KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRO-OPTİK SİSTEM MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ADHEZİF BİRLEŞTİRME DAYANIMINI ARTTIRMAK İÇİN KARBON FİBER KATKILI KOMPOZİT MALZEMELERİN YÜZEYLERİNİN LAZER İLE İŞLENMESİ

YALÇIN ERDOĞAN

KOCAELİ 2018

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRO-OPTİK SİSTEM MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ADHEZİF BİRLEŞTİRME DAYANIMINI ARTTIRMAK İÇİN KARBON FİBER KATKILI KOMPOZİT MALZEMELERİN YÜZEYLERİNİN LAZER İLE İŞLENMESİ

YALÇIN ERDOĞAN

Doç.Dr. Erhan AKMAN
Danışman, Kocaeli Üniv. .....

Doç.Dr. Belgin GENÇ ÖZTOPRAK
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv. .....

Dr.Öğr.Üyesi Zeynep TAŞLUÇUKUR ÖZTÜRK
Jüri Üyesi, İstanbul Gedik Üniv. .....

Tezin Savunulduğu Tarih: 09.07.2018

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez çalısmamın hazırlanmasında, sabır ve titizlikle verdiği tüm emekler ve geleceğe yönelik kazandırdığı bilimsel bakıs açısı için sayın hocam Doç. Dr. Erhan AKMAN'a tesekkür ediyorum.

Yüksek lisans tez çalısması süresince yardımlarını esirgemeyen ve çalışmalarımda yol gösteren Kocaeli Üniversitesi Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi öğretim üyeleri Doç. Dr. Onur ÇOBAN, Doç. Dr. Mustafa Özgür BORA ve Doç. Dr. Belgin GENÇ ÖZTOPRAK'a tesekkür ederim.

Yüksek lisans tez çalısması süresince sağladığı laboratuvar desteğinden dolayı Doç. Dr. Sinan FİDAN'a teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans eğitimim süresince kazandırdığı bilimsel bakış açısı ve motivasyonu ile çalışmalarımın bu noktaya gelmesinde büyük katkısı olan Kocaeli Üniversitesi Öğretim Üyelerinden sayın hocam Prof. Dr. Arif DEMİR'e tesekkür ederim.

Yüksek lisans Tez çalışmamın gerçekleşmesine 215M775 no'lu TUBİTAK 1001 projesi bünyesinde sağladıkları desteklerden dolayı Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu'na teşekkür eder saygılarımı sunarım.

Eşim Zeynep ARSLAN ERDOĞAN'a yüksek lisans çalısmalarım süresince gösterdiği sabır ve destek için tesekkür eder saygılarımı sunarım.

Haziran-2018 Yalçın ERDOĞAN

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR i
İÇİNDEKİLER ii
ŞEKİLLER DİZİNİ iv
TABLOLAR DİZİNİ viii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ ix
ÖZET x
ABSTRACT xi
GİRİŞ 1
1. KOMPOZİT MALZEMELER 3
1.1. Takviye Eden Faz 5
1.2. Takviye Edilen Faz(Matris Fazı) 6
1.3. Polimer Matrisli Kompozitler 6
1.3.1. Kompozit malzemelerde kullanılan başlıca elyaf türleri 7
1.4. Karbon Fiber 7
1.5. Karbon Fiber Kullanım Alanları 8
1.5.1. Hava araçlarında kompozit malzemelerin kullanımı 9
1.6. Kullanım Alanına Bağlı Olarak Birleştirme Yöntemleri 10
1.7. Kompozit Malzemelerin Mekanik Birleştirilmesindeki Yapısal Arıza Modları 13
2. ADHEZİF YAPIŞTIRMA 16
2.1. Yapışkan Çeşitleri 21
2.1.1. Epoksi yapıştırıcılar 21
2.2. Yüzey Temizleme İşlemleri 22
2.2.1 Mekanik süreçler 23
2.2.2 Kimyasal süreçler 24
2.2.3 Fiziko-Kimyasal süreçler 24
2.3. Adhezif Yapıştırmayı Etkileyen Parametreler 25
2.3.1. Yapıştırıcı kalınlığı etkisi 25
2.4. Adhezif Yapışmada Yüzey Özelikleri 27
2.5. Yüzey Pürüzlülüğü 28
2.6. Yüzey Enerjisi ve Kontak Açısı 30
2.7. CFRP Malzemelerin Yüzey Kimyası 30
3. LAZERLER 34
3.1. Lazer Işığının Özellikleri ve Çalışma Prensibi 34
3.2. Lazerin Bileşenleri 35
3.2.1. Lazer enerji pompalama 36
3.2.2. Lazer aktif madde, lazer aktif ortam 36
3.2.3. Resonatörler ve ayna yansıtıcılar 36
3.3. Lazer Işığının Özellikleri 37
3.4. Lazer Çeşitleri 38
3.5. CO_2 Lazer 39
3.6. Lazer ile Yüzey Temizleme 41
4. MALZEME VE METHOD 54

4.1. Karbon Fiber Takviyeli Kompozit (CFRP) Malzeme ve Yapıştırıcı 54
4.2. Adhezif Yapıştırma Sistemi 55
4.3. Lazer Sistemi ve Deneysel Düzenek 58
4.3.1. Karbondioksit lazeri (IR) 58
4.4. Temas Açısı Ölçümü 60
4.5. Lazer 3D Optik Profilometre ile Analiz 62
4.6. Yüzey Görüntüleme 63
4.7. Spektroskopik Yüzey Analizi 64
4.8. Tekil Bindirme Testi 67
5. ADHEZİF YAPIŞTIRMA DAYANIMINI ARTTIRMAK İÇİN KARBON FİBER KATKILI KOMPOZİT MALZEMELERİN YÜZEYLERİNİN LAZER İLE İŞLENMESİ 71
5.1. Yapıştırıcının Belirlenmesi 72
5.2. Referans Örneklerinin Belirlenmesi 73
5.3. CO_2 Lazer ile Yüzey İşleme Çalışmaları 82
5.4. Nd:YAG Lazer ile Yüzey İşleme Çalışmaları 97
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 106
KAYNAKLAR 111
KİŞİSEL YAYINLAR VE ESERLER 118
ÖZGEÇMİŞ 119

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Kompozit malzeme faz gösterimi 3
Şekil 1.2. Doğa da kullanılan kompozit uygulaması 4
Şekil 1.3. a) Tek doğrultuda dizilmiş elyaf b) İki doğrultuda dizilmiş elyaf 5
Şekil 1.4. Karbon fiber uygulama örnekleri 6
Şekil 1.5. Karbon elyaf gösterimi 8
Şekil 1.6. Otomotivde kullanılan kompozit parçaları 9
Şekil 1.7. Savunma amaçlı kullanılan kompozit malzemeler 9
Şekil 1.8. Airbus A380'de fiber katkılı kompozitlerin uygulamaları 10
Şekil 1.9. Mekanik birleştirme yöntemleri 12
Şekil 1.10. Perçinli bağlantıdaki gerilme dağılımı 13
Şekil 2.1. Adezyon ve kohezyon olayları 17
Şekil 2.2. Mekanik bağlantı stres dağılımı 17
Şekil 2.3. Yapıştırma ile birleştirme Stres Dağılımı 18
Şekil 2.4. Soyulma ve ayrılma yükleri bağlantı şekli 18
Şekil 2.5. Yapıştırma bağlantı şekilleri 19
Şekil 2.6. Sünek ve kırılgan yapıştırıcılar için çakışma 20
Şekil 2.7. Örnek literetürde yapılmış bağ kalınlığı çalışması 26
Şekil 2.8. Yapışkan kalınlığının teori ve deneysel sonuçlarda 27
Şekil 2.9. Örnek yüzey pürüzlülüğü ve çekme dayanım testi ilişkisi 29
Şekil 2.10. Çekme dayanım grafiği 33
Şekil 3.1. Örnek lazer çalışma prensibi 35
Şekil 3.2. Lazer enerji geçişleri 37
Şekil 3.3. Lazer ışın demeti 38
Şekil 3.4. CO_2 çalışma mantığı 39
Şekil 3.5. PWM gösterimi 41
Şekil 3.6. Lazer türlerine göre termal etki 43
Şekil 3.7. Lazer dalga boyu ile farklı termoplastiklerin geçirim grafiği 44
Şekil 3.8. Örnek CO_2 ile yüzey tarama işlemi 45
Şekil 3.9. Farklı güçlerdeki lazerin malzeme yüzeyine etkisi 45
Şekil 3.10. Sonlu elemanlar yöntemi ile oluşturulan ısıl yayılım görüntüsü 46
Şekil 3.11. Örtüşme oranlarına göre yüzey temizliği 47
Şekil 3.12. CFRP malzemelerin yapışma ile birleştirme işlemi için yüzeylerinin farklı işlemeler sonrası mikroskop görüntüleri; (a) işlenmemiş, (b) zımparalanmış, (c) ve (d) CO2 lazer ile işlenmiş 48
Şekil 3.13. Farklı akılarda Nd:YAG ve CO_2 lazeri ile gerçekleştirilen yüzey işleme örneklerine ait görüntüler 49
Şekil 3.14. Yüzey temizleme işlemlerine göre kontak açısı 50
Şekil 3.15. Yüzey işleme yöntemlerine göre çekme dayanımı 50
Şekil 3.16. Atım sayısına göre ablasyon derinlik miktarı 51
Şekil 3.17. Mukavemet karşılaştırılması 51
Şekil 3.18. Çekme deneyi sonuçları 52
Şekil 3.19. Hata durumları 53

Şekil 4.1. Fiber takviyeli plastiklerin tekil bindirmeli yapıştırma bağlantısı standardı, ASTM D5868-01 54
Şekil 4.2. Yapıştırma işleminde kullanılan Loctite EA9396 Aero ve teknik özellikleri..... 55
Şekil 4.3. Yapıştırma ile birleştirmede kontrollü yapıştırıcı kalınlığı sağlamak için tasarlanan ilk kalıp tasarımı 56
Şekil 4.4. a) Yapıştırma ile birleştirmenin yapıldığı 3 eksenli düzenek, b) komparatör ve c) kamera yardımıyla incelenen kesit görüntüsü ile doğrulama. 57
Şekil 4.5. Örneklerin istenilen yapıştırma kalınlığında birleştirilme prosedürü. 57
Şekil 4.6. Yapıştırma işlemi yapılmış örneklere ait kesit görüntüsü 58
Şekil 4.7. Deneysel çalışmalarda kullanılan CO_2 lazere ait görüntü ve teknik özellikleri..... 59
Şekil 4.8. Deneysel çalışmalarda kullanılan Nd:YAG lazer ve UV demete ait görüntüler 60
Şekil 4.9. Tez süresince işlenen yüzeylerin temas açısını belirlemek için oluşturulan düzenek..... 61
Şekil 4.10. Tez bünyesinde laboratuarda oluşturulan temas açısı ölçüm sistemi..... 62
Şekil 4.11. Nanovea PS50 marka Lazer 3D optik profilometre cihazı 63
Şekil 4.12. a) Görüntülemede kullanılan Olympus BX51 marka optik mikroskop..... 64
Şekil 4.13. FTIR-ATR spektrofotometresi 65
Şekil 4.14. Lazerle oluşturulan plazma spektroskopisi (LIBS sistemi) 66
Şekil 4.15. Yüzeylerin element analizinde kullanılan XPS sistemi 67
Şekil 4.16. Bindirme bağlantı çeşitleri..... 68
Şekil 4.17. Yükleme öncesi ve sonrası kayma gerilmesi dağılımının sonlu eleman analiz sonuçları 68
Şekil 4.18. Tekil Bindirmeli Bağlantıda Kayma Gerilmesi Dağılımı 69
Şekil 4.19. Çekme cihazı ve çenelere sabitlenmiş kompozit numunesi..... 70
Şekil 5.1. Henkel Loctite 3450 ve EA 9396 yapıştırıcıları kullanılarak üretilen örneklerin a) yapıştırma bağlatısı dayanımı sonuçları b) Henkel Loctite 3450 72
Şekil 5.2. a) İşlenmemiş b) Zımparalanmış yüzeylere ait profilometre, optik mikroskop ve elektron mikroskobu görüntüleri..... 73
Şekil 5.3. a) Zımpara ile yüzeyleri aşındırılmış b) işlenmemiş örneklere ait temas açısı ölçüm görüntüsü 74
Şekil 5.4. Yüzeyleri zımpara ile işlenmiş örneklerin yapıştırıcı kalınlığına göre mekanik dayanım sonuçları..... 75
Şekil 5.5. b) Kesit görüntüleri, c) 300µm, 400µm ve 500µm yapıştırıcı kalınlığındaki örneklerde oluşan gözenek kusurları..... 76
Şekil 5.6. Fiber takviyeli polimer kompozitlerde yapıştırmalı bağlantılarındaki hasar mekanizması 77
Şekil 5.7. Kompozit malzemelerde soyulma hasarı 78
Şekil 5.8. Zımparalanmış CFRP numunelerinin 30 µm yapıştırıcı kalınlığı için hasar yüzeyleri..... 78

Şekil 5.9. Zımparalanmış CFRP numunelerinin 50 µm yapıştırıcı kalınlığı için hasar yüzeyleri 79
Şekil 5.10. Zımparalanmış CFRP numunelerinin 100 µm yapıştırıcı kalınlığı için hasar yüzeyleri 79
Şekil 5.11. Zımparalanmış CFRP numunelerinin 200 µm yapıştırıcı kalınlığı için hasar yüzeyleri 79
Şekil 5.12. Zımparalanmış CFRP numunelerinin 300 µm yapıştırıcı kalınlığı için hasar yüzeyleri 80
Şekil 5.13. Zımparalanmış CFRP numunelerinin 400 µm yapıştırıcı kalınlığı için hasar yüzeyleri 80
Şekil 5.14. Zımparalanmış CFRP numunelerinin 500 µm yapıştırıcı kalınlığı için hasar yüzeyleri 80
Şekil 5.15. Çekme kuvveti nedeni ile yapıştırıcıda ve yapıştırılan numune yüzeylerinde oluşan gerilmeler 82
Şekil 5.16. CO_2 Lazer kullanılarak farklı lazer akılarında (3, 6, 9, 12 j/cm^2) yüzeyleri işlenmiş CFRP laminant malzemeler ve yüzey görüntüleri 84
Şekil 5.17. CO_2 Lazer kullanılarak farklı lazer akılarında (15, 18, 21, 24 j/cm^2) yüzeyleri işlenmiş CFRP laminant malzemeler ve yüzey görüntüleri 84
Şekil 5.18. CO_2 Lazer kullanılarak farklı lazer akılarında (33, 62 j/cm^2) yüzeyleri işlenmiş CFRP laminant malzemeler ve yüzey profilometre görüntüleri 85
Şekil 5.19. İşlenmemiş, zımparalanmış ve yüzeyleri CO_2 lazer ile farklı akılarda işlenmiş örneklere ait elektron mikroskobu görüntüleri 86
Şekil 5.20. İşlenmemiş, zımparalanmış ve farklı lazer akıları işle işlenmiş CFRP yüzeylerin temas açı ve pürüzlülük değişimleri 87
Şekil 5.21. Yüzeyleri CO_2 lazer ile işlenmiş CFRP numunelerin lazer akısına göre yapışma dayanımı sonuçları 88
Şekil 5.22. İşlenmemiş, zımpara ve lazerle işlenmiş CFRP numunelerin FTIR-ATR spektrumları 89
Şekil 5.23. İşlenmemiş, zımparalanmış ve farklı lazer akıları ile hazırlanmış CFRP yüzeylerin 1. lazer atımı LIBS spektrumları 91
Şekil 5.24. İşlenmemiş, zımparalanmış ve farklı lazer akıları ile hazırlanmış CFRP yüzeylerin 2. lazer atımı LIBS spektrumları 92
Şekil 5.25. Aynı noktadan art arda alınan spektrumlarda element oran profillerinin atım sayısına göre değişimi 93
Şekil 5.26. 6 J/cm^2 lazer akısı ile yüzeyi işlenmiş CFRP numunesinin tekil bindirme testi sonrası yüzey görüntüsü 94
Şekil 5.27. 9 J/cm^2 lazer akısı ile yüzeyi işlenmiş CFRP numunesinin tekil bindirme testi sonrası yüzey görüntüsü 95
Şekil 5.28. 18 J/cm^2 lazer akısı ile yüzeyi işlenmiş CFRP numunesinin tekil bindirme testi sonrası yüzey görüntüsü 95
Şekil 5.29. 33 J/cm^2 lazer akısı ile yüzeyi işlenmiş CFRP numunesinin tekil bindirme testi sonrası yüzey görüntüsü 95
Şekil 5.30. 9 J/cm^2 lazer akısı ile yüzeyi işlenmiş CFRP numunelerinin yapıştırma kalınlığına bağlı olarak kayma dayanımı değerlerinin değişimi 96

Şekil 5.31. Farklı lazer akılarında yüzeyleri UV dalgaboyunda lazer ile işlenmiş örneklere ait optik mikroskop görüntüleri 97
Şekil 5.32. UV (355 nm) ve IR (10,6 µm) dalgaboyundaki lazerler ile işlenmiş yüzeylerin yüksek büyütmedeki görüntüleri..... 98
Şekil 5.33. UV lazer ile farklı akılarda yüzeyleri işlenmiş örneklere ait 99
Şekil 5.34. UV lazer ile yüzeyleri farklı akılarda işlenen ve 50 µm yapıştırıcı kalınlığında birleştirme işlemi gerçekleştirilen örneklerin tekil bindirme test sonuçları..... 100
Şekil 5.35. UV Lazer ile farklı akılarda yüzeyleri işlenen CFRP örneklere ait elektron mikroskobu görüntüleri..... 101
Şekil 5.36. İşlenmemiş, zımparalanmış, CO_2 ve UV lazer ile farklı enerji..... 102
Şekil 5.37. 160 mj/cm^2 akı değerinde UV lazer ile işlenmiş ve sonrasında çekme testine tabii tutulan örneklerin hasar analizleri 103
Şekil 5.38. 240 mj/cm^2 akıl değerinde UV lazer ile işlenmiş ve sonrasında çekme testine tabii tutulan örneklerin hasar analizleri 104
Şekil 5.39. 400 mj/cm^2 akı değerinde UV lazer ile işlenmiş ve sonrasında çekme testine tabii tutulan örneklerin hasar analizleri 104
Şekil 5.40. 440 mj/cm^2 akı değerinde UV lazer ile işlenmiş ve sonrasında çekme testine tabii tutulan örneklerin hasar analizleri 104
Şekil 5.41. 480 mj/cm^2 akı değerinde UV lazer ile işlenmiş ve sonrasında çekme testine tabii tutulan örneklerin hasar analizleri 105
Şekil 6.1. Farklı yüzey işleme teknikleri kullanılarak yüzeyleri işlenen ve adhezif olarak birleştirilen örneklerin tek bindirme kayma dayanımı sonuçları 110

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo 1.1. Mekanik birleştirme avantajları ve dezavantajları 11
Tablo 1.2. Hata modları..... 14
Tablo 2.1. CFRP yüzeyinde % kimyasal kirlenme oranları 28
Tablo 2.2. CFRP'nin yüzey enerjisi ve pürüzlülüğü..... 28
Tablo 2.3. Örnek yüzey kimyası 32
Tablo 2.4. Yüzey işleme yöntemlerine göre yüzey kimyası 32
Tablo 5.1. Yüzeylerin XPS sonuçlarına bağlı yüzey element konsantrasyonları..... 89

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

A	: Lazer spot alanı, (cm^2)
c	: Işık hızı, (m/s)
E	: Lazer enerjisi, (Joule)
F	: Lazer akısı, (J/cm^2)
μ	: Lazer frekansı, (Hz)
FL	: Yapışıtırıcı bağlantısının kopma yükü, (Newton)
G	: Yapıştırıcı kesme modülü,(mPa)
h	: Planck sabiti, (J.s)
I	: Lazer enerji yoğunluğu, (J/cm^2)
l	: Yapıştırma örtüşme uzunluğu, (mm)
P	: Lazer ortalama gücü, (Watt)
Ra	: Yüzey Pürüzlülüğü, (um)
V	: Lazer tarama hızı, (mm/s)
t	: Birim zaman, (sn)
ta	: Yapıştırıcı kalınlığı, (um)
ts	: Alt katman kalınlığı, (mm)
w	: Bağlantı genişliği, (mm)
ω_0	: Lazer odak noktasının yarıçapı, (um)
τ_y	: Yapıştırıcının akma kesme mukavemeti,(mPa)
τ_r	: Yapıştırıcının kesme dayanımı, (mPa)
σ_y	: Yapıştırıcının akma gerilimi, (mPa)
λ	: Lazer dalga boyu, (m)

Kısaltmalar

ASTME	: Amerikan Malzeme ve Üretim Mühendisleri Toplumu
CFRC	: Karbon Fiber Katkılı Kompozit
CFRP	: Karbon Fiber Katkılı Polimer
CW	: Sürekli Dalgalı
FEM	: Sonlu Elemanlar Yöntemi
FTIR	: Fourier Dönüşümlü Kızılaltı Spektroskopisi
ICAO	: Uluslararası Sivil Havacılık Organizasyonu
IEB	: Isıdan Etkilenmiş Bölge
IR	: Kızılötesi
LIBS	: Lazer Etkileşimli Plazma Spektroskopisi
PMMA	: Polimetil Metakrilat
PWM	: Darbe Genişliği Modülasyonu
UV	: Ultraviyole
XPS	: X-ışını Fotoelektron Spektroskopisi

ADHEZİF BİRLEŞTİRME DAYANIMINI ARTTIRMAK İÇİN KARBON FİBER KATKILI KOMPOZİT MALZEMELERİN YÜZEYLERİNİN İNTERFEROMETRİK LAZER DEMETİ İLE İŞLENMESİ

ÖZET

Karbon fiber katkılı kompozitler (CFRC-Carbon Fiber Reinforced Composites) olağanüstü dayanıklılıkları, düşük yoğunlukları gibi özeliklerinin getirdiği avantajlar sebebiyle havacılık veya otomotiv sektöründe çok fazla tercih edilen kompozit malzemeler arasındadır. Kompozit parçaların kullanılacakları uygulama büyük ve karmaşıksa genellikle birden fazla parçanın birleştirilmesi ile üretilirler.

Karbon fiber kompozitlerinin birbirlerine bağlanması işlemi birçok zorlukları beraberinde getirmektedir. Mekanik bağlantılar yük taşıyıcı görevini üstlenen fiberlere zarar vermekte ve birleştirme noktalarında yüksek gerilme yığılmalarının oluşmasına neden olmaktadır. Bu noktada alternatif bir teknik olarak kabul edilen yapıştırma ile birleştirme mekanik bağlantı yöntemlerine göre, hafifilik, sızdırmazlık, korozyon ve maliyet gibi avantajlar sunmaktadır. Adhezif yapıştırma prosesinde bağlanma kalitesini belirleyen belki de en önemli faktör malzeme yüzeyidir. Güçlü ve dirençli bir yapışma bağlantısı sağlamak için yapıştırıcı ve malzeme arasında iyi bir adezyon sağlanmalıdır. Bu durum yapışma öncesi kompozit yüzeylerin işlenmesi ile gerçekleştirilir. Geleneksel yöntemlere alternatif olarak ortaya çıkan lazer ile yüzey işleme, karbon fiber katkılı kompozitlerin işlenmesinde kullanım potansiyeli olan bir tekniktir.

Bu çalısmada Karbon Fiber Katklı Kompozitlerin adhezif yapışma için yüzey temizleme işlemi infrared ve ultraviyole bölgesinde ışıma veren farklı özeliklerdeki lazerler ile gerçekleştirilmiştir. Üretilen yüzeylerin mekanik ve spektroskobik analizleri ile yapışmaya uygunluğu yapıştırma sonrası gerçekleştirilen tekil bindirme çekme testleri ile karşılaştırmalı olarak belirlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Karbon Fiber Katkılı Kompozit Malzemeler, Lazer ile Yüzey İşleme, Yapıştırma ile Birleştirme.

LASER BEAM PROCESSING OF CARBON FIBER REINFORCED COMPOSITE MATERIALS SURFACES TO INCREASE ADHESIVE JOINING STRENGTH

ABSTRACT

Carbon fiber reinforced composites (CFRC-Carbon Fiber Reinforced Composites) are highly preferred composite materials in the aerospace or automotive industry due to their advantages such as extraordinary durability and low density. Composite parts are usually produced by combining multiple parts if the application is large and complex. Joints are the weakest part of the structure as naturally.

The process of bonding carbon fiber composites to one another has many difficulties. The mechanical joints damage the fibers which serve as load carriers and cause high stress build-up at the joints. At this point, adhesive bonding, which is considered as an alternative technique, offers advantages such as lightness, tightness, corrosion and cost compared to mechanical connection methods. The most important factor that determines bonding quality in the adhesive bonding process is perhaps the material surface. In order to provide a strong and durable adhesion bonding, good adhesion between the adhesive and the material should be provided. This is accomplished by processing composite surfaces prior to bonding. As an alternative to conventional methods, surface treatment with laser is a technique that has the potential to be used in the processing of carbon fiber reinforced composites.

In this study, the surface cleaning process of adhesive bonding of Carbon Fiber reinforced Composites was performed with different laser types. Radiation was given in infrared and ultraviyolet region. The mechanical and spectroscopic analysis were carried out for the surface treatment. Its suitability for adhesion were determined in comparison with the single lap tensile tests after bonding.

Keywords: Carbon Fiber Reinforced Composite Materials, Surface Treatment with Laser, Adhesion Bonding.

GİRİŞ

Karbon fiber kompozitlerinin birbirlerine bağlanması işlemi birçok zorluklarıda beraberinde getirmektedir. Mekanik bağlantı elemanları ile yapılan geleneksel birleştirme yöntemleri büyük stres konsantrasyonlarına neden olmaktadır. Buna kıyasla, yapıştırma yöntemi ile bağlantı yapmak, daha yüksek bir mekanik performans göstermektedir. Yapıştırıcı ile bağlantı yöntemi artan mühendislik uygulamalarındaki mekanik bağlantılara alternatif olarak kullanılmaktadır. Geleneksel bağlantı yöntemlerine göre hızlıdır ve birçok avantajı vardır. Bu avantajlar arasında daha düşük yapısal ağırlık, daha düşük imalat maliyeti ve geliştirilmiş hasar toleransı sayılabilir [1]. Yapıştırma yöntemi ile bağlanan parçaların birleştirme kabiliyeti geliştirilir ve uygulaması kolaydır. Güçlü ve dirençli yapışkan bir bağ elde etmek için; yapıştırıcı ile birleştirme altlığı arasında uygun bir derecede yapışmanın olması gerekir. Bununla birlikte yapıştırıcının mukavemeti ve dayanaklılığı, yapıştırıcının yüzey ile olan uyumluluğu, yapıştırma kalınlığı, kirlenme, stres ve çevresel koşullar yapıştırma kalitesini ve mukavemetini etkilemektedir [2].

Kompozit malzemelerin yapışma performansını arttırmak için farklı yüzey işleme yöntemleri kullanılmaktadır. Üretim işleminden kaynaklanan yüzey kirlilikleri, düzgün yüzeyler, düşük yüzey enerjileri ve ıslanabilirlik, kompozitlerin yapışkan davranışını bozmaktadır.

Yüzey hazırlama yöntemleri arasında bulunan lazerle yüzey temizleme işlemi etkili bir yöntemdir. Kimyasal aşındırma, aşındırıcı kumlama ve plazma yüzey temizleme gibi diğer geleneksel işlemlere kıyasla avantajlara sahiptir. Lazerle yüzey temizleme, fiber takviyesini etkilemeden yüzeydeki polimer tabakasının kısmen veya tamamen çıkarılmasına izin verir. Uygun yüzey özelliklerine ulaşmak için lazer parametreleri (lazer akısı, darbe sayısı, dalga boyu vb.) dikkatle seçilmelidir.

BÖLÜM 1'de kompozit malzemelerin tanımı ile birlikte kompozitlerin fiziksel özellikleri, kullanım alanları, kompozitleri mekanik bağlantılı birleştirme yöntemi ve bu bağlantı yapısından kaynaklanan hata durumları hakında yöntemler yer almaktadır.

BÖLÜM 2'de kompozit malzemelerin birleştirme yöntemlerinden biri olan adhezif yapıştırma yöntemi, yapıştırmada kullanılan yapıştırıcı çeşitleri, yüzey temizleme işlemleri ve yapıştırmanın kalitesini etkileyen parametreler hakkında literatür bilgisi verilmiştir.

BÖLÜM 3'te lazerler hakkında kısa literatür bilgisi ile kompozit malzemelerin lazer ile yüzey temizleme işlemleri ve bu işlemlerin kompozit malzemelerin çekme dayanıma etkisi hakkında literatürde yapılan çalışmalar yer almaktadır.

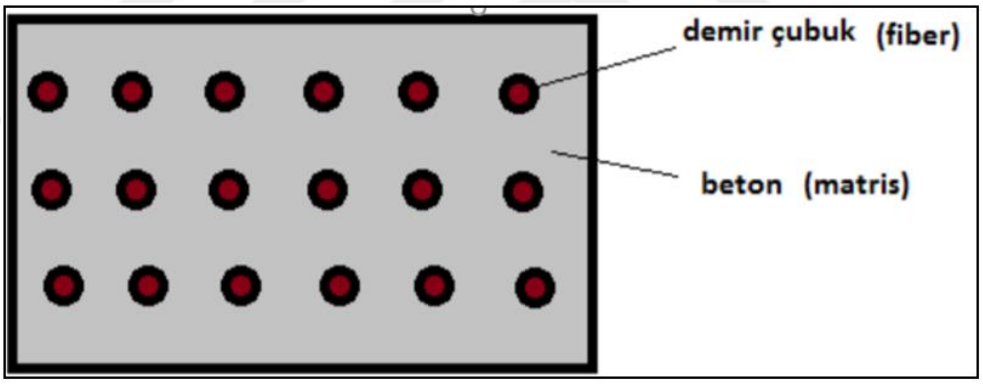
BÖLÜM 4'te deneysel çalışmada kullanılan adhezif yapıştırmada kullanılan yapıştırıcı, yapıştırma işleminde kullanılan düzenek, Karbon Fiber Katkılı Kompozit malzemelerin lazer ile yüzey temizleme işleminin gerçekleştirildiği deneysel düzenek, kompozit yüzeyi temizlendikten sonra yüzey özelliklerinin ölçümünde kullanılan düzenekler ve Karbon Fiber Katkılı Kompozit malzemenin çekme testinin nasıl yapıldığı hakkında bilgi verilmiştir.

Deneysel çalısmanın yapıldığı BÖLÜM 5'te en iyi yapıştırma parametrelerini elde etmek için çalışmalar yapıldı ve bu parametrelerin çekme mukavemeti üzerine etkileri yapılan testler yardımı ile belirlenmiştir, elde edilen bilgiler ve grafikler ayrıntılı bir biçimde verilmiş ve değerlendirilmesi yapılmıştır.

BÖLÜM 6'da bu tezde yapılan çalışmaların sonuçları özetlenmiştir.

1. KOMPOZİT MALZEMELER

Kompozit malzemeler; iki ya da daha fazla malzemenin uygun özelliklerini tek malzemede toplayarak veya yeni bir özellik çıkarmak amacıyla makro düzeyde birleştirilmesi sonucu oluşturulan malzemelerdir. Fakat uygulamada kompozitler, bileşenlerin makro düzeyde bir araya geldiği malzemeler olarak anılmaktadır [3]. Günümüzde ise en çok kullanılan kompozitlerden biri olarak kullanılan beton Şekil 1.1'de gösterilmiştir. Çimento ve kumdan meydana gelen matris çelik çubuklar ile takviyelenir. Kompozit malzemeler aslında prensip olarak uzun yıllar önce kullanılmaya başlanmıştır. Kompozitin doğada uygulama örneği olarak kerpiçin bileşimindeki kil, dayanıklığının artması için saman ve bitkisel liflerle harmanlanmıştır. (Bkz. Şekil 1.2)



Şekil 1.1. Kompozit malzeme faz gösterimi[4]



Şekil 1.2. Doğa da kullanılan kompozit uygulaması [4]

Bir malzemeden aynı anda birçok özellik beklenmektedir. Fakat ne yazık ki malzemeler kendi başlarına istenen özelliklerin tümünü gösteremeyebilir. Yüksek performanslı bir malzemeye ihtiyaç duyulan bir alanda aynı anda sağlamlık, aşınma dayanımı, rijitlik, darbe dayanımı, hafiflik istenebilir [3]. Bu özelliklerin sadece metallerle, sadece seramiklerle veya sadece polimerlerle elde edilmesi güçtür. Böyle bir durumda her biri belli bir özelliği ile iyi olan malzemeler kompozitin bir fazını oluşturacak şekilde bir araya getirilip üretilerek ihtiyaçlar karşılanabilir. Kompozit malzemelerde çekirdek olarak, bir takviye edici malzeme ve bunun çevresinde hacimsel olarak çoğunluğu oluşturan bir matris malzeme bulunmaktadır. Burada takviye edici malzeme, kompozit malzemenin mukavemet ve yük taşıma özelliğini sağlamaktadır. Matris malzeme ise, plastik deformasyona geçişte oluşabilecek çatlak ilerlemelerini önler ve kompozit malzemenin kopmasını geciktirmektedir [3].

Kompozitler, özellikle polimer kompozitler yüksek mukavemet, boyut ve termal kararlılık, sertlik, aşınmaya karşı dayanıklılık gibi özellikleriyle pek çok avantajlar sağlar. Ayrıca kompozit malzemeler neredeyse metaller kadar dayanıklı ve sert olmalarının yanında çok da hafiftirler. Bir kompozitte matris ve takviye fazı olarak adlandırılan iki temel faz vardır [3]. Bu iki unsurun özellikleri, ihtiyaç duyulan nitelikleri karşılayacak şekilde kontrol edilebilir.

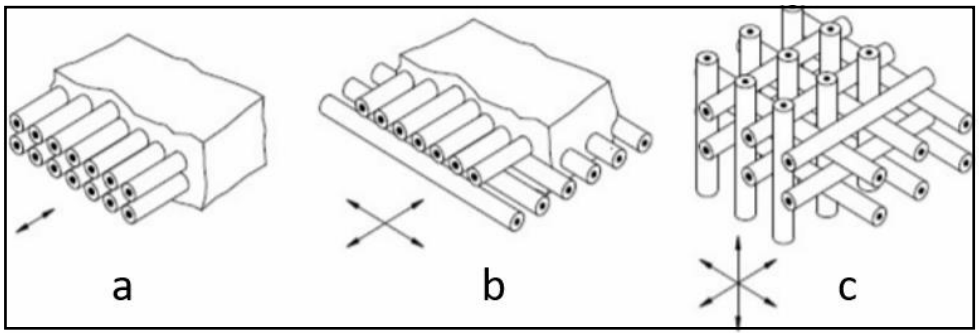
1.1. Takviye Eden Faz

Takviye faz (takviye eden faz) kompozit malzemelerde yükün taşındığı fazdır. Yükün büyük bölümü bu faz tarafından taşınarak malzeme mukavemeti arttırılmaktadır. Mukavemetin arttırılmasında takviye faz ile matris fazının birbirine uyumu ve birbirine bağlanması önemlidir [5].

Takviye fazı tanecik ve elyaf yapısında bulunabilir. Kompozit malzemelerde mukavemetin fazla veya az olması elyafın tipine, kompozitteki malzeme oranına ve elyafın yönü ile dağılımına göre değişmektedir. Elyafın kompozitin mukavemetini arttırabilmesi için elyaf ile takviye edilen faz (matris fazı) ile sarılması bir diğer adıyla ıslanma olması gerekmektedir [3].

Takviye edilen fazın ıslatabileceği elyafın bir sınır değeri vardır. Sınır değerine kadar elyaf miktarı arttırıldığında kompozitin mukavemeti artmaktadır. Sınır değerinde daha fazla elyaf sarılırsa mukavemetin azalmasına neden olacaktır [5].

Kompozit malzemenin mukavemeti istenen şekilde olabilmesi için uygulanan yükle elyafın yönü aynı doğrultuda olmalıdır. Yük farklı doğrultuda uygulanırsa ve elyafa dik yüklenirse elyafın dayanımı istenilen seviyelerde olmaz ve malzeme mukavemeti düşük olur. Bu doğrultuda, çeşitli yönlerden yük uygulanan bir uygulama için elyafların kompozit içerisindeki yönlenmesi 2 ya da 3 boyutta olmaktadır. Farklı boyutlarda elyaf dizilimi Şekil 1.3'te gösterilmiştir. Örnek karbon fiber uygulamaları ise Şekil 1.4'te gösterilmiştir.



Şekil 1.3. a) Tek doğrultuda dizilmiş elyaf b) İki doğrultuda dizilmiş elyaf c) Üç doğrultuda dizilmiş elyaf [6].



Şekil 1.4. Karbon fiber uygulama örnekleri [4]

1.2. Takviye Edilen Faz(Matris Fazı)

Matris fazı kompozit malzemeye şeklini verir ve kompoziti bir arada tutarak malzemeyi dış etkilerden korumaktadır. Kompozite dışarıdan yük uygulandığında uygulanan yükü takviye edilen faza aktarmaktadır [6].

Takviye edilen faz için istenilen bazı özellikler vardır. Bunları şu şekilde sıralanır; yüksek mukavemet, yüksek elastik uzama, yüksek kayma mukavemeti, kullanım sıcaklığında düşük sürünme, yüksek tokluk ve darbe dayanımı, düşük ısıl iletkenlik, takviye ile iyi bağ oluşturma, kimyasallara ve çözücülere dayanım, düşük nem emme, hızlı kür etme / katılaşma, kür etme sıcaklığının kullanım sıcaklığından çok yüksek olması, düşük çekme oranı, uzun raf ömrü, düşük öz kütlesi ve düşük fiyattır [7].

Kompozit malzemler takviye edilen faza göre üç sınıfa ayrılabilir; metal matrisli kompozitler, seramik matrisli kompozitler ve polimer matrisli kompozitler. Tez çalışmasında kullanılan karbon fiber kompozitleri polimer kompozitlere örnektir.

1.3. Polimer Matrisli Kompozitler

Polimer kelimesi çok parçalı manasına gelmektedir. Polimer malzemeler, çoğunlukla karbon, hidrojen ve metal olmayan diğer organik elementlerin birleşiminden oluşmaktadır [6]. Plastiklerin ana maddesini organik polimerler oluşturur. Bunlar genellikle büyük moleküllü organik bileşiklerdir. Kimyasal bakımdan incelendiğinde plastiklerde genelde karbon (C), hidrojen (H), azot (N), oksijen (O) elementlerinin

bulunduğu görülür. Bu elementlerin çeşitli yöntemlerle tepkimeye girmesiyle makromolekül adını taşıyan çok büyük ve kompleks moleküller meydana gelir ve böylece polimerler oluşur [8].

1.3.1. Kompozit malzemelerde kullanılan başlıca elyaf türleri

- Cam elyafı
- Karbon (Graphite) elyafı, (PAN -polyacrylonitrile- ve zift kökenli)
- Aramid (Aromatic Polyamid) elyafı, (Ticari ismi: Kevlar-DuPont)
- Bor elyafı
- Oksit elyafı
- Yüksek yoğunluklu polyetilen elyafı
- Poliamid elyafı
- Polyester elyafı
- Doğal organik elyaflar
- Seramik elyaflar

Cam elyafı kompozit malzemelerde en sık kullanılan takviye malzemesidir. Yüksek dayanıma ve düşük yoğunluğa sahip aramid ve karbon elyaflar yüksek maliyetlerine rağmen, hava ve uzay sanayi başta olmak üzere geniş bir kullanıma sahiptir. Tez çalışmasında karbon fiber malzemeler kullanılmıştır.

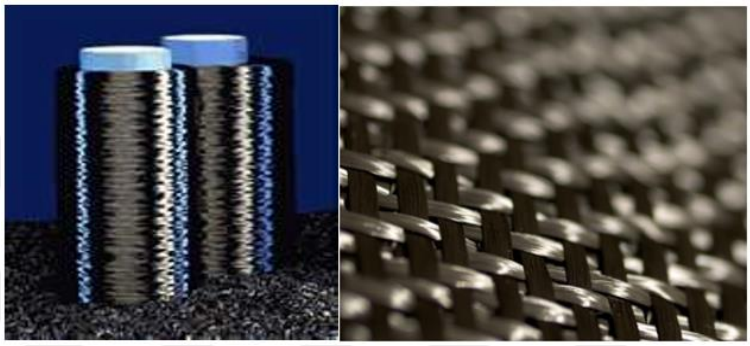
1.4. Karbon Fiber

Karbon fiber veya karbon elyaf, Arapça dilinden gelme olan, teknoloji ürünü olan ipliksi türü bir maddedir. Ana bileşimleri karbonlaşmış akrilik elyaf (Orlon), katran ve naylondur.

- Yüksek dayanıklılık, düşük yoğunluk, düşük sürtünme ve düşük ağırlık özelliklerinin üstün bileşimi ile uzay ve havacılık sanayii, savunma, otomotiv sanayilerinde, spor gereçlerinde (tenis raketi, board), yapı güçlendirme alanlarında ve enerji depolamada tercih edilen bir üründür.
- Karbon fiberin yapısı, çelikten 4,5 kat daha hafif olmasına rağmen 3 kat daha dayanıklıdır.

- Karbon fiber, naylon gibi esnek ve orlon gibi de orta derecede dayanıklı değildir. Daha sert ve çok daha dayanıklıdır.

Üretilen karbon fiber üstüne kaplama yapılarak fiberi sonraki işlemlerden (prepreg gibi) korumak için nötr bir sonlandırma işlemi (sizing işlemi) yapılır. Elyaf reçine ile kaplanır. Genellikle bu kaplama işlemi için epoksi kullanılır. Kompozit malzemede kullanılacak olan reçine ile elyaf arasında bir arayüz görevi görür. Karbon elyaf gösterimi Şekil 1.5'te görülmektedir.



Şekil 1.5. Karbon elyaf gösterimi

1.5. Karbon Fiber Kullanım Alanları

Kompozit malzemeler teknoloji geliştikçe farklı alanlarda kullanılmaya başlanmıştır. Karbon fiber malzemeler genel olarak uçak sanayisi tarafından kullanılmış ve geliştirilmiştir. İhtiyaca göre havacılık, askeri uygulamalar, türbinler, otomotiv, tıbbi ve spor malzmeleri gibi farklı sektörlerde kullanılmaktadır [9-11]. Otomotiv sektöründe karbon fiberler gövde parçalarında (kapılar, davlumbazlar, güverte kapakları, ön uç, tamponlar vb.), şasi içinde ve süspansiyon sistemleri (yaprak yaylar), tahrik milleri ve benzerleri kullanılabilir [9-11]. Otomotiv sektöründe kullanılan kompozit malzemelere örnekler Şekil 1.6'da gösterilmiştir. Savunma alanında kullanılan kompozitler Şekil 1.7'de gösterilmiştir.



Şekil 1.6. Otomotivde kullanılan kompozit parçaları[12]

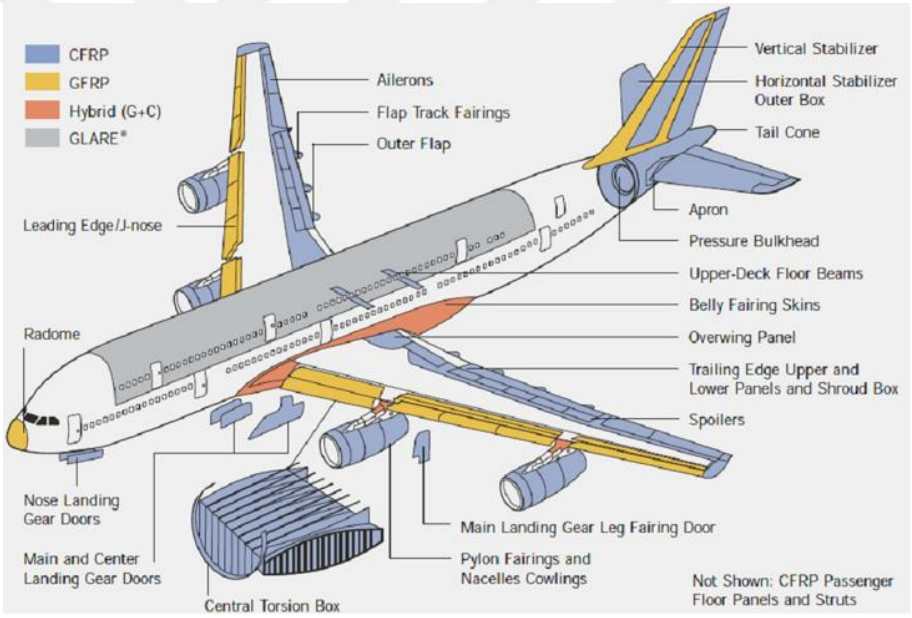


Şekil 1.7. Savunma amaçlı kullanılan kompozit malzemeler [13]

1.5.1. Hava araçlarında kompozit malzemelerin kullanımı

Günümüzde, farklı endüstrilerden kaynaklanan gaz yayılımının doğada iklim değişikliğine yol açtığı bilimsel ve politik çevreler tarafından kabul edilmiş bir gerçektir. Hava araçlarının gaz türbinli motorlarının yaydığı gazlar da (karbondioksit, nitrojen oksit ve sülfür vb.) diğer yakıtlarda olduğu gibi iklim değişikliğine neden olmaktadır. Bu çevresel sorunla mücadele edebilmek için, Uluslararası Sivil Havacılık Organizasyonu (ICAO-International Civil Aviation Organization) gibi teşkilatlar uluslararası politikalar üzerinde çalışırken, havacılık endüstrisi, hava araçlarında ağırlık azaltma, aerodinamik iyileştirmeler ve yeni uçak tasarımları gibi yöntemlere başvurmaktadır Hava araçlarının ağırlıklarının önemli ölçüde azaltılabilmesi için kompozit malzemelerin kullanılması küresel olarak kabul görmüş anahtar teknolojilerden biridir.

Karbon fiber ve polimer esaslı matrislerden oluşan ileri kompozit malzemeler metallerden daha üstün malzeme özelikleri ve daha hafif yapısal tasarımlar sağladıkları için havacılık uygulamalarında tercih edilmektedir. Kompozit malzemeler ilk olarak 1960 yılında askeri hava araçlarında kullanılmış ve 1970'lerde sivil hava araçlarına genişletilmiştir. Ancak sivil hava aracı üreticileri 2000'li yıllara kadar birincil yapısal uygulamalarda kompozit malzemeleri kullanmakta yavaş kalmışlardır [14]. Günümüzde, sektörün önde gelen üreticileri birincil ve ikincil yapısal uygulamalarda geleneksel malzemeler yerine kompozit malzemeleri kullanmaya başlamışlardır. Airbus A350'de bu oran ağırlıkça %30 iken Boeing 787'de %50 civarındadır [6]. Yakıt verimi ve gaz yayılımının yanı sıra kompozit malzemeler yolcu konforunda da gelişmelere neden olmaktadır. A380'deki fiber katkılı kompozitlerin uygulamaları Şekil 1.8'de görülmektedir [14].



Şekil 1.8. Airbus A380'de fiber katkılı kompozitlerin uygulamaları [14]

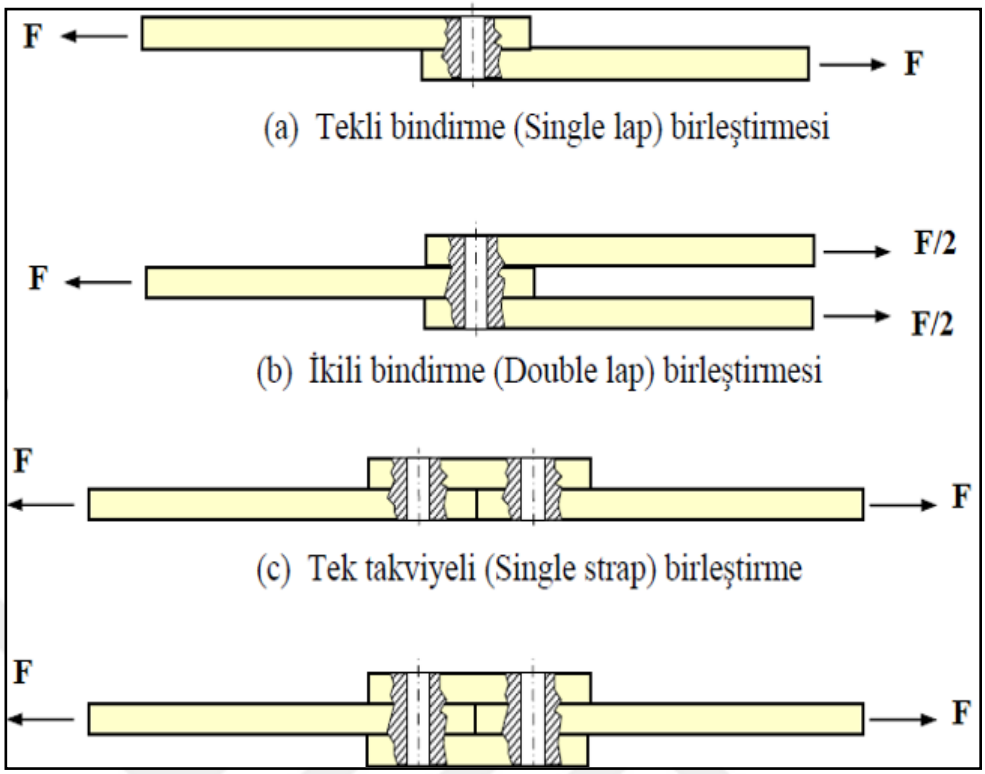
1.6. Kullanım Alanına Bağlı Olarak Birleştirme Yöntemleri

Kompozit malzemeler, mekanik ve sivil uygulamalarda yapısal bileşen olarak yaygın olarak kullanılmaktadır. Büyük yapıların elde edilmesi genellikle küçük parçalar birleştirilerek yapılır. Kompozit malzemelerin birleştirilmesinde uygulanan iki yöntem vardır. Bunlardan biri perçin cıvata gibi mekanik parçalar ile gerçekleştirilen teknik, diğeri ise yapıştırma ile birleştirme tekniğidir. Cıvata ile tutturma 2 kompozit malzemenin birleştirilmesinde kullanılan en yaygın yöntemlerden biridir.

Kompozitlerin cıvata ile tutturulması, kompozitlerin yapısını bozmadan tekrar çıkarma avantajı sağlamaktadır. Ayrıca yüzey hazırlamaya gerek duymazlar. Bununla birlikte eğer bağlantı yerleri uygun geometrik parametreler göz önünde bulundurularak tasarlanmamışsa, bunlar stres konsantrasyonunun alanları olarak hareket ederler ve sonunda dayanım olarak başarısız olurlar [15]. Bağlantı eklem yerlerinin kopma mukavemeti bilgisi bilinirse uygulamalarda kullanılacak cıvata boyutunu seçmeye yardımcı olur [15]. Mekanik birleştirme maliyeti düşük olmasına rağmen eğer otomatik birleştirme yöntemleri geliştirilmemişse uzun zaman alan bir uygulamadır. Ayrıca kompozitleri birbirine bağlamak için cıvata yanında pul ve perçin gibi diğer mekanik yardımcı elemanlara ihtiyaç duyarlar. Mekanik birleştirme, Şekil 1.9'da görüldüğü gibi daha önceden matkapla delinmiş kompozit plakaların deliklerinden civata veya perçin gibi mekanik bir bağlantı elemanı vasıtasıyla yapılmaktadır. Özellikle civata kullanımı, kompozit plakaların hasarsız olarak hızlı ve kolay biçimde birleştirilip sökülmesini sağlar. Bu yöntem ile birleştirme işlemi yapılırken birleşecek parçaların yüzeylerinin işlem görmesine gerek yoktur. Mekanik birleştirmenin avantaj ve dezavantajlarını Tablo 1.1'deki gibi sıralayabiliriz.

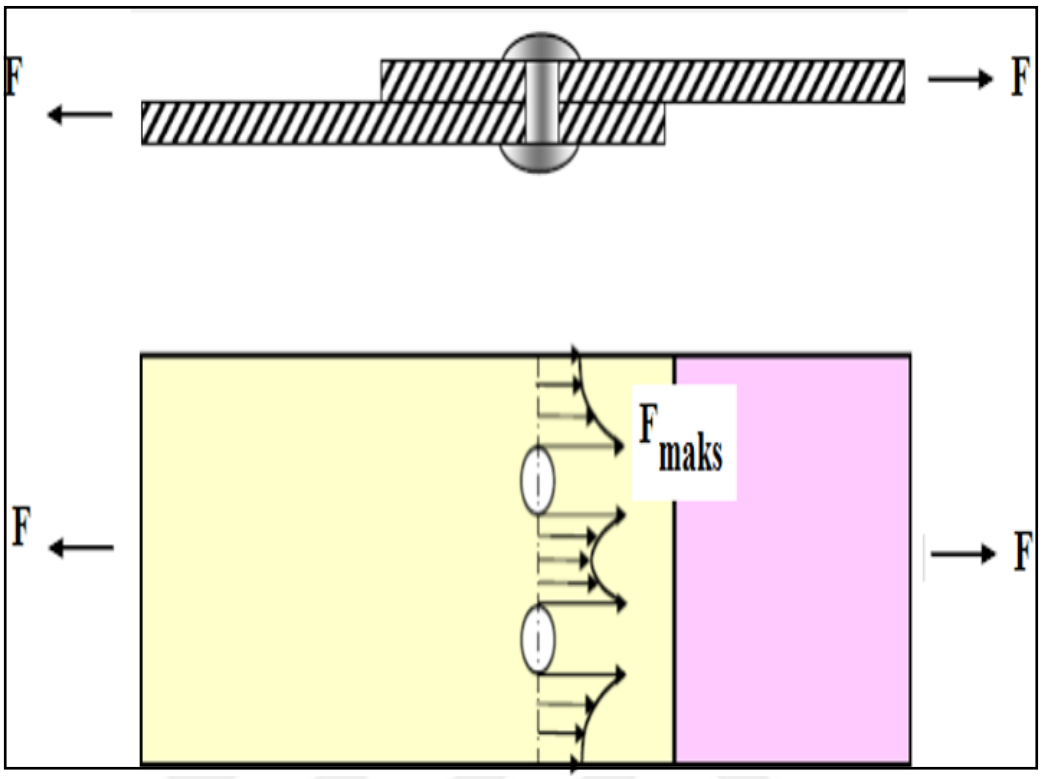
Tablo 1.1. Mekanik birleştirme avantajları ve dezavantajları

Mekanik birleştirme avantajları	Mekanik birleştirme dezavantajları
Sökülmesi kolaydır.	Önemli stres konsantrasyonu olmasıdır.
Kalınlık sınırlaması yoktur.	Mekanik bağlantı elemanlarının olmasıdır.
Bağlantı konfigürasyonu basittir.	Metalik bileşenler yorulmaya eğilimlidir.
İmalat ve denetimi basittir	Delik formasyonu kompozit hasara neden olabilir.
Çevresel etkilere duyarlı değildir.	Kompozitlerin zayıf yatak özellikleri vardır.
Soyulma kuvvetlerine karşı duyarsızdır.	Metallerde problem çıkması



Şekil 1.9. Mekanik birleştirme yöntemleri [16]

Birleştirilmiş kompozit yapının yük altındaki delik açılan bağlantı noktalarında Şekil 1.10'da görüldüğü gibi gerilme yığılmaları meydana gelir. Kesit boyunca gerilme dağılımlarının düzgün olmaması plakaların yük taşıma kapasitelerini zayıflatır. Bu durum erken malzeme yorulmasına neden olabilir. Dolayısıyla, bu birleştirme yöntemi kullanıldığında gerekli mukavemetin sağlanabilmesi için malzeme kalınlığının artırılması gerekir [17]. Ayrıca, Şekil 1.10'da da görüldüğü gibi plakalar arasındaki eksenel açıklık miktarının artması ile de birleştirme bölgesinin mukavemeti düşebilmektedir. Yani eksenel açıklık miktarının artmasından dolayı yük taşıma kapasitesi düşmektedir. Mekanik bağlantılarda eksenel açıklığın artması ise civata veya perçin hasarlarına yol açabilmektedir.

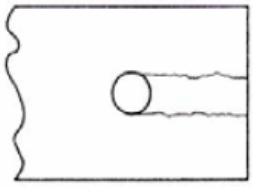
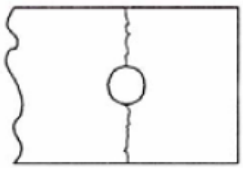
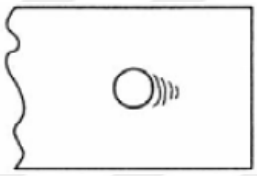
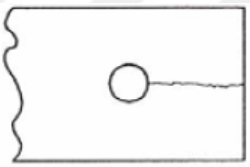


Şekil 1.10. Perçinli bağlantıdaki gerilme dağılımı [16]

1.7. Kompozit Malzemelerin Mekanik Birleştirilmesindeki Yapısal Arıza Modları

Civata perçin gibi mekanik birleştirme ile oluşturulmuş kompozit yapılar yüke tabii tutulduğunda kayma, çekme, yataklama ve yarılma olmak üzere dört adet hata modu mevcuttur. Bu hatalar ayrı ayrı oluşabileceği gibi birliktede kompozit yüzeylerinde oluşabilmektedir. Bu hataların dışında kompozit malzemenin kalınlığı yeterli olmadığında mukavemetinin yüksek olmaması ve cıvatalarda oluşabilecek yüksek kayma gerilmeleri birleştirilen kompozitlerin zarar görmesine neden olabilir [18]. Çekme ve kayma hasarlarında, hasar oluştuğu anda kuvvet aniden düşer. Yataklama hasarında ise kompozit yapının taşıyabileceği maksimum yüke ulaşıldığında kuvvet düşümü yavaş yavaş olur. Eğer kompozit plakaların fiber doğrultusu 0° ise yarılma hasarlarının oluşması mümkün olabilir. Bu yüzden tasarım yapan kişi, ani oluşabilecek hasarları engelleyebilmek için optimum geometrik parametrelerdeki birleşme dizaynını ve malzeme konfigürasyonunu yapmak zorundadır [19].

Tablo 1.2. Hata modları [18]

Hata Modları		
Kayma Hasarı		Kayma gerilimlerinden kaynaklanır. Mekanik bağlantı yapılan noktadan kompozitin kenarına doğru düzlem boyunca oluşur.
Çekme Hasarı		Mekanik bağlantı yapılan delik noktalarından kenarlardaki teğet gerilme veya basma gerilmeleri nedeniyle oluşabilir.
Yataklama Hasarı		Mekanik bağlantı yapılan noktalardaki sıkıştırma kuvveti yüzünden oluşabilir.
Yarılma Hasarı		

Mekanik birleştirme malzemeleri seçilirken dikkat edilmesi gereken hususlar [18];

- Malzemelerin çekme ve eğilme gerilmeleri
- Cıvataların dayanımı ve sertliği
- Deliklerin işlenmesinden dolayı malzemelerde oluşacak gerilme mukavemeti kaybı
- Eklemlerdeki kayma dağılımı
- Parçalar arasında sürtünme
- Atık gerilmeleri
- İzin verilen yatak gerilmeleri
- Cıvata tipi
- Yorgunluk davranışı
- Cıvatanın içinden geçerek uygulanan T-T kuvveti

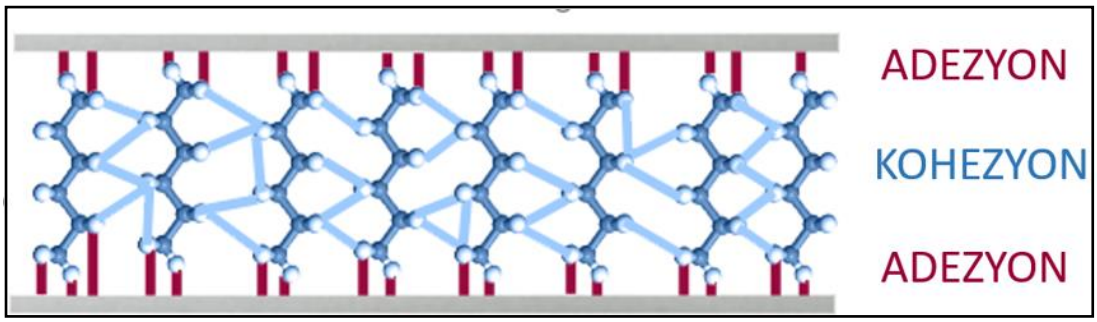
Mekanik birleştirmenin neden olduğu olumsuz etkilerin bertaraf edildiği ve karbon fiber katkılı malzemelerin doğası gereği kazandırdığı hafif konstrüksiyon avantajından yararlanabilmek için ileri birleştirme teknikleri gerekli hale gelmektedir [20].

Bu noktada yapıştırma ile birleştirme en umut verici yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır [21]. Bu yöntem bölüm 2'de ayrıntılı olarak açıklanacaktır.

2. ADHEZİF YAPIŞTIRMA

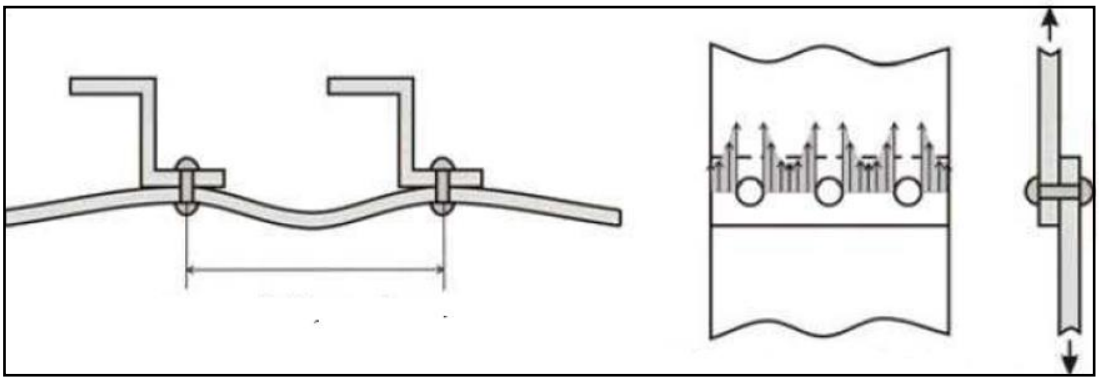
Karbon fiber kompozitlerinin birbirlerine bağlanması işlemi birçok zorluklarıda beraberinde getirmektedir. Mekanik bağlantı elemanları ile yapılan geleneksel birleştirme yöntemleri büyük stres konsantrasyonlarına neden olmaktadır. Buna kıyasla, yapıştırma yöntemi ile bağlantı yapmak, daha yüksek bir mekanik performans göstermektedir. Yapıştırma ile birleştirme, yapışkan yüzeyler arasına yerleştirilen bir yapıştırıcının, bir yapışkan bağ oluşturmak üzere katılaştığı bir malzeme birleştirme işlemidir. Yapıştırıcı ile bağlantı yöntemi artan mühendislik uygulamalarındaki mekanik bağlantılara alternatiflerdir. Geleneksel bağlantı yöntemlerine göre hızlıdır ve avantajları vardır. Bu avantajlar arasında daha düşük yapısal ağırlık, daha düşük imalat maliyeti ve geliştirilmiş hasar toleransı sayılabilmektedir [3]. Yapıştırma yöntemi ile bağlanan parçaların birleştirme kabiliyeti geliştirilir ve kolaylaştırılır. Güçlü ve dirençli yapışkan bir bağ elde etmek için, yapıştırıcı ile birleştirme altlığı arasında uygun bir derecede yapışmanın olması gerekir. Bununla birlikte yapıştırıcının mukavemeti ve dayanaklılığı, yapıştırıcının yüzey ile olan uyumluluğu, yapıştırma kalınlığı, kirlenme, stres ve çevresel koşullar yapıştırma kalitesini ve mukavemetini etkilemektedir [7].

Yapışma işlemi, yapıştırıcının kendi içinde ve yapıştırıcı ile malzeme arasında meydana gelen fiziksel ve kimyasal olaylar sonucunda gerçekleşir. Bu olaylar adezyon (adhesion) ve kohezyon (cohesion) olaylarıdır. Adezyon, yapıştırıcı ile yapıştırılan yüzey arasında meydana gelir. İki yüzeyin ara yüzey kuvvetleri (valans kuvvetleri) tarafından bir arada tutulması olayıdır. Kohezyon ise yapıştırıcının kendi içerisinde meydana gelir. Yapıştırıcıyı meydana getiren kütle bileşenlerinin kimyasal (monomerler arasındaki bağ kuvvetleri) ve fiziksel kuvvetler (Van der Waals kuvvetleri) tarafından bir arada tutulması olayıdır. Bu olay yapıştırıcının polimerisazyon aşamasında meydana gelir. Adezyon ve kohezyon olayları Şekil 2.1'de şematik olarak gösterilmiştir [22].

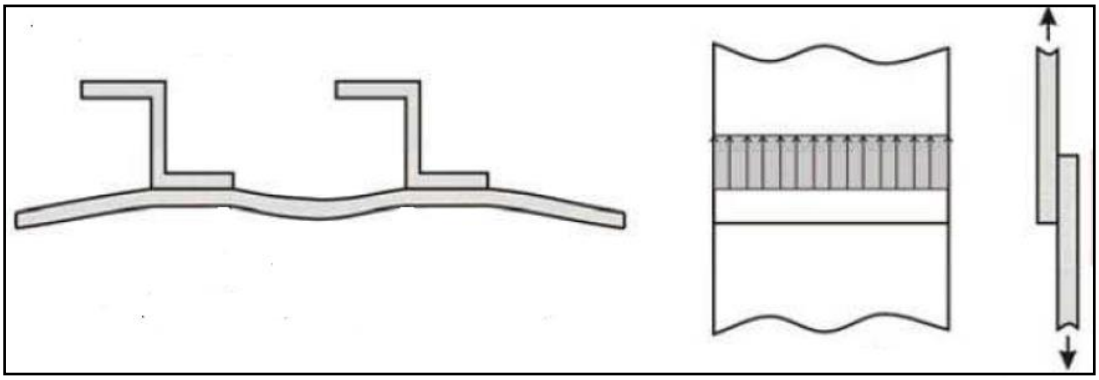


Şekil 2.1. Adezyon ve kohezyon olayları [22]

Karbon Fiber Katkılı Kompozit (CFRP) malzemelerin yapıştırıcı ile bağlanmasının mekanik yöntemlerle bağlanmasına kıyasla bazı avantajları vardır. Yapıştırma yönteminin yük taşıma kapasitesi eşittir; bu nedenle eğilme, yorulma ve titreşim gerilmelerine karşı daha dirençlidir [23]. Yapışkanlı bağlantılar, vida veya cıvata olmadığı için daha hafiftir. Bağlantı uygun bir şekilde yapılmışsa, birbirine uymayan yapışan malzemeler arasında galvanik korozyonu önleyen bağlantı elde edilir. CFRP'ler için kullanılan yapıştırma yöntemi mekanik bağlantıya göre daha ucuzdur. Yapıştırıcılar genellikle kürlenme ihtiyacı duyarlar. Bu yüzden parçaların boyutuna ve geometrisine bazı sınırlamalar getirir. Bazı yapıştırıcılar ayrıca uzun bir kürlenme süresi gerektirir. Yapışkanlı bağlantıların onarılması zordur, çünkü bağlar kalıcıdır ve yüzeye zarar vermeden bunları sökmek mümkün değildir [24]. Mekanik bağlantının CFRP yüzeyindeki stres dağılımı Şekil 2.2'de görülmektedir. Yapıştırma ile bağlantının CFRP yüzeyindeki stres dağılımı ise Şekil 2.3'te görülmektedir.



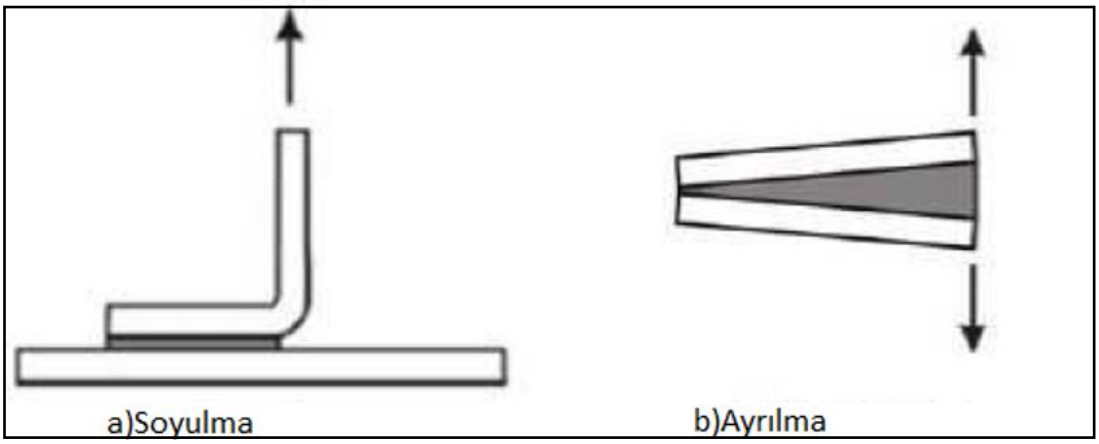
Şekil 2.2. Mekanik bağlantı stres dağılımı [25]



Şekil 2.3. Yapıştırma ile birleştirme Stres Dağılımı [25]

Yapıştırıcıların birtakım avantajları olsa da, sahip oldukları sınırlamaları da dikkate almak gerekir [25]. CFRP malzemelerin yapıştırma ile birleştirmede karşılaşılabilecek olumsuzlukları ve çözüm aşamaları aşağıdaki gibi listelenmiştir.

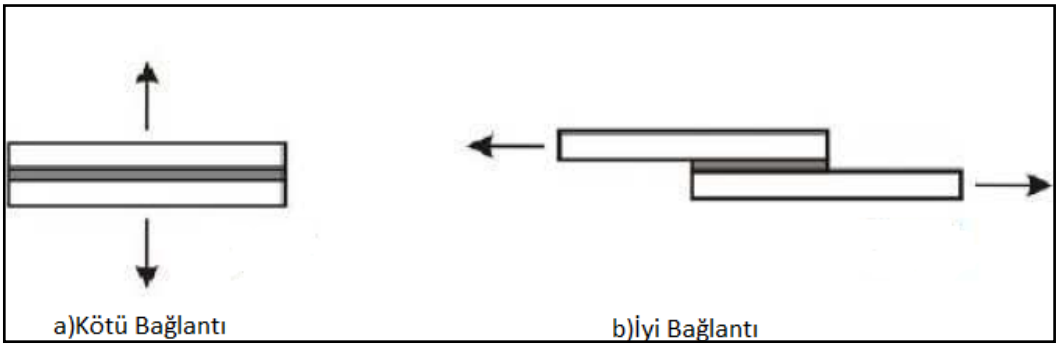
- Soyulma, ayrılma gibi yükleri ortadan kaldıran tasarım bağlantı hataları (Şekil 2.4)



Şekil 2.4. Soyulma ve ayrılma yükleri bağlantı şekli [25]

- Lokalize stresten uzak durularak ve yapıştırıcıyı kayma gerilmesine maruz bırakarak stresin eşit dağılımının sağlanması mukavemeti arttıracağı belirtilmektedir [25].

CFRP'nin bağlanması için tasarlanan bağlantı yapısı Şekil 2.5-a'da gösterilmiştir. Bu bağlantı yapısı ile çekme dayanımı kötü etkilenmektedir [25]. İyi bağlantının nasıl yapılması gerektiği ise Şekil 2.5-b'de gösterilmektedir.



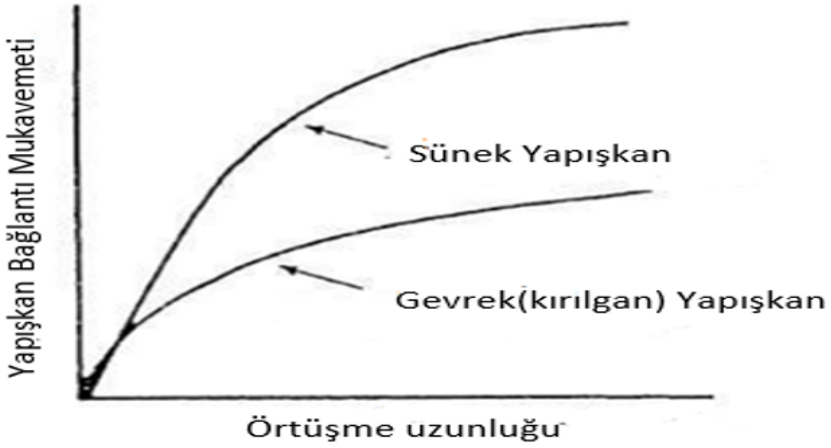
Şekil 2.5. Yapıştırma bağlantı şekilleri [25]

- İyi sonuçlar elde etmek için dikkatli bir yüzey hazırlığı gereklidir;
- Kalite ve güvenlik kontrolleri yapmak zordur;
- Yapıştırıcıların, yapışkanın polimer yapısına bağlı olarak ısı ve nem gibi aşırı koşullara karşı sınırlı direnci vardır.

Yapışkanların çoğunun sert ortamlarda bozunmaya yatkınlığı, yapışkan yapıştırma ile bağlantı yönteminin ana sınırlandırmasıdır. Nem, sıcaklık ve güneş ışınları, yapışkan bağlantılarının dayanıklılığını etkileyen bazı parametrelerdir.

CFRP'lerin yapıştırıcı ile bağlanması endüstriyel uygulamalarda giderek daha fazla kullanılmaktadır. Bu nedenle yapıştırmada kullanılan yapıların daha ayrıntılı bir analizine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu analiz, en uygun bağlantı geometrisi, yapıştırıcılar ve yapıştırıcının yapısını içerir. Bu seçimler çevre koşullarına, yüklere ve yapıştırıcı bağlantısının maruz kaldığı çalışma koşuluna göre yapılmalıdır. CFRP'lerin yapıştırılmasında dikkate alınacak ana faktörler şunlardır: alt tabakanın verimi ve kalınlığı, yapıştırıcının tipi ve kalınlığı, örtüşme uzunluğu ve yüzey işlemidir.

Tekil bindirme bağlantılarda, bağlantının kenarları en yüksek gerilme konsantrasyonuna sahip bölgelerdir. Ortalama stres, eklemin kenarlarındaki stresden daha düşüktür ve yapışkan tabaka boyunca gerilmenin düzensiz dağılımı, normalde yapışkanın destekleyebileceğinden daha düşük değerlerde bir hataya neden olur [26]. Üst üste binme uzunluğuna bağlı olarak, sünek ve kırılgan yapışkanlar için bağlantı mukavemetindeki fark Şekil 2.6'da gösterilmektedir. Bağlantı kuvveti öncelikle kırılgan yapıştırıcılar için daha yüksek olmak üzere artar. Fakat büyük örtüşmeler için, sünek yapıştırıcıların gevrek yapıştırıcılardan çok daha yüksek bir eklem mukavemetine sahip olduğu görülmektedir [27].



Şekil 2.6. Sünek ve kırılgan yapıştırıcılar için çakışma uzunluğunun kopma mukavemeti üzerine etkisi [28]

Dikkate alınması gereken bir başka faktör de, yapışkanın akma dayanımıdır. Elastik ve sünek bir yapışkan için, tekil bindrime bağlantıların arıza yükü yapıştırıcının kayma gerilmesine dayanan küresel bir akma kriteri kullanılarak belirlenebilir. Yapıştırıcı bağlantısının kopma yükü;

$$FL= \tau_y wl \tag{2.1}$$

Denklem (2.1)'deki gibi ifade edilmektedir. FL yapıştırıcı bağlantısının kopma yüküdür, τ_y ise yapıştırıcının akma kesme mukavemetidir, w ise bağlantı genişliği, l ise örtüşme uzunluğudur. Gevrek ve elastik yapıştırıcı bağlantıları için Volkersen [29] modeli kullanılır [25]. Üst üste binmenin uçlarındaki maksimum kesme gerilmesi yapıştırıcının dayanabildiği maksimum kesme gerilmesini aştığında hata durumu meydana gelmektedir. Yapıştırıcının kesme dayanımı ve yapıştırıcı kesme modülünün yapıştırıcı bağlantısının kopma yükü ile olan bağlantısı şu şekilde ifade edilir;

$$FL\cong\tau_r \frac{2wl\sinh(\lambda l)}{\lambda l(1+\cosh(\lambda l)} \tag{2.2}$$

$$\lambda^2=\frac{G}{t_a}\left(\frac{2}{Et_s}\right) \tag{2.3}$$

Denklem (2.3)'te t_a yapıştırıcı kalınlığını, t_s alt katman kalınlığını, G yapıştırıcı kesme modülünü, E alt katman young modülünü göstermektedir. Denklem (2.2)'de ise τ_r yapıştırıcının kesme dayanımını göstermektedir.

Yapıştırıcıların plastik deformasyonu için Adams [30] yapıştırıcının akma dayanımının yerini tutan hata kriteri önermiştir. Yapıştırıcının akma geriliminin, yapıştırıcı bağlantısının kopma yükü ile olan ilişkisi şu şekilde ifade edilmektedir;

$$FL=\sigma_y wt_s \tag{2.4}$$

Denklem (2.4)'te σ_y yapıştırıcının akma gerilimini göstermektedir. Yapısal yapıştırıcılar söz konusu olduğunda yapışkan tabakanın kalınlığı önemli bir faktördür. Bağlantının en iyi perfermonsı göstermesi için yapıştırıcı kalınlığının optimum değerinin sağlanması gerekmektedir.

2.1. Yapışkan Çeşitleri

Yapıştırmada birçok yapıştırıcı çeşidi mevcuttur. Bu yapıştırıcılar şu şekilde sıralanmıştır; amino veya üre yapıştırıcılar, anaerobik yapıştırıcılar, siyanoakrilat yapıştırıcılar, epoksi yapıştırıcılar, sıcak eriyen yapıştırıcılar, fenolik ve resorsinik yapıştırıcılar, plastisol ve kauçuk yapıştırıcılar, poliüretan yapıştırıcılar, radyasyonla kürleşen yapıştırıcılar, silikon yapıştırıcılar, solvent bazlı yapıştırıcılar, bant yapıştırıcılar, su bazlı yapıştırıcılar. Bunların içerisinde ise en fazla tercih edilen epoksi yapıştırıcılardır.

2.1.1. Epoksi yapıştırıcılar

Bu yapıştırıcılar grubu yaygın olarak kullanılmaktadır ve aynı zamanda mevcut varyantlar açısından en fazla çeşide sahip olandır. Epoksi yapıştırıcılar düşük viskoziteli sıvılardan katı macunlara veya filmlere kadar geniş ölçüde değişmektedir. Çeşitli temel epoksi reçineler, 70'den fazla farklı sertleştirici madde ile kombinasyon edilebilir. Bütün varyasyonlar boyunca, kürlenme mekanizması her zaman aynıdır. Halka yapısı aktif bir molekül tarafından bozulur. Bu işlemin sürekli tekrarı, polimerik bir ağ oluşturarak yapıştırıcıyı sertleştirir. Yapıştırıcı ve sertleştirici malzemelerin karışım oranları hassas olmalıdır. Karışım istenildiği gibi olmadığında polimer düzgün bir şekilde oluşmayacak ve genellikle daha düşük özellikler ortaya çıkacaktır. Örnek olarak malzemenin düşük mukavemeti ve düşük çevre direncinde olmasıdır.

Reçine ve katalitik sertleştirici önceden karıştırılır, ancak katalizör oda sıcaklığında inaktif bir formda olduğu için polimerizasyon meydana gelmez. Sıcaklık yükseldikçe

epoksi gruplar sadece tepkimeye dönüşür. Sıcaklık ne kadar yüksek olursa reaksiyon o kadar hızlı olur ve dolayısıyla daha kısa kürleşme zamanları elde edilir. İki parçalı yapıştırıcıların iyileştirilmesi de ısı ile hızlandırılabilir. Bu malzemeler iyi mukavemet ve kimyasal dirence sahiptir, kürleşme sırasında uçucu maddeler üretmez ve düşük büzülmeye sahiptir. Bu nedenle iyi tasarlanmış bağlantılarda çoğu malzeme ile son derece güçlü ve dayanıklı bağlar oluştururlar.

2.2. Yüzey Temizleme İşlemleri

CFRP kompozitlerde yapıştırma işleminden önce fiberlere ulaşmak için yüzey ön işlemesi gerekmektedir. Yüzey temizleme işlemi ile zayıf sınır tabakaları temizlenir ve yüzey enerjisi değiştirilir. Bu sayede yüzey pürüzlülüğü sağlanarak yapıştırma yüzeyi ile yapıştırıcı arasında daha kuvvetli bağ oluşturulur. Yapıştırılan CFRP'lerden optimum dayanımı elde etmek için ön temizleme süreçleri üç gruba ayrılır [31].

Mekanik Süreçler;

- Kumlama
- SiC patlatma
- Taşlama, fırçalama
- Aşındırma
- Soyma katmanı [peel ply]

Kimyasal Süreçler;

- CSA [kromik sülfürik asit] ile temizleme
- Ozon ile temizleme
- Organik çözücü ile temizleme- aşındırma
- Kimyasal olarak kaplama

Fiziko-Kimyasal Süreçler

- Düşük basınçlı plazma
- Atmosferik basınç plazma
- Korona deşarj
- Termal arıtma

- Flame
- İyon aşındırma
- Lazer
- UV ışığı.

2.2.1 Mekanik süreçler

Mekanik yüzey hazırlığında yüzey, aşınma veya kesme ile pürüzlendirilir. Pürüzlendirilen yüzeylerde yapışkanın temas yüzeyi arttığı için sertlik doğrudan bağlanma kuvvetine etki eder. Böylece kimyasal bağlanma ve yüzey alanı artarak kısmi mekanik kitleme sağlanmış olur. Bunun birlikte çok pürüzlü olan yüzey, stres konsantrasyonlarına yol açabilir. Yapıştırıcı ile yüzey arasında hava sıkışırsa yapışkan boşluklara nüfuz etmez [25]. Taşlama ve kumlama gibi mekanik aşındırıcılar zayıf yüzey tabakasını alır ancak yüzeyde kimyasal değişim yapmaz. Yüzey pürüzlendirme işleminden sonra temiz hava veya azot gazı püskürtülerek yüzeyde kalan parçacıklar temizlenir.

CFRP yüzeyi mekanik olarak temizlenirken zayıf olan tabakalar kaldırılmalıdır ancak CFRP'de yükü taşıyan matriste bulunan lifler ortaya çıkarılmamalıdır. Yüzeyler orta grit zımpara kağıdı ile zımparalanabilir ve buna paralel olarak kumlama kullanılabilir. Liflere verilen zararı en aza indirmek için zımparalama yönü liflerin yönüne doğru olmalıdır [32].

Taşlama veya aşındırıcı işleme genellikle alüminyum oksit, silikon karbür veya elmas parçacıklarından oluşan bir aletle yapılır. İnce bir kesici alet ile elde edilecek yüzey, kalın bir kesici alet ile elde edilecek yüzeyden daha düzgün olmaktadır. Kesme işlemi gerçekleştirilirken kullanılan aletin ince olmasına dikkat edilmelidir. Yüzey taşlanırken, kesme işlemi ne kadar hızlı gerçekleşirse sürtünmenin neden olduğu ısı açığa çıkacaktır. Dolayısıyla termal degradasyonu önlemek için yüzeyi soğutmak gerekebilir [32].

Kumlama yüzey pürüzlendirmenin etkili bir yoludur. Aşındırıcı parçacıklar yüzeyini kesmemeli ve delmemelidir. Soyma tabakası yüzey temizleme işlemi için oldukça basit bir yoldur. Soyma katları tipik olarak poliamid veya polyesterden yapılmış tabakadır. Soyma katmanı bileşenlerin imalatı sırasında yüzeye yerleştirilir ve

kompozitle birleştirilmesi sağlanır. Kürleme işleminden sonra tabaka çıkarılır ve yüzey yeterince pürüzlendirilir. Bu işlemden sonra toz ve diğer kirleticilerden yüzey temizlenir [33]. Soyma tabakasının dezavantajı ise bazen tabakanın çıkarılması zordur ve yırtılarak çıkabilir. Bu yüzden kompozite zarar verebilir.

2.2.2 Kimyasal süreçler

Kimyasal işlemler genellikle yüzeyin polaritesini değiştirmeyi amaçlar. Artan polarite daha iyi kimyasal yapışmaya neden olur [33]. CFRP yüzeyini kimyasallarla işlerken, parçalar 10 dakika boyunca 65 ° C ila 95 ° C'de deterjan içeren bir çözelti içine daldırılır. Bu işlemde kullanılan deterjanlar, alkali tuzlar ve sürfaktanların kombinasyonlarıdır. Kimyasal işlemler yüzey enerjisini değiştirir, böylece yapışmayı arttırır [34]. Kimyasal süreçlerde daldırma işleminden sonra parçalar saf su ile temizlenir. Temizleme işlemi yapıldıktan sonra yüzeyin nemini almak için kompozit malzemeler fırın içerisinde belirli bir süre tutularak kurutulur. Bu işlem yüzey temizleme süresini uzattığı için diğer yöntemlere göre kimyasal yüzey temizleme işlemini dezavantajlı konuma getirmektedir.

2.2.3 Fiziko-Kimyasal süreçler

Lazer yüzey temizliği, adezyonu iyileştirmek için kullanılan fiziko-kimyasal bir yöntemdir. Yüzey tabakasını matris veya liflerde bozulmaya neden olmadan çıkarır [35]. Plazma ile yüzey işleme gibi diğer fiziko-kimyasal CFRP yüzeyi üzerinde yapılabilir. Ancak bu yöntemlerin dezavantajı vardır. Plazma ortamını oluşturmak için özel gazların veya vakum ortamının kullanılmasını gerektirir, bu da yüzey temizliliği için elde edilen bileşenin büyüklüğünün kısıtlandığı anlamına gelir [36].

CFRP yüzeyinin temizlenmesi için Nd:YAG, CO_2, Excimer lazerler kullanılabilinir. Bu tez çalışmasında Nd:YAG ve CO_2 lazer kullanılmıştır. Excimer lazerler, argon ve kripton gibi nadir gazların ve florin, klorin gibi halojenürlerin kombinasyonuna dayanırlar [36]. Halojenürler tehlikeli gazlardır ve emisyonları çevreye zarar verir. Halojenler excimer lazer ekipmanlarına zarar verdiğinden, excimer lazer ekipmanının bakım maliyetleri yüksektir [31].

2.3. Adhezif Yapıştırmayı Etkileyen Parametreler

Yapıştırma ile birleştirmenin mukavemet ve dayanıklılığı yapıştırıcının ve yapıştırılan malzemenin özellikleri ile yapıştırma kalınlığı, kirlilik, stres ve çevresel faktörler ve en çok da yapıştırılan malzemelerin yüzey durumuna bağlılık göstermektedir [37].

2.3.1. Yapıştırıcı kalınlığı etkisi

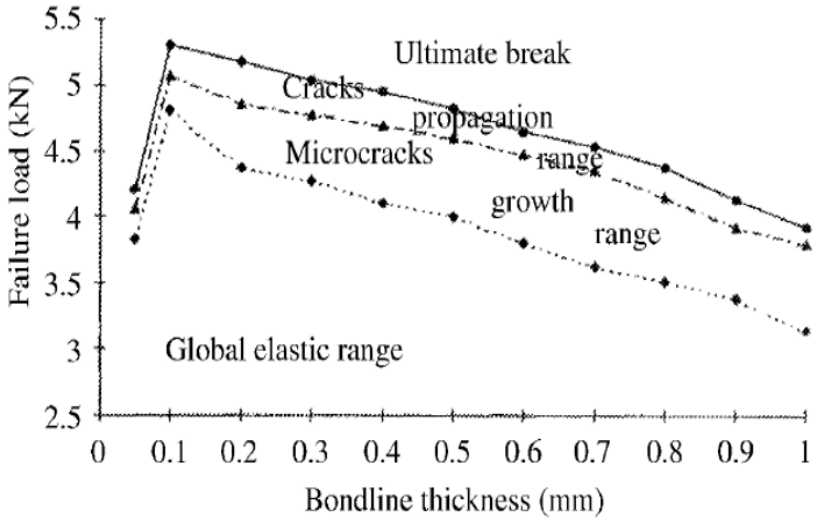
CFRP'lerin yapıştırılmasında kullanılan özel yapıştırma bağlantı tasarımı ile malzemenin performansı arttırılmaktadır. Bağlantı yapışkanının geometrisi malzemelerinin performansını önemli ölçüde etkilediği için çok önemlidir. Yapıştırıcının kalınlığı performansı en fazla etkileyen etmendir. Yapıştırıcının yapışma direncindeki etkisini belirlemek için bir dizi analitik model kullanılarak araştırma yapılmıştır [38-39]. Bununla birlikte, yapıştırıcı kalınlığının tekil bindirme yapışkan bağlantıların bağlanma mukavemeti üzerindeki etkisi hala tam olarak anlaşılamamıştır. Klasik elastik analizler, mukavemetin yapışkan kalınlık ile arttığını, deney sonuçların ise tam tersini göstermektedir. [40].

Bu çelişkiyi açıklamak için çeşitli teoriler önerilmiştir. Adams ve Peppiatt [41] daha kalın yapıştırma bağlantılarının boşluklar ve mikro çatlaklar gibi daha fazla kusur içerdiğini bunun sonucu olarak yapışma mukavemeti ile birlikte yapıştırma kuvvetinin azaldığını tespit etmiştir. Crocombe [42], yapıştırıcının kalınlaştığında yapışkanın üst üste binme boyunca plastik yayılmasının daha hızlı gerçekleşmesiyle mukavemetin azalmasını açıklamıştır. Ara yüzey gerilmelerinin daha kalın yapıştırma bağlantıları için daha yüksek olduğu Gleich ve arkadaşları tarafından gösterilmiştir [43].

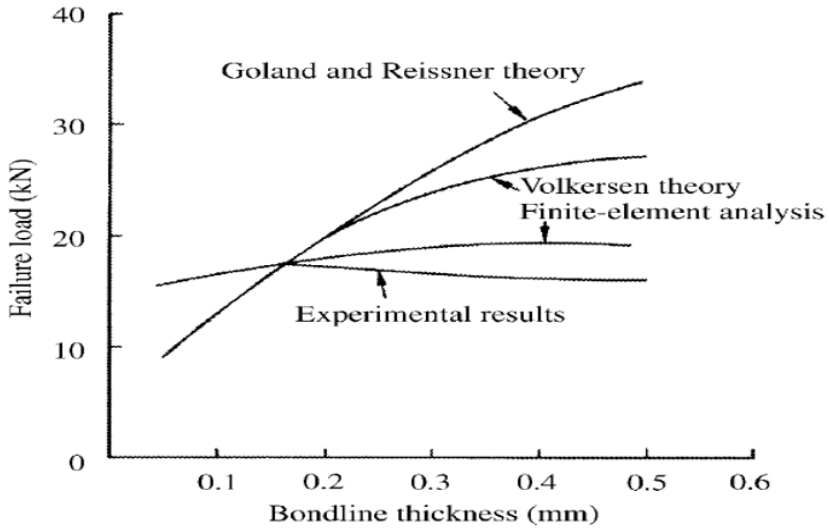
Genel olarak yapıştırıcı bağ kalınlığı uygulamalara göre farklılık göstermektedir. Bağ kalınlığı yapıştırıcının tipine, sertliğine, bağ geometrisine ve yükleme durumuna göre değişebilmektedir. Birçok pratik uygulamada çok ince bağ hatları (0,05-0,2 mm) elde etmek zordur ve optimal olmayan konfigürasyonlar kullanılması gerekmektedir. Yapışkan bağlı yapıların çoğunda bağ kalınlıkları tipik olarak 0,2 mm ile birkaç milimetre arasında kullanılmaktadır. Havacılık sektöründe ince bağ kalınlığı yaygın olarak kullanılmaktadır. Otomotiv ve sivil sanayi uygulamalarında yapıştırıcı bağ kalınlıkları çok daha yüksektir. Bazı durumlarda bu kalınlık 20 mm'ye kadar

çıkmaktadır. Kalın yapışkan bağlantıları üretim kolaylığı, boşluk doldurma ve sızdırmazlık rollerinden ötürü tercih edilebilmektedir. [43].

Yapışkan kalınlığının mukavemete etkisini göstermek için yapılan çalışmalarda genel olarak bağ kalınlığı 0,05 ile 0,5 mm arasında seçilmektedir. Literetürde yapılmış yapışkan bağ kalınlığı çalışması Şekil 2.7'de gösterilmiştir. Bu çalışmada yakalanan mukavemeti en yüksek değer 0,1 mm çıkmıştır [43]. Teorik olarak hesaplanan yapışkan kalınlığına denk gelen çekme dayanımı ve deneysel olarak elde edilen yapışkan kalınlığına bağlı çekme deneyi sonuçları Şekil 2.8'de gösterilmiştir. Bu grafikten de anlaşılacağı üzere teoride hesaplanan yapışkan kalınlığına bağlı olan çekme dayanımı ile deneysel sonuçlardan elde edilen çekme dayanımı değerleri uyuşmamaktadır.



Şekil 2.7. Örnek literetürde yapılmış bağ kalınlığı çalışması [43]



Şekil 2.8. Yapışkan kalınlığının teori ve deneysel sonuçlarda karşılaştırılması [43]

2.4. Adhezif Yapışmada Yüzey Özelikleri

Çeşitli yüzey işleme yöntemleri ile (mekanik, lazer, elektrokimyasal, kimyasal, termal, deşarj plazması vb.) CFRP malzemelerinde yapışmayı iyileştirmek için çeşitli araçlar kullanılabilir. Bunları sıralıyacak olursak [44];

- CFRP yüzeyinin ıslanabilirliğini matris reçinesi ile arttırarak.
- Zayıf sınır tabakası lif yüzeyinden çıkarılarak. Zayıf sınır tabakasına örnek olarak fiziksel olarak absorbe edilen kontaminant türler veya gaz molekülleri gösterilir. Bu, kısa menzilli bir kuvvet olan van der Waals kuvvetinin temin edilmesi için fiber ve polimer arasında daha yakın bir temas sağlayacaktır.
- Fiber ve matris arasında mekanik kilitleme oluşturarak. Mekanik kitleme, reçine moleküllerinin içine nüfuz edebileceği yüzey gözenekliliği oluşturarak elde edilebilir.
- Reçine yüzeyinde reaksiyona girmemiş türleri kimyasal bağlanma ile aktif ederek yapışkan kalitesini arttırmak.
- Liflere uygulanan polimer kaplama ile matris moleküllerinin fiziksel olarak birleşmesini sağlamak.

Yüzey temizleme işlemlerinden sonra yüzey morfolojisi değiştirilir ve yüzey pürüzlülüğü arttırılır. Yüzey pürüzlülüğü ile fiberler ile yapıştırıcının bağlanma arayüzünün alanını arttırmaktadır. Bu işlem de mukavemet arttırmayı sağlar. Yüzey

işleme ayrıca liflerin kimyasal yapısını da etkiler ve matris ile kimyasal bağları güçlendirir [44].

Kirletici maddeler kompozit yüzeylerde bulunabilir ve doğaları itibariyle bir bağda zayıf bir sınır tabakası oluştururlar. Bu kirletici maddeler, salım maddeleri ve torbalama malzemeleri, florokarbon salma spreyleri ve filmleri, işleme yağları, parmak izleri, silikonlar ve kendinden salım yapan formülasyonlardan gelen kalsiyum stearat, su ve plastikleştiriciler gibi yüzeye göç etmiş kompozitin içindeki bileşenleri içerir. Örnek karbon/epoksi kompozit yüzey için florür türleri (% 30) ile kimyasal kirlenme oranları Tablo 2.1'de verilmektedir [45].

Tablo 2.1. CFRP yüzeyinde % kimyasal kirlenme oranları

	C	O	N	F	Si	S	O/C
Karbon /Epoksi	56,4	8,1	1,5	32,2	1,8	-	0,14

Tablo 2.2. CFRP'nin yüzey enerjisi ve pürüzlülüğü

	Yüzey Pürüzlülüğü	γ^{LW}(mJ/m^2)	γ^{AB}(mJ/m^2)	γ^{TOT}(mJ/m^2)
Cam/Epoksi	0,79(+/-0,08)	31,6(+/-1,11)	2,36(+/-1,11)	33,96(+/-1,11)
Karbon/Epoksi	0,81(+/-0,17)	38,54(+/-0,9)	1,13(+/-1,11)	39,67(+/-1,11)

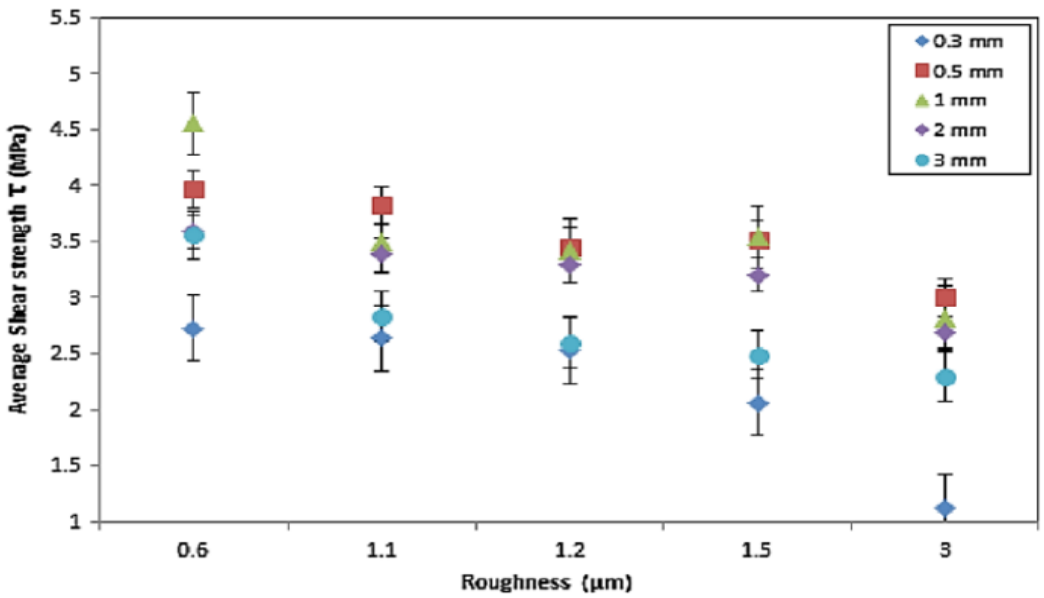
Kompozitler genellikle imalatta kalıp ayırıcı olarak florlu ve silikonlu film kullanımı nedeniyle çok düzgün ve parlak kalıplanmış yüzeylere sahiptir. Kompozitlerin yüzey enerjileri ve yüzey pürüzlülüğü örnek değerler Tablo 2.2'de gösterilmiştir [45]. Dayanıklı yapışma elde etmek için kompozit yüzeylerin yüzey ıslanabilirliğini ve morfolojisini değiştirmek ve daha iyi yapışma sağlanması için yüzey kirleticilerini çıkarmak için ön temizleme gerekir.

2.5. Yüzey Pürüzlülüğü

Yüzey pürüzlülüğü Amerikan alet ve üretim mühendisleri toplumu (ASTME) tarafından yüzey dokusundaki düzensizlikler olarak tanımlanır. Bu düzensizlikler, yüzey desenini oluşturan nominal yüzeyden tekrarlayan veya rastgele oluşan sapmalardır [46]. Yüzey dokusunu ölçerek profil ölçümüyle karşılaştırmanın bir takım faydası vardır. Alansal ölçümler yüzeyin daha gerçekçi gösterimini verir [47]. Yüzey

pürüzlülüğü temassız, optik yöntemle veya kalem sistemi gibi bir iletişim yöntemiyle ölçülebilir.

Eklem gücünü etkileyen en kritik parametrelerden biri yüzey işlemidir. Yüzey pürüzlü olursa, temas alanı da artacaktır. Temas alanı arttığında da yapışıtırılan CFRP'nin mukavemeti artacaktır. CFRP yüzeyi ile yapışkan arasındaki yapışmayı etkileyen faktör ıslanabilirliktir. Yüzey pürüzlülüğü yüzeyde ölçülen kontak açısında azalmaya yol açmaktadır. Ancak yüzey pürüzlülüğü çok arttırılırsa kontak açısı da artmaktadır. Yüzey morfolojisinin neden olduğu temas açısındaki artış, yüzeydeki damlaların serbestçe yayılmasını önler. Bu durumda sıvının pürüzlü yüzey düzlüklerine iyi nüfuz etmemesi ve gaz moleküllerinin pürüzlü çukurlarda sıkışıp kalabilmektedir. Bunun sonucunda CFRP yüzeyleri ile yapıştırıcı sürekli bağlantılı değildir. Böylece bütün yüzey yapıştırıcı ile dolmaz. Bu etkili yapışıtırıcı bağ alanını azaltır ve arayüzde stres yükselticileri oluşturur. Bunların sonucu olarak CFRP'nin mukavemeti azalmaktadır [48]. Örnek yüzey pürüzlülüğü ve çekme dayanım testi Şekil 2.9'da gösterilmiştir. Bu test sonucuna göre en iyi dayanım 0,6 um pürüzlülükte ve 1 mm yapıştırma kalınlığında çıkmıştır [48].



Şekil 2.9. Örnek yüzey pürüzlülüğü ve çekme dayanım testi ilişkisi [48]

2.6. Yüzey Enerjisi ve Kontak Açısı

Yüzey enerjisi kazanılan bağ kuvvetine büyük ölçüde etki eder. Yapışkanın yüzey enerjisi, yapıştırıcının CFRP yüzeyinde ne kadar iyi yayıldığı, yani yüzeyin ıslanabilirliği ile doğrudan bağlantılıdır. Yüzey enerjisi ne kadar büyükse, ıslanabilirliği o kadar iyidir [49].

Bir damla sıvı yapıştırıcının yüzeyi ve temas açısı (θ), damlalardan alınan dijital görüntülerden ölçülebilir. Kontak açısı, 90 dereceden küçükse sıvı yüzeyi ıslatabildiği, 90 dereceden büyükse yüzeyi ıslatamadığı anlamına gelmektedir. Kontak açısının 90 dereceden küçük olduğu damla malzeme yüzeyinde yayılım gösterme eğilimindeyse bu tarz yüzeylere hidrofilik yüzey denir. Hidrofilik yüzeylerde yapışkan kuvvetler daha büyüktür. Kontak açısının 90 dereceden büyük olduğu damla malzeme yüzeyinde yayılmak yerine küresel bir şekilde durma eğilimi gösteriyorsa bu tarz yüzeylere hidrofobik yüzey denir. Eğer yüzeyler bu eğilimleri çok fazla gösteriyorsa, yani damla tamamen yayılıyorsa ve yüzeyle yaptığı açı 5 dereceden küçükse (0 dereye yaklaşıyorsa) buna süperhidrofilik; damla neredeyse küresel bir şekilde duruyorsa ve yüzeyle yaptığı açı 150 dereceden büyükse (180 dereceye yaklaşıyorsa) süperhidrofobik yüzeyler denir [50]. Kontak açısını etkileyen en önemli faktörler katının yüzey enerjisi ve pürüzlülüğüdür. Hidrofobik yüzeylerde ıslanma zayıftır [51]. Yüzey enerjisi, uygun bir ön işlemle yüzey kimyası değiştirilerek de artırılabilir. Mekanik yüzey işleme aslında birim başına düşen yüzey enerjisini artırmaz. Ancak yüzey alanını artırır, böylece toplam yüzey enerjisi daha büyük olur. Literatürde yapılan çalışmalarda kontak açısı küçüldükçe yüzey enerjisinin artacağı ve bu bağlamda daha kuvvetli yüzey yapışmasının gerçekleşeceği bildirilmiştir [52].

2.7. CFRP Malzemelerin Yüzey Kimyası

Kompozit malzemelerin yapışma performansını arttırmak için farklı yüzey işleme yöntemleri değerlendirilmiştir. Üretim işleminden kaynaklanan yüzey kirlilikleri, düzgün yüzeyler, düşük yüzey enerjileri ve ıslanabilirlik, kompozitlerin yapışkan davranışını bozar. Kompozit malzemeler, yüzeylerini işlerken özel uygulamalar gerektirir. Bazı yüzey işleme yöntemlerinde yüzeyin hemen altında delaminasyon kusurlarına veya nispeten kırılgan liflere zarar verme tehlikesi vardır. Bu kusurlar, kompozitin daha zayıf mekanik özelliklerine neden olabilir. Dikkate alınacak önemli

faktörler, silikonlar ve florokarbonlar gibi yüzey kirliliğinin giderilmesini içerir. Kompozitin hacimsel mekanik özellikleri, alumina kumlama ve silisyum karbür aşınması gibi aşındırıcı yüzey işlemlerinden etkilenebilir. Korona deşarjı ve plazma yüzey işlemleri, kimyasal değişikliklere ve kompozit yüzeylerin pürüzlenmesini sağlayarak yapışmayı iyileştirir. Bu yöntemler aynı zamanda, kompozit yüzey üzerine oksijen fonksiyonel gruplar getirerek (karboksil ve hidroksil), yüzeyin daha iyi ıslanmasını sağlar [45].

Yüzey hazırlama yöntemleri arasında bulunan lazerle yüzey temizleme işlemi etkili bir yöntemdir. Kimyasal aşındırma, aşındırıcı kumlama ve plazma yüzey temizleme gibi diğer geleneksel işlemlere kıyasla avantajlara sahiptir. Lazerle yüzey temizleme, fiber takviyesini etkilemeden yüzeydeki polimer tabakasının kısmen veya tamamen çıkarılmasına izin verir. Uygun yüzey özelliklerine ulaşmak için lazer parametreleri (lazer akısı, darbe sayısı, dalga boyu vb.) dikkatle seçilmelidir. Lazerle yüzey temizleme işleminde sırası ile şu aşamalar gerçekleştirilir; kirliliğin kaldırılması ve zayıf sınır tabakalarının buharlaştırılması, oksit türevleri ve hidroksitler ile yüzey kimyası modifikasyonu ve tekdüze pürüzlülüğün uygulanmasıyla yüzey morfolojisinin değiştirilmesidir. Bu yöntemlerle CFRP yüzey temizliği yapılmaktadır [45]. Sonuç olarak, yüzey temizleme performansı, mekanik kilitleme, kimyasal çekim ve yapışma performansına etki eden ıslanabilirlik gibi önemli hususların hepsi lazer ile yüzey temizleme işlemi yöntemiyle karşılanabilir [45].

İşlenmemiş yüzey ve lazer atım sayısına göre değişen malzeme yüzeyindeki element oranları Tablo 2.3'te gösterilmiştir. Sezer H. K tarafından yapılan uygulamada UV lazer kullanılmıştır [45]. İşlenmemiş yüzeyde malzeme kirliliğine yol açan silisyum (si) elementi Tablo 2.3'te görüldüğü gibi mevcuttur. Lazerle yüzey işlendikten sonra silisyum değerinin azaldığı görülmektedir. Kirlenmenin azalmasıyla mukavemet artışı sağlanmaktadır. Aynı zamanda oksijen miktarınında arttığı gözlenmiştir. Yüzeydeki oksijen miktarının artmasıyla C-O bağların oluşması sağlanabilir. Bu bağda mukavemet arttırıcı rol oynamaktadır. Belirli enerji seviyesinden fazla lazer ile yüzey temizleme işlemi gerçekleştirilirse yüzeyde tekrar kirlenmelerin oluştuğu gözlemlenmiştir. Lazer enerji seviyesi arttıkça C oranında azalma meydana gelmektedir [45].

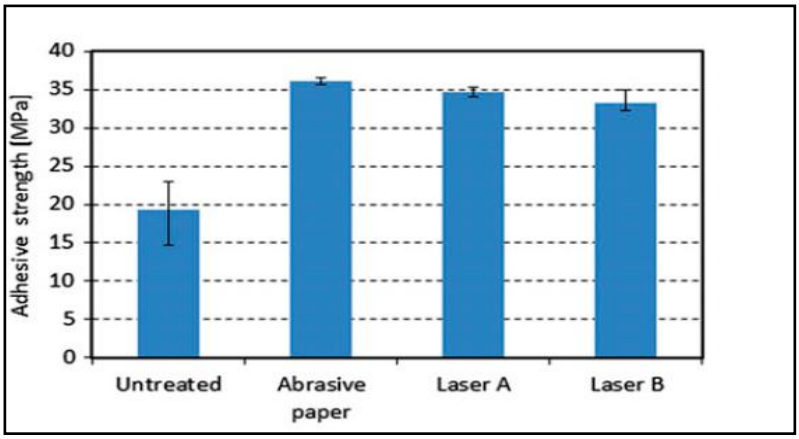
Tablo 2.3. Örnek yüzey kimyası [45]

	C	O	N	F	Si	S	O/C
İşlenmemiş yüzey	56,4	8,1	1,5	32,2	1,8	T	0,14
50 mj/cm^2-1 atım	80,4	12,5	5,6	0,7	0,5	0,5	0,16
150 mj/cm^2-4 atım	76,4	16,9	4,2	-	1,5	-	0,22
150 mj/cm^2-10 atım	78,6	15,9	3,6	-	1,1	-	0,2
150 mj/cm^2-40 atım	77,8	16	5,4	T	-	0,8	0,21
150 mj/cm^2-400 atım	77,4	16.9	5	-	-	0,7	0,22
500 mj/cm^2-40 atım	75,3	15,7	5,8	-	1,9	1,1	0,21

Tomohiro Yokozeki ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilen çalışmadan elde edilen kimyasal analiz sonucu Tablo 2.4'te gösterilmiştir. Bu verilerde işlenmemiş yüzeyde Si oranı yine yüksek değerde olduğu görülmektedir. Bu çalışmaya ait çekme dayanım grafiği Şekil 2.10'da gösterilmiştir. Grafikten de anlaşılacağı üzere işlenmemiş yüzeyin mukavemeti az çıkmıştır. Yüzey kirliliği azaldığında mukavemet artmıştır [53].

Tablo 2.4. Yüzey işleme yöntemlerine göre yüzey kimyası [53]

	F 1s [%]	Si 2p [%]	Diğer [%] (C 1s, O 1s)
İşlenmemiş yüzey	13,1	3,8	83,1
Zımparalanmış yüzey	0	0	100
Lazer A	1,4	1,2	97,4
Lazer B	4,7	2,7	92,6



Şekil 2.10. Çekme dayanım grafiği [53]

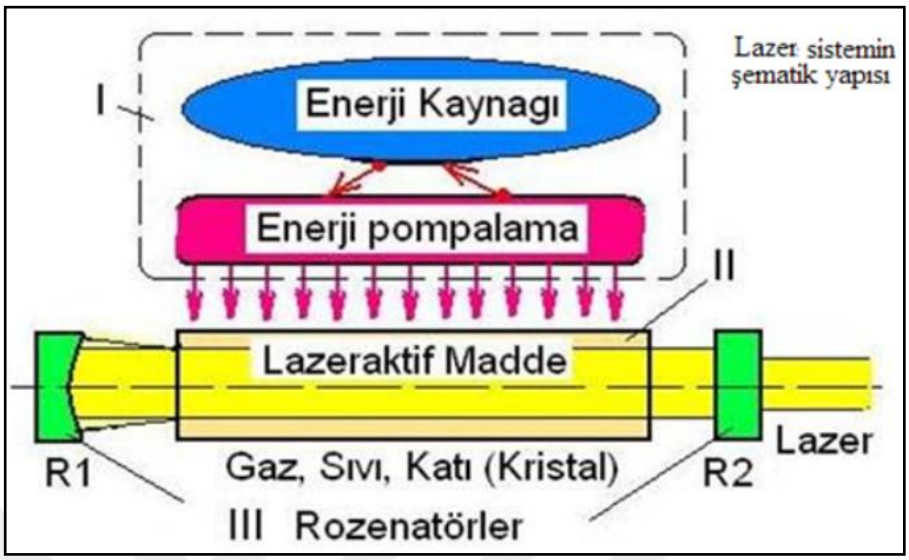
3. LAZERLER

Çok şiddetli, koherent ve tek renk ışık elde etmek için geliştirilmiş optik düzeneklere lazer denir. İlk kez C. H. Townes (1953) tarafından mikrodalga bölgesinde geliştirilen ve Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation (Uyarılmış Işıma ile Mikrodalga Yükseltici) kelimelerinin ilk harflerinden yararlanarak kısaca maşer adı verilen düzenekler daha sonra T. H. Maiman (1960) tarafından Laser (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) olarak adlandırılmıştır [54]. Lazerler, fotonları uyumlu bir hüzme şeklinde oluşturan optik kaynaklardır. İlk olarak 1917 yılında Albert Einstein tarafından uyarılmış ışımanın varlığının öne sürülmesi ile teorik adımları atılmıştır. Theodore Maiman'ın 1960 yılında ilk deneysel çalışması sonucu yakut lazeri üretilmiştir. [54]. Bu olaydan sonra lazer kullanımında oldukça önemli gelişmeler oldu. Lazer ışını endüstriyel süreçlerde, mühendislik alanında, tıpta, bilimsel araştırmalarda, meteorolojide, iletişimde, holografide ve savunma donanımlarında kullanılmaktadır.

3.1. Lazer Işığının Özellikleri ve Çalışma Prensibi

Lazerin temeli atom veya molekül enerji düzeyleri arasındaki elektron geçişleri ile oluşan ışık fotonlarına dayanır. Bir atomun iki enerji düzeyi E2 ve E3 olsun ve E3>E2 farzedelim. Minimum enerji ilkesine göre atom veya moleküller düşük enerji seviyesinde olmak istediklerinden E3 seviyesindeki elektron kendiliğinden E2 seviyesine inecektir. Ama bu sırada enerjisi E3-E2=hμ olan bir foton salar. Burada μ fotonun frekansıdır. Eğer elektron bu salınımı kendiliğinden yaparsa salınan fotonun yönü tamamen rastgeledir. Ancak eğer E3 düzeyindeki elektron E3-E2 enerjisindeki başka bir fotonla etkileşerek E2 düzeyine inerse bu şekilde salınan fotonun yönü ve fazı geçişe etki eden fotonla aynı olacaktır. Bu ikinci geçiş biçimine uyarılmış ışıma (stimulated emmision) denir ve lazerin çalışmasının ana ilkesini oluşturur [55].

Şekil 3.1'de lazer çalışma prensibi gösterilmiştir. Bu şekilde gösterilen R1 aynası %100 yansıtan ayna R2 aynası ise %1 geçirgen özelliği olan aynadır.



Şekil 3.1. Örnek lazer çalışma prensibi [56]

Çok sayıda atomdan oluşan bir sistemde başlangıçta atomlar en alt enerji düzeyinde bulunduklarından dolayı lazer ışınımı ortaya çıkarılması için atomların en üst enerji seviyesine çıkarılması gerekir. Bu yapılan işleme pompolama işlemi denilmektedir. Ayrıca üst enerji seviyesi ve alt enerji seviyesi arasındaki geçişten lazer ışığı elde edebilmek için atomların üst enerji seviyesinde düzeyinde kalma süreleri alt enerji düzeyinde kalma sürelerinden uzun olmalıdır. Ancak bu şekilde üst enerji düzeyinde bulunan atomların sayısı daima artacaktır (population inversion) [57]. Lazerler, günlük yaşamda sıklıkla kullanılmaktadırlar. Örneğin, süper marketlerde ürün fiyatlarını, CD'lerden müziği, DVD'lerden de veri okumakta lazerlerden faydalanılmaktadır.

3.2. Lazerin Bileşenleri

Lazerlerin bileşenleri lazer aktif maddesi, pompalamada yöntemlerinde kullanılan malzemeler, aynalar ve lazerin oluştuğu kapalı ortam olan rezanatörlerdir [55]. Lazerin oluşmasını sağlayan elektrik enerjisi ve enerji pompolama aynı yapı içersinde yer almaktadır. Enerji pompolamasıyla, lazer aktif madde atomlarının, moleküllerinin uyarılması için gerekli enerjiyi sağlamaktadır.

3.2.1. Lazer enerji pompalama

Lazer aktif maddesine enerji pompalama genelde iki yöntemle gerçekleşmektedir; elektrik pompalama yöntemi ve optik pompalama yöntemidir. Elektrik enerji pompalama yönteminde lazer aktif madde elektrik enerjisi ile uyarılarak atomların, moleküllerin en üst enerji seviyelerine çıkmalarını sağlamaktadır. Örneğin; CO_2 lazerinde CO_2 molekülleri üst enerji seviyelerine geçmeleri vakumlu deşarj tüpü içerisinde yeralan iki elektrotun doğru akımına veya yüksek frekanslı alternatif akıma bağlanarak sağlanmaktadır. Optik enerji pompalama yönteminde ise lazer aktif maddesi atomları, molekületi ışıkla, ışınla uyarılmaktadır. Burada pompalama güçlü bir optik lamba (kripton lambası), tüplü lamba, deşarj lambası veya diyotlu-lazer ile gerçekleşmektedir.

3.2.2. Lazer aktif madde, lazer aktif ortam

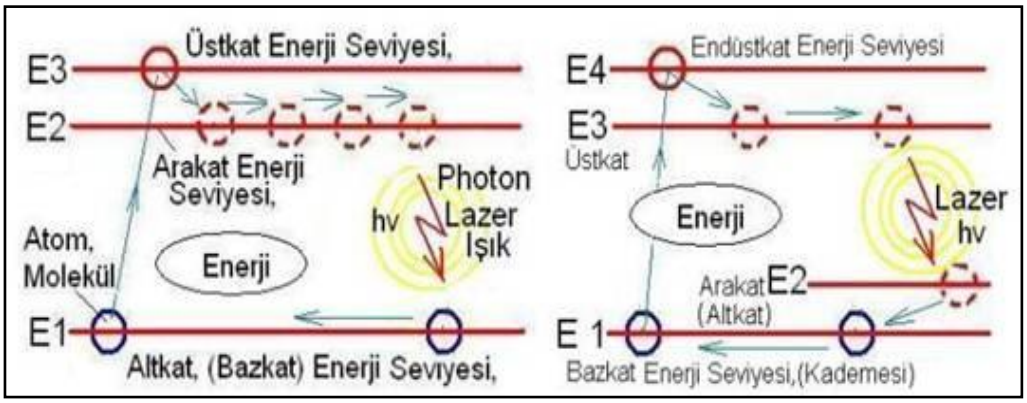
Lazer aktif maddeleri lazer ışının ortaya çıkmasını sağlayan maddelerdir. Kristal veya camsı maddelerin içine katkılanan toprak alkali metaller olarak Er, Nd, Yb, Tm, Pr maddelerini sayabiliriz. Lazer aktif maddeleri katı kristal (Nd:YAG), gaz (CO_2), veya sıvı halde (renkli bir eriyik) olabilmektedir. Seçilen lazer aktif maddesine göre; yakut lazeri, helyum-neon lazeri, karbon dioksit lazeri, UV lazeri, excimer lazeri, kripton lazeri, neodymium lazeri gibi farklı kullanım amaçları için çok sayıda lazer çeşitleri bulunmaktadır. Lazer aktif ortam lazer tipine göre farklılıklar göstermektedir. Nd:YAG lazerinde aktif ortam aktif bir madde ile zenginleştirilmiş bir kristal çubuk seklinde bulunmaktadır. CO_2 gaz lazerinde ve excimer lazerinde aktif ortam, içinde aktif gazlar bulunan bir tüpten ibarettir bu tüpün hacmi büyüklüğü gaz lazerin gücünü belirlemektedir. Fiber lazerinde ise aktif ortam optik kablonun çekirdeğinin lazer aktif madde ile örnegin Yb ile katkılayarak sağlanmaktadır.

3.2.3. Resonatörler ve ayna yansıtıcılar

İki aynadan oluşan bir optik sistemdir. Lazer aktif maddenin arkasında ışınları yansıtıcı bir ayna sistemi bulunmaktadır. Lazer ışını güç ölçümleri için ışık geçirgenliği % 0,5 ile % 2 olan ayna kullanılmaktadır, Önde ise kısmi geçirgen (ışın, ışık geçirgenliği % 40-50) olan bir ayna veya mercek sistemi bulunmaktadır. Rezanatör; lazer ışınlarının bir kısmını lazer aktif maddesine, aktif

ortama geri yansıtarak devamlı yoğunlaştırılmış bir ışık demeti şeklinde ve yayılma eksenine paralel yayılmalarını sağlamaktadır. Ön rezanatörden çıkan lazer demeti lazer tipine göre ayna, mercek sistemleri ile veya optik kablosu ya da lazer kablosu (10 mm çaplı fiber optik kablo, veya isin elyaf kablosu) yardımıyla kayıpsız istenilen yere, operasyon noktasına, iş parçasına iletilmektedir. Lazer ışınlarının optik kablosu ile iletimi lazer ışınının dalga boyuna göre değişmektedir. Örneğin düşük dalga boyutlu Nd-YAG-lazerin (l=1060 nm ya da l =1,06mm) iletiminde optik kablo kullanılırken, CO_2 lazerin iletimi ayna mercek sistemleri ile gerçekleşmektedir. Elde edilen lazerin soğurması (absorbisyon) veya yansıtma yatkınlığı da lazerin dalga boyuna ve malzemeye göre değişmektedir. Örneğin, Nd-YAG-lazeri, CO_2 lazerine göre metaller tarafından daha iyi soğrulmaktadır. Farklı malzemeler için farklı soğurma özellikleri vardır; Örneğin Al-malzemeleri demir, çelik malzemelerine kıyasla lazer ışınlarının soğurma miktarı daha düşüktür.

Lazer enerji demetinin zamana göre sürekliliği pompalan enerjinin zamana göre sürekliğine bağlıdır. Pompalama enerjisi kesildiğinde lazer demetin iletimi de kapanmaktadır. Malzemelerin işlenmesinde lazer demetin enerji iletimi sabit ya da impuls (darbeli) şeklinde olmaktadır. Birçok malzeme işlemlerinde darbeli lazer tipi tercih edilmektedir. Lazer enerji seviyerleri arasındaki geçişler Şekil 3.2'de görülmektedir.

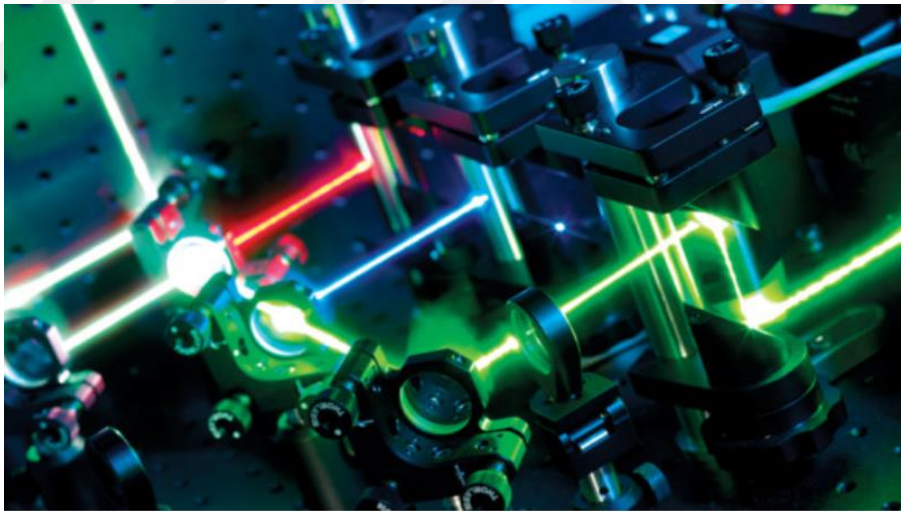


Şekil 3.2. Lazer enerji geçişleri [56]

3.3. Lazer Işığının Özellikleri

Son derece düzgün bir ışıktır ve çok az sapar. Yoğun bir şekilde yakın veya uzak hedefe kayıpsız yönlendirilebilir. Ayrıca lazer ışınları, aynı fazda üretilen ışık

dalgaları olduğu için şiddetleri büyük olur. Ergitme kaynağında, örneğin yaygın olarak kullanılan ark kaynağında, metaller ergitilerek kaynak dikişi oluşturulurken, lazer ışın kaynağında bu işlem, çok küçük boyutlarda ve kısa sürede malzemeler buharlaştırılarak gerçekleştirilir. Lazer ışını küçük bir noktaya yüksek enerji verebilir ve böylece çok hassas işler yapılabilir. Lazer ışını, dalga boyu tek olduğundan monokromatik tek renkli özellik taşır [59]. Frekans dağılım aralığı, frekansının bir milyonda biri civarındadır. Bu nedenle istenilen frekansta çok sayıda dalga, lazer dalgası üzerine bindirilmek suretiyle haberleşmede iyi bir sinyal jeneratörü olarak iş görür. Aynı anda birçok bilgi bir yerden başka yere gönderilebilir. Lazer dağılmaz olduğundan kısa darbeler halinde yayılabilmesi mümkündür. Bu özellik sayesinde kayıpsız yüksek enerji naklinin yapılması sağlanabilir. Lazer, kendisinde bulunan yüksek enerji sayesinde imalat endüstrisinde, kesme, kaynak, delme, buharlaştırarak tıraşlama gibi işlerinde kullanılır [60]. Lazer ışını tek dalga boyuna sahip olduğu için lazer cinsine göre çeşitli renkte ışınlar elde etmek mümkündür. Farklı renklerde lazer ışın demetleri görseli Şekil 3.3'te sunulmuştur.



Şekil 3.3. Lazer ışın demeti [55]

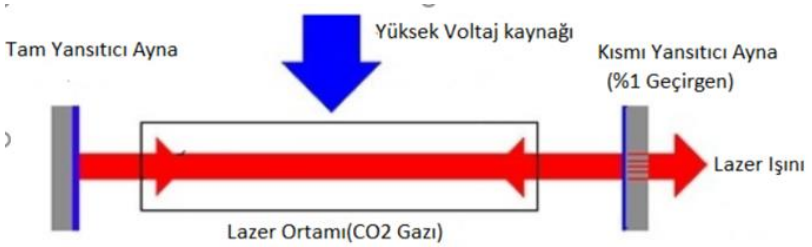
3.4. Lazer Çeşitleri

Lazerler aktif ortam özelliklerine göre dörte ayrılır. Bunlar; Gaz lazerleri, Katı hal lazerleri, Sıvı lazerler ve Yarı iletken lazeleridir [61]. Gaz lazerlerinde aktif madde olarak gaz ve buhar kullanılmaktadır. Pompalama mekanizması elektrikle uyarmak veya gaz tahliyesi yapılarak olmaktadır. Bu lazerlere örnek olarak CO_2 lazerler gösterilebilir. Bu lazerlerin dalga boyu 10600 nm'dir. Katı hal lazerlerinde ise aktif

madde kristallerdir. Bu lazer türlerinde pompolama optik, flash lambaları, ark lambaları, diyot lazerler ile yapılmaktadır. Örnek lazer türleri ise Ruby lazer 694 nm ve Nd:YAG lazer 1064 nm dalga boylarında lazerler gösterilebilir [61]. Sıvı lazerlerinde aktif madde aşırı derecede sulandırılmış organik boyalardır. Bu lazerlerin pompolamasında optik ve flash lambaları kullanılmaktadır. Bu lazer türlerinin dalga boyları 300 nm ile 1020 nm arasında değişmektedir. Yarı iletken lazerlerinin aktif maddesi yarı iletken malzemelerdir. Bu lazerler elektrikle uyarılarak pompalanır. Örnek olarak GaInP 670-680 nm, GaAlAs 780-880 nm dalga boylarındaki lazerler gösterilebilir [61].

3.5. CO_2 Lazer

Karbondioksit lazerler ilk bulunan lazerlerden olmasına karşın, hala popülerliğini korumaktadır. Bunun sebeplerinin başında, çoğu yeni teknoloji lazerlerin hala CO_2 güç çıkışına erişememiş olması gelmektedir. Bu anlamda, CO_2 lazerler en yüksek güce sahip CW lazerlerdir. Karbondioksit lazerler CO_2, N_2, H ve He olan tüpe yüksek gerilim uygulanarak uyarılması mantığı üzerine çalışır. Tüpün içerisinde CO_2'dan sonra en çok bulunan element N_2'dir. Bunun nedeni ise Nitrojenin uyarılmış durumda uzun süre enerji kaybı yaşamadan kendini koruyabilmesidir. Yüksek enerjili pozisyonda uzun süre uyarıldıktan sonra normal pozisyonlarına geçmek için fazla enerjiyi yani fotonu dışarıya salarlar ve serbest elektronları da uyararak foton salınımını artırırlar. Bu sayede uyarılmış foton sayısı normal foton sayısını geçerek önce ters popülasyon daha sonra da uyarılmış emisyonu oluştururlar. CO_2 lazerin çalışma mantığı Şekil 3.4'te gösterilmiştir.



Şekil 3.4. CO_2 çalışma mantığı [62]

Uyarılma süreci sisteme enerji verilmesiyle devam eder. Lazerin iki ucuna yerleştirilen aynalar vasıtasıyla fotonlar her iki tarafa yansıtılarak daha fazla atomu uyarmaları sağlanır. Genelde lazerin bir ucundaki ayna %100 yansıtma kapasitesine sahipken,

diğer uçtaki ayna %1′ lik geçirgenliğe sahiptir. Demet haline getirilen fotonlar aynı faz ve aynı frekansta olacak şekilde birbirleriyle uyumlu olarak buradan dışarıya çıkar ve lazer ışını meydana gelir.

CO_2 lazerlerde üretilen ışık diğerlerine göre çok daha fazladır. Bunun nedeni ise gaz karışımının bulunduğu tüpün etrafının aynalarla çevrili olup ışının büyük bir bölümünün hızla geri yansıtılmasıdır. Işın kavite ortamında sürekli yansıma yapar ve sonunda yeterli güce ulaştığında dışarı çıkar. CO_2 lazerler kullanım alanına ve uygulamasına göre mW'lardan yüzlerce kW'a kadar değişen bir güç aralığına sahip olup 10600nm dalgaboyunda ışın yayarlar.

CO_2 lazerler sürekli ve atımlı olmak üzere 2'ye ayrılmaktadır. Sürekli ve atımlı lazerler de bazı lazer parametreleri farklılık göstermektedir. Sürekli lazerlerde kesintisiz lazer çıkışı olduğu için ortalama gücü yüksektir. Ancak tepe güç değeri bu durumda düşük kalmaktadır. Atımlı lazerlerde ise lazer çıkışı kesikli olarak verilmektedir. Atım frekansı ve atım süresine göre lazerin ortalama gücü değişmektedir. Kısa süreli darbeler ile lazer çıkışı olduğunda lazerin ortalama gücü düşük ancak tepe güç değeri yüksektir. CO_2 lazer için bir diğer parametre ise enerji yoğunluğu parametresidir. Buna enerji akısı (fulence) denir ve birimi J/cm^2'dir. Lazer parametreleri şu şekildedir;

$$E=h\mu=h\frac{c}{\lambda} \tag{3.1}$$

$$P=\frac{E}{t} \tag{3.2}$$

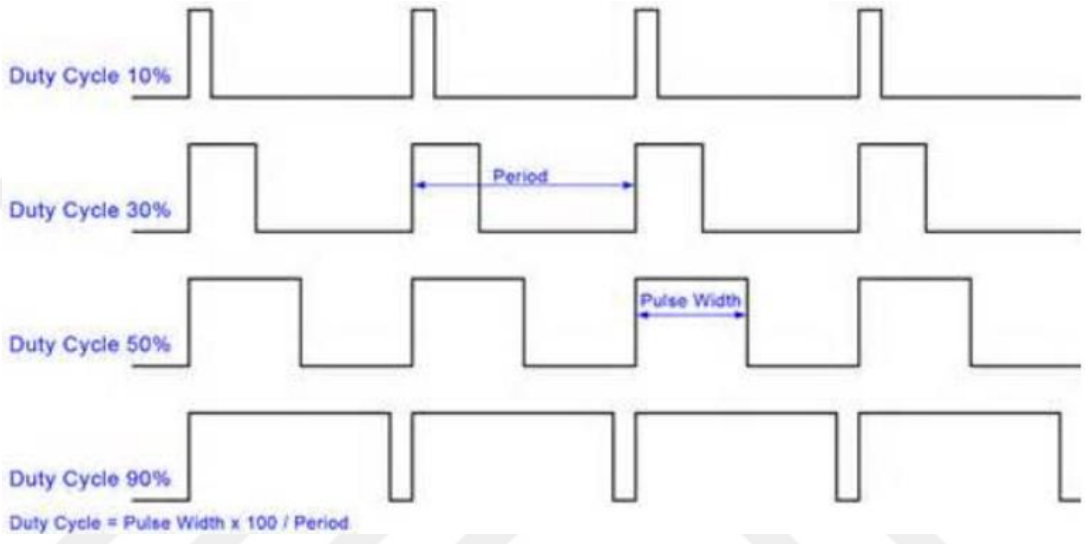
$$F=\frac{E}{A} \tag{3.3}$$

Denklem (3.1)'de E lazerin foton enerjisini, h planck sabitini μ ise lazerin frekansı, c ışık hızı, λ ise lazerin dalga boyudur.

Denklem (3.2)'de P lazerin gücünü göstermektedir. Lazerin gücü hesaplanırken lazer enerjisinin birim zamana bölünerek bulunur. Bu güç değeri sürekli lazerlerde lazer enerjisi ile eşit olurken atımlı lazerlerde lazerin açık olduğu süreye göre değişkenlik göstermektedir. Denklem (3.3)'te lazerin enerji yoğunluğu gösterilmiştir. Burada F lazerin enerji yoğunluğunu bir diğer adı fluence değeridir. E lazer enerjisini, A ise lazer ışın demetinin alanını göstermektedir. Fluence yüzey işlemede önemli yüzeyde

bulunan reçine veya kirli madderlerin kaldırılmasında önemli bir parametredir. Atımlı lazerlerde ortalama güç düşükken tepe güç değeri yüksektir.

Atımlı lazerler, lazerin atım süresi ayarlanarak oluşturulmaktadır. Bu işlem için kullanılan teknik PWM (pulse width modulation)'dir. Bu teknikte lazer belirli frekansta ve atım sürelerinde aktif edilir. Frekans aralığı 1 Hz'den 100 KHz'e kadar olabilmektedir. Atım süresi de Lazerin gücünü ayarlamaya yaramaktadır.



Şekil 3.5. PWM gösterimi [63]

Şekil 3.5'te PWM doluluk oranı gösterilmiştir. PWM bir kare dalgadır. PWM'in lojik seviyesi "1" olduğunda lazer açık, lojik seviyesi "0" olduğunda da lazer kapalıdır. Bu oranlar değiştirilerek lazerin gücü ayarlanmaktadır. Lazerin atım süresi ne kadar düşük olursa lazerin tepe gücü o kadar yüksek olmaktadır. CO_2 lazerler birim alanda daha yüksek güç elde etmek için belirli frekans seviyelerinde anatarlanmaktadır. Bu frekans aralığı genelde 20 Hz ile 100 KHz arasında olmaktadır.

3.6. Lazer ile Yüzey Temizleme

CFRP malzemeleri yapıştırılmadan önce yüzey temizliğinin yapılması daha verimli yapıştırma için önemlidir. Yapıştırma ile birleştirmede yapıştırılacak malzemelerin yüzeyleri önemli bir rol oynamaktadır ki belki de birleşmenin kalitesini belirleyen en önemli parametredir [3]. Güçlü ve dirençli bir yapışma bağlantısı sağlamak için yapıştırıcı ve malzeme arasında iyi bir adezyon sağlanmalıdır. Yapıştırıcı ve malzeme arasındaki adezyon problemi genelde üretimden sonra yüzeyde kalan kalıp ayırıcı gibi

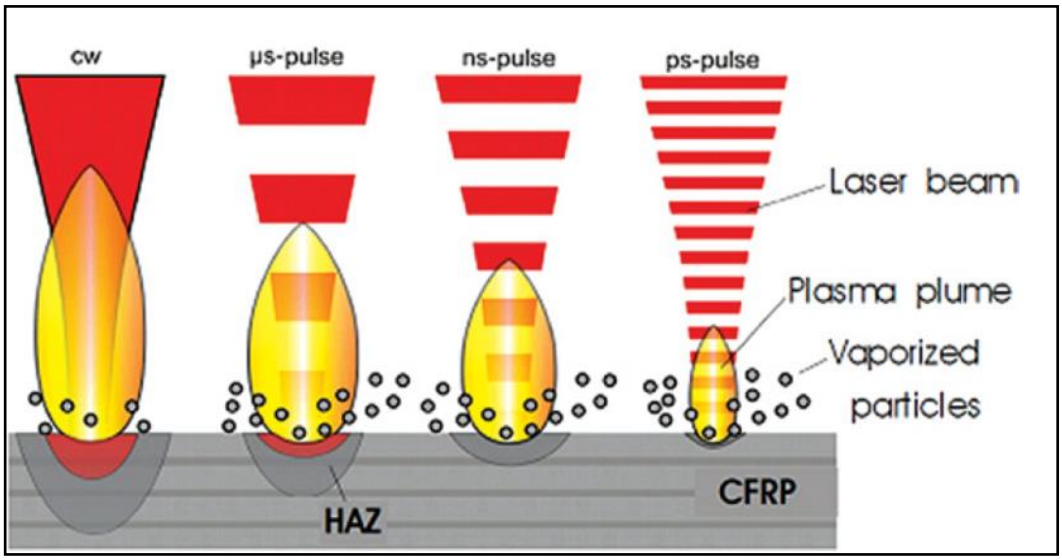
yüzey kirliliği yaratan kimyasallardan kaynaklanır [64]. Yapışma bağlantısında optimum bir mukavemet elde etmek için özel ön yüzey işlemeleri yapılması gerekmektedir. Yüzeylerde yapılacak ön işleme, yüzeydeki zayıf sınır tabakalarını kaldırır, yüzey enerjisini değiştirir ve yüzeyin mikrotopografik yapısını geliştirir.

Yüzey temizleme işlemi kumlama, SiC patlatma, taşlama, fırçalama, aşındırma, soyma katmanı (peel ply) gibi mekanik yollarla olduğu gibi farklı lazer çeşitleri ile de yapılabilmektedir. Lazer ışımasının yerel olarak malzemenin kristal yapısı, kimyası ve morfolojisinde neden olduğu değişimler malzemenin uygulamadaki davranışlarının değişime neden olmaktadır [65]. Ayrıca lazerin büyük miktarlardaki enerjiyi yüzeye yakın bir bölgede, belirlenen sınırlar içinde ve çok kısa sürelerde malzemeye aktarabilmesi, malzemenin özeliklerini yerel olarak değiştirme imkânı vermektedir [65].

Lazerler, son 30 yılda karbon fiber takviyeli plastiklerin (CFRP) işlenmesi için alternatif bir teknik olarak kullanılmıştır. CFRP laminatların lazerle işlenmesi üzerine yapılan ilk deneyler, 1980'lerde yaygın kızılötesi (IR) kaynaklarla Caprino ve Tagliaferri [66] tarafından yapılmıştır. Çalışmaları, farklı takviyeli kompozit laminatların CO_2 lazer kesimi için izin verilen maksimum besleme oranının tahminine odaklanmıştır (cam, karbon ve polyester reçine içindeki aramid elyafları ve kalınlıkları). Bu çalışmalarında kesme performansını etkileyen kesme kalitesi, kerf geometrisi ve proses parametrelerine bağlı olarak ısıdan etkilenen bölgenin (IEB) boyutları açısından tanımlamak için termal modellere olan ihtiyacı işaret etmiştirler. [66]. CFRP'leri yüzey temizleme işleminde yaygın olarak CO_2 lazer ve UV lazerler kullanılmaktadır. Ancak CO_2 lazerler IR bölgesinde oldukları için malzeme yüzeyindeki IEB bölgelerini genişletmektedir. Lifler boyunca hızlı iletim nedeniyle, transfer edilen ısı matrisi yumuşatır ve bozar, böylece laminatın interlaminar bütünlüğüne zarar verir.

Atımlı lazerler ile yapılan aşındırma işleminde kullanılan lazerin atım uzunluğuna ve dalga boyuna bağlı olarak lazer demeti ile malzeme etkileşim mekanizması farklılaşmaktadır [67]. Mikro ve nanosaniye atım uzunluğundaki lazerler ile yapılan aşındırma işlemlerinde baskın olan süreç ısı iletimi, buharlaşma ve plazma oluşumudur. Foto-ısısal işlem grubuna giren bu mekanizmada, lazer atım enerjisi

malzemenin yüzeyi tarafından soğurulur ve ısı iletimi bir sıcaklık alanının oluşumuna neden olur. Ulaşılan sıcaklığa bağlı olarak malzeme erir, buharlaşır veya plazma durumuna geçer. Bu tür bir mekanizmada malzemenin erimesi sonucu, belirgin bir ısıdan etkilenmiş bölge (IEB), yüzey atıkları ve mekanik çatlaklar gibi hatalar oluşur. Atım sürelerinin termolizasyon süresinden kısa olması nedeniyle piko-saniye ve daha kısa atım uzunluğuna sahip lazerler ile yapılan işlemde ise ısı iletimi ve hidrodinamik hareket, atım genişliği süresince ihmal edilebilir [68]. Atım sürelerine bağlı olarak lazer malzeme aşındırma mekanizmalarına ait sembolik gösterim Şekil 3.6'da gösterilmiştir.



Şekil 3.6. Lazer türlerine göre termal etki [69]

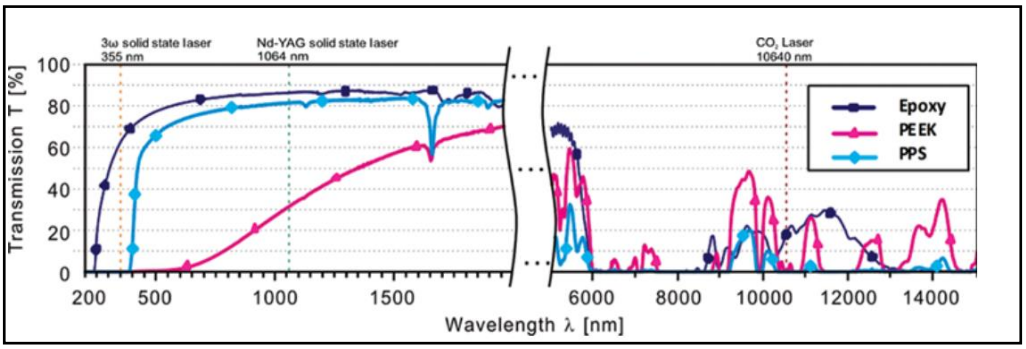
Lazer ile malzeme işlemede aşındırma mekanizmasında farklılık yaratan diğer bir parametre ise dalga boyudur. Günümüzde kızılötesi bölgesinden ultraviyole bölgeye kadar olan spektrum aralığında birçok farklı dalgaboyuna sahip lazer bulunmaktadır.

Polimer esaslı malzemelerin lazer ile aşındırılmasında doğrudan fotokimyasal yolla bağ kırma prosesi ve foto-ısısal olmak üzere iki farklı mekanizma dikkate alınmaktadır. Fotokimyasal aşındırma, yeterince yüksek enerjili fotonların soğurulması ile polimer malzemeyi oluşturan türler arasındaki bağların kırılması ve oluşan itici gücün malzemenin ayrışmasına neden olması ile gerçekleşir. 3,5-7,9 eV enerji aralığına sahip UV fotonlar ile gerçekleşen süreç forokimyasal aşındırmadır [70].

Kızılötesi bölgesinde ışıma veren lazerler ile gerçekleşen aşındırma işlemi ise foto-ısısal kategoride değerlendirilmektedir. Kızılötesi dalgaboyu doğrudan polimer malzemedeki titreşim modlarını uyarır. Titreşim modlarının uyarılması ile çok kısa sürelerde (10^{-12} s) enerji ısıl enerjiye dönüşür ve yüksek sıcaklık nedeniyle bağlar kopar [71].

Lazer teknolojilerinin geldiği nokta itibarı ile lazer ile malzemeye aktarılan enerjide yüksek kontrol sağlanabilmektedir. Bu sayede malzemenin yüzey katmanını kaldırılırken epoksi dolgu ya da fiberlere zarar verilmez [35] .

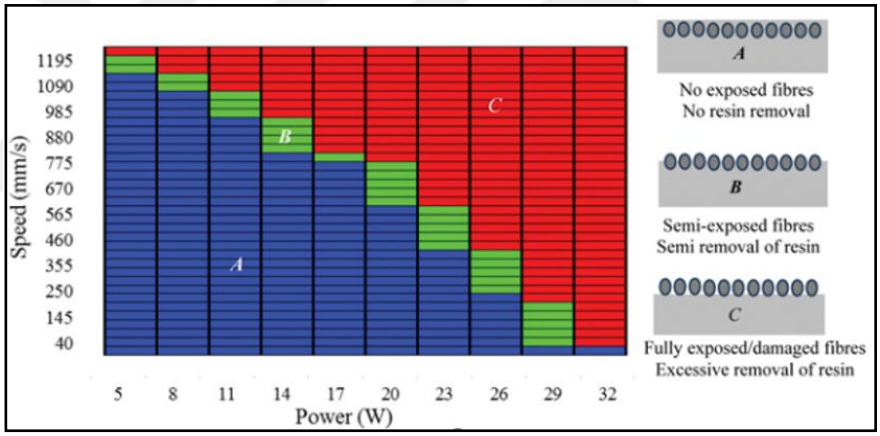
CFRP kompozitlerin lazerle yüzey işleminin, yüzeyleri temizlemenin yanı sıra hem güçlü hem de güvenilir birleştirmeyi sağlayan bir teknik olduğu çalışmalarda belirtilmiştir [72, 54]. Günümüzde ultraviyole, orta kızıl ötesi ve kızıl ötesi olmak üzere 3 farklı dalga boyunda lazerler kullanılarak CFRP malzemelerin yapıştırma bağlantısı için yüzey işleme çalışmaları gerçekleştirilmektedir. Gelen lazerin dalga boyuna bağlı olarak farklı termoplastiklerin geçirim grafiği Şekil 3.7'de görülmektedir. Bu grafikte yola çıkarak epoksi malzemelerinin UV bölgesindeki ışımaları daha fazla geçirdiği gözlemlenmiştir.



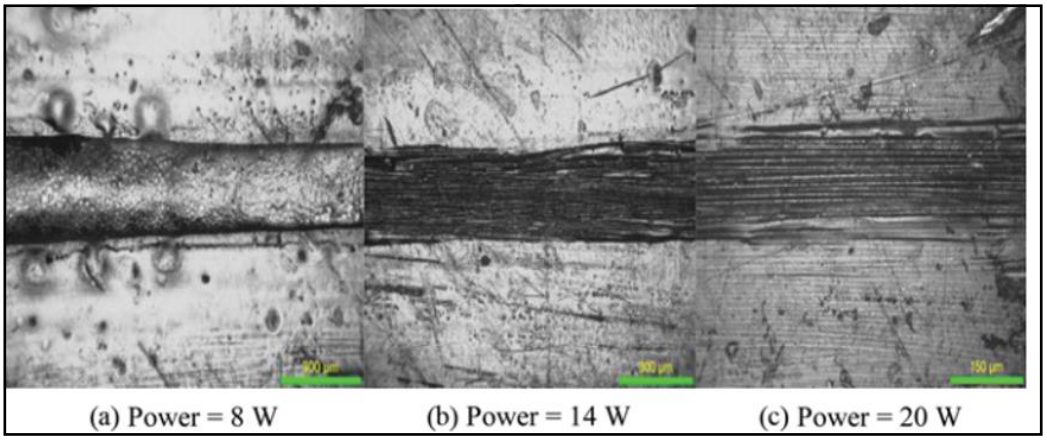
Şekil 3.7. Lazer dalga boyu ile farklı termoplastiklerin geçirim grafiği [72]

Güçlü ve dayanıklı yapıştırma için malzemler arasında uygun bir yapıştırıcı gerekmektedir. Yapıştırıcının uygunluğu ve miktarı sağlam yapıştırma için önemlidir. Reçine fazlalığı veya yüzeylerin yapıştırıcıya yapışmaması malzeme dayanımını negatif etkilemektedir. Bu yüzden malzeme yüzeyinde yapılacak modifikasyonla daha kuvvetli yapıştırma gerçekleştirilmektedir. Yüzey temizliği ile kompozit üzerindeki reçine kaldırılarak modifikasyon işlemi gerçekleştirilir.

Yüzey temizleme işleminde sürekli ve atımlı CO_2 lazer kullanılabilmektedir. CFRP yüzeyinin taranması için galvo tarama yöntemi kullanılabilmektedir. Bu yöntem ile lazer çıkışı aynalar vasıtasıyla yönlendirilerek istenilen alan taranmaktadır. CO_2 lazerle yüzey temizliği yaparken fiberlere zarar vermeden reçinelerin yüzeyden temizlenmesine dikkat edilmelidir. Tarama işlemi gerçekleştirilirken dikkat edilmesi gereken bazı hususlar vardır. Bunlar; tarama hızı, lazer spotlarının örtüşme oranları, lazerin fluence etkisi ve lazer gücüdür. Optimum değerler deneme yöntemiyle bulunabilmektedir. M. Nattapat ve arkadaşlarının yapmış olduğu CO_2 lazer ile yüzey temizleme sonuçları Şekil 3.8'de görülmektedir. Bu çalışmada kompozit malzemenin tarama hızı ile lazer gücü değişmine göre reçine ve fiberlerin kaldırım miktarı gösterilmiştir. A bölgesinde fiberler çıkarılmamıştır. B bölgesinde fiberler kısmen çıkmış ve reçine kısmen kaldırılmıştır. C bölgesinde reçine tamamen kaldırılmışıtr ama fiberler zarar görmüştür [54].

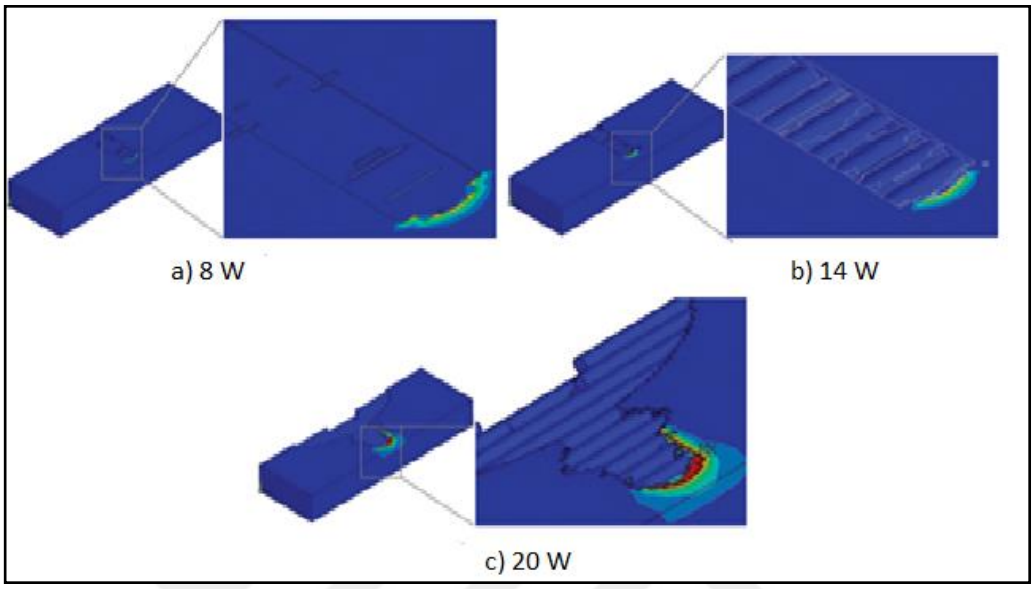


Şekil 3.8. Örnek CO_2 ile yüzey tarama işlemi[54]



Şekil 3.9. Farklı güçlerdeki lazerin malzeme yüzeyine etkisi [54]

Farklı lazer güçlerinde 8, 14 ve 20 W ve 880 mm'sn tarama hızıyla yapılan denemelerin malzeme yüzeyine etkisi Şekil 3.9'da gösterilmiştir. 8 W A bölgesinde 14 W, B bölgesinde ve 20 W ise C bölgesindendir.

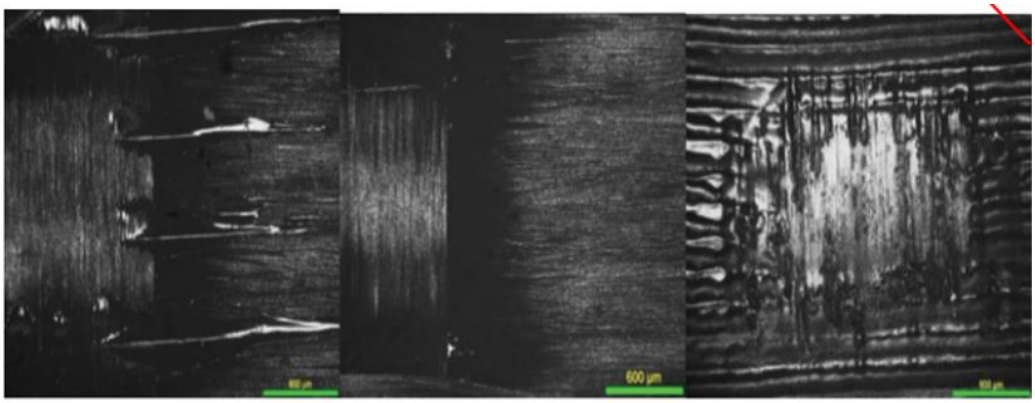


Şekil 3.10. Sonlu elemanlar yöntemi ile oluşturulan ısıl yayılım görüntüsü [54]

FEM analiz görüntüsü Şekil 3.10'da verilmiştir a görüntüsü 8 W, b görüntüsü 14 W ve c görüntüsü ise 20 W'lık lazere göre hazırlanmış sonuçlardır. Bu analizde ısıl yayılım denklemleri kullanılmıştır. Lazer güçlerine göre ısıl yayılımdaki değişim ve tahribat gösterilmiştir. Deneysel sonuçlar ile bağdaşan bir analiz sonucu yakalanmıştır. Lazerin gücü arttıkça reçineyle birlikte fiberlere de zarar vermekte ve IEB denilen ısıl hasarlara yol açmaktadır [54].

Lazer ışın demetlerinin birbiri üzerinde örtüşme oranları yüzey temizliğine etki etmektedir. Örtüşme oranlarına göre farklı yüzey temizliği Şekil 3.11'de gösterilmiştir. Örtüşme oranı hesabı Denklem (3.5)'te şu şekilde yapılmaktadır;

$$\text{Lazer Örtüşme Oranı } \% = \frac{\text{Lazer spot boyutu-Offset mesafesi}}{\text{Lazer spot boyutu}} 100 \qquad (3.5)$$

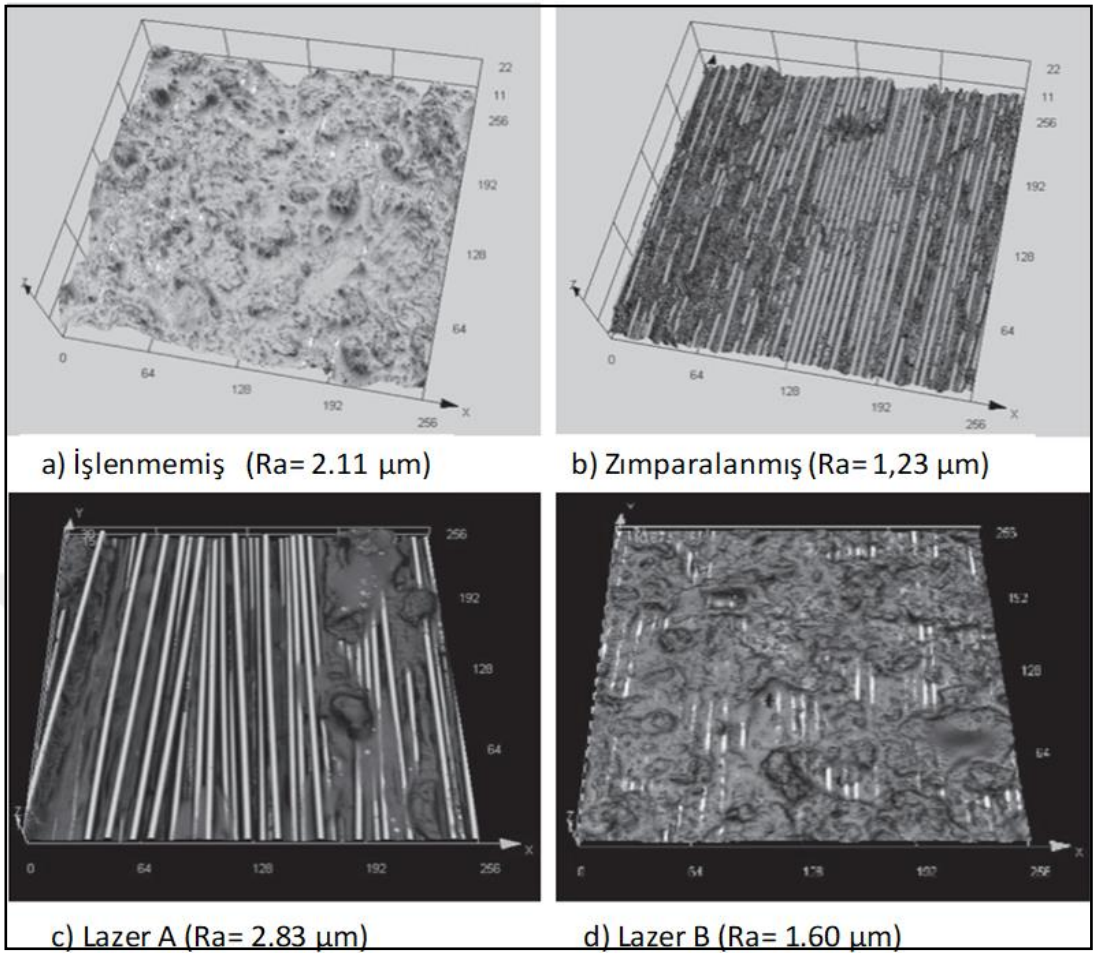


(a) Overlap = 0% (b) Overlap = 25% (c) Overlap = 50%

Şekil 3.11. Örtüşme oranlarına göre yüzey temizliği [54]

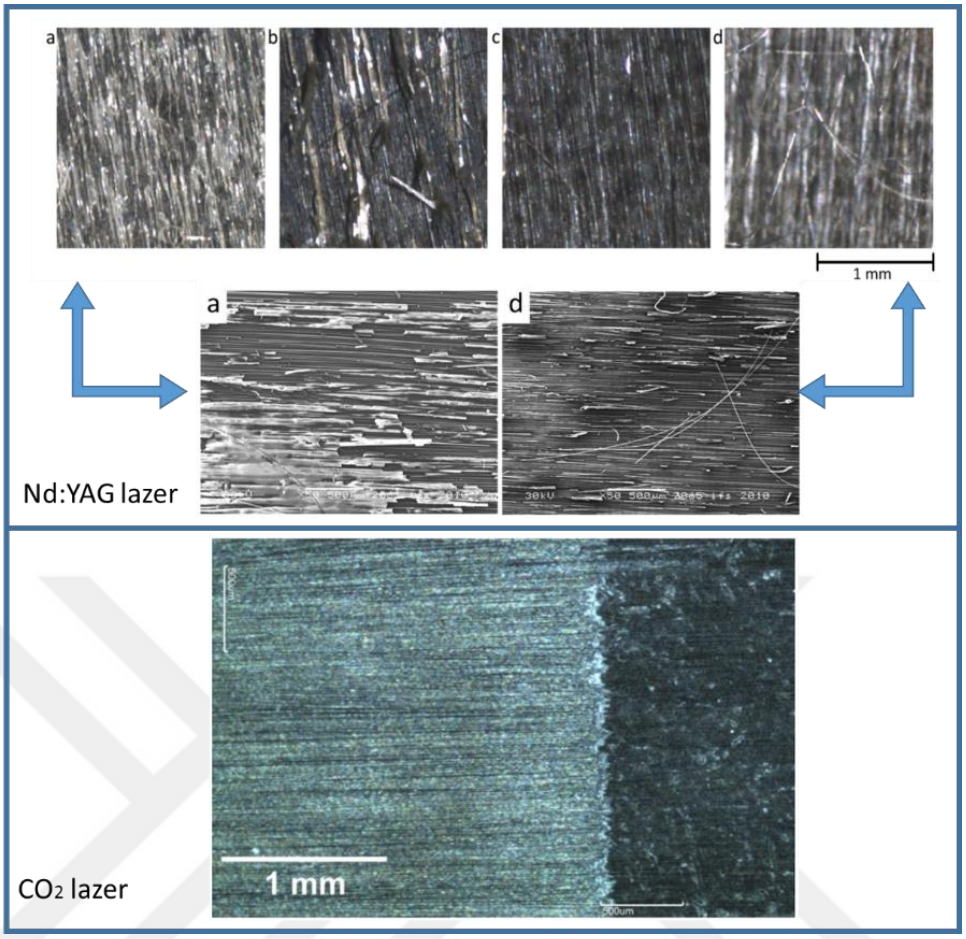
Yokozeki ve arkadaşları atımlı CO_2 lazer kullanarak gerçekleştirdikleri çalışmada CFRP kompozit malzemelerin yüzeylerini işleyerek yapıştırma ile birleştirme mukavemetini arttırmayı hedeflemişlerdir [53]. Çalışmada kullanılan lazer 10,6µm dalga boyuna sahip olup, atım başına maksimum 6,5J enerjiye sahiptir ve 50Hz tekrarlama oranında ışıma vermektedir. CFRP yüzeylerinin işlenmesinde 10,6µm dalga boylu lazer kullanma gerekçelerini, organik maddelerin bu dalga boyunda iyi soğurma sergilemeleri ve bu sayede işlem sırasında sadece CFRP yüzeyindeki polimerlerin kaldırılacağı bu sayede de yüzey temizliği ve pürüzlülük sağlanacağı şeklinde açıklamaktadırlar.

Çalışmada kullandıkları CFRP malzemeler 3mm kalınlığındaki tek yönlü fiber katkılı malzemelerdir. Yapıştırma işlemi ince film ile gerçekleştirilmiştir. Lazer parametreleri üzerine yaptıkları ön çalışmalar için aynı güç ve tarama hızına sahip ancak farklı spot alanı kullanarak elde edilen iki farklı yüzeyin yapıştırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Yüzeylerin karakterizasyonu mikroskop görüntüleri, yüzey pürüzlülüğü ve spektroskobik incelemeler ile gerçekleştirilmiştir. Çalışmalarda elde edilen yüzeylere ait spektroskobik görüntüleri Şekil 3.12'deki gibidir.



Şekil 3.12. CFRP malzemelerin yapışma ile birleştirme işlemi için yüzeylerinin farklı işlemeler sonrası mikroskop görüntüleri; (a) işlenmemiş, (b) zımparalanmış, (c) ve (d) CO_2 lazer ile işlenmiş [53]

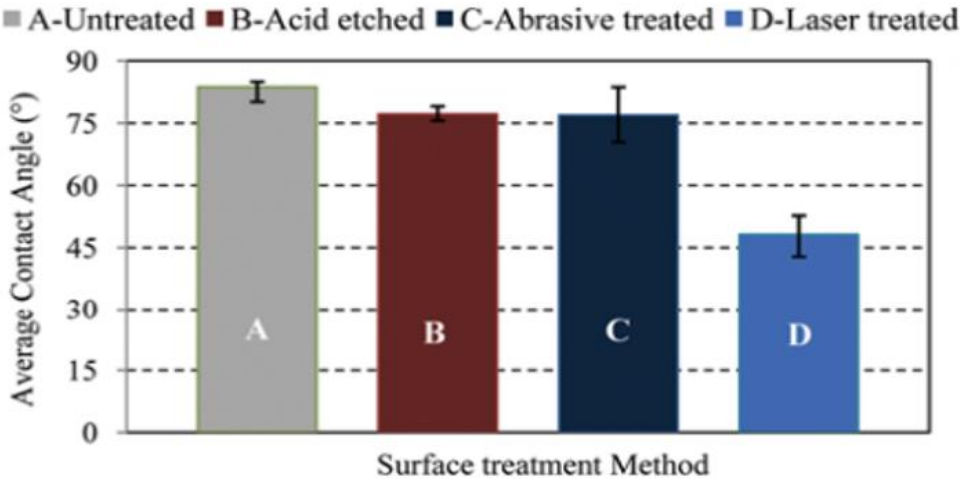
Fischer ve arkadaşları [64] tarafından 1064nm ve 10600nm dalga boylarıındaki Nd:YAG ve CO_2 lazer kullanılarak gerçekleştirilen çalışmada dalga boyu ve lazer parametrelerinin etkisi incelenmiştir. Bu amaca yönelik olarak belirlenen ana strateji; CRFP yüzeylerindeki reçinenin tamamen kaldırılması ve bu süreçte fiberlere zarar vermeden bir yüzey elde edilmesidir. Yapıştırma işlemi ince film ile gerçekleştirilmiştir. Farklı lazer parametreleri kullanılarak üretilmiş örneklerin ilk testleri optik mikroskop görüntüleri ile değerlendirilmiştir. 1064 nm dalgaboylu Nd:YAG lazeri kullanılarak elde edilen yüzeyler Şekil 3.13'te görülmektedir.



Şekil 3.13. Farklı akılarda Nd:YAG ve CO_2 lazeri ile gerçekleştirilen yüzey işleme örneklerine ait görüntüler [72]

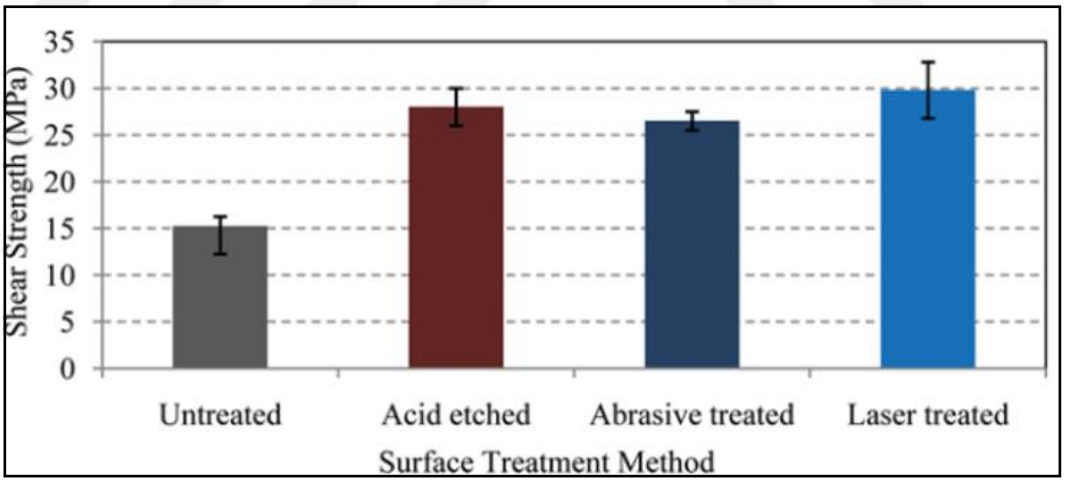
Nd:YAG lazer ile düşük akılarda reçine yüzeyden tamamen kaldırılmazken, yüksek lazer akılarında fiberler zarar görmeye başlamaktadır (Şekil 3.13; Nd:YAG lazer-d). CO_2 lazer kullanılarak üretilen örnekte ise reçine tamamen kaldırılırken fiberlere zarar verilmemiştir (Şekil 3.13; CO_2 lazer). CO_2 lazer ile gerçekleştirilen çalışmalarda fiberlere zarar verecek lazer şiddetleri nispeten oldukça yüksek değerlerdedir [72].

CFRP malzemeleri yüzey temizleme işlemi gerçekleştirildikten sonra kontak açısı değerlerine bakılarak yüzey ıslanma oranları hesaplanabilir. Çeşitli yüzey temizleme işlemlerine göre elde edilen kontak açısı Şekil 3.14'te gösterilmiştir. A yüzeyi işlenmemiş malzeme, B asit ile işlenmiş, C zımparama ile ve son olarak D lazer ile işlenmiş malzeme yüzeyleridir.



Şekil 3.14. Yüzey temizleme işlemlerine göre kontak açısı [54]

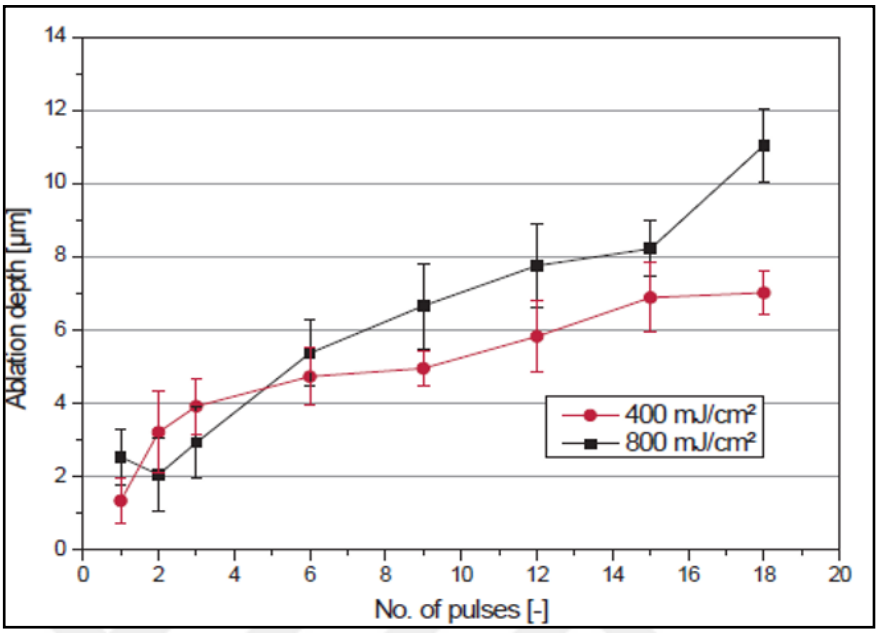
M. Nattapat ve arkadaşları tarafından yapmış oldukları yüzey temizleme işlemlerinin çekme dayanımı karşılaştırılması Şekil 3.15'te gösterilmiştir. Bu sonuca göre CO_2 lazer ile yüzey temizleme işlemi en yüksek dayanımı sağlamıştır. Kontak açısı ile mukavemet ilişkisine bakılacak olursa kontak açısı düştüğünde yapıştırma mukavemetinin arttığı gözlemlenmektedir. Buda kontak açısının düşmesiyle yüzey enerjisinin artması ve daha iyi yapıştırmanın sağlanması ile açıklanmaktadır.



Şekil 3.15. Yüzey işleme yöntemlerine göre çekme dayanımı [54]

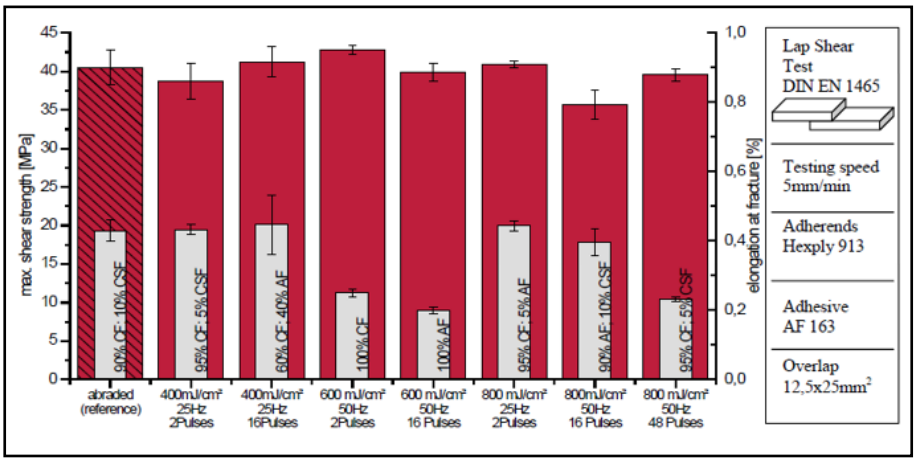
Yüzey hazırlama işleme malzemenin işlenmesi için çok önemlidir. Yüzey temizleme işleminde uygulanan lazer yöntemlerinde farklı sayıda lazer atışı ve farklı enerji seviyelerinde lazer atımı yapılarak CFRP'lerde farklı ablasyon derinlikleri elde edilebilir. CFRP yüzeylerinde deleminasyon yapmama adına bu parametre önemlidir. F. Fischer ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilmiş olan çalışmada fluence ve lazer

atım sayısına göre CFRP yüzeyindeki aşınma derinliği Şekil 3.16'da gösterilmiştir [53].

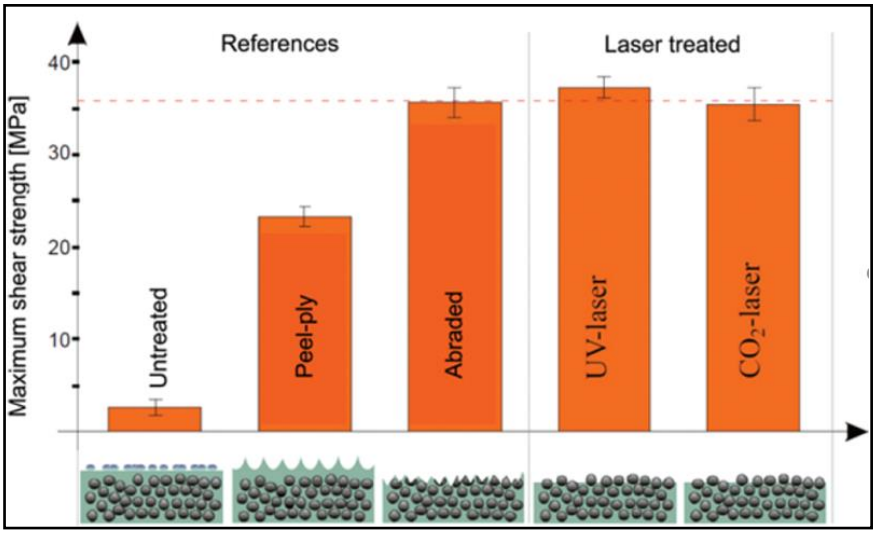


Şekil 3.16. Atım sayısına göre ablasyon derinlik miktarı [73]

F. Fischer ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilen çalışmada farklı UV fluence değerleriyle işlenen CFRP'nin yapıştırılmasından sonraki çekme deneyi testinde elde edilen mukavemet dayanımı Şekil 3.17' de gösterilmiştir. En iyi sonucu 600 mJ/cm^2 fluence ve 2 pulse lazer atımında alınmıştır. Lazer gücü arttırıldığında fiberler zarar gördüğünden mukavemetin azaldığı görülmektedir. Lazer gücünün azaltılması ile de malzeme yüzeyinin düzgün işlenmemesinden kaynaklı mukavemet azalmıştır [73].



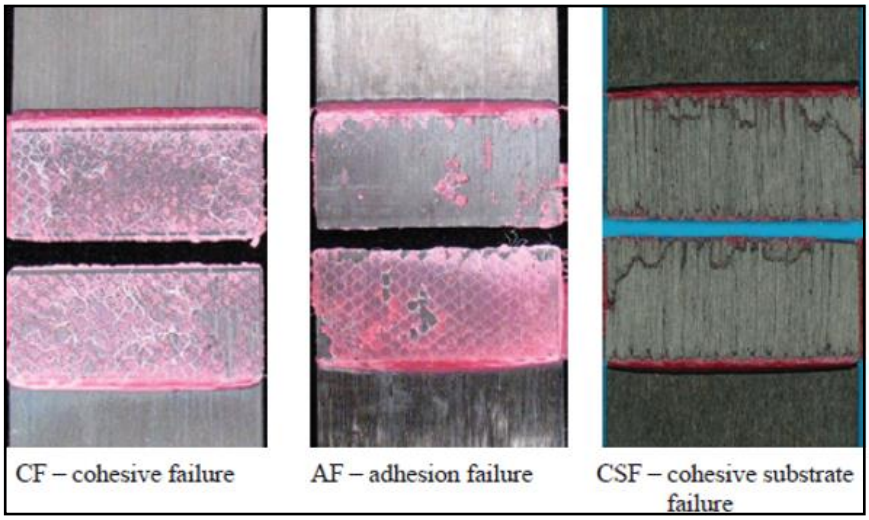
Şekil 3.17. Mukavemet karşılaştırılması [73]



Şekil 3.18. Çekme deneyi sonuçları [69]

F. Fischer ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilen çalışmada farklı dalga boylarındaki (UV ve IR) lazerler ile aşındırma ve soyma yöntemiyle oluşturulan referans numuneleri çekme deneyi sonuçları Şekil 3.18'de gösterilmiştir. Deneyde elde edilen sonuca göre aşındırma metodu ve lazer ön işlemiyle yüzey mukavemetini arttırmak için uygun yöntemlerdir. Buna ek olarak, UV ve CO_2 lazerleri ile lazer ön-muamelesi güvenilir ve otomatikleştirilebilir olmasıyla daha avantajlıdır. CO_2 lazerin dezavantajı yüzey işleme sırasında oluşan IEB noktalarıdır. Bu termal etki ve deleminasyon yüzünden malzemenin mukavemeti azalmaktadır. UV lazerlerin lazer atım süresi az olduğundan(15-50ns) termal etki oluşturması yok denecek kadar azdır. Buda mukavemetin daha fazla olmasını sağlamaktadır [69].

CFRP malzemeleri yapışma sonrası çekme testlerine ait yüzey görüntüleri işlemin değerlendirilmesi açısından önemli bilgiler vermektedir. Çekme deneyinden sonra CFRP'lerin kopma yerlerine göre hata durumları değişmektedir. Şekil 3.19'da çekme deneyi sonucunda oluşan hata modları gösterilmiştir. CF ile gösterilen hata durumu lazerle temizlenen yüzeye yapıştırılan yapışkanın cekme kuvvetinin maksimum düzeyindeki kuvvet uygulandığında yapışkanın kopmasıdır. AF hata durumu ise yapışkanın yüzeye yapışmamasından kaynaklı oluşan durumdur. CSF ise lazerle malzeme işlerken lazer enerjisi çok yüksek seviyede tutulursa fiberlerin zarar görmesinden kaynaklı oluşan hata durumudur [69].



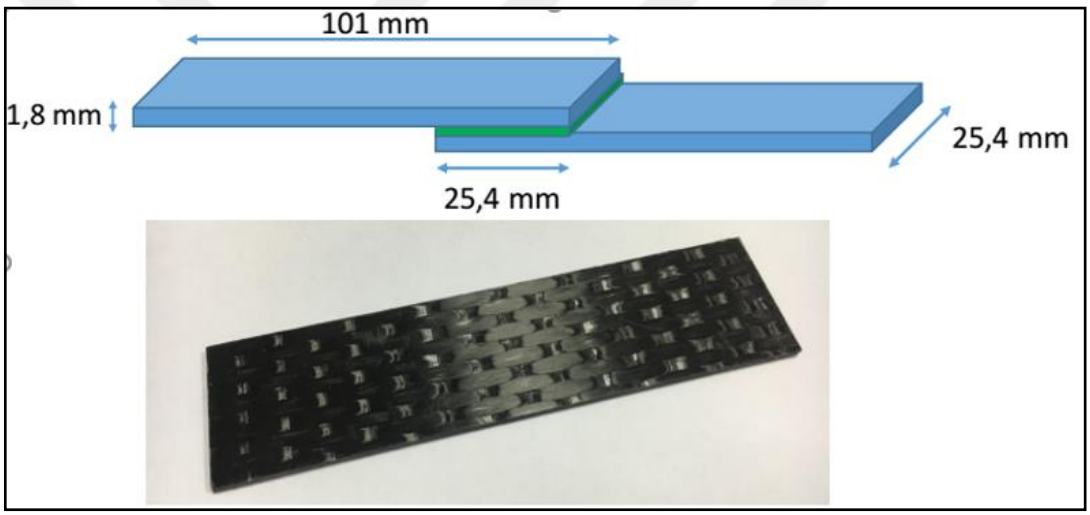
Şekil 3.19. Hata durumları [73]

Çalışmadan elde edilen sonuçlara göre; 1064nm ve 10600nm dalga boylarında olan her iki lazerin de CFRP kompozitlerin yapıştırma ile birleştirmesinde yüzey işlemeye uygun oldukları belirtilmiştir. Bununla birlikte, uygun olmayan lazer parametreleri kullanıldığında, üst reçine tabakasında bir yapışma hatası veya tamamen delaminasyon riskinin oluşmasının da muhtemel olduğu belirtilmektedir. Dalga boyuna göre lazer malzeme etkileşimini dikkate alarak karşılaştırma yapıldığında; orta kızılötesi bölgesindeki 10600 nm dalga boylu CO_2 lazerin delaminasyona neden olmadan ve fiberlere zarar vermeden CFRP malzemelerin aşındırma işlemini gerçekleştirebilmektedir. Diğer yandan yakın kızıl ötesi bölgesine karşılık gelen 1064nm dalga boylu Nd:YAG lazer nispeten düşük soğurulma karakteristiği nedeniyle malzemeye daha fazla ısı aktarmaktadır. Malzeme yüzeyindeki reçinenin 1064nm dalga boyuna göre yüksek oranda geçirgenliğe sahip olması enerjinin doğrudan fiberlere aktarılmasına ve sonuç olarak en üstteki fiber katının altında termal bozulmaya sebep olmaktadır [72].

4. MALZEME VE METHOD

4.1. Karbon Fiber Takviyeli Kompozit (CFRP) Malzeme ve Yapıştırıcı

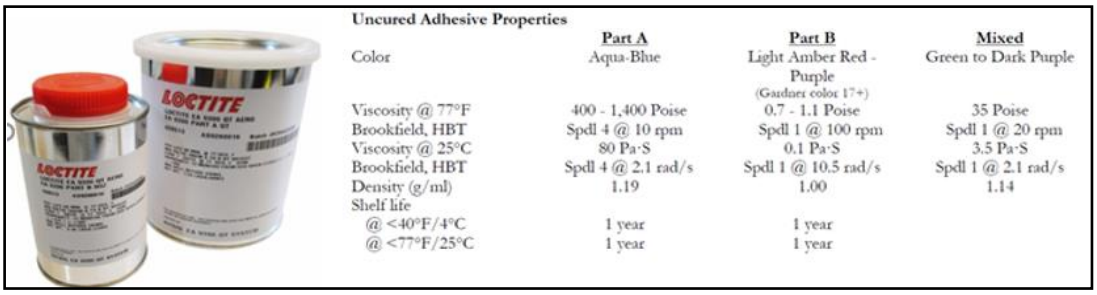
Tez süresince kullanılan numuneler tek yönlü 16 katmandan üretilmiş karbon fiber katkılı kompozit (carbon fiber reinforced polymer-CFRP) malzemeler olup Şekil 4.1'de görüldüğü gibi ASTM D5868-01 standardında belirtilen boyutlara göre hazırlanmışlardır. İstatiksel sonuçlar elde etmek amacıyla çalışılan her parametre için 5'er adet kupon numune hazırlanmıştır.



Şekil 4.1. Fiber takviyeli plastiklerin tekil bindirmeli yapıştırma bağlantısı standardı, ASTM D5868-01

Yüzeyleri işlenen kompozit malzemelerin yapıştırma işleminde yapıştırıcı olarak havacılık kompozitlerinin de birleştirilmesinde hem pratik hem de araştırma geliştirme uygulamalarında yaygın olarak kullanılan iki bileşenli (A-epoksi esaslı, B-amin esaslı) Loctite EA 9396 AERO kullanılmıştır. Düşük viskozite ve oda koşullarında kürlenme özelliğine sahip bu yapıştırıcı ayrıca -55ºC ile 177ºC sıcaklık aralığında en iyi mukavemet özelliklerini sergilemektedir. Bunun yanında ince film yapıştırıcılara göre kolay taşınabilme ve oda koşullarında uzun süreli depolanabilme özeliklerinden dolayı tercih edilmektedir.

Tez kapsamında üretilen mikro yapılara (mikro delik, mikro kanal) nüfuziyetinin daha iyi olacağı düşünülerek düşük viskoziteli EA 9396 tercih edilmiştir. EA 9396'nın ticari etiketli fotoğrafı ve teknik özellikleri Şekil 4.2'de verilmektedir.



Şekil 4.2. Yapıştırma işleminde kullanılan Loctite EA9396 Aero ve teknik özellikleri

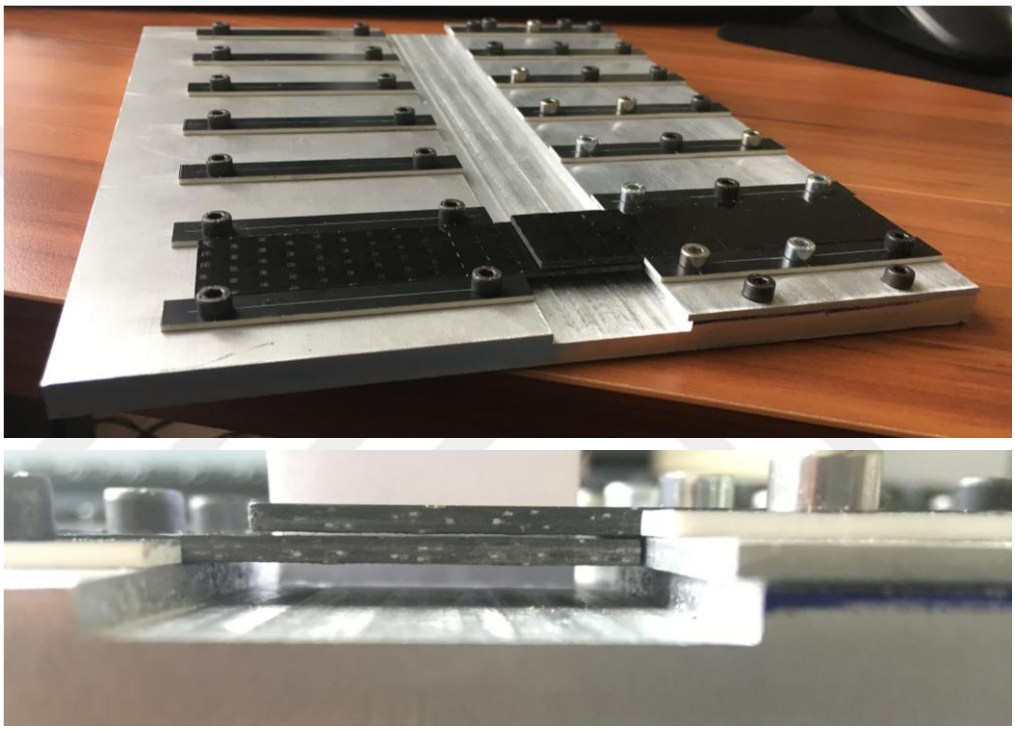
4.2. Adhezif Yapıştırma Sistemi

Yapıştırma ile birleştirme tekniği birçok endüstriyel sektörde sıklıkla kullanılan bir yöntemdir. Yapısal yapıştırıcıların avantajları en kötü atmosferik koşullara karşı yüksek direnç, düşük ağırlıkları, su sızdırmazlıkları ve korozyon dirençleri olarak vurgulanabilir. Ancak yapıştırıcılara özgü bu avantajlardan yararlanmak için tüm imalat uygulamalarında sınırları azaltmak ve yapışma performansını arttırmak için uygun bağlantı tasarımının yapılması gereklidir [40]. Bu bağlamda, yapıştırıcıların performansı hakkında daha fazla bilgi edinmek ve yapışma tasarımını optimize etmek için yapısal yapıştırıcı bağlantılarının analitik modellerini içeren birçok araştırma projeleri gerçekleştirilmiştir.

Yapıştırma ile birleştirmede sonucu etkileyen en önemli etkenlerden biri yapıştırıcı kalınlığıdır. Yapıştırıcının bağlantı mukavemeti üzerindeki etkisini belirlemek için analitik model çalışmaları, sonlu elemanlar ile simülasyon çalışmaları ve deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir [40]. Ancak, yapıştırma kalınlığının tekil bindirme ile yapıştırmadaki etkisi tam anlamıyla açıklanmamıştır. Klasik elastik analiz, yapıştırıcı kalınlığı ile bağlantı mukavemetinin artacağını ön görürken deneysel sonuçlar tam tersini söylemektedir. Bu nedenle uygun yapıştırma sisteminin tasarımı için ön çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

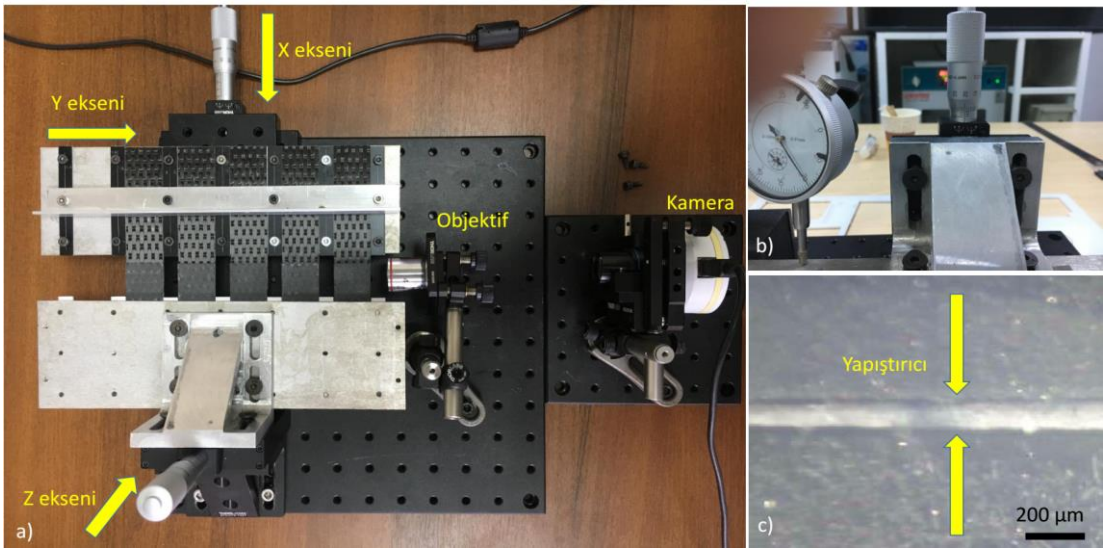
Literatür incelendiğinde farklı endüstriyel uygulamalar için üretilen yapıştırıcılar için farklı kalınlıklar önerilmektedir. Havacılık sektöründe kullanılan yapıştırıcılar için önerilen kalınlık ise 100-200µm aralığındadır. Tez kapsamında gerçekleştirilen

çalışmalarda optimum yapıştırıcı kalınlığını belirlemek ve kontrol etmek için iki farklı tasarım oluşturulmuştur. Şekil 4.3' te görüldüğü gibi oluşturulan ilk tasarım bir kalıptır. Aynı anda 6 kupon numunenin yapıştırılabildiği bu tasarımda farklı yapışkan kalınlıklarının numunelerin altına yerleştirilecek farklı kalınlıklardaki (50µm, 100µm, 150µm) saçlar ile sağlanması planlanmıştır. Ancak yapıştırma işleminde hedeflenen kalınlık hassasiyeti ±10µm olduğu için ve numunelerin altına yerleştirilecek ince saçların kesilmesi esnasında mikro bükülmeler ile çapaklar meydana geldiğinden ve bu nedenle üretimde pratik olmadığı düşüncesiyle bu tasarımdan vazgeçilmiştir.

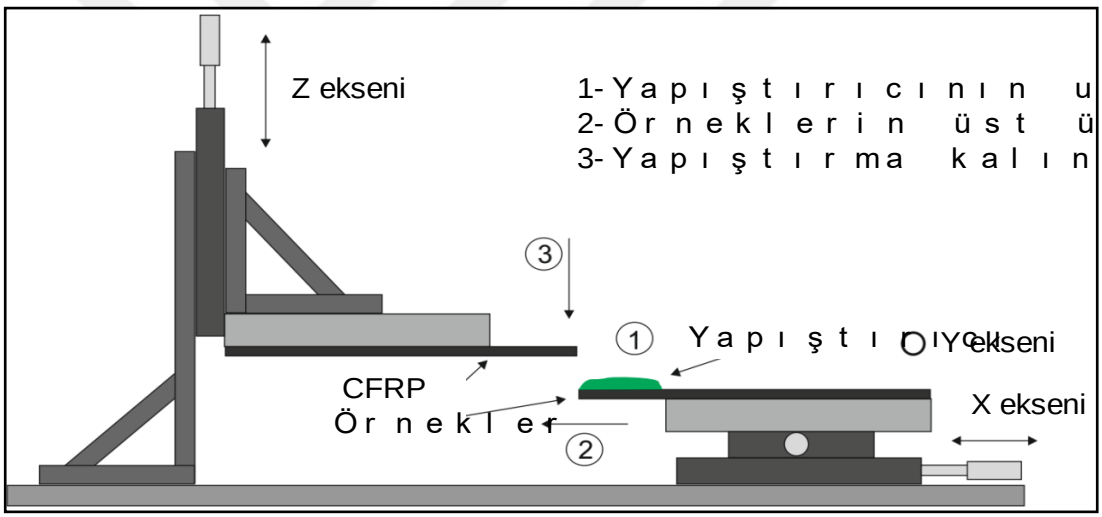


Şekil 4.3. Yapıştırma ile birleştirmede kontrollü yapıştırıcı kalınlığı sağlamak için tasarlanan ilk kalıp tasarımı

Tasarımı gerçekleştirilen ikinci sistem ise ±10 µm hassasiyetle hareket edebilen 3 adet doğrusal hareket sistemlerinden oluşan bir tasarımdır. Üç eksende birbirine bağlanan ve 25 mm hareket eden modüller ile yüksek hassaslıkta konumlama yapılabilmektedir. Aynı kalınlığa getirilen numunelerin yerleştirildiği metal parça yüksek hassaslıktaki taşlama makinesi ile düzleştirilmiştir. Yapıştırma işleminin yapıldığı düzeneğe ait görüntü Şekil 4.4-a'da görülmektedir. Düzeneğin doğruluğu komparatör (Şekil 4.4-b) ve en dıştaki numunelerin kesit görüntülerini alabilen basit bir mikroskop dizaynı ile doğrulanmıştır (Şekil 4.4-c).



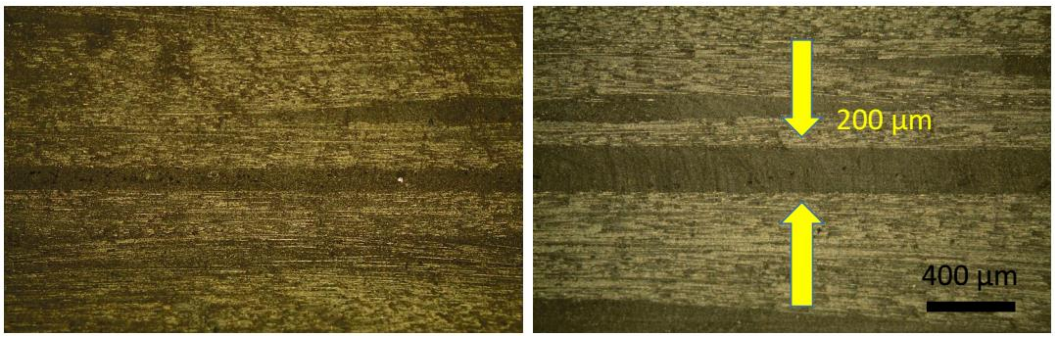
Şekil 4.4. a) Yapıştırma ile birleştirmenin yapıldığı 3 eksenli düzenek, b) komparatör ve c) kamera yardımıyla incelenen kesit görüntüsü ile doğrulama.



Şekil 4.5. Örneklerin istenilen yapıştırma kalınlığında birleştirilme prosedürü.

Yüzeyleri hazırlanan örneklerin yapıştırılması Şekil 4.5‘ te görüldüğü gibi 3 aşamada gerçekleştirilmiştir. 1. aşamada; yapıştırma alanına hazırlanan yapıştırıcı uygulanmıştır. 2. aşamada; mikrometre kontrollü doğrusal X ekseni hareket ettirilerek örneklerin 25,4 mm’lik parçaların üst üste gelmesi sağlanmıştır. 3. aşamada; örnekler arasındaki mesafe z ekseni hareket ettirilmesi ile planlanan kalınlığa getirilmiştir. Yapıştırılarak birleştirilen kupon numunelerin kürleme işlemi yapıştırıcının teknik data kağıdında belirtilen prosedürüne göre 66°C’deki elektrikli fırın içinde 1 saatte gerçekleştirilmiştir. Fırında 1 saat süresince kürlenen örnekler sonrasında oda koşullarındaki kapalı bir başka fırın içinde bir gün boyunca bekletilerek çekme testleri için hazır hale getirilmiştir. Şekil 4.4’te görülen düzenek kullanılarak farklı

kalınlıklarda yapıştırma işlemi gerçekleştirilen örneklere ait örnek bir görüntü Şekil 4.6' da verilmiştir.



Şekil 4.6. Yapıştırma işlemi yapılmış örneklere ait kesit görüntüsü

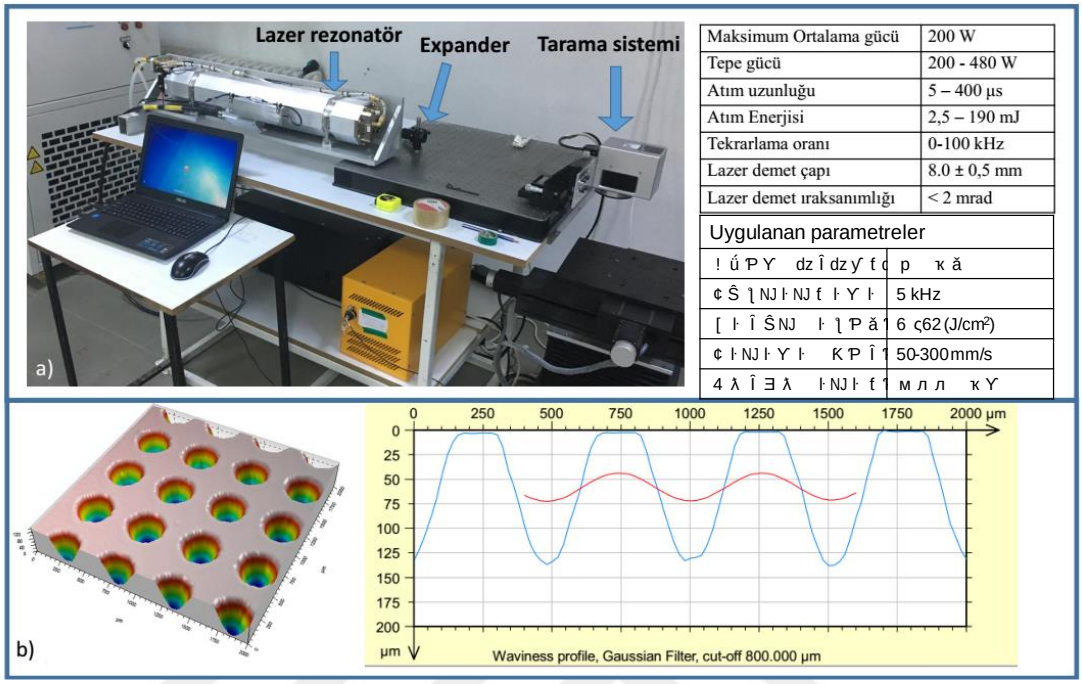
4.3. Lazer Sistemi ve Deneysel Düzenek

CFRP malzemelerin yüzeylerin işlenmesinde iki farklı özelikte lazer kullanılmıştır. Bunlardan ilki 10,6 µm dalgaboyunda ışıma veren ve 0,012 eV foton enerjisine sahip olan karbondioksit lazer (CO_2) ikincisi ise ultraviyole bölgesinde ışıma veren ve 3,5 eV foton enerjisine sahip Nd:YAG lazerin III. harmoniğidir. Daha öncede belirtildiği üzere her iki lazerin dalgaboyu kompozit malzemelerin matris elemanı tarafından yüksek miktarlarda soğurulmaktadır.

4.3.1. Karbondioksit lazeri (IR)

CFRP kompozit malzemelerin lazer ile yüzey işleme çalışmaları atımlı karbon dioksit lazer (CO_2) ile gerçekleştirilmiştir. Çalışmalarda kullanılan CO_2 lazer, 10,6µm dalga boyuna sahip olup, PWM (Pulse Width Modulation) sinyali ile sürülmektedir. CO_2 lazer sistemine ait görüntü ve teknik özelikleri Şekil 4.7'de belirtilmektedir. Lazer rezanatöründen çıkan lazer demeti malzeme yüzeyinde daha küçük alana odaklanabilmesi için 1,25 X büyütme oranına sahip bir demet genişletici ile 10 mm çapa genişletilmiştir. Malzeme yüzeyindeki tarama işlemi iki düz ayna ve 160 mm odak uzaklığına sahip F-Theta mercekten oluşan tarama kafası ile gerçekleştirilmiştir. Tarama kafası bilgisayar kontrollü olup lazer ile senkronize çalışabilmektedir. Yüzeylerin taranması işlemi birbirine paralel çizgiler şeklinde gerçekleştirilmiştir. Lazer demetinin şiddet dağılımı gausyen yapıda olup, polimetil metakrilat (polymethyl methacrylate-PMMA) malzemede yarattığı deliklere ait profilometre görüntüleri Şekil

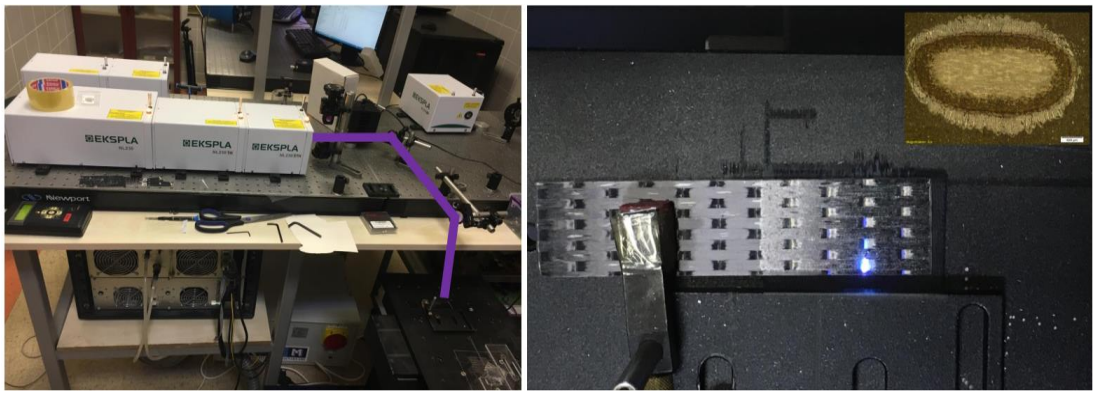
4.7-b'de görülmektedir. Profilometre sonuçlarından da anlaşılacağı üzere lazer atım enerjisi kararlılığı oldukça iyidir.



Şekil 4.7. Deneysel çalışmalarda kullanılan CO_2 lazere ait görüntü ve teknik özellikleri

2.2.4 Nd:YAG lazeri

Tez kapsamında yüzey hazırlama işlemlerinde kullanılan ikinci lazer ise 355 nm dalgaboyunda ışıma veren Nd:YAG (Neodymium-doped yttrium aluminum garnet; Nd:Y3Al5O12) lazerin III. Harmoniğidir. Atımlı modta çalışan bu lazer 20 Hz tekrarlama oranında 4,4 ns uzunluğuna atımlar üretmektedir. Atım başına üretebildiği 355 nm dalgaboyundaki atım enerjisi ≈ 20 mJ'dür. Karbondioksit lazerden farklı olarak numunelerin işlenmesi sürecinde lazer demeti yerine malzeme 2 eksenli hareket sistemi ile hareket ettirilmiştir. Yüksek foton enerjisinden dolayı lazer demeti malzeme yüzeyine mercek kullanılmadan gönderilmiştir. Yüzeydeki lazer demet alanı yaklaşık 5 mm^2 olup elips şeklindedir. Çalışmalardan malzeme üzerine gönderilen lazer akısı sabit hareket hızında (15 mm/s) 160 mJ/cm^2 ile 480 mJ/cm^2 aralığında değiştirilmiştir. Nd:YAG lazer ve yüzey işleme sistemine ait görüntü Şekil 4.8'de görülmektedir.



Şekil 4.8. Deneysel çalışmalarda kullanılan Nd:YAG lazer ve UV demete ait görüntüler

4.4. Temas Açısı Ölçümü

Yapışma bağlantı teknolojisi aynı veya farklı türden malzemeleri yapıştırmak için otomotiv ve havacılık gibi birçok endüstriyel alanda kullanılan bir teknolojidir. Yapışma bağlantılarının mukavemet ve dayanıklılığı yapıştırıcı ve yapıştırılan malzemenin doğası, yapıştırma kalınlığı, kirlilik ve çoğunlukla yetersiz yüzey koşulları gibi birçok faktöre bağlı olarak değişir. Yüzey önişleme yapışma bağlantılarında mukavemeti ve dayanıklılığı arttırmak için her türden malzemeye uygulanır. Yüzey önişleme, zayıf sınır tabakalarını kaldırır, yüzeyi temizler, yüzey enerjisini değiştirir ve yüzeyin mikro-topografik yapısını değiştirir. Bu değişimlerin net etkisi, arttırılmış arayüzey yapıştırma ve yapıştırıcı ile yapışkan arasındaki mekanik kilitleme olarak görülür.

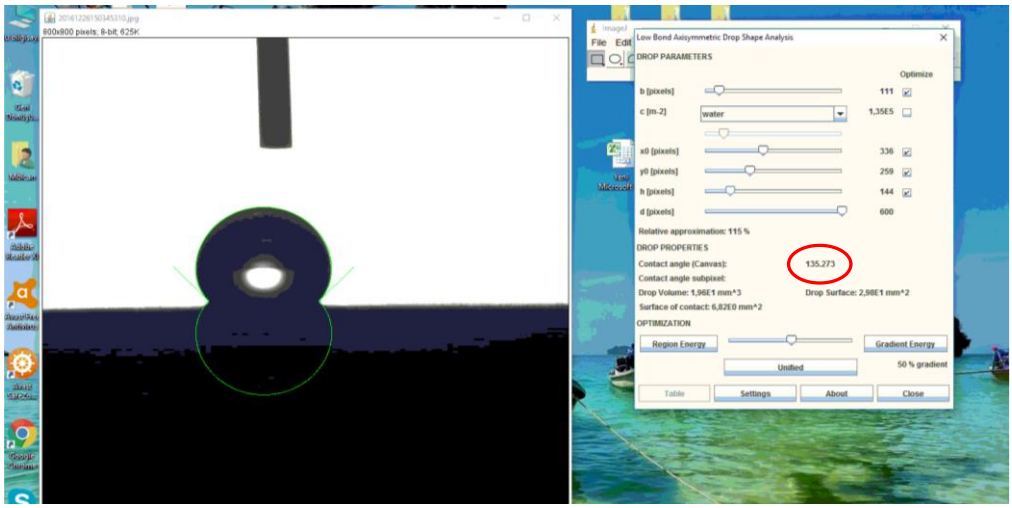
Düzgün bir yüzey işleme, moleküler etkileşimi ve fiziksel Adsorpsiyonu yükseltmek için yapıştırıcının malzeme üzerinde kolayca yayılmasını sağlamalıdır [37]. Yüzeyin ıslanabilirliği genellikle yüzey yapışmasının bir göstergesidir ve ıslanabilirlik ne kadar yüksek olursa yapışma o kadar iyi olur.

Tez süresince yüzeyleri işlenen malzemelerin temas açıları Kocaeli Üniversitesi Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi bünyesinde bulunan laboratuvarda oluşturulan temas açı cihazı kullanılarak belirlenmiştir. Şekil 4.9'da oluşturulan temas açı ölçüm düzeneğine ait bir görüntü yer almaktadır.



Şekil 4.9. Tez süresince işlenen yüzeylerin temas açısını belirlemek için oluşturulan düzenek

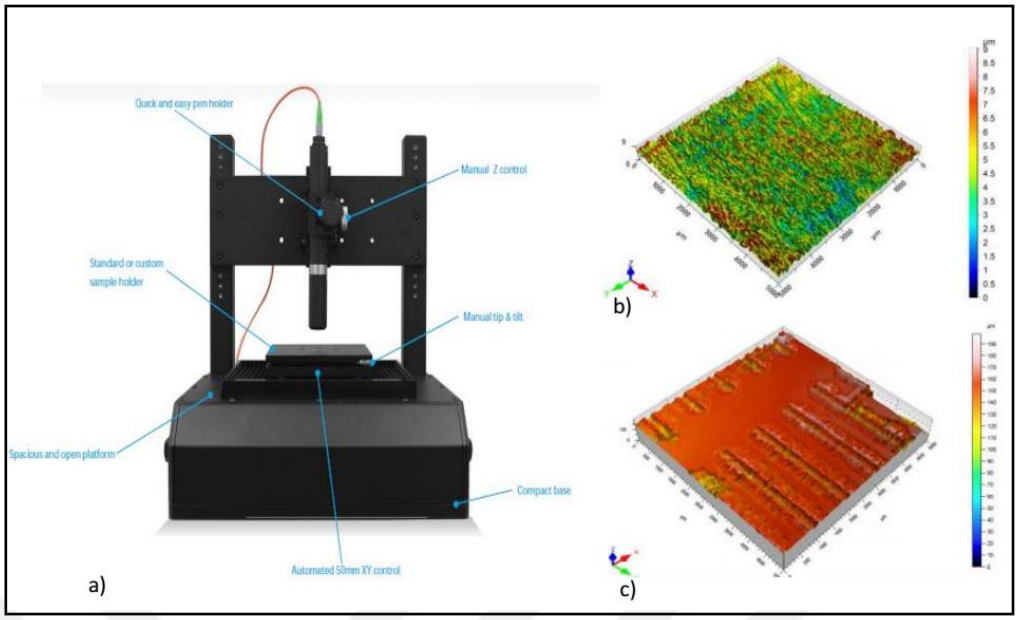
Kamera, mercek, enjektör ve beyaz ışık kaynağı kullanılarak oluşturulan düzenekten alınan görüntülerin ölçümleri Imagej programı uygulaması olan Drop analysis ile gerçekleştirilmiştir [74]. Ölçme sistemin doğruluğu ticari bir ürün ile karşılaştırarak teyit edilmiştir. Düzenekte kullanılan kamera > 0,2 saniye aralıklarla fotoğraf kareleri alabilen bir kameradır. Bu sayede tüm örneklerde yüzeye damlatılan damla kararlı hale geldikten sonra alınan fotoğraf kullanılarak ölçüm gerçekleştirilmiştir. Ölçümlere ait bir görüntü Şekil 4.10'da görülmektedir.



Şekil 4.10. Tez bünyesinde laboratuarda oluşturulan temas açısı ölçüm sistemi ile alınan bir görüntü ve ölçümü

4.5. Lazer 3D Optik Profilometre ile Analiz

220 mesh ile zımparalanmış ve farklı enerji akılarında yüzeyleri lazerle işlenmiş sürekli karbon fiber takviyeli kompozit malzemelerin yüzey pürüzlülüklerini tespit etmek amacı ile "Nanovea PS50" marka 3D optik profilometre cihazı kullanılmıştır (Şekil 4.11). Yüzey pürüzlülüğü ölçümleri sonucu kompozit malzeme yüzeylerinin 3D topografyaları Mountain Software programı kullanılarak oluşturulmuştur. Bu topografya görüntülerinde kompozit malzemelerin işlenen yüzeylerinin (25,4 mm x 25,4 mm) R_a – aritmetik ortalama yüzey pürüzlülüğü tespit edilmiştir. Bu sayede zımparalama ve lazerle işleme yöntemleri ile kompozit malzeme yüzeylerinde oluşturulan yüzey pürüzlülüğünün yapıştırma sonrası kompozit malzemelere uygulanacak olan çekme testlerinden elde edilecek tekil bindirme kayma dayanımı değerlerine etkisi belirlenebilmiştir.

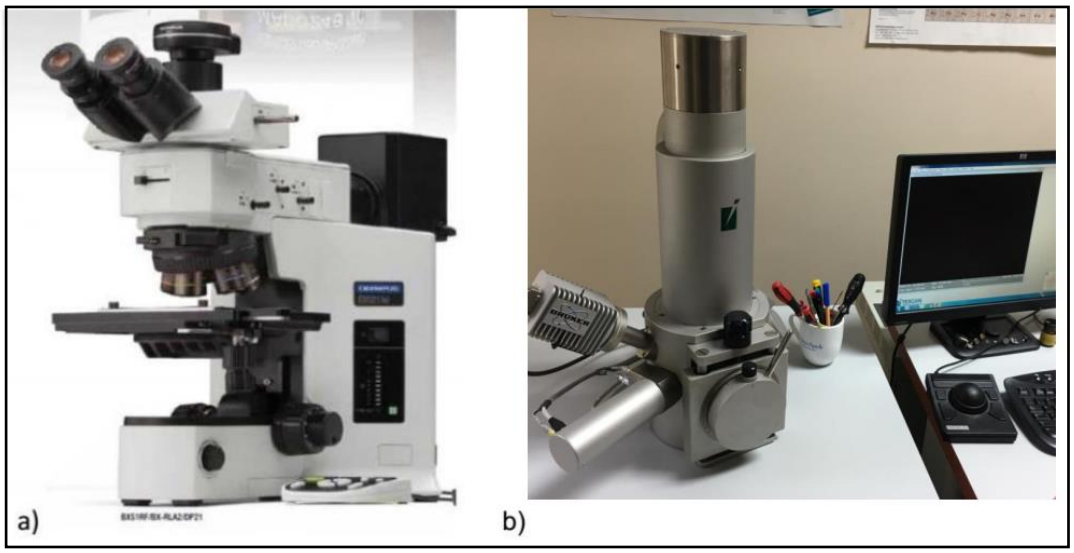


Şekil 4.11. Nanovea PS50 marka Lazer 3D optik profilometre cihazı

4.6. Yüzey Görüntüleme

Lazer veya zımpara ile işlenmiş yüzeyler optik mikroskop ve elektron mikroskobu yardımıyla incelenmiştir. Farklı büyütme oranlarında yüzey ve kesitlerden alınan görüntüler ile lazer malzeme etkileşimi, lazer aşındırma seviyeleri, ısıdan etkilenmiş bölgenin genişliği, fiberlerde oluşan deformasyon gibi soruların cevaplarına optik mikroskop görüntüleri ile ulaşılmaya çalışılmıştır.

Çalışmalarda kullanılan Olympus BX51 marka optik mikroskop ve Tescan Vega3 elektron mikroskobu ait görüntüler Şekil 4.12'de görülmektedir.



Şekil 4.12. a) Görüntülemede kullanılan Olympus BX51 marka optik mikroskop ve b) Tescan Vega3 elektron mikroskobu

4.7. Spektroskopik Yüzey Analizi

4.7.1 Fourier dönüşümlü kızılaltı spektroskopisi (FTIR-ATR)

Yüzey işleme, fiber-matris yapışmasında önemli bir kazanım üretse de karbon fiber yüzey yapısının arayüzey ve fiber matris yapışmasına etkisi hala tam olarak anlaşılamamıştır. Genelde, fiber-matris yapışması fiber takviyesi ve matris reçinesi arasındaki kimyasal ve mekanik etkileşim tarafından kontrol edilmektedir. Yapışmaya katkıda bulunan mekanizmalardan bazıları: fiber yüzeyi ve matris reçinesi arasındaki kimyasal reaksiyonları içerir, van der Waals güçleri, elektrostatik çekimler, asit-baz etkileşimleri ve fiber yüzeyindeki gözeneklere reçinenin difüzyonu ile sağlanan mekanik kilitlemedir [75]. Termoset kompozit sistemlerinde hem artan yüzey pürüzlülüğünün hemde oksidasyonun yapışmayı arttırdığı gösterilmiştir [76]. Yapışmanın her bir mekanizması karbon fiber yüzey kimyası ve yüzey morfolojisi ile kontrol edilmektedir.

Karbon fiber yüzeylerini tanımlamada Fourier Dönüşümlü Kızılaltı Spektroskopisi (FTIR) kullanılmaktadır. Deneysel çalışmalarda üretilen yüzeylerin analizinde zayıflatılmış toplam yansıma (ATR) FTIR analizi kullanılmakta ve 1 μm derinlikteki özellikleri belirlediği için yüzey hassasiyetinin daha az olduğu bilinmektedir. Güçlü karbon fiber soğurumu ve saçılması spektrum verilerini sınırlamaktadır [77]. Bu sorunlara rağmen, birkaç çalışmada, yüzeyin işlenmesinden kaynaklanan karbonil ve

hidroksil işlevselliğinde bir artış sergileyen FTIR-ATR spektrumları bildirilmiştir [78]. Karbon içerikli numuneleri tanımlamak için FTIR kullanılması güçlü bir taban soğurumu olduğu için problem oluşturmaktadır, bu nedenle karbon içerikli maddelerin FTIR-ATR spektrumları geniş bir arka plan soğurumu içermektedir. Karbon fiber takviyeli numunelerin moleküler yüzey analizleri Perkin Elmer Spectrum 100 FTIR-ATR cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.13). ATR yüzey analizleri için Germanyum kristali kullanılmış ve 700-4000 cm^{-1} spektral bölgesi analiz edilmiştir. Spektrum kayıt işlemi taban çıkarması, spektrum tarama yapılması, taban düzeltme ve spektrumda kalan gürültüyü azaltmak için yumuşatma işlemleri sırası ile gerçekleştirilmiştir.

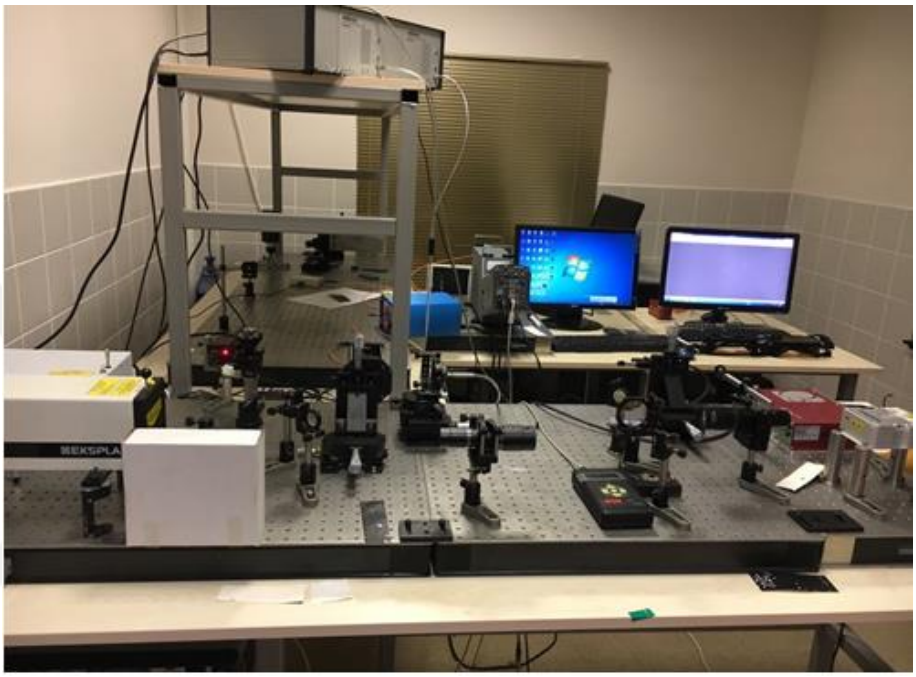


Şekil 4.13. FTIR-ATR spektrofotometresi

4.7.2 Lazer Oluşturulan Plazma Spektroskopisi (LIBS)

CFRP yüzeylerin element analizleri lazerle oluşturulan plazma spektroskopisi (Laser Induced Breakdown Spectroscopy-LIBS) tekniği ile de analiz edilmiştir. LIBS optik yayınım spektroskopi temeline dayanmaktadır. LIBS tekniği ile spektroskopik analiz, lazer ışını ve malzeme arasındaki etkileşimi içermektedir. LIBS tekniğinde nanosaniye (ns) atımlı bir lazer numune yüzeyine odaklanır. Numune yüzeyinde plazma üretilir. Lazerle oluşturulan plazmadan yayılan ışınlar malzemenin bileşiminde bulunan elementlere özgü dalgaboylarında ışımalar yayar. Plazmadan yayılan bu ışımaları doğru zamanda spektrometre ile kaydedip analiz ettiğimizde numune bileşiminde bulunan elementler belirlenebilmektedir. LIBS sisteminde 1064 nm dalgaboyunda ns atımlı Q-anahtarlamalı, 20 Hz frekansında, 4,4 ns atım uzunluğuna ve maksimum 450 mJ enerjiye sahip Nd:YAG (EKSPLA) lazer kullanılmıştır. CFRP numunelerinin

yüzeylerine tek lazer atımı uygulanarak, numunenin farklı katmanlardaki element profili değişimleri de incelenmiştir. Lazerin odaklanması ile yüzeyde oluşan plazmadan yayılan ışınlar ICCD detektöre sahip MECHELLE5000 spektrometresi kullanılarak 200-900 nm spektral bölgesindeki yayınım çizgileri kaydedilmiş ve CFRP yüzeyinin element analizleri gerçekleştirilmiştir. CFRP numunelerinin yüzey analizlerinde kullanılan LIBS sistemi deney düzeneği Şekil 4.14'te görülmektedir.



Şekil 4.14. Lazerle oluşturulan plazma spektroskopisi (LIBS sistemi)

4.7.3 X-ışını fotoelektron spektroskopisi (XPS)

Yüzeylerin element analizi geleneksel olarak kullanılan X-ışını fotoelektron spektroskopisi (XPS) tekniği ile ODTÜ Merkez laboratuarından hizmet alımı yolu ile analiz edilmiştir. Yüzey analiz tekniği olan XPS ile katı örnekleri uyaran bir x-ışın demeti kullanılarak fotoelektronların saçılmasına bağlı yüzeydeki element bilgisini sağlamaktadır, numunelerin analizinde kullanılan ULVAC-PHI 5000 Versa Probe XPS deney sistemi Şekil 4.15'te görülmektedir.

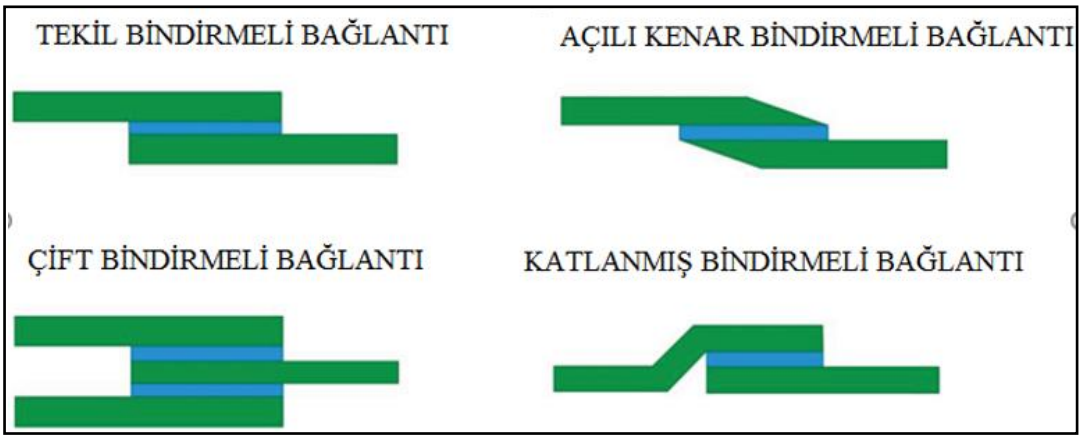


Şekil 4.15. Yüzeylerin element analizinde kullanılan XPS sistemi

4.8. Tekil Bindirme Testi

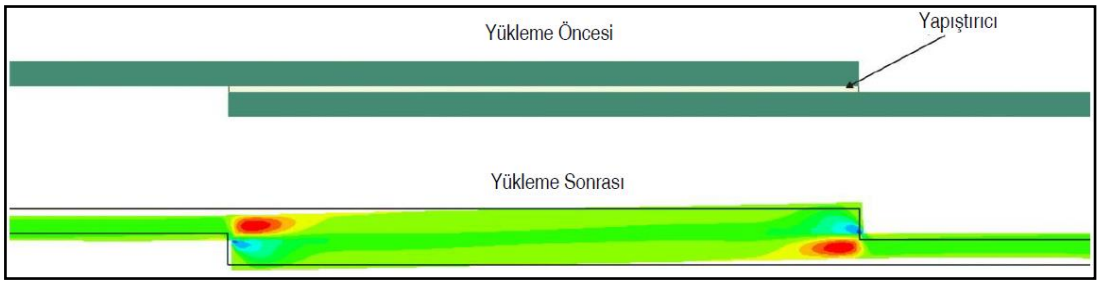
Endüstride, düzlemsel yüzeylerin montajında yapıştırıcıların kullanılması önemli avantajlar sağlamaktadır. Cıvata, perçin ve kaynak gibi geleneksel birleştirme yöntemlerinin yerine yapıştırıcıların tercih edilmesi, bağlantıda delik ve çentik olmaması nedeniyle gerilme yığılması önlenmekte, buna karşın mukavemet/ağırlık oranı önemli oranda artabilmektedir. Örneğin havacılık endüstrisinde hafif bağlantıların tercih edilmesi ile sağlanacak 0,453 kg'lık ağırlık azalması, yıllık 1360 kg yakıt tasarrufu anlamına gelmektedir [79].

Yapıştırılanlar (levhalar) arasında yükün emniyetli bir şekilde iletilmesi, bağlantı dayanımının arttırılması ile mümkündür. Bindirmeli bağlantı çeşitleri Şekil 4.16'da gösterilmektedir. Bu bağlantılar içerisinde tekil bindirmeli bağlantılar, en sık kullanılan bağlantı geometrisidir [80].

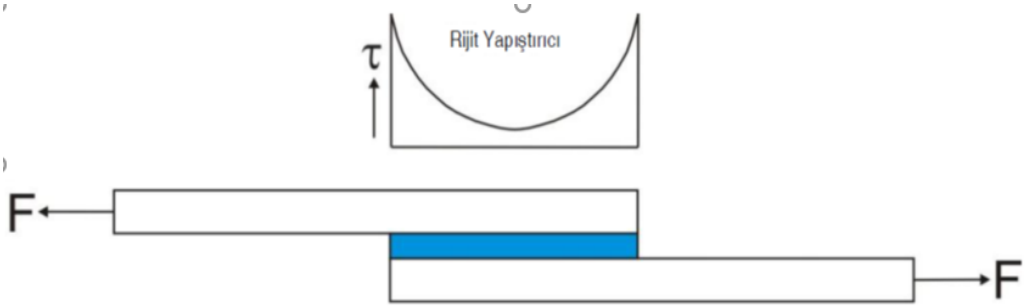


Şekil 4.16. Bindirme bağlantı çeşitleri [80]

Tekil bindirmeli bağlantılar imalat açısından en kolay geometriye sahiptir. Ancak, yükleme durumunda, bağlantıyı ayırma yönünde etkiye sahip olan kayma gerilmeleri meydana gelir. Bağlantıda, bindirme uzunluğunun kenarları ile ortasında kayma gerilmesi değerleri arasındaki fark önemli derecede artmaktadır. Yükleme öncesi ve sonrası, basit bindirmeli bağlantıda dış eksenli yükleme ile meydana gelen kayma gerilmesi dağılımına ait sonlu eleman analiz sonuçları Şekil 4.17'de gösterilmiştir. Yükleme sonrası, yapıştırma kenarlarında kayma gerilmeleri maksimum değerine ulaşmaktadır. Koyu mavi ve kırmızı ile gösterilen bölgeler sırasıyla, yapıştırıcı ve levhada oluşan maksimum gerilme değerleri Şekil 4.18'de göstermektedir [80].

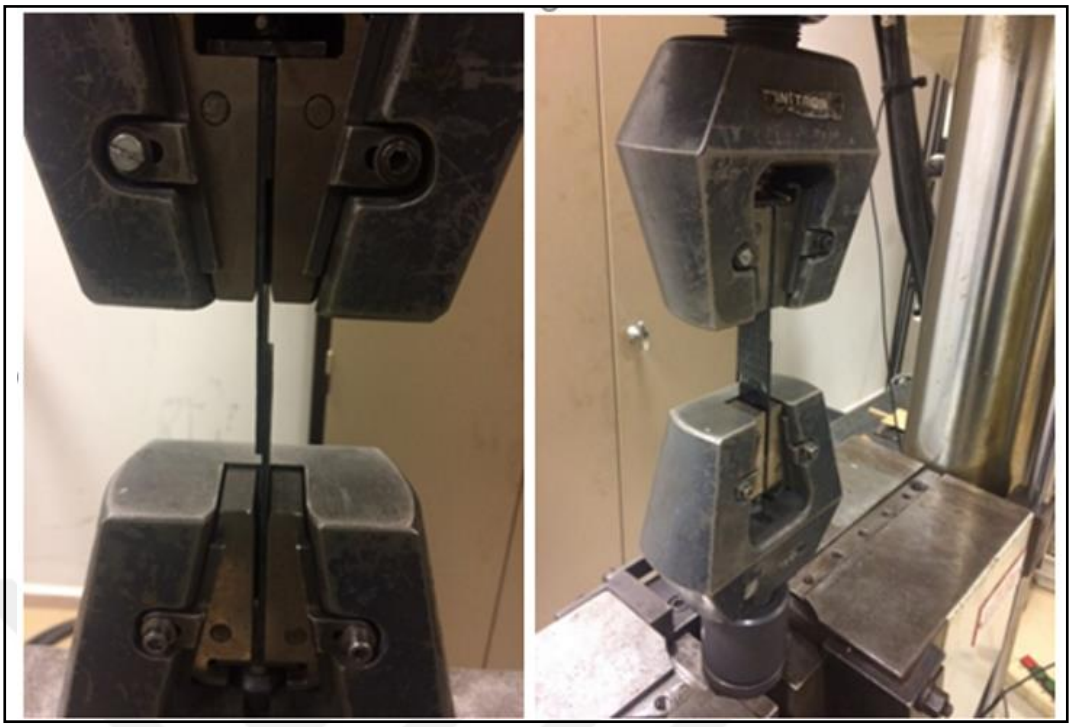


Şekil 4.17. Yükleme öncesi ve sonrası kayma gerilmesi dağılımının sonlu eleman analiz sonuçları [80]



Şekil 4.18. Tekil Bindirmeli Bağlantıda Kayma Gerilmesi Dağılımı [80]

Tez kapsamında işlenmemiş, zımparalanmış ve lazerle yüzeyi işlenmiş sürekli karbon fiber takviyeli kompozitlerin tekil bindirme kayma testleri ASTM D5868-01 standardında belirtilen usüllere göre yapılmıştır. Kompozit numuneler tedarikçi firmadan standartta belirtilen ölçülerde (101,6 mm x 25,4 mm x 1,8 mm) tedarik edilmiştir. Loctite 9396 kullanılarak yapılan yapıştırma işlemi sonrası işlenmemiş, zımparalanmış ve lazerle işlenmiş kompozit numunelerin tekil bindirme kayma dayanımlarının tespit edilebilmesi için Kocaeli Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Talaşlı İmalat Atölyesi'nde bulunan 60 ton yük kapasiteli DARTEC üniversal çekme cihazında testler gerçekleştirilmiştir. Çeneler arası mesafe 75 mm olup 13 mm/dk çekme hızında testler gerçekleştirilmiştir. Testler öncesinde tekil bindirme şeklinde yapıştırılmış kompozit numunelerin çekme çenelerine temas edecek kısımlarına ek kompozit plakalar yerleştirilerek çekme doğrultusu tam yapıştırma bölgesinden geçecek şekilde düzenlenmiştir. Ayrıca kompozit numunelere uygulanan yapıştırma işleminden sonra numunelerin yan yüzeylerinde ve bindirme köşelerinde biriken yapıştırıcılar numunelere zarar verilmeden ince bir zımpara yardımı ile temizlenmiştir. Çekme cihazı ve çenelere sabitlenmiş kompozit numune Şekil 4.19'da gösterilmiştir. Her bir deney grubu için beş tekrar yapılmış olup tez çalışmasında elde edilen ortalama kayma dayanımı değerleri verilmiştir. Elde edilen kayma dayanımı değerleri ile işlenmemiş, zımparalanmış ve lazerle işlenmiş kompozit numunelerin yapıştırma kalınlığı ilişkilendirilmiştir. Elde edilen kayma dayanımı değerleri sayesinde optimum yapıştırma kalınlığı tespit edilmiştir.



Şekil 4.19. Çekme cihazı ve çenelere sabitlenmiş kompozit numunesi

5. ADHEZİF YAPIŞTIRMA DAYANIMINI ARTTIRMAK İÇİN KARBON FİBER KATKILI KOMPOZİT MALZEMELERİN YÜZEYLERİNİN LAZER İLE İŞLENMESİ

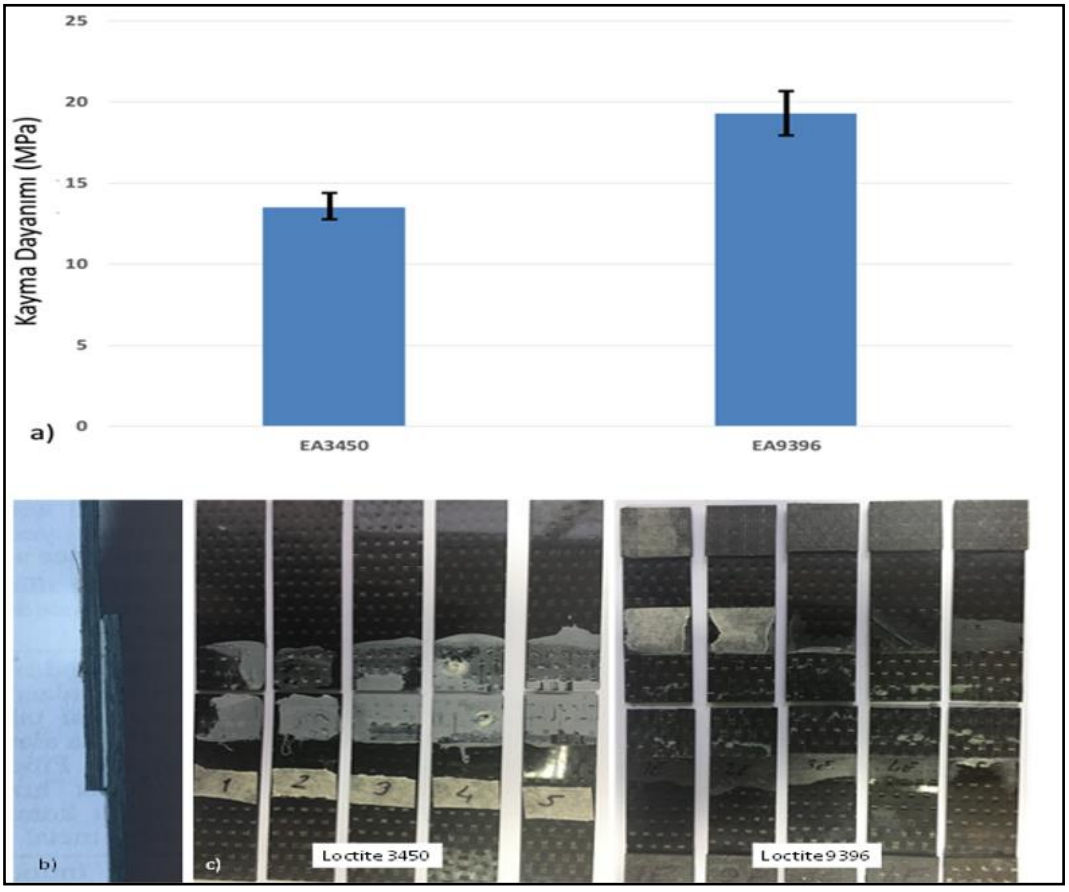
Yapıştırma ile birleştirme işleminde yüzeyin modifikasyonu önemli bir etkendir. CFRP kompozit malzemelerde de gerçekleştirilen bu işlemin amaçlarını aşağıdaki gibi özetleyebiliriz [45].

- Yüzeyde üretimden kalma yağ gibi kirliliğin temizlenmesi,
- Islanabilirliği arttırmak için yüzey enerjisinin arttırılması
- Mekanik kilitleme veya bağlanabilir yüzey alanını arttırmak için yüzey pürüzlülüğünün arttırılması.

Gerçekleştirilen bu tez çalışmasında havacılıkta kullanılan kompozit/kompozit bağlantılarının adhezif birleştirme çekme dayanımını arttırmak için kompozit malzemelerin yüzeylerinde üretim kaynaklı var olan kirliliğin azaltılması ve mekanik kilitleme sağlayabilecek yapıların oluşturulması hedeflenmiştir. Yapıştırma ile birleştirme mekanik birleştirme yöntemine göre avantajları olmakla beraber süreç uzundur. Bu süreçte yapıştırma ile birleştirme işleminde kompozit malzemelerin mukavemetini etkileyecek birçok parametre mevcuttur. Bu parametrelerden en önemli olanaları şu şekildedir; yapıştırıcının tipi, yapıştırıcının kalınlığı ve kürleme prosesidir. Tez çalışmasında deneysel çalışmalara yapıştırıcının belirlenmesi, yapıştırıcı kalınlığının kontrolü ve kürleme prosesinin belirlenmesi konuları ile başlanmıştır. İkinci adımda CO_2 lazerin ve Nd:YAG lazer III. Harmoniği 355 nm ile CFRP malzemelerin farklı lazer parametrelerinde yüzeylerinin işlenmesi ve parametre belirleme çalışmaları gerçekleştirilmiştir. İşlenmiş numunelerin yüzey analizleri temas açısının belirlenmesi, yüzey pürüzlülüğünün belirlenmesi, mikroskop görüntüleri ve spektroskopik analizler ile yapılmış olup, yapıştırma bağlantısının dayanımı da tekil bindirmeli kayma testleri ile gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen yüzey analizleriyle, tekil bindirme test sonuçları karşılaştırılıp mukavameti etkileyen parametreler hakkında bilgi sağlanmıştır.

5.1. Yapıştırıcının Belirlenmesi

Çalışmanın ilk aşamasında CFRP kompozit malzemelerin yapıştırılması işleminde iki farklı yapıştırıcı ile ön denemeler gerçekleştirilmiştir. Yapıştırıcıların belirlenmesi Loctite Türkiye teknik ofisi ve THY kompozit bölümü ile yapılan diyaloglar ile gerçekleşmiştir. Yapıştırma işleminde Henkel Loctite 3450 ve Loctite 9396 yapıştırıcılar kullanılmıştır. Yapıştırılmış tekil bindirmeli bağlantılara ait mekanik sonuçlar ve hasarlı yüzey görüntüleri Şekil 5.1'deki gibidir.

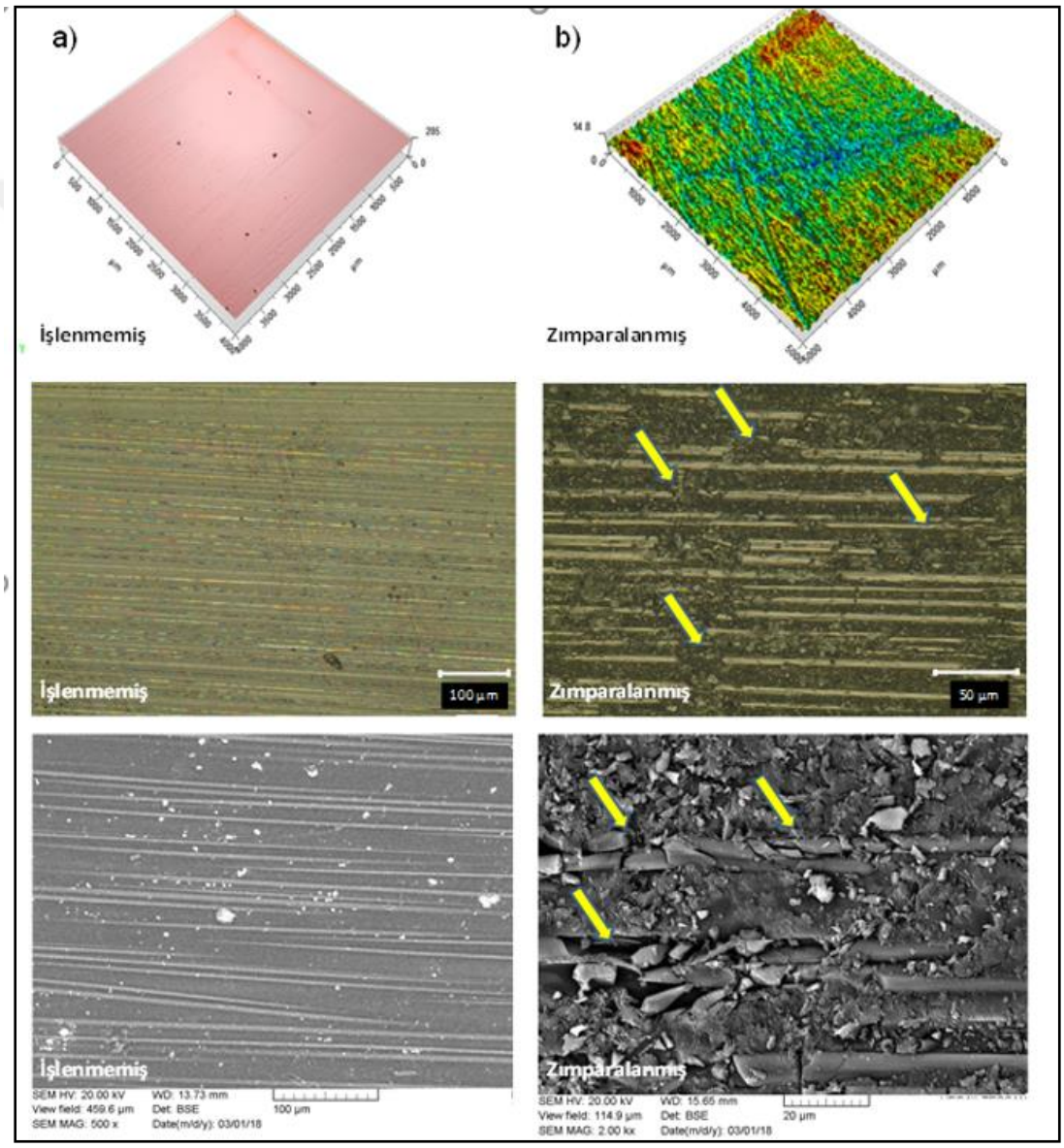


Şekil 5.1. Henkel Loctite 3450 ve EA 9396 yapıştırıcıları kullanılarak üretilen örneklerin a) yapıştırma bağlatısı dayanımı sonuçları b) Henkel Loctite 3450 ile yapıştırılan örneğe ait kesit görüntüsü, c) mekanik test sonrası örneklerin görüntüleri

Şekil 5.1-a'dan görüldüğü gibi yüzeyleri işlenmemiş ilk numunelerde EA 9396 ile daha yüksek dayanımlar elde edilmiştir. Buna ek olarak EA 9396'nın oda koşullarında kürleme zamanı Loctite 3450'ye göre daha uzun olduğundan yapıştırma işlemi süresince yapıştırıcının viskozitesi değişmeden ve tamamen yüzeye dağıtılarak işlem gerçekleştirilebilmiştir.

5.2. Referans Örneklerinin Belirlenmesi

Kompozit malzemelerin yapıştırma ile birleştirme işleminde yüzey işleme tekniklerinden en yaygın kullanılan yöntem zımparalamadır. Lazer ile gerçekleştirilen çalışmalara referans olması için kompozit malzemeler 220 kum zımpara ile pürüzlendirilerek hazırlanmıştır. Elde edilen yüzeylere ait profilometre ve optik mikroskop görüntüleri Şekil 5.2 'deki gibidir.

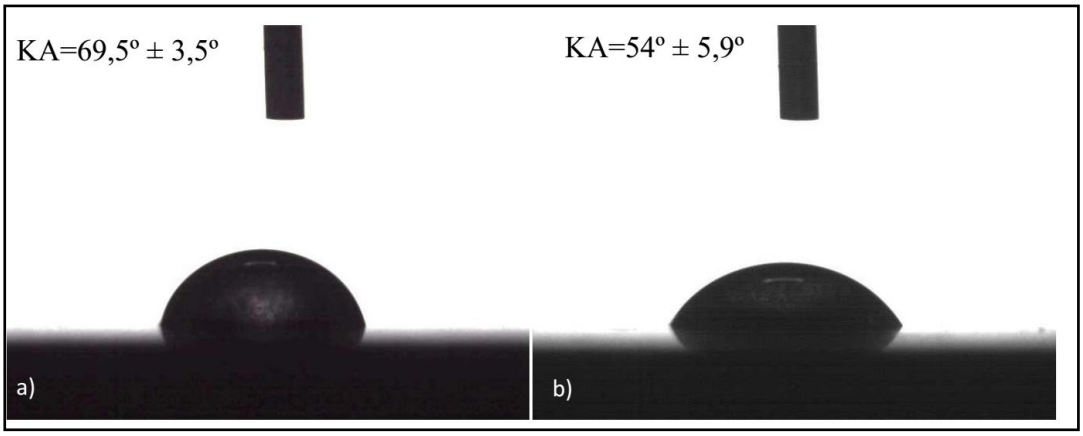


Şekil 5.2. a) İşlenmemiş b) Zımparalanmış yüzeylere ait profilometre, optik mikroskop ve elektron mikroskobu görüntüleri

İşlenmemiş yüzeylerin 0,58 µm olan yüzey pürüzlülüğü zımparalama ile ortalama 1,1 µm olarak ölçülmüştür. Benzer olarak Tomohiro Yokozeki ve arkadaşları yaptıkları

çalışmada 240 kum zımpara ile işledikleri yüzeylerde 1,23 μm yüzey pürüzlülüğü elde ettiklerini açıklamışlardır [53]. Zımpara ile gerçekleştirilen işlemde üst katmanda yer alan fiberlerin uğradığı mekanik hasarlar ve malzemede yarattığı düzensizlikler mikroskop görüntülerinde görülmektedir (Şekil 5.2-b). Ayrıca zımparanın neden olduğu mekanik hasarlarla parçalanan fiberlerin epoksi ile olan bağlantısı zayıflamakta, ancak parçalar yüzeyden ayrılmadığından veya temizleme sırasında bu parçaların yüzeyden koparılması zor olduğundan yüzeyle yapıştırıcı arasında kirlilik olarak yer almakta ve bu kirliliğin mukavemetin düşmesine neden olduğu düşünülmektedir (Şekil 5.2-b).

Yüzey analizinde kullanılan yöntemlerden biride temas açısının belirlenmesidir. Bir yüzeyin ıslanabilirliği genellikle yüzey yapışmasının bir etkisi olarak tanımlanmaktadır. Islanabilirlik ne kadar yüksek olursa yapışma o kadar iyi olur [58]. Yapılan ölçümlerde işlenmemiş yüzeylerde ortalama 54º ± 5,9º olarak belirlenen temas açısı, zımparalanmış yüzeylerde 69,5º ± 3,5º olarak belirlenmiştir (Şekil 5.3-a). Yüzeylere ait temas açısı yüzeylerin pürüzlülüğünde ve kimyasal yapısında meydana getirilen değişiklikler ile değişim göstermektedir. Zımpara ile yapılan işlemede ise değişime neden olan etki sadece yüzey pürüzlülüğündeki değişimdir. XPS sonuçlarında işlenmemiş yüzeylerde % 1,7 olarak belirlenen silisyum oranı zımparalanmış örneklerde de %1,7 olarak ölçülmüştür.



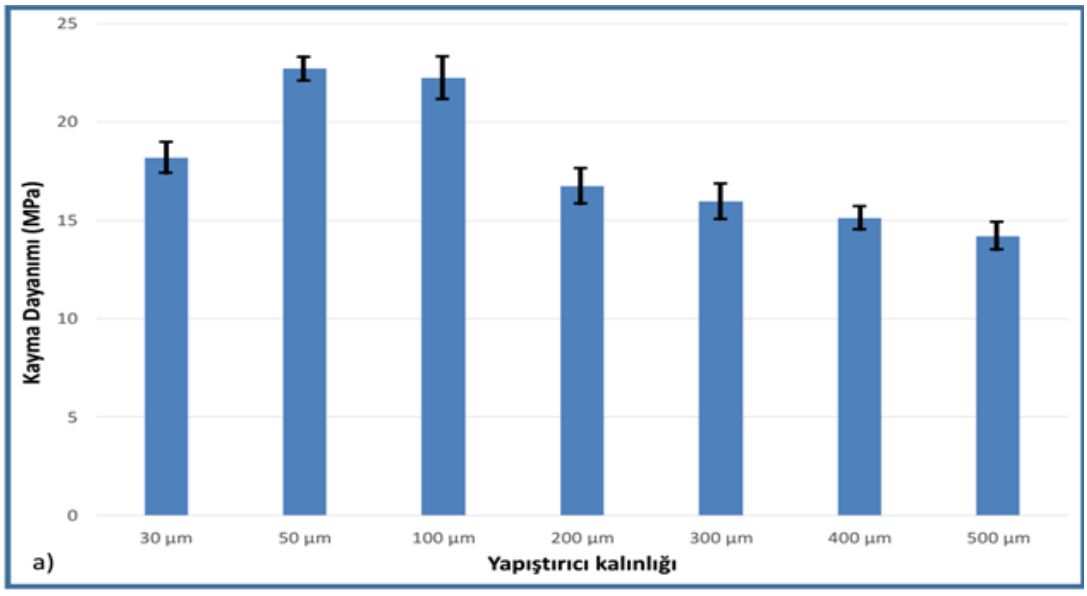
Şekil 5.3. a) Zımpara ile yüzeyleri aşındırılmış b) işlenmemiş örneklere ait temas açısı ölçüm görüntüsü

Yapısal parçaların yapıştırma ile birleştirmesinde yapının geometrisi servis performansının büyük ölçüde etkileyen bir parametrelerdir. Sonucu etkileyen en önemli geometrik faktörde ise yapıştırma kalınlığıdır (bondline thickness). Konu

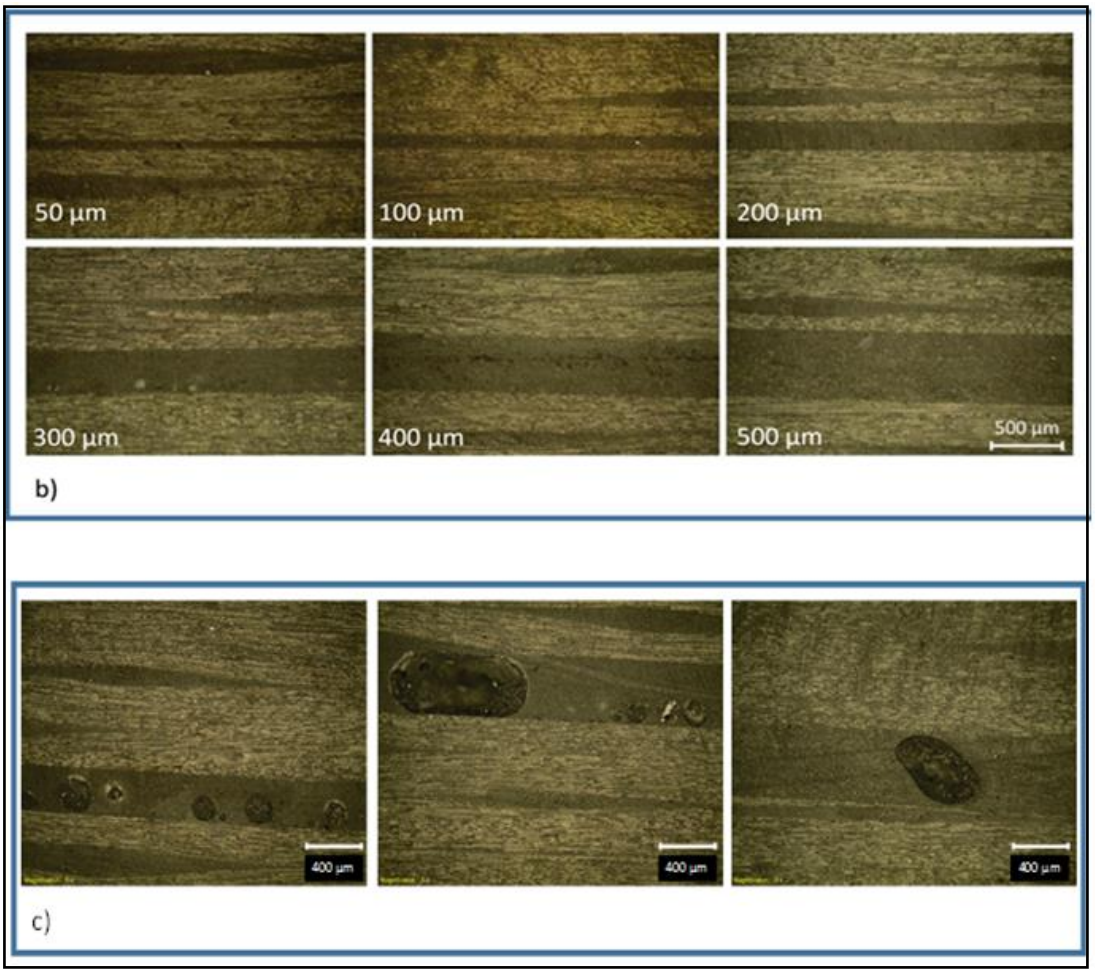
hakkında litertürde teorik Bigwood ve Crocombe, Adams ve Mallick ve deneysel Da Silva olmak üzere birçok çalışma gerçekleştirilmiştir [38, 39, 81, 82]. Ancak tekil bindirme bağlantılarında hala yapıştırma kalınlığının etkisi tam olarak anlaşılamamıştır [40]. Klasik elastik analizler, dayanımın yapışkanın kalınlığı ile arttığını öngörürken, deneysel çalışmalarda tam tersi sonuçlar elde edilmektedir. Bu uyumsuzluğun sebebini ortaya çıkarmak için birçok farklı teori ileri sürülmüştür. Adams ve Peppiatt'nin teorisine göre daha kalın yapışma bağlantısı, boşluklar ve mikro çatlaklar gibi daha fazla kusur içermektedir [41]. Gleich göre ise kalın yapışkan bağlantılarında yapışma ara yüzeylerindeki gerilmeler daha yüksektir [43].

Kullanılan yapıştırıcının özeliklerine, yapıştırılan malzemenin sertliğine, bağlantı geometrisi ve yüke bağlı olarak yapıştırma kalınlığı farklılık göstermektedir [43]. Yapıştırma ile birleştirme geometrilerinde daha incesi pratik olmadığı düşünüldüğünden önerilen kalınlık 0,2mm ile birkaç milimetre aralığındadır.

Literatürden elde edilen yukarıdaki bilgiler ışığında tez çalışmasında kullanılan EA 9396 için de optimum kalınlığın belirlenmesi gerekliliği ortaya çıkmıştır. Bu amaca yönelik zımparalanarak hazırlanmış örneklerin yapıştırma ile birleştirme işlemi farklı yapıştırıcı kalınlıklarında gerçekleştirilmiştir. 30µm ile 500µm aralığında değişen yapıştırıcı kalınlıklarıyla hazırlanan kupon numunelere ait mekanik test sonuçları Şekil 5.4'te verilmektedir.



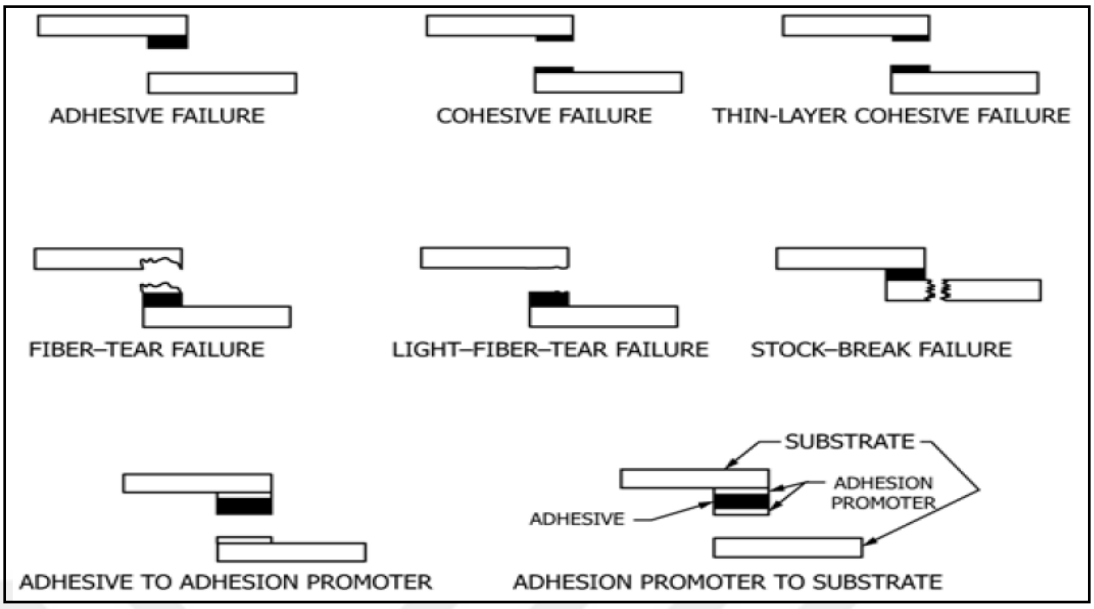
Şekil 5.4. Yüzeyleri zımpara ile işlenmiş örneklerin yapıştırıcı kalınlığına göre mekanik dayanım sonuçları



Şekil 5.5. b) Kesit görüntüleri, c) 300µm, 400µm ve 500µm yapıştırıcı kalınlığındaki örneklerde oluşan gözenek kusurları

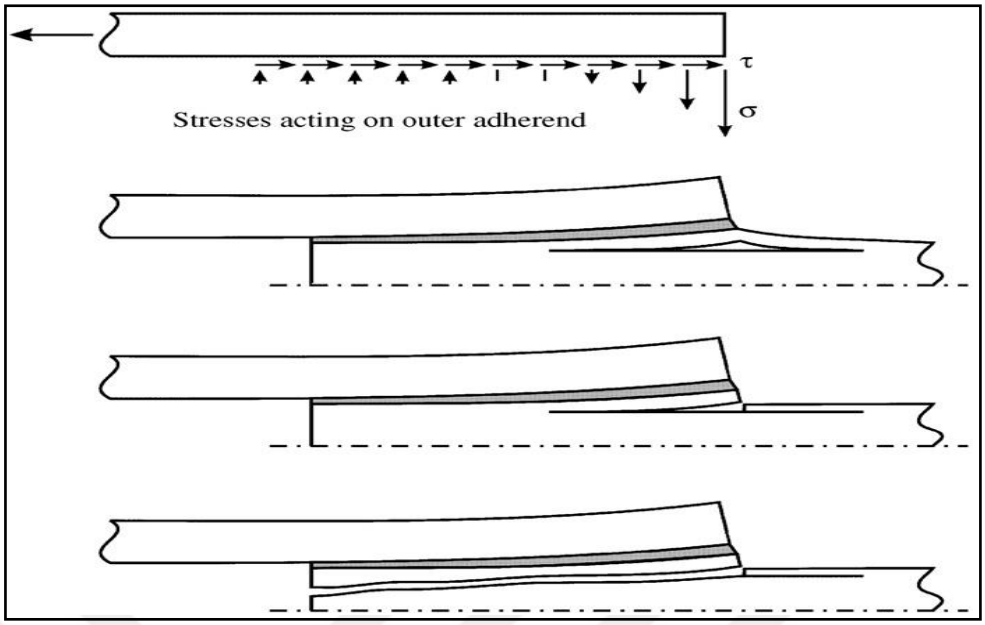
Şekil 5.4'te verilen grafikten de görüleceği üzere en yüksek mukavemete yapıştırıcı kalınlığı 50 µm olarak hazırlanan örneklerde ulaşılmış olup 22,7 MPa ±1 MPa'dır. Neredeyse tüm örneklerde görülen gözenek kusurları Adams ve Peppiatt'nin da teorilerinde belirttiği üzere nispeten kalın yapıştırıcı kalınlığına sahip örneklerde Şekil 5.5-c) daha fazla hacim kaplamaktadır [41]. Dolayısıyla yapışma yüzey alanında azalma sonucu gerilme daha düşük çıkmıştır.

Zımparalanmış CFRP numunelerinin farklı Loctite 9396 yapıştırıcı kalınlıklarında yapıştırılıp tekil bindirme test sonuçlarında yüzeylerinin hasar analizleri ASTM D5573-99 standardına göre yapılmıştır ASTM D5573 [83]. Belirtilen standarda göre fiber takviyeli polimer kompozitlerde ilgili test sonrası gözlemlenecek hasar mekanizmaları Şekil 5.6'da gösterilmiştir.



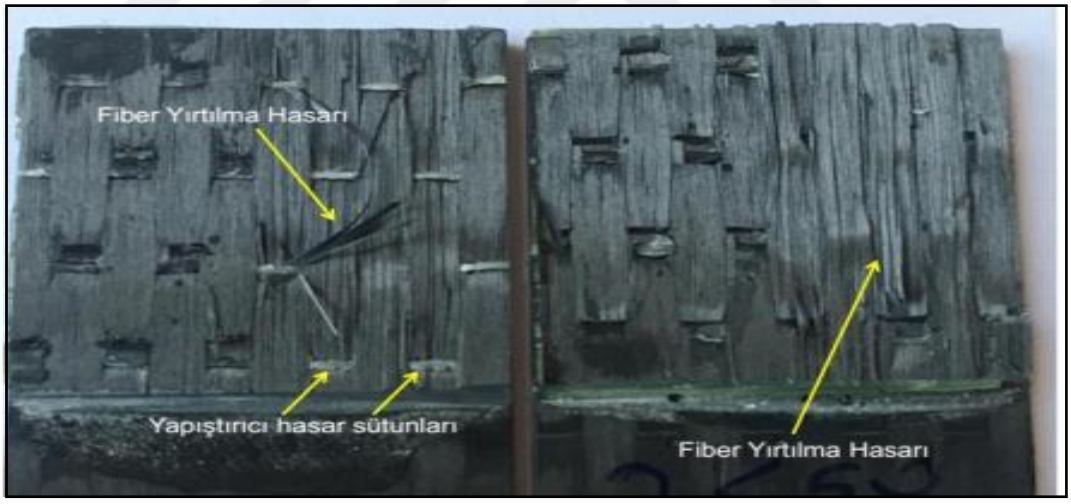
Şekil 5.6. Fiber takviyeli polimer kompozitlerde yapıştırmalı bağlantılarındaki hasar mekanizmaları ASTM D5573 [83]

Yapıştırma bağlantılarında genel olarak 3 farklı hasar mekanizması öne çıkmaktadır: kohezif, adhezif ve yapıştırılan malzemenin hasarlanması. Yapıştırma bağlantılarında asıl istenen hasar mekanizması koheziv hasarı olup her zaman bunu oluşturacak üretim metodlarının kontrolünü sağlamak mümkün değildir. Adhezif hasar mekanizması ise yapıştırıcı ile yapıştırılan malzemeler arasında gözlenen bir hasar türüdür. Yapıştırılan malzemede oluşan hasar ise genellikle yapıştırıcı ve ara yüzey dayanımına kıyasla daha düşük dayanıma sahip olmasından dolayı oluşur [84]. Tekil bindirme testleri esnasında uygulanan eksenel yük yapıştırıcıda kayma ve soyulma gerilmelerine sebep olmaktadır ki genelde de bu gerilmeler yapıştırma bağlantısının uç noktalarında moment yaratmaktadır. Özellikle sürekli fiber takviyeli kompozitlerde zayıf enine doğrultudaki çekme dayanımı soyulma gerilmesini artırarak çatlağın malzemenin bağlantı yapılan uç kısmından başlayarak ilerlemesini sağlamaktadır. Bu da hafif ve şiddetli fiber yırtılma hasarlarına sebep olmaktadır. Yapıştırmalı bağlantılarda oluşan bu soyulma kuvveti nedeniyle kompozit malzeme adhezif hasara uğramadan önce enine doğrultuda çekme hasasrına uğrayacaktır. Şekil 5.7'de görüldüğü gibi kompozit malzeme içinde soyulma gerilmeleri kaynaklı bölgesel kalkmalar olacaktır [85].

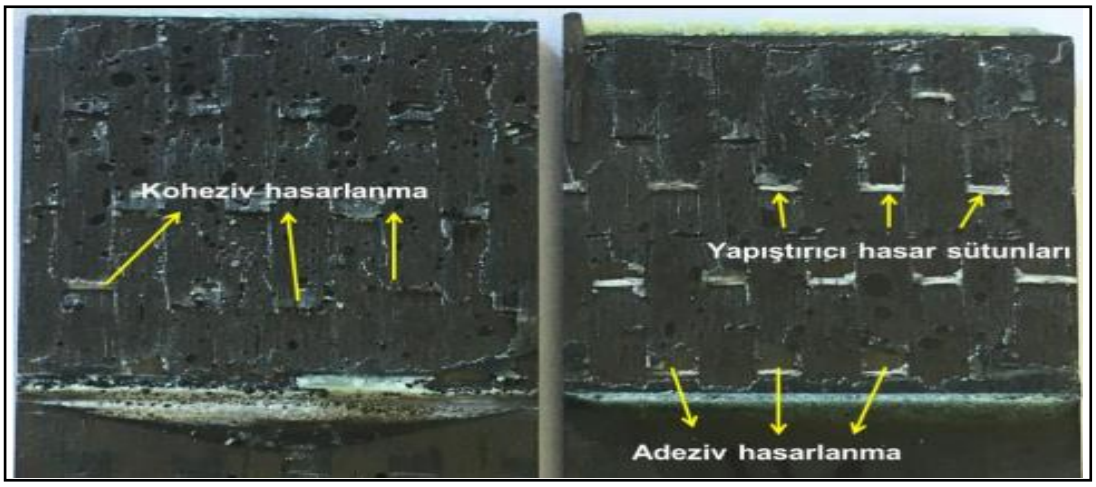


Şekil 5.7. Kompozit malzemelerde soyulma hasarı [85]

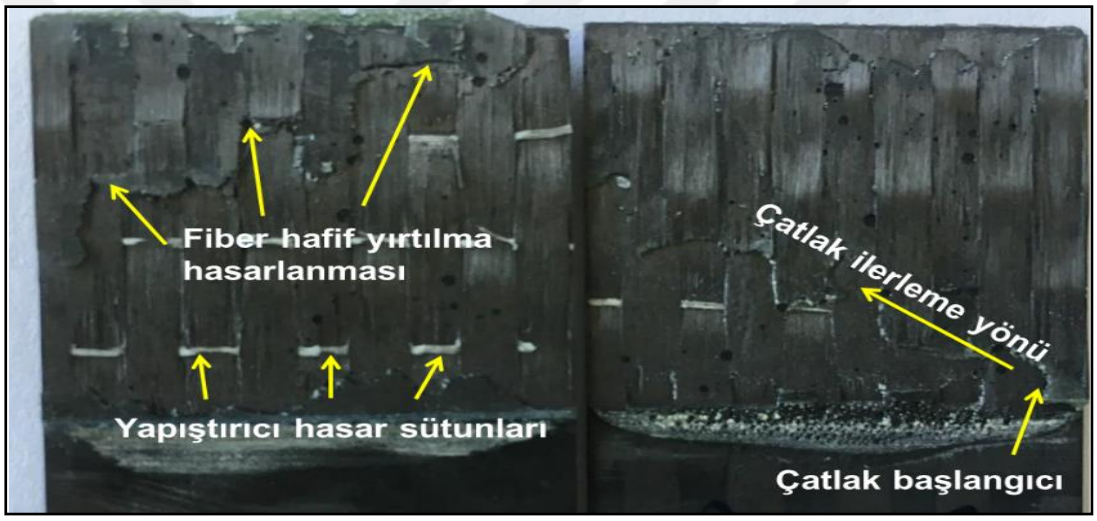
Tez kapsamında tekil bindirme testleri sonrasında farklı yapıştırma kalınlığına sahip CFRP kompozit numunelerin hasarlı bölgeleri Şekil 5.8 - Şekil 5.14'te verilmiştir.



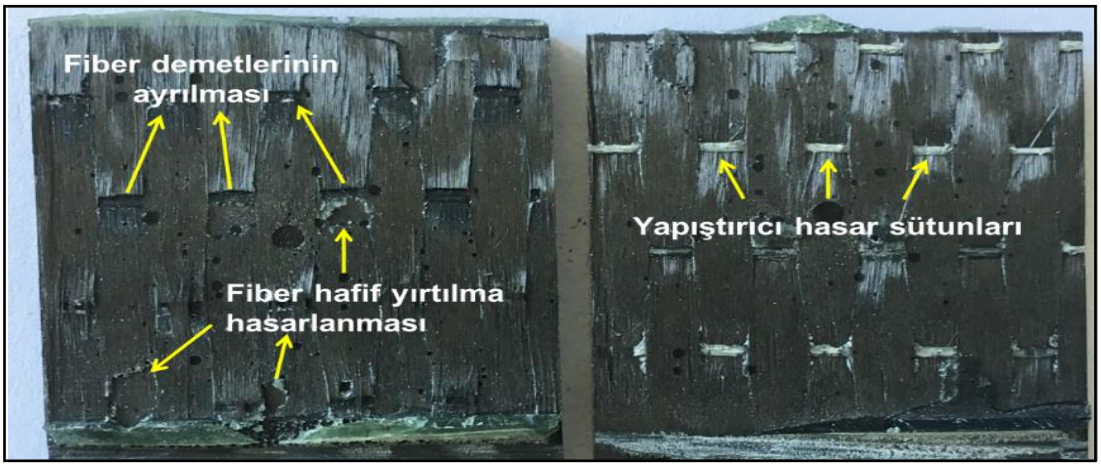
Şekil 5.8. Zımparalanmış CFRP numunelerinin 30 µm yapıştırıcı kalınlığı için hasar yüzeyleri



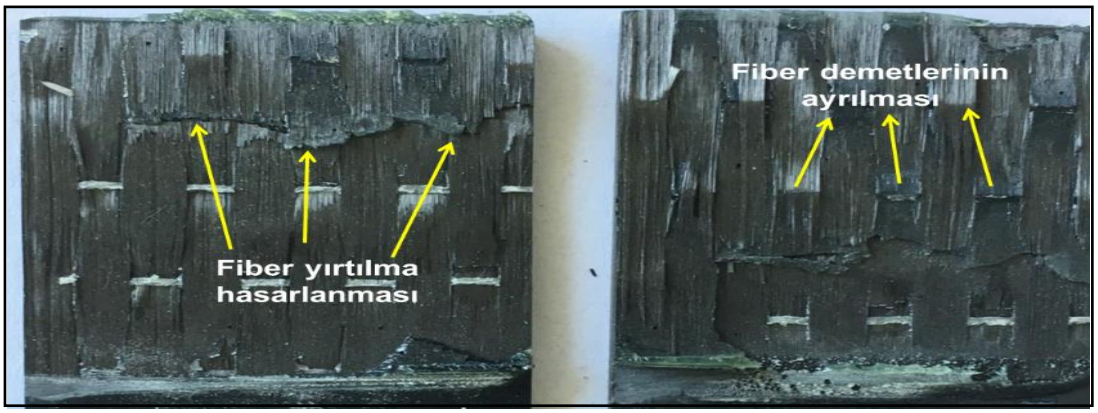
Şekil 5.9. Zımparalanmış CFRP numunelerinin 50 µm yapıştırıcı kalınlığı için hasar yüzeyleri.



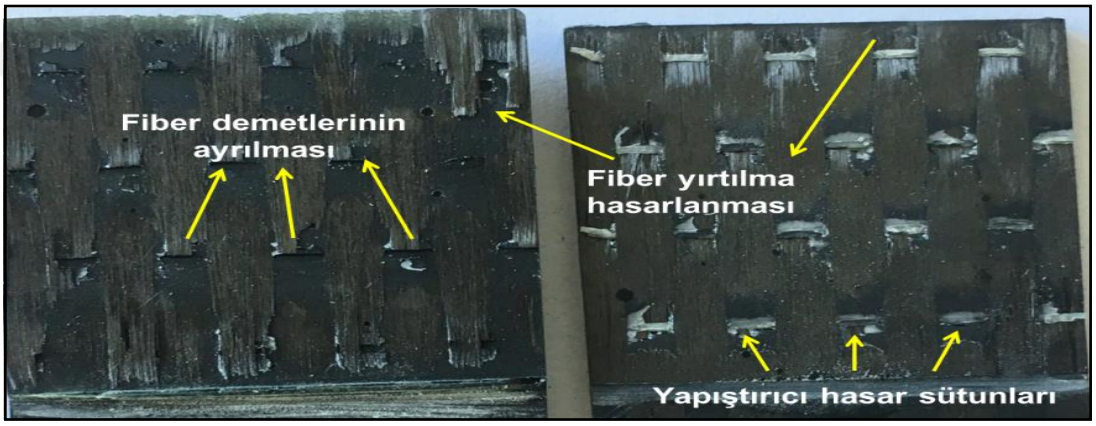
Şekil 5.10. Zımparalanmış CFRP numunelerinin 100 µm yapıştırıcı kalınlığı için hasar yüzeyleri



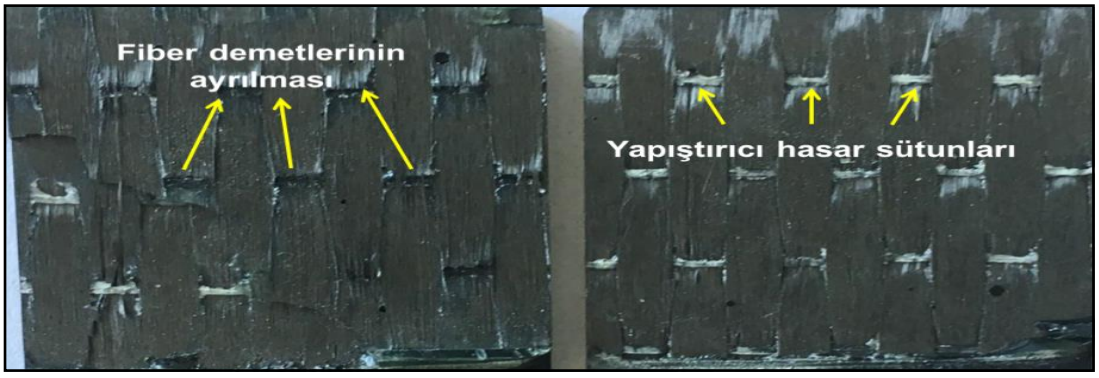
Şekil 5.11. Zımparalanmış CFRP numunelerinin 200 µm yapıştırıcı kalınlığı için hasar yüzeyleri



Şekil 5.12. Zımparalanmış CFRP numunelerinin 300 µm yapıştırıcı kalınlığı için hasar yüzeyleri



Şekil 5.13. Zımparalanmış CFRP numunelerinin 400 µm yapıştırıcı kalınlığı için hasar yüzeyleri

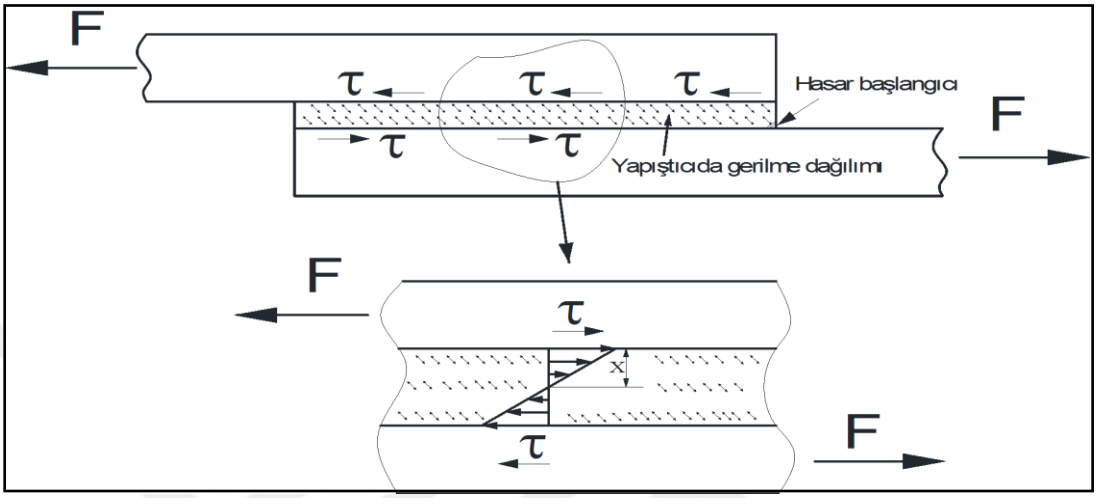


Şekil 5.14. Zımparalanmış CFRP numunelerinin 500 µm yapıştırıcı kalınlığı için hasar yüzeyleri

Farklı yapıştırıcı kalınlığına sahip zımparalanmış CFRP numunelerinin hasar yüzeyleri Şekil 5.8-Şekil 5.14 arasındaki şekillerde incelendiğinde 30 µm yapıştırıcı kalınlığında hasar mekanizmasının yıkıcı bir şekilde fiber yırtılma hasarı şeklinde oluştuğu gözlenmiştir (Şekil 5.8). Bununla birlikte 50µm yapıştırıcı kalınlığına sahip CFRP

numunelerinin istenilen kohezif hasarlanma türüne sahip olduğu tespit edilmiştir. (Şekil 5.9). Ancak artan yapıştırıcı kalınlığı ile hasar türünün fiber yırtılma hasarı ve fiber demetlerinin ayrılması şeklinde oluştuğu tespit edilmiştir (Şekil 5.10-Şekil 5.14). Bunun nedeninin numune yüzeylerindeki yapıştırıcı sütunlarından kaynaklandığı düşünülmektedir. Sürekli fiber takviyeli kompozit numunelerde fiber demetlerinin bir arada durmasını sağlayan dikişler bulunmaktadır. Kompozit numunelerin yapışmasında istenen yüzey pürüzlülüğüne ulaşmak için yapılan zımparalama işlemi ile numunelerin en üstteki epoksi matris katmanının bir kısmı kaldırılmıştır. Fakat dikiş bölgesinde dikişten kaynaklı çukur bölgelerde normal yüzeylere nazaran daha fazla epoksi miktarı bulunmaktadır. Loctite EA 9396 yapıştırıcının zımparalanmış kompozit yüzeylere uygulanması sonucu oluşturulan bağlantıların mekanik testler sonrası şekillerde gösterildiği gibi bu dikiş bölgelerinde yapıştırıcının sütun şeklinde hasarlandığı saptanmıştır. Dikiş bölgesinde oluşan yapıştırıcı sütunlarında fiber takviye elemanı bulunmamaktadır. Tekil bindirme testleri esnasında izafi hareket nedeniyle yapıştırma kalınlığı boyunca gerilme dağılımı ortaya çıkmaktadır. Çekme kuvveti nedeni ile yapıştırıcıda ve yapıştırılan numunelerin yüzeyinde oluşan kayma gerilmelerinin dağılımı ve hasar başlangıç bölgeleri Şekil 5.15'te gösterilmiştir. Yapıştırıcıda oluşan kayma gerilme dağılımının yapıştırıcının tam orta ekseninde sıfır, eksenden uzaklaştıkça artarak her iki yapışma yüzeyinde maksimuma ulaştığı görülmektedir. Yapıştırıcı kalınlığının artması ile Şekil 5.14'te gösterilen "X" mesafesinin artmasına bağlı olarak bu kayma gerilmesinin daha da arttığı ve özellikle yapıştırıcı sütunlarının olduğu bölgelerde yoğunlaşarak yapıştırma bağlantısının hasarlanmasına sebep olduğu düşünülmektedir. Yapıştırıcı kalınlığının düşük olduğu durumda (Şekil 5.8, ve Şekil 5.9), kayma gerilmesinin ulaşabildiği değer için adhezif hasar oluşamadan koheziv hasarlanmanın ortaya çıktığı tespit edilmiştir. Artan yapıştırıcı kalınlığı ile birlikte kayma gerilmesi dağılımının yapıştırıcı kesit boyunca değişmesi nedeni ile soyulma gerilmesinin uç kısımlarda hasar başlatarak fiber demetlerinin ayrılması ve fiber yırtılma hasarlarının numunelerde gözlenmesine neden olduğu belirlenmiştir (Şekil 5.10-Şekil 5.14). Özellikle artan yapıştırıcı kalınlığına bağlı olarak yapıştırıcı bölgesinin uç kısımlarında (Şekil 5.10) çatlağın başladığı ve yaklaşık 45 ^{o} açıyla ilerlediği gözlenmiştir. Yapıştırıcı kalınlığının fazla olduğu numunelerde (Şekil 5.13 ve Şekil 5.14) gözle görülen yapıştırıcı sütun miktarının arttığı yine tespit edilen başka bir durumdur. Artan yapıştırıcı kalınlığı oluşan

yapıştırıcı sütun kalınlığını arttırmış bu da numunenin daha düşük dayanım değerlerine sahip olmasına sebep olmuştur. Sonuç olarak 50µm yapıştırıcı kalınlığına sahip zımparalanmış CFRP numunelerin en iyi dayanım değerlerine sahip olduğu elde edilen hasar mekanizmaları ile de açıklanmıştır.



Şekil 5.15. Çekme kuvveti nedeni ile yapıştırıcıda ve yapıştırılan numune yüzeylerinde oluşan gerilmeler

Zımparalanmış örnekler ile yapılan çalışmalar sonrasında lazer ile yapılacak çalışmalarda yapıştırıcı kalınlığının 50µm olmasına karar verilmiştir.

5.3. CO_2 Lazer ile Yüzey İşleme Çalışmaları

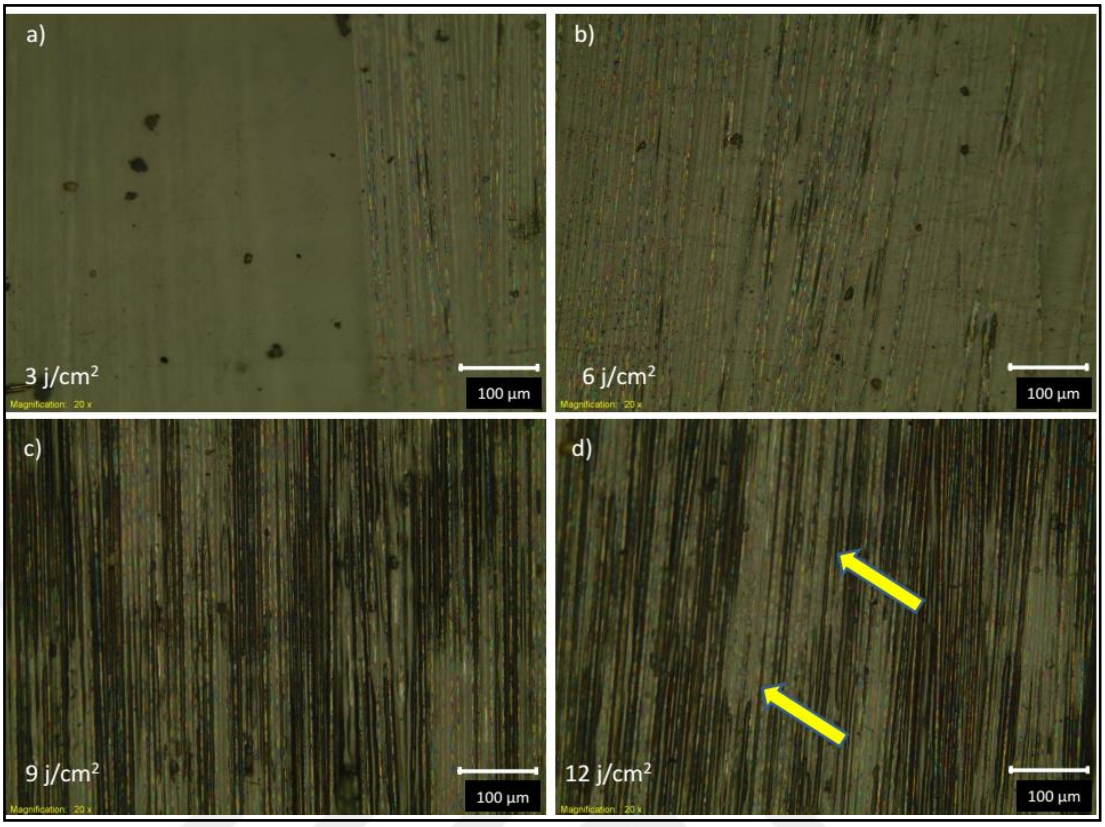
Lazerle malzeme işlemenin temel amacı yoğunlaştırılmış elektromanyetik ışımanın gücünü kullanarak malzemede kontrollü bir şekilde istenilen değişiklikleri yapmaktır [65]. Bu işlemde istenilen sonuca ulaşmak; malzeme, lazer ve uygulama yöntemine ait parametrelere bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Lazer ile malzeme işlemede; lazer gücü, frekansı, atım süresi, hareket hızı vb. kontrol edilmesi gereken birçok parametre vardır. Temel de kontrol edilmesi gereken en önemli parametre birim alana gönderilen lazer enerjisi olarak tanımlanan lazer akısıdır. CO_2 lazer ile gerçekleştirilen çalışmalarda malzemelerde kontrollü aşındırma yaratabilmek için değişken parametre olarak lazer akısı seçilmiştir. Lazer demetinin hareket hızının da dahil edildiği lazer akı eşitliği, Denklem 5.1'de verilmektedir [86]. Çalışmalarda lazer demetinin hareket hızı ve atım enerjisinde gerçekleştirilen değişimler ile lazer akısı 3-62 J/cm^2 aralığında değiştirilmiştir. Lazer akı eşitliği Denklem (5.1)'de şu şekilde ifade edilmiştir;

$$F=\frac{P2\sqrt{2}}{V\pi\omega_0} \quad (5.1)$$

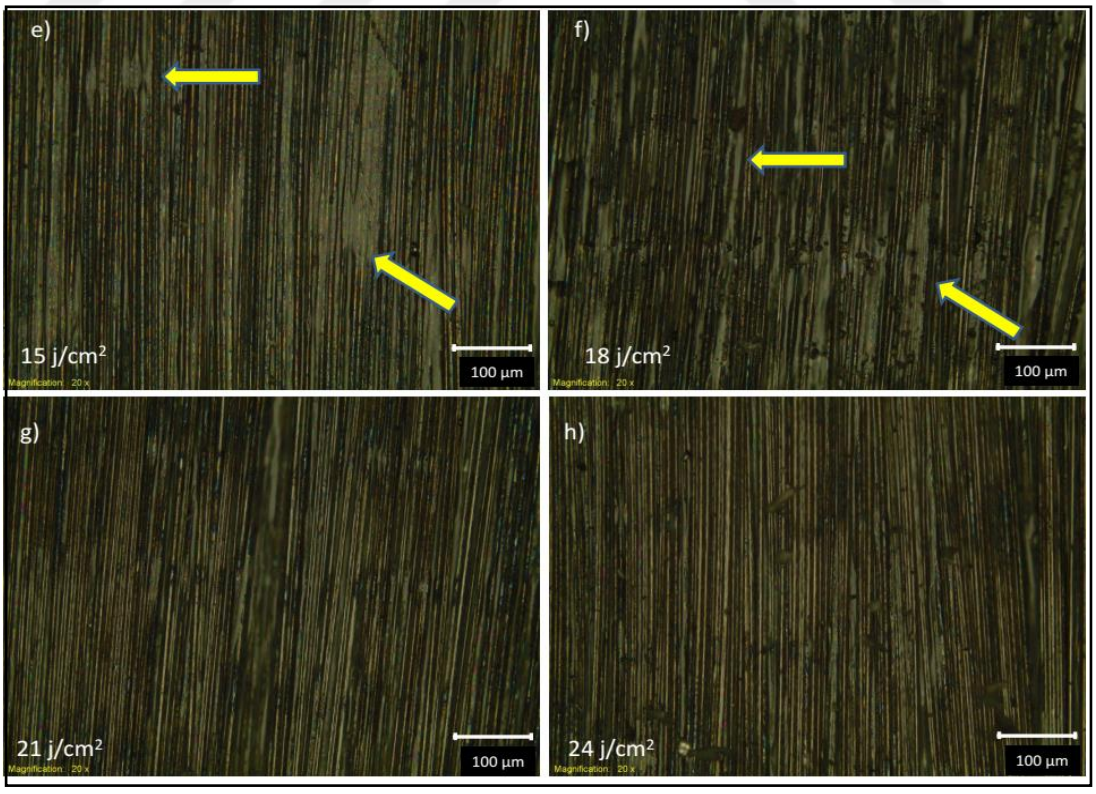
Lazer malzeme işleme çalışmalarında malzemeye aktarılan enerjide kontrolü sağlayan diğer bir önemli parametre de atım süresidir. Kısa atım sürelerinde aktarılan enerji ile malzemede yüksek kesinlikte aşındırma işlemi yapılabilmektedir. Tez kapsamında Kocaeli Üniversitesi Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi laboratuvarında bulunan lazer PWM sinyalleri ile sürülen bir lazer olup minimum 5 µs'lik atımlar üretmektedir. Yapılan deneysel çalışmalarda minimum enerji aktarımı sağlamak için 5 µs atım süresi seçilmiştir.

CFRP kompozit malzemelerin yapıştırılması için lazer ile yüzey hazırlama çalışmalarında belirtilen temel hedef; yük taşıyıcı görevi üstlenen fiberlere zarar vermeden kompozit malzemelerin üretimi sırasında malzeme yüzeyinde oluşan ve yapışmayı olumsuz etkileyen maddelerin kaldırılması olarak tanımlanmaktadır. Ancak doğru parametreler seçilmediğinde kullanılan tüm lazer dalgaboylarında fiber hasarları veya delaminasyon kusurları oluşturulabilmektedir [53].

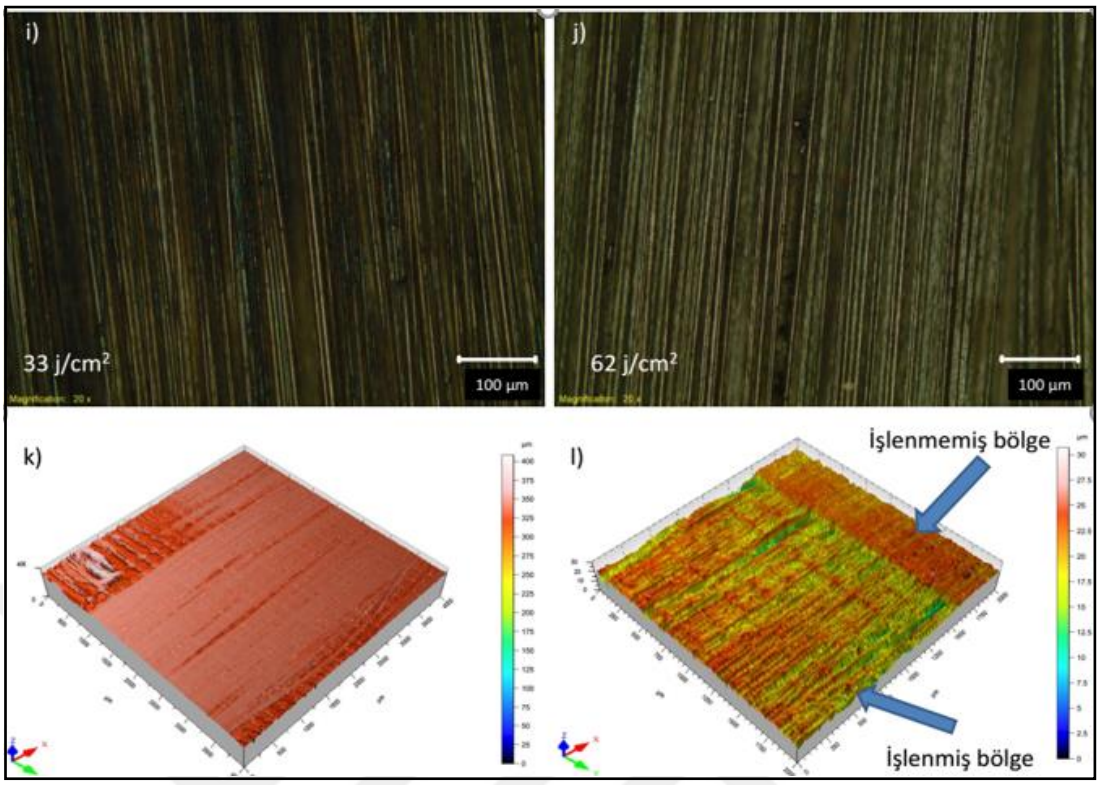
Farklı lazer akıları kullanılarak üretilmiş örneklerin yüzey görüntüleri ve örnek profilometre sonuçları Şekil 5.16, Şekil 5.17 ve Şekil 5.18'te görülmektedir.



Şekil 5.16. CO_2 Lazer kullanılarak farklı lazer akılarında (3, 6, 9, 12 j/cm^2) yüzeyleri işlenmiş CFRP laminant malzemeler ve yüzey görüntüleri

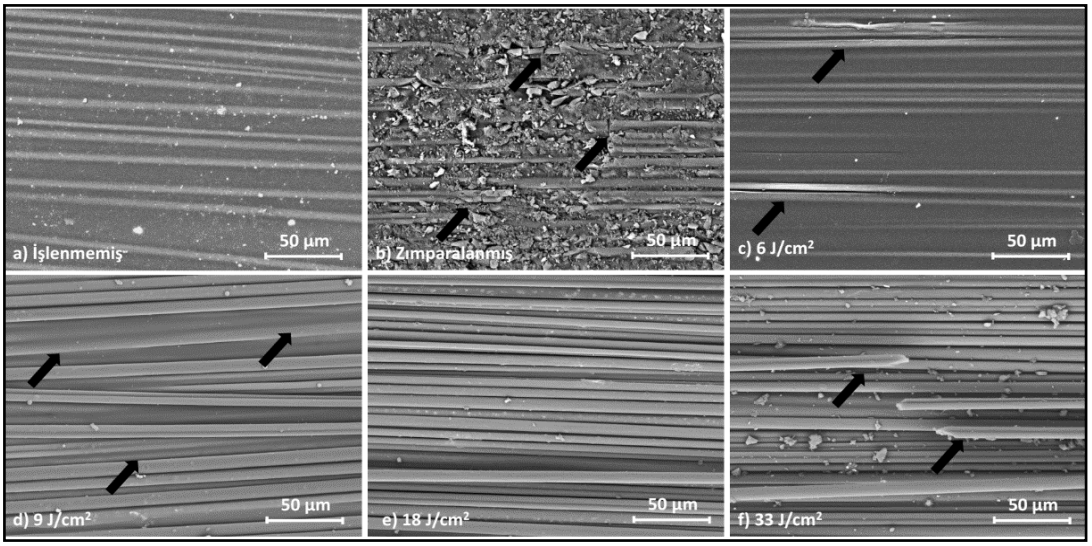


Şekil 5.17. CO_2 Lazer kullanılarak farklı lazer akılarında (15, 18, 21, 24 j/cm^2) yüzeyleri işlenmiş CFRP laminant malzemeler ve yüzey görüntüleri



Şekil 5.18. CO_2 Lazer kullanılarak farklı lazer akılarında (33, 62 j/cm^2) yüzeyleri işlenmiş CFRP laminant malzemeler ve yüzey profilometre görüntüleri

Düşük akılardan başlanarak malzeme yüzeyinde var olan reçine tabakası aşındırma çalışmaları yapılmıştır. 3J/cm^2 lazer akısı Şekil 5.16'da görüldüğü aşındırma için yeterli olmamış, lazer aşındırma derinliği henüz reçinenin içinde kalmıştır. Hızın azaltılması ile lazer akısında sağlanan artış çok az da olsa fiberlerin açığa çıkmasına neden olmuştur (Şekil 5.16-b-c). Yüzeydeki reçineyi tam olarak uzaklaştırmak amacıyla lazer akısındaki artışlara devam edilmiştir. Lazer akısı 21J/cm^2 ve sonrasında yüzeyde reçine kalmamış ve kompozit malzemenin üst katmanındaki tüm fiberler açığa çıkmıştır (Şekil 5.17-g-h, Şekil 5.18-i-j). Ancak lazer akısında gereğinde fazla gerçekleştirilen artış yüzeye yakın fiber katmanlarını tutan reçinenin de ısı etkisi ile zarar görmesine ve delaminasyon hatalarına neden olabileceği literatürde belirtilmektedir [37]. İşlenmemiş, zımparalanmış ve yüzeyleri CO_2 lazer ile işlenmiş örneklere ait elektron mikroskobu görüntüleri Şekil 5.19'da görülmektedir. Ayrıca lazer akısındaki artış 33 J/cm^2 değerine ulaştığında fiberlerde kopma hasarları meydana gelmeye başlamıştır (Şekil 5.19-f). Bu nedenle işleme için lazer akısının 62 J/cm^2 değerinden sonrasına devam edilmemiştir.

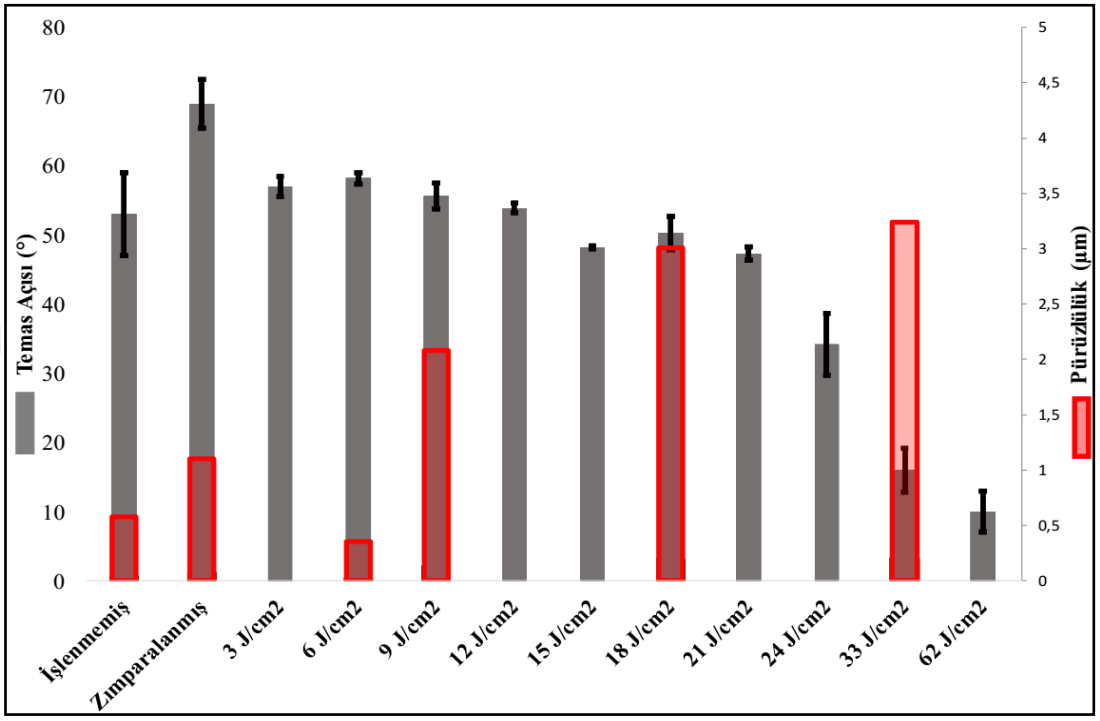


Şekil 5.19. İşlenmemiş, zımparalanmış ve yüzeyleri CO_2 lazer ile farklı akılarda işlenmiş örneklere ait elektron mikroskobu görüntüleri

Bir malzemenin yüzey enerjisi; diğer malzemeler üzerindeki çekici gücün bir ölçüsü olarak tanımlanmaktadır. Bu nedenle yüzey enerjisi yüzeyi karakterize eden önemli tekniklerden biridir ve yüzeye damlatılan su veya farklı sıvıların temas açılarının ölçülmesi ile belirlenir. Yüksek yüzey enerjisi dolayısıyla düşük temas açıları malzemeler arasındaki daha büyük bağ kuvvetlerine karşılık gelmektedir [52].Temas açı değişimini etkileyen önemli faktörler ise yüzey pürüzlülüğü, yüzey kimyası ve kirliliktir. Yüzey pürüzlülüğündeki değişim, Wenzel modeline göre yüzeyin kendisinin doğasına bir amplifikatör olacak şekilde temas açısını etkiler. Yani yüzey hidrofilikse pürüzlülük artışı ile hidrofiliklik artar, hidrofobikse pürüzlülük ile yüzeyin hidrofobikliği artar [87]. Kompozit malzemelerde flor veya silikonun neden oldu yüzey kirliliği ise yüzey enerjisini dolayısıyla yapışma dayanımını olumsuz yönde etkiler [52]. Diğer yandan temas açısına ve yapışma dayanımına önemli etkisi olan yüzeydeki oksidasyon işlemleri yüzeyi pürüzlü hale getirerek, lif ile reçine arasındaki mekanik bağlanmayı artırmaktadır. Kimyasal modifikasyon ile yüzeyde karbonil, karboksil ve hidroksil gruplar oluşturularak, lif reçine adhezyonu artırılabilmektedir [88,89].

CO_2 lazer ile yüzeyleri işlenen CFRP kompozit örneklerin temas açıları incelendiğinde işlenmemiş yüzeyler için 54 º ve zımparalanmış yüzeyler için 69,5 º olan temas açısının lazer akısına bağlı olarak azaldığı gözlenmektedir (Şekil 5.20). Düşük lazer akısı değerinde (6 J/cm^2) yüzey pürüzlülüğü lazer parlatma etkisi nedeni ile 0,5 µm'nin

altına düşmüştür. Lazer akısında meydana gelen artış Şekil 5.20'de görüldüğü gibi yüzey pürüzlülüğünün artmasına, buna bağlı olarak ta yüzeylerin temas açılarında azalma gözlenmiştir. Lazer akısındaki artış ile yüzey kirliliğinde meydana gelen azalma da temas açılarının azalmasına katkı sağlamaktadır (Tablo 5.1).

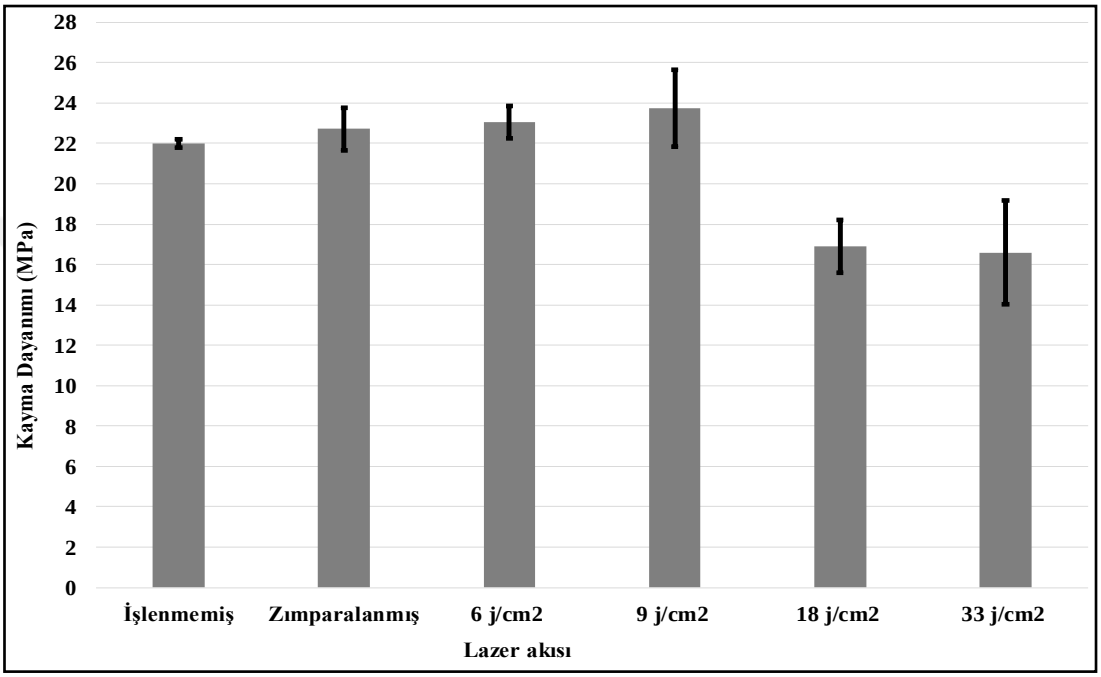


Şekil 5.20. İşlenmemiş, zımparalanmış ve farklı lazer akıları işle işlenmiş CFRP yüzeylerin temas açı ve pürüzlülük değişimleri

Düşük lazer akılarında iki eksende simetrik bir dağılım gösteren su damlasının temas açısı 18 J/cm^2 lazer akısına kadar yavaşça düşüş göstermiştir. Bu durumu yüzeyde meydana gelen fiziko-kimyasal değişim ile yüzey enerjisinde meydana gelen artış sonucu az da olsa su damlasının yayılması şeklinde açıklayabiliriz. 12 J/cm^2 lazer akısından itibaren işlenen yüzeylerin temas açılarında fiberlerin uzanım doğrultusunda bir azalma olduğu görülmüştür. Lazer akısı 33 J/cm^2 değerine ulaştığında temas açısı ölçülemeyecek düzeyde fiberlerin uzanım doğrultusunda yayılma göstermiştir. Bu durumu; yüksek lazer akısı nedeniyle üst katmandaki fiberlerin çevresindeki epoksinin buharlaştırılması ile fiberler boyunca meydana gelen kanallarda suyun rahatça yayılması şeklinde açıklayabiliriz [52].

Temas açısındaki bu değişim malzemenin yüzeyindeki fiber katmanının alt katmanlarla olan bağlantılarının zarar görmüş olduğu dolayısıyla delaminasyonun

gözlenebileceğinin bir belirtisidir. CO_2 lazer ile işlenen yüzeylerin temas açısı değerleri ve optik mikroskop görüntülerinin literatürdeki lazer ile işlenmiş yüzeyler ile kıyaslanması sonucu Şekil 5.21'de belirtilen lazer akılarındaki örneklerin mekanik teste tabii olmasına karar verilmiştir. Ayrıca zımparalanmış yüzey örneklerinden elde edilen yapıştırıcı kalınlığına bağlı sonuçlar değerlendirilerek, lazerle işlenen CFRP kompozitlerin birleştirilmesinde 50 µm yapıştırıcı kalınlığı uygulanmıştır.



Şekil 5.21. Yüzeyleri CO_2 lazer ile işlenmiş CFRP numunelerin lazer akısına göre yapışma dayanımı sonuçları

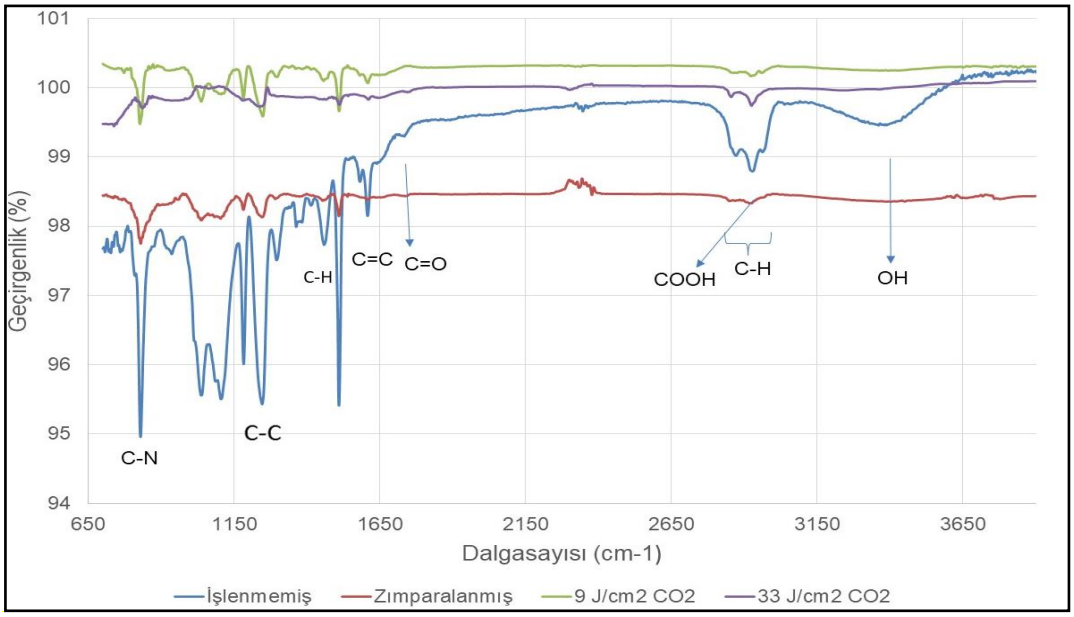
Lazer ile işlenmiş yüzeylerin kirlilik analizleri için X-ışını fotoelektron spektroskopisi (XPS) kullanılmıştır. XPS verileri incelendiğinde de yüzeydeki kirliliğin göstergesi olan oksijen/silisyum (O/Si) elementleri oranı arttıkça çekme dayanımının artış göstermesi beklenmektedir. Çekme testi sonuçları incelendiğinde lazer akısında meydana gelen artış ile çekme dayanımında bir artış olmuştur. Lazer akısındaki artışa devam edildiğinde çekme dayanımında hızlı bir azalma olduğu gözlenmekte ve sonrasında bu davranış devam etmektedir (18 J/cm^2 ve 33 J/cm^2). Bu durum; düşük lazer akısında (6 J/cm^2) kirlilik ajanının yüzeyden tamamen kaldırılamadığı sonucu ile açılanabilir (Tablo 5.1). Lazer akısında meydana getirilen artış yüzeydeki kirlilik oranının azalmasına neden olmuş ve çekme dayanımı maksimum değerine ulaşmıştır (9 J/cm^2). Lazer akısı 18 j/cm^2'ye çıkartıldığında dayanımda sert bir düşüş gözlenmesi; 18 j/cm^2 ve üstü lazer akısı değerlerinin CO_2 lazer ile yüzey işleme için yüksek değerler

olduğu ve üst katmandaki fiberlerin çevresini saran reçinenin ısıl etki ile delaminasyon kusuru ve fiber kırılma hasarları nedeniyle mukavemetin düştüğü sonucu ile açıklanabilir (Şekil 5.19-e-f). Yüzey kirliliği diğer örneklere göre nispeten daha az olmasına rağmen yüzey kusurları sebebiyle mukavemetin düştüğü sonucu ortaya çıkmaktadır.

Tablo 5.1. Yüzeylerin XPS sonuçlarına bağlı yüzey element konsantrasyonları

İçerik	İşlenmemiş	Zımparalanmış	6 J/cm^2	9 J/cm^2	18 J/cm^2	33 J/cm^2
O [%]	18,1	14,4	16,4	18,8	16,45	14,6
Si [%]	1,7	1.7	1,5	1,3	1,04	0,8
O/Si	10,64	8,4	10,9	14,46	15,8	18,25

Farklı yüzey özelliği kazandırılan (işlenmemiş, zımpara ve lazerle işlenmiş) CFRP numunelerin FTIR-ATR spektrumları Şekil 5.22'de görülmektedir. Yüzeyinde epoksi bulunan CFRP numunelerinin işlenmemiş, zımparalanmış ve 9 J/cm^2 ve 33 J/cm^2 enerji akı parametreleri kullanılan lazer ile işlenmiş yüzey spektrumları incelendiğinde işlenmemiş CFRP yüzeyinde 3300-3500 cm-1 dalga sayısı aralığındaki hidroksil (O-H) bandı dikkati çekmektedir.



Şekil 5.22. İşlenmemiş, zımpara ve lazerle işlenmiş CFRP numunelerin FTIR-ATR spektrumları

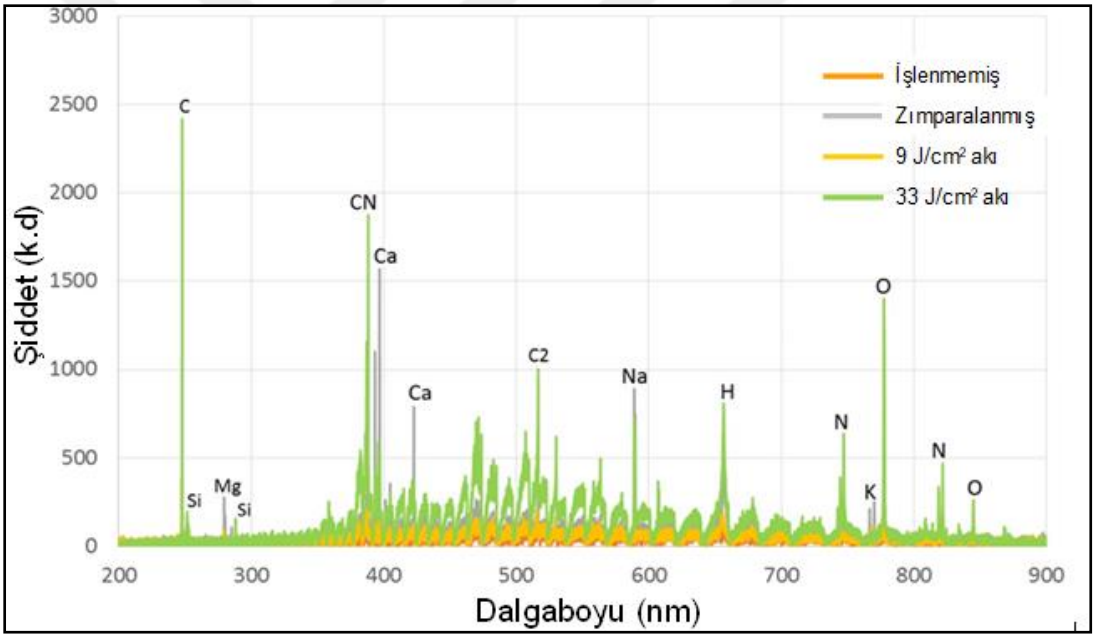
İşlenmemiş ve 9 J/cm^2 lazer akısı ile işlenmiş numunelerin FTIR_ATR spektrumları birbirine benzediği görülmektedir. Zımparalanmış ve 33 J/cm^2 lazer akısı ile işlenmiş numune yüzeylerinde ortaya çıkan karbon fiberlerden kaynaklanan karbonun soğurma etkisi ile oluşan düşük çizgi şiddetleri de dikkati çekmektedir. Farklı yüzeylerin kontaminasyonu ve oksidasyon özellikleri açısından bakıldığında FTIR-ATR spektrumlarında önemli bir fark olmadığı görülmektedir, literatürde kontaminasyonun belirteci olduğu ifade edilen Si-C grubu bantlar FTIR-ATR spektrumlarında belirlenememiştir.

Epoksi reçinenin fonksiyonel gruplarını epoksi ve hidroksil gruplar oluşturmaktadır. Karbon fiber yüzeylerde CO_4 gruplarının bazik olduğu ve COOH gruplarının asidik olduğu üç çeşit oksijen içeren fonksiyonel gruplar (hidroksil, karbonil ve karboksil grupları) bulunur. Karbon fiber yüzeyler üzerindeki C = O ve bazik OH gruplarını içeren bazik gruplar sadece amin grupları ile reaksiyona girdiği ve asidik grupların ise amin grupları ve epoksi gruplarıyla reaksiyona girdiği bildirilmektedir. Epoksi reçinenin hidroksil gruplarının karbon yüzeylerindeki COOH gruplarıyla da tepkimeye girebildiği, bu nedenle de karbon fiber yüzeyleri ile epoksi reçinesi arasındaki güçlü reaksiyonlardan COOH gruplarının sorumlu olduğu ifade edilmektedir [90]. Fiberler üzerindeki hidroksil veya karboksil gibi oksijen fonksiyonel gruplarındaki artışın fiberler ve polimer matrisi arasındaki yüzeylerde yapışma derecesinin iyileştirilmesinde önemli bir rol oynayacağı ifade edilmektedir ve bu amaçla yüzey asitliliğini arttıran fosforik asit çözeltileriyle işlemler yapılan çalışmalarda literatürde bulunmaktadır [91].

Lazerle oluşturulan plazma spektroskopisi (LIBS) yüzeylerin element analizleri ve element oranlarının derinlik profil analizinde kullanıldı. Karbon fiber katkılı kompozitlerin analizi konusunda da literatürde birkaç çalışma bulunmaktadır, bu çalışmalarda LIBS CFRP yüzeylerinde bulunan ve yapışmada olumsuzluk oluşturduğu bilinen silisyum elementinin belirlenmesi amacı ile kullanılmıştır. İşlenmemiş ve lazer ile işlenmiş numunelerin spektrumlarında Si elementinin varlığı araştırılmıştır. Tornow yaptığı çalışmada CFRP yüzeylerinde kirlilik ajanı olarak belirtilen Si elementi belirlenmiştir [92]. Benzer şekilde Palmieri LIBS yöntemi ile gerçekleştirdiği LIBS analizlerinde silisyum elementi içeren silane ile kirletilmiş ve sonrasında lazer

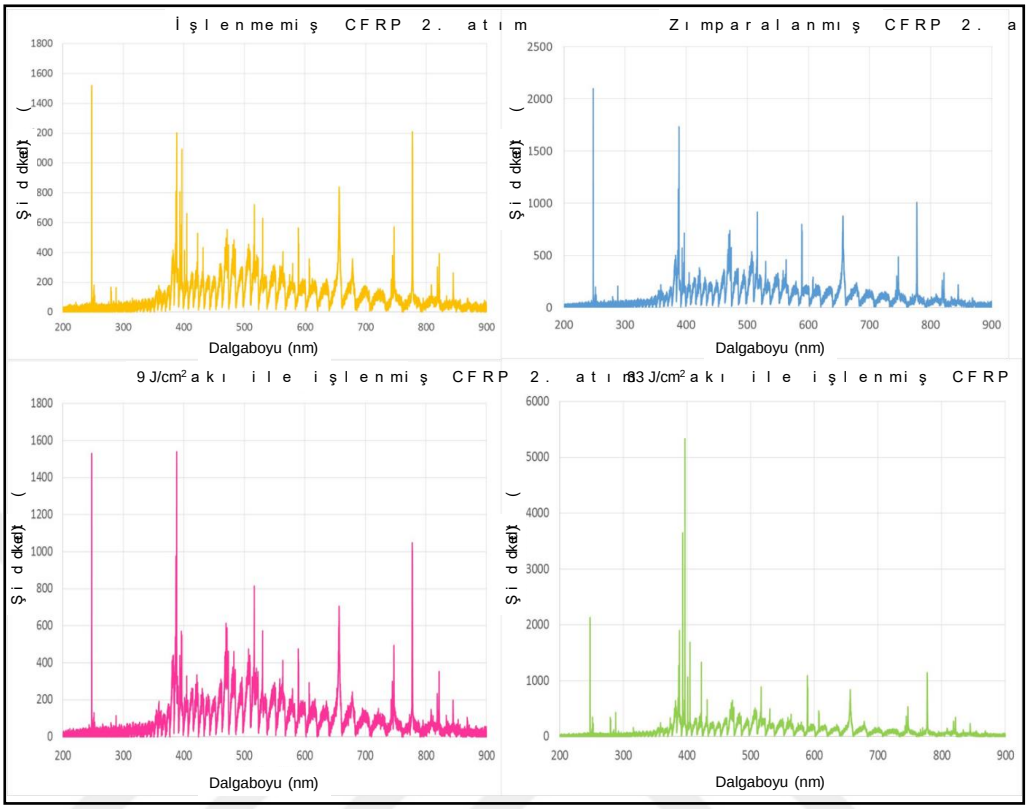
ile temizlenmiş yüzeylerin LIBS analizleri gerçekleştirilmiş fakat tüm spektrumlarda spektral şiddet düşse de Si elementinin gözlendiği bildirilmiştir [93].

Karbon fiber takviyeli kompozitlerin yapıştırılmasında dezavantaj olarak görülen silan ayırıcı ajanının sembolü olan Si elementinin zımparalama işleminden sonra da tam olarak ortadan kalkmadığı şiddetinde azalma olduğu görülmüştür (Şekil 5.23). Hem lazerle yüzey hazırlığı yapılan numunelerde hemde zımpara ile yüzeyi hazırlanmış numunelerde Si elementi spektral şiddette azalma olsa da tüm spektrumlarda Si elementi belirlenmiştir (Şekil 5.23). Palmieri çalışmasında da lazerle temizleme sonrası da Si elementinin belirlendiği bildirilmişti [93]. Elde ettiğimiz sonuçları değerlendirdiğimizde; Si elementinin sadece epokside değil karbon fiberde de olabileceği düşünülmektedir.



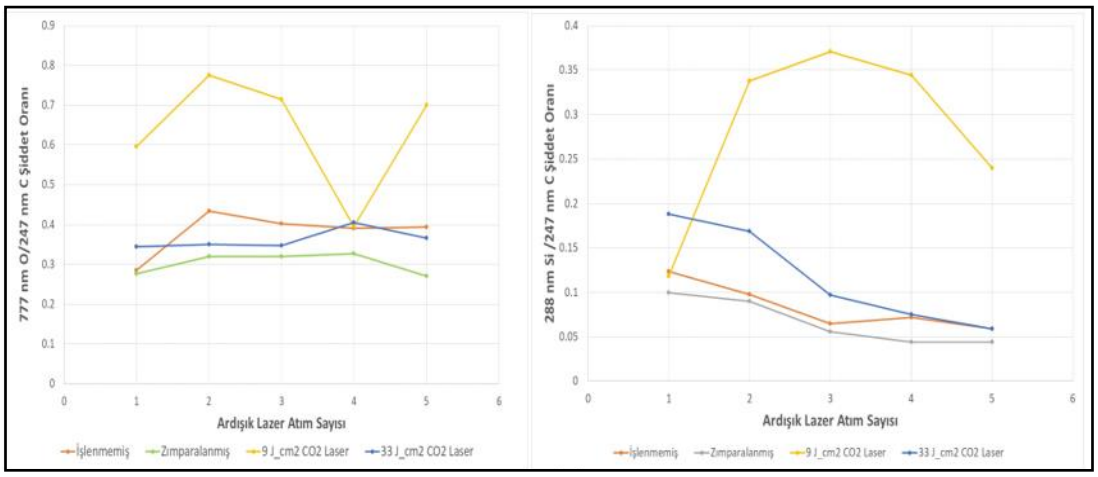
Şekil 5.23. İşlenmemiş, zımparalanmış ve farklı lazer akıları ile hazırlanmış CFRP yüzeylerin 1. lazer atımı LIBS spektrumları

LIBS spektrumları incelendiğinde; C, H, N, O, Si, Na, Ca, Mg, K ve C_2 ve CN gibi basit moleküler yapılar gözlenmektedir. Yüzeylerin 2. lazer atımı ile elde edilen LIBS spektrumları incelendiğinde (Şekil 5.24) özellikle karbon spektral çizgisinde önemli derecede artış olduğu gözlenmektedir. Numune yüzeylerinin alt katmanından alınan 2. Atım spektrumlarında spektral çizgilerdeki en büyük fark, yüzeyi 33 J/cm^2 lazer enerji akısı ile işlenmiş numunede gözlenmiştir.



Şekil 5.24. İşlenmemiş, zımparalanmış ve farklı lazer akıları ile hazırlanmış CFRP yüzeylerin 2. lazer atımı LIBS spektrumları

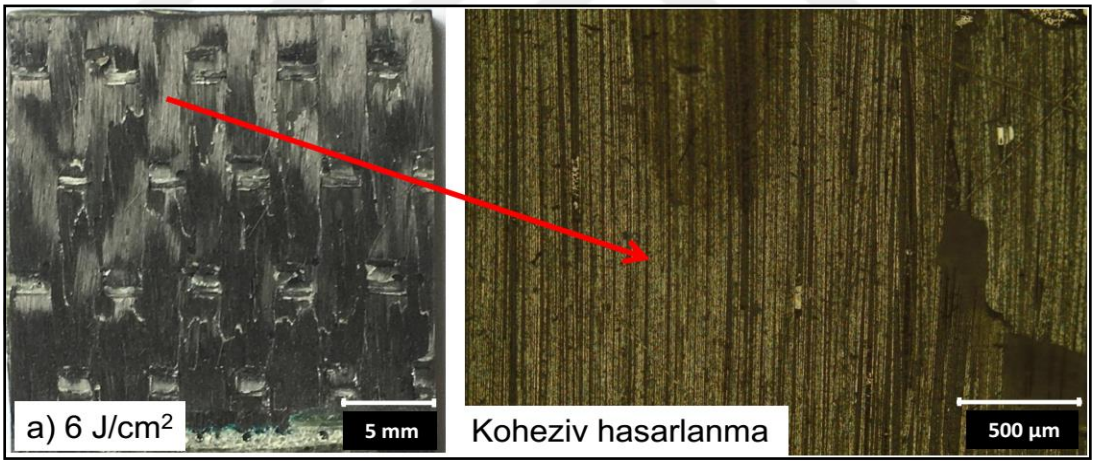
CFRP numunelerin yapısındaki fiberin belirteci olan karbon elementi referans alınarak oluşturulan O/C ve Si/C element oranlarının atım sayısına göre profilleri Şekil 5.25'de görülmektedir. CFRP yüzeylerinin farklı yüzey işlemlerinin yapışmaya etkileri araştırıldığında; yüzeydeki kontaminasyon belirtisi olan Si/C oranı etkisinden çok oksidasyonun belirtisi olan O/C oranı artışının yapışmada daha etkili olduğunu LIBS sonuçları da desteklemektedir.



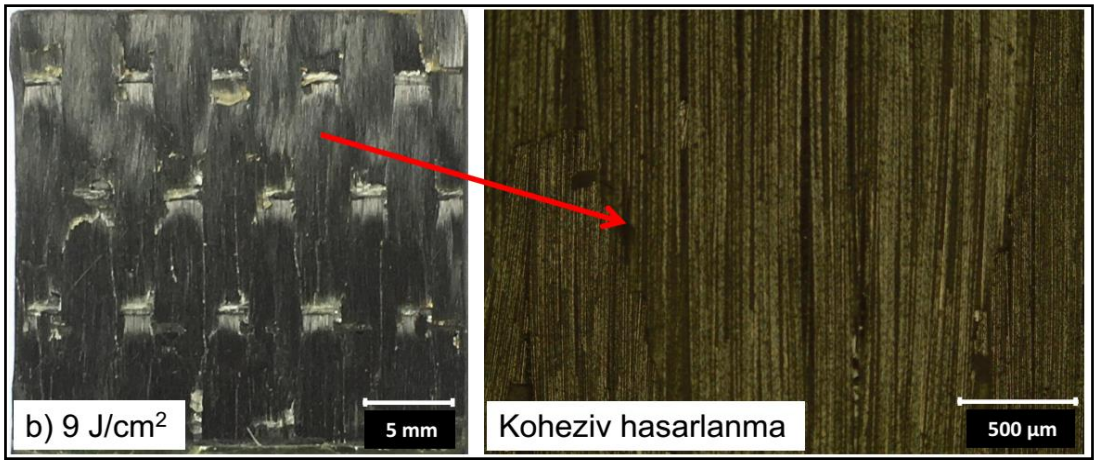
Şekil 5.25. Aynı noktadan art arda alınan spektrumlarda element oran profillerinin atım sayısına göre değişimi

Farklı lazer akısı ile yüzeyleri işlenmiş ve daha sonra Loctite 9396 yapıştırıcı kullanılarak yapıştırılan CFRP numunelerin tekil bindirme testleri sonrasında hasar mekanizmalarının belirlenebilmesi için yüzeylerden görüntüler alınmıştır. Elde edilen yüzey görüntüleri Şekil 5.26 - Şekil 5.29'da verilmiştir. Şekil 5.26'da 6 J/cm2 lazer akısı ile yüzeyi işlenmiş CFRP numunesinin tekil bindirme testi sonrası yüzey görüntüsü verilmiştir. Şekil 5.26'dan genel olarak her iki CFRP yüzeyinin de parlak olduğu ve koheziv hasarlanmanın oluştuğu tespit edilmiştir. Loctite EA 9396 yapıştırıcının her iki kompozit numune yüzeyinde de belirgin bir şekilde kaldığı ve açıkta kalmış fiber demetlerini kapladığı görülmektedir. Şekil 5.27'de ise 9 J/cm^2 lazer akısı ile yüzeyi işlenmiş CFRP numunesinin yüzey görüntüsü verilmiştir. Benzer şekilde koheziv hasarlanmanın baskın olduğu belirlenmiştir. Bununla birlikte 6 J/cm^2 lazer akısı ile işlenmiş CFRP numunesine göre yüzeydeki yapıştırıcının fiber demet dikişlerini de doldurduğu ve daha az dikiş bölgesinin görüldüğü tespit edilmiştir. Bununda Şekil 5.21'de belirtilen numunelerin kayma dayanımı değerlerinin en fazla 9 J/cm^2 lazer akısı ile işlenmiş CFRP numunesinde çıkmasının nedeni olduğu düşünülmektedir. Şekil 5.28'den genel olarak CFRP numunelerde koheziv hasarlanma gözlense de ana hasar mekanizmasının fiber demetlerinde yırtılma hasarı şeklinde olduğu saptanmıştır. Özellikle lazer akı değerinin artması ile kompozit yüzeylerinden epoksinin tamamen kaldırılması ile birlikte açığa çıkan fiberler de daha fazla lazer enerjisine maruz kalmıştır. Buda Şekil 5.28'de görüldüğü gibi fiberlerin yırtılmasına yol açtığını göstermektedir. Tekil bindirme testlerinde uygulanan yükü karşılaması beklenen fiberlerin ya da fiber demetlerinin yırtılması nedeni ile CFRP numunelerinin

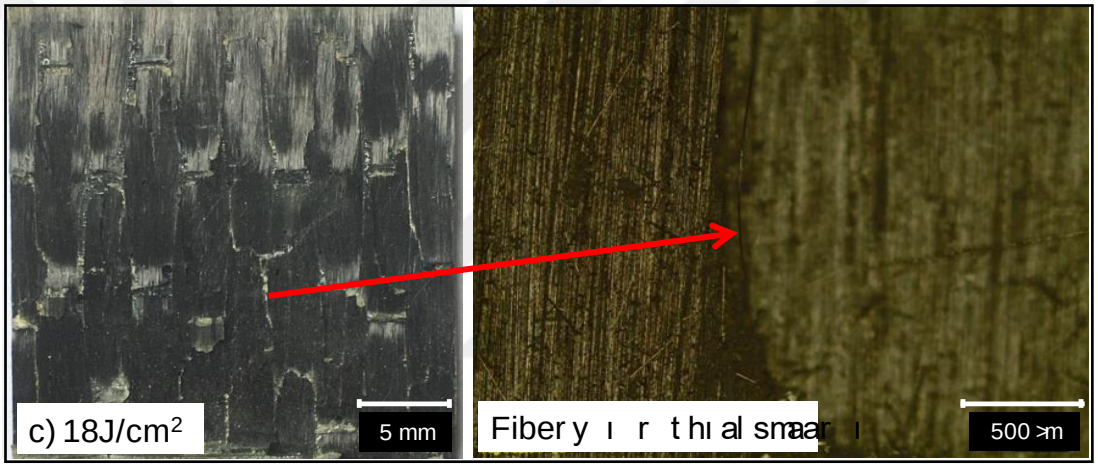
tekil bindirme kayma dayanımı değerlerinin düşmesine sebep olduğu düşünülmektedir. 33 J/cm^2 lazer akısı ile yüzeyi işlenmiş CFRP numunesinin yüzey görüntüsü Şekil 5.29'da verilmiştir. Burada da ana hasar mekanizmasının aynı olduğu saptanmıştır. Fiber demetlerinin yırtılma hasarlanmasına ek olarak yapıştırıcı hasar sütunlarının da oluştuğu gözlenmiştir. Her iki hasar mekanizmasının da etkili olması nedeni ile CFRP numunelerinin tekil bindirme kayma dayanımı değerlerinin daha da düşmesine sebep olduğu belirlenmiştir. Son olarak farklı lazer akısı ile yüzeyi işlenmiş CFRP numuneleri ile zımparalanmış CFRP numunelerinin hasarlanmış yüzeyleri incelendiğinde lazerle işlenmiş tüm CFRP numunelerinde kohezif hasarlanma gözlendiği bununla birlikte zımparalanmış CFRP numunelerinde ise sadece 50 µm yapıştırıcı kalınlığına sahip numunede koheziv hasarlanma gözlendiği tespit edilmiştir. Bu sonuç ışığında lazer ile yüzey işlemenin CFRP numunelerin yüzey pürüzlülüğünü iyileştirdiği bununla birlikte uygulanan lazer ile yüzeydeki epoksi matrisin daha iyi giderildiği belirlenmiştir. Yapıştırma bağlantılarında istenen hasarlanma türünün (koheziv hasarlanma) lazerle yüzey işleme ile sağlandığı saptanmıştır.



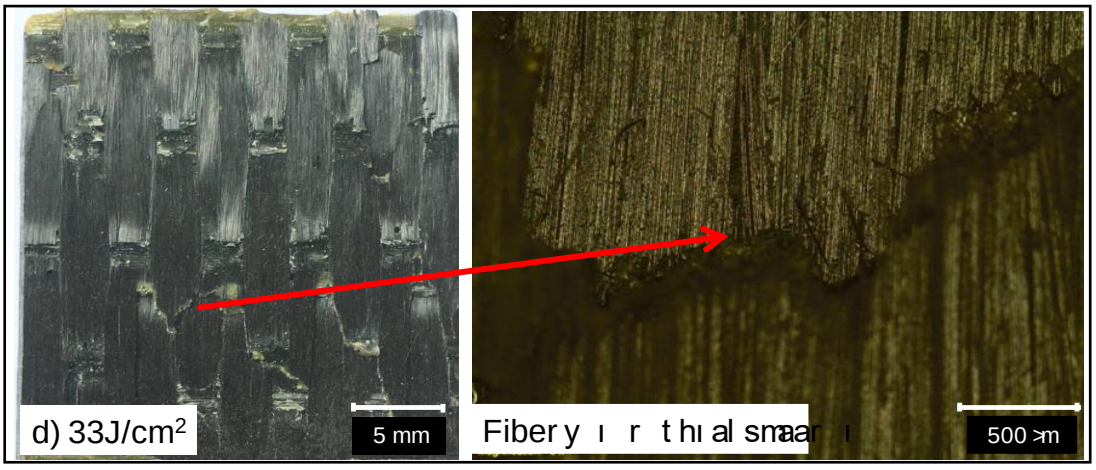
Şekil 5.26. 6 J/cm^2 lazer akısı ile yüzeyi işlenmiş CFRP numunesinin tekil bindirme testi sonrası yüzey görüntüsü



Şekil 5.27. 9 J/cm^2 lazer akısı ile yüzeyi işlenmiş CFRP numunesinin tekil bindirme testi sonrası yüzey görüntüsü

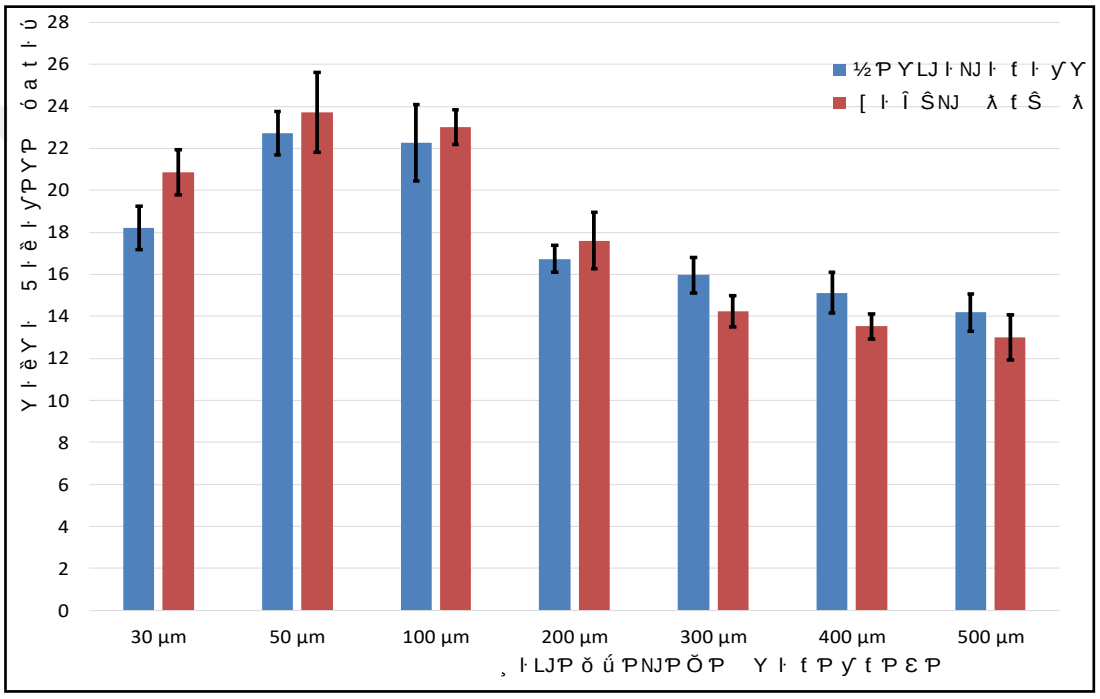


Şekil 5.28. 18 J/cm^2 lazer akısı ile yüzeyi işlenmiş CFRP numunesinin tekil bindirme testi sonrası yüzey görüntüsü



Şekil 5.29. 33 J/cm^2 lazer akısı ile yüzeyi işlenmiş CFRP numunesinin tekil bindirme testi sonrası yüzey görüntüsü.

Farklı lazer akıları ile yüzeyleri işlenmiş CFRP numunelerinin tekil bindirme testleri sonrasında yapıştırma bağlantısının optimum kayma dayanımının 9J/cm^2 lazer akısında elde edildiği saptanmıştır. Bu bilgi ışığında 9J/cm^2 lazer akısında yüzeyi işlenmiş numunelerde optimum yapıştırma kalınlığının tespit edilebilmesi için zımparalanmış numunelerde belirtilen yapıştırma kalınlıklarında numuneler tekrar hazırlanmıştır. Hazırlanan numunelere tekil bindirme testleri uygulanmış olup elde edilen kayma dayanımı değerleri zımparalanmış numuneler ile birlikte verilerek Şekil Şekil 5.30'da karşılaştırılmıştır.

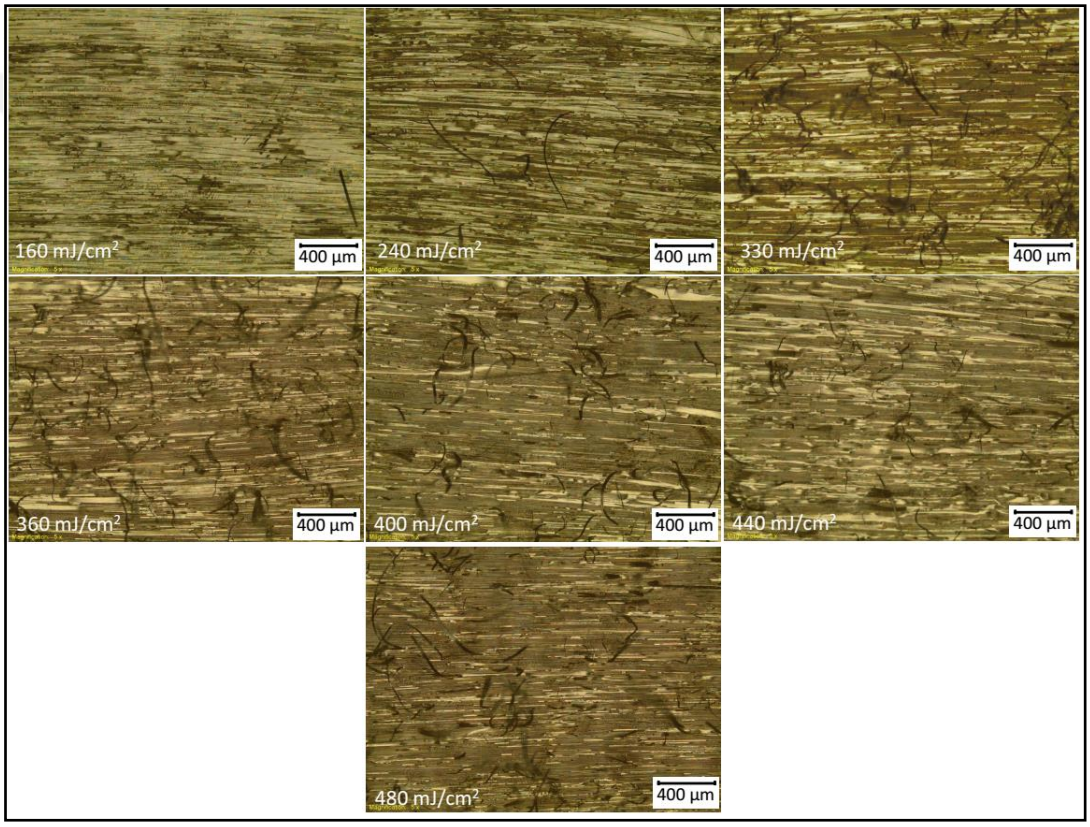


Şekil 5.30. 9 J/cm^2 lazer akısı ile yüzeyi işlenmiş CFRP numunelerinin yapıştırma kalınlığına bağlı olarak kayma dayanımı değerlerinin değişimi

Şekil 5.30 incelendiğinde zımparalanmış CFRP numunelerinin kayma dayanımı değerlerine benzer olarak 50 µm yapıştırma kalınlığında en yüksek değerlere ulaşıldığı görülmektedir (23,72 MPa). Aynı yapıştırma kalınlığına sahip zımparalanmış numuneye göre kayma dayanımı değerinin yaklaşık 4,4 % arttığı gözlenmiştir. İşlenmemiş örneklerde ise bu değişim % 7,8 civarındadır. Bunun nedeninin lazer ile işlenen yüzeylerde elde edilen yüzey pürüzlülüğü değerinin zımparalanmış numunelere göre daha fazla olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

5.4. Nd:YAG Lazer ile Yüzey İşleme Çalışmaları

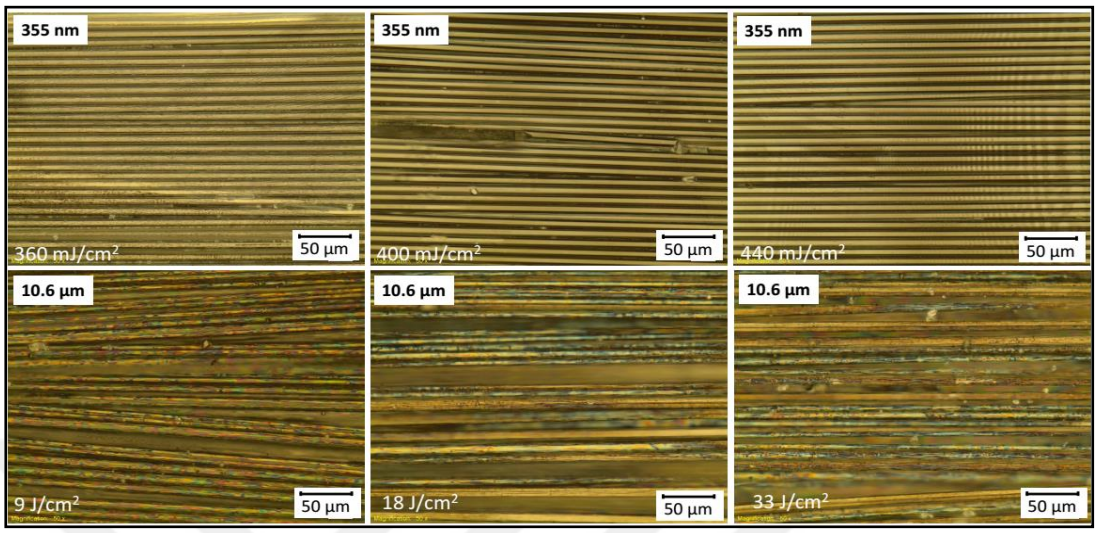
Çalışmalarda kullanılan Nd:YAG lazerin III. Harmoniği ultraviyole bölgesinde 355nm'de ışıma veren ve yaklaşık 3,5 eV enerjiye sahip fotonlar üreten bir lazerdir. Üretilen atımların nanosaniye mertebelerinde olması (4,4 ns) malzemede oluşan ısıdan etkilenmiş bölgenin nispeten çok daha az olmasına neden olmaktadır. CO_2 lazer ile karşılaştırıldığında Nd:YAG lazer ile işlenen örneklerin yüzey görüntüleri oldukça farklılık göstermektedir. Şekil 5.31'de 160 mJ/cm^2 - 480 mJ/cm^2 lazer akısı aralığında işlenen örneklerin yüzey görüntüleri verilmektedir.



Şekil 5.31. Farklı lazer akılarında yüzeyleri UV dalgaboyunda lazer ile işlenmiş örneklere ait optik mikroskop görüntüleri

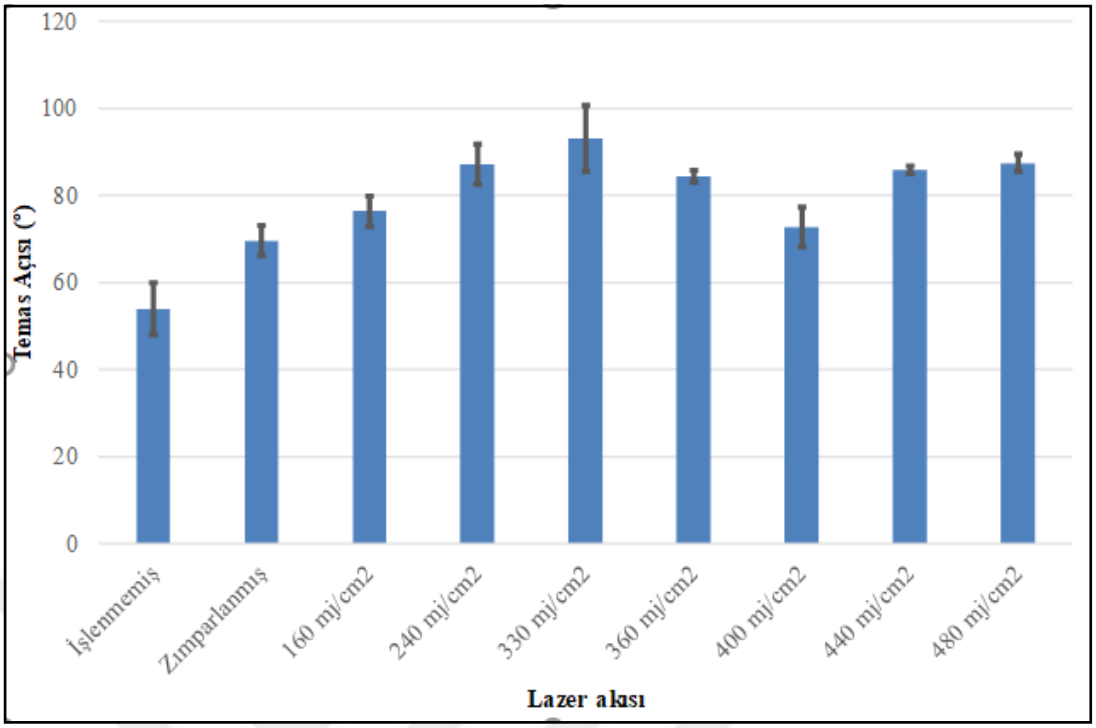
Optik mikroskop görüntülerinden görüldüğü gibi lazer etkisine maruz tutulan epoksi malzeme ısıl etki olmaması nedeniyle tam olarak yüzeyden uzaklaştırılmamış ve kılcal lifler halinde yüzeyde yer aldığı gözlenmektedir. Düşük lazer akılarında az miktarda gözlenen lifler akıdaki artış ile artmakta bununla birlikte daha fazla fiber açığa çıkmaktadır (Şekil 5.31). Yüzeylere daha yüksek büyütmelerde bakıldığında açığa çıkan fiberlerin yüzeylerinde hiçbir kalıntının kalmadığı gözlenmektedir (Şekil 5.32). CO2 lazer ile işlenen yüzeylerde ise epoksi tamamen kaldırıldığında dahi fiberler

üzerinde kalıntıların kaldığı gözlenmektedir. 355 nm ile yapılan yüzey temizleme işlemi ise elektron mikroskobu ve EDX sonuçlarında bu kalıntılar belirlenememiştir.



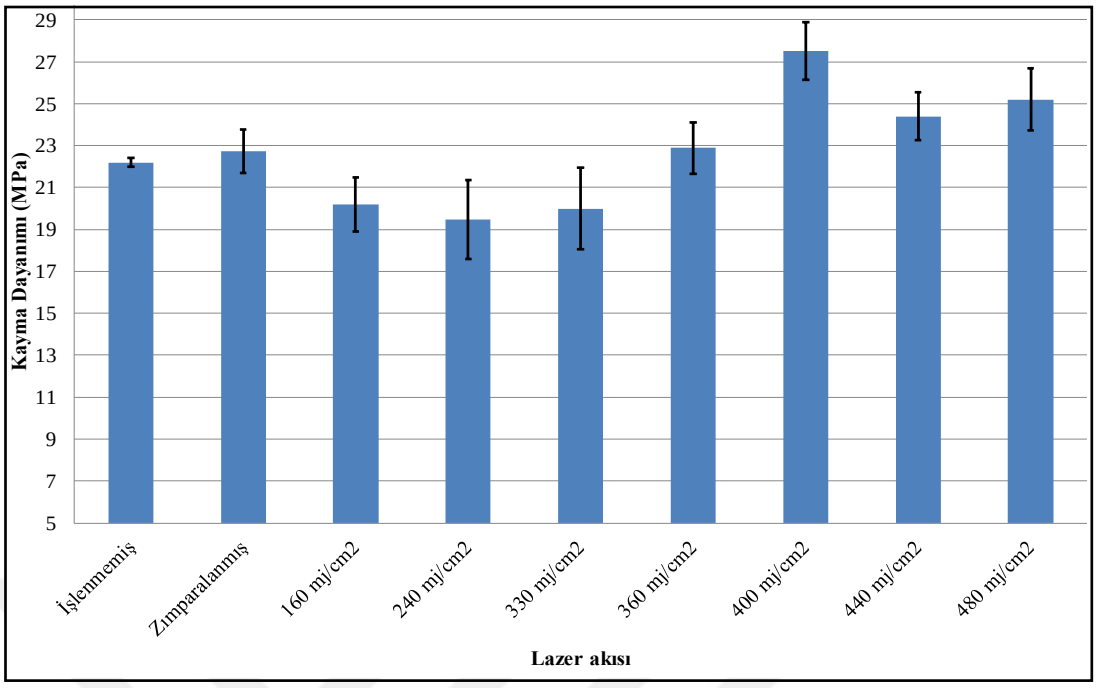
Şekil 5.32. UV (355 nm) ve IR (10,6 µm) dalgaboyundaki lazerler ile işlenmiş yüzeylerin yüksek büyütmedeki görüntüleri

Yüzeylere ait temas açısı sonuçları incelendiğinde (Şekil 5.33) lazer akısındaki artış ile temas açısının arttığı gözlenmektedir. Bu artış 330 mJ/cm^2 lazer akısına kadar devam etmiş sonrasında azalmaya başladığı gözlenmiştir. Temas açısı en düşük değerine 400 mJ/cm^2 değerinde ulaşmış, daha büyük akı değerlerinde ise bir miktar artarak yaklaşık sabit kalmıştır. Literatürdeki yorumlar değerlendirildiğinde yüzeylerin ıslanabilirliğindeki artış yapışma dayanımını olumlu yönde etkilediği belirtilmektedir. Ancak IR lazer ile işlenen yüzeylere ait temas açı sonuçları ile karşılaştırıldığında UV lazer ile işlenen yüzeylerin temas açılarının nispeten yüksek olduğu gözlenmektedir.



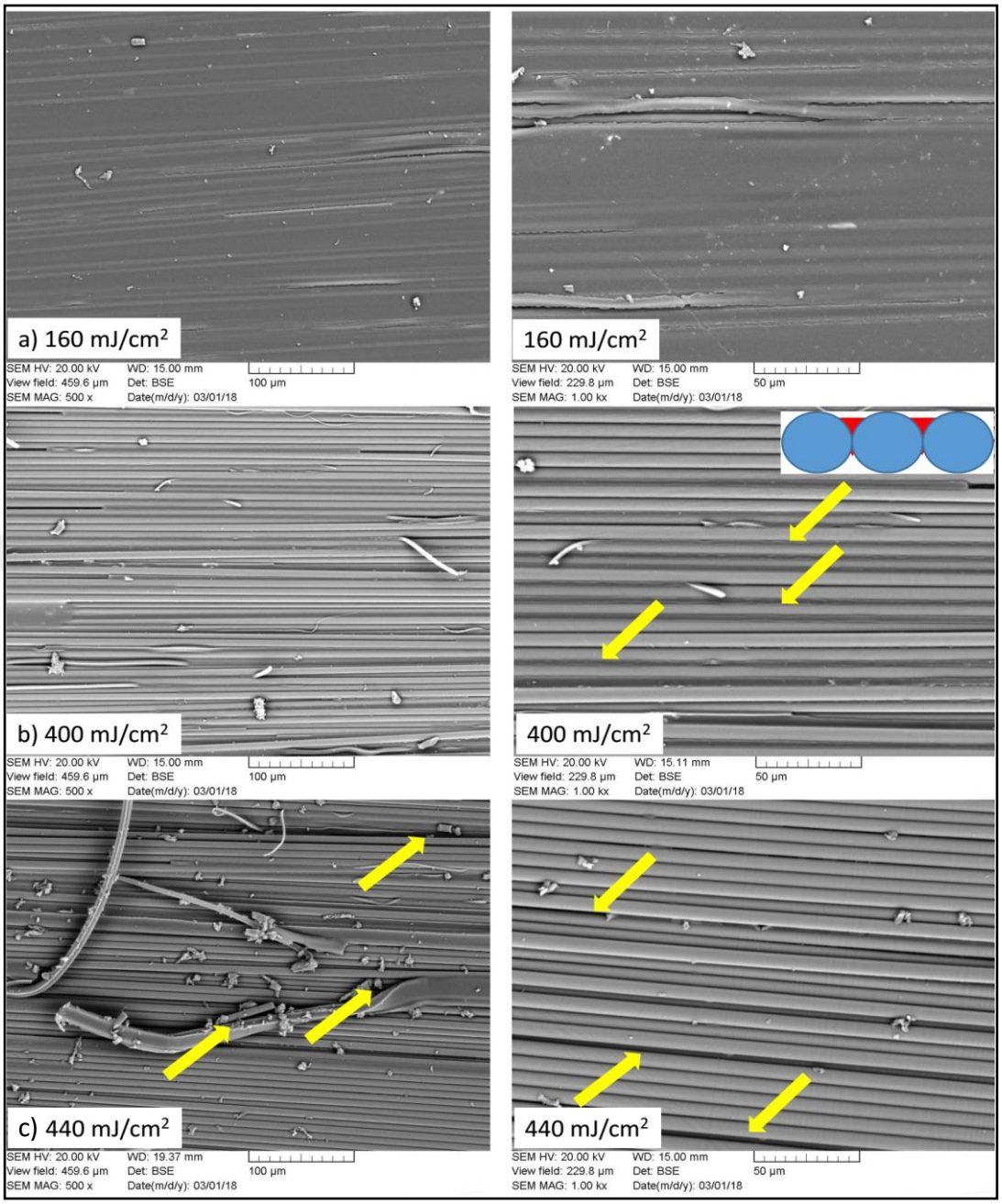
Şekil 5.33. UV lazer ile farklı akılarda yüzeyleri işlenmiş örneklere ait temas açı sonuçları

UV lazer ile yüzeyleri işlenen ve 50 µm yapıştırıcı kalınlığında birleştirme işlemi gerçekleştirilen örneklerin tekil bindirme test sonuçları Şekil 5.34'de görülmektedir. Düşük lazer akılarında referans örneklere göre düşük olan gerilme dayanımı lazer akısındaki artış ile bir artma göstermiş ve maksimum değerine 400 mJ/cm^2 lazer akı değerinde ulaşmıştır. Lazer akısındaki artışa devam edildiğinde ise gerilme dayanımı tekrar azalma eğilimi göstermektedir. UV lazer ile işlenen örneklerde ıslanabilirliğin gerilme dayanımı üzerindeki etkisi değerlendirildiğinde gerilme sonuçları beklendiği gibi çıkmış, yüksek temas açılarında gerilme dayanımı az iken düşük temas açılarında gerilme dayanımı yüksek değerlere ulaşmıştır. UV lazer ile 400 mJ/cm^2 lazer akısı kullanılarak işlenen örneklerde işlenmemiş örneğe göre % 23,87 zımparalanmış örneğe göre % 21,1'lik bir çekme dayanımı artışı gözlenmiştir.



Şekil 5.34. UV lazer ile yüzeyleri farklı akılarda işlenen ve 50 µm yapıştırıcı kalınlığında birleştirme işlemi gerçekleştirilen örneklerin tekil bindirme test sonuçları

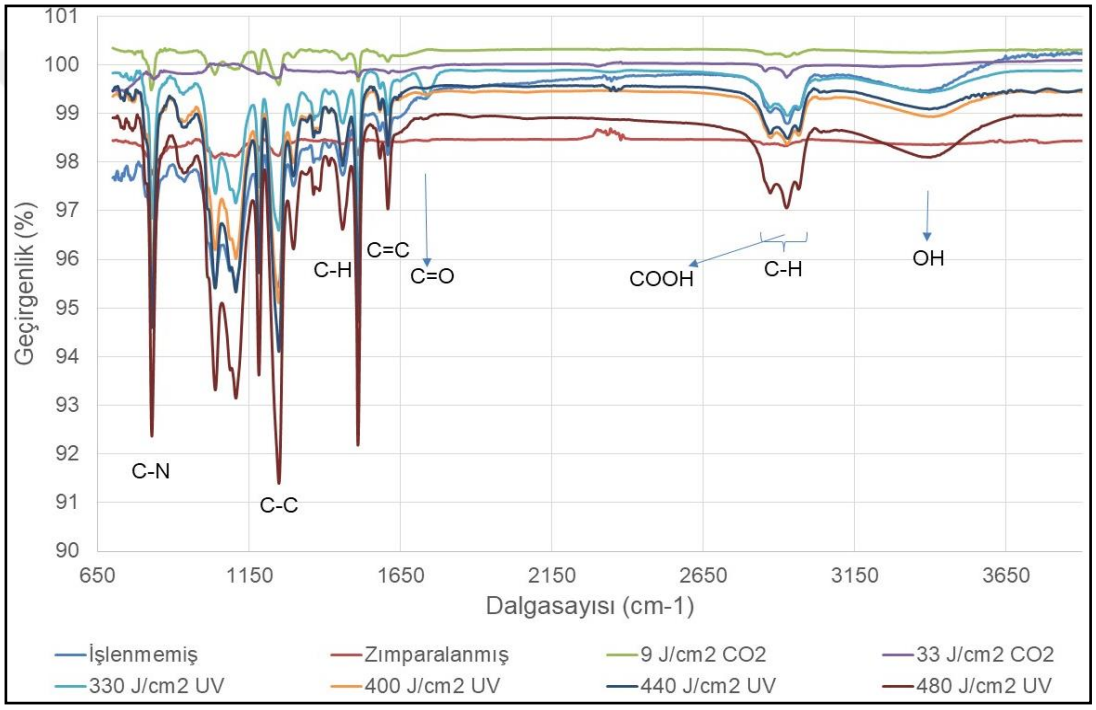
Çekme mukavemeti düşük çıkan ve 160 mJ/cm^2 lazer akısı ile işlenen yüzeylerin elektron mikroskobu görüntüleri (Şekil 5.35-a) incelendiğinde fiberlerin yüzeyindeki epoksinin az miktarda kaldırıldığı, bölgesel olarak çok az da olsa fiberlerin açığa çıktığı görülmektedir. Ayrıca kaldırılan epoksi yüzeyden tam olarak uzaklaştırılamadığı için yapışma dayanımını da olumsuz etkilediği sonucuna varılmaktadır. Lazer akısının 400 mJ/cm^2 arttırıldığı ve çekme mukavemetinin maksimum ulaştığı örneklerde (Şekil 5.35-b) ise fiber yüzeylerinin büyük oranda açığa çıktığı gözlenmektedir. Ancak bu yüzeylerde dikkati çeken nokta, fiberlerin üst yüzeylerindeki epoksi kaldırılırken fiberlerin yanal yüzeylerindeki epoksinin kaldırılmadığı görülmektedir. Lazer akısı UV lazer için optimum olarak belirlenen 400 mJ/cm^2 üzerine çıktığında (Şekil 5.35-c) delaminasyon etkisine neden olabilecek fiberleri saran epoksinin yüzeyden uzaklaştırıldığı ve aynı zamanda fiber kırılma hasarlarının da oluşmaya başladığı gözlenmektedir. Bu nedenle 440 mJ/cm^2 ve üzerindeki lazer akılarında çekme dayanımı düşmektedir.



Şekil 5.35. UV Lazer ile farklı akılarda yüzeyleri işlenen CFRP örneklere ait elektron mikroskobu görüntüleri

Temelde iki lazerin foton enerjisindeki fark, ablasyon mekanizmalarında farklılığa neden olmaktadır**.** Ultraviyole (UV) lazer yüksek foton enerjisinden dolayı soğuk aşındırma olarak adlandırılan foto-kimyasal aşındırma yaparken, IR (CO_2) lazer düşük foton enerjisinden dolayı ısısal aşındırma yapar. Foto-kimyasal aşındırmada foton enerjisi malzemeyi oluşturan kimyasal bağları koparabilecek seviyededir bu nedenle ısıdan etkilenmiş bölge oluşumu nispeten çok azdır. Bu noktada UV lazerin yüzeyde neden olduğu kimyasal değişimler yapıştırma ile birleştirmede mukavemet artışına

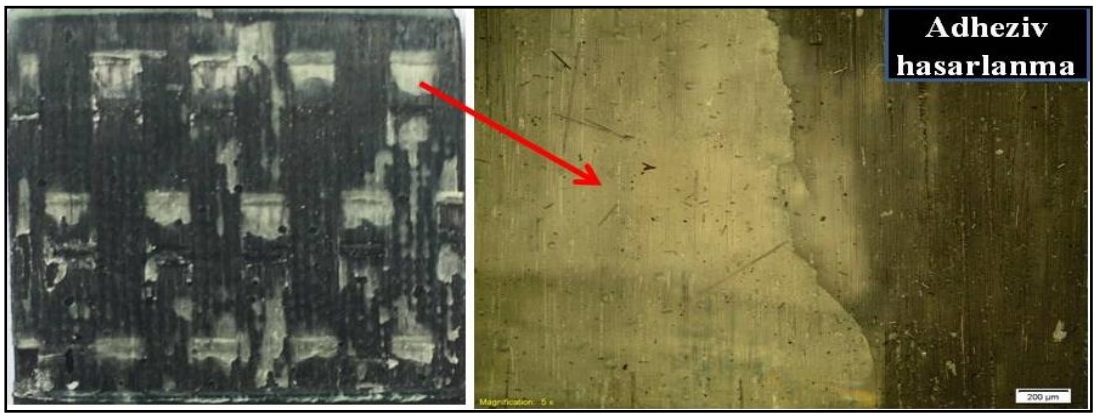
etkisi olan hidroksil ve karboksil gruplarının artışına neden olmaktadır. Şekil 5.36'da görülen FTIR-ATR sonuçları incelendiğinde UV lazer ile yüzeyleri hazırlanan örneklerin hidroksil ve karboksil bantlarının IR lazere göre daha şiddetli oldukları görülmektedir. Bu durum yapıştırma ile birleştirmede dayanımı arttıran iki temel etkenden biri olan elektrostatik bağların artmasını sağlamaktadır. UV lazer ile yüksek akılarda işlenen (480 mJ/cm^2) ve FTIR-ATR grafiğinden görüldüğü üzere hidroksil ve karboksil bantlarının en şiddetli çıktığı örnekte çekme dayanımlarının nispeten düşük çıkması, yüksek lazer akısından dolayı üst katmandaki fiberlerin kırılma hasarından kaynaklandığı düşünülmektedir (Şekil 5.35).



Şekil 5.36. İşlenmemiş, zımparalanmış, CO_2 ve UV lazer ile farklı enerji akılarında işlenmiş örneklere ait FTIR-ATR sonuçları

Şekil 5.37 - Şekil 5.41'de farklı UV lazer akılarında yüzeyleri işlenmiş CFRP/CFRP yapıştırma bağlantılarının tekil bindirme çekme testleri sonrasında çekilen optik mikroskop görüntüleri verilmiştir. Şekil 5.37 - Şekil 5.41'de genel olarak iki farklı hasar mekanizmasının ön plana çıktığı gözlenmiştir; ilk olarak düşük UV lazer akılarında (Şekil 5.37 ve Şekil 5.38) yapıştırıcı/CFRP malzeme yüzeyinde oluşan adhezif hasarlanma, ikinci olarakta yüksek lazer akılarında (Şekil 5.39, Şekil 5.40, Şekil 5.41) oluşan fiber yırtılma hasarlanmasıdır. CFRP/CFRP yapıştırma bağlantılarının kayma dayanımı değerlerinin 160 mj/cm^2 ve 240 mj/cm^2 lazer akıları

için sırasıyla 20,2 MPa ve 19,49 MPa olarak bulunduğu Şekil 5.34'te belirtilmiştir. Düşük lazer akılarında elde edilen kayma dayanımı değerlerinin yüksek lazer akılarında yüzeyleri işlenmiş CFRP/CFRP yapıştırma bağlantılarının kayma dayanımı değerlerinden düşük çıkmasının sebebinin adhezif hasarlanma olduğu düşünülmektedir. Bu tip hasarlanmada yapıştırıcı ile malzeme ara yüzeyinden ayrılma gözlendiği için iyi bir tutunma sağlanamadığı öngörülmektedir. Yüksek lazer akılarında ise gözlenen fiber yırtılma hasarlanmalarında ise yapıştırıcı ile CFRP malzeme yüzeyi iyi bir şekilde ara yüzey oluşturmuşlardır. Hasarlanma ara yüzeyde oluşmamış, yapıştırıcının kayma dayanımının iyi olması ve UV lazer uygulaması esnasında kaldırılan epoksi reçinenin yerine iyi bir şekilde dolup fiber/yapıştırıcı ara yüzeyi sağlandığı için yükleme esnasında fiberler yırtılma şeklinde hasarlanmıştır. Şekil 5.34'te belirtildiği gibi 400 mj/cm^2, 440 mj/cm^2 ve 480 mj/cm^2 UV lazer akıları ile yüzeyi işlenen yapıştırma bağlantılarının kayma dayanımı değerleri işlenmemiş ve zımparalanmış CFRP/CFRP yapıştırma bağlantılarından yüksek çıkmıştır. Yüksek kayma dayanımı değerlerinin çıkma sebebinin uygun lazer akıları ile işlenen yüzeylerde açığa çıkan karbon fiberler ile yapıştırıcı arasındaki ara yüzey uyumundan kaynaklandığı düşünülmektedir.



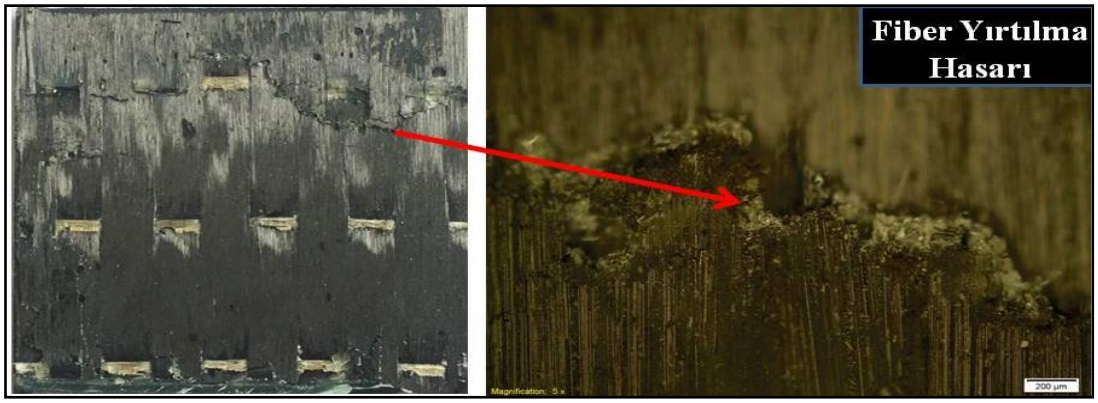
Şekil 5.37. 160 mj/cm^2 akı değerinde UV lazer ile işlenmiş ve sonrasında çekme testine tabii tutulan örneklerin hasar analizleri



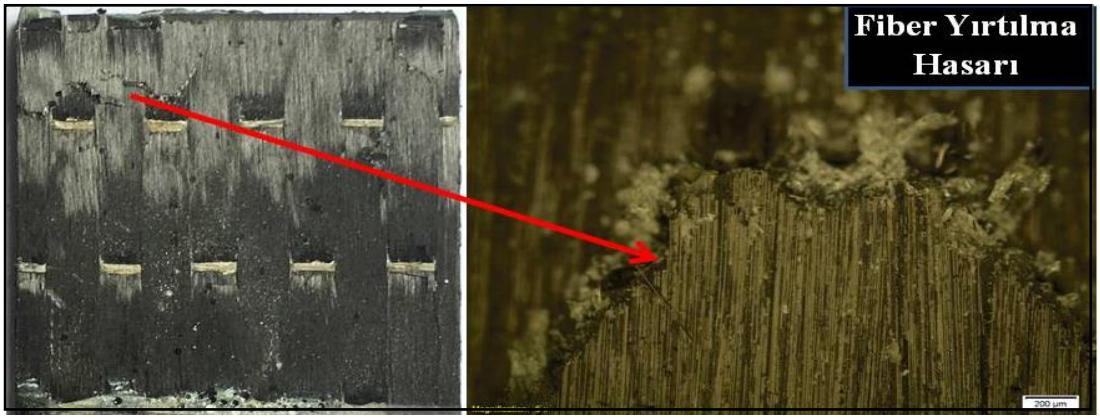
Şekil 5.38. 240 mj/cm^2 akıl değerinde UV lazer ile işlenmiş ve sonrasında çekme testine tabii tutulan örneklerin hasar analizleri



Şekil 5.39. 400 mj/cm^2 akı değerinde UV lazer ile işlenmiş ve sonrasında çekme testine tabii tutulan örneklerin hasar analizleri



Şekil 5.40. 440 mj/cm^2 akı değerinde UV lazer ile işlenmiş ve sonrasında çekme testine tabii tutulan örneklerin hasar analizleri



Şekil 5.41. 480 mj/cm^2 akı değerinde UV lazer ile işlenmiş ve sonrasında çekme testine tabii tutulan örneklerin hasar analizleri

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Gerçekleştirilen bu tez çalışmasında havacılıkta kullanılan kompozit/kompozit bağlantılarının adhezif birleştirme çekme dayanımını arttırmak için kompozit malzemelerin yüzeylerinde üretim kaynaklı var olan kirliliğin azaltılması ve mekanik kilitleme sağlayabilecek yapıların oluşturulması hedeflenmiştir. Bu amaca yönelik olarak tezin ilk adımı tez çalışmasına uygun bir yapıştırıcının belirlenmesi olmuştur. Günümüzde kompozit malzemelerin yapıştırılmasında ince film ve sıvı olmak üzere iki farklı yapıştırıcı kullanılmaktadır. Her yapıştırıcının kendine özgü avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır. İnce film yapısındaki yapıştırıcılar yapışmada genelde daha yüksek dayanımlar sağlarken, yapıştırma sürecinde basınç uygulanması gerekliliği nedeniyle pratik kullanımdan uzaklaşmaktadırlar. Ayrıca taşıma ve saklama koşularının sıvı yapıştırıcılara göre daha zor ve alt yapı ihtiyacı doğurduğundan ek maliyetler getirmektedir. İlk etapta belirlenen iki yapıştırıcıdan kayma dayanımı yüksek olan ve aynı zamanda kürleme süresinin uygunluğu nedeniyle Loctite EA 9396 Aero'nun kullanılmasına karar verilmiştir.

İkinci aşamada lazer ile işlenmiş yüzeylere referans oluşturmak amacıyla yüzey işleme tekniklerinden en yaygın kullanılan zımparalanmış yüzeylerin yapıştırma işlemi gerçekleştirilmiştir. CFRP kompozit malzemelerin yapıştırma ile birleştirme işleminde sonucu etkileyen en önemli parametrelerden olan optimum yapıştırıcı kalınlığını belirlemek için yapıştırıcı kalınlığı 30-500µm aralığında 50µm aralıklarla değişen örnekler hazırlanmıştır. Örnekler arasında kalınlığı ayarlayabilmek için ±10µm hassasiyetle kontrol sağlayabilen mikrometrelerden oluşan bir düzenek hazırlanmıştır. Tez çalışmasında kullanılan yapıştırıcı için (Loctite EA 9396) maksimum çekme dayanımına 50µm yapıştırıcı kalınlığında ve 22,7MPa olarak elde edilmiş ve referans değer olarak kayıt altına alınmıştır.

Optimum yapıştırıcı kalınlığının belirlenmesi için yapılan çalışma ile zımparalanmış yüzeylerde elde edilen en düşük dayanım uygun yapıştırma kalınlığında %62 oranında artmıştır. Lazer ile işlenmiş yüzeyler için yapılan yapıştırıcı kalınlığının belirlenmesi çalışmasında ise bu oran %82'lere ulaşmaktadır. Bu sonuç yapıştırıcı türüne bağlı olarak en iyi yapışma dayanımının sağlanması için yapıştırıcı kalınlığının tespit edilmesi gerekliliğini kanıtlamaktadır.

Tez çalışmasında CO_2 lazer ile yüzey işleme çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Yüzey işleme çalışmalarının temel amacı fiberlere zarar vermeden yüzeydeki kalıp ayırıcı kimyasalların temizlenmesi olarak belirlenmiştir.

Lazer ile yapılan çalışmaların ilk aşaması yüzey işleme çalışmalarında sonucu etkileyen en önemli parametre olan lazer akısının optimizasyonu olmuştur. Literatür incelendiğinde adhezif yapışma için uygun bir yüzey; kirliliklerden arındırılmış, yüzey enerjisi arttırılmış (temas açısı azaltılmış), mekanik kilitleme sağlayacak pürüzlülüğe sahip ve aynı zamanda yüzeyler arasında elektrostatik kuvvetler oluşturabilecek kimyasal özeliklere sahip yüzeyler olarak tanımlanmaktadır. CO_2 lazer ile yüzey işleme sürecinde düşük akılardan başlanarak yüzeyde hiç epoksinin kalmadığı ve fiberlerin açığa çıktığı akı değerlerine kadar yüzey işleme çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Bir malzemenin yüzey enerjisi; diğer malzemeler üzerindeki çekici gücün bir ölçüsü olarak tanımlanmaktadır. Bu nedenle yüzey enerjisi yüzeyi karakterize eden önemli tekniklerden biridir ve yüzeye damlatılan su veya farklı sıvıların temas açılarının ölçülmesi ile belirlenir. CO_2 lazer ile yüzeyleri işlenen CFRP kompozit örneklerin temas açıları incelendiğinde işlenmemiş yüzeyler için 54º ve zımparalanmış yüzeyler için 69,5º olan temas açısının lazer akısına bağlı olarak azaldığı gözlenmiştir. Düşük lazer akılarda iki eksende simetrik bir dağılım gösteren su damlasının temas açısı 21 J/cm^2 lazer akısına kadar yavaşça düşüş göstermiştir. 12 J/cm^2 lazer akısından itibaren işlenen yüzeylerin temas açılarında fiberlerin uzanım doğrultusunda bir azalma olduğu görülmüştür. Lazer akısı 33 J/cm^2 değerine ulaştığında temas açısında hızlı bir düşüş gözlenmiş ve 16º olarak ölçülmüştür. Lazer akı değeri 62 J/cm^2'ye ulaştığında yüzey temas açısı yaklaşık 10º'ye kadar düşmüştür. Ancak yüksek akı değerlerinde (33J/cm^2 ve 62J/cm^2) yüzeyde fiber hasarları net bir şekilde gözlenmiştir. Temas açısındaki azalma adhezif birleştirme için pozitif bir gösterge olsa da fiber yırtılmaları ve delaminasyon riski ortaya çıkmaktadır. Düşük

lazer akısı değerinde (6 J/cm^2) yüzey pürüzlülüğü lazer parlatma etkisi nedeni ile 0,5 µm'nin altına düşmüş, lazer akısında meydana gelen artış ile yüzey pürüzlülüğü artmış ve buna bağlı olarak ta yüzeylerin temas açılarında azalma gözlenmiştir.

Yüzeylerin kimyasal yapısını incelemek için gerçekleştirilen spektroskopik analizlerde ise lazer akı değerinde meydana gelen artış ile yüzey kirliliğinde azaldığı gözlenmiş, ancak çekme testine tabii tutulan 33 J/cm^2 lazer akı değerinde dahi az da olsa silisyum tespit edilmiştir. Çekme testi sonuçlarına göre lazer akısında meydana gelen artış ile çekme dayanımında bir artış olmuştur. Lazer akısındaki artışa devam edildiğinde çekme dayanımında hızlı bir azalma olduğu gözlenmiştir (18 J/cm^2 ve 33 J/cm^2). Elde edilen sonuçlar spektroskopik verilen ile değerlendirildiğinde; düşük lazer akısında (6 J/cm^2) kirlilik ajanının yüzeyden tamamen kaldırılamadığı, lazer akısında (9 J/cm^2) meydana getirilen artışın yüzeydeki kirlilik oranının azalmasına neden olduğu ve bu sayede çekme dayanımının maksimum değerine ulaştığı (23,72 MPa) sonucuna varılmıştır. Lazer akısı 18 j/cm^2'ye çıkartıldığında dayanımda sert bir düşüş gözlenmesi; 18 j/cm^2 ve üstü lazer akısı değerlerinin CO_2 lazer ile yüzey işleme için yüksek değerler olduğu ve üst katmandaki fiberlerin çevresini saran reçinenin ısıl etki ile delaminasyon kusuru ve fiber kırılma hasarları nedeniyle mukavemetin düştüğü sonucuna varılmıştır.

Lazer ile gerçekleştirilen çalışmalarda lazer akı değerlerinde gereğinden fazla gerçekleştirilen artışın kayma dayanımı değerlerinde azalmalara neden olduğu tespit edilmiştir. Lazer akısının optimizasyonu için gerçekleştirilen çalışma ile elde edilen en düşük dayanım uygun parametreler kullanıldığında %43 oranında arttırılabileceği belirlenmiştir. IR dalgaboyunda ışıma veren CO_2 lazer ile işlenen yüzeylerde referans örnekleri olan işlenmemiş ve zımparalanmış yüzeylere göre sırasıyla %7,8 ve %4,4 oranında artış sağlanmıştır.

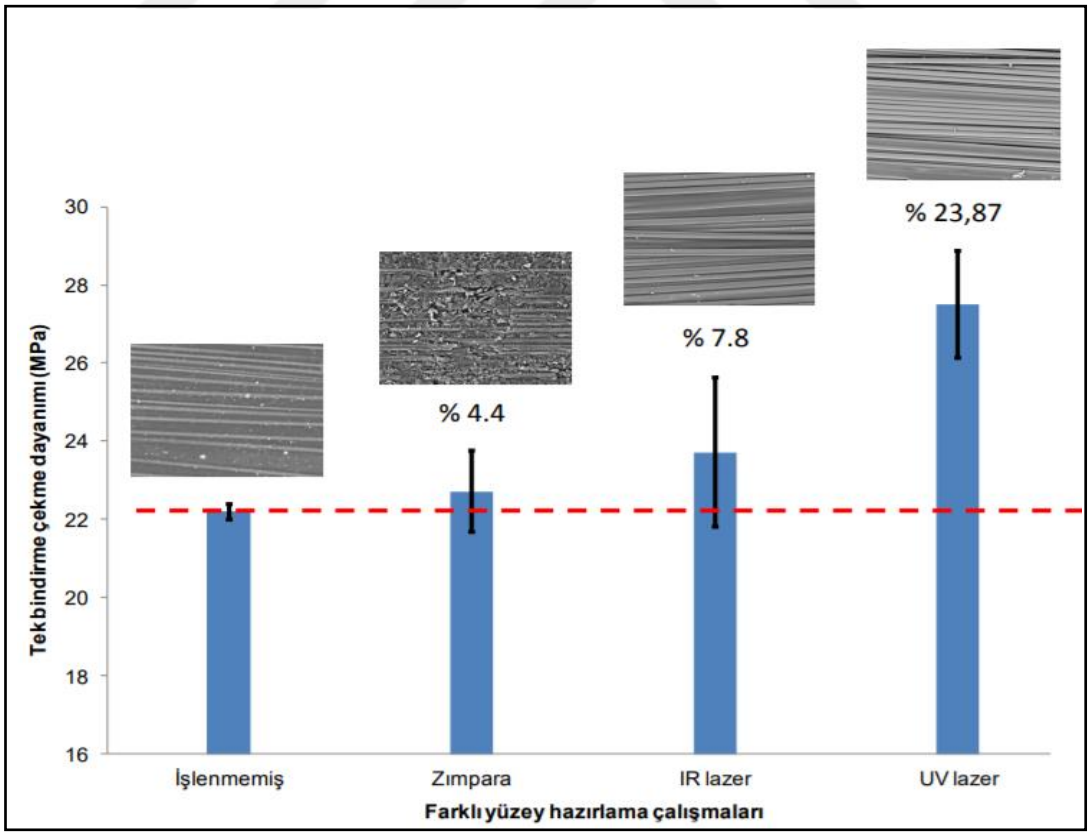
CO_2 lazer ile gerçekleştirilen uygun lazer akısı çalışmalarında CFRP/CFRP yapıştırma numunelerinin tekil bindirme çekme testleri sonrasında elde edilen hasar mekanizmaları incelendiğinde 9 J/cm^2 enerji akısı ile işlenen yüzeylerde kohezif hasarlanma oluşurken, 33 J/cm^2 enerji akısı ile işlenen numunede ise kohezif hasarlanmanın yanısıra fiber demetlerindeki yırtılma hasarlanması da olduğu tespit edilmiştir.

Tez süresince yüzey işleme çalışmalarında kullanılan diğer bir lazer ise ultraviyole bölgesi 355nm dalgaboyunda ışıma veren Nd:YAG lazerin III. harmoniğidir. Lazer dalgaboyu ve atım süresi bakımından farklılık gösteren bu lazer IR lazerin aksine foto-kimyasal aşındırma mekanizması ile aşındırma gerçekleştirmektedir. Genel olarak UV lazer ile işlenen yüzeyler incelendiğinde epoksi malzemeden oluşan lif benzeri yapıların tüm lazer akı değerlerinde yüzeyde yer aldığı gözlenmiştir. Yüksek büyütme optik mikroskop görüntülerinde fiber yüzeyleri incelendiğinde ise IR lazer ile işlenen yüzeylere göre fiber yüzeylerinde hiçbir kalıntının kalmadığı gözlenmiştir. UV lazer ile en uygun lazer akı değerini belirlemek için yüzeyler 160 mJ/cm^2-480 mJ/cm^2 aralığında işlenmiştir. Düşük lazer akılarında referans örneklere göre çekme dayanımında azalma olduğu gözlenmiştir. Lazer akısındaki artış ile çekme dayanımında artış gözlenmiş ve maksimum değerine 400 mJ/cm^2 lazer akısında ulaşılmıştır. Yaklaşık 27,5 MPa değerine ulaşan çekme dayanımı ile işlenmemiş örneğe göre %23,87 zımparalanmış örneklere göre ise %21,1'lik artışlar sağlanmıştır. Bu lazer akısı ile işlenen yüzeye ait temas açısı diğer lazer akıları ile işlenen yüzeylere göre en düşük değerine ulaşmıştır. Lazer akısının da ki artışa devam edildiğinde çekme dayanımında tekrar bir azalma gözlenmiştir.

Elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde; çalışmalarda kullanılan yapıştırıcının kompozit malzemenin matris elemanını oluşturan epoksi ile uyumlu bir kimyasal yapıya sahip olduğu sonucuna varılmaktadır. Düşük lazer akıları ile işlenen yüzeyler bu uyumluluğu olumsuz yönde etkilerken uygun lazer akı değerine ulaşıldığında kazançlar kayıplardan fazla olmakta ve çekme dayanımı referans örneklere göre artış gözlendiği sonucuna varılmaktadır. Gereğinde fazla arttırılan akı değerinde ise IR lazerde olduğu gibi her ne kadar foto-kimyasal bir aşındırma süreci olsa da delaminasyon ve fiber hasarlarına neden olduğu sonucu çıkarılmaktadır.

Farklı UV lazer akılarında yüzeyleri işlenmiş CFRP/CFRP yapıştırma bağlantılarında tekil bindirme çekme testleri sonucunda oluşan hasar mekanizmaları incelendiğinde ise genel olarak iki farklı hasar mekanizmasının ön plana çıktığı gözlenmiştir; ilk olarak düşük UV lazer akılarında yapıştırıcı/CFRP malzeme yüzeyinde oluşan adhezif hasarlanma, ikinci olarakta yüksek lazer akılarında oluşan fiber yırtılma hasarlanmasıdır.

Tez çalışmasında gerçekleştirilen çalışmaların tamamının sonuçlarını içeren özet bir grafik Şekil 6.1'de görülmektedir. Yapılan bütün çalışmalarda yapıştırıcı kalınlığı 50 µm'dir. İşlenmemiş kompozitlerin yapıştırılması ile elde edilen çekme dayanımı sonucunu 22 MPa civarında çıkmıştır. Zımparalama ile işlenmiş kompozit yüzeylerinin yapıştırılması sonucu elde edilen çekme dayanımı ise 22,7 MPa çıkmıştır. Zımparalama sonucunda %4,4'lük bir mukavemet artışı gerçekleştirilmiştir. CO_2 lazer ile yapılan yüzey temizleme işlemi sonrası yapılan yapıştırma sonucunda çekme dayanımı 23,7 MPa olarak elde edilmiştir. CO_2 lazer zımparaya göre mukavemeti daha fazla arttırmıştır. Ancak birbirine yakın sonuçlar çıkmıştır. UV lazer ise bu işlemlere göre çok daha iyi sonuç vermiştir. UV lazer ile yapılan yüzey temizleme işleminden sonra yapılan yapıştırma sonucunda çekme dayanımı 27,5 MPa çıkmıştır. Buda işlenmemiş yüzeyle karşılaştırıldığında %23,87'lik bir artış anlamına gelmektedir. UV lazer ile yüzey temizleme işleminde deleminasyon etkisi olmaması ve yüzeyde karboksil ve hidroksil grupları oluşturduğu için kimyasal bağıda güçlendirerek mukavameti daha fazla arttırdığı düşünülmektedir.



Şekil 6.1. Farklı yüzey işleme teknikleri kullanılarak yüzeyleri işlenen ve adhezif olarak birleştirilen örneklerin tek bindirme kayma dayanımı sonuçları

KAYNAKLAR

[1] Banea M.D, Da Silva L.F.M, Adhesively Bonded Joints in Composite Materials: An Overview, *The Journal of Materials: Design And Applications*, DOI: 10.1243/14644207JMDA219.

[2] Buchman A., Rotel M., Dodiuk-Kenig H., Laser Surface Treatment/Modification to Enhance Adhesion, Editors: Mittal K.L., Bahners T., *Laser Surface Modification and Adhesion*, 1st ed., Wiley, New York, 3-54, 2015.

[3] Onat A., Metaluriji Programı Kompozit Malzemeler Ders Notu, Sakarya Üniversitesi,http://content.lms.sabis.sakarya.edu.tr/Uploads/78375/31395/kompozit_malzemeler_ders_notu.pdf/(Ziyaret Tarihi: 10.06.2018).

[4] Zor M., Kompozit Malzemelerle ilgili Genel Bilgiler, Dokuz Eylül Üniversitesi, http://kisi.deu.edu.tr/mehmet.zor/composite%20materials/2-Genel_bilgiler.pdf/(Ziyaret Tarihi: 10.06.2018).

[5] Demirel A., Karbon Elyaf Takviyeli Epoksi Kompozit Malzemelerin Karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2007, 212872.

[6] Morkavuk S., Karbon Fiber Takviyeli Plastiklerin Kuru ve Kriyojenik İşleme Koşullarında Frezelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 2016, 453456.

[7] Salstela J., Influence of Surface Structuring on Physical and Mechanical Properties of Polymer-Cellulose Fiber Composites and Metal-Polymer Composite Joints, Department of Chemistry University of Eastern Finland, http://epublications.uef.fi/pub/urn_isbn_978-952-61-1631-0/urn_isbn_978-952-61-1631-0.pdf/(Ziyaret Tarihi: 10.06.2018).

[8] Kınayyiğit F., Cam Elyaf Takviyeli Plastik Kompozitler, Gebze Teknik Üniversitesi, http://doczz.biz.tr/doc/135661/camelyaf%C4%B1-takviyeli-kompozitlerde-dolgu-maddelerinin-mekanik/(Ziyaret Tarihi: 10.06.2018).

[9] Kumar V., Singh M., Latest Advancements in Carbon Based Fiber, A Review, *International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development*, 2017, **7**(4), 327-340.

[10] Red C., Aerospace Will Continue To Lead Advanced Composites Market in 2006., *Composites Manufacturing,* 2006, **7**, 24-33.

[11] Xiaosong H., Fabrication and Properties of Carbon Fibers, *Materials,* 2009, **2**, 2369-2403.

[12] URL-1: http://lifpolimer.btu.edu.tr/index.php?sid=6654/, (Ziyaret Tarihi: 10.06.2018)

[13] Tekinbüğrü C.M., Kompozit Zırh Malzemeleri, Sakarya Üniversitesi, http://www.authorstream.com/presentation/cmtcmt-2465379-kompozit-rh-malzemeleri/(Ziyaret Tarihi: 10.06.2018)

[14] URL-2: https://www.atsb.gov.au/media/27758/ar2007021.pdf/, (Ziyaret Tarihi: 10.06.2018)

[15] Sridevi K., Failure Load Estimation of Pin Loaded Composite Plates Using Mathematical Models, *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology,* 2016, **5**(5), 7129-7134.

[16] Altan G., Değişik Sıcaklık Ve Nem Etkisinde Çalışan Birleştirilmiş Kompozit Malzemelerin Yorulma Mukavemetlerinin İncelenmesi, Doktora Tezi, Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli, 2009, 245797.

[17] Loctite C., Part:4, Editors: Loctite C, *Loctite Worldwide Design Handbook*, 2nd ed., Erasmusdruck Gmbh Mainz, Germany, 452, 1998.

[18] Broughton W.R., Crocker L.E., Gower M.R.L., Design Requirements for Bonded and Bolted Composite Structures, *NPL Materials Centre National Physical Laboratory Teddington*, MATC(A)65, 3, 2002.

[19] Mallick P.K., Chapter 3, Editor: Dekker M., *Fiber-Reinforced Composites*, 3rd ed., CRC Press, New York, 556, 2007

[20] Fischer F., Kreling S., Jäschke P., Frauenhofer M., Kracht D., Dilger K., Laser Surface Pre-Treatment of CFRP for Adhesive Bonding in Consideration of The Absorption Behaviour, *The Journal Of Adhesion*, 2012, **88**(4-6), 350-363.

[21] Taib A., Boukhili R., Achiou S., Gordon S., Boukehili H., Bonded Joints With Composite Adherends. Part I. Effect of Specimen Configuration, Adhesive Thickness, Spew Fillet and Adherend Stiffness on Fracture, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2006, **26(**4), 226-236.

[22] URL-3: http://www.adhesiveandglue.com/adhesive-definition.html, (Ziyaret Tarihi: 10.06.2018).

[23] Mazumdar S.K., *Joining of Composite Materials*, 2nd ed., CRC Press, Florida, 2001.

[24] Davis M., Bond D., Principles and Practices of Adhesive Bonded Structural Joints and Repairs, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 1999, **19**(2–3), 91-105.

[25] Ferreira N.M.A.J, Effect Of Grooves On The Strength Of Adhesively Bonded Joints, Dissertation of Integrated Master, Porto University, Mechanical Engineering, Porto, 2010.

[26] Monteiro D.F., Análise Do Comportamento À Fractura De Juntas De Aço Efectuadas Com Adesivos Estruturais, Tese De Mestrado Integrado, Universidade Do Porto, Faculdade De Engenharia Da, Porto, 1995.

[27] Carbas R.J.C., Estudo Paramétrico De Juntas Adesivas Pelo Método De Taguchi, Tese De Mestrado Integrado, Universidade Do Porto, Faculdade De Engenharia Da, Porto, 2008.

[28] Edward P.M., *Handbook Of Adhesives And Sealants*, 2nd ed., Mcgraw Hill, New York, 2007.

[29] Volkersen O., Die Nietkraftoerteilung in Zubeanspruchten Nietverbindungen Mit Konstanten Loschonquerschnitte, *Luftfahrtforschung*, 1938, **15**, 41-47.

[30] Adams R.D., Comyn J., Wake W.C., *Structural Adhesive Joints in Engineering*, 2nd ed., Chapman and Hall, London, 1997.

[31] Malka R., Zahavi J., Shoshana T., Alisa B., Hanna D., Pre-Bonding Technology Based on Excimer Laser Surface Treatment, *Applied Surface Science*, 2000, **154**, 610-616.

[32] Maksimainen R., Preparation and Characterization of Composite Surfaces for Adhesive Joining, Master of Science Thesis, Tampere University of Technology, Technical Polymer Materials, Finland, 2016.

[33] Bénard Q., Fois M., Grisel M., Peel Ply Surface Treatment for Composite Assemblies: Chemistry And Morphology Effects, *Applied Science and Manufacturing*, 2005, **36**(11),1562-1568.

[34] Mazumdar S.K., *Joining of Composite Materials, in: Composites Manufacturing: Materials, Product, and Process Engineering*, 1st ed., CRC Press, Florida, 2001.

[35] Bénard Q., Fois M., Grisel M., Laurens P., Surface Treatment of Carbon/Epoxy and Glass/Epoxy Composites With an Excimer Laser Beam, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2006, **26**(7), 543-549.

[36] Basting P.D., Marowsky G., *Excimer Laser Technology*, 1st ed., Springer, Berlin Heidelberg, 2005.

[37] Mittal K.L., Bahners T., *Laser Surface Modifcation and Adhesion*, 1st ed., Wiley, New York, 2015.

[38] Bigwood D.A., Crocombe A.D., Elastic Analysis and Engineering Design Formulae for Bonded Joints, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 1989, **9**(4), 229-42.

[39] Adams R.D., Mallick V. A., Method For The Stress Analysis of Lap Joints, *The Journal of Adhesion*, 1992, **38**(3),199-217.

[40] Arenas J.M., Narbon J.J., Alia C., Optimum Adhesive Thickness in Structural Adhesives Joints Using Statistical Techniques Based on Weibull Distribution, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2010, **30**(3), 160-165.

[41] Adams R.D., Peppiatt N.A., Stress Analysis of Adhesively Bonded Lap Joints, *Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, 1974, **9**, 185-96.

[42] Crocombe A.D., Global Yielding as A Failure Criterion for Bonded Joints, *International Journal of Adhesion and Adhesives,* 1989, **9**(3), 145-53.

[43] Gleich D.M., Van Tooren M.J.L., Beukers A., Analysis and Evaluation of Bondline Thickness Effects on Failure Load in Adhesively Bonded Structures, *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2001, **15**(9), 1091-101.

[44] Tiwaria S., Bijweb J., Surface Treatment of Carbon Fibers - A Review, *2nd International Conference on Innovations in Automation and Mechatronics Engineering*, Gujarat, India, 7-8 March 2014.

[45] Sezer H.K., Short Review on Laser Texturing and Cleaning Carbon Fibre Composites for Aerospace Applications, *Journal of Polytechnic*, 2016, **19**(4), 623-631.

[46] Raghavendra N.V., Krishnamurthy L., *Engineering Metrology and Measurements*, 1st ed., Oxford University Press, New Delhi, 2013.

[47] Leach R., Introduction to Surface Texture Measurement, Editor: Leach R., *Optical Measurement of Surface Topography*, 1st ed., Springer, Berlin Heidelberg, 1-14, 2011.

[48] Boutar Y., Naïmi S., Mezlini S., Da Silva L.F.M., Hamdaoui M., Ali M.B.S., Effect of Adhesive Thickness and Surface Roughness on The Shear Strength of Aluminium One-Component Polyurethane Adhesive Single-Lap Joints for Automotive Applications, *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2016, **30**(17), 1913-1929.

[49] Packham D.E., Surface Energy, Surface Topography and Adhesion, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2003, **23**(6), 437-448.

[50] Oktav N., Akıllı Nanayüzey, http://hilminamli.baun.edu.tr/calisma/p2009-2010/Nuri_Oktav_Akilli_Nanoyuzeyler.pdf (Ziyaret Tarihi: 10.06.2018).

[51] Barnes G., Gentle I., *Interfacial Science: An Introduction*, 2nd ed., Oxford University Press Inc., New York, 2005.

[52] Belcher M.A., Wohl C.J., And Connell J.W., Laser Surface Preparation and Bonding of Aerospace Structural, *Composıtes, ICCM-17 17th International Conference on Composite Materials,* Edinburgh, United Kingdom, 27-31 July 2009.

[53] Yokozeki T., Ishibashi M., Kobayashi Y., Shamoto H., Iwahori Y., Evaluation of Adhesively Bonded Joint Strength of

CFRP With Laser Treatment, *Advanced Composite Materials*, 2016, **25**(4), 317-327.

[54] Nattapat M., Marimuthu S., Kamara A.M., Nekouie M.R., Laser Surface Modification of Carbon Fiber Reinforced Composites, *Materials and Manufacturing Processes*, 2015, **30**, 1450-1456.

[55] Demirbilek R., Lazer Ders Notları, Yıldız Üniversitesi, http://www.yildiz.edu.tr/~oscg/lazer.html (Ziyaret Tarihi: 10.06.2018).

[56] Kıyak İ., Laser Safety Officer, http://www.ilkmak.com/dokuman/LASER_SAFETY_OFFICER.pdf (Ziyaret Tarihi: 10.06.2018).

[57] Silfast W.T., *Laser Fundamentals*, 1st ed., Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, 1996.

[58] Mittal K.L, The Role of The Interface in Adhesion Phenomena, *Polymer and Engineering Science,* 1977, **17**, 467-473.

[59] Miralles M., Laser Hardining of Cutting Tools, Master of Science Programme, Lulea Tekniska Universitet, Department of Applied Physics and Mechanical Engineering Division of Engineering Materials, Sweden, 2003.

[60] Yao Y.L., Chen H., Zhang W., Time Scale Effects in Laser Material Removal, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2004, **26**(5-6), 598-608.

[61] Sidney S., *Guide to Laser Materials Processing*, 107th ed., Laser Institute of America, Orlando, 1993.

[62] Kurt T., Lazerin Çalışma Prensibi ve Lazer Çeşitleri, Electrolog, https://electrolog.blog/2017/12/27/lazerlazerin-calisma-prensibi-ve-lazer-cesitleri (Ziyaret Tarihi: 10.06.2018),

[63] URL-4: https://www.mcufreak.com/pwm-nedir-ne-ise-yarar/, (Ziyaret Tarihi: 10.06.2018).

[64] Kreling S., Fischer F., Delmdahl R., Gäbler F., Dilger K., Analytical Characterization of CFRP Laser Treated by Excimer Laser Radiation, *Physics Procedia,* 2013, **41**, 282-290.

[65] Sugioka K., Meunier M., Pique A., *Laser Precision Microfabrication*, 1st ed., Springer, Berlin, 2010.

[66] Caprino G., Tagliaferri V., Maximum Cutting Speed in Laser Cutting of Fiber Reinforced Plastics, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 1998, **28**(4), 389-398.

[67] Leitza K.H., Redlingshöfera B., Regc Y., Otto A., Schmidt M., Metal Ablation With Short and Ultrashort Laser Pulses, *Physics Procedia*, 2011, **12**, 230-238

[68] Semaltianos N.G., Nanoparticles by Laser Ablation, *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, 2010, **35**, 105-124

[69] Fischer F., Kreling S., Laser Surface Pre-Treatment of CFRP for Adhesive Bonding in Consideration of The Absorption Behaviour, *The Journal of Adhesion*, 2012, **88**(4-6), 350-363.

[70] Dyer P.E., Excimer Laser Polymer Ablation: Twenty Years on, *Applied Physics A: Materials Science And Processing*, 2003, **77**(2), 167-173.

[71] Pham D., Tonge L., Cao J., Wright J., Papiernik M., Harvey E., Nicolau D., Effects of Polymer Properties on Laser Ablation Behaviour, *Smart Materials and Structures*, 2002, **11**(5),668-674.

[72] Fischer F., Kreling S., Dilger K., Pre-Treatment of CFRP for Adhesive Bonding Using Laser Radiation, *ECCM15*, Venice, Italy, 24-28 June 2012.

[73] Fischer F., Kreling S., Dilger K., Surface Structuring of CFRP by Using Modern Excimer Laser Sources, *Physics Procedia*, 2012, **39**, 154-160.

[74] Lamour G., Hamraou A., Contact Angle Measurements Using A Simplified Experimental Setup, *Journal of Chemical Education*, 2010, **87**(12), 1403-1407.

[75] Xu L., Drzal L.T., 2000, Influence of Interphase Chemistry on The Adhesion Between Vinyl Ester Resin and Carbon Fibers. *Proceedings of the 23rd Annual Meeting of "Adhesion Science for the 21st Century*, South Carolina, USA, 20-23 February 2000.

[76] Drzal L.T., Sugiura N., Hook D., 1996, The Role of Chemical Bonding and Surface Topography in Adhesion Between Carbon Fibers and Epoxy Matrices, *Chemical Engineering and Materials Science*, 1997, **4**(5), 337-354.

[77] Ohwaki T., Ishida, H., Comparison Between FTIR and XPS Characterization of Carbon Fiber Surfaces, *Journal of Adhesion*, 1995, **52**, 167-186.

[78] Sherwood P.M.A., Surface Analysis of Carbon and Carbon Fibers for Composites, *Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena*, 1996, **81**(3), 319-342.

[79] Bavi O., Bavi N., Shishesaz M., Geometrical Optimization of The Overlap in Mixed Adhesive Lap Joints, *The Journal of Adhesion*, 2013, **89**, 948-972.

[80] Öz Ö., Özer H., Hibrit Yapıştırma-Düzeninin Bindirme Bağlantı Mukavemetine Etkileri, *Mühendis ve Makina*, 2016, **679**, 63-72.

[81] Da Silva L.F.M., Rodrigues T.N.S.S., Figueiredo M.A.V., De Moura M.F.S.F., Chousal J.A.G., Effect of Adhesive Type and Thickness on The Lap Shear Strength, *The Journal of Adhesion*, 2006, **82**(11), 1091-115.

[82] Da Silva L.F.M., Carbas R.J.C., Critchlowb G.W., Figueiredo M.A.V., Browne K., Effect Of Material, Geometry, Surface Treatment And Environment On The

Shear Strength Of Single Lap Joints, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2009, **29**(6), 621-632

[83] ASTM D5573-99, Standard Practice for Classifying Failure Modes in Fiber-Reinforced-Plastic (FRP) Joints, *ASTM International*, West Conshohocken PA, 2012.

[84] Rahman, N.M., Sun C.T., Strength Calculation of Composite Single Lap Joints With Fiber-Tear-Failure, *Composites Part B: Engineering*, 2014, **62**, 249-255.

[85] Da Silva Lucas F.M., Adams R.D., Techniques to Reduce The Peel Stresses in Adhesive Joints With Composites", 2007, *International Journal Of Adhesion & Adhesives*, **27**, 227-235.

[86] Antończak A.J., Stępak B., Kozioł P.E., Abramski K.M., The İnfluence Of Process Parameters on The Laser-İnduced Coloring of Titanium, *Applied Physics A*, 2014, **115**(3), 1003-1013.

[87] Busscher H.J, Van Pelt A.W.J., De Boer P., De Jong H.P., Arends J., The Effect of Surface Roughening of Polymers on Measured Contact Angles of Liquids, *Colloids and Surfaces*, 1984, **9**(4), 319-331.

[88] Ryu S.K., Park B.J., Park S.J., XPS Analysis of Carbon Fiber Surfaces Anodized and Interfacial Effects in Fiber–Epoxy Composites, *Journal of Colloid and Interface Science*, 1999, **215**(1), 167-169.

[89] Tiwari S., Bijwe J., Surface Treatment of Carbon Fibers - A Review, *Procedia Technology*, 2014, **14**, 505-512.

[90] Qian X., Chen L., Huang J., Wang W., Guan J., Effect of Carbon Fiber Surface Chemistry on The Interfacial Properties of Carbon Fibers/Epoxy Resin Composites, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2013, **32**(6), 393-401.

[91] Park S.J., Kim K.S., Surface Characterization of Carbon Materials by X-ray Photoelectron Spectroscopy, Editors: Vilas A.M., Díaz J., *Microscopy: Science, Technology, Applications and Education*, 3rd ed., Formatex Research Center, Badajoz, 1905-1916, 2010.

[92] Tornow C., Schlag M., Junior L.C.M.L., Stübing D., Hoffmann M., Noeske P. M., Brune K., Dieckhoff S., Quality Assurance Concepts for Adhesive Bonding of Composite Aircraft Structures-Characterisation of Adherent Surfaces by Extended NDT, *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2015, **29**(21), 2281-2294.

[93] Palmieri F., Ledesma R., Cataldo D., Lin Y., Wohl C., Gupta M., Connell J., Controlled Contamination of Epoxy Composites With PDMS and Removal by Laser Ablation, *Long Beach 2016 Conference,* Long Beach, USA, 23-26 May 2016,

KİŞİSEL YAYINLAR VE ESERLER

[1] Bora M.O., **Erdogan Y.**, Akman E., Coban O., Oztoprak B.G., Demir A., Effect of Mechanical Interlocking With Various Micro Hole Formations on The Adhesive Bonding Strength of CFRP/CFRP Joints, *II International Conference on Engineering Technology and Innovation*, Budapest, Hungary, 7-11 March 2018.

[2] Coban O., **Erdogan Y.**, Akman E., Bora M.O. Oztoprak B.G., Demir A., Effects of The Laser Wavelength on The Pre-Treatment of Carbon Fiber-Reinforced Plastics for Adhesive Joint, *II International Conference on Engineering Technology and Innovation*, Budapest, Hungary, 7-11 March 2018.

[3] Akman E., **Erdogan Y.**, Bora M.O., Coban O., Oztoprak B.G., Demir A., Effect of Bondline Thickness on Adhesive Bonding of Laser Treated Carbon Fiber Reinforced Composites*, III International Conference On Engineering and Natural Sciences (Icens)*, Kiev, Ukraine, 2-6 May 2018.

[4] **Erdogan Y.**, Akman E., Coban O., Bora M.O. Oztoprak B.G., Demir A., Laser Structuring of CFRP Surface for Adhesive Bonding using Michelson İnterferometer and Laser Beam, *Turkish Physical Society 33rd International Physical Congress*, Bodrum, Turkey, 24 May 2017.

ÖZGEÇMİŞ

1991 yılında Konya'da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini İzmit'te tamamladı. 2009 yılında girdiği Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mekatronik Mühendisliği Bölümü'nden 2014 yılında Mekatronik Mühendisi olarak mezun oldu. Çift anadal programı kapsamında 2016 yılında Elektronik ve Haberleşme Mühendisi olarak mezun oldu. 2015 yılında Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektro-Optik Sistem Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans öğrenimine başladı. 2014 yılında çalışmaya başladığı BEAM AR-GE firmasından 2015 yılında ayrıldı. 2015 yılından beri İstanbul Teknopark'ta bulunan Pavo Tasarım Üretim Elektronik Şirketin'de çalışmaktadır.