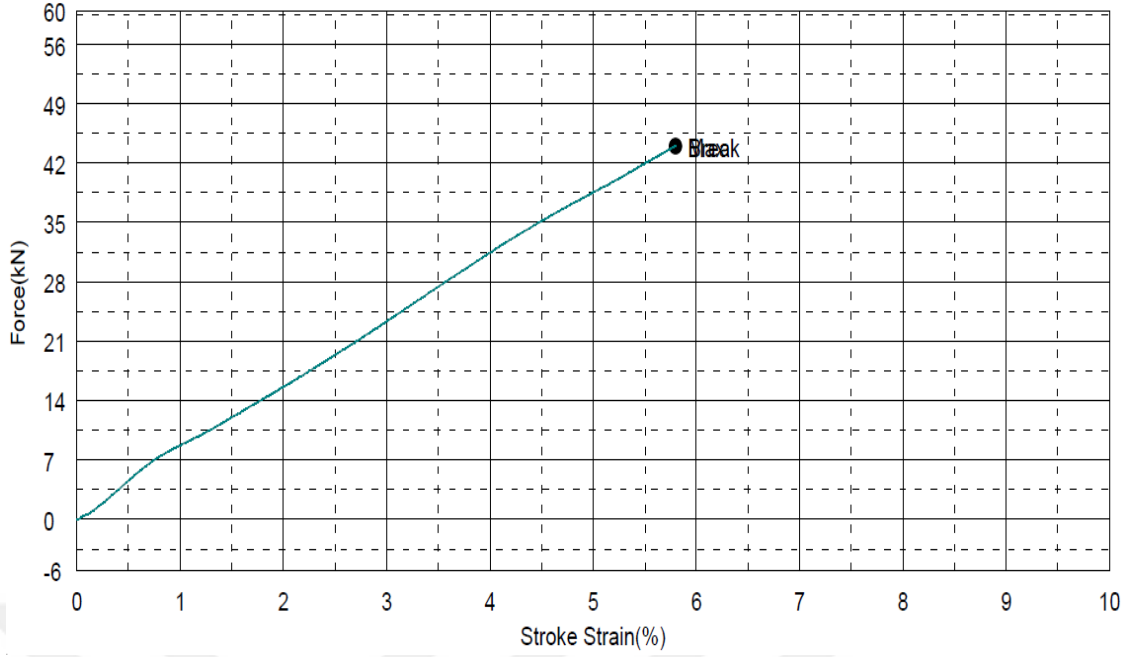
**Şekil.4.9.** 45° Dolgu Yama Epoxy Numunesi Çekme Deney Grafiği

#### 4.2.2.1.5. 60° Dolgu Yama

Hasarlı numune üzerine, Epoxy yapıştırıcı kullanılarak yapılan 60° dolgu yama işlemi sonrası, aşağıdaki tablo 4.11 ve şekil 4.10 da görüleceği gibi maksimum kuvvet 44.02 kN, maksimum gerilme ise 137.58 N/mm<sup>2</sup> olmuştur.

**Tablo.4.11.** 60° Dolgu Yama Epoxy Numunesi Çekme Deney Tablosu

Name	YP_Strain	Max_Force	Max_Disp	Max_Stress	Max_Strain
Parameter	0,1 %/FS				
Units	%	kN	mm	N/mm2	%
1 - 1	--	44,0281	4,63550	137,588	5,79437



**Şekil.4.10.** 60° Dolgu Yama Epoxy Numunesi Çekme Deney Grafiği

#### 4.2.2.2. Montage Klebstoff Yapıştırıcı ile Yama Sonrası Çekme Deneyi

Montage Klebstoff yapıştırıcı kullanılarak gerçekleştirilen onarım işlemleri sonrası yapılan çekme deney sonuçları aşağıdaki gibidir;

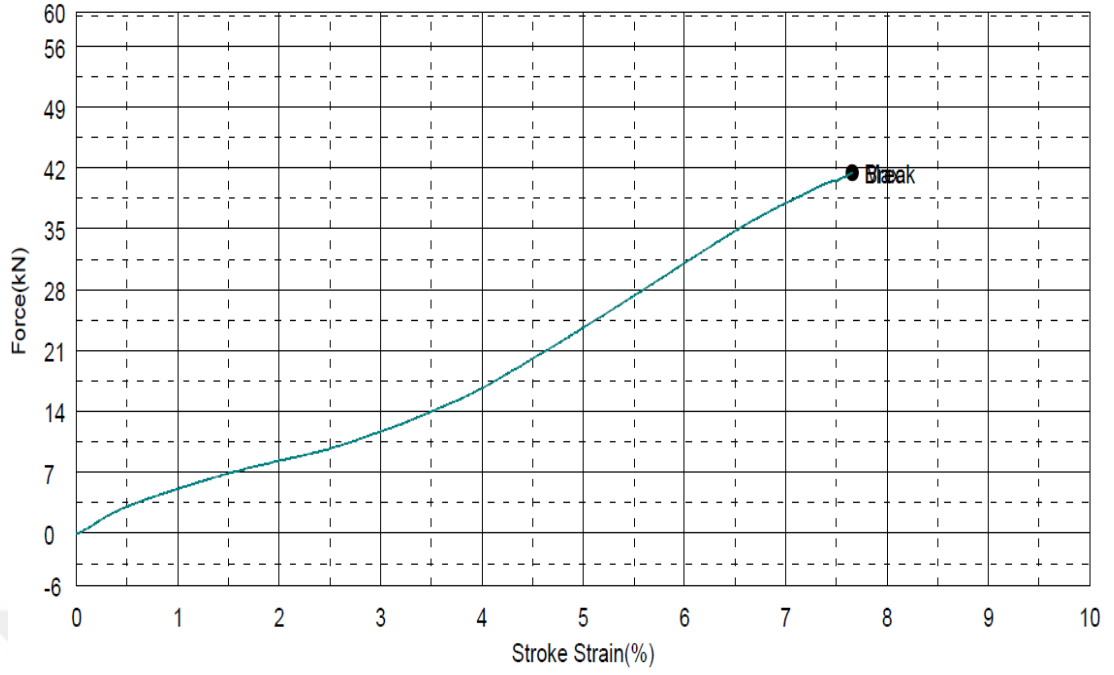
##### 4.2.2.2.1. 10x20 Basamaklı Yama

Hasarlı numune üzerine, Montage Klebstoff yapıştırıcı kullanılarak yapılan 10x20 basamaklı yama işlemi sonrası, aşağıdaki tablo 4.12 ve şekil 4.11 de görüleceği gibi maksimum kuvvet 41.51 kN, maksimum gerilme ise 129.71 N/mm<sup>2</sup> olmuştur.

**Tablo.4.12.** 10x20 Basamaklı Yama Montage Klebstoff Numunesi Çekme Deney Tablosu

Name	YP_Strain	Max_Force	Max_Disp	Max_Stress	Max_Strain
Parameter	0,1 %/FS				
Units	%	kN	mm	N/mm2	%
1 - 1	--	41,5094	6,12200	129,717	7,65250





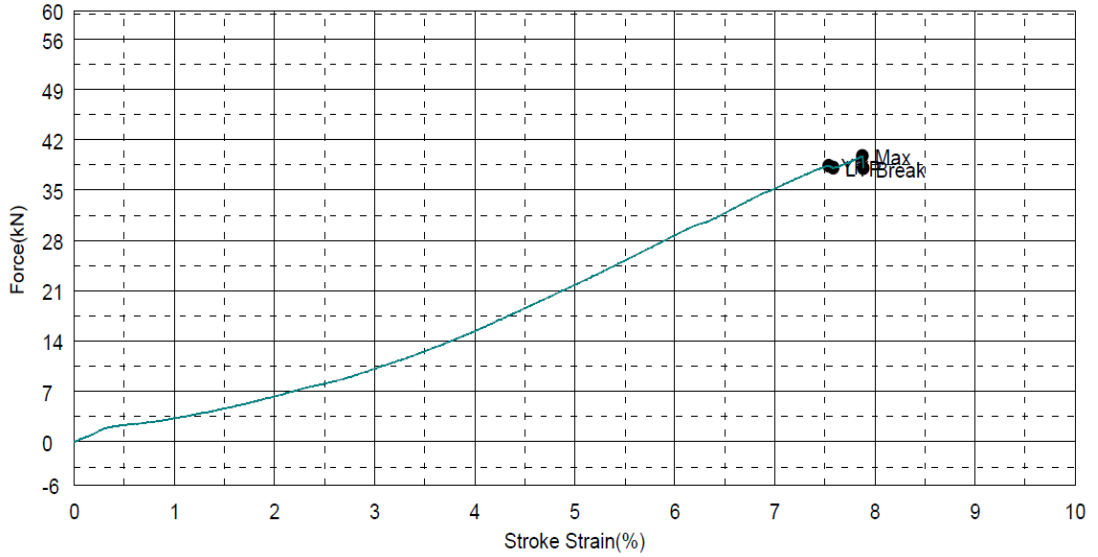
**Şekil.4.11.** 10x20 Basamaklı Yama Montage Klebbstoff Numunesi Çekme Deney Grafiği

#### 4.2.2.2.2. 10x30 Basamaklı Yama

Hasarlı numune üzerine, Montage Klebbstoff yapıştırıcı kullanılarak yapılan 10x30 basamaklı yama işlemi sonrası, aşağıdaki tablo 4.13 ve şekil 4.12 de görüleceği gibi maksimum kuvvet 39.77 kN, maksimum gerilme ise 124.28 N/mm<sup>2</sup> olmuştur.

**Tablo.4.13.** 10x30 Basamaklı Yama Montage Klebbstoff Numunesi Çekme Deney Tablosu

Name	YP Strain	Max_Force	Max_Disp	Max_Stress	Max_Strain
Parameter	0,1 %/FS				
Units	%	kN	mm	N/mm <sup>2</sup>	%
1 - 1	7,53625	39,7719	6,29900	124,287	7,87375



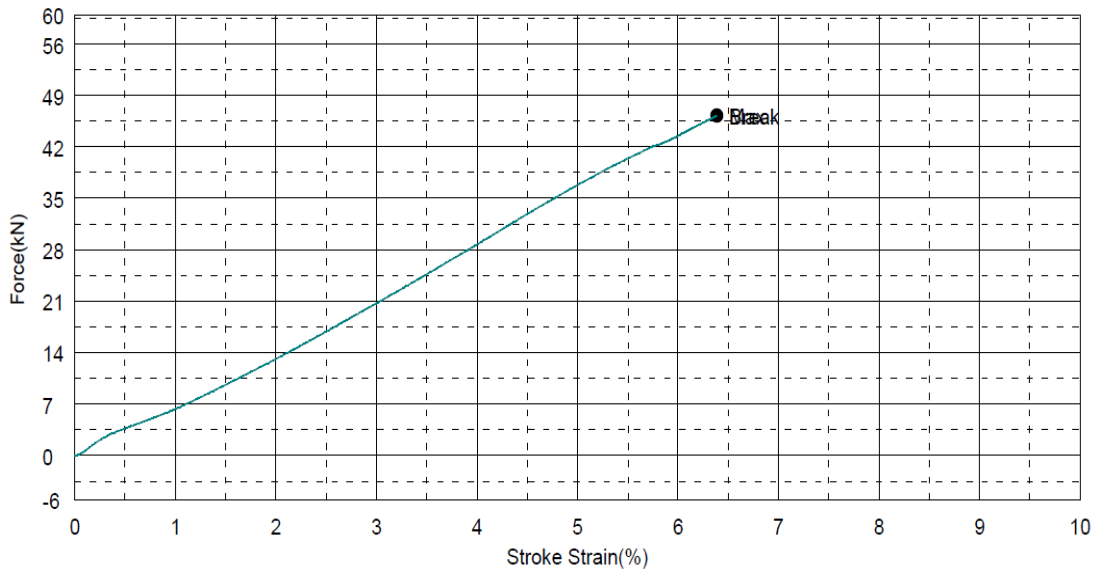
**Şekil.4.12.** 10x30 Basamaklı Yama Montage Klebbstoff Numunesi Çekme Deney Grafiği

#### 4.2.2.2.3. 30° Dolgu Yama

Hasarlı numune üzerine, Montage Klebbstoff yapıştırıcı kullanılarak yapılan 30° dolgu yama işlemi sonrası, aşağıdaki tablo 4.14 ve şekil 4.13 te görüleceği gibi maksimum kuvvet 46.29 kN, maksimum gerilme ise 144.67 N/mm<sup>2</sup> olmuştur.

**Tablo.4.14.** 30° Dolgu Yama Montage Klebbstoff Numunesi Çekme Deney Tablosu

Name	YP Strain	Max Force	Max Disp	Max Stress	Max Strain
Parameter	0,1 %/FS				
Units	%	kN	mm	N/mm2	%
1 - 1	--	46,2969	5,10700	144,678	6,38375



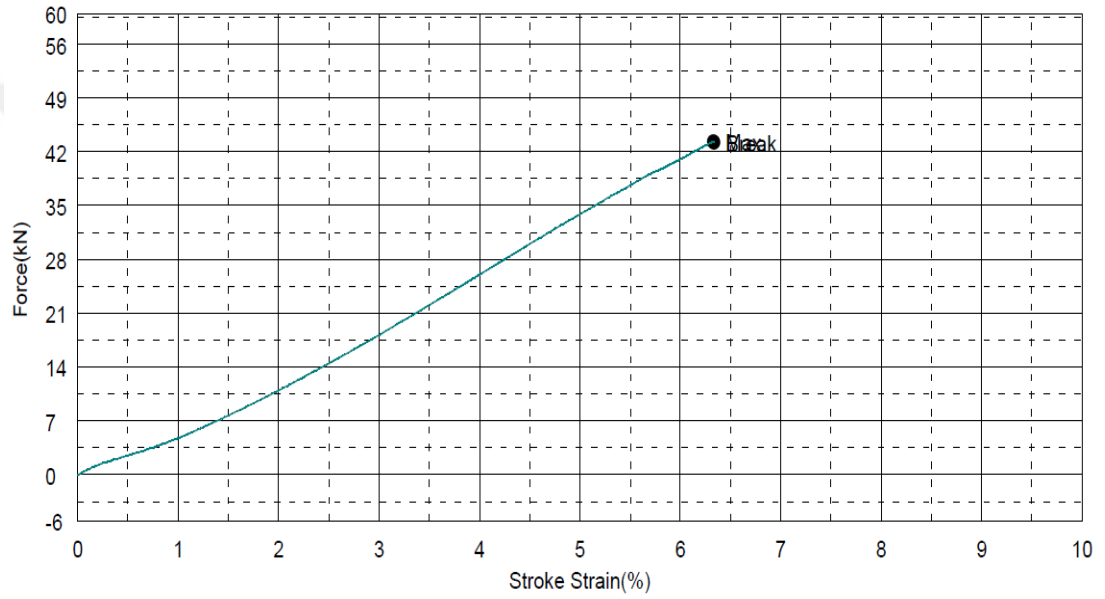
**Şekil.4.13.** 30° Dolgu Yama Montage Klebbstoff Numunesi Çekme Deney Grafiği

#### 4.2.2.2.4. 45° Dolgu Yama

Hasarlı numune üzerine, Montage Klebstoff yapıştırıcı kullanılarak yapılan 45° dolgu yama işlemi sonrası, aşağıdaki tablo 4.15 ve şekil 4.14 te görüleceği gibi maksimum kuvvet 43.34 kN, maksimum gerilme ise 135.44 N/mm<sup>2</sup> olmuştur.

**Tablo.4.15.** 45° Dolgu Yama Montage Klebstoff Numunesi Çekme Deney Tablosu

Name	YP_Strain	Max_Force	Max_Disp	Max_Stress	Max_Strain
Parameter	0,1 %/FS				
Units	%	kN	mm	N/mm2	%
1 - 1	-.	43,3406	5,06200	135,439	6,32750



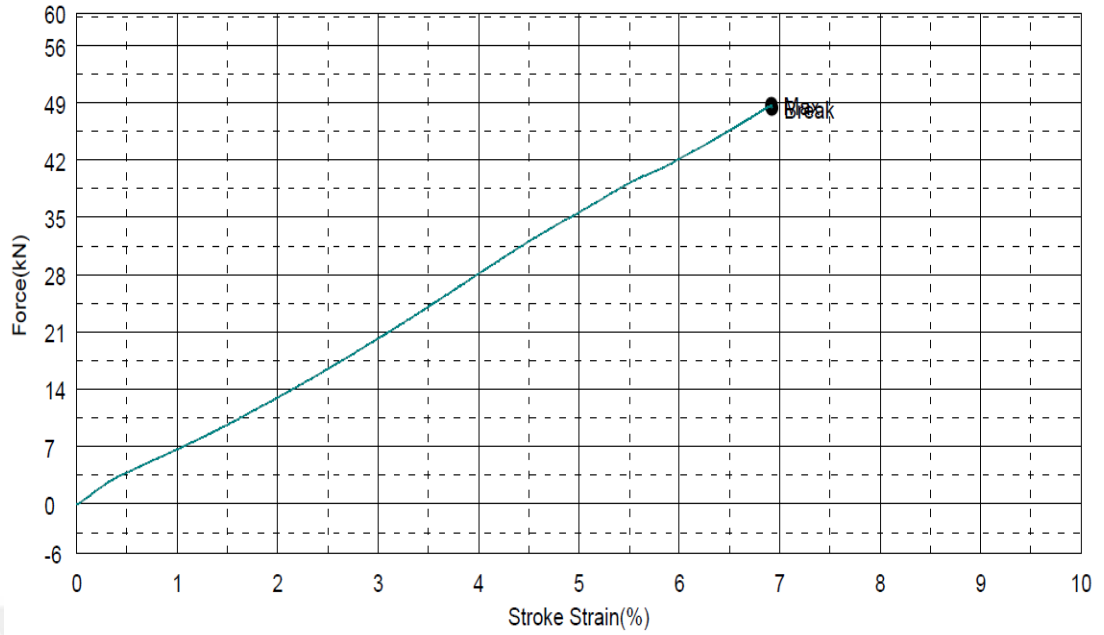
**Şekil.4.14.** 45° Dolgu Yama Montage Klebstoff Numunesi Çekme Deney Grafiği

#### 4.2.2.2.5. 60° Dolgu Yama

Hasarlı numune üzerine, Montage Klebstoff yapıştırıcı kullanılarak yapılan 60° dolgu yama işlemi sonrası, aşağıdaki tablo 4.16 ve şekil 4.15 te görüleceği gibi maksimum kuvvet 48.75 kN, maksimum gerilme ise 152.36 N/mm<sup>2</sup> olmuştur.

**Tablo.4.16.** 60° Dolgu Yama Montage Klebstoff Numunesi Çekme Deney Tablosu

Name	YP_Strain	Max_Force	Max_Disp	Max_Stress	Max_Strain
Parameter	0,1 %/FS				
Units	%	kN	mm	N/mm2	%
1 - 1	-.	48,7562	5,53300	152,363	6,91625



**Şekil.4.15.** 60° Dolgu Yama Montage Klebbstoff Numunesi Çekme Deney Grafiği

### 4.2.3. Eğme Deney Sonuçları

ISO 178 standardına uygun olarak hazırlanan numunelere yapılan yama işlemi sonrası eğme deneylerine ait sonuçlar, yapıştırıcılara göre gruplanarak alt başlıklarda verilmiştir.

#### 4.2.3.1.Epoxy Yapıştırıcı ile Yama Sonrası Eğme Deneyi

Epoxy yapıştırıcı kullanılarak gerçekleştirilen onarım işlemleri sonrası yapılan eğme deney sonuçları aşağıdaki gibidir;

##### 4.2.3.1.1. 10x20 Basamaklı Yama

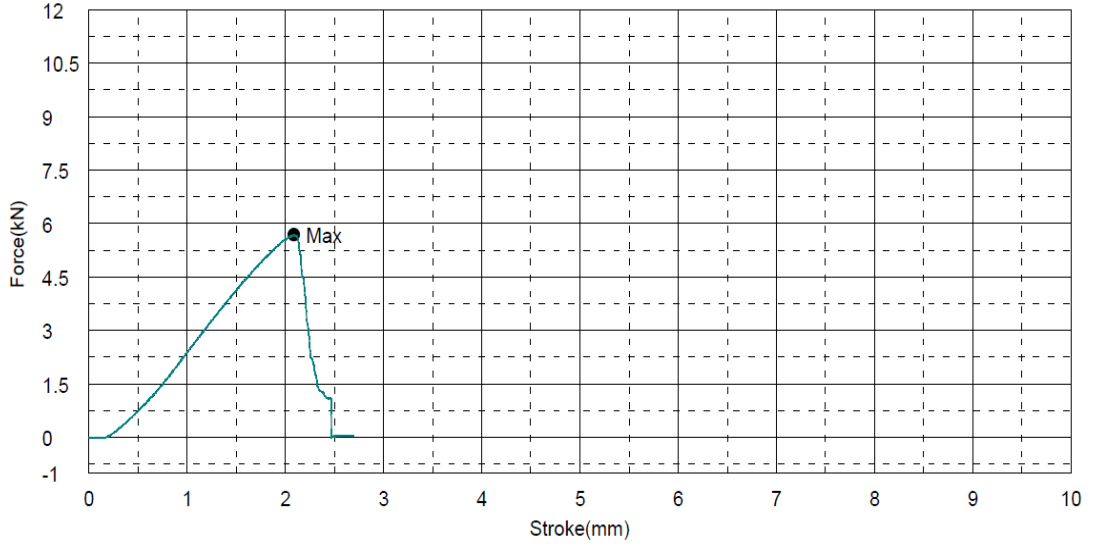
Hasarlı numune üzerine, Epoxy yapıştırıcı kullanılarak yapılan 10x20 basamaklı yama işlemi sonrası, aşağıdaki tablo 4.17 ve şekil 4.16 da görüleceği gibi maksimum kuvvet 5.69 kN, maksimum gerilme ise 512.15 N/mm<sup>2</sup> olmuştur.

**Tablo.4.17.** 10x20 Basamaklı Yama Epoxy Numunesi Eğme Deney Tablosu

Name	LYP_Force	LYP_Disp	LYP_Stress	LYP_Strain	Max_Force
Units	kN	mm	N/mm2	%	kN
1 - 1	--	--	--	--	5,69063

Name	Max_Disp	Max_Stress	Max_Strain	Break_Force	Break_Disp
Units	mm	N/mm2	%	kN	mm
1 - 1	2,08600	512,156	3,47667	--	--



**Şekil.4.16.** 10x20 Basamaklı Yama Epoxy Numunesi Eğme Deneş Grafiği

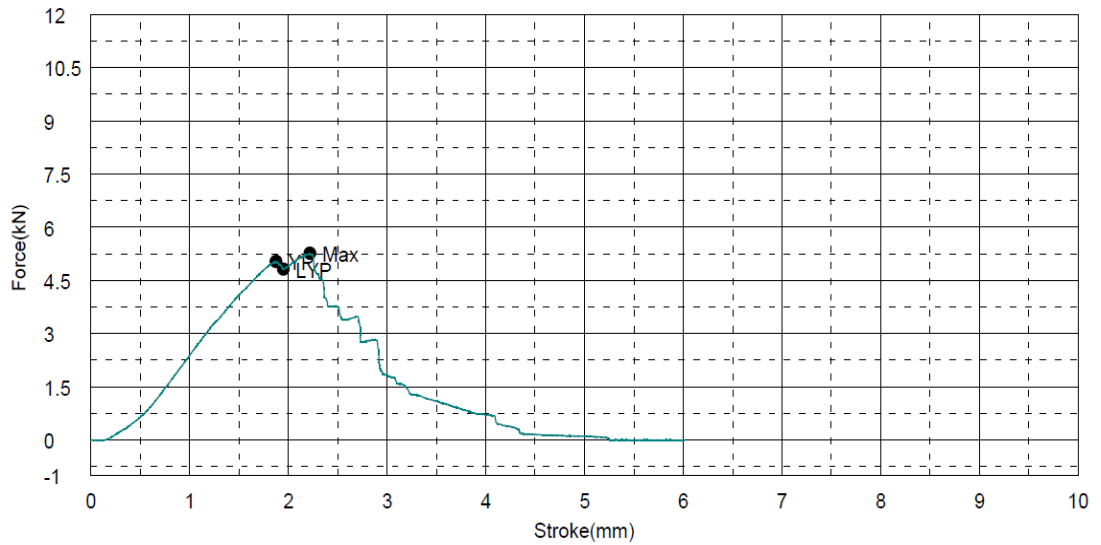
#### 4.2.3.1.2. 10x30 Basamaklı Yama

Hasarlı numune üzerine, Epoxy yapıştırıcı kullanılarak yapılan 10x30 basamaklı yama işleminin sonrası, aşağıdaki tablo 4.18 ve şekil 4.17 de görüleceği gibi maksimum kuvvet 5.26 kN, maksimum gerilme ise 473.90 N/mm<sup>2</sup> olmuştur.

**Tablo.4.18.** 10x30 Basamaklı Yama Epoxy Numunesi Eğme Deneş Tablosu

Name	LYP_Force	LYP_Disp	LYP_Stress	LYP_Strain	Max_Force
Units	kN	mm	N/mm2	%	kN
1 - 1	4,81563	1,94900	433,406	3,24833	5,26563

Name	Max_Disp	Max_Stress	Max_Strain	Break_Force	Break_Disp
Units	mm	N/mm2	%	kN	mm
1 - 1	2,21800	473,906	3,69667	--	--



**Şekil.4.17.** 10x30 Basamaklı Yama Epoxy Numunesi Eğme Deneş Grafiği

#### 4.2.3.1.3. 30° Dolgu Yama

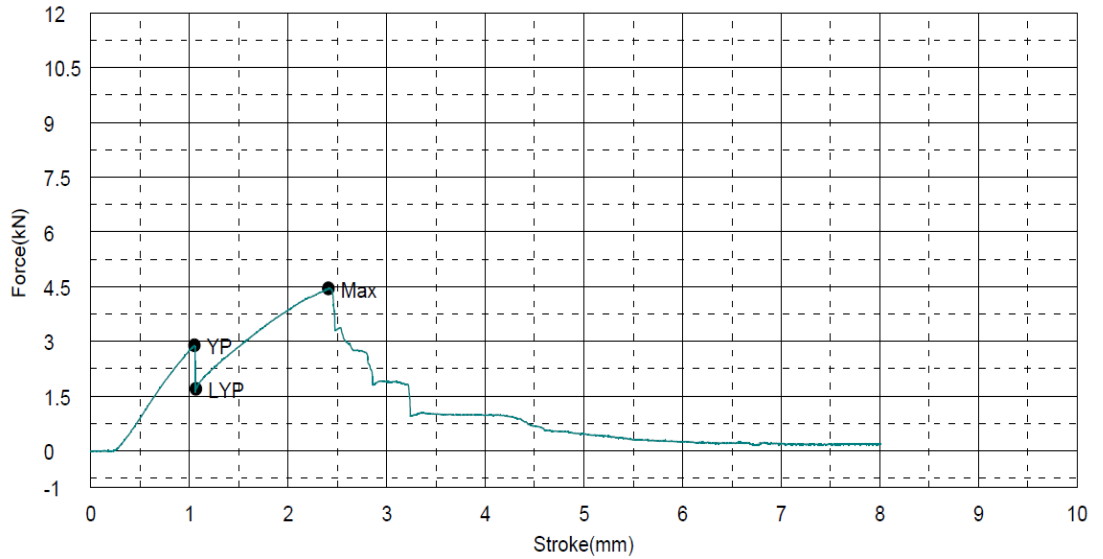
Hasarlı numune üzerine, Epoxy yapıştırıcı kullanılarak yapılan 30° dolgu yama işlemi sonrası, aşağıdaki tablo 4.19 ve şekil 4.18 de görüleceği gibi maksimum kuvvet 4.45 kN, maksimum gerilme ise 400.50 N/mm<sup>2</sup> olmuştur.

**Tablo.4.19.** 30° Dolgu Yama Epoxy Numunesi Eğme Deney Tablosu

Name	LYP_Force	LYP_Displacement	LYP_Stress	LYP_Strain	Max_Force
Units	kN	mm	N/mm <sup>2</sup>	%	kN
1 - 1	1,70000	1,06700	153,000	1,77833	4,45000

Name	Max_Displacement	Max_Stress	Max_Strain	Break_Force	Break_Displacement
Units	mm	N/mm <sup>2</sup>	%	kN	mm
1 - 1	2,40900	400,500	4,01500	--	--



**Şekil.4.18.** 30° Dolgu Yama Epoxy Numunesi Eğme Deney Grafiği

#### 4.2.3.1.4. 45° Dolgu Yama

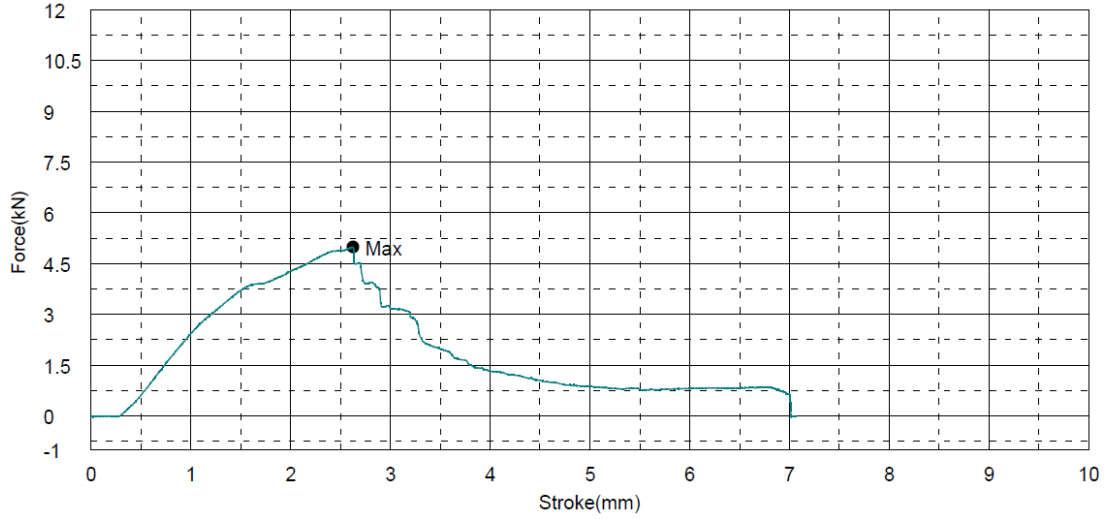
Hasarlı numune üzerine, Epoxy yapıştırıcı kullanılarak yapılan 45° dolgu yama işlemi sonrası, aşağıdaki tablo 4.20 ve şekil 4.19 da görüleceği gibi maksimum kuvvet 4.99 kN, maksimum gerilme ise 449.43 N/mm<sup>2</sup> olmuştur.

**Tablo.4.20.** 45° Dolgu Yama Epoxy Numunesi Eğme Deney Tablosu

Name	LYP_Force	LYP_Displacement	LYP_Stress	LYP_Strain	Max_Force
Units	kN	mm	N/mm <sup>2</sup>	%	kN
1 - 1	--	--	--	--	4,99375

Name	Max_Displacement	Max_Stress	Max_Strain	Break_Force	Break_Displacement
Units	mm	N/mm <sup>2</sup>	%	kN	mm
1 - 1	2,62550	449,438	4,37583	--	--



**Şekil.4.19.** 45° Dolgu Yama Epoxy Numunesi Eğme Deney Grafiği

#### 4.2.3.1.5. 60° Dolgu Yama

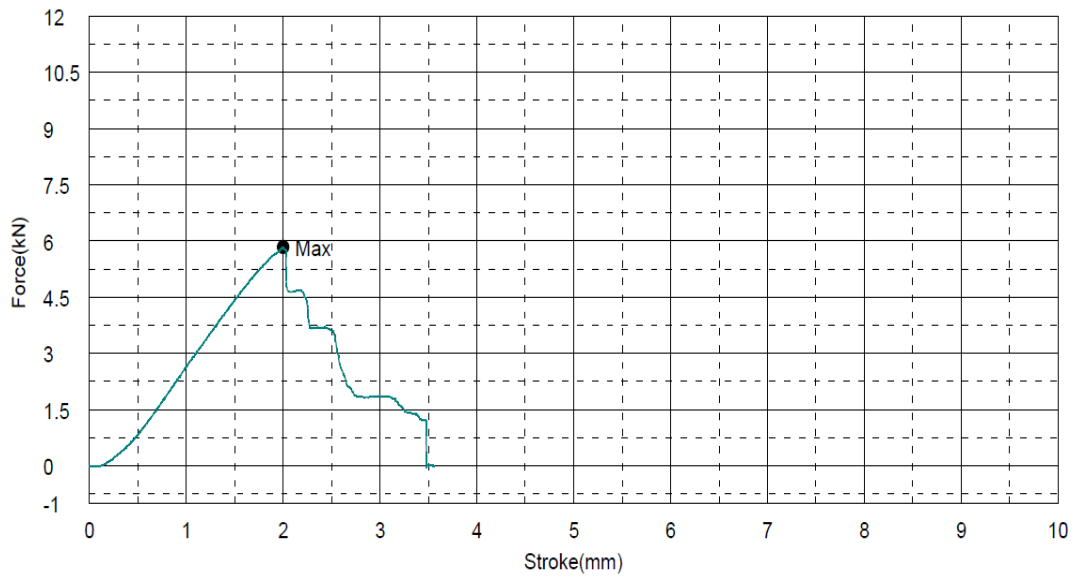
Hasarlı numune üzerine, Epoxy yapıştırıcı kullanılarak yapılan 60° dolgu yama işlemi sonrası, aşağıdaki tablo 4.21 ve şekil 4.20 de görüleceği gibi maksimum kuvvet 5.84 kN, maksimum gerilme ise 525.65 N/mm<sup>2</sup> olmuştur.

**Tablo.4.21.** 60° Dolgu Yama Epoxy Numunesi Eğme Deney Tablosu

Name	LYP_Force	LYP_Displ	LYP_Stress	LYP_Strain	Max_Force
Units	kN	mm	N/mm2	%	kN
1 - 1	--	--	--	--	5,84062

Name	Max_Displ	Max_Stress	Max_Strain	Break_Force	Break_Displ
Units	mm	N/mm2	%	kN	mm
1 - 1	2,00000	525,656	3,33333	--	--



**Şekil.4.20.** 60° Dolgu Yama Epoxy Numunesi Eğme Deney Grafiği

#### 4.2.3.2.Montage Klebbstoff Yapıştırıcı ile Yama Sonrası Eğme Deneyi

Montage Klebbstoff yapıştırıcı kullanılarak gerçekleştirilen onarım işlemleri sonrası yapılan eğme deney sonuçları aşağıdaki gibidir;

##### 4.2.3.2.1. 10x20 Basamaklı Yama

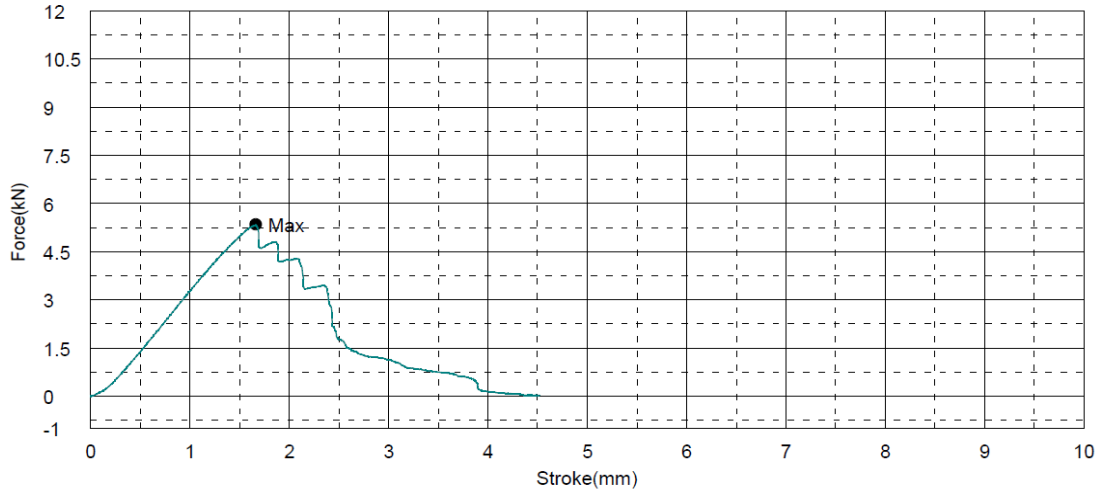
Hasarlı numune üzerine, Montage Klebbstoff yapıştırıcı kullanılarak yapılan 10x20 basamaklı yama işlemi sonrası, aşağıdaki tablo 4.22 ve şekil 4.21 de görüleceği gibi maksimum kuvvet 5.35 kN, maksimum gerilme ise 481.50 N/mm<sup>2</sup> olmuştur.

**Tablo.4.22.** 10x20 Basamaklı Yama Montage Klebbstoff Numunesi Eğme Deney Tablosu

Name	LYP_Force	LYP_Disp	LYP_Stress	LYP_Strain	Max_Force
Units	kN	mm	N/mm2	%	kN
1 - 1	--	--	--	--	5,35000

Name	Max_Disp	Max_Stress	Max_Strain	Break_Force	Break_Disp
Units	mm	N/mm2	%	kN	mm
1 - 1	1,66200	481,500	2,77000	--	--



**Şekil.4.21.** 10x20 Basamaklı Yama Montage Klebbstoff Numunesi Eğme Deney Grafiği

##### 4.2.3.2.2. 10x30 Basamaklı Yama

Hasarlı numune üzerine, Montage Klebbstoff yapıştırıcı kullanılarak yapılan 10x30 basamaklı yama işlemi sonrası, aşağıdaki tablo 4.23 ve şekil 4.22 de görüleceği gibi maksimum kuvvet 4.91 kN, maksimum gerilme ise 442.68 N/mm<sup>2</sup> olmuştur.

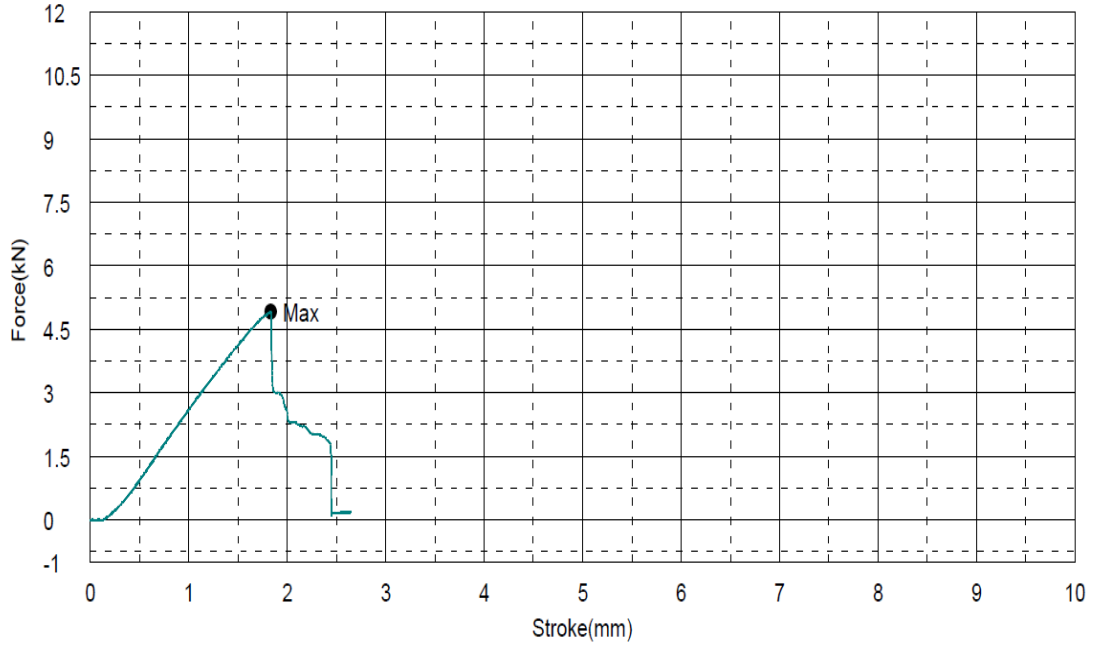


**Tablo.4.23.** 10x30 Basamaklı Yama Montage Klebbstoff Numunesi Eğme Deney Tablosu

Name	LYP_Force	LYP_Disp	LYP_Stress	LYP_Strain	Max_Force
Units	kN	mm	N/mm2	%	kN
1 - 1	--	--	--	--	4,91875

Name	Max_Disp	Max_Stress	Max_Strain	Break_Force	Break_Disp
Units	mm	N/mm2	%	kN	mm
1 - 1	1,83250	442,687	3,05417	--	--



**Şekil.4.22.** 10x30 Basamaklı Yama Montage Klebbstoff Numunesi Eğme Deney Grafiği

#### 4.2.3.2.3. 30° Dolgu Yama

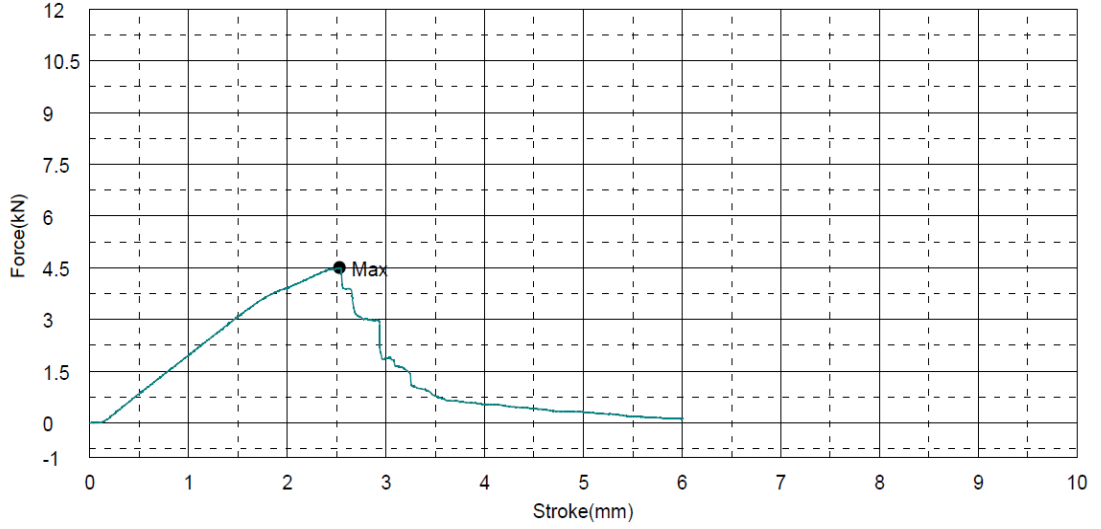
Hasarlı numune üzerine, Montage Klebbstoff yapıştırıcı kullanılarak yapılan 30° dolgu yama işlemi sonrası, aşağıdaki tablo 4.24 ve şekil 4.23 te görüleceği gibi maksimum kuvvet 4.50 kN, maksimum gerilme ise 405.28 N/mm<sup>2</sup> olmuştur.

**Tablo.4.24.** 30° Dolgu Yama Montage Klebbstoff Numunesi Eğme Deney Tablosu

Name	LYP_Force	LYP_Disp	LYP_Stress	LYP_Strain	Max_Force
Units	kN	mm	N/mm2	%	kN
1 - 1	--	--	--	--	4,50313

Name	Max_Disp	Max_Stress	Max_Strain	Break_Force	Break_Disp
Units	mm	N/mm2	%	kN	mm
1 - 1	2,53050	405,281	4,21750	--	--



Şekil.4.23. 30° Dolgu Yama Montage Klebbstoff Numunesi Eğme Deney Grafiği

#### 4.2.3.2.4. 45° Dolgu Yama

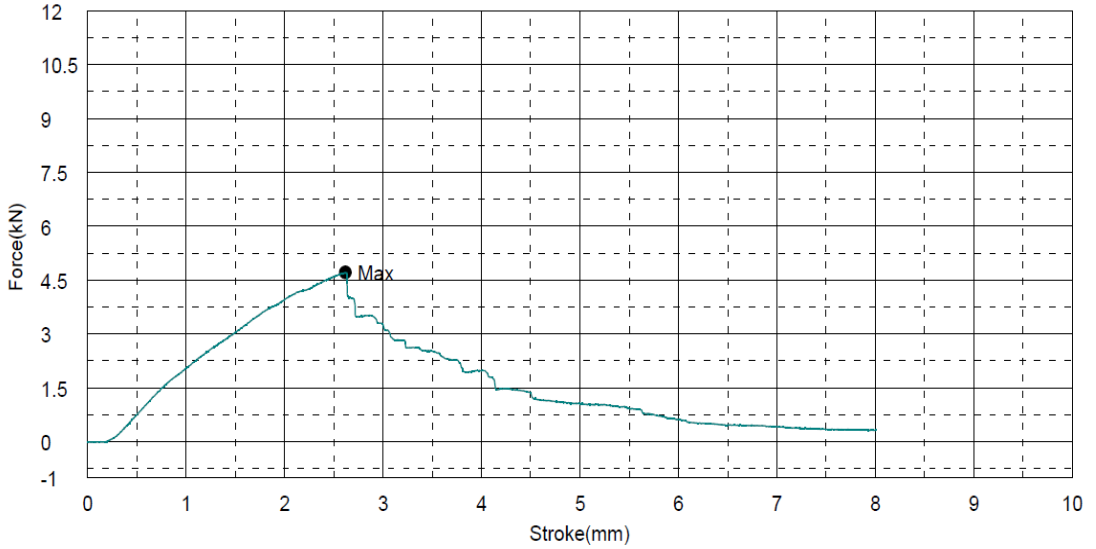
Hasarlı numune üzerine, Montage Klebbstoff yapıştırıcı kullanılarak yapılan 45° dolgu yama işlemi sonrası, aşağıdaki tablo 4.25 ve şekil 4.24 te görüleceği gibi maksimum kuvvet 4.71 kN, maksimum gerilme ise 424.12 N/mm<sup>2</sup> olmuştur.

Tablo.4.25. 45° Dolgu Yama Montage Klebbstoff Numunesi Eğme Deney Tablosu

Name	LYP_Force	LYP_Displacement	LYP_Stress	LYP_Strain	Max_Force
Units	kN	mm	N/mm <sup>2</sup>	%	kN
1 - 1	-.-	-.-	-.-	-.-	4,71250

Name	Max_Displacement	Max_Stress	Max_Strain	Break_Force	Break_Displacement
Units	mm	N/mm <sup>2</sup>	%	kN	mm
1 - 1	2,61750	424,125	4,36250	-.-	-.-



Şekil.4.24. 45° Dolgu Yama Montage Klebbstoff Numunesi Eğme Deney Grafiği

#### 4.2.3.2.5. 60° Dolgu Yama

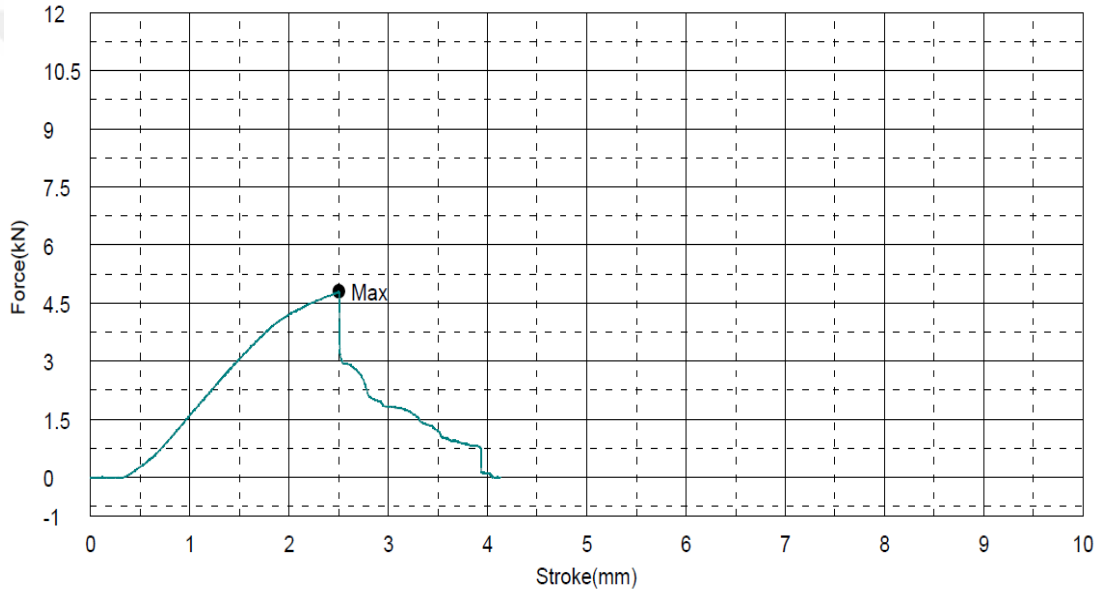
Hasarlı numune üzerine, Montage Klebstoff yapıştırıcı kullanılarak yapılan 60° dolgu yama işlemi sonrası, aşağıdaki tablo 4.26 ve şekil 4.25 te görüleceği gibi maksimum kuvvet 4.80 kN, maksimum gerilme ise 432.28 N/mm<sup>2</sup> olmuştur.

**Tablo.4.26.** 60° Dolgu Yama Montage Klebstoff Numunesi Eğme Denei Tablosu

Name	LYP_Force	LYP_Displacement	LYP_Stress	LYP_Strain	Max_Force
Units	kN	mm	N/mm <sup>2</sup>	%	kN
1 - 1	--	--	--	--	4,80312

Name	Max_Displacement	Max_Stress	Max_Strain	Break_Force	Break_Displacement
Units	mm	N/mm <sup>2</sup>	%	kN	mm
1 - 1	2,50000	432,281	4,16667	--	--



**Şekil.4.25.** 60° Dolgu Yama Montage Klebstoff Numunesi Eğme Denei Grafiği

#### 4.2.3.2.6. Tıkama Metodunda Onarım

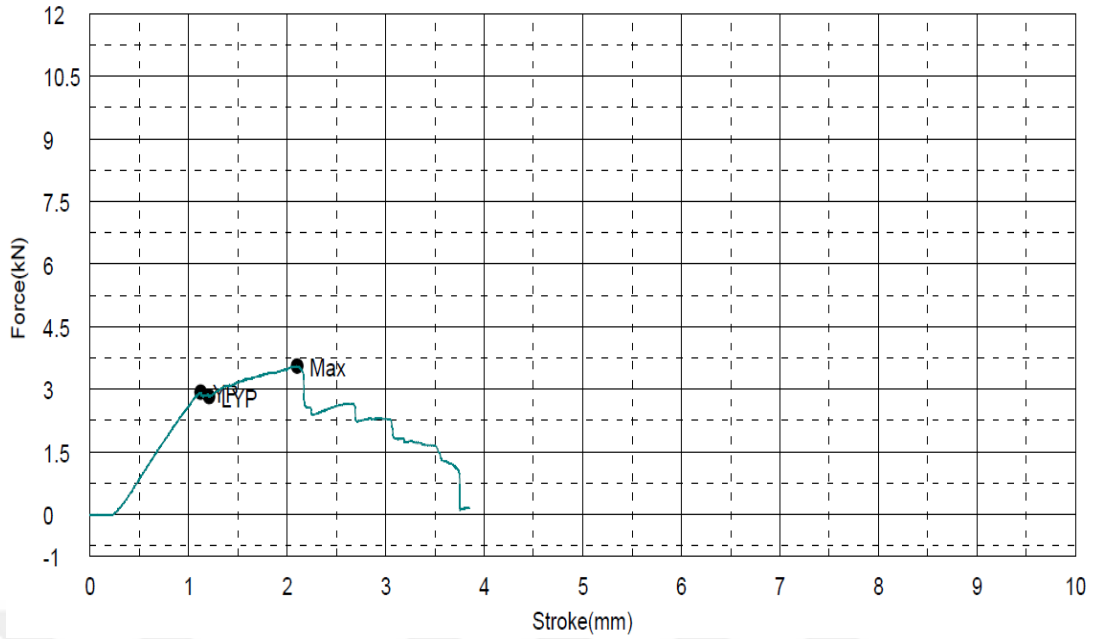
Hasarlı numune üzerine, Montage Klebstoff yapıştırıcı kullanılarak yapılan tıkama işlemi sonrası, aşağıdaki tablo 4.27 ve şekil 4.26 da görüleceği gibi maksimum kuvvet 3.56 kN, maksimum gerilme ise 320.34 N/mm<sup>2</sup> olmuştur.

**Tablo.4.27.** Tıkama Yama Montage Klebstoff Numunesi Eğme Denei Tablosu

Name	LYP_Force	LYP_Displacement	LYP_Stress	LYP_Strain	Max_Force
Units	kN	mm	N/mm <sup>2</sup>	%	kN
1 - 1	2,82500	1,20900	254,250	2,01500	3,55938

Name	Max_Displacement	Max_Stress	Max_Strain	Break_Force	Break_Displacement
Units	mm	N/mm <sup>2</sup>	%	kN	mm
1 - 1	2,10150	320,344	3,50250	--	--



**Şekil.4.26.** Tıkama Yama Montage Klebbstoff Numunesi Eğme Deney Grafiği

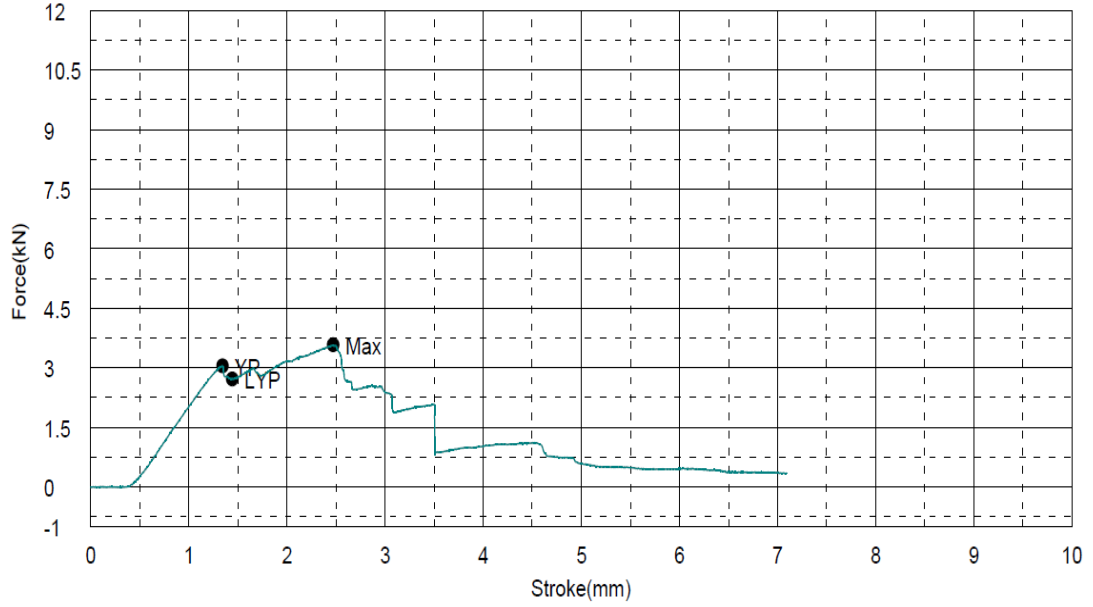
#### 4.2.3.2.7. Tıkama+0,018 mm Al Bant Yama

Hasarlı numune üzerine, Montage Klebbstoff yapıştırıcı kullanılarak yapılan dolgu işlemi ve üzerine 0.018 mm Al bant uygulaması sonrası, aşağıdaki tablo 4.28 ve şekil 4.27 de görüleceği gibi maksimum kuvvet 3.57 kN, maksimum gerilme ise 322.03 N/mm<sup>2</sup> olmuştur.

**Tablo.4.28.** Tıkama+0.018 mm Al Bant Yama Montage Klebbstoff Numunesi Eğme Deney Tablosu

Name	LYP_Force	LYP_Disp	LYP_Stress	LYP_Strain	Max_Force
Units	kN	mm	N/mm2	%	kN
1 - 1	2,71563	1,44400	244,406	2,40667	3,57813

Name	Max_Disp	Max_Stress	Max_Strain	Break_Force	Break_Disp
Units	mm	N/mm2	%	kN	mm
1 - 1	2,47000	322,031	4,11667	--	--



**Şekil.4.27.** Tıkama+0.018 mm Al Bant Yama Montage Klebbstoff Numunesi Eğme Deney Grafiği

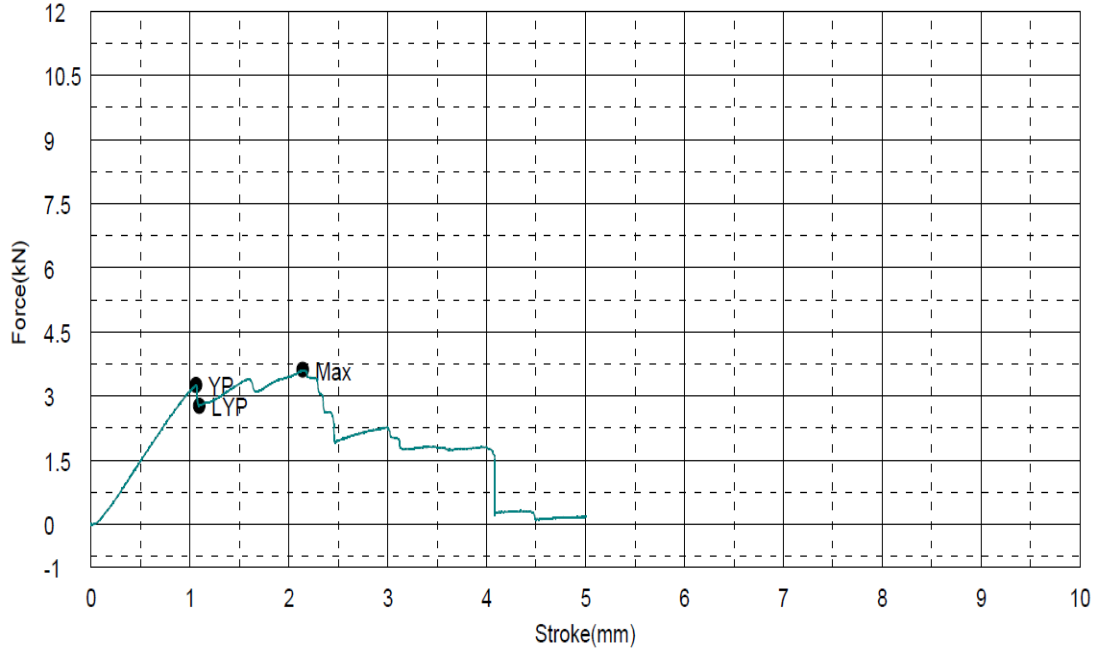
#### 4.2.3.2.8. Tıkama+0,050 mm Al Bant Yama

Hasarlı numune üzerine, Montage Klebbstoff yapıştırıcı kullanılarak yapılan dolgu işlemi ve üzerine 0.050 mm Al bant uygulaması sonrası, aşağıdaki tablo 4.29 ve şekil 4.28 de görüleceği gibi maksimum kuvvet 3.61 kN, maksimum gerilme ise 325.40 N/mm<sup>2</sup> olmuştur.

**Tablo.4.29.** Tıkama+0.050 mm Al Bant Yama Montage Klebbstoff Numunesi Eğme Deney Tablosu

Name	LYP_Force	LYP_Disp	LYP_Stress	LYP_Strain	Max_Force
Units	kN	mm	N/mm <sup>2</sup>	%	kN
1 - 1	2,76875	1,09400	249,188	1,82333	3,61562

Name	Max_Disp	Max_Stress	Max_Strain	Break_Force	Break_Disp
Units	mm	N/mm <sup>2</sup>	%	kN	mm
1 - 1	2,14100	325,406	3,56833	--	--



**Şekil.4.28.** Tıkama+0.050 mm Al Bant Yama Montage Klebbstoff Numunesi Eğme Deney Grafiği

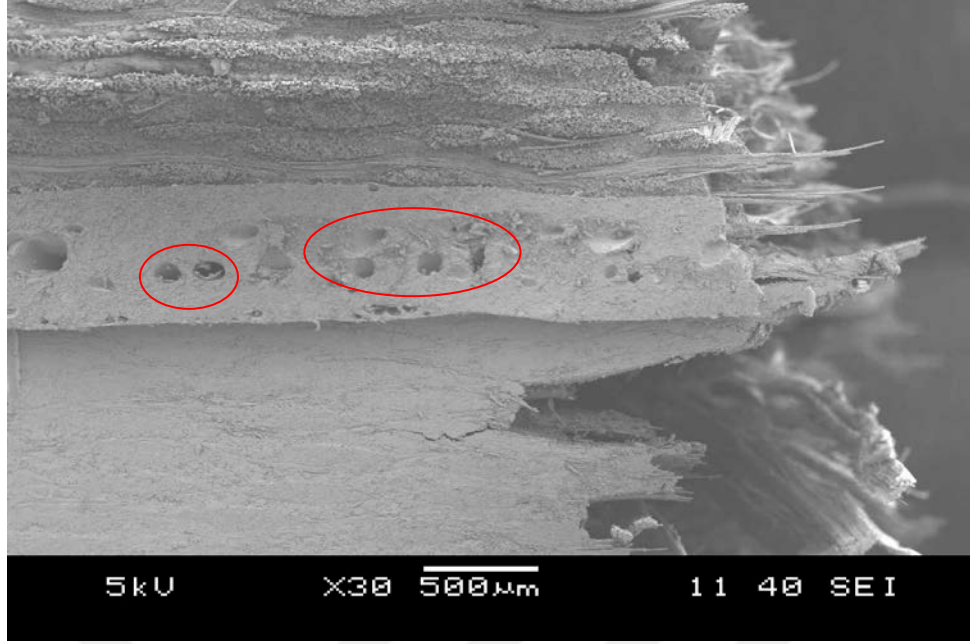
### 4.3. SEM Analizi

Yapılan deneyler sonrası numunelerin ait kırık yüzey ve ara yüzey görüntüleri SEM yardımı ile incelenmiştir. Bunlar hakkında bilgiler alt başlıklarda bulunmaktadır.

#### 4.3.1. Ara Yüzey Görüntüleri;

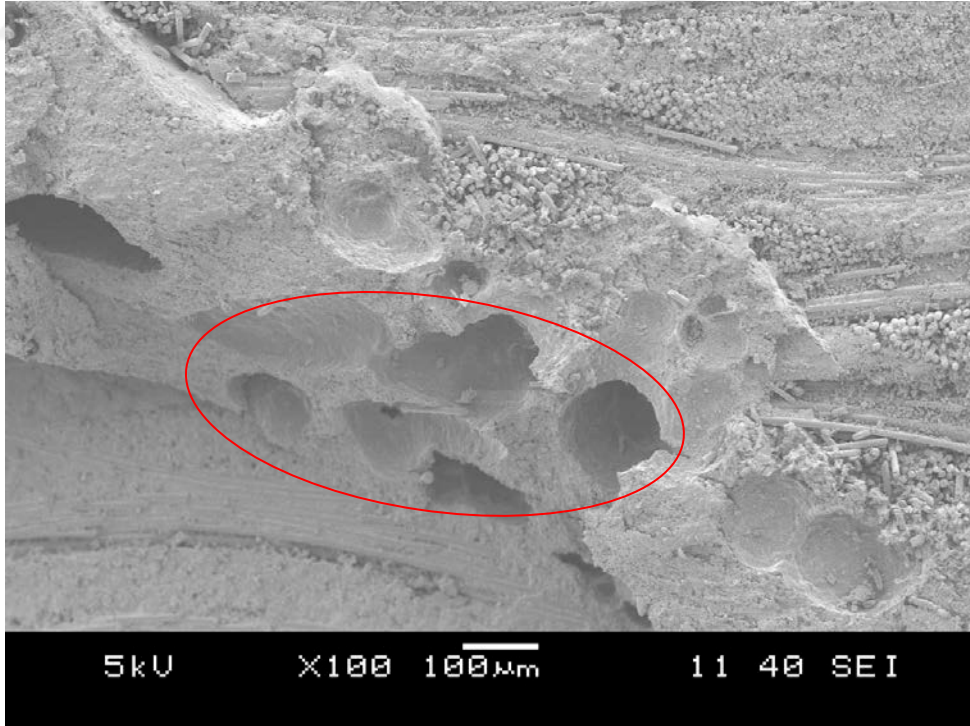
-Montage Klebbstoff yapıştırıcı onarımı yapılan numunelerin ara yüzeyleri aşağıdaki gibidir;

Şekil 4.29 da belirtilen işaretli bölgelerde görüleceği gibi yapıştırıcı içinde boşluklar bulunmaktadır. Yapışma yüzeylerinde bu boşluklar görülmemektedir.



**Şekil.4.29.** Montage Klebstoff Yapıştırıcı Ara Yüzey

Şekil 4.30 ve 4.31 de boşluklar daha yakından, detaylı bir şekilde incelendiğinde boşlukların süreklilik göstermediği ve yapıştırıcının kendi içinde bölge bölge bir oluşum gösterdiği anlaşılmaktadır.

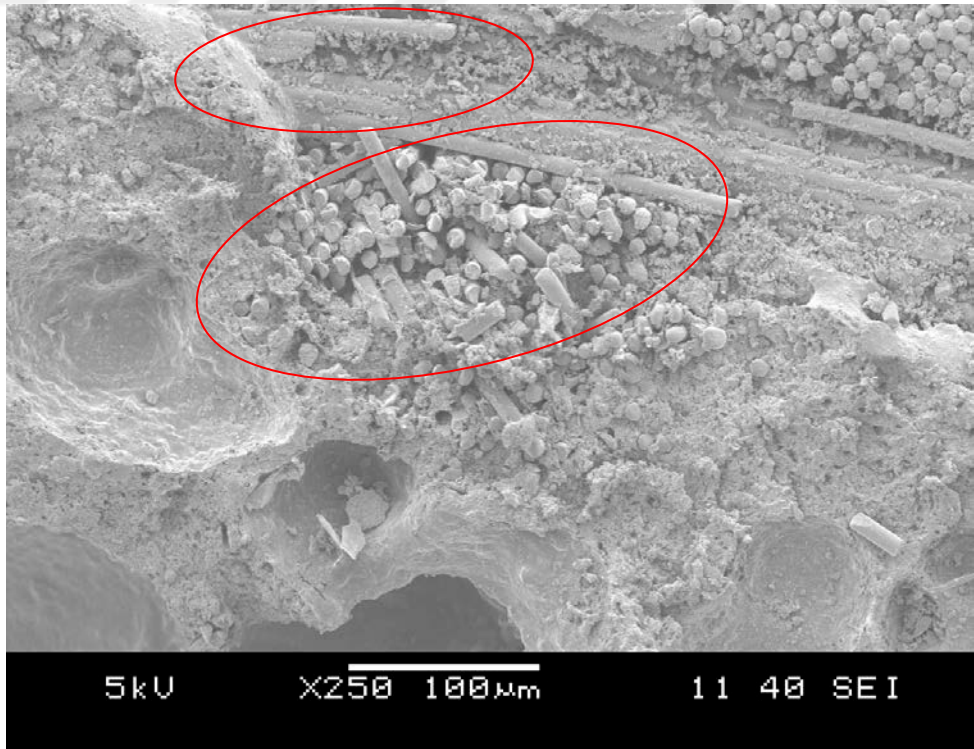


**Şekil.4.30.** Montage Klebstoff Yapıştırıcı Ara Yüzey



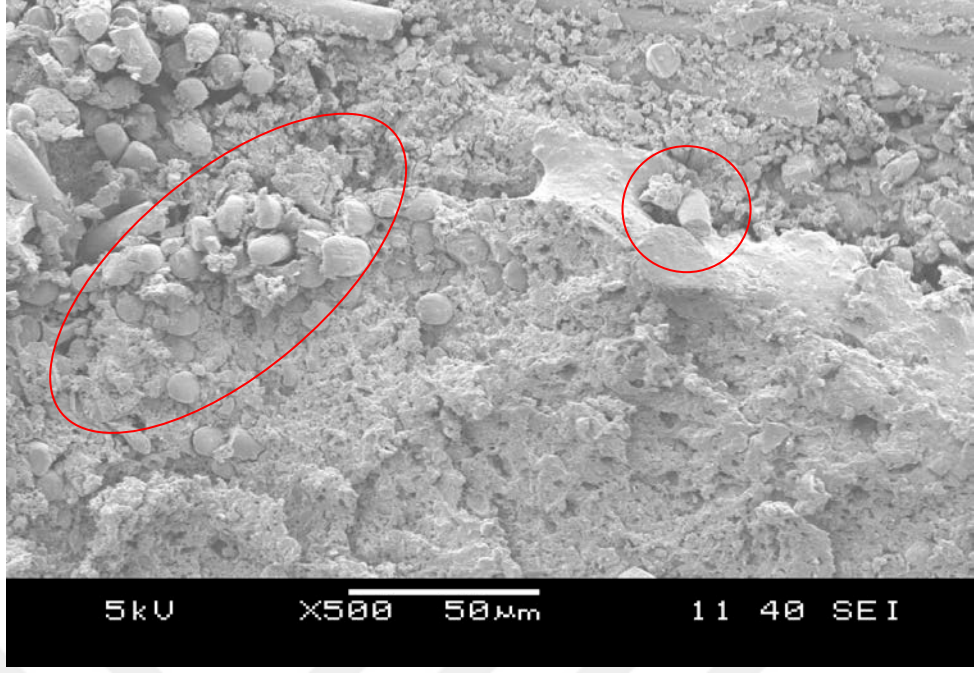
**Şekil.4.31.** Montage Klebstoff Yapıştırıcı Ara Yüzey

Şekil 4.32 ve 4.33 te görüldüğü gibi yapıştırıcı ile kompozit malzemede bulunan yatay ve dikey lifler iç içe girerek yüksek seviyede bağ oluşmasını sağlamıştır.



**Şekil.4.32.** Montage Klebstoff Yapıştırıcı Ara Yüzey

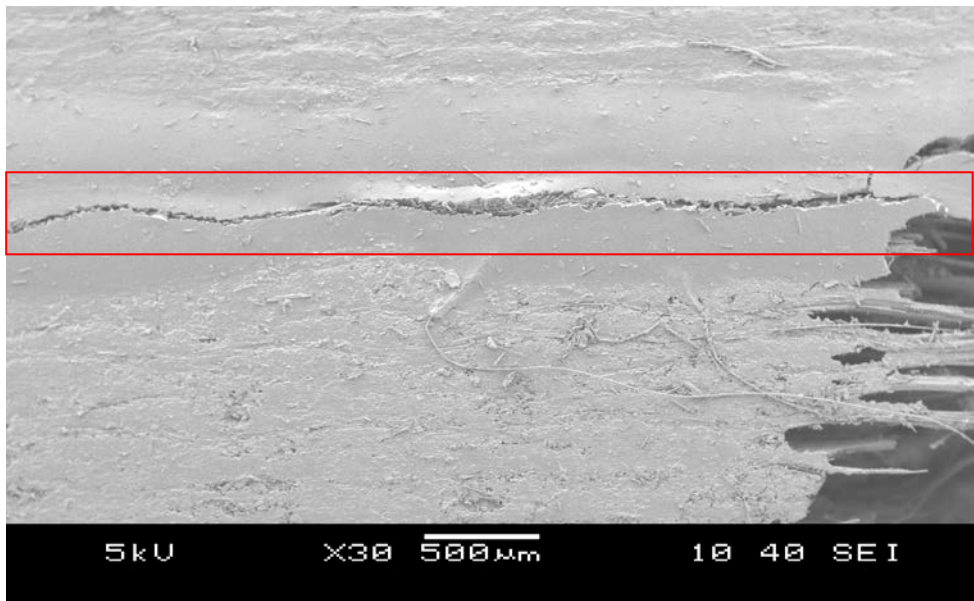




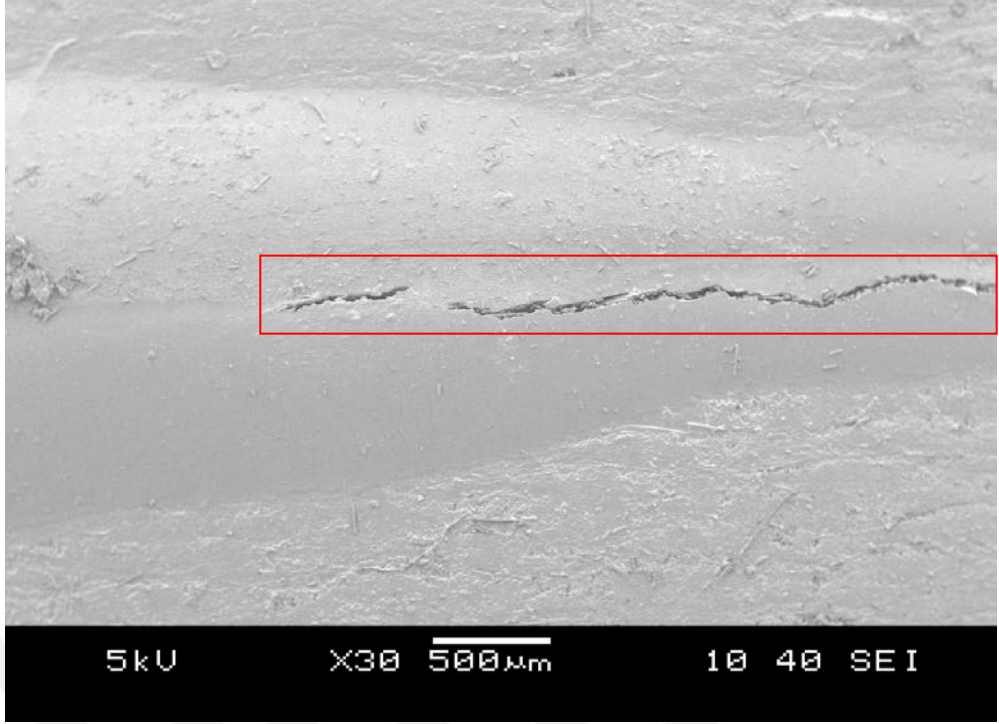
**Şekil.4.33.** Montage Klebstoff Yapıştırıcı Ara Yüzey

-Epoxy yapıştırıcı ile hazırlanan numunelerin ara yüzey görüntüleri aşağıdaki gibidir;

Şekil 4.34 ve şekil 4.35 te görüldüğü gibi kopma bölgesine yakın yerlerde kuvvetin etkisi ile yapıştırıcıda ayrılmalar meydana gelmiştir. Ayrılma yapıştırıcının yama ve hasarlı numunede kalması ile oluşmaktadır. Kopma bölgesinden uzaklaştıkça bu ayrılmalar azalmakta ya da kaybolmaktadır.

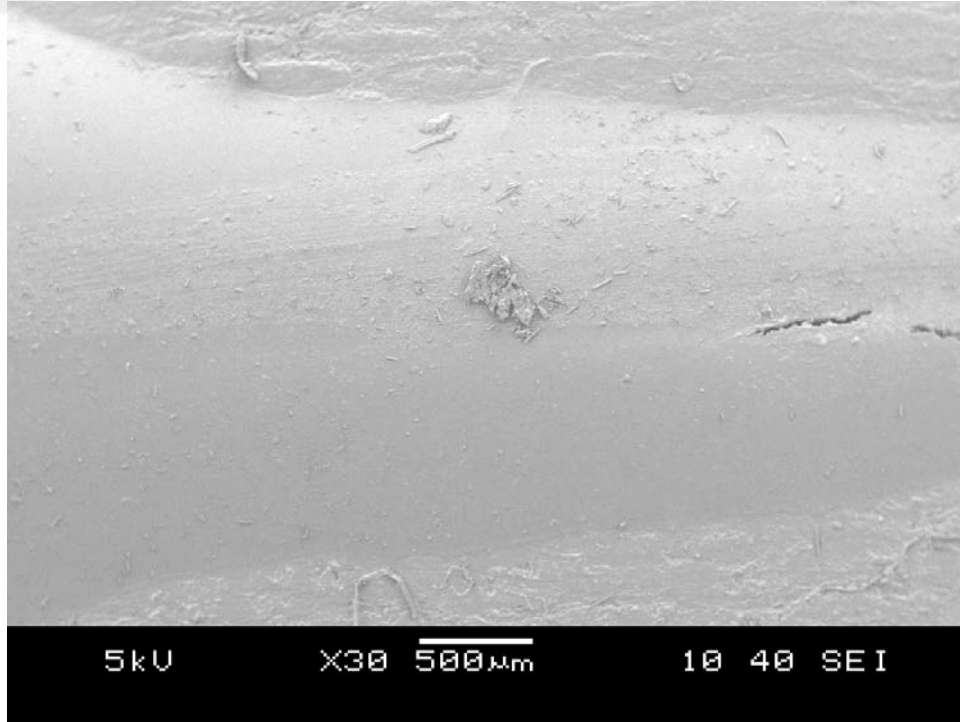


**Şekil.4.34.** Epoxy Yapıştırıcı Ara Yüzey



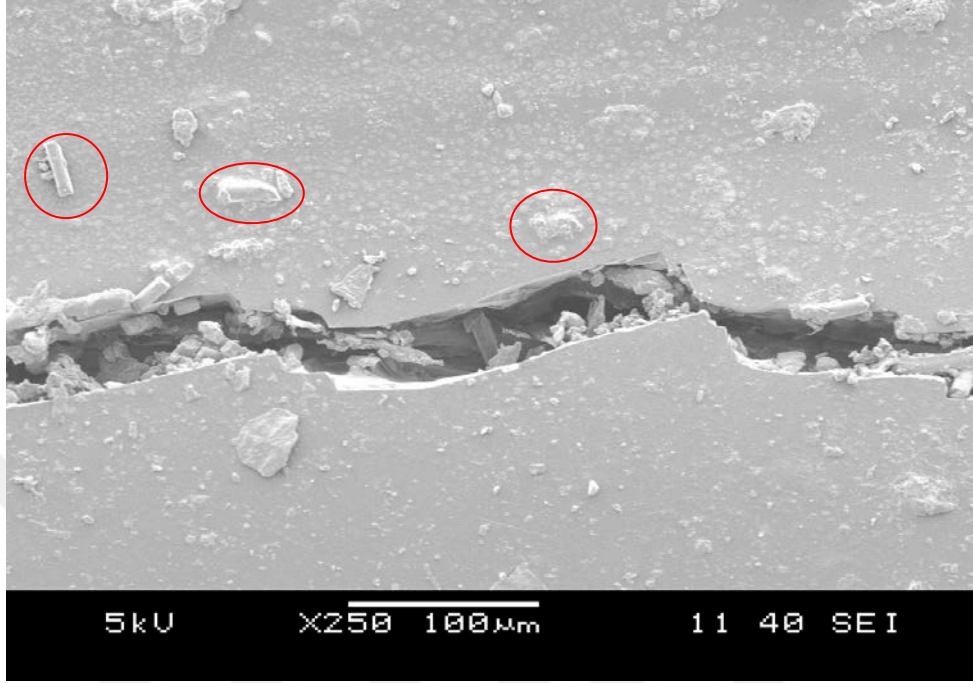
**Şekil.4.35.** Epoxy Yapıştırıcı Ara Yüzey

Şekil 4.36 da numune üzerindeki kopma bölgesinden uzaklaştıkça yapıştırıcının malzeme ile birleştiği görülmektedir.

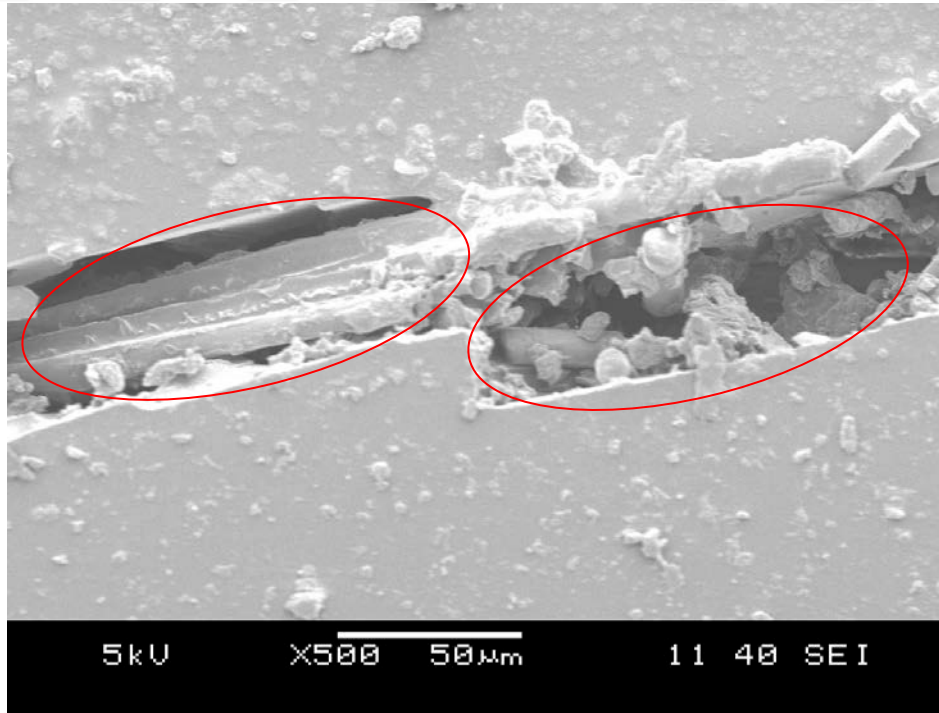


**Şekil.4.36.** Epoxy Yapıştırıcı Ara Yüzey

Şekil 4.37 ve şekil 4.38 de ayrılmalar daha yakından incelendiğinde yapıştırıcının malzeme üzerindeki parçacıkları ve yapıştırıcı içindeki kopan lifler görülmektedir. Bu lifler dikey ve yatay olarak farklı yönlerde kopmuştur.



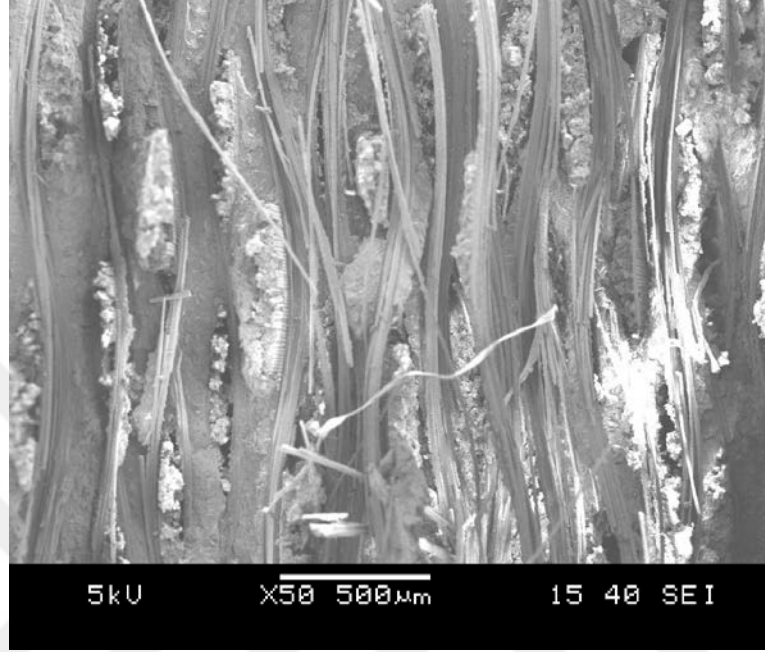
Şekil.4.37. Epoxy Yapıştırıcı Ara Yüzey



Şekil.4.38. Epoxy Yapıştırıcı Ara Yüzey

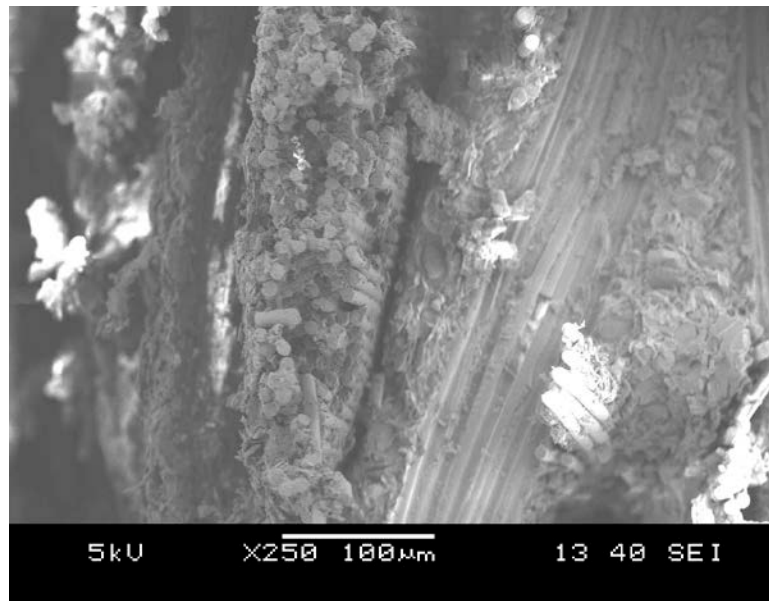
### 4.3.2. Kırık Yüzey Görüntüleri

Şekil 4.39 da çekme deneyi uygulanan numuneye ait SEM görüntüleri bulunmaktadır. Şekilde görüleceği gibi yatay ve dikey lifler kopma sonrası belirginleşmiş ve düzensiz bir şekilde kopmuştur.



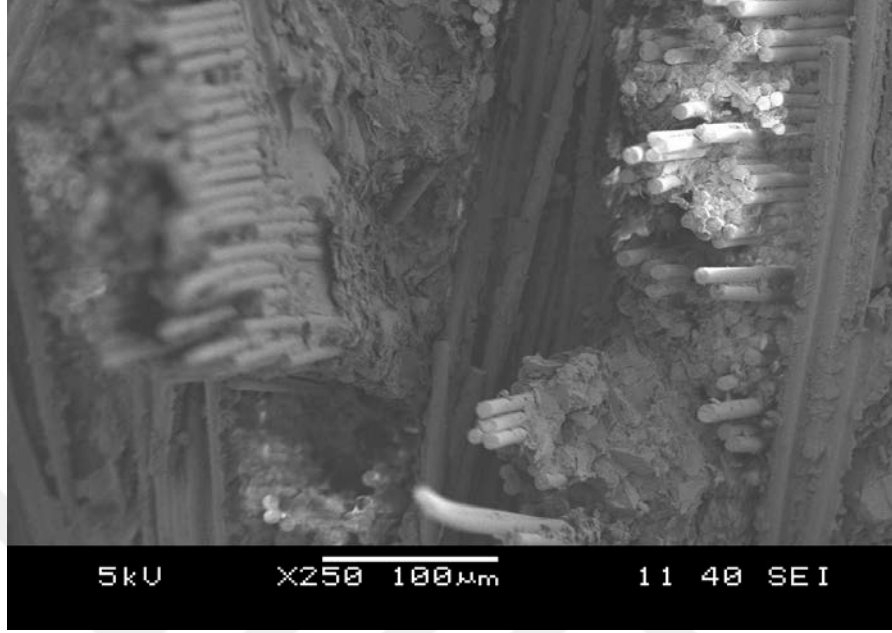
Şekil.4.39. Çekme Deneyi Kırık Yüzey Görüntüsü

Şekil 4.40 ta Charpy darbe deneyi uygulanan numuneye ait SEM görüntüleri bulunmaktadır. Şekilde görüleceği gibi yatay lifler tek bir doğrultuda kopmuş, dikey liflerde ise uç noktalarda kırılmalar meydana gelerek kopmalar gerçekleşmiştir.



Şekil.4.40. Charpy Darbe Deneyi Kırık Yüzey Görüntüsü

Şekil 4.41 de eğme deneyi uygulanan numuneye ait SEM görüntüleri bulunmaktadır. Şekilde görüleceği gibi yatay liflerde farklı bölgelerde kopmalar oluşmuştur. Dikey liflerde ise düzensiz ve daha uzun kopmalar meydana gelmiştir.



Şekil.4.41. Eğme Deneyi Kırık Yüzey Görüntüsü

## 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada cam elyafli epoksi fiber kompozit malzemelerin çekme, darbe ve eğme yüklerine karşı onarım sonrası durumu incelenmiştir. Kompozit malzemelerin yenilenme maliyeti yüksek olacağı için onarılması ve bu onarımın mümkün olduğunca uzun süre kalıcı olması ihtiyaç duyulan bir durumdur. Çeşitli onarım tipleri ve farklı yapıştırıcılar kullanılarak deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

Beklendiği gibi hasarsız numuneler, hasarlı ve onarılmış numunelere göre daha fazla çekme, eğme ve darbe yükü taşımışlardır. Hasarlı numuneler ise en düşük dayanıma sahip olmuşlardır. Çeşitli parametreler değiştirilerek yapılan onarımlar sonrası ise malzemelerin dayanımı yapılan testler ve parametrelere bağlı olarak değişiklik göstermiştir.

Çekme kuvvetine karşı onarım sonrası en yüksek dayanım 10x20 basamaklı yamada ve Epoxy yapıştırıcı da görülmüştür. Epoxy yapıştırıcı Montage Klebstoff a göre basamaklı yamada üstünlük sağlarken, dolgu yamada daha düşük bir dayanım göstermiştir. Yapılan deneyler ve sonuçları doğrultusunda durum değerlendirildiğinde; çekme kuvvetine maruz kalacak bölgelerde basamaklı yama uygulanmasının ve uygulamada Epoxy yapıştırıcı kullanılmasının daha yüksek bir dayanım sağlayacağı belirlenmiştir. Basamaklı yamanın dolgu yamaya göre daha iyi bir sonuç vermesinin sebebi ise dolgu yama için kullanılan açının kaymaya yol açmasıdır. Basamaklı yama uygulanması mümkün olmayan bölgelerde ise dolgu yama kullanılmalı fakat yapıştırıcı olarak Montage Klebstoff tercih edilmelidir. Dolgu yama içinde en yüksek dayanım ise 60° açığa sahip olan tipte görülmüştür.

Eğme kuvvetine karşı onarım sonrası en yüksek dayanım 60° açı ile uygulanmış dolgu yamanın Epoxy yapıştırıcı ile kullanılması sonucunda görülmüştür. Dolgu yamanın basamaklı yamaya göre daha iyi bir sonuç vermesinin sebebi ise yapışma yüzeyinin geometrisi ve yüzey alanının daha fazla olmasıdır. Yama tipine bakılmaksızın Epoxy yapıştırıcı kullanılması Montage Klebstoff a göre daha yüksek dayanım sağladığı sonucuna varılmıştır. Eğme kuvvetine karşı en düşük dayanım ise tıkama metodunda görülmüştür. Tıkama metoduna ilave olarak kullanılan Al folyo uygulaması ise çok düşük seviyelerde bir etki oluşturmuştur.

Darbe kuvvetine karşı onarım sonrası en yüksek dayanım 10x30 Basamaklı yamanın Epoxy yapıştırıcı ile kullanılması sonucunda görülmüştür. Basamaklı

yamanın daha yüksek bir dayanım göstermesinin sebebi ise yamanın uygulanması için dolgu yamaya göre daha az yama bölgesi açılmasıdır. Yama tiplerinin tamamında Epoxy yapıştırıcı Montage Klebstoff yapıştırıcıya karşı üstünlük sağlamış ve daha yüksek bir dayanım oluşturmuştur. Bu sebeple tüm tiplerde Epoxy yapıştırıcı kullanılmasının daha dayanıklı bir onarım gerçekleşmesini sağladığı belirlenmiştir. Tıkama metodunda kullanılan Al folyo uygulaması ise dayanıma bir etki gösterememiştir.

Genel olarak tüm verilerin ortak bir şekilde değerlendirilmesi sonucunda Epoxy yapıştırıcının onarım için daha uygun bir seçenek olduğu saptanmıştır. Onarım tipi olarak çekme ve darbe kuvvetlerinde basamaklı yama, eğme kuvvetinde ise dolgu yama metodu uygulanmasının en uygun tercihler olduğu belirlenmiştir. Alternatif seçenekler aşağıda verilmiştir.

- Çekme kuvvetine maruz kalan bölgelerde basamaklı yama için uygun alan yok ise Montage Klebstoff yapıştırıcı ile 60° dolgu yama uygulanması,
- Eğme kuvvetine maruz kalan bölgelerde 60° dolgu yama için uygun alan yok ise yine Epoxy yapıştırıcı ile basamaklı yama uygulaması,
- Darbe kuvvetine maruz kalan bölgelerde basamaklı yama için uygun alan yok ise Epoxy yapıştırıcı ile 45° dolgu yama uygulaması

## 6. KAYNAKLAR

- 1) Onat A. Sakarya MYO Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü Ders Notu, Sakarya, 2015, 1-3
- 2) Rao, V.V., Singh, R. Malhotra, S.K., Residual strength and fatigue life assessment of composite patch repaired specimens. Composites: 1999, Part B. Vol. 30, 621-627.
- 3) Goertzen, W.K., Kessler, M.R., Dynamic mechanical analysis of carbon/epoxy composites for structural pipeline repair, Composites: 2007, Part B. Vol. 38, pp. 1-9.
- 4) Soutis, C., Duan, D-M., Goutas, P., Compressive behaviour of cfrp laminates repaired with adhesively bonded external patches. Composite Structures. 1999, Vol. 45, pp. 289-301.
- 5) Sayman, O. Analysis of Multi-Layered Composite Cylinders under Hygrothermal Loading. Composites: 2005, Part A, 36: 923-933.
- 6) Aktaş, M., and Karakuzu, R. 2008, Determination of Mechanical Properties of Glass-Epoxy Composites in High Temperatures. Polymer Composites, article in pres.
- 7) Topçu, M., Altan, G., and Ergun, E. An Experimental Investigation on Damage Loads of Butterfly Joints in Composite Structures. Advanced Composites Letters, 2007, 16: 197-204.
- 8) Karakuzu, R., Çalışkan, C. R., Aktaş, M., and İçten, B. M. Failure Behavior of Laminated Composite Plates with Two Serial Pin-Loaded Holes. Composite Structures, 2008, 82: 225-234.
- 9) Karakuzu, R., Taylak, N., İçten, B. M., and Aktaş, M. Effects of Geometric Parameters on Failure Behavior in Laminated Composite Plates with Two Parallel Pin-Loaded Holes. Composite Structures, 2008, 85: 1-9.
- 10) Camanho, P. P., and Lambert, M. A Design Methodology for Mechanically Fastened Joints in Laminated Composite Materials. Composites Science and Technology, 2006, 66: 3004-3020.
- 11) Xiao, Yi. Bearing Deformation Behavior of Carbon/Bismaleimide Composites Containing One and Two Bolted Joints. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2003, 22: 169-182.



- 12) Kweon, J. H., Jung, J. W., Kim, T. H., Choi, J. H., and Kim, D. H. Failure of Carbon Composite-to-Aluminum Joints with Combined Mechanical Fastening and Adhesive Bonding. *Composites Structures*, 2006, 75: 192-198.
- 13) Adams, R. D., and Comyn J. Joining Using Adhesives. *Assembly Automation*, 2000, 20: 109-117.
- 14) Kinloch, A. J. Adhesive in Engineering. *Proc. Instn. Mech. Engrs.*, 1997, 211: 307-335.
- 15) Hojjati, M., Johnston, A., Hoa, S. V., and Denault, J. Viscoelastic Behavior of Cytec FM73 Adhesive during Cure. *Journal of Applied Polymer Science*, 2004, 91: 2548-2557. 95
- 16) Baker, A. A., and Jones R. Bonded Repair of Aircraft Structures. Dordrecht: Martinus Nijoff Publishers, 1988, 196s. 93
- 17) Seo, D. C., and Lee, J. J. Fatigue Crack Growth Behaviour of Cracked Aluminium Plate Repaired with Composite Patch. *Composite Structures*, 2002 57: 323–330.
- 18) Toudeshky, H. H., Mohammadi, B., and Daghyani, H. R. Mixed-Mod Fracture Analysis of Aluminum Repaired Panels Using Composite Patches. *Composites Science and Technology*, 2006, 66: 188–198.
- 19) Duong, C. N., Verhoeven, S., and Guijt, C. B. Analytical and Experimental Study of Load Attractions and Fatigue Crack Growths in Two-Sided Bonded Repairs. *Composite Structures*, 2006, 73: 394-402.
- 20) Sabelkin, V., Mall, S., Hansen, M. A., Vandawaker, R. M., and Derriso, M. Investigation into Cracked Aluminum Plate Repaired with Bonded Composite Patch. *Composite Structures*, 2007, 79: 55-66.
- 21) Ahn S-H, Springer G.S. Repair of composite laminates-I: test results. *Journal of Composite Materials*, 1998, 32: 1036–1074.
- 22) Tzetzis, D., Hogg, P.J. Bondline toughening of vacuum infused composite repairs. *Journal of Composites*: 2006, Part A, 37, 1239-1251.
- 23) Tzetzis, D., Hogg, P. J. Experimental and finite element analysis on the performance of vacuum-assisted resin infused single scarf repairs. *Journal of Materials and Design*, 2008, 29, 436-449.

- 24) Bleay, S.M., Loader, C.B., Hawyres, V.J., Humberstone, L., Curtis, P.T. A smart repair system for polymer matrix composites. *Journal of Composites*: 2001, Part A, 32, 1767-1776.
- 25) Pang, J.W.C., Bond, I.P. A hollow fibre reinforced polymer composite encompassing self – healing and enhanced damage visibility. *Journal of Composites Science and Technology*, 2005, 65, 1791–1799.
- 26) Odi R.A., Friend C.M A comparative study of finite element models for the bonded repair of composite structures. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2002, 21: 311-332.
- 27) Gama B.A., Cichanowski C., Gillespie J.W. Jr. Static and dynamic axial compression of scarf repaired thick section composite laminates. *International SAMPE Symposium and Exhibition (Proceedings)*, 2003, 48 I: 814–825.
- 28) Soutis, C., Zu, F.Z., Design and Performance of Bonded Patch Repairs of Composite Structures, Department of Aeronautics, Imperial College of Science
- 29) Tomita, Y., Tamaki. T., Morioka, K., Effect of Fiber Strength on Notch Bending Fracture of Unidirectional Long Carbon Fiber-Reinforced Composites, *Materials Characterization* 41 1998, 123-135.
- 30) Tomita, Y., Tempaku, M., Effect of Fiber Strength on Tensile Fracture of Unidirectional Long Carbon Fiber-Reinforced Epoxy Matrix Composites, *Materials Characterization* 38 1997, 91-96.
- 31) Achour, T., Bouiadjra, Serier, B., Numerical Analysis of the Performances of the Bonded Composite Patch for Reducing Stress Concentration and Repairing Cracks at Notch, *Computational Materials Science* 28 2003, 41–48. ASTM-D. 3039-76, 1982
- 32) Campilho, R.D.S.G., Moura, M.F.S.F., Domingues, J.J.M.S., Modelling Single and Double-lap Repairs on Composite Materials, *Composites Science and Technology* 65 2005, 1948–1958.
- 33) Salehi-Khojin, A., Thoreson A.R., Zhong W., Stone J.J., Gan, Y.X., The Effect of Patch Geometry on the Static and Fatigue Behaviors of Defective Aluminum Panels Repaired with a Composite Patch, *Journal of Adhesion Science and Technology* 2006, Vol. 20, No. 6, pp. 537–554.

- 34) Toudeshky, H.H., Effects of Composite Patches on Fatigue Crack Propagation of Single-side Repaired Aluminum Panels, *Composite Structures* 76 2006, 243–251.
- 35) Bouiadjra, B.B., Rezgani, L., Ouinas, D., Belhouari, M., Ziadi, A., Numerical Analysis of the Notch Effect and the Behaviour of Notch Crack in Adhesively Bonded Composite Laminates, *Computational Materials Science* 38 2007, 759–764.
- 36) Tsouvalis, N.G., Mirisiotis L.S., Experimental Investigation of the Static Behaviour of a Hole Drilled Steel Plate Reinforced with a Composite Patch, Shipbuilding Technology Laboratory, School of Naval Architecture and Marine Engineering, National Technical University of Athens, 15780 Athens, , 2007, The Authors. *Journal compilation Strain* 2008, 44, 133–140, Greece.
- 37) Ouinas, D., Sahnoune, m., Bebdouche, N., Bouiadjra, B.B., Stress Intensity Factor Analysis for Notched Cracked Structure Repaired by Composite Patching, *Materials and Design* 30 2009, 2302–2308.
- 38) Her, S., Chao, M., Adhesively Bonded Patch Repair of Composite Laminates, *Journal of Adhesion Science and Technology* 2011, 25 :2569–2585. 124
- 39) Luo, Q., and Tong, L. Analytical Solutions for Nonlinear Analysis of Composite Single-Lap Adhesive Joints. *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 2009, 29: 144-154.
- 40) Bouiadjra, B. B., Fekirini, H., Series, B., and Benguediab, M. Numerical Analysis of the Beneficial Effect of the Double Symmetric patch Repair Compared to Single one in Aircraft Structures. *Computational Materials Science*, 2007, 38: 824-829.
- 41) Madani, K., Touzain, S., Feaugas, X., Benguediap, B., and Radwani, M. Numerical Analysis for the Determination of The Stress Intensity Factors and Crack Opening Displacements in Plates Repaired with Single and Double Composite Patches. *Computational Material Science*, 2008, 42: 385-393.
- 42) Seydibeyoğlu, M.Ö., "Karbon Elyaf Kompozitlerin Hazırlanmasında Yeni Teknolojiler", (Kasım 2012) III. Uluslararası Polimerik Kompozitler Sempozyumunda Sunuldu, İzmir
- 43) Arıcasoy O. 2006 Kompozit Sektör Raporu, İstanbul Ticaret Odası
- 44) Daniel I.M. and Ishai O. "Engineering Mechanics of Composite Materials", Oxford University Press, 1994, New York.

- 45) Yıldız II. Sarıkanai M. "Finite- element analysis of thick composite beams and plates", Composite Science and Technology 2001, 61 (200i) 1723-1727 .
- 46) Mazumdar,S.K.: Composites Manufacturing, CRC Press, USA, 2002, 4-56
- 47) Gay, D.: Composite Materials Design and Applications, CRC Press, USA, 2003, 12-18
- 48) Sur,G., “Karma Takviyeli Alüminyum Matrisli Kompozitlerin Üretimi, Mekanik Özellikler Ve İşlenebilirliğin İncelenmesi”, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2008
- 49) W. F. Smith, Malzeme Bilimi Ve Mühendisliği, 3. Baskıdan Çeviri, N.G. Kınıkoğlu, 2001 K. Onaran, Malzeme Bilimi
- 50) Tanır, 1997 Termoplastik kompozitlerin imalı ve mekanik özelliklerinin bulunması
- 51) Sorucu A. Ortotropik malzemelerde çatlak ilerlemesi ve kırılma tokluğu tayini, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir, 2007
- 52) Department Of Defense Handbook, Composite Materials Handbook, Volume5, Ceramic Matrix Composites, 2002
- 53) Şahin, Y.,”Kompozit Malzemelere Giriş”, Gazi Kitapevi, Ankara, 2000, 1-16,37-41,65-68,79-88
- 54) Jawaid, A., Barnes, S. and Ghadimzadeh, S.R., “Drilling of particulate aluminium silicon carbide metal matrix composites”, Proceedings of the Machining of Composite Materials Symposium, ASM Materials Week, Chicago, Illinois, 1992, 35-47
- 55) Warren, R., Ceramic-matrix composites, Springer, 1992, 276p.
- 56) Beşergil B. “Kompozitler Temel İlkeler Test Metotları” Gazi Kitabevi 2016, sy.107.
- 57) Seydibeyoğlu,M.Ö.,(2012,9-11kasım),"Karbon Elyaf Kompozitlerin Hazırlanmasında Yeni Teknolojiler", III. Uluslararası Polimerik Kompozitler Sempozyumunda Sunuldu, İzmir
- 58) Saçak, M., “Polimer Kimyası”, Gazi Kitabevi, Ankara, 2002, 85-89, 221-224, 275-297, 393-397
- 59) Strategic Study, The Worldwide Composite Industry Jec Composites 2010
- 60) Kurt,H., “Alüminyum-Alümina Kompozit Malzeme Üretiminde Karıştırma Tekniğinin Kompozitin Aşınma Davranışı Üzerine Etkilerinin Araştırılması”, Bitirme Projesi,Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2010

- 61) Zor, M. (b.t.). 7 Aralık 2015 Kompozit malzemelerle ilgili genel bilgiler.
- 62) Attia O., Kinloch A.J., Matthews F.L. The prediction of fatigue damage growth in impact-damaged composite skin/stringer structures. Part I: Theoretical modelling studies. *Composite Science and Technology*, 2003, 63:1463-1472
- 63) Belhouari, M., Bouiadjra, B.B., Megueni A., Kaddouri K. Comparison of double and single bonded repairs to symmetric composite structures: a numerical analysis. *Journal of Composite Structures*, 2004, 65, 47-53
- 64) Abrate, S., *Impact on composite structures*. Cambridge, Cambridge University Press. 1998, 135-160.
- 65) O'Brien, T. And Elber, W., 1993, *Delamination and Fatigue of Composite Materials*
- 66) Choi, H.Y., Wu, H.-Y.T. and Chang, F.K., *A new approach toward understanding damage mechanisms and mechanics of laminated composites due to low-velocity impact: Part II Analysis.*, *J. Compos. Mater.*, 1991, 25, 1012-1038
- 67) Min-Gyu Song, Jin-Hwe Kweon, Jin-Ho Choi, "Effect of Manufacturing Methods on the Shear Strength of Composite Single-Lap Bonded Joints", Research Center for Aircraft Parts Technology, School of Mechanical and Aerospace Engineering, Gyeongsang National University, Republic of Korea, 2006, 660-701
- 68) *Mühendis ve Makina Cilt:52 Sayı: 614 Sayfa:94-102*
- 69) Wu, H.-Y.T. and Springer, G.S., *Measurements of matrix cracking and delamination caused by impact on composite plates.*, *J. Compos. Mater.*, 1988 22, 518-532
- 70) Cui, W. and Wisnom, M.R., *A combined stress-based and fracture mechanics-based model for predicting delamination in composites.*, *Composites*, 1993, 24(6), 467-474
- 71) Wang, S.S., *Delamination crack growth in unidirectional fiber reinforced composites under static and cyclic loading.*, In *Composite Materials: Testing and Design (Fifth Conference)*, ASTM STP 674 (Ed. S.W. Tsai), American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA, 1979, pp. 642-663
- 72) Choi, H.T. and Chang, F.-K., *A model for predicting damage in graphite/epoxy laminated composites resulting from low-velocity point impact.*, *J. Compos. Mater.*, 1992, 26(14), 2134-2169

- 73) Chang, F.-K., Choi, H.Y. and Jeng, S.-T., „Study on impact damage in laminated composites.‘, Mech. Mater., 1990, 10, 83-95,
- 74) A Günaydın, B. Kompozit yama ile onarılmış yüzey çentikli filaman sarım borularda yorulma davranışları, Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 2010
- 75) Park, R., Jang, J., Impact behavior of aramid fiber/glass fiber hybrid composites: Effect of stacking sequences. Polymer Composites, 2001, 22 (1): 80-89.
- 76) Belingardi G, Cavatorta MP, Paolino DS. Repeated impact response of hand lay-up and vacuum in fusion thick glass reinforced laminates. International Journal of Impact Engineering, 2008
- 77) Harris, B. 2003. Fatigue in Composites Science and Technology of the Fatigue Response of Fibre-Reinforced Plastics, CRC Press.
- 78) Attia O., Kinloch A.J., Matthews F.L. The prediction of fatigue damage growth in impact-damaged composite skin/stringer structures. Part I: Theoretical modelling studies. Composite Science and Technology, 2003, 63:1463-1472
- 79) Abdel Wahab, M.M., Ashcroft, I.A., Crocombe, A.D. ve Shaw, S.J. Prediction of Fatigue Thresholds in Adhesively Bonded Joints Using Damage Mechanics and Fracture Mechanics, Journal of Adhesion Science Technology, 2001, 15(7), 763–781.
- 80) Azouaoui, K., Rechak, S., Azari, Z., Benmedakhene, S., Laskimi, A., Pluvinage, G., “Modelling of damage and failure of glass/epoxy composite plates subject to impact fatigue”, International Journal of Fatigue, 2001, 23:877-885.
- 81) Jacobson, G. Corrosion—a Natural but Controllable Process. AMPTIAC Quart, 2003, 7(4).
- 82) Goertzen, W.K. ve Kessler, M.R. Dynamic Mechanical Analysis of Carbon/Epoxy Composites for Structural Pipeline Repair, Composites: Part B. 2007, Vol. 38, pp. 1-9.
- 83) Ferreira, J.M., Pires J.T.B., Costa, J.D., Zhang, Z.Y., Errajhi, O.A., Richardson, M., “Fatigue damage analysis of aluminized glass fiber composites”, Materials Science and Engineering A, 2006, 407, 1-6.

- 84) Bleay, S.M., Loader, C.B., Hawyes, V.J., Humberstone, L., Curtis, P.T. A smart repair system for polymer matrix composites. *Journal of Composites*: 2001, Part A, 32, 1767-1776.
- 85) Campilho, R.D.S.G., de Moura, M.F.S.F., Domingues, J.J.M.S. Modelling single and double-lap repairs on composite materials. *Journal of Composites Science and Technology*, 2005, 65, 1948-1958.
- 86) Yala, A.A., Megueni, A. 2008, Optimisation of composite patches repairs with the design of experiments method. *Journals of Materials and Design*.
- 87) Schubbe. J.J., 1997, Thickness effects on a cracked aluminum plate with composite patch repair, Ph.D. Thesis, Air Force Institute of Technology, Wright-Patterson AFB, Ohio.
- 88) Mazumdar, S.K., 2002, Composites manufacturing materials, Product and Process Engineering, CRC Press, United States of America.
- 89) Hoskin, B. ve Baker, A. 1986. *Composite Materials for Aircraft Structures*. AIAA Education Series, AIAA, New York.
- 90) Bleay, S.M., Loader, C.B., Hawyes, V.J., Humberstone, L., Curtis, P.T. A smart repair system for polymer matrix composites. *Journal of Composites*: 2001, Part A, 32, 1767-1776.
- 91) Chicken, S.H., Welburn, S. Reed, S., Repairing composite aircraft structures-RAF experience of peacetime and battle damage techniques. *Aeronautical Journal* 1997, 101 (1006), 277-285.
- 92) Armstrong, K.B. ve Barrett, R.T. 1998, *Care and Repair of Advanced Composites*. SAE Press, Warrendale, PA.
- 93) Ersan, A. ve Memis, U., Ucak yapısal tamir teknikleri ve özel tamirler, Ucak Bakım Okul Komutanlığı 2004, 193 s.
- 94) Hu, F. Z., Soutis, C. Strength prediction of patch - repaired CFRP laminates loaded in comparison. *Journal of Composite Sciences and Technology*, 2000, 60, 1103- 1114.
- 95) Clarke, S. 2002, *Field Repair of Composite Plates Using Fibre Metal Laminates*, M.S. Thesis. Carleton University, Ottawa, Ontario.
- 96) Abaris Training Notes 2007
- 97) Marioli-Riga Z., Xenos D., Vrettos C. A standard analysis methodology for the stress analysis of repaired aircraft structures with the method of composite patch repair. *Applied Composite Materials*, 2004, 11: 191–203.

- 98)** Odi R.A., Friend C.M A comparative study of finite element models for the bonded repair of composite structures. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2002, 21: 311-332.
- 99)** Hosur, M. V., Vaidya, U. K., Myers, D., Jeelani, S. Studies on the repair of ballistic impact damaged S2 – glass / vinyl ester laminates. *Journal of Composite Structures*, 2003, 61, 281-290.
- 100)** Marioli-Riga Z., Xenos D., Vrettos C. A standard analysis methodology for the stress analysis of repaired aircraft structures with the method of composite patch repair. *Applied Composite Materials*, 2004, 11: 191–203.
- 101)** Roberts, P.D., 1995, Crack growth retardation by carbon fibre composite patching: An application to steel pressure vessel repair. M.S. Thesis. University of Alberta, Edmonton, Alberta.
- 102)** Okafor, A.C., Singh, N., Enemuoh, U.E. Rao, S.V., Design, analysis and performance of adhesively bonded composite patch repair of cracked aluminum aircraft panels. *Composite Structures*. 2005, Vol. 71, pp. 258-270.
- 103)** R. W. Messler, “Joining of Materials and Structures”, Butterworth Heinemann, 2004.
- 104)** H. Adin, Yapıştırıcı İle Birleştirilmiş Ters Z Tipi Kompozit Malzemelerinin Mekanik Analizi, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 2007.
- 105)** Pizzi, K. L. Mittal, —Handbook of Adhesive Technology, Copyrighted Material, 2003.
- 106)** P. Cognard, —Adhesives and Sealants;, Application Techniques, New Curing Techniques: Handbook of Adhesives and Sealants, 2007, Volume 2., France, Mc Graw Hill.
- 107)** Manisa Celal Bayar Üniversitesi Malzeme Mühendisliği Çekme Deneyi Deney Föyü
- 108)** Manisa Celal Bayar Üniversitesi Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Eğme Deney Föyü
- 109)** Reid, S.R., and Zhou, G. Impact behaviour of fibre-reinforced composite materials and structures. CRC Press, Woodhead Pub., United States of America, 2000, 303 s.
- 110)** Ceyhun, V., Turan, M., Tabakalı kompozit malzemelerin darbe davranışı. *Mühendis ve Makine*, 2003, 516, 35-41.



- 111)** Gunda, N. S. K., Choi, H.-W., Berson, A., Kenney, B., Karan, K., Pharoah, J. G., Mitra, S. K., “Focused ion beam-scanning electron microscopy on solidoxide fuel-cell electrode: Image analysis and computing effective transport properties”, *Journal of Power Sources*, 2011, 196: 3592-3603
- 112)** Barnett, S.A., Wilson, J.R., Kobsiriphat, W., Chen, H.Y., Mendoza, R., Hiller, J.M., Miller, D.J., Thornton, K., Voorhees, P.W., Alder, S.B., “Three dimensional analysis of solid oxide fuel cells using Focused ion beam Scanning electron microscopy”, *Microsc. Microanal.*, 2007, 13: 596-597



## ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Mümin KILINÇ  
Doğum Yeri ve Yılı : Manisa, 1991  
Medeni Hali : Evli  
Yabancı Dili : İngilizce  
E-posta : [klncmumin@gmail.com](mailto:klncmumin@gmail.com)



### Eğitim Durumu

Lise : Manisa MESOB METEM Meslek Lisesi, CNC Bölümü 2004-2007

Ön lisans : Manisa Celal Bayar Üniversitesi Turgutlu Meslek Yüksekokulu, Makine Bölümü, 2007-2009

Lisans : Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, 2011-2015

Yüksek Lisans : Manisa Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği İmalat ve Konstrüksiyon Bilim Dalı, 2015-2019

### Mesleki Deneyim

Kurum bilgisi : Ersoy Makine ve Kalıp Sanayii 2006-2016  
Kurum bilgisi : SKP Makine ve Kalıp 2016-(hâlen)