

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**HAVACILIK BİLİMİ VE TEKNOLOJİLERİ  
ANABİLİMDALI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**KARBON KOMPOZİT İLE ALÜMİNYUM ALAŞIMINI  
YAPIŞTIRMADA MEKANİK KİLİTLEME SAĞLAMAK İÇİN  
LAZERLE YÜZEY İŞLEME PROSESİ OPTİMİZASYONU**

**SEDA AYBALIK**

**KOCAELİ 2021**

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**HAVACILIK BİLİMİ VE TEKNOLOJİLERİ**  
**ANABİLİMDALI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**KARBON KOMPOZİT İLE ALÜMİNYUM ALAŞIMINI**  
**YAPIŞTIRMADA MEKANİK KİLİTLEME SAĞLAMAK İÇİN**  
**LAZERLE YÜZEY İŞLEME PROSESİ OPTİMİZASYONU**

**SEDA AYBALIK**

**Doç.Dr. Onur ÇOBAN**  
**Danışman, Kocaeli Üniv.**

.....

**Doç.Dr. Salih AKPINAR**  
**Jüri Üyesi, Erzurum Teknik Üniv.**

.....

**Doç.Dr. Alpay Tamer ERTÜRK**  
**Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv.**

.....

**Tezin Savunulduğu Tarih: 23.06.2021**

## ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

“Karbon Kompozit ile Alüminyum Alaşımını Yapıştırma Mekanik Kilitleme Sağlamak İçin Lazerle Yüzey İşleme Prosesi Optimizasyonu” çalışmasında yüzeyi işlemenin yapışma kayma dayanımına etkisi incelenmiştir.

Tez danışmanlığımı yapan, tezimi yaptığım süre boyunca benden yardımlarını ve ilgilerini esirgemeyen, meslek sevgisi ve sabrıyla bana örnek olan, Doç. Dr. ONUR ÇOBAN’a,

Kıymetli bilgi, birikim ve tecrübeleri ile bana yol gösterici ve destek olan, ilgisini ve önerilerini göstermekten kaçınmayan Doç. Dr. ERHAN AKMAN’a

Yüksek lisans eğitimim boyunca yardım, bilgi ve tecrübeleri ile bana sürekli destek olan Doç. Dr. MUSTAFA ÖZGÜR BORA ve Doç. Dr. BELGİN GENÇ ÖZTAPRAK’a,

Çalışmalarım boyunca maddi ve manevi destekleriyle beni hiçbir zaman yalnız bırakmayan, sevgili anneme ve babama,

Bu süreçte sevgilerini ve desteklerini her zaman hissettiğim kardeşlerim Pınar, Eda, Vural ve Özkan’a,

Çalışmalarımı destekleyen, esirgediğim zamana gösterdikleri anlayış ve sabır için sevgili eşim Mehmet HOPLAMAZ ve Mabel’e,

Motivasyon kaynaklarım, yorulup yıldıığım anda geleceğini düşündüğüm ve yılmadan çalışmaya devam ettiren yeğenlerim Uras ve İlgin’a,

Açtığı ülkü yolunda ışığıyla her zaman yön göstericim olacak olan Gazi Mustafa Kemal ATATÜRK'e sonsuz minnet ve teşekkürlerimi sunarım.

Haziran – 2021

Seda AYBALIK

## İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR .....	i
İÇİNDEKİLER .....	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	iv
TABLolar DİZİNİ .....	viii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	ix
ÖZET.....	xi
ABSTRACT .....	xii
GİRİŞ .....	1
1. GENEL BİLGİLER.....	2
1.1. Havacılıkta Kullanılan Kompozit ve Alüminyum Malzemeleri ve Birleştirme Teknikleri .....	2
1.2. Yapışma Mekanizmaları .....	8
1.2.1. Adhezyon ve kohezyon mekanizmaları .....	8
1.3. Islanabilirlik .....	10
1.4. Yüzey Hazırlığı .....	11
1.5. Kimyasal Yüzey İşleme Metotları.....	12
1.6. Lazer ile Yüzey İşleme.....	18
2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI .....	20
3. MALZEME VE METOT .....	27
3.1. Karbon Fiber Takviyeli Kompozit (CFRP) Malzeme.....	27
3.2. AA2024-T3 Metal Malzeme .....	27
3.3. Yapıştırıcı .....	28
3.4. Metotlar .....	28
3.4.1. Yüzey hazırlama metotları.....	28
3.4.1.1. Zımparalama.....	29
3.4.1.2. Fpl-dağlama.....	29
3.4.1.3. Silanlama.....	29
3.4.1.4. Lazerle yüzey işleme .....	30
3.4.1.5. Yüzey işleme sonrası ağırlık kaybı ölçümü .....	31
3.4.1.6. İşlenen yüzeylerin optik mikroskop ile incelenmesi .....	31
3.4.1.7. Kontak açısı ölçümü .....	32
3.4.1.8. Lazer 3D optik profilometre ile analiz .....	32
3.4.1.9. FTIR analizi.....	33
3.4.1.10. Tekil bindirmeli yapıştırma işlemi .....	33
3.4.1.11. Tekil bindirmeli kayma testi .....	35
3.4.1.12. Tahribatlı testler sonrası hasar mekanizmalarının incelenmesi .....	35
4. BULGULAR VE TARTIŞMA .....	36
4.1. Silanlama İşleminin AA2024-T3 Yüzey Özelliklerine ve Yapıştırma Performansına Etkisi .....	36
4.2. FPL Dağlama İşleminin AA2024-T3 Yüzey Özelliklerine ve Yapıştırma Performansına Etkisi .....	44

4.3. AA2024-T3'ün Lazer İle İşlenmesinde Homojen Bir Yüzey ve Optimum Yapışma Dayanımı Sağlayacak Lazer İşleme Parametrelerin Belirlenmesi .....	54
4.4. Fiber Lazer Tekniği İle AA2024-T3 Malzeme Yüzeyinde Mekanik Kilitleme Sağlayacak Kanalların Açılması .....	69
4.4.1. Lazer geçiş sayısının artırılmasına bağlı olarak elde edilen kanalların değişen geometrik parametrelerinin yapışma özelliklerine etkileri.....	69
4.4.2. Kanallar arası mesafenin değişimine bağlı olarak yapışma özelliklerinin incelenmesi .....	78
4.4.3. Kanal açısının değişimine bağlı olarak yapışma özelliklerinin incelenmesi.....	84
4.4.4. Malzeme yüzeyinde oluşturulan açısız desenlerin yapışma özelliklerine etkisi .....	89
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....	92
KAYNAKLAR .....	96
KİŞİSEL YAYINLAR VE ESERLER .....	104
ÖZGEÇMİŞ .....	105

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1.	A380 yolcu uçağında kullanılan yapıştırma bağlantı elemanları .....	3
Şekil 1.2.	Ticari yolcu uçağında kullanılan alüminyum alaşımları .....	4
Şekil 1.3.	Cessna Citation III uçağında kompozit/metal yapıştırma bağlantıları.....	4
Şekil 1.4.	Britanya Havayollarına ait BAe RJ85 Bölgesel Jet uçağında kompozit/metal yapıştırma bağlantısı .....	5
Şekil 1.5.	Uçak yapısal parçalarında adheziv yapıştırma bağlantıları.....	5
Şekil 1.6.	Bir yolcu uçağının kanat hücum hattı kesiti.....	6
Şekil 1.7.	Mekanik ve yapıştırma bağlantılarının karşılaştırılması. ....	7
Şekil 1.8.	Adhezyon ve kohezyon mekanizmaları .....	9
Şekil 1.9.	Suyun a) küçük temas açısı ( $<90^{\circ}$ ), b) büyük temas açısı ( $>90^{\circ}$ ) .....	10
Şekil 1.10.	Yüzey ıslanabilirlik modelleri.....	11
Şekil 1.11.	Alüminyuma uygulanan yüzey işlemleri sonrası morfolojik değişim (a) FPL, (b) PAA ve (c) CAA.....	13
Şekil 1.12.	(a) 25 oC ve (b) 50 oC’de 90 gün boyunca farklı sulu ortamlara maruz kalan yapıştırma bağlantılarının tekil bindirme test sonuçları .....	17
Şekil 1.13.	Atım sürelerine bağlı olarak lazer malzeme aşındırma mekanizmaları .....	19
Şekil 2.1.	20 W ortalama güce sahip fiber lazer ile işlenmiş inconel yüzeyler .....	21
Şekil 2.2.	30 W maksimum güce sahip fiber lazer ile işlenmiş alüminyum yüzeylerin görüntüsü .....	21
Şekil 2.3.	Silisyum karbür temelli seramik ve titanyum malzemelerin yüzeylerinde oluşturulan mekanik yapılar .....	22
Şekil 2.4.	5052-Al alaşımı yüzeyine lazer ile yapılan farklı güçlerdeki işlemin SEM görüntüleri .....	23
Şekil 2.5.	Lazer ile işlenmiş 5052 Al-CFRTP sürtünme kaynağı bağlantılarının mekanik test sonrası kesit SEM görüntüleri .....	23
Şekil 2.6.	Lazer tipi ve tekrar atım sayısına bağlı olarak elde edilen yapışma dayanımı değerleri ) .....	24
Şekil 2.7.	Çelik yüzeyine yapılan lazer işleme izleri.....	25
Şekil 2.8.	(a) kanal aralığına bağlı olarak üst üste gelme kabul durumu, (b) açılmış kanalların geometrik parametreleri (güç=3000 W, hız=5 m/s).....	25
Şekil 3.1.	Deneylerde kullanılan CFRP malzemesi .....	27
Şekil 3.2.	Loctite EA9396 AERO ticari etiketli fotoğrafı ve teknik özellikleri.....	30
Şekil 3.3.	Alüminyum malzemelerin yüzey işleminde kullanılacak 50 W gücünde fiber lazer .....	30
Şekil 3.4.	Weightlab Instruments marka laboratuvar terazisi.....	31
Şekil 3.5.	Olympus SZX16 model optik mikroskop .....	31
Şekil 3.6.	Kontakt açısı ölçüm cihazı .....	32

Şekil 3.7. “Nanovea PS50” marka Lazer 3D optik profilometre cihazı.....	33
Şekil 3.8. FTIR spektrofotometresi .....	33
Şekil 3.9. ASTM D5868-01 standardına göre tekil bindirmeli yapıştırma işlemi şematik gösterimi.....	34
Şekil 3.10. Yapıştırma işlemi düzeneği ve şematik gösterimi.....	34
Şekil 4.1. Farklı silan hacim miktarları uygulanan numunelerin, işlenmemiş ve zımparalanmış AA2024-T3 alüminyum malzemelerin kontak açısı değerleri .....	37
Şekil 4.2. Farklı silan hacim miktarları uygulanan numunelerin, işlenmemiş ve zımparalanmış AA2024-T3 alüminyum malzemelerin yüzey pürüzlülüğü değerleri .....	38
Şekil 4.3. Farklı silan hacim miktarları uygulanan numunelerin, işlenmemiş ve zımparalanmış AA2024-T3 alüminyum malzemelerin yüzey FTIR-ATR spektrumları.....	39
Şekil 4.4. Farklı silan hacim miktarları uygulanan numunelerin, işlenmemiş ve zımparalanmış AA2024-T3 AA2024-T3 içeren Al/CFRP yapıştırma bağlantılarının yapışma kayma dayanım test sonuçları.....	42
Şekil 4.5. Silanlama yüzey işlemi uygulanmış Al/CFRP yapıştırma bağlantılarının yapışma kayma dayanım testleri sonrası dijital kamera ile yüzey fotoğrafları .....	43
Şekil 4.6. İşlenmemiş AA2024-T3 numunesinin farklı büyütmelerdeki mikroskopik görüntüleri.....	46
Şekil 4.7. FPL dağlama sıcaklığı ve süresine bağlı olarak yüzeylerin mikroskopik fotoğrafları (50x).....	46
Şekil 4.8. İşlenmemiş AA2024-T3’ün topografik görüntüsü ve pürüzlülük değeri.....	47
Şekil 4.9. FPL dağlama sıcaklığı ve süresine bağlı olarak yüzeylerin topografik görüntüleri ve pürüzlülük değerleri .....	47
Şekil 4.10. FPL dağlama sıcaklığı ve süresine bağlı olarak kontak açısı değişimi .....	49
Şekil 4.11. Yüzey ıslanabilirlik modelleri.....	49
Şekil 4.12. FPL dağlama işlemi sonrası yüzeyde oluşan mikro yapının şematik görünümü .....	50
Şekil 4.13. Farklı FPL Dağlama Parametreleri İle İşlenmiş Numunelerin, İşlenmemiş ve Zımparalanmış Yüzeylerin FTIR-ATR Spektrumları. ....	51
Şekil 4.14. FPL dağlama işlemine bağlı olarak yapışma dayanımı değişimi.....	53
Şekil 4.15. FPL dağlama işleminin mekanik testler sonrası ortaya çıkan hasar modlarının yüzey fotoğrafları; işlenmemiş (a), 60 °C-20 dk (b), 70 °C-20 dk (c) and 80 °C-20 dk (d).....	54
Şekil 4.16. (a) Düşük lazer akıllarında polarizasyon etkisi ile oluşan periyodik yapılar [88], (b) yüksek lazer akıllarında malzeme yüzeyinde oluşturulan mikro kanallar .....	55
Şekil 4.17. Taguchi deneysel tasarım matrisindeki işleme örneklerinin optik mikroskop görüntüleri .....	57
Şekil 4.18. Alüminyum yüzeylerinin lazer ile işlenmesi sonucu oluşan farklı yüzey yapıları .....	58

Şekil 4.19. Optimizasyon proseslerinden (a) D7, (b) D8 ve (c) D9 numunelerinin SEM ve kesit görüntüleri. ....	61
Şekil 4.20. Farklı lazer parametreleri ile işlenmiş numunelerin, işlenmemiş ve zımparalanmış yüzeylerin FTIR-ATR spektrumları. ....	62
Şekil 4.21. İşlenmemiş ve farklı lazer parametreleri ile işlenmiş (D7, D8 ve D9 ) numunelerin XPS spektrumları. ....	64
Şekil 4.22. Al/ CFRP yapışma bağlantılarının hasar fotoğrafları.....	66
Şekil 4.23. Yüzeylerin temas açılarına göre ıslanabilirlik özelliklerinin sınıflandırılması $\theta_w$ : (a) hidrofilik; (b) süperhidrofilik; (c) süper ıslatma /süper esneme; (d) hidrofobik; (e) süperhidrofobik (lotus etkisi: suyu itme); (f) süperhidrofobik (gül etkisi: yüksek yapışma) .....	67
Şekil 4.24. Optimizasyon proseslerinden D7, D8 ve D9 ile işlenen AA2024-T3 numunelerinin kontak açıları. ....	69
Şekil 4.25. D9 lazer prosesi ile (a) 120 $\mu\text{m}$ aralıklı işlenen kanalların üstten görüntüsü (b) geçiş tekrar sayısına bağlı olarak oluşan kanalların kesit görüntüleri.....	70
Şekil 4.26. D9 lazer işleme prosesinin geçiş sayısının artırılmasına bağlı olarak oluşan kanalın geometrik ölçülerinin şematik gösterimi (a), geometrik parametrelerinin değişimi (b) ve (c) .....	71
Şekil 4.27. Fiber lazer tekniği ile D9 işleme prosesinde; (a) 1 geçiş; (b) 5 geçiş ve (c) 6 geçiş ile işlenmiş AA2024-T3 malzeme yüzeylerinin üstten SEM görüntüleri (500x).....	72
Şekil 4.28. Fiber lazer tekniği ile D9 prosesinde; (a) 1 geçiş; (b) 5 geçiş ve (c) 6 geçiş ile işlenmiş AA2024-T3 malzeme yüzeylerinin açılı SEM görüntüleri (100x). ....	72
Şekil 4.29. Geçiş sayısına bağlı olarak kontak açısı sonuçları .....	73
Şekil 4.30. Lazer geçiş sayısına bağlı olarak yapışma kayma dayanımı.....	74
Şekil 4.31. İşlemsiz ve zımparalı AA2024-T3/CFRP yapıştırma bağlantıları ile farklı geçiş sayıları için bağlantıların mekanik testler sonrası hasar türlerine ait fotoğraflar .....	76
Şekil 4.32. Lazer geçiş sayısına bağlı olarak elde edilen yapışma kayma dayanımı testi grafikleri .....	78
Şekil 4.33. Kanallar arası mesafenin değişimine bağlı olarak yapılarının üstten ve kesitten görüntüleri .....	80
Şekil 4.34. Kanallar arası mesafeye bağlı olarak kontak açısı için yüzeye su damlatılan noktaların fotoğrafları.....	80
Şekil 4.35. Kanallar arası mesafeye bağlı olarak yapışma kayma dayanımı .....	82
Şekil 4.36. 5 geçiş sayısında farklı lazer kanal aralığı ile alüminyum yüzeyleri işlenmiş AA2024-T3/CFRP yapıştırma bağlantılarının hasar türlerine ait fotoğraflar.....	83
Şekil 4.37. Kanallar arası mesafeye bağlı olarak elde edilen yapışma kayma dayanım testi grafikleri.....	84
Şekil 4.38. Kanal açılarının test yönüne göre konumlandırılması.....	85
Şekil 4.39. Farklı kanal açılarında işlenen AA2024-T3 numunelerinin kontak açısı ölçümüne ait su damlatma noktalarının fotoğrafları.....	85
Şekil 4.40. Kanal açısına bağlı olarak yapışma kayma dayanımı özellikleri .....	86



Şekil 4.41. Farklı kanal açılarında alüminyum yüzeyleri işlenmiş AA2024-T3/CFRP yapıştırma bağlantılarının hasar türlerine ait fotoğraflar.....	87
Şekil 4.42. Kanal açısına bağlı olarak elde edilen yapışma kayma dayanım testi grafikleri .....	89
Şekil 4.43. Kanal desenine bağlı olarak yapışma kayma dayanımı. ....	89
Şekil 4.44. Fiber lazer ile işlenmiş AA2024-T3 malzeme yüzeyinde oluşturulan desenlerin; (a) 90°/30° ; (b) 90°/45°; (c)90°/15°; (d) +45°/-45° Al/CFRP yapıştırma bağlantılarının hasar türleri.....	91
Şekil 5.1. Tüm sonuçların toplu grafiği.....	94



## TABLULAR DİZİNİ

Tablo 2.1. İşleme sonrası elde edilen izlerin geometrik değerleri.....	24
Tablo 3.1. AA2024 Alüminyum Alaşımının Kimyasal Bileşimi (Seykoç Al.).....	27
Tablo 3.2. AA2024 Alüminyum alaşımının mekanik özellikleri (Seykoç Al.).....	28
Tablo 3.3. Silan malzemesinin türü ve temel özellikleri (SIGMA-ALDRICH).....	30
Tablo 4.1. Farklı FPL dağlama prosesleri sonrası AA2024-T3 numunelerindeki ağırlık değişimleri .....	45
Tablo 4.2. Taguchi metodu ile deneysel tasarım matrisi.....	57
Tablo 4.3. Lazer parametreleri optimizasyonu için Taguchi deney tasarımı .....	59
Tablo 4.4. Lazer işleme parametrelerinin optimizasyonu için ANOVA sonuçları .....	60
Tablo 4.5. Numunelerin yüzey kimyası bileşimi XPS analizi ve element oranları. ....	65

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Ra	:	Yüzey Pürüzlülüğü Değeri
$\theta_w$	:	Temas Açısı

### Kısaltmalar

AA2024-T3	:	Temperlenmiş Alüminyum Alaşımı
Al	:	Alüminyum
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	:	Alüminyum Oksit
BAA	:	Boric Acid Anodisation ( Borik Asit Anodizasyon)
BSA	:	Boric-Sulphuric Acid (Sülfirik Asit Anodizasyon)
C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> COCH <sub>3</sub>	:	Metil Etil Keton
C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> COCH <sub>3</sub>	:	Metil Etil Keton
CAA	:	Chromic acid anodisation
CFRP	:	Carbon Fiber Reinforced Polymer (Karbon Fiber Takviyeli Polimer)
CH <sub>2</sub>	:	Hidrokarbon
CH <sub>3</sub> COOH	:	Asetik Asit
CH <sub>3</sub> OH	:	Metil Alkol
CO <sub>2</sub>	:	Karbondioksit
Cr	:	Krom
Cu	:	Bakır
CW	:	Continuous Wave ( Sürekli Dalga)
DLT-DA	:	Doğrudan Lazer Tekstürleme
DLT-YA	:	Yüksek Lazer Akıllarındaki Doğrudan Lazer Tekstürleme
Fe	:	Demir
FPL	:	Forest Product Laboratory
H <sub>2</sub> O	:	Su
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	:	Sülfirik Asit
HAMAG	:	Havacılık Malzemeleri Araştırma ve Geliştirme Laboratuvarı
IEB	:	Isıdan Etkilenmiş Bölge
LIPSS	:	Lazer Kaynaklı Periyodik Yüzey Yapıları
Mg	:	Sülfirik Asit
Mn	:	Manganez
Na <sub>2</sub> Cr <sub>2</sub> O <sub>7</sub>	:	Sodyum Dikromat
ns	:	Nanosecond Fiber
O	:	Oksijen
OH	:	Hidroksit
PAA	:	Phosphoric Acid Anodisation (Fosforik Asit Anodizasyon)
RTM	:	Resin Transfer Molding
SEM	:	Scanning Electron Microscope (Taramalı Elektron Misroskop)
Si	:	Silisyum

Si-OH : Silanolün  
SiOSi : Siloksan  
Ti : Titanyum  
Zn : Çinko



# KARBON KOMPOZİT İLE ALÜMİNYUM ALAŞIMINI YAPIŞTIRMADA MEKANİK KİLİTLEME SAĞLAMAK İÇİN LAZERLE YÜZEY İŞLEME PROSESİ OPTİMİZASYONU

## ÖZET

Havacılık uygulamalarında birleştirme tekniği olarak kullanılmakta olan yapıştırma bağlantılarında hibrit malzeme olarak AA2024-T3 ve CFRP kompozitleri dikkati çekmektedir. Yapıştırma bağlantılarının performansını artırmak üzere yapılan tasarım girişimlerinin birisi de yüzey hazırlığıdır. Yüzey hazırlığının genel olarak amacı hem mekanik kilitleme sağlayacak pürüzlülükte hem de kimyasal bağlanma sağlayacak özellikte olan bir yapı elde etmektir. Çalışmanın özgünlüğü de mekanik kilitleme sağlamak üzere kimyasal metotlara nazaran daha sağlığa ve çevreye duyarlı, kontrol edilebilirliği ve tekrarlanabilirliği yüksek olan lazer işleme tekniğinin kullanılması esasına dayanmaktadır. Özellikle belirli bir malzeme ve belirli bir lazer türü için birbirleri ile uyumlu lazer işleme prosesi optimizasyonu yapıştırma bağlantısı performansının geliştirilmesinde elzem bir literatür problemi doğurmaktadır. AA2024-T3 alaşımının fiber lazer ile işlenerek yapıştırma performansının geliştirilmesi hedeflenmiştir. Bu amaç için lazer işleme prosesi yüzeyde mekanik kilitleme sağlayarak yapıştırma dayanımının artırılmasına yönelik optimizasyona tabi olmuştur.

Sadece AA2024-T3 alüminyum alaşımı yüzeyinin kanal tipi girintilerden oluşan yüzey yapısında olacak şekilde fiber lazer işleme proses parametre optimizasyonu ile elde edilen AA2024-T3/CFRP yapıştırma dayanımı 6,46 MPa'dan 23,58 MPa seviyesine çıkarılmıştır. Bu değer endüstride ve literatürde yaygınca kullanılan ancak gün geçtikte kısıtlanmaya çalışılan kimyasal metotlardan FPL dağlama metodunun sağladığı yapıştırma dayanımı sonucu ile (23,52 MPa) kıyaslanabilir ölçüde başarılı olmuştur. Kanal tipi girintilerin mekanik kilitleme ve dolayısıyla yapıştırma dayanımını daha da artırması için geometrik boyutlarının değiştirilmesine karar verilmiştir. Bu amaçla kanal derinliği ve genişliğinin değiştirilmesi amacıyla lazer tekrar sayısı, kanallar arası mesafe, kanalların çekme yönüne göre açısı ve tüm bu parametreler doğrultusunda açıl desenler üzerinde çalışmalar yapılarak yapıştırma dayanımındaki değişiklikler rapor edilmiştir. AA2024-T3 yüzeyine uygulanan lazer işleminin 5. tekrarıyla elde edilen kanalların derinlik ve genişliklerinin değişimine bağlı olarak mekanik kilitlemede sağlanan iyileşme sonucu AA2024-T3/CFRP yapıştırma dayanımı 23.58 MPa'dan 26,48 MPa'a çıkarılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Adeziv Yapıştırma, Alüminyum Alaşımı, Karbon Fiber Katkılı Kompozit, Lazer Yüzey İşleme.

# **OPTIMIZATION OF LASER SURFACE TREATMENT PROCESS TO PROVIDE MECHANICAL LOCKING IN ALUMINUM ALLOY ADHESIVE BONDING WITH CARBON COMPOSITE**

## **ABSTRACT**

AA2024-T3 and CFRP composites attract attention as hybrid materials in bonding joints used as joining techniques in aviation applications. One of the design attempts to improve the performance of adhesive bonds is surface preparation. The general purpose of the surface preparation is to obtain a structure that is both rough enough to provide mechanical locking and has the property to provide chemical bonding. The specificity of the project is based on the use of laser processing technique, which is more health and environmentally sensitive than chemical methods, and has high controllability and reproducibility, in order to provide mechanical locking. In particular, optimization of the compatible laser processing process for a particular material and a specific type of laser poses an essential literature problem in improving the bonding joint performance. It is aimed to improve the bonding performance of AA2024-T3 alloy by processing fiber laser. For this purpose, laser processing processes have been subject to optimization to increase the bond strength by providing mechanical locking on the surface.

AA2024-T3 / CFRP bonding strength obtained by fiber laser processing process parameter optimization so that the AA2024-T3 aluminum alloy surface is from channel type indentations has been increased from 6.46 MPa to 23.58 MPa. This value has been comparably successful with the bonding strength (23.52 MPa) provided by the FPL etching method, which is one of the chemical methods widely used in industry and literature, but which is tried to be restricted day by day. It has been decided to change the geometrical dimensions of the channel type indentations in order to increase the mechanical locking and thus the bonding strength. To change the depth and width of the channel, the number of laser repetitions, the distance between the channels, the angle of the channels according to the tensile direction and the angular patterns in line with all these parameters, the changes in the bonding strength were reported. The bond strength of AA2024-T3/CFRP was increased from 23.58 MPa to 26.48 MPa as a result of the improvement achieved in mechanical interlocking depending on the change in the depth and width of the channels obtained by the 5th repetition of the laser processing.

**Keywords:** Adhesive Bonding, Aluminum Alloy, Carbon Fiber Reinforced Composite, Laser Surface Treatment.

## **GİRİŞ**

Uçak gövde yapısındaki perçin, vida ve cıvata gibi bağlantı elemanlarının neden olduğu olumsuz etkileri en aza indirmek ve malzeme yüzeylerinde en iyi dayanımı elde edebilmek için mekanik birleştirme işlemlerine alternatif yöntem olarak yapıştırma ile birleştirme yöntemi tercih edilmektedir.

Yapıştırma ile birleştirme işleminin tekrarlanabilirliği, genellikle diğer birleştirme yöntemlerine eşlik eden elektrokimyasal olayların eksikliği, metaller ve birbirine benzemeyen yapısal malzemelerin birleştirilmesi, geometrik boyutlarda önemli ölçüde bozulmaların olmaması genel avantajlarından. Yapıştırma ile birleştirme işleminin bağlantı dayanımını güçlendirmek için yüzey hazırlığına ihtiyaç duyulmaktadır. Yüzey hazırlığında çevreye duyarlı, düşük maliyetli ve tekrar edilebilirliği kimyasal metotlara karşı birçok üstünlüğü olan ve gelişen teknoloji ile kullanımı yaygınlaşan lazer yöntemleri tercih edilmektedir.

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. Uygun yüzey özelliklerine ulaşmak için lazer parametreleri (lazer akısı, darbe sayısı, dalga boyu vb.) dikkatle seçilmelidir.

Bölüm 1’de kompozit ve alüminyum malzemelerin fiziksel özellikleri, kullanım alanları, yapışma mekanizmaları, yapıştırıcı yüzey ıslatma özelliği ve yüzey hazırlığı işlemleri hakkında bilgiler yer almaktadır.

Bölüm 2’de lazer ile yüzey temizleme işlemi yapılan malzemelerin mekanik kilitleme sağlayarak yapışma ile birleştirilmesi sonrasında çekme dayanımına etkisi hakkında literatür bilgisi yer almaktadır.

Bölüm 3’te deneysel çalışmada kullanılan alüminyum ve kompozit malzemelerin fiziksel özellikleri, adheziv yapıştırmada kullanılan yapıştırıcı, yapıştırma işleminde kullanılan düzenek, alüminyum malzemelerin lazer ile yüzey hazırlama işleminin

gerçekleştirildiği deneysel dzenek, alüminyum yüzeyi işlendikten sonra yüzey özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan analizler ve yapıştırma kupon numunelerine çekme testinin nasıl yapıldığı hakkında bilgi verilmiştir.

Bölüm 4'te deneysel çalışmaların yapıldığı en iyi yapıştırma parametrelerini elde etmek için ön denemeler yapıldı ve bu parametrelerin çekme mukavemeti üzerine etkileri yapılan testler yardımı ile belirlenmiş; elde edilen bilgiler ve grafikler ayrıntılı bir biçimde verilmiş ve değerlendirilmesi yapılmıştır.

Bölüm 5'te bu tezde yapılan çalışmaların sonuçları özetlenmiştir.





## 1. GENEL BİLGİLER

### 1.1. Havacılıkta Kullanılan Kompozit ve Alüminyum Malzemeleri ve Birleştirme Teknikleri

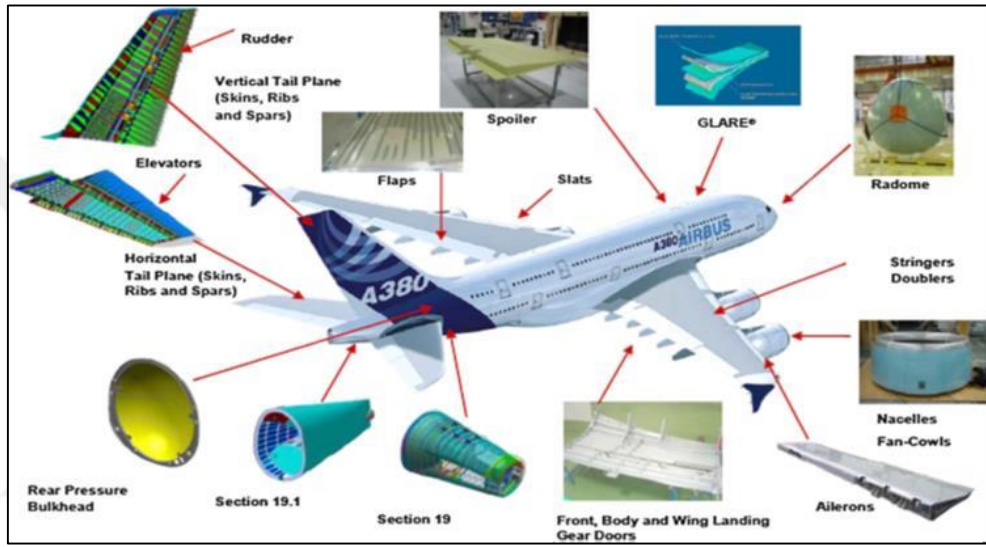
Yüksek özgül mukavemet, iyi korozyon direnci ve mükemmel yorulma direnci özellikleri ile karbon fiber takviyeli polimer (Carbon Fiber Reinforced Polymer - CFRP) kompozitler genellikle havacılık sektöründe geniş uygulama alanına sahip değerli malzeme olarak kabul edilmiştir [1]. Kompozit malzemelerinin kullanımı daha düşük imalat ve onarım maliyeti, yüksek sertlik ve daha iyi hasar toleransı performansıyla kullanım alanı artmaktadır [2].

Alüminyum hafif metaller gurubuna giren ve teknik alanda çok kullanılan bir metaldir. Alüminyum, düşük özgül ağırlığının yanı sıra, yüksek elektrik ve ısı iletkenlik, atmosferik korozyona direnç, kolay üretilebilirlik ve diğer metallerle çekme dayanımı yüksek alaşım oluşturabilme gibi özelliklere sahiptir [3]. Alüminyumun oksijene karşı olan yüksek afinitesi nedeni ile yüzeyde metalin havayla temas etmesi sonucu, ince fakat yoğun bir oksit tabakası ( $Al_2O_3$ ) oluşmaktadır. Bu tabaka alüminyumu pek çok ortamda korozif etkilerden korur, ancak bazı asit, baz ve tuz çözeltileri bu koruyucu oksit tabakasının yapısını bozmaktadır [4].

Havacılık endüstrisi tarafından  $CO_2$  emisyonu ve yakıt tüketimini azaltmak, Boeing Dreamliner 787 (2011) ve Airbus A350X (2014) uçaklarında gövde, kanatlar, fan kanatları ve kuyruk konileri gibi yapı elemanlarını hafifletip yolcu / kargo taşıma kapasitesini artırmak için yaygın olarak kullanılmaktadır [5]. CFRP/titanyum, CFRP/alüminyum ve CFRP/CFRP yapıları özellikle Airbus A380 veya Boeing 787 gibi ticari uçaklarda arka basınç perdesi, aileronlar, dikey kuyruk düzlemi, radome'a bağlı eklemler, motor kaportaları, sabit firar kenarları, kanat panelleri, helikopter pervaneleri, uzay optik tezgâhları, gemi gövdelerinin kaplamalarında yaygın olarak kullanılan malzeme oluşumlardır [6,7]. Airbus A380 yolcu uçağında kullanılan kompozit malzeme toplam ağırlığın %22'sini oluşturur [8]. Kompozit yapı oluşumları

Textron-Bell Helikopter, Boeing'den Lockheed-Martin'in X-33 ve Raytheon Premier I gelecekteki uygulamaları ve rotorcrafts (pervaneli uçak yapılarında da) baskın olacağı görülmektedir [9].

Kompozit malzemelerin hafif metal malzemeler ile birlikte kullanılmasının avantajlarından yararlanabilmek için alternatif bir yöntem olarak yapıştırma ile birleştirme tekniği havacılık sektöründe yaygın bir şekilde kullanıldığı Şekil 1.1'de görülmektedir.

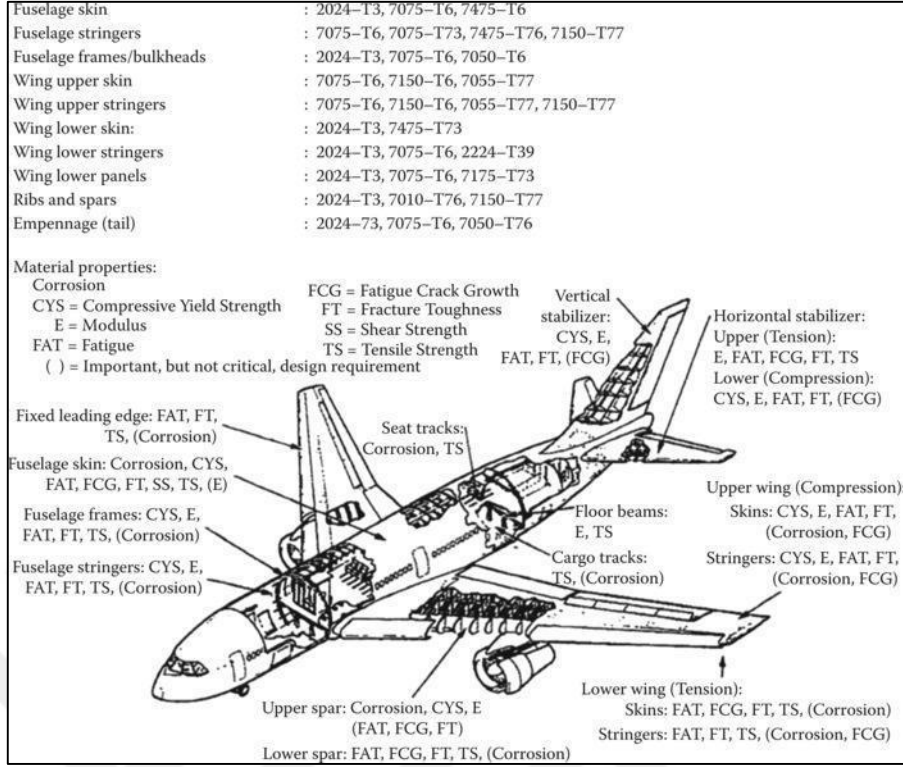


Şekil 1.1. A380 yolcu uçağında kullanılan yapıştırma bağlantı elemanları [7]

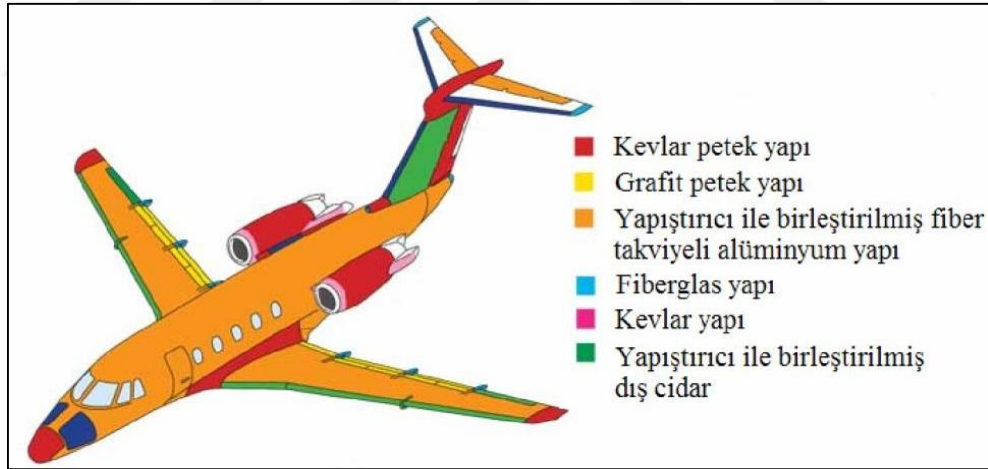
Uçaklarda yaygınca kullanıldığı bilinen iki alüminyum alaşımı AA2024-T3 ve AA7075-T6, uçaklara yüksek mukavemet ve hafiflik vermek üzere tasarlanmıştır, ancak yerel galvanik korozyona karşı hassastır [10].

Bu nedenle, her iki malzeme türünün sağladığı faydaları optimize etmek için, metal ve kompozit malzemelerin ortak yapı oluşturmalarına yönelik birleştirme teknikleri geliştirilmektedir. Hava araçlarının yapısal parçalarında özellikle alüminyum alaşımların (2xxx ve 7xxx serisi) yaygın bir şekilde kullanıldığı Şekil 1.2'de gösterilmiştir [11].

Yolcu uçaklarında kompozit/metal yapıştırma bağlantılarına örnek olarak Şekil 3'de Cessna Citation III uçağında petek dokulu sandviç yapıların yapıştırıcı ile birleştirme tekniğinin kullanıldığı yerler gösterilmektedir.

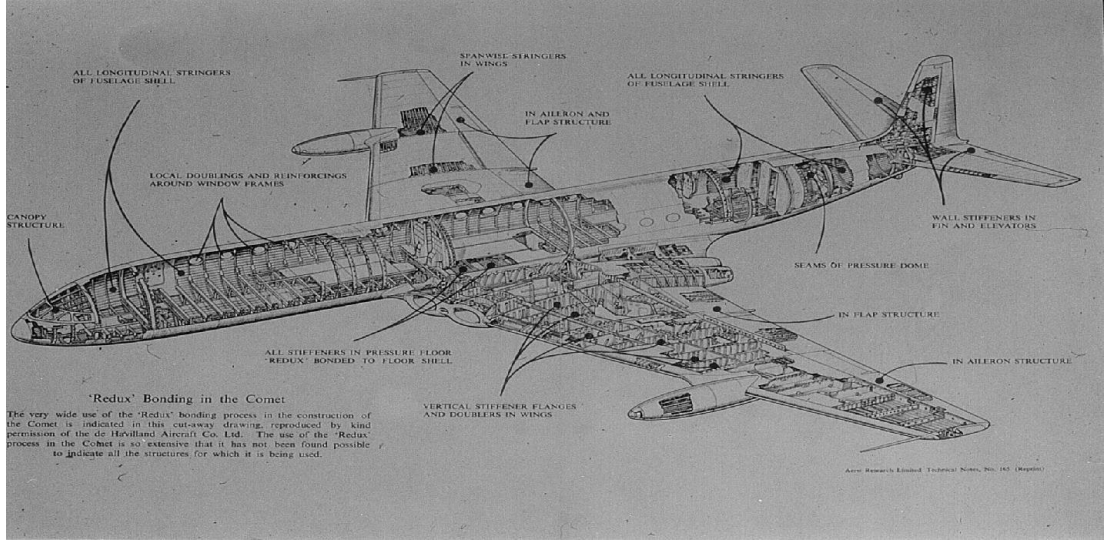


Şekil 1.2. Ticari yolcu uçağında kullanılan alüminyum alaşımları [11]



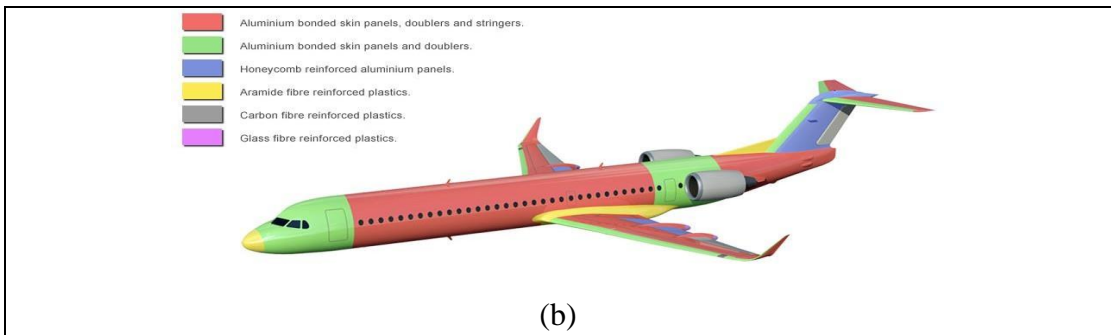
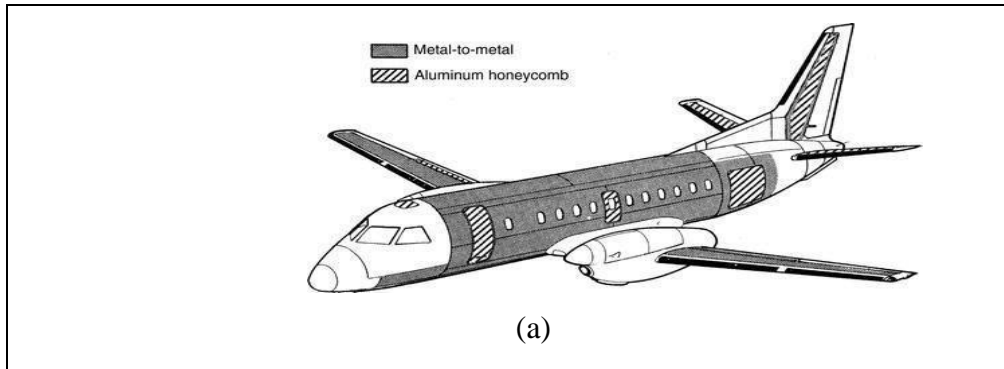
Şekil 1.3. Cessna Citation III uçağında kompozit/metal yapıştırma bağlantıları [12]

Yapıştırıcı ile birleştirme, birincil uçak gövdesi ve kanat yapılarının üretiminde 50 yıldan fazla bir süredir kullanılmaktadır. Britanya Havayollarına ait BAe RJ85 Bölgesel Jet uçağında kompozit/metal yapıştırma bağlantı noktaları Şekil 1.4'te görülmektedir. Ayrıca bölgesel olarak belirtmek gerekirse kanatların üst kaplamasında, kirişlerde ve pencerelerin çevresinde yapıştırma ile birleştirme işlemi uygulanmıştır [13].

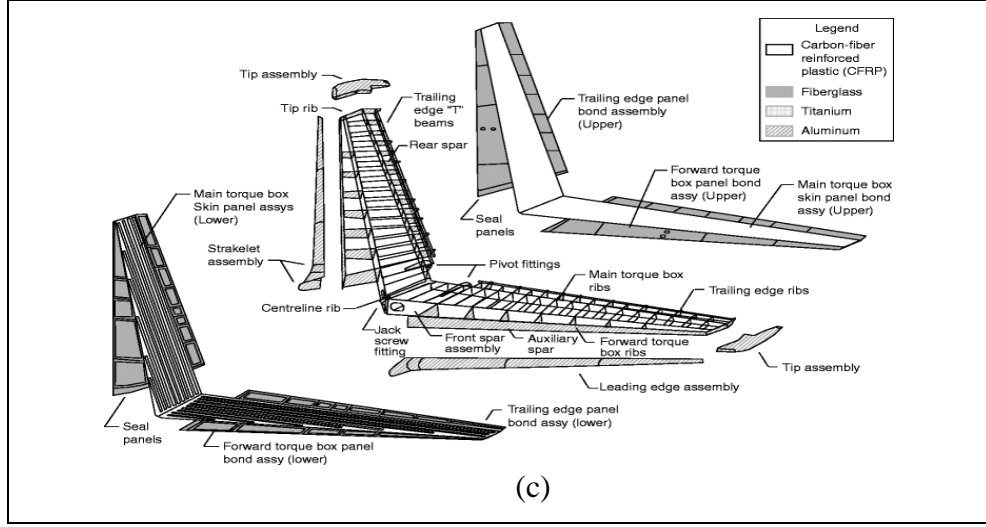


Şekil 1.4. Britanya Havayollarına ait BAe RJ85 Bölgesel Jet uçağında kompozit/metal yapıştırma bağlantısı [13]

Şekil 1.5'te adheziv yapıştırma bağlantılarının hava araçlarında kullanım yerleri örnekler ile gösterilmiştir. Genel olarak Şekil 1.5-a,b ve c'de görüldüğü gibi metal/metal, metal/kompozit gibi malzemelerin epoksi ve/veya fenolik esaslı termoset yapıştırıcılar ile birleştirildiği ve bu yapısal parçaların istenilen servis şartlarında kullanıldığı belirtilmiştir.

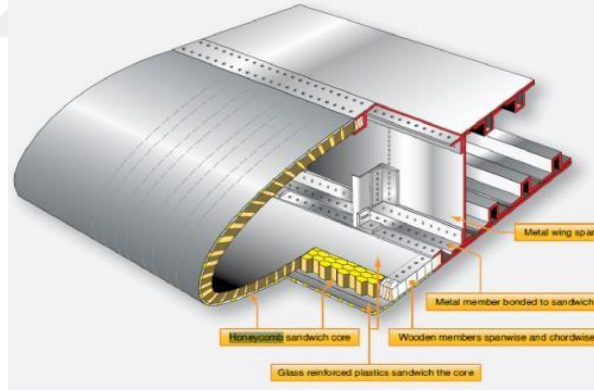


Şekil 1.5. Uçak yapısal parçalarında adheziv yapıştırma bağlantıları (a) Metal/metal ve alüminyum balpeteği kompozitlerin kullanım ve yapıştırma bağlantısı bölgeleri [14], (b)Fokker 130 uçağında kullanılan bağlantı çeşitleri [15]



Şekil 1.5. (Devam) Uçak yapısal parçalarında adeziv yapıştırma bağlantıları (c) Hücum ve firar kanat bölgesinde kullanılan yapısal parçaların yapıştırma bağlantısı [14]

Şekil 1.6’da bir yolcu uçağının kanat hücum hattı kesiti gösterilmiştir [14]. Kanat kesiti incelendiğinde özellikle metal sac paneller ile sandviç kompozit panellerin adeziv yapıştırma ile birleştirildiği gözlenmektedir.

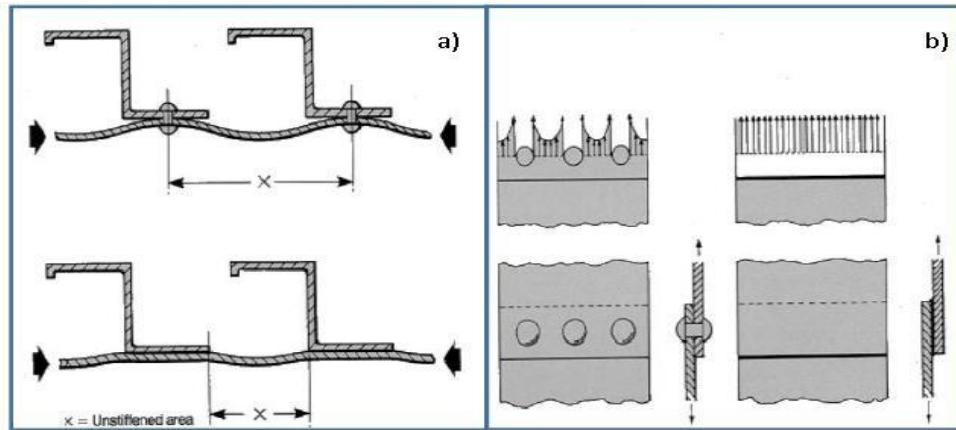


Şekil 1.6. Bir yolcu uçağının kanat hücum hattı kesiti [16]

Mekanik birleştirme, Şekil 7-a’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 hızlı ve kolay biçimde birleştirilip sökülmesini sağlar. Bu yöntem ile birleştirme işlemi yapılırken birleşecek parçaların yüzeylerinin işlem görmesine gerek yoktur. Plakaların birleşme bölgelerindeki malzemelerinin rijitliği bu yöntemde oldukça önemlidir. Eğer plakaların malzemeleri yumuşak ise civata ve somunlar sıkıştırılırken çok fazla güç

kullanılması durumunda plakalarda bozulmalar meydana gelmektedir. Bu durumda ise kompozit yapının tümü olumsuz olarak etkilenir. Mekanik bağlama elemanları genellikle metalik olduklarından yoğunlukları yüksektir. Bu yüzden birleşme noktasındaki ağırlığın artmasına neden olurlar. Aynı zamanda kullanılan metalik bağlama elemanlarında korozyon problemi de oluşmaktadır. Mekanik birleştirmenin sebep olduğu yerel hasarlar [17], stres konsantrasyonları [18] ve delaminasyon [19] gibi olumsuzluklar ve zayıflık nedeniyle adheziv yapıştırma tekniği kullanımı günden güne artmaktadır.

Yapıştırma ile birleştirme işleminde perçinleme ve cıvata ile birleştirmede olduğu gibi delme işlemi olmadığından yük taşıyan liflere zarar verilmez bu sayede hem yapı bütünlüğü bozulmaz hem de delikler çevresinde gerilme yığılması oluşturulmaz [20]. Bu yüzden yapıştırma ile birleştirme tekniği mekanik birleştirme elemanları ile yapılan birleştirmelere göre daha düzenli yük dağılımı sağladığından ve birleştirme elemanı kullanılmadığından bağlantı ağırlığının azalmasını sağladığı için tercih edilmektedir (Şekil 7-b) [21]. Bunun yanında yapıştırma bağlantılarının dezavantajları da bulunmaktadır. Bağlantıya gelen yük dağılımı mekanik birleştirmeye göre daha düzenli olsa da gerilme yığılmaları birleştirme uç noktalarında artmaktadır; ayrıca bağlantının dayanımında yapıştırıcının cinsi, yapıştırılan yüzeylerin temizliği gibi değişken parametrelerin etkisi ön planda olmaktadır [22]. Yapışma bağlantısında iyi bir dayanım elde etmek için özel yüzey işlemleri yapılması gerekmektedir. Yüzeylerde yapılacak işleme ile yüzeydeki zayıf sınır tabakaları kaldırılabilir, yüzey enerjisi değiştirilebilir, yüzeyin mikrotopografik yapısı geliştirilebilir ve yüzeydeki oksijen konsantrasyonu ve fonksiyonel grupların sayısı artırılabilir.



Şekil 1.7. Mekanik ve yapıştırma bağlantılarının karşılaştırılması [21].

Yapıştırma bağlantısının diğer avantajları şunlardır: titreşim sönümlenme, tezgahı aletsiz şekillendirme, ekipman veya malzemelerin düşük maliyeti (yine de bazı durumlarda teknolojik enstrümantasyonun maliyeti yüksek olabilir), genellikle diğer birleştirme yöntemlerine eşlik eden elektrokimyasal olayların eksikliği, metaller ve birbirine benzemeyen yapısal malzemelerin birleştirilmesi, geometrik boyutlarda önemli ölçüde bozulmaların olmaması genel avantajlarından [23].

Yapışma bağlantısının avantajlarından yararlanabilmek için yüzeyin yapıştırma ile birleştirme işlemine hazırlanması gerekmektedir. Yapıştırma ile birleştirme işleminin başarılı olabilmesi için yapışma mekanizması önem arz etmektedir.

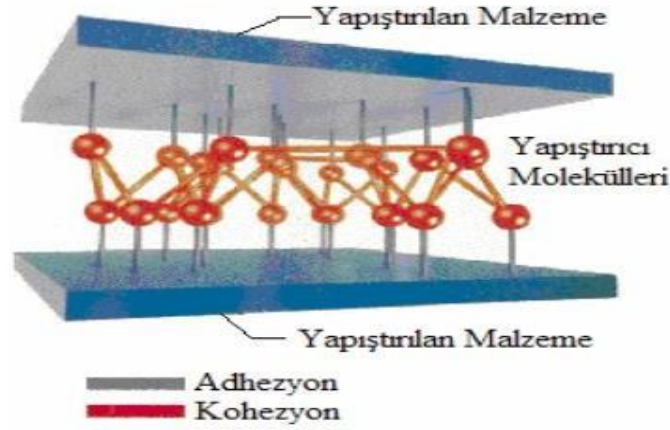
## **1.2. Yapışma Mekanizmaları**

Yapıştırma ile birleştirme 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 [18]. Metaller, polimerler veya seramikler gibi hemen hemen her türlü birbirine benzemeyen malzeme çifti bu yöntemle birleştirilebilir [24]. Güçlü ve dirençli yapışkan bir bağ elde etmek için, yapıştırma ile birleştirilen yüzeyler arasında uygun bir derecede yapışmanın olması gerekir. Bununla birlikte yapıştırıcının mukavemeti ve dayanıklılığı, yapıştırıcının yüzey ile olan uyumluluğu, yapıştırma kalınlığı, kirlenme, stres ve çevresel koşullar yapıştırma kalitesini ve mukavemetini etkilemektedir [25].

### **1.2.1. Adhezyon ve kohezyon mekanizmaları**

Yapışma işlemi, yapıştırıcının kendi içinde ve yapıştırıcı ile malzeme arasında meydana gelen fiziksel ve kimyasal olaylar sonucunda gerçekleşir. Bu olaylar adhezyon ve kohezyon mekanizmalarıdır. (Şekil 1.7) [12].

Adhezyon (Adhesion): Bu olay yapıştırıcı ile yapıştırılan yüzey arasında meydana gelir. İki yüzeyin ara yüzey kuvvetleri (valans kuvvetleri) tarafından bir arada tutan mekanizmadır [12].



Şekil 1.8. Adhezyon ve kohezyon mekanizmaları [12]

Kohezyon (Cohesion): Bu olay 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 tutan mekanizmadır [12].

Kontrollü bir şekilde malzeme yüzeyinde oluşturulan yüzey pürüzlülüğü ile sıvı yapıştırıcının girinti-çıkıntıları doldurup katılaşma (kürlenme) sonrası daha iyi bir tutunma sağlayarak mekanik kilitleme mekanizması ile yapışma dayanımını iyileştirdiği bilinmektedir. Yapışma dayanımını güçlendirebilecek en az 3 özellik vardır;

Adsorpsiyon: Bağ oluşumuna doğru ilk adım sıvı-katı etkileşimidir ve bu nedenle yüzeylerin iyi ıslanması genel yapışma kalitesini belirler [24].

Difüzyon teorisi: Yapıştırılan eleman ile yapıştırıcı ara yüzündeki kimyasal etkileşimler, fiziksel etkileşimlere kıyasla ana bağlar olarak kabul edilen birleştirme parçaları arasındaki yapışmaya önemli ölçüde katkıda bulunur [24].

Mekanik anahtarlama veya kilitleme: Mekanik anahtarlama, yapıştırıcıların yüzeyleri, oyukları, gözenekleri ve pürüzlülükleri ıslatmasını sağlar ve böylece sertleştikten sonra önemli ölçüde yapıştırıcı kuvvetine katkıda bulunur. Ayrıca, ıslatma koşulları, gözeneklerde ve oyuklarda yapışkan nüfuziyetini artırır [24].

Yapıştırıcılar ve alt tabakalar temas ettiğinde, çekim kuvvetleri aralarında yeterli ıslanma ile hareket etmeye başlar, bu kuvvetler genellikle yüksek mukavemetli



bağlanma sağlamak için yeterlidir. Pürüzlü yüzeyler ve yapıştırıcılar arasındaki mekanik kilitleme de iyi ıslanma gerektirir, aksi halde yüzey pürüzlendirmenin düşük bağ kuvvetine neden olması muhtemeldir.

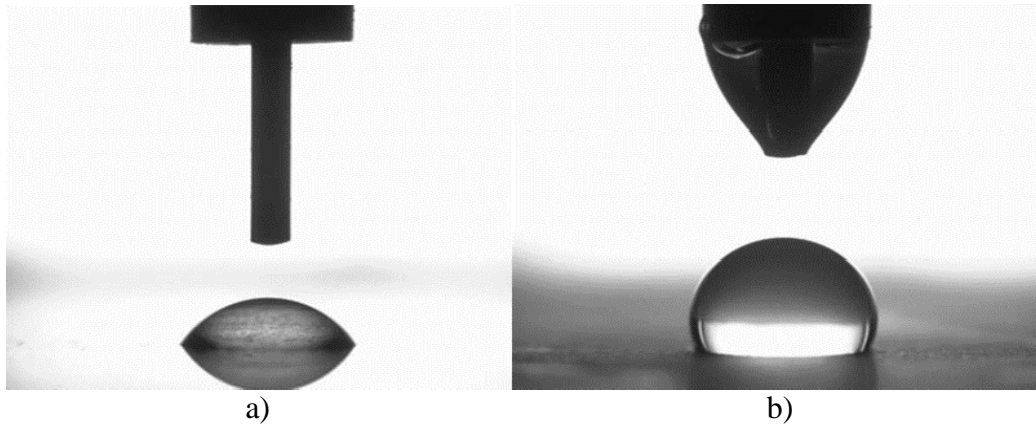
### 1.3. Islanabilirlik

Yapıştırma bağlantısındaki ana eleman olan yapıştırıcılar, CFRP'ler ve alüminyum alaşımları gibi birleştirme elemanlarının bağlantı uygulamalarını kolaylaştırmak için iyi ıslatabilirliğe sahip olmalıdır. Düzgün bir şekilde yayılmış yapıştırıcılar, yüzeyler arasında moleküler temasları artırır, böylece bağlantı mukavemetini artırır [24].

Islanabilirlik, katı bir yüzeyin temel özelliklerinden biridir ve su damlacığı temas açısı ile karakterize edilir. Temas açısı  $90^\circ$ 'nin altında olduğunda, yüzey hidrofildir; Temas açısı  $90^\circ$ 'den büyük olduğunda, yüzey hidrofobiktir [26]. Temas açısı  $150^\circ$ 'den daha büyük olduğunda, katı yüzey nilüfer etkisi (yani,  $10^\circ$  'den az kayma açısı ) veya pimleme etkisi (yani,  $10^\circ$  'den büyük) ile süper hidrofobiklik gösterir. Bir su damlası yüzeye tamamen yayıldığında,  $5^\circ$  veya  $10^\circ$  'den daha az su temas açısına neden olur ve yüzey süperhidrofilik hale gelir [26].

İyi ıslanabilirlik küçük temas açısı ile belirtilir; zayıf ıslanabilirlik ise yüksek temas açısı ile birlikte ortaya çıkar [23]. Tamamen ıslanan bir yüzey küçük temas açısına sahiptir. Ayrıca yüzey enerjisinin arttığını, yüzeyin temizliğini ve bir yüzeyin yapışkan bağlanması için uygunluğunun bir göstergesi olarak kabul edilir [27].

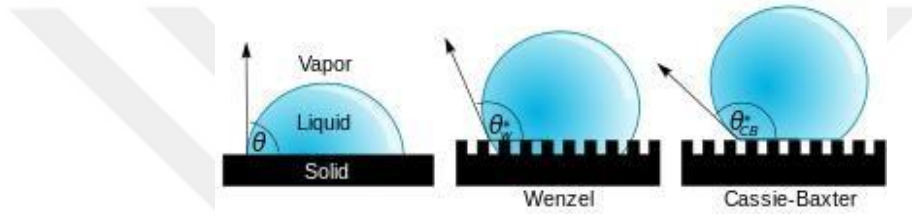
Şekil 1.9'da analiz edilen yüzeydeki bir su damlasının temas açısının doğrudan ölçümü verilmektedir [23].



Şekil 1.9. Suyun a) küçük temas açısı ( $<90^\circ$ ), b) büyük temas açısı ( $>90^\circ$ ) [23]

Yüzey pürüzlülüğünün (mikro/nano yapı) ve yüzey kimyasının süperhidrofobik veya süperhidrofilik yüzeylerin oluşumunda iki ana faktör olduğu iyi bilinmektedir. Mikro veya nano yapı açısından ıslanabilirliği açıklamak için, Wenzel modeli veya Cassie-Baxter modeli kullanılır [23].

Wenzel modeli pürüzlülüğü artırarak bir yüzeyin doğal ıslanma durumunun artırılmasını temsil eder. Bu, hidrofilik bir yüzeyin daha hidrofilik hale geldiği anlamına gelir; hidrofobik yüzey ise pürüzlülük arttıkça daha hidrofobik hale gelir [23]. Aksine, Cassie-Baxter durumu yalnızca hidrofobik bir yüzeyin pürüzlülüğünü değiştirerek geliştirilmesini temsil eder (Şekil 1.10)[28].



Şekil 1.10. Yüzey ıslanabilirlik modelleri [29-30]

Yapışkan sadece malzemeyi ıslatmakla kalmaz aynı zamanda gözeneklere ve açıklıklara makul bir süre içinde nüfuz edebilmek için doğru reolojik özelliklere sahip olmalıdır. Birleşmenin etkili olabilmesi için, yapıştırılan yüzeyin yeterli sayıda mikroskopik kök benzeri oyuklara sahip olması gerekir. Mekanik kilitleme, hidrolitik ve termal bozulmaya karşı güçlü yapışkan bağlar üretebilir. Mekanik kilitleme yapıştırma bağlantı dayanımını arttırmada önemli bir unsurdur. Metaller için mikro veya makro-mekanik, kimyasal veya bunların bir kombinasyonu olarak sınıflandırılacak çeşitli yüzey işlemleri vardır.

#### 1.4. Yüzey Hazırlığı

Temiz ve tercihen aktif bir yüzey elde etmek için, yapıştırma işleminden önce birincil ve minimum yüzey ön işlemleri gerekir. Yapıştırma ile birleştirmede malzeme çiftlerinin yüzeylerinin hazırlanması çok önemlidir; çünkü ancak bu sayede mükemmel ve uzun süreli yapışma dayanımı elde edilebilir. Malzeme yüzeyinin, yapışmayı engelleyebilecek düzensiz oksit tabakasından, boyadan, silikon gibi bir ayırıcı ajandan veya diğer kalıntılardan mutlaka arındırılması gerekmektedir. Bu nedenle uygun ön yüzey işlemleriyle hem bu istenmeyen maddelerden kurtulmak hem de yüzeyin

enerjisini (ıslanabilirlik) ve pürüzlülüğünü artırarak hem kimyasal hem de mekanik olarak yüzeyin yapışmaya uygun hale gelmesi mümkündür.

Yapıştırma ile birleştirilen bağlantının dayanımı ve kalitesi büyük ölçüde yapışkanların yüzey hazırlığına bağlıdır [31]. Uygun bir yüzey işlemi, yapışkanın moleküler etkileşimi ve fiziksel adsorpsiyonunu destekleyerek yüzeyde kolay bir şekilde yayılmasını sağlamalıdır. Güçlü ve dirençli bir yapışma bağlantısı sağlamak için yapıştırıcı ve malzeme arasında iyi bir adhezyon sağlanmalıdır. Yapıştırıcı ve malzeme arasındaki adhezyon problemi genelde üretimden sonra yüzeyde kalan kalıp ayırıcı gibi yüzey kirliliği yaratan kimyasallardan kaynaklanır [31]. Yüzeylerde yapılacak ön işleme, yüzeydeki zayıf sınır tabakalarını kaldırır, yüzey enerjisini değiştirir (öncelikle oksidasyon yoluyla) ve yüzeyin mikropografik yapısını geliştirir.

Güçlü ve dayanıklı bir bağlantı elde etmek için, yapıştırılan malzemelerin yüzey işlemi aşağıdaki hususları sağlamalıdır: yüzeylerdeki tüm kirleticilerin (yağlayıcılar, tozlar, gevşek korozyon katmanları, mikroorganizmalar) çıkarılması, özelliklerintekrarlanabilirliği, iyi yüzey ıslatabilirliği, yüzey enerjisi, yüzeylerinin aktivasyonu vb. [32].

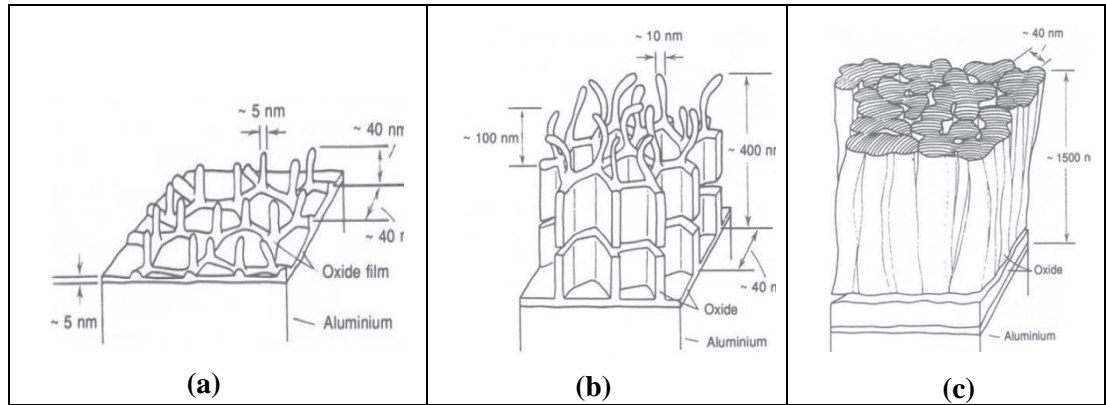
### **1.5. Kimyasal Yüzey İşleme Metotları**

Havacılıkta alüminyum alaşımlarına yapıştırma öncesi uygulanan en etkili yüzey işleme metotları kimyasal olarak uygulanan kromik asit anodizasyonu (chromic acid anodisation-CAA) ve potasyum dikromat/sülfürik asit aşındırmasıdır (potassium dichromate/sulphuric acid etching-FPL (Forest Product Laboratory)) [33, 34]. Ancak malzemelerin değişimi ve endüstriyel beklentilerin giderek artması ile araştırmacılar kromat içeren kimyasalların da işleme ilavesi ile yöntemi daha da geliştirmiştir [35]. Ancak içeriklerindeki Cr (VI) iyonları nedeniyle insan sağlığına ve çevreye zararlı olarak bilinmektedirler [28, 36]. Avrupa'da yayımlanan bir rapora göre insan üzerindeki en yaygın etkisi, çalışma ortamındaki kroma (özellikle Cr (VI) bileşiklerine) maruz kalmanın neden olduğu krom alerjisidir. Ayrıca bu bileşiklerin kansere neden olduğu da söylenmektedir. Çevresel olarak Cr (VI) bileşikleri genellikle en toksik olarak kabul edilir. Bu nedenle Avrupa REACH Tüzüğü (Kimyasalların Kaydı, Değerlendirilmesi, İzni ve Kısıtlanması - (Registration, Evaluation,

Authorization and Restriction of Chemicals)) Avrupa'daki endüstriyel uygulamalarda bunların yerine alternatiflerini teşvik etmektedir [33]. Bu amaçla Avrupa ilk olarak borik asit anodizasyonu (boric acid anodisation-BAA) ile ilgilenmiştir. Aynı zamanlarda Boeing firması Amerika'da 1970 yılında aynı amaçla fosforik asit anodizasyonunu (phosphoric acid anodisation-PAA) [36, 37] ve 1990 yılında da borik-sülfürik asit anodizasyonunu (boric-sulphuric acid anodization-BSAA) [37] geliştirmiştir. PAA ile elde edilen alüminyum oksit kalınlığının CAA ile elde edilenden daha ince olduğu ve bu nedenle yapıştırma dayanımı için yeterli sonucu verirken korozyon direnci açısından yeterli olmadığı raporlanmıştır [38].

Zhang ve diğ. yaptıkları çalışma ile 2024 alüminyum alaşımına uyguladıkları birkaç farklı kimyasal yüzey işleminin yapışma dayanımı ve korozyon direnci açısından karşılaştırmasını yapmışlardır [36]. Tekil bindirme kayma testleri sonucunda yapışma dayanımı olarak büyükten küçüğe sırasıyla PAA≈CAA>PBSAA>BSAA değerleri tespit edilmiştir.

En yaygın kullanıma sahip kimyasal metotlardan FPL, PAA ve CAA'nın alüminyum alaşımı yüzeyinde meydana getirdiği mikro yapı değişimlerinin kıyaslaması Şekil 1.11'de gösterilmiştir [39].



Şekil 1.11. Alüminyuma uygulanan yüzey işlemleri sonrası morfolojik değişim (a) FPL, (b) PAA ve (c) CAA [39]

Driver çalışmasında, FPL prosesi ile düzenli çıkıntıları ( $\approx 40$  nm uzunluğunda) olan hücresel yapıdaki oksit yapısı elde edilip bu yapı sayesinde yapıştırıcının iyi yayılması ve içine dolması sağlanarak mekanik kilitleme ile iyi bir yapışma dayanımı elde etmişlerdir [39]. Diğer taraftan PAA ile benzer yapıdaki ancak daha uzun ( $\approx 400$  nm)

çıkıntılardan ve daha derin sütunlardan oluşan hücresel yapı sayesinde mekanik kilitlemenin daha etkili olduğu vurgulanmıştır. Son olarak CAA ile kapalı ve diğerlerinden çok daha uzun ( $\approx 1500$  nm) sütunsal yapılı daha kalın tabaka elde edilip mekanik kilitleme açısından (yapışma dayanımı) diğer bahsi geçen çalışmaların aksine PAA kadar etkili bir sonuç elde edilmediği bildirilmiştir [39]. Alüminyum yüzeylerinde oluşturulan oksit tabakası, yapıştırma dayanıklılığı ve uzun vadeli yapışma direnci üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Gözenekli katman, yüzey alanını önemli ölçüde artırır ve yapıştırıcının, oksit katmanına nüfuz etmesine izin verir. Bu sadece yapışmayı etkilemekle kalmaz, aynı zamanda metal ile yapışkan arasındaki zayıf sınır katmanını korur [40].

Alüminyum, oksijene maruz kaldığında hızlı bir şekilde okside olur ve üzerinde ince ( $\sim 10$  nm) bir alüminyum oksit ve / veya hidroksit tabakası oluşturur. Bu doğal oksit tabakası kararsızdır ve genellikle zayıf olarak görülen bağ kuvvetlerine yol açar. Bağlanma veya yapışma için uygun kimyasal işlemler uygulanması gerekir [27]. Bu kimyasal işlemler gözenekli oksit yapısı oluşturur böylece yüzey yapısını değiştirerek farklı yüzeyler arası uygulanabilecek yapıştırma işlemlerinde iki yüzey arasında kuvvetli yapışma sağlanabilir [41]. 1950'lerin başında, kromik asit esaslı FPL-Etch işlemi ve çeşitlerinin kullanımı başlıca askeri ve endüstriyel uygulamalar için oldukça pratik bir yöntemdi. Ancak malzemelerin değişimi ve endüstriyel beklentilerin giderek artması ile araştırmacılar kromat içeren kimyasalların da işleme ilavesi ile yöntemi daha da geliştirmiştir [42]. Yapıştırılan alüminyum alaşımları için birçok yüzey hazırlama işleminin ortak adımları ASTM D2651'de listelenmiştir. İlk adım, metalin yüzeyindeki safsızlıkları gidermektir bunun için farklı alkoller veya çözeltiler yardımı ile metal yüzeyinin yıkanmasıdır. Bu yıkama işlemi genellikle atmosfer basıncında ve oda sıcaklıklarında yapılmaktadır.

CAA, PAA gibi alüminyum yüzeylere uygulanan yüzey işlemleri, alüminyum ve yapıştırıcı malzemeler arasında iyi bir ara yüzey oluşturmaktadır. Bu nedenle endüstriyel uygulamalarda tercih edilen yöntemler oldukları belirtilmiştir. Fakat son yıllarda çevresel endişeler, toksitesi iyi bir şekilde belgelendirilmiş kanserojen bileşiklerin kullanımı konusunda yeni düzenlemeler getirildiği belirtilmişti. Bu bağlamda silanlama yöntemi de alternatif yüzey hazırlama yöntemi olarak geliştirilmiştir. Yapılan literatür incelemelerinde silanlama yüzey işlemlerinin metal

malzemelerine uygulanmasının genellikle korozyon direncinin arttırılması, boya uygulamaları öncesinde boyanın yüzeye daha iyi yapışmasının sağlanması ve yapışma dayanımı üzerine yoğunlaştığı saptanmıştır. Özellikle son yıllarda silanlama yöntemi ile gelişen teknolojinin de yardımı ile alüminyum ve kaplama malzemeleri arasında iyi bir yapışma sağlanmaktadır [43]. Metal yüzeyinde oluşturulan yaklaşık olarak 200-400 nm kalınlığındaki ağırlıkça %5 silanlama yüzey işlemleri ile özellikle metal malzemelerin korozyona karşı dirençleri arttırılmasının yanında yüzeye yapılması hedeflenen boya uygulamasının da daha iyi tutunmasının elde edildiği literatür çalışmalarından saptanmıştır.

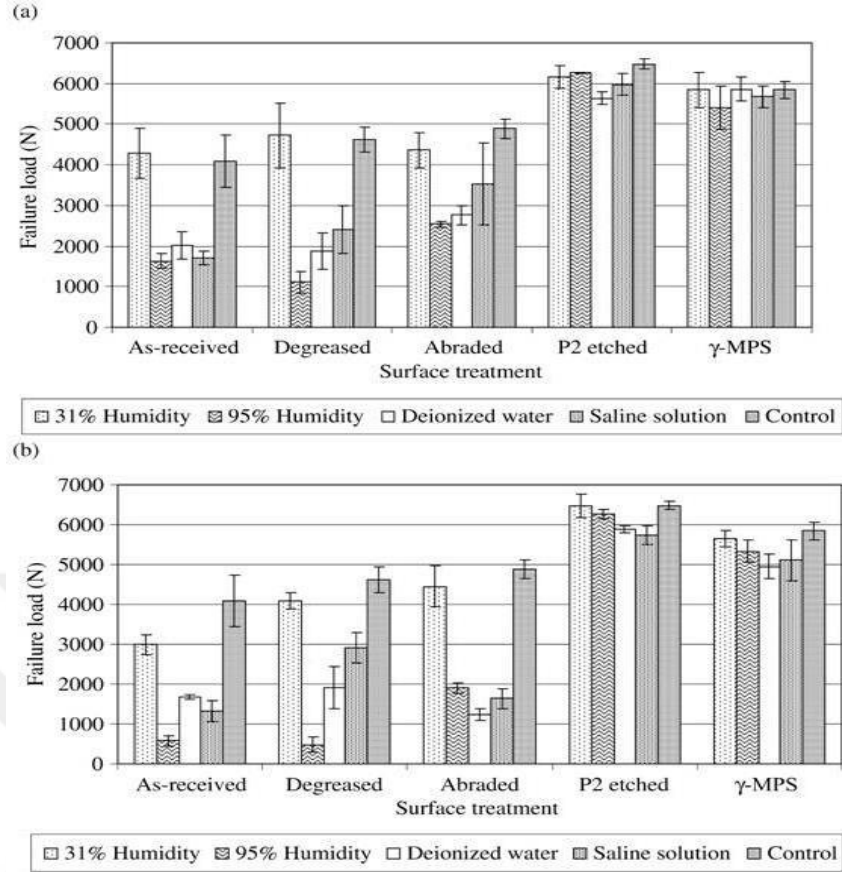
Silanlar, ilk 1940'larda keşfedilen birleştirici ajanlar olarak kullanılan monomerik kimyasallardır. Silan en az bir silikon-karbon bağı içeriyorsa, organosilan olarak adlandırılır. Silan yapısındaki karbon-silikon bağı çok kararlı ve kutupsuzdur, ancak bir alkil grubunun varlığında hidrofobik etkiler ve düşük yüzey enerjisi sergiler. Organo-fonksiyonel silanlar sayısız farklı ile bağlanabilir. Silan atomunun iki reaktif grubu yüzeyler arasında etkileşimde bulunarak bağ yapar ve yapıştırıcı ajan olarak kullanılır [44-45]. Ayrıca, silan bileşiklerinin işlevselliği nedeniyle, yapışma arttırıcı, mineral dolgu maddesi, korozyona dayanıklı tabaka ve çapraz bağlama maddesi olarak endüstriyel uygulamaları olduğu bilinmektedir. Silan kaplamanın metal yüzeyine nasıl bağlandığına dair birçok teori vardır. Silanlar, birbirine benzemeyen iki malzeme arasında, genellikle inorganik ve organik bir kimyasal bağ sağlayan bir yapıştırıcı malzeme olarak bilinmektedir. Trialkoksisilan, silanol içeren bir bileşik oluşturmak üzere alkoksi grupları içerir. Öncelikle bu grupların hidroliz olması gerekir. Hidroliz tepkimesi tamamlandığında oligomerlere yoğunlaşma meydana gelir. Metal yüzeyler hidrolize silan çözeltisine batırıldığında, oligomerler, metal yüzeylerinin -OH gruplarıyla bir hidrojen bağı oluşturur. Ardından kütleme işlemi sırasında, su uzaklaştırılır ve metal yüzey ile kovalent bağlantı oluşturulur. Metal yüzeyinde gerçekleşen ana tepkimeler şu şekildedir;



tepkime, 2 tepkimeden daha hızlıdır Böylece, metal yüzeylerinde silan bağlayıcı ajanların yoğunlaşması da desteklenmektedir. Silanlama sırasında bu aşamalar hızlı

gerçekleşir. MeOSi ve SiOSi kovalent bağları bu yapışmayı sağladığı bilinir [43-46]. Silanlama tamamlandığında, silikon ve oksijen bakımından yüzeyde zengin bir ağ kurmasıdır. Oluşturulan bu ince film homojen, hidrofobik ve su alımına karşı dirençlidir. Bu filmin kalınlığı, siloksan çözeltisinin derişimine bağlıdır. İşlem sırasında filmde küçük çatlaklar veya delikler oluşursa, bir miktar korozyon görülebilmektedir [47-48].

Del Real ve diğ. [49] çalışmalarında  $\gamma$ -methacryloxypropyltrimethoxysilane ( $\gamma$ -MPS) ve sulfo ferrik dağlama (P2 etch) yüzey işlemlerini 6082-T651 alüminyum alaşımlarına uygulayarak akrilik bazlı Loctite Hysol H4800 kodlu yapıştırıcı ile birleştirmişlerdir. Yapıştırma bağlantısının tuzlu su, su ve nem gibi ıslak ortamlardaki kayma dayanımı değerlerini incelemişlerdir. Yapıştırma bağlantıları iki farklı sıcaklıkta %31 ve %95 nem altında, deiyonize su ortamında ve ağırlıkça %3 sodyum klorür solüsyonunda 10, 30 ve 90 gün bekletilmiş daha sonra numunelere tekil bindirme kayma testleri uygulanmıştır. Beş farklı yüzey işlemi uygulanmıştır; (1) Temin edildiği gibi, (2) Metil etil keton ile yağ giderme işlemi, (3) Metil etil keton ile yağ giderme ve zımparalama, (4) P2 dağlama ve (5)  $\gamma$ -MPS ile silanlama işlemi. Yüzey pürüzlülüğü değerlerinin ( $R_a$ ) sırasıyla 1. ve 2. yüzey işlemleri uygulanan malzeme için 0,066  $\mu\text{m}$ , 3. Yüzey işlemi uygulanan numune için 0,131  $\mu\text{m}$ , 4.yüzey işlemi uygulanan numune için 0,315  $\mu\text{m}$  ve 5.yüzey işlemi uygulanan numune için 0,089  $\mu\text{m}$  olduğu belirtilmiştir. Yapıştırma bağlantılarına uygulanan tekil bindirme testleri sonucunda hiçbir yüzey işlemi yapılmamış numunelerin 4080 N hasar yüklerine ulaştığı, P2 dağlama ve  $\gamma$ -MPS işlemi yapılmış bağlantıların ise sırasıyla 6482 N ve 5845 N yük değerlerinde hasarlandığı tespit edilmiştir. 25 °C ve 50 °C'de 90 gün boyunca farklı sulu ortamlara maruz kalan yapıştırma bağlantılarının tekil bindirme test sonuçları Şekil 1.12'de gösterilmiştir. Şekil 6'dan genel olarak P2 dağlama ve  $\gamma$ -MPS silanlama işlemi ile akrilik bazlı yapıştırıcının metal yüzeyine iyi yapıştığı, özellikle nemli ve sulu ortamlarda dahi bağlantıyı hasara uğratacak maksimum yük değerinin yağ giderme ve zımparalama yüzey işlemi uygulanan numunelere göre daha yüksek çıktığı tespit edilmiştir [49].



Şekil 1.12. (a) 25 °C ve (b) 50 °C’de 90 gün boyunca farklı sulu ortamlara maruz kalan yapıştırma bağlantılarının tekil bindirme test sonuçları [49]

Çift işlevli olmaları nedeniyle, silan bağlama ajanları, malzeme yüzeyi üzerinde aktif bölgeler ve bağlayıcı moleküllerin karşılık gelen reaktif grupları ile kimyasal bağlar oluşturabilirler. Bu şekilde, metal yüzeyi ve kaplama arasında dengeli, yüksek enerjili birleşme gerçekleşmektedir. Silanlama yüzey işlemi bu nedenle kimyasal olarak aktif bağlayıcı maddeler olarak sınıflandırılmaktadır [43].

Bu işlemlerin çoğu, metalin sıvı organik çözücülere ve / veya inorganik çözeltilere maruz bırakılmasını gerektiren "ıslak" işlemlerdir. Bu nedenle, ıslak ön işlemlerin bir ana dezavantajı ekolojik nitelikte olup sağlık, güvenlik ve çevresel endişe yaratmaktadır. Lazer işleme tekniği burada alternatif bir "kuru" ön işlem olarak önerilmektedir [50].

Kimyasal yüzey işlemleri hakkında yapılan literatür incelemeleri sonucunda; krom alerjisi, kanser gibi insan sağlığına zararlı ve çevresel olarak toksik etkileri kanıtlanmış dezavantajlara sahiptir. Kimyasal yöntemlerin dezavantajları nedeniyle literatürde



alternatif yöntemler aranmaktadır. Bu doğrultuda lazer ile yüzey işleme alternatif yöntem olarak geliştirilmektedir. Ayrıca kimyasal yüzey işlemlerinin tez çalışmasında referans yapışma dayanımları tespit edilip, yine tezde yapılacak lazer işleme metodu ile kıyaslanması amacıyla uygulanacaktır.

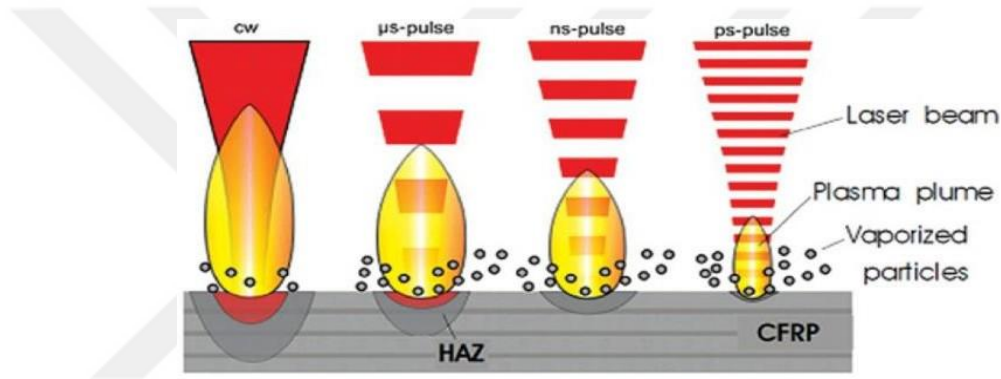
### **1.6. Lazer ile Yüzey İşleme**

Lazer ile yüzey işleme yukarıda bahsedilen tekniklerin neredeyse tüm dezavantajlarının üstesinde gelebilecek bir tekniktir. Lazer işleme tekniği ile yüzeydeki kirlilik tamamen kaldırılabilir ve yapıştırma için uygun bir yüzey elde edilebilir. Mekanik yöntemlerin aksine kuru ortamda gerçekleştirilebilir. Ayrıca lazerle yapılacak optik tasarımlarla kısa süreler içinde geniş alanlar hazırlanabilir ve temassız bir işlem olduğu için kolaylıkla otomasyona tabii tutulabilir [51]. Günümüz lazer teknolojilerinin geldiği noktada lazer demetinin yüzeye aktardığı ısı miktarı atım süresi, atım enerjisi ve tekrarlama oranı olmak üzere birçok farklı parametre ile kontrol edilebilmektedir. Bunlara ek olarak malzemelerin lazer dalgaboyuna verdiği tepki de farklılık göstermektedir. Bu durum yüzeylerin başka hiçbir teknik ile mümkün olamayacak hassaslıkta işlenebilmesine imkan sağlamaktadır [51].

Kompozit/metal parçaların yapıştırma ile birleştirilmesinde yapılan yüzey hazırlığı çalışmaları incelendiğinde genellikle mekanik zımparalama gibi yöntemlerin daha sıklıkla kullanıldığı tespit edilmiştir. Güncel çalışmalarda ise malzemelere zarar vermeden istenilen yüzey formasyonunu hem fiziksel hem de kimyasal açıdan hazırlayabilecek yeni nesil lazer işleme yöntemleri de denenmiştir. Lazerlerin yüzeylerde yarattığı kontrollü pürüzlülük ile yüzeylerin çeşitli uygulamalara genişletilmesi sağlanmaya çalışılmaktadır. Lazerlerin malzemelerin yüzeylerinde oluşturdukları fiziksel ve kimyasal değişimlerin getirdiği avantajlar ortaya çıkmasıyla beraber lazer ile yüzey modifikasyonu ve yüzeylerin fonksiyonelleştirilmesi üzerine farklı bilimsel alanlara hitap eden pek çok çalışma gerçekleştirilmiştir.

Lazerler, atımlı ve sürekli modda ışığa veren lazerler olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Atımlı lazerler ile yapılan aşındırma işleminde kullanılan lazerin atım uzunluğuna ve dalga boyuna bağlı olarak lazer demeti ile malzeme etkileşim mekanizması farklılaşmaktadır [52]. 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 [53]. Atım sürelerine bağlı olarak lazer malzeme aşındırma mekanizmalarına ait sembolik gösterim Şekil 1.13.'de görülmektedir.



Şekil 1.13. Atım sürelerine bağlı olarak lazer malzeme aşındırma mekanizmaları [54]

Metalik malzemelerin yüzey işleme çalışmaları yapışma dayanımını arttırmak için malzeme yüzeylerinde mekanik kilitleme ve kimyasal bağlanma yolu olmak üzere 2 temel mekanizmada iyileştirme sağlanabilmek için yapılır. Mekanik kilitleme sağlayabilecek pürüzlü yüzeyler her atım süresinde lazerler ile gerçekleştirilebilirken, kimyasal bağ sağlayabilecek yapıların oluşabilmesi için ısı etkileşimi ile yüzeyde işlem yapabilecek lazerlerin kullanımı daha uygundur. Bu nedenle araştırma sürecinde nanosaniye atım uzunluğuna sahip alüminyum alaşımlar ile foto-termal bir aşındırma mekanizması gerçekleştiren fiber lazer kullanılmıştır.

## 2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI

Alüminyum/CFRP yapıştırma bağlantılarının dayanımının iyileştirilmesine yönelik alüminyum alaşımı yüzeyini lazer ile modifiye etmeye çalışan referanslar tespit edilmiş olup aşağıda belirtilmektedir.

Mandolino ve diğ. 6061-T6 alüminyum levhaların yüzeylerini çevreye duyarlı olduğunu belirttikleri fiber lazer ve plazma ile işleyerek yapıştırma dayanımı üzerine yaptıkları çalışmalarında en yüksek yapışma dayanımını referans numuneye kıyasla 2 kat artış sağladıkları fiber lazer ile işleyerek elde ettiklerini belirtmişler [55].

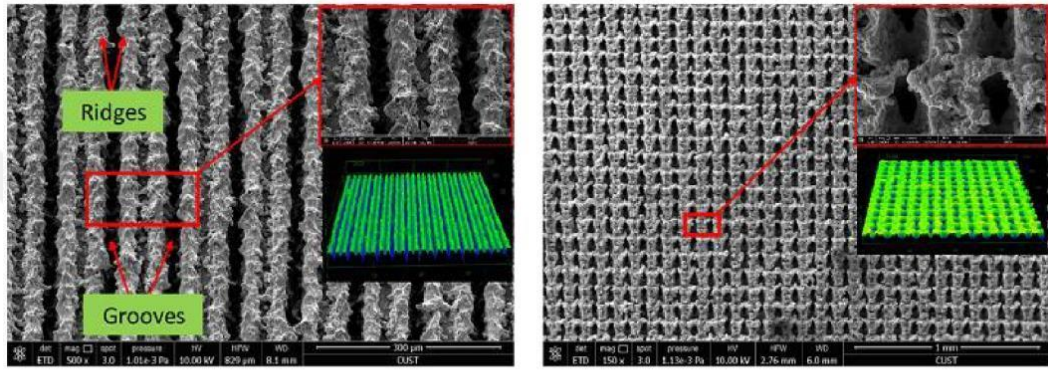
Gendler ve diğ. anodizasyon ile yalıtılmış 2024-T3 alüminyum alaşımının yüzeyini excimer lazer ile işleyerek yapışma bağlantısı dayanımını %150 arttırdıklarını belirtmişler [56]. Yapışmadaki bu artışı özellikle yüzeyde elde edilen pürüzlülük ve porozite miktarındaki artışa bağlı olarak yüksek derecelere çıkan mekanik kilitlemeye bağlamışlar.

Aynı 2024-T3 alaşımını başka bir tür lazer olan Nd-YAG ile farklı parametrelerde (lazer demeti çapı, enerji yoğunluğu) işleyerek epoksi yapıştırıcılar ile bağlantı oluşturup kırılma enerjilerini inceleyen Spadaro ve diğ. de yüksek enerjili işlemlerde elde edilecek daha girintili çıkıntılı yapı sayesinde artan yüzey alanına bağlı olarak ortaya çıkan mekanik kilitleme sayesinde daha yüksek kırılma enerjilerinin ve kohesiv hasar mekanizmasının elde edildiğini vurgulamışlardır [57].

Sabau ve diğ. Nd:YAG lazer ile 5182 alüminyum alaşımını farklı lazer parametreleri ile işleyerek yapışma bağlantısı için hazırlayıp sadece yüksek çözünürlüklü mikroskoplar ile yüzey karakterizasyonu yapmışlardır [58].

5251 alüminyum alaşımını CO<sub>2</sub> lazer ile işleyerek yapışma dayanımı üzerindeki etkilerini inceleyen Critchlow ve diğ. sadece yağı arındırılmış kontrol numunelerden elde edilen yapışma bağlantısına kıyasla %22'lik bir dayanım artışı elde etmişlerdir [59].

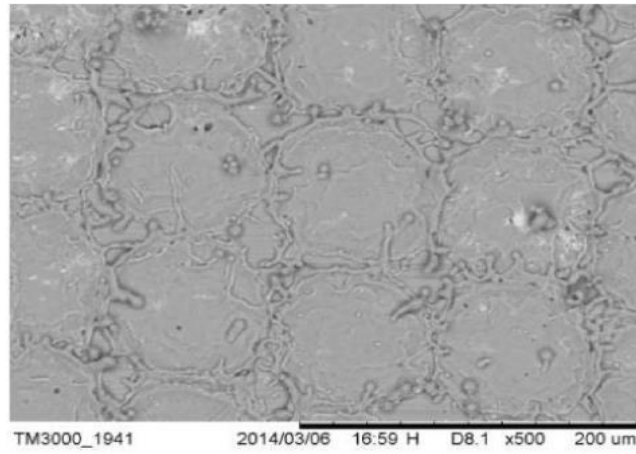
Yang ve diğ. [60] inconel yüzeylere su tutmaz özellik kazandırılması amacı ile gerçekleştirdikleri çalışmada 20 W ortalama güce sahip 1064 nm dalgaboyunda fiber lazer kullanılmıştır. Yapılan çalışmada elde edilen yüzeylere ait elektron mikroskobu görüntüleri Şekil 9’da görülmektedir. Araştırmacılar farklı geometride oluşturdukları yapılarda Ra=26 µm pürüzlülüğe sahip yüzeyler elde etmişlerdir. Bakır ve pirinç gibi yüksek yüzey yansıtıcılığa sahip metal yüzeylerde 20 W fiber lazer ile gerçekleştirilen diğer bir çalışmada ise 25 µm derinlikte kanallar oluşturulmuştur (Şekil 2.1) [60].



(a) Line pattern

(b) Grid pattern

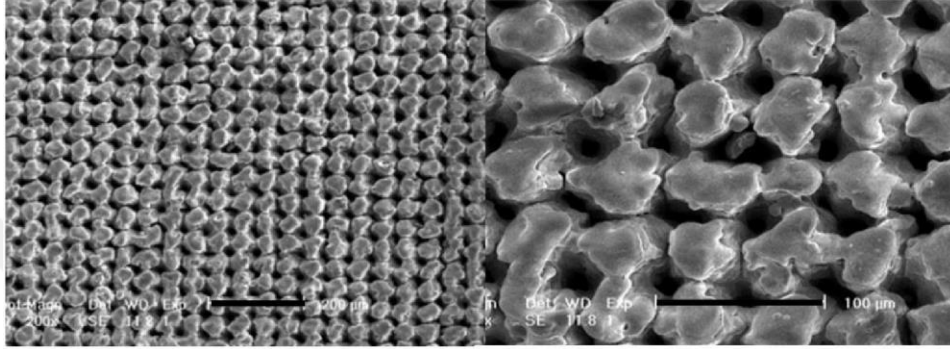
Şekil 2.1. 20 W ortalama güce sahip fiber lazer ile işlenmiş inconel yüzeyler [60].



Şekil 2.2. 30 W maksimum güce sahip fiber lazer ile işlenmiş alüminyum yüzeylerin görüntüsü [55].

Mandolfino ve diğ. [55] yüzeyleri lazer ile işlenmiş alüminyum levhaların yapıştırılması üzerine yaptıkları çalışmalarında yüzey temizleme sırasında yüzeyde yarattıkları pürüzlülük ile kayma gerilmesi testinde yüzeyleri işlenmemiş örneklere göre ortalama 2.5 kat artış gözlemişlerdir. Alüminyum yüzeylere ait görüntüler Şekil 2.2’de görülmektedir.

Starikov ve diğ. [61] silisyum karbür temelli seramik malzemelerin titanyum levhalar ile yapıştırma ile birleştirme konusunda yaptıkları çalışmada her iki malzemenin yüzeyinde de mikro sütun dizileri oluşturmuşlardır (Şekil 2.3). 100 W ortalama gücünde Nd:YAG lazeri kullanılarak yaptıkları çalışmada işlenmiş yüzeyler ile elde edilen yapışma dayanımında işlenmemiş yüzeyler ile yapılan yapıştırmalı bağlantıya göre %12'lik bir artış gözlemişlerdir.

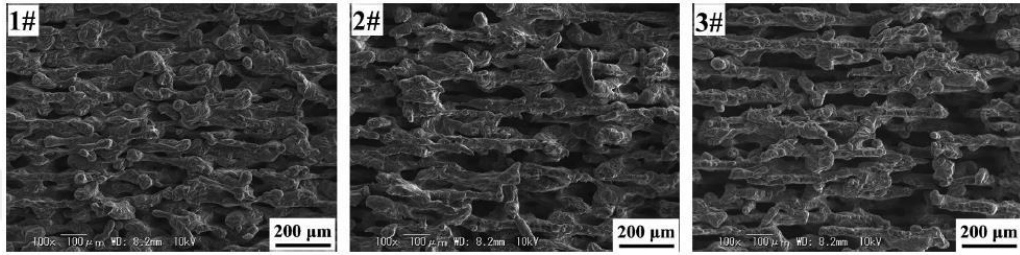


Şekil 2.3. Silisyum karbür temelli seramik ve titanyum malzemelerin yüzeylerinde oluşturulan mekanik yapılar [61].

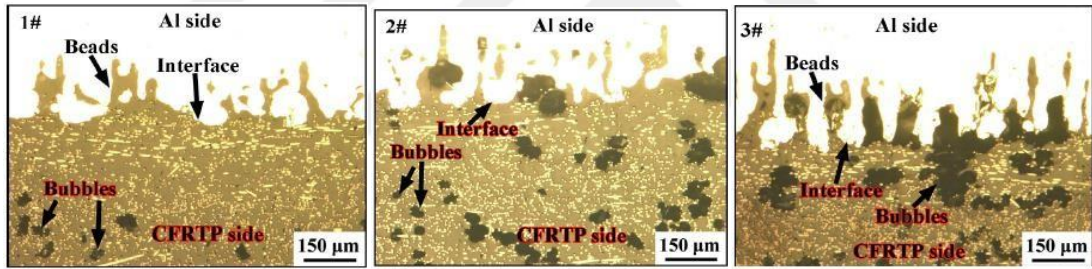
Lazer ışığının yerel olarak malzemenin kristal yapısı, kimyası ve morfolojisinde neden olduğu değişimler malzemenin uygulamadaki davranışlarının değişimine neden olmaktadır [62]. Ayrıca lazerin büyük miktarlardaki enerjiyi yüzeye yakın bir bölgede, belirlenen sınırlar içinde ve çok kısa sürelerde malzemeye aktarabilmesi, malzemenin özelliklerini yerel olarak değiştirme imkânı vermektedir [62].

Wu ve diğ. (2020) [63], 5052-Al alaşımı yüzeyini türü hakkında detay verilmemiş lazer ile zayıf (1#), orta (2#) ve yüksek (3#) lazer güçlerde Şekil 2.4'de görüldüğü gibi işlemişlerdir [1]. Farklı güçlerde yapılan lazer yüzey işlemleri sonucunda elde edilen mikro yapıları incelediklerinde; yüzeyde oluşan gözeneklerin düşük lazer güçleri sonucunda küçük boyutlu olduğunu ancak lazer işleme gücünün artırılması ile gözeneklerin dar ve uzun bir hale dönüştüğü rapor edilmiştir. Lazer gücü artırıldığında bu boşluk yapılarının derinliğinin 120 µm'den 240 µm'ye, genişliğin ise ortalama 25 µm'den 100 µm'ye kadar arttığı belirtilmiştir. Ardından işlenmiş 5052-Al alaşımı ile poliamid 6 esaslı CFRTP (carbon fiber reinforced thermoplastic polymer) ile sürtünme kaynağı metoduyla birleştirmişler ve yapışma dayanımı tespiti için mekanik teste tabi tutmuşlar. Elde edilen test sonuçlarına göre en yüksek yapışma dayanımı 1# nolu işleme türü için elde edilmiştir. Bu sonuca göre lazer işleme ile elde edilmiş

gözeneklerin derinliği arttıkça yapışma dayanımının düştüğü rapor edilmiştir. Hasarlanma sonrası yüzeylerden alınan Şekil 2.5'teki SEM görüntülerinde yaptıkları incelemeler sonucunda da yapışma dayanımındaki iyileşmeyi mekanik kilitleme etkisi ile de kanıtladıklarını belirtmişler. Ancak yüksek güçlerde yaptıkları işlemler sonrasında elde edilen derin yapılara kompozitin PA6 polimer matrisinin ısıl etki ile nüfuz etmesi güçleştiği için Şekil 2.5'te gösterildiği gibi boşluklar meydana getirdiği ve bu nedenle de kayma dayanımının artışının da mümkün olmadığı vurgulanmıştır.



Şekil 2.4. 5052-Al alaşımı yüzeyine lazer ile yapılan farklı güçlerdeki işlemin SEM görüntüleri [63].



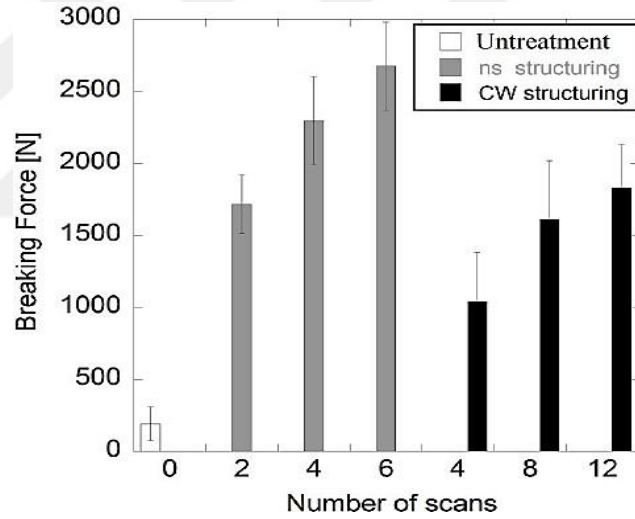
Şekil 2.5. Lazer ile işlenmiş 5052 Al-CFRTP sürtünme kaynağı bağlantılarının mekanik test sonrası kesit SEM görüntüleri [63].

Vidal ve diğ. (2014) [64], çelik metali ile %30 cam elyaf takviyeli PA6 kompozitini hibrit birleştirmede çelik yüzeyine açılan farklı derinlik, genişlik ve oranlarına bağlı olarak yapışma dayanımının değişimini rapor etmişlerdir. Çelik yüzeyine açılacak farklı genişlik ve derinlikler sürekli dalga boyuna sahip (continuous wave-CW) bir lazer ve nanosaniye fiber (nanosecond fiber -ns) lazer kullanılarak tekrarlı atışlarla elde edilmiştir. Farklı lazer ve atım sayılarına bağlı elde edilen mikro yapıların üstten ve kesitten görüntüleri incelenip elde edilen mikro yapıların derinlik, genişlik ve derinlik/genişlik oranı değerleri ölçülerek Tablo 2.1'deki şekliyle verilmiştir. Lazer tekrar atım sayısı arttıkça çelik yüzeyinde oluşan kanalın her iki lazer tipi için de genişliği sabit kalırken derinliğinin arttığı açıkça görülmektedir.

Tablo 2.1. İşleme sonrası elde edilen izlerin geometrik değerleri [64]

Laser Source	Number of scans	Depth ( $\mu\text{m}$ )	Width ( $\mu\text{m}$ )	Aspect ratio
ns active fiber	2	$19 \pm 2$	$72 \pm 2$	0.26
ns active fiber	4	$37 \pm 2$	$72 \pm 2$	0.52
ns active fiber	6	$56 \pm 2$	$72 \pm 2$	0.78
CW active fiber	4	$75 \pm 32$	$21 \pm 4$	3.57
CW active fiber	8	$133 \pm 44$	$21 \pm 4$	6.33
CW active fiber	12	$155 \pm 56$	$21 \pm 4$	7.38

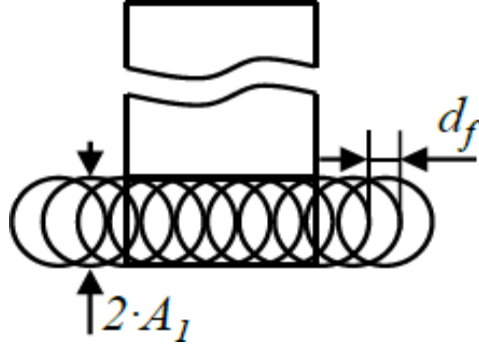
Farklı geometrik yapılarda elde edilen çelik malzemeler ile cam elyaf takviyeli PA6 kompoziti lazer ile kaynak edilerek yapışma dayanımı testlerine tabi tutulmuş ve tespit edilen sonuçlar Şekil 2.6'deki grafikte verilmiştir. Lazer tipinden ziyade yüzeye gönderilen atım sayısına odaklanılan bu çalışmada, atım sayısına bağlı olarak artış gösteren derinliğin, yapışma dayanımının artışı sağladığı tespit edilmiştir.



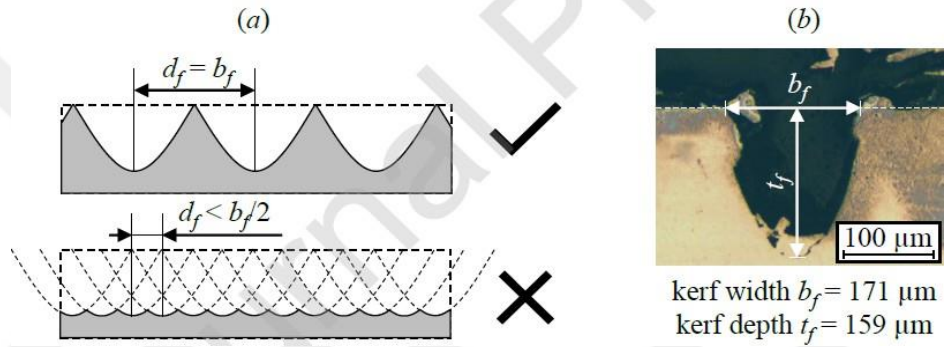
Şekil 2.6. Lazer tipi ve tekrar atım sayısına bağlı olarak elde edilen yapışma dayanımı değerleri [64].

Wunderling ve diğ. (2020) [65] çinko kaplı çelik ile CFRP kompozitinin ısı ile birleştirilmesi sonucu yapışma dayanımını geliştirmeye çalışmışlardır. Bu amaçla çelik malzemenin yapışma yüzeyi alanını artırmak amacıyla 1070 nm dalga boyuna ve 3 kW gücüne sahip sürekli atımlı lazer kullanılarak Şekil 2.7'de görüldüğü gibi dairesel salınımlarla işlenmiştir. Oluşan izin genişliğinin işleme parametreleri olarak lazer gücü, odağın hızı ve çapına bağlı olduğunu belirten araştırmacılar 3000 W gücünde, 5 m/s odak hızında ve 171  $\mu\text{m}$  kanal aralığında işleme yaparak Şekil 2.8'deki gibi bir

kanal izini kabul etmişlerdir.



Şekil 2.7. Çelik yüzeyine yapılan lazer işleme izleri [65]



Şekil 2.8. (a) kanal aralığına bağlı olarak üst üste gelme kabul durumu, (b) açılmış kanalların geometrik parametreleri (güç=3000 W, hız=5 m/s) [65]

Kanal aralığını ( $d_f$ ) değiştirerek oluşturulan mikro yapılar sayesinde yüzey alanı artırılan çelik malzemesini CFRP ile ısıl birleştirme ile yapıştırıp hem deneysel olarak hem de sayısal analiz metodu ile yapışma dayanımını raporlamışlardır. Yapışma dayanımı değerinin yüzeyde oluşturulan kanalların aralıklarına ciddi ölçüde bağlı olduğu görülmektedir. Buna bağlı olarak araştırmacılar matematiksel hesaplama ile optimize edilmiş kanal aralığını 487  $\mu\text{m}$  olarak raporlamışlardır.

Literatür çalışmaları incelendiğinde mekanik kilitlemenin yapışma bağlantılarında önemli bir etkisi olduğu açıktır. Mekanik kilitleme mekanizmasının yapışma dayanımı üzerindeki potansiyel katkısı göz önüne alındığında AA2024-T3/CFRP yapıştırma bağlantılarında mekanik kilitlemenin dayanım üzerindeki etkilerinin incelenmesi gerektiği fikri doğmuştur. Tez çalışması süresince yapılan literatür araştırmaları sonucunda AA2024-T3/CFRP malzemelerinin mekanik kilitleme dayanımı hakkında çalışmaya rastlanmamıştır. Çalışma içerisinde kimyasal yüzey işlemlerinin doğruluğu



ve kıyaslanabilirliği sağlanması için referans değerler araştırılacaktır. AA2024-T3/CFRP hibrit yapıştırma bağlantısının yapışma dayanımını artırmak için lazer işleme tekniği ile yzeyde yapışmayı iyileştirecek oksit tabakası kalınlığı artırmaya ynelik çalışmalar yapılacaktır. AA2024-T3 alüminyum alaşımımız ve kullanılması uygun olduğuna karar verilen fiber lazer için kanal tipi girinti çıkıntı için cihaz parametre optimizasyonu belirlenecektir. Ulaşılan kanal tipi geometrisine bağlı olarak çalışmanın devamı amacıyla “lazer geçiş sayısının artırılması”, “kanal aralığının değiştirilmesi”, “kanal açısının değiştirilmesi”, “farklı açılarda dzenlenmiş kanallardan oluşan desenlerin” kullanılması ile AA2024-T3/CFRP yapıştırma dayanımı üzerine çalışmalar yapılacaktır. Her bir parametre için kendi içinde sınırlar belirlenerek optimizasyon çalışmaları yapılıp yapıştırma dayanımı üzerindeki etkileri değerlendirilerek optimum seviyeler tespit edilerek bir sonraki parametrenin optimizasyon denemelerine geçilecektir.

### 3. MALZEME VE METOT

#### 3.1. Karbon Fiber Takviyeli Kompozit (CFRP) Malzeme

Deneyleerde sürekli karbon fiber takviyeli epoksi matrisli 8 kat tabakalı kompozit malzemeler Kompozitsan (İzmir/Türkiye) firmasından tedarik edilmiştir. Karbon fiber takviyeli (CFRP) laminant malzemeler reçine aktarmalı kalıplama ( Resin Transfer Molding (RTM) ) yöntemi uygulanarak üretilmiştir. CFRP malzeme 2,3 mm x 101 mm x 25,4 mm boyutlarında su jeti ile kesilerek hazırlanmıştır.



Şekil 3.1. Deneyleerde kullanılan CFRP malzemesi

#### 3.2. AA2024-T3 Metal Malzeme

Deneyleerde AA2024-T3 alüminyum alaşım malzemeleri Seykoç Alüminyum (Kocaeli/Türkiye) firmasından tedarik edilmiştir. AA2024-T3 alüminyum malzemeleri 1,6 mm x 101 mm x 25,4 mm boyutlarında Jet Lazer firmasında kestirilerek hazırlanmıştır. AA2024-T3 malzemesinin kimyasal bileşimi ve mekanik özellikleri sırasıyla Tablo 2.1 ve 2.2’de gösterilmiştir.

Tablo 3.1. AA2024 Alüminyum Alaşımının Kimyasal Bileşimi (Seykoç Al.)

Fe	Si	Cu	Cr	Mn	Mg	Zn	Zi+Ti	Diğer	Al
0,5	0,5	3,8-4,9	0,1	0,3-0,9	1,2-1,8	0,25	0,15	0,15	Kalan

Tablo 3.2. AA2024 Alüminyum alaşımının mekanik özellikleri (Seykoç Al.)

Temper	Akma Mukavemeti (MPa)	Çekme Mukavemeti (MPa)	Uzama (%50)	Sertlik (Brinel)
T3	340	475	18	120

### 3.3. Yapıştırıcı

Yüzeyleri işlenen alüminyum malzemelerin kompozit malzemeler ile yapıştırma işleminde yapıştırıcı olarak havacılık sektöründe kullanılmayı yaygın olan iki bileşenli (A-epoksi esaslı, B-amin esaslı) sıvı Loctite EA 9396 AERO kullanılmıştır. Düşük viskozite ve oda koşullarında kürlenme özelliğine sahip bu yapıştırıcı ayrıca 55 °C ile 177 °C sıcaklık aralığında en iyi mukavemet özelliklerini sergilemektedir. Ayrıca kolay taşınabilme ve oda koşullarında uzun süreli depolanabilme özelliklerinden dolayı tercih edilmektedir. Bunun yanında çalışma kapsamında üretilen mikro yapılara nüfuziyetinin daha iyi olacağı düşünülerek düşük viskoziteli Loctite EA9396 AERO tercih edilmiştir. Loctite EA9396 AERO' nun ticari etiketli fotoğrafı ve teknik özellikleri Şekil 3.2' de verilmiştir.

Uncured Adhesive Properties	Part A	Part B	Mixed
	Color	Aqua-Blue	Light Amber Red - Purple (Gardner color 17+)
Viscosity @ 77°F	400 - 1,400 Poise	0.7 - 1.1 Poise	35 Poise
Brookfield, HBT	Spdl 4 @ 10 rpm	Spdl 1 @ 100 rpm	Spdl 1 @ 20 rpm
Viscosity @ 25°C	80 Pa·S	0.1 Pa·S	3.5 Pa·S
Brookfield, HBT	Spdl 4 @ 2.1 rad/s	Spdl 1 @ 10.5 rad/s	Spdl 1 @ 2.1 rad/s
Density (g/ml)	1.19	1.00	1.14
Shelf life			
@ <40°F/4°C	1 year	1 year	
@ <77°F/25°C	1 year	1 year	

Şekil 3.2. Loctite EA9396 AERO ticari etiketli fotoğrafı ve teknik özellikleri

### 3.4. Metotlar

#### 3.4.1. Yüzey hazırlama metotları

Literatür çalışmalarından edinilen bilgiler ışığında tekil bindirme işlemi yapılmadan önce ön yüzey işlemleri uygulanması gerekmektedir. Çalışmanın özgünlüğü gereği AA2024-T3 malzemesi için literatür çalışmalarını kıyaslayabilmek ve referans değerlere ulaşabilmek adına çalışmalar yapılmıştır.

### 3.4.1.1. Zımparalama

AA2024-T3 alüminyum alaşımının zımparalama işlemleri 240 numara zımpara kağıdı kullanılarak el ile olabildiğince kontrollü dairesel yönde hareketler uygulanarak yapılmıştır. Bol tekrar uygulaması ile malzeme yüzeyi olabildiğince homojen ve düzenli şekilde zımparalanmıştır.

### 3.4.1.2. Fpl-dağlama

Çalışmalarda kullanılan tüm kimyasallar analitik saflıkta olup MERCK firmasından satın alınmıştır. İşlem öncesinde alüminyum numuneler saf aseton ile oda sıcaklığında yıkanmıştır. Temizlenen numuneler hemen, 30 kısım su (H<sub>2</sub>O), 10 kısım sülfürik asit (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) ve 2 kısım sodyum dikromat (Na<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>)'den oluşacak şekilde hazırlanan farklı sıcaklıklardaki (60-70-80 °C) FPL dağlama çözelti banyolarına daldırılmıştır. Bekleme süresi (10-15-20 dk.) ardından plakalar banyodan çıkartılıp saf su püskürtülerek yıkanmıştır. Son olarak 60 °C sıcaklıkta havası alınmış etüvde 1 saat süre ile kurutulmuştur.

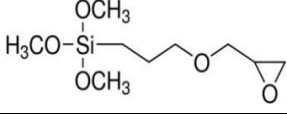
FPL dağlama işleminde literatüre bakıldığında proses girdisi olarak farklı sıcaklık ve sürelerde işlemin yapıldığı görülmüştür. Al/CFRP yapıştırma işlemi öncesi alüminyumun yüzeyinin işlenmesinde optimum FPL dağlama işlemi için bu parametrelerden sıcaklık için 60 ile 80 °C arasında, süre olarak da 10 ile 20 dakika arasında çalışılmasına karar verilmiş ve her bir varyasyona göre FPL dağlama işlemleri yapılarak modifiye edilen yüzeylerin fiziksel ve kimyasal karakterizasyonları yapılmıştır.

### 3.4.1.3. Silanlama

Çalışmada kullanılan tüm kimyasallar analitik saflıkta olup SIGMA-ALDRICH firmasından satın alınmıştır. Kullanılan (3-Glycidyoxypropyl) trimethoxysilane (C<sub>9</sub>H<sub>20</sub>O<sub>5</sub>Si) kimyasal yapısı ve başlıca özellikleri Tablo 3.3'de görülmektedir.

Silanlama işlemi öncesinde AA2024-T3 alüminyum plakalar safsızlıkları gidermek ve yüzeyi aktif hale getirmek amacı ile metil etil keton (C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>COCH<sub>3</sub>) ile oda sıcaklığında yıkanmıştır.

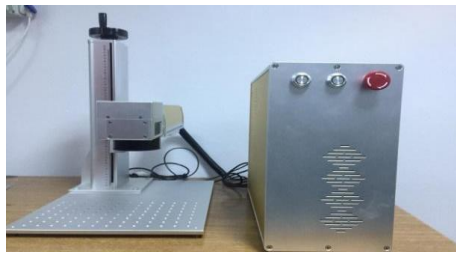
Tablo 3.3. Silan malzemesinin türü ve temel özellikleri (SIGMA-ALDRICH)

Adı	Kimyasal Formülü	Molekül ağırlığı (g/mol)
(3-glycidyloxypropyl) trimethoxysilane (C <sub>9</sub> H <sub>20</sub> O <sub>5</sub> Si)		236,34

Hacimce farklı oranlarda (1-3-5%) hazırlanan silan çözeltileri 1 saat 200 rpm karıştırma hızında IKA marka manyetik karıştırıcıda hidroliz edilmiştir. Hidroliz edilen silan çözeltinin pH'ı 1 molar asetik asit (CH<sub>3</sub>COOH) çözeltisi damlatılarak 4'e ayarlanmıştır. AA2024-T3 plakalar 15 dakika boyunca hazırlanan silan havuzlarına daldırılmıştır. Silanlama işlemi sonunda tüm numuneler 60 °C sıcaklıkta havası alınmış etüvde 1 saat süre ile kurutulmuştur.

#### 3.4.1.4. Lazerle yüzey işleme

AA2024-T3 alaşımının yüzey işleminde kullanılan Fiber lazer 50 W ortalama gücünde ve 1.06 µm dalgaboyuna sahip olup 100 ns'lik atımlar üretebilmektedir. Maksimum atım enerjisi 1 mJ olup 10 kW'lık tepe gücüne ulaşabilmektedir. Kullanılacak fiber lazer 20 kHz - 80 kHz tekrarlanma oranlarında lazer atımları üretebilmektedir. Lazer demetinin malzeme yüzeyine aktarılması 2 D tarayıcı ayna sistemi ve F-Theta mercekten oluşan galvo tarama sistemi ile gerçekleştirilmektedir. Sistemde 160 mm odak uzaklığına sahip F-Theta merceği bulunmaktadır. Bu merceği 100x100 mm<sup>2</sup>'lik bir alanda bilgisayar kontrollü olarak işlem yapma imkânı vermektedir. Kocaeli Üniversitesi Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi bünyesinde bulunan Havacılık Malzemeleri Araştırma ve Geliştirme Laboratuvarı (HAMAG) altyapısında var olan özellikleri yukarıda verilen Fiber lazer Şekil 3.3'te görülmektedir.



Şekil 3.3. Alüminyum malzemelerin yüzey işleminde kullanılacak 50 W gücünde fiber lazer

#### 3.4.1.5. Yüzey işleme sonrası ağırlık kaybı ölçümü



Şekil 3.4. Weightlab  
Instruments marka  
laboratuvar terazisi

Kimyasal ve lazer işlemleri sonrası malzemede meydana gelen ağırlık değişimlerini tespit etmek için laboratuvar terazisi ile hem işleme öncesi hem de işlemler sonrası tartımlar yapılarak ağırlık farkları kaydedilmiştir.

#### 3.4.1.6. İşlenen yüzeylerin optik mikroskop ile incelenmesi

Yüzeyler işlendikten sonra Kocaeli Üniversitesi Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi bünyesinde bulunan Havacılık Malzemeleri Araştırma ve Geliştirme Laboratuvarı (HAMAG) altyapısında var olan “Olympus SZX16” model mikroskop ile incelenmiştir. Farklı büyütme oranlarında yüzey ve kesitlerden alınan görüntüler ile kimyasal işlemlerle elde edilen yüzey değişimleri ve lazerle işlemede malzeme etkileşimi, lazer aşındırma seviyeleri, ısıdan etkilenmiş bölgenin genişliği gibi değişimler gözlenmiştir.



Şekil 3.5. Olympus SZX16 model optik mikroskop

#### 3.4.1.7. Kontak açısı ölçümü

Malzemelerin yüzeyleri işlendikten sonra yüzey enerjilerinin ve pürüzlülüklerinin durumuna göre ortaya çıkan kontak açısı değişimlerini belirlemek ve yapıştırıcının yayılması ve ayrıca kürleme sonrası mekanik kilitleme sağlayabilmesi hakkında yorum yapabilmek için Kocaeli Üniversitesi Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi bünyesinde bulunan Havacılık Malzemeleri Araştırma ve Geliştirme Laboratuvarı (HAMAG) altyapısında bulunan  $\pm 2^\circ$  sapma ile çalışan kontak açısı ölçüm cihazı (Şekil 3.6) ile ölçümler alınmıştır.



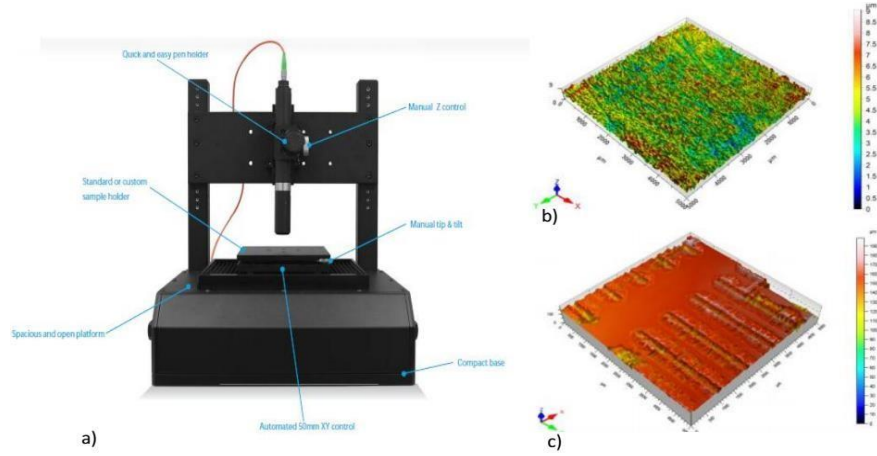
Şekil 3.6. Kontak açısı ölçüm cihazı

#### 3.4.1.8. Lazer 3D optik profilometre ile analiz

Deneysel çalışmalar süresince modifiye edilen yüzeylerin pürüzlülüklerini tespit etmek amacı ile "Nanovea PS50" marka 3D optik profilometre cihazı kullanılmıştır (Şekil 3.7).

Yüzey pürüzlülüğü ölçümleri sonucu malzeme yüzeylerinin 3D topografyaları Mountain Software programı kullanılarak oluşturulmuştur.

Bu topografya görüntülerinde malzemelerin işlenen yüzeylerinin (25,4 mm x 25,4 mm)  $R_a$  – aritmetik ortalama yüzey pürüzlülükleri tespit edilmiştir. Bu sayede farklı işleme yöntemleri ile malzeme yüzeylerinde oluşturulan yüzey pürüzlülüğünün yapıştırma sonrası malzemelere uygulanacak olan çekme testlerinden elde edilecek tekil bindirme kayma dayanımı değerlerine etkisi yorumlanmıştır.



Şekil 3.7. "Nanovea PS50" marka Lazer 3D optik profilometre cihazı

#### 3.4.1.9. FTIR analizi

Malzemelerin işleme öncesi ve sonrası moleküler yüzey analizleri Kocaeli Üniversitesi Kimya Mühendisliğinde bulunan Perkin Elmer Spectrum 100 FTIR-ATR cihazı (Şekil 3.8) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. ATR yüzey analizleri için Germanyum kristali kullanılarak  $700-4000\text{ cm}^{-1}$  spektral bölgesi analiz edilmektedir. Spektrum kayıt işlemi taban çıkarması, spektrum tarama yapılması, taban düzeltme ve spektrumda kalan gürültüyü azaltmak için yumuşatma işlemleri sırası ile gerçekleştirilmiştir.

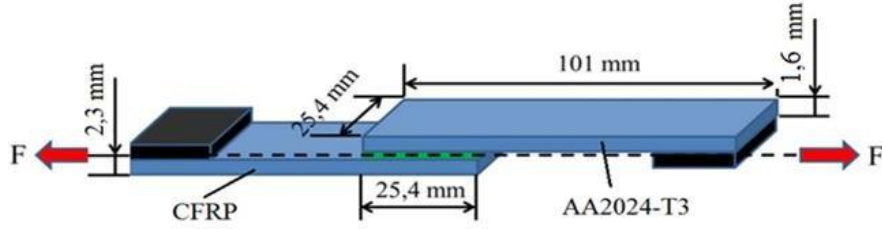


Şekil 3.8. FTIR spektrofotometresi

#### 3.4.1.10. Tekil bindirmeli yapıştırma işlemi

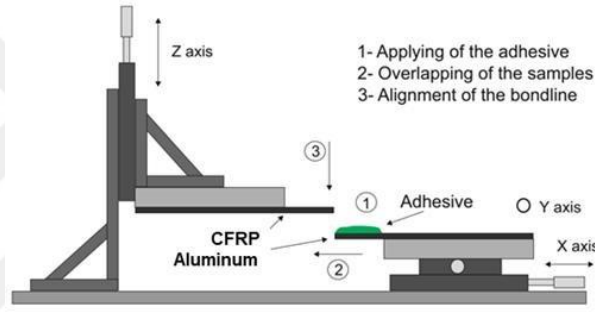
AA2024-T3 ve CFRP numunelerin yapıştırma işlemleri ASTM D5868-01 standardına göre Şekil 3.9'da görüldüğü gibi tekil bindirmeli şekilde yapılmıştır.





Şekil 3.9. ASTM D5868-01 standardına göre tekil bindirmeli yapıştırma işlemi şematik gösterimi

Yapıştırma işleminde aynı anda altı (6) farklı kupon numunenin yapıştırma kalınlığında en fazla  $\pm 10 \mu\text{m}$ 'lik sapma olacak şekilde yapıştırılabilmesi için 3 eksenli ve 25 mm hareket eden yapıştırma düzeneği hazırlandı. Yapıştırma işleminin yapıldığı düzeneğe ait görüntü Şekil 3.10'da görülmektedir.



Şekil 3.10. Yapıştırma işlemi düzeneği ve şematik gösterimi

Yüzeyleri hazırlanan örneklerin yapıştırılması Şekil 10'da görüldüğü gibi 3 aşamada gerçekleştirilmiştir.

1. şamada; yapıştırma alanına hazırlanan yapıştırıcı uygulanmıştır.2. aşamada; 25,4 mm'lik alanın üst üste gelmesi sağlanmıştır. 3. aşamada; örnekler arasındaki mesafe z eksenini hareket ettirilerek planlanan kalınlığa getirilmiştir.

Yapıştırma işlemi bittikten sonra yapıştırıcının kurlenmesi ve katılaşması için düzenek  $66^\circ\text{C}$ 'ye ayarlanmış fırına yerleştirilerek numuneler 1 saatlik kurlmeye bırakılmıştır. 1 saatlik kurlmenin ardından düzenek  $66^\circ\text{C}$ 'lik fırından alınarak oda sıcaklığındaki başka bir fırında 24 saatlik normalizasyon sürecine bırakılmıştır. Ardından tüm kupon numuneler düzeneğinden çıkarılarak en fazla 48 saat içinde tekil bindirme kayma testine tabi tutulmuştur.

#### **3.4.1.11. Tekil bindirmeli kayma testi**

ASTM D5868-01 standardına göre hazırlanmış tekil bindirmeli yapıştırma kupon numunelerinin yapışma dayanımının tespiti için aynı standarda bağlı olarak testler Tübitak MAM'daki mekanik laboratuvarında bulunan Zwick marka universal test cihazında 13 mm/dk'lık hız ile yapılmıştır. Testlerin tek ekseninde eksantriklik olmadan yapılabilmesi için Şekil 3.9'da görüldüğü gibi numunelerin uçlarına ilave ek tampon malzemeleri ters türden olacak şekilde yapıştırılmıştır. Yani alüminyum alaşımı numunesi kısmına kompozit parçadan, kompozit numune kısmına da alüminyum alaşımı parçasından yapıştırılmıştır.

#### **3.4.1.12. Tahribatlı testler sonrası hasar mekanizmalarının incelenmesi**

Mekanik testler sonrası kopan numunelerin yüzeylerinde meydana gelen hasar modlarının analizleri ASTM D5573-99 (Standard Practice for Classifying Failure Modes in Fiber-Reinforced-Plastic (FRP) Joints) standardı doğrultusunda yapılmıştır. Bunun için kopan yüzeylerin fotoğrafları dijital kamera yardımıyla çekilmiş olup incelemeler bu fotoğraflar üzerinde yapılmıştır.

## 4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada fiber lazer ile AA2024-T3 alaşımının yüzeyi işlenerek CFRP malzemesi ile mekanik kilitleme sağlayarak yapışma dayanımına etkisi incelenmiştir. Lazer ile yüzeyi işlemenin ne derece etkin sonuçlar verdiğini kıyaslayabilmek adına literatürde ve pratikte yaygınca uygulanan kimyasal metotların yüzey özellikleri ve yapıştırma performansı üzerine ortaya koydukları sonuçlar tespit edilmiş olup aşağıda sırasıyla verilmiştir.

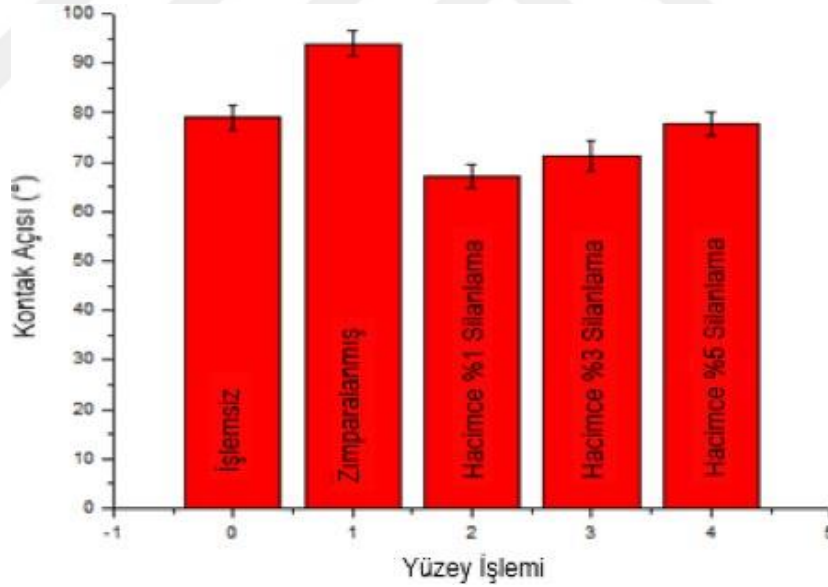
### 4.1. Silanlama İşleminin AA2024-T3 Yüzey Özelliklerine ve Yapıştırma Performansına Etkisi

Kontak açısı ölçümleri yüzeylerin hidrofilik veya hidrofobik yüzey karakteristiği hakkında bilgi sahibi olmak amacı ile kullanılmaktadır. Kontak açısı, yüzeylerin sıvı veya katı malzemeler ile etkileşimi değiştirebilen biyolojik, fiziksel ve kimyasal etkileşimde oldukça öneme sahip bir yüzey karakteristiğidir [66]. Kullanım alanına ve ihtiyaca bağlı olarak farklı yüzey modifikasyonları gerçekleştirerek farklı ıslanma karakteristiğine sahip yüzeyler imal edilebilir. Kontak açısı ölçüm cihazında yapılan ölçümlerden elde edilen işlem uygulanmamış, zımparalanmış ve farklı hacim oranlarında yüzeylerine silanlama yüzey işlemi uygulanmış AA2024-T3 alüminyum malzemelerinin kontak açısı değerleri Şekil 4.1'de verilmiştir. İşlenmemiş numune için kontak açısı değeri  $79^\circ$  olarak ölçülmüş olup hidrofilik olduğu tespit edilmiştir. Genel olarak zımparalanmış numunelerin kontak açısı değerlerinin diğer numunelere uygulanan yüzey işlemlerinin kontak açısı değerlerine göre yüksek çıktığı (yaklaşık olarak  $94^\circ$ ) tespit edilmiştir.

Ghumatkar ve diğ. [67] çalışmalarında belirtildiği üzere yüzey pürüzlülüğü değerlerinin artması ile kontak açısı değerlerinde kayda değer artışların gözlemlendiği tespit edilmiştir. AA2024-T3 malzemesinin yüzey pürüzlülüğü değerlerinin zımparalama ile artması, yüzey üzerinde malzeme yayılmasına karşı bariyer teşkil edeceği belirtilmiştir. Bu olayda aslında yapıştırıcının yüzeydeki pürüzlülüklere tam dolamayacağı bunda yapıştırıcı ile yapıştırılan malzeme ara yüzeyinde optimum

yapışmanın sağlanamayacağını gösterdiği söylenmiştir [68].

Silanlama yüzey işlemlerinin kontak açısı değerlerine etkisi incelendiğinde ise tüm hacim oranlarında işlemsiz AA2024-T3 numunelerin kontak açısı değerlerinden daha düşük kontak açısı değerlerinin elde edildiği tespit edilmiştir. Malzeme yüzeyindeki silan hacim oranlarının artması ile yaklaşık 10°'lik kontak açısı değerlerinde artış yaşandığı (hacimce %5 silanlama için ortalama 77,83°) gözlenmiştir. Kim ve diğ. [69] çalışmalarında kriyonejik sıcaklıklarda adheziv yapıştırma bağlantılarında yapıştırma öncesi farklı pH ve ağırlıkça silan oranının alüminyum malzemenin kontak açısı ve yüzey enerjisi değerlerine etkisini araştırmışlardır. Elde edilen sonuçlara göre pH miktarının 5 ve silan oranının %1 olması durumunda en düşük kontak açısı değerlerinin sağlandığı (63°), silan oranının artması ile kontak açısı değerlerinin yükseldiği (%5 silan oranı için 78°) tespit edilmiştir. Elde edilen veriler ışığında silan oranının düşük olması kontak açısı değerlerini istenilen seviyelere getirerek yapışma dayanımını iyileştireceğini göstermektedir.

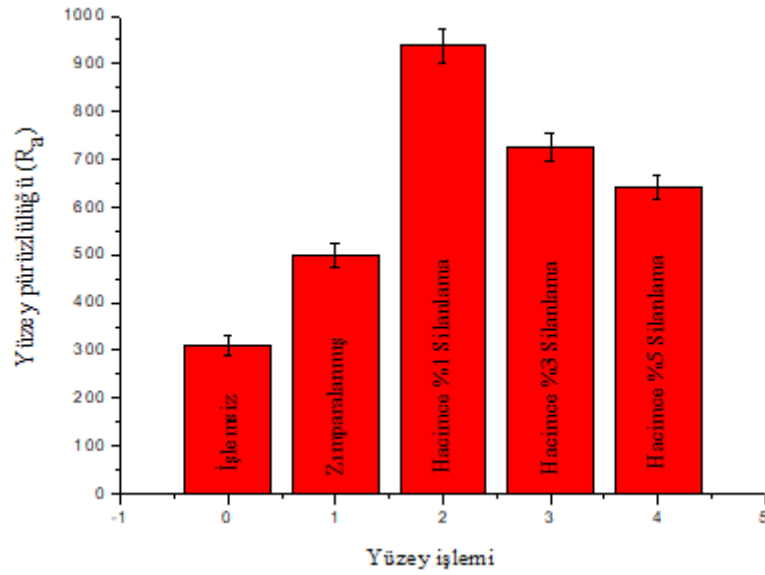


Şekil 4.1. Farklı silan hacim miktarları uygulanan numunelerin, işlenmemiş ve zımparalanmış AA2024-T3 alüminyum malzemelerin kontak açısı değerleri

Farklı yüzey işlemleri uygulanmış AA2024-T3 alüminyum malzemelerin yüzey pürüzlülüğü değerleri Şekil 4.2'de verilmiştir. İşlemsiz numunelere göre mekanik ya da kimyasal yüzey işlemlerinin AA2024-T3 malzemesine uygulanması ile yüzey pürüzlülüğü ( $R_a$ ) değerlerinin arttığı tespit edilmiştir. İşlemsiz numunenin  $R_a$  değeri

257 nm olup, zımparalama işleminde  $R_a$  değerlerinin ortalama 498,1 nm, silanlama işlemlerinde ise hacim oranına göre %1 için ortalama 938 nm, %3 için ortalama 726,5 nm ve %5 için ortalama 641,4 nm olduğu belirlenmiştir. Zımparalama yüzey işlemi ile yüzey pürüzlülüğü değerleri artırılarak yapıştırılan/yapıştırıcı ara yüzeyi mekanik olarak geliştirilmiştir. Bunun özellikle yapışma kayma dayanımı test sonuçlarına pozitif etki yapacağı düşünülmektedir. Silanlama işleminde ise yüzey pürüzlülüğü değerlerinin zımparalama işleminden yüksek çıktığı tespit edilmiştir. Bunun nedeninin ise silanlama işleminin yüzeye uygulanması ile yüzeyde film tabakasının oluşmasıdır. Oluşan film tabakası yüzey topografyasının üzerine yerleşmekte ve bu da yüzey pürüzlülüğü değerlerini arttırmaktadır.

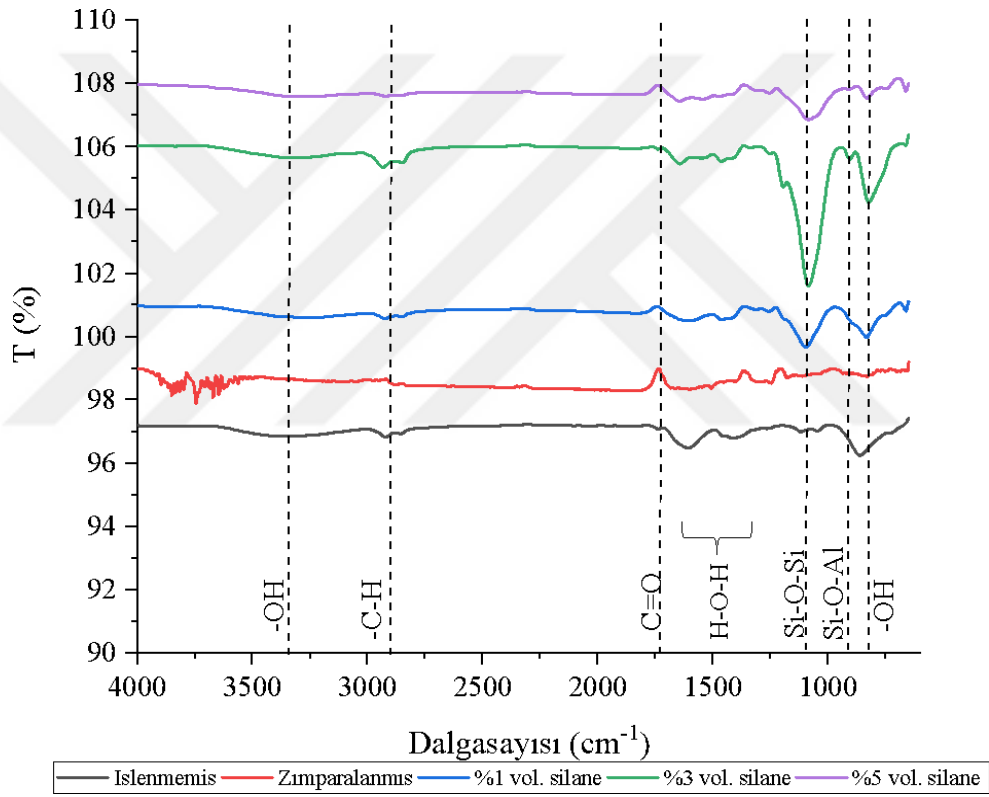
Hacimce artan silan oranlarında ise yüzey pürüzlülüğü değerlerinin düşmesi bunu göstermektedir. Düşük hacim oranlarında (hacimce %1 silanlama) yüzeyde yeterli film tabakası oluşmadığından ve mevcut yüzey pürüzlülüğü de eklenince  $R_a$  değerlerinin arttığı, silan hacim oranlarının artması ile optimum SiO film tabakasının yüzeyde oluştuğu bunda  $R_a$  değerlerini düşürdüğü belirlenmiştir.



Şekil 4.2. Farklı silan hacim miktarları uygulanan numunelerin, işlenmemiş ve zımparalanmış AA2024-T3 alüminyum malzemelerin yüzey pürüzlülüğü değerleri

Farklı silan hacim miktarları (%1, %3 ve %5) uygulanan alüminyum yüzeylerin Al/CFRP adheziv yapıştırma bağlantılarının kayma dayanımı değerlerine etkisini araştırmak amacı ile yüzeylerin kimyasal bağ yapısı FTIR-ATR spektroskopisi ile

incelenmiştir. Hacimce %3 silanlama işlemi uygulanmış Al/CFRP yapıştırma bağlantılarının kayma dayanımı değerleri %5 silanlama işlemi ile elde edilen sonuçlarstandart sapma göz önüne alındığında yakın değerler olduğu belirlenmiştir, silan kaplama işleminin yüksek maliyetleri göz önüne alındığında hacimce %3 silanlama işleminin yeterli olduğu sonucuna varılmıştır. %3 hacimce silan kaplama işlemi uygulanmış numunenin işlenmemiş numune ile karşılaştırma spektrumu Şekil 4.3'de görülmektedir. Spektrum incelendiğinde yüzeyde film oluştuğunu kanıtlayan bantlar belirlenmiştir. Ayrıca, farklı silanlama hacim miktarlarının etkisini incelemek amacı ile FTIR-ATR spektrumları Şekil 4.3'de görülmektedir.



Şekil 4.3. Farklı silan hacim miktarları uygulanan numunelerin, işlenmemiş ve zımparalanmış AA2024-T3 alüminyum malzemelerin yüzey FTIR-ATR spektrumları.

Şekil 4.3'de görülen  $\sim 3550 \text{ cm}^{-1}$  ve  $857 \text{ cm}^{-1}$  bandı, silanolün (Si-OH) O-H gerilmesinden kaynaklanmaktadır,  $857 \text{ cm}^{-1}$  bandı işlenmiş numunelerde ise  $830 \text{ cm}^{-1}$  gibi daha küçük bir dalga sayısına kaymış ve şiddetinde azalma olduğu görülmektedir. Silan içerisindeki silikon atomu, Al-OH gibi alüminyum hidroksil grupları ile Si-OH gibi silanol gruplarının yüksek reaktivitesi ile alüminyum yüzeyinde üç bağ oluşturabilir [70]. Metal/silan arayüzünde bu bağlardan biri Si-O-Al bağı  $908 \text{ cm}^{-1}$ 'de

oluşmuştur. Silan bağlama ajanlarının hidroliz ve yoğunlaşma reaksiyonları sonucunda oluşan siloksan (Si-O-Si) grupları ise  $1095\text{ cm}^{-1}$  bandında gözlenir. Bu bağ metalik yüzey ile epoksi yapıştırıcı arasında kimyasal bir köprü görevi görebilir. Şekil 4.3’de görülen spektral bantlar ile AA2024-T3 alüminyum yüzeylerinin siloksan ile kaplandığı sonucuna varıldı. Bu bağlar, AA2024-T3 alüminyum yüzeyinin yüzeyinde kararlı bir polimerik siloksan ağının oluşmasına neden olur. Bu moleküllerin metal oksit yüzeyinde birikmesine bağlı olarak silanoller, oksan bağları (Si – O – Me) ve hidrojen bağlarının bir kombinasyonunu oluşturmak için ayrıca reaksiyona girebilir. Torun vd. (2017) [71] oluşan hidrojen bağlarının kütleme işlemi ile kovalent oksan bağlarına dönüştürüldüğünü ifade etti. Ayrıca, varlığı FTIR ATR spektrumları ile kanıtlanan AA2024-T3 kaplama arayüzünde Si-O-Al bağlarının oluşması nedeniyle adheziv yapıştırma bağlantılarının kayma dayanımı daha yüksek olabilir.

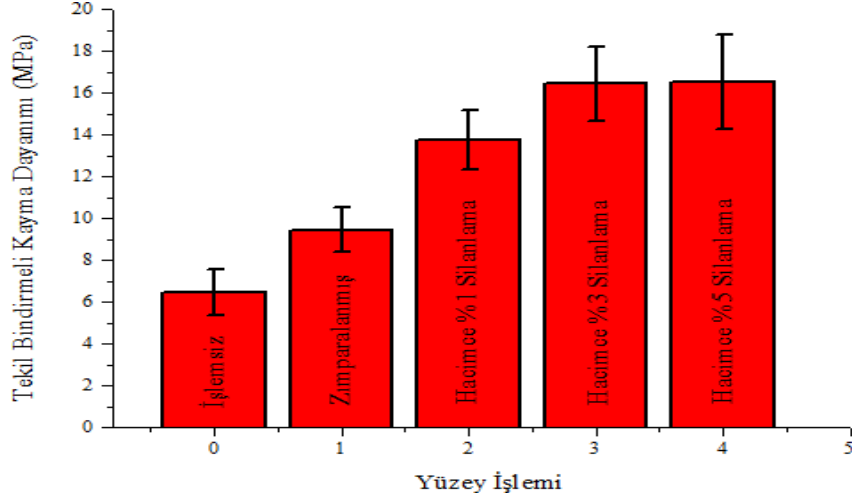
Mrad vd. (2017) [72],  $1436\text{ cm}^{-1}$  ve  $1615\text{ cm}^{-1}$ deki bantların bohemit ağda  $\text{H}_2\text{O}$ 'nun bükülmesini (adsorbe edilmiş suyun OH germe titreşimini) yansıttığını ve AA2024-T3 numunelerinin sadece işlenmemiş ve silan bağlı yüzeyinde gözlendiğini ifade etti. Şekil 63 incelendiğinde; işlenmemiş numunede her iki bant ( $1436\text{ cm}^{-1}$  ve  $1615\text{ cm}^{-1}$ ) gözlemlenirken, silan kaplama işlemi uygulanmış numunelerde H-O-H bant şiddetlerinde önemli bir azalma gözlemlenmemiştir. İşlenmemiş ve silanlama yapılmış numunelerin spektrumlarında  $1720\text{ cm}^{-1}$ 'de etiketlenen bant C = O (karbonil) germe titreşimlerinin varlığını göstermektedir [73]. Silan kaplı numunelerde karbonil pikinin azaldığı, bu bandın sadece hacimce %3 silan kullanılan kaplama işleminde görülmektedir. Zımparalanmış ve sonrasında hacimce %3 silanla kaplanmış numunede hem Si-O-Si hem de C = O bandında artış gözlenmiş olup, bu sonuç silanlamadan önce yüzeye uygulanan temizleme işleminin silan kaplama etkisini artırdığını göstermektedir. Mrad vd. (2017) [72], silan kaplamadan önce AA2024-T3 numunelerine aseton yağı giderme (AD) veya endüstriyel kimyasal aşındırma ön işlemi (ICP) gibi farklı temizleme prosedürleri uyguladığı işlemlerde bu sonucu doğrulamaktadır. ICP ön işlemden geçirdikleri yüzey, AA2024-T3 yüzeyinde yüzey pürüzlülüğü, Al—OH bağları ve gözenekli bir metal oksit tabakası geliştirerek AD işlemi uygulanmış numune yüzeyine kıyasla daha iyi yapıştırma özelliği sağladı, ayrıca FTIR ATR spektrumlarında ICP ile dağlanmış yüzeyde daha fazla Al—O—Si bağının oluştuğunu gözlemlidiler. Şekil 65’de  $2864\text{ cm}^{-1}$  ve  $2921\text{ cm}^{-1}$ de belirlenen

bantlar, CH<sub>2</sub> (hidrokarbon) gruplarının C-H'nin deformasyonuna ve asimetrik gerilmesi olarak adlandırılmaktadır. Hacimce %3 silanla kaplanmış yüzey hariç tüm işlenmiş numunelerde hidrokarbon bant şiddetlerinde azalma olduğu görülmektedir.

Farklı silanlama hacim miktarlarının Al/CFRP adheziv yapıştırma bağlantılarının kayma dayanımı değerlerine etkisini araştırmak amacı ile yapışma kayma dayanımı testleri TÜBİTAK-MAM yerleşkesinde bulunan Zwick marka universal test cihazında gerçekleştirilmiştir. Testlerden elde edilen kayma dayanımı değerlerin alüminyum plaka yüzeyine uygulanan işlemlerin türüne göre değişimi Şekil 4.4'te verilmiştir. AA2024-T3 malzemesine yapıştırma öncesinde uygulanan fiziksel ve kimyasal yüzey işlemlerinin yapıştırma bağlantısının kayma dayanımı değerlerini iyileştirdiği belirlenmiştir. İşlenmemiş AA2024-T3/CFRP yapıştırma bağlantısının kayma dayanımı değeri yaklaşık 6,5 MPa, uygulanan zımparalama işlemi ile ortalama 9,46 MPa değerine, hacimce %1, %3 ve %5 silanlama işlemleri ile de sırasıyla ortalama 13,77 MPa, 16,44 MPa ve 16,52 MPa değerlerine yükseldiği tespit edilmiştir. Özellikle yapıştırma öncesi AA2024-T3 plakalara yapılan zımparalama yüzey işlemi yüzey pürüzlülüğünü ve yüzey alanını arttırdığı için Buckton ve diğ. [74] çalışmalarına benzer olarak Al/CFRP yapıştırma bağlantılarının kayma dayanımı değerlerini arttırmıştır.

AA2024-T3 plakalara uygulanan silanlama yüzey işlemleri ise yapıştırıcı-yapıştırılan yüzey arasında kimyasal olarak etkili bağ mekanizmaları oluşturduğu için zımparalamaya göre daha yüksek kayma dayanımı değerlerine ulaşıldığı saptanmıştır. Pramanik ve diğ. [24] gerçekleştirdikleri çalışmada silanlama işlemi sayesinde ara yüzey kimyasal bağların oluştuğu bunun da yapıştırıcı-yapıştırılan malzeme tutunma özelliğini iyileştirdiği belirtilmiştir. Dawood ve Rizkalla [75] çalışmalarında silanlama işleminin ayrıca nem girişini engellediği bu sayede yapıştırma bağlantısının çevresel şartlara karşı direncini de iyileştirdiğini tespit etmişlerdir. Literatür çalışmalarında belirtildiği gibi yapıştırma yüzeyinde silan varlığı ile alüminyum-epoksi ara yüzey dayanımı kimyasal bağ mekanizmaları sayesinde geliştirilmiştir. İşlenmemiş AA2024-T3/CFRP yapıştırma bağlantısının kayma dayanımı değeri yaklaşık 6,5 MPa seviyesindeyken uygulanan %5 silanlama işlemi sonrasında en yüksek ortalama ile 16,52 MPa değerine ulaşmıştır.

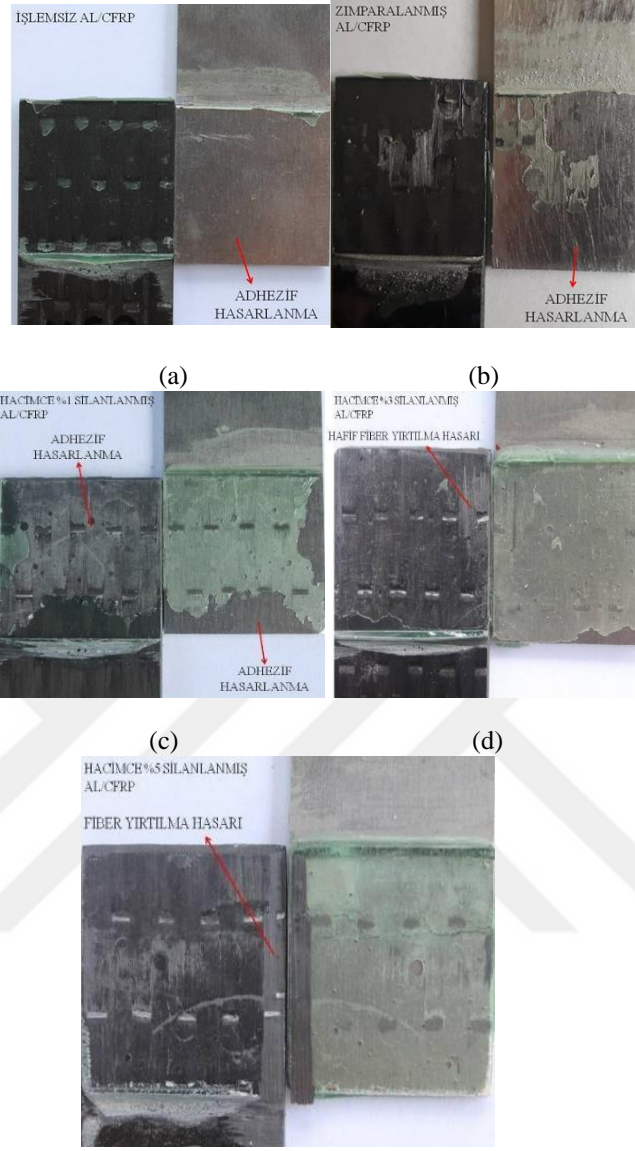




Şekil 4.4. Farklı silan hacim miktarları uygulanan numunelerin, işlenmemiş ve zımparalanmış AA2024-T3 AA2024-T3 içeren Al/CFRP yapıştırma bağlantılarının yapışma kayma dayanım test sonuçları

Yapışma kayma dayanımı testleri sonrası Al/CFRP yapıştırma bağlantısında oluşan hasar mekanizmalarının belirlenmesi için dijital kamera ile yüzey görüntüleri alınmış ve elde edilen yüzey görüntüleri Şekil 4.5'te detaylı olarak verilmiştir. Yüzey görüntülerinden AA2024-T3 alüminyum plakalara gerçekleştirilen yüzey işlemlerinin yapıştırma bağlantısında oluşan hasar mekanizmalarına etkisi incelenmiştir. Şekil 4.5-a'da mekanik testler sonrası herhangi bir yüzey işlemi uygulanmamış Al/CFRP yapıştırma bağlantısının yüzey görüntüsü verilmiştir. Alüminyum malzeme yüzeyinde epoksi yapıştırıcının bulunmadığı tüm yapıştırıcının CFRP yüzeyinde kaldığı ve bağlantının AA2024-T3 alüminyum plaka yüzeyinden adheziv olarak hasarlandığı tespit edilmiştir. Buradan elde edilen sonuç ışığında epoksi yapıştırıcı ile alüminyum plaka arasında yapışma sağlanamamıştır. Şekil 4.5-b'de ise zımparalama işleminin etkisi görülmektedir. Zımparalama yüzey işlemi sayesinde epoksi yapıştırıcının bölgesel olarak alüminyum malzeme yüzeyine tutunduğu fakat yine de optimum yapışmanın metal yüzeyinde oluşturulamadığı ve hasarın yine alüminyum-epoksi yapıştırıcı yüzeyinden olduğu belirlenmiştir.

Şekil 4.5-c, d ve e'de ise farklı hacimlerde silanlama yüzey işlemi uygulanmış Al/CFRP yapıştırma bağlantılarının yapışma kayma dayanım testleri sonrasındaki malzeme yüzeyleri gösterilmiştir. İşlemsiz ve zımparalama işlemi uygulanmış Al/CFRP yapıştırma bağlantılarına göre hasar oluşma bölgesinin ve türünün değiştiği gözlenmiştir.



(e)

Şekil 4.5. Silanlama yüzey işlemi uygulanmış Al/CFRP yapıştırma bağlantılarının yapışma kayma dayanım testleri sonrası dijital kamera ile yüzey fotoğrafları

Öncelikle silanlama işlemi ile alüminyum-epoksi yapıştırıcı ara yüzeyinde iyi bir yapışma sağlandığı bununla birlikte hasar türünün adheziv hasarlanmadan CFRP malzeme yüzeyinde hafif ya da normal fiber yırtılması şeklinde olduğu belirlenmiştir. Fiber yırtılma hasarı epoksi yapıştırıcının CFRP yüzeyine iyi tutunduğu ve yapışma kayma dayanımı testlerinde uygulanan yükü karşıladığını belirtmektedir. Silanlama yüzey işlemleri ile alüminyum-epoksi yapıştırıcı ara yüzeyinde oluşan kimyasal bağlar sayesinde hasar bölgesi CFRP yüzeyine doğru kaymıştır. Buda

silanlama işleminin özellikle hacimde %3 ve %5 silanlama işlemlerinde başarılı bir şekilde tatbik edildiğini göstermektedir. Hacimce %1 silanlama işleminde ise hem CFRP hem de AA2024-T3 yüzeyinde az da olsa adheziv hasarlanma gözlenmiştir. Buda silanlama işlemi ile oluşturulan kimyasal bağların yeterli olmadığını göstermektedir.

Elde edilen sonuçlar ışığında silanlama yüzey işleminin AA2024-T3 alüminyum-epoksi yapıştırıcı ara yüzeyini geliştirerek Al/CFRP yapıştırma bağlantılarının adheziv kayma dayanımı değerlerini 6,5 MPa seviyesinden 16,52 MPa değerine arttırdığı ve alüminyum-epoksi yapıştırıcı ara yüzeyinde oluşan adheziv hasarlanmayı CFRP yüzeyinde fiber yırtılma hasarına dönüştürdüğü tespit edilmiştir. Silanlama işlemi maliyetli bir yüzey işlemidir. Bu bağlamda hacimce %5 silanlama işlemi ile elde edilen kayma dayanımı değerleri diğer yüzey işlemlerine göre yüksek olmasına rağmen hacimce %3 silanlama işleminin yeterli olduğu düşünülmektedir. Hacimce %3 silanlama işlemi uygulanmış Al/CFRP yapıştırma bağlantılarının kayma dayanımı değerleri %5 silanlama işlemi ile elde edilen sonuçlar standart sapma göz önüne alındığında benzerdir. Hasar mekanizmalarında da benzer sonuçlar gözlenmiştir.

#### **4.2. FPL Dağlama İşleminin AA2024-T3 Yüzey Özelliklerine ve Yapıştırma Performansına Etkisi**

FPL dağlama ile yüzey işlemede literatür incelemeleri sonucunda tam netleşmiş bir prosese rastlanmamıştır. Çalışmalarda özellikle etkin parametreler olarak belirtilen dağlama sıcaklığı için 60 ile 80 °C arasındaki ve daldırma süresi olarak da 10 ile 20 dk. arasındaki değerler kullanılarak FPL dağlama işlemleri yapıp alüminyum alaşımların yapışma davranışları üzerindeki etkilerinin incelendiği tespit edilmiştir. Ancak burada açıkça görülmektedir ki özellikle malzeme çiftlerinin değişkenliği göz önüne alındığında AA2024-T3 alaşımının CFRP gibi farklı bir malzeme ile yapıştırılmasında bu prosesin etkin olarak görülen parametrelerin seviyelerinin yapışma dayanımı açısından optimize edilmesi gerektiği tespit edilmiştir. Bu nedenle lazer ile işlemeye kıyasla referans olarak değerlendirilecek FPL dağlama metodunda elde edilecek sonuçların rastgele değil etkili bir değerde tespit edilmesi gerektiği düşünülerek dağlama sıcaklığı 60, 70 ve 80 °C olarak belirlenmiştir.

Ayrıca daldırma süresi da 10, 15 ve 20 dk olacak şekilde deney planlaması yapılmıştır.

Toplamda dokuz (9) ayrı proseste FPL dağlama işlemleri yapılmış olup öncelikle AA2024-T3 numunelerinde meydana gelen ağırlık kaybı değerleri tespit edilmiş ve Tablo 4.1’de verilmiştir. Tablo 4.1 incelendiğinde dağlama sıcaklığı ve süresi arttıkça ağırlık kaybının da sürekli arttığı görülmektedir.

Bu ağırlık kaybı en fazla 0,121 gr (%1.05) olarak 80 °C ve 20 dk.’lık FPL dağlama prosesinde tespit edilmiştir. FPL dağlama gibi kimyasal işlemler, doğal ince oksit tabakasını dağıtmak, alüminyum yüzeyini temizlemek, aktifleştirmek ve iyi bir yapışma sağlayabilecek yeni bir gözenekli ve kalın oksit tabakasının oluşmasına yardımcı olmak için ağır şartlardaki çözeltik ortamdan kaynaklı korozyon olaylarına dayanır. Bu nedenle ağır şartları teşkil edecek dağlama sıcaklığının ve süresinin artması doğal olarak AA2024-T3 numunelerinden çok daha fazla malzemenin çözünerek kaybolmasına yol açmıştır.

Tablo 4.1. Farklı FPL dağlama prosesleri sonrası AA2024-T3 numunelerindeki ağırlık değişimleri

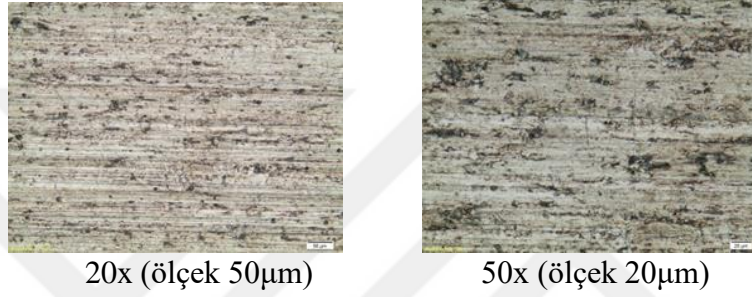
<b>FPL dağlama tipi</b>	<b>Dağlama öncesi ağırlık (gr)</b>	<b>Dağlama sonrası ağırlık (gr)</b>	<b>Ağırlık kaybı (gr)</b>	<b>Ağırlık kaybı yüzdesi (%)</b>
60 °C – 10 dk.	11,53	11,500	0,030	0,26
60 °C – 15 dk.	11,57	11,534	0,036	0,31
60 °C – 20 dk.	11,56	11,524	0,036	0,31
70 °C – 10 dk.	11,63	11,593	0,0372	0,32
70 °C – 15 dk.	11,51	11,438	0,072	0,63
70 °C – 20 dk.	11,56	11,490	0,070	0,60
80 °C – 10 dk.	11,60	11,500	0,100	0,86
80 °C – 15 dk.	11,57	11,440	0,130	1,12
80 °C – 20 dk.	11,51	11,389	0,121	1,05

Bu malzeme kaybını gözlemek amacıyla farklı dağlama prosesleri sonrası yüzeyler incelenmek üzere mikroskopik fotoğraflar çekilmiştir. İşlenmemiş numunenin mikroskopik görüntüsü Şekil 4.6’da, farklı FPL dağlama prosesleri sonrası elde edilen yüzeylerin mikroskopik görüntüleri de Şekil 4.7’de verilmiştir. Mikroskopik görüntüler incelendiğinde her bir proses sonrası git gide daha homojen bir yüzeyin

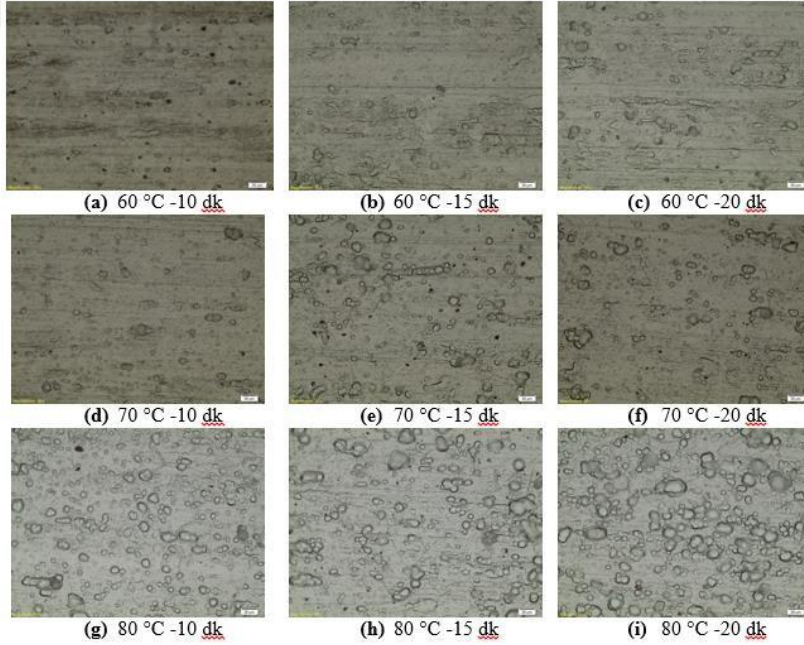
meydana geldiği gözlenmiştir.

Diğer taraftan görüntüye bakıldığında dağlama sıcaklığının ve süresinin artması ile ağırlık kaybındaki değişimi destekler şekilde AA2024-T3 numune yüzeylerinde gözle görünür çukurcukların meydana geldiği görülmektedir.

Ayrıca bu gözeneklerin boyutlarının da aynı şekilde işlem sıcaklığı ve süresine önemli derece bağlı olduğu açıkça görülmektedir. Neticede çok daha girintili çıkıntılı ve pürüzlü olduğu açık olan yüzeylerin elde edildiği kanaatine varılmıştır.



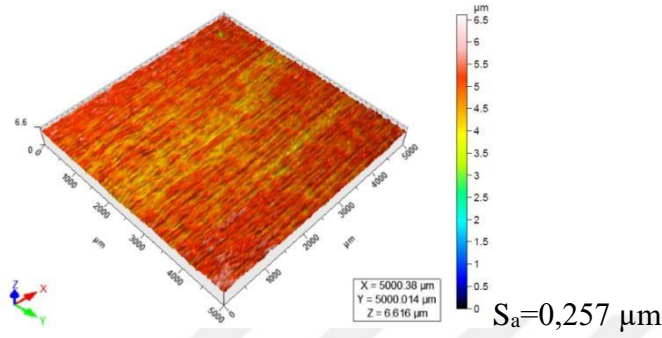
Şekil 4.6. İşlenmemiş AA2024-T3 numunesinin farklı büyütmelelerdeki mikroskopik görüntüleri



Şekil 4.7. FPL dağlama sıcaklığı ve süresine bağlı olarak yüzeylerin mikroskopik fotoğrafları (50x)

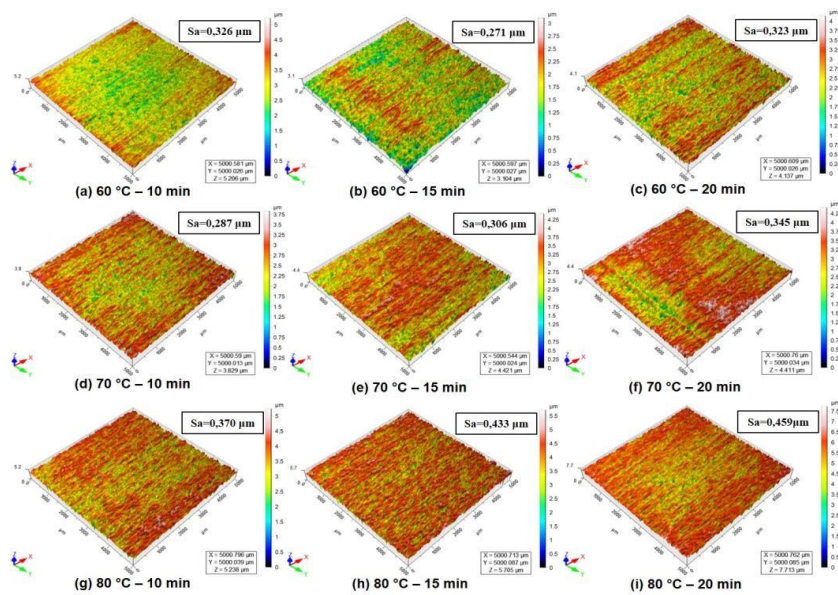
Ancak pürüzlülük yüzey topografyasının metrik bir ölçüsü olduğu için sayısal olarak da pürüzlülük değerlerinin değerlendirilmesi amacıyla işlenmemiş ve farklı FPL

prosesleri ile işlenmiş yüzeyler profilometre ile incelenerek topografik görüntüleri ve sayısal olarak pürüzlülük değerleri de belirlenmiştir (Şekil 4.8 ve Şekil 4.9). İşlenmemiş AA2024-T3 numunesinin pürüzlülük değeri  $0,257 \mu\text{m}$  çıkmış olup renkli ölçek yardımıyla oldukça homojen bir durumda olduğu görülmektedir.



Şekil 4.8. İşlenmemiş AA2024-T3'ün topografik görüntüsü ve pürüzlülük değeri

Diğer taraftan artan dağlama sıcaklığı ve süresine bağlı olarak pürüzlülük değerlerinin sürekli arttığı tespit edilmiştir. En fazla pürüzlülük  $0,459 \mu\text{m}$  olarak yine en fazla ağırlık kaybının gözleendiği FPL dağlama prosesinde ( $80 \text{ }^\circ\text{C} - 20 \text{ dk}$ ) tespit edilmiştir. Şekil 4.9'daki topografik görüntüler renk ölçeğine göre incelendiğinde git gide daha homojen bir yüzey topografyasının ortaya çıktığı açıkça desteklenmiştir. Ayrıca pürüzlülük ve yine renk ölçeği temel alındığında artan sıcaklık ve süre ile daha girintili çıkıntılı bir yüzeyin elde edildiği desteklenmiş olmuştur.



Şekil 4.9. FPL dağlama sıcaklığı ve süresine bağlı olarak yüzeylerin topografik görüntüleri ve pürüzlülük değerleri

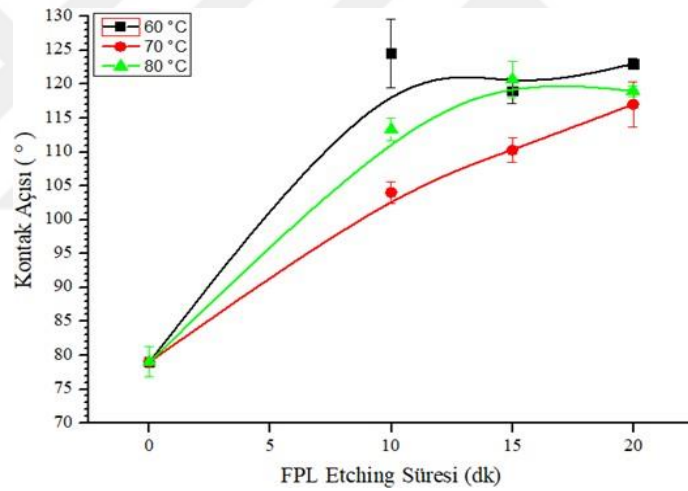
Farklı FPL dağlama prosesleri sonrası AA2024-T3 yüzeylerinde farklı ağırlık kaybı ve pürüzlülük değerleri elde edildiği tespit edildikten sonra bu yüzeylerin yapışma performansı üzerine nasıl etki yapacağını belirlemek için yüzeylerin yapıştırıcı tarafından ıslanabilirlik özellikleri Şekil 4.10'da verilen kontak açısı sonuçları ile irdelenmiştir. İşlenmemiş numune için kontak açısı değeri 79° olarak ölçülmüş olup hidrofilik olduğu tespit edilmiştir.

Kontak açısı değişim grafikleri incelendiğinde herhangi bir sıcaklık için süre arttıkça kontak açısının azalan bir eğimle giderek arttığı görülmektedir. Neticede 20 dakikadan sonra asimtotik bir dengeye geldiği açıkça görülmektedir. İlginç bir şekilde en yüksek kontak açısı değeri yaklaşık 124° olarak ölçülmüş olup en yüksek değerler her süre için aynı şekilde hep 60 °C'lik işlemlerde tespit edilmiştir. Herhangi bir süre için sıcaklığın artmasına bağlı olarak kontak açısı lineer bir davranış sergilememiş olup en düşük kontak açısı değerleri 70 °C için elde edilmiştir. Sürenin artmasına bağlı olarak artan kontak açısı değerleri pürüzlülük artışına benzer olarak yorumlanmıştır. Yüzey pürüzlülüğü katı yüzeylerin ıslanabilirliğinde önemli bir rol oynamaktadır. Pürüzlü katı bir yüzeydeki ıslanabilirliği tanımlayan ünlü iki modelden ilki Wenzel (1936) [29] ikincisi de Cassie-Baxter (1944) [31]; Latthe (2015) [76] modelidir. Wenzel'in modelinde sıvı damla pürüzlü yüzeye iyice nüfuz edip ıslatabilirken Cassie-Baxter modelinde pürüzlü yapı içindeki havayı çıkaramayan damlanın yayılamadığı vurgulanmaktadır (Şekil 4.11). Kontak açısı değişimi sonuçlarımızı irdelediğimizde teorik olarak ıslanma modellerinden Cassie-Baxter modeli ile uyumlu olduğu tespit edilmiştir. FPL dağlama ile Şekil 4.12'de şematik görüntüsü verilmiş yüzey mikro-yapısının elde edildiği literatürden tespit edilmişti. Mikroyapısı incelendiğinde, 5 nm çapında ve 40 nm uzunluğundaki uzantıların belirli aralıklarda bir dizi halinde yer alması ile pürüzlü bir yüzeyin ortaya çıktığı görülmektedir. FPL dağlama işlemi sonrası bu uzantılardan oluşan pürüzlü yapı içine sızamayan su damlasının yayılmasının da engellenerek daha yüksek kontak açısı değerlerinin elde edildiği kanaatine varılmıştır [77].

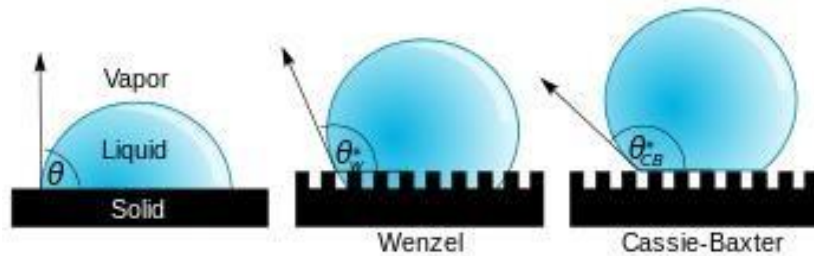
Bu durum artan pürüzlülük ile daha etkili hala gelmiştir ki bu sayede kontak açısı değeri de artış göstermiştir. Çok iyi bilinmektedir ki metal yüzeylerinde hidrofobikliği artırmak için kimyasal yöntemler yaygınca kullanılmaktadır. Bu stratejiyi kullanarak yüzey mühendisliği alanında süperhidrofobik yüzey elde etme çabaları çeliklerde [78],

bakır alaşımlarında [79], alüminyum alaşımlarında [80] ve çinko alaşımlarında [81] farklı uygulama örnekleriyle çalışılmıştır. Kristalin metallerde bulunan çok sayıda yüksek enerjili dislokasyon bölgesi, kimyasal çözeltilere daldırıldığında, mikron ölçeğinde yüzey pürüzlülüğünün oluşmasına neden olan tahribata eğilimlidir [76].

Yaklaşık 124°'lik kontak açısı ile AA2024-T3 malzemesinin hidrofobik hale gelmesi özellikle 60 °C ve 20 dakikada yapılan FPL dağlama işlemi sonrası oluşan ve daha fazla havayı hapsederek su damlasının yayılmasını engelleyen düzenli nano boyutlu uzantıları olan hücresel oksit yapısına (Şekil 4.12) dayandırılabilir. Bu durum düşük ıslanabilirlik ve dolayısıyla yapışma dayanımı sağlayabilir. Bu nedenle bu hususu açığa kavuşturmak için 20 dakikada yapılan tüm sıcaklıktaki FPL dağlama işlemleri ile yüzeyi modifiye edilmiş AA2024-T3 alaşımı ile CFRP numuneleri yapıştırılıp yapışma dayanımları test edilmiştir.

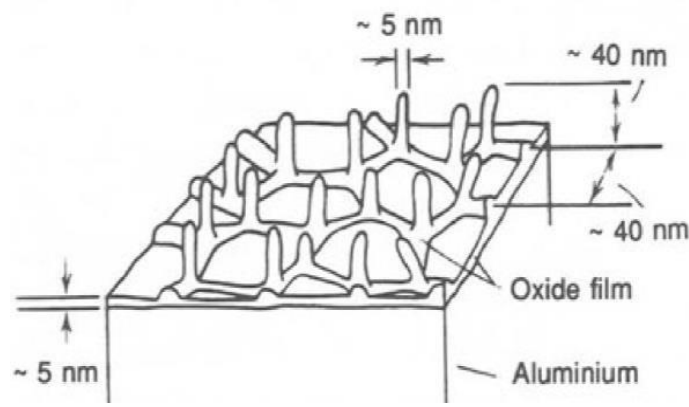


Şekil 4.10. FPL dağlama sıcaklığı ve süresine bağlı olarak kontak açısı değişimi



Şekil 4.11. Yüzey ıslanabilirlik modelleri [29, 30].

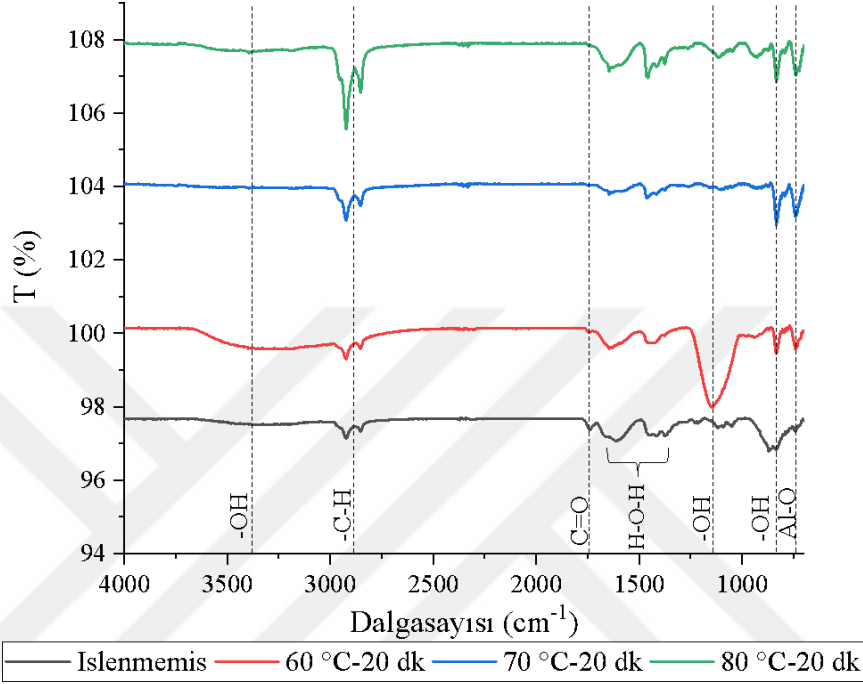




Şekil 4.12. FPL dağlama işlemi sonrası yüzeyde oluşan mikro yapının şematik görünümü [76]

FPL dağlama ile aşındırılmış alüminyum yüzeyin kimyasal özellikleri, AA2024-T3/CFRP bağlantılarının kayma dayanımını da etkilemiştir. Yüzeyi farklı FPL işlem parametreleri ile işlenmiş alüminyum yüzeylerin Al/CFRP yapışma bağlantılarının yapışma kayma dayanımı (MPa) test sonuçları incelendiğinde en yüksek kaymadayanımı değerinin 60 °C ve 20 dk işlem parametreleri uygulanan numunede elde edildiği belirlenmiştir. 20 dk sabit tutularak işlem sıcaklığının değiştirilip uygulandığı farklı FPL dağlama işlemlerinin yüzeylerde oluşturduğu kimyasal değişimlere ait FTIR-ATR spektrumları Şekil 4.13’de görülmektedir. Alüminyum, oksijene karşı oldukça reaktif olduğu için ortam havasıyla temas ettiğinde yüzeyinde oksit / hidroksit tabakası oluşturur. Şekil 4.11’de merkezi 3329  $\text{cm}^{-1}$ deki geniş bant, hidroksit yapısındaki -OH (hidroksil) grubunun gerilme titreşimi olarak adlandırılmaktadır. Hidroksil grubunun başka bir karakteristik bandı da işlenmemiş numunede 857  $\text{cm}^{-1}$ ’de belirlenirken, işlenmiş numunelerin hepsinde 830  $\text{cm}^{-1}$ ’lik daha düşük bir dalga numarasına kaydığı ve ayrıca FPL dağlama ile aşındırılmış tüm numuneler için band şiddetlerinin azaldığı görülmektedir. FPL dağlama ile aşındırılmış numunelerde  $\text{AlO}_4$  ünitesinin 4 koordineli Al-O bağının gerilme titreşimi ile ilgili 740  $\text{cm}^{-1}$ ’de yeni bir bant gözlemlendi. 1152  $\text{cm}^{-1}$ ’de gözlemlenen bandın, sadece FPL dağlama ile aşındırılmış numunelerin spektrumlarında gözlemlenen Al-O-H modu olduğu düşünülmektedir. Bu band, 20 dakika boyunca 60 °C’de FPL dağlama ile aşındırılmış numunenin spektrumunda daha yüksek şiddete sahiptir. -OH bant şiddetindeki bu önemli fark, 60°C-20 dakika FPL dağlama aşındırma işlemi uygulanmış numune ile elde edilen en yüksek yapışma kayma dayanımı sonucunu destekler, ancak bu numune nispeten daha düşük yüzey gözeneklilik dağılımına (Şekil

4.7-c) ve yüzey pürüzlülüğüne (Şekil 4.9-c) sahiptir. Hidroksil grupları ile epoksi arasında kovalent bağların oluştuğu bilinmektedir; bu nedenle OH grupları, yüzeydeki kimyasal bağlar için yapışma kayma dayanımının artmasına neden olan demirleme (çapa atılmış) noktaları olarak hizmet ettiği düşünülmektedir [82].



Şekil 4.13. Farklı FPL Dağlama Parametreleri İle İşlenmiş Numunelerin, İşlenmemiş ve Zımparalanmış Yüzeylerin FTIR-ATR Spektrumları.

1300  $\text{cm}^{-1}$  civarındaki spektral band alüminyum okside sabit bağlanmada COO- bağlarına bağlanmaktadır [83]. 1316  $\text{cm}^{-1}$ 'deki bant Al=O (vs(Al-COO-)) bağı ile ilişkilendirilmiştir. İşlenmemiş numunede Al=O bağı gözlenmezken, zımpara ile işlem görmüş yüzeyde de Al=O bandı belirlenmiştir [84]. Ayrıca, FPL dağlama ile yüzey işlemi uygulanan numunelerde de zımparalanmış yüzeydekine benzer şekilde Al=O piki gözlenmiştir, FPL dağlama işlemindeki sıcaklık arttıkça Al=O band şiddetinde artış olduğu görülmektedir.

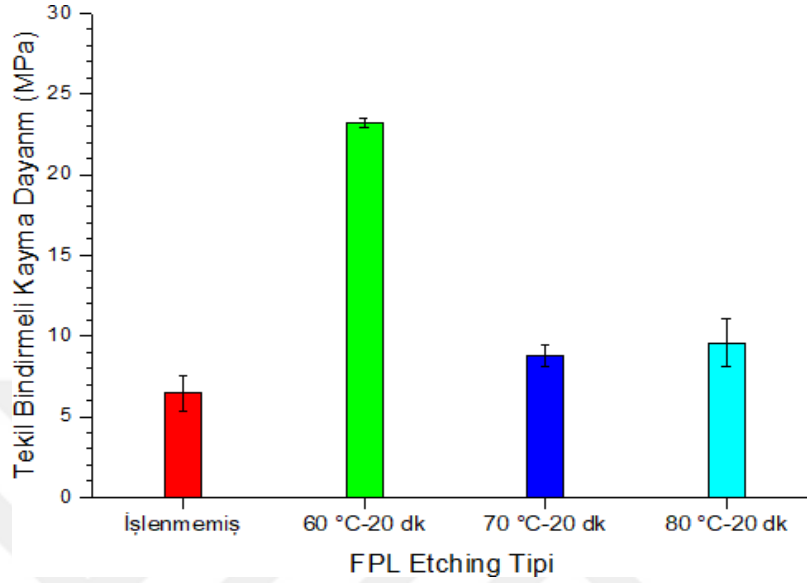
Hidrokarbonlar (C-H) gibi atmosferik kontaminantlar (kirleticiler), alüminyumun FPL dağlama ile aşındırılmış ön işlemde hemen sonra yüzey tarafından anında soğurulmaktadır. İşlenmemiş ve FPL asit ile aşındırılmış yüzeylerin spektrumlarında 2864  $\text{cm}^{-1}$  ve 2921  $\text{cm}^{-1}$ 'de tespit edilen bantlar, CH<sub>2</sub> gruplarının C-H deformasyonunu ve asimetrik olarak gerilmesini ifade etmektedir. İşlenmemiş yüzeyin spektrumu ile

karşılaştırıldığında hem zımparalanmış yüzeyde hem de FPL dağlama uygulanmış yüzeylerde C-H bant şiddetlerinde azalma gözlemlenirken, sıcaklığa bağlı değişimlerde pik şiddetlerinde belirgin bir farklılık görülmemektedir. Zımparalanmış yüzeyde C-H gruplarına ait çizgi şiddetlerinin azaldığı görülmektedir.

Bu yüzey kontaminantları, zayıf sınır tabakası oluşumuna ve dolayısıyla daha yüksek sıcaklıklarda daha düşük yapışma kayma dayanımı değerlerine neden olabilir. Daha yüksek sıcaklıkta FPL dağlama işlemi uygulanan numunelerin spektrumunda C-H bant tepe noktası daha yüksek şiddet değerine sahip olması da bu sonucu doğrulamaktadır.  $1436\text{ cm}^{-1}$  ve  $1615\text{ cm}^{-1}$  'de gözlemlenen bantlar, bohemit ağında veya Al-OH'ın  $\text{H}_2\text{O}$ 'nun bükülmesini (adsorbe edilmiş suyun OH titreşimi) yansıtmaktadır. Ayrıca işlenmemiş numunede her iki bant gözlemlenirken, FPL asit işlemi uygulanmış numunelerde H-O-H ( $1400\text{-}1600\text{ cm}^{-1}$ ) bant şiddetlerinde azalma gözlemlenmiş ve Al-OH bandı belirgin hale gelmiştir [72]. İşlenmemiş numune spektrumunda belirlenen  $1742\text{ cm}^{-1}$  etiketli bant, C=O (karbonil) germe titreşimlerini göstermektedir [73]. C = O, metal / epoksi yapışmasına katkıda bulunan oksijen içeren bir fonksiyonel gruptur ancak FPL işlem sıcaklığı arttıkça bu bant şiddetleri azalır. İşlenmemiş numune spektrumunda belirgin bir C=O spektral pik gözlemlenirken zımparalanmış yüzeyin spektrumunda C=O piki yok olmuştur. Ayrıca zımparalanmış numune spektrumuna benzer şekilde FPL asit işlemi uygulanmış numunelerin spektrumunda da C=O bağı gözlenmemektedir. Pürüzlülük ve FTIR analizi sonucunda, AA2024-T3 / CFRP yapıştırma bağlantılarının yapışma dayanımını artırmada pürüzlülük artışı yerine kimyasal dönüşüm sağlayan FPL dağlama aşındırma modifikasyonunun yapışma dayanımına önemli bir etkisi olduğu tespit edilmiştir.

Yapışma kayma dayanım testi yapılan FPL dağlama ile işlenmiş ve işlenmemiş numunelerin test sonuçları grafiği Şekil 4.14'de gösterilmiştir. CFRP ile yapıştırılacak AA2024-T3 numunelerinin FPL dağlama işlemi görmesinin yapışma dayanımı üzerinde çok etkin sonuçlar gösterdiği Şekil 4.14'de açıkça görülmektedir. Özellikle  $60\text{ }^\circ\text{C}$ 'de ve 20 dakikada yapılan FPL dağlama işlemi sonrası CFRP ile yapıştırılmış kupon numunelerde  $23,22\pm 0,27\text{ MPa}$ 'lık bir yapışma dayanımı elde edilmiştir. Bu değer işlenmemiş AA2024-T3 ile CFRP'nin yapıştırılması ile elde edilen kupon numunenin yapışma değeri olan  $6,46\pm 1,09\text{ MPa}$ 'm yaklaşık 3,5 katı olarak tespit edilmiştir. Ancak diğer FPL dağlama tipleri ile sırasıyla 8,81 ve 9,59 MPa'lık dayanım

değerleri elde edilmiş olup işlenmemiş numune ile elde edilenden daha yüksek sonuçlar oldukları görülürken özellikle 60 °C ile elde edilen değerle kıyaslanamayacak kadar düşük oldukları açıktır.

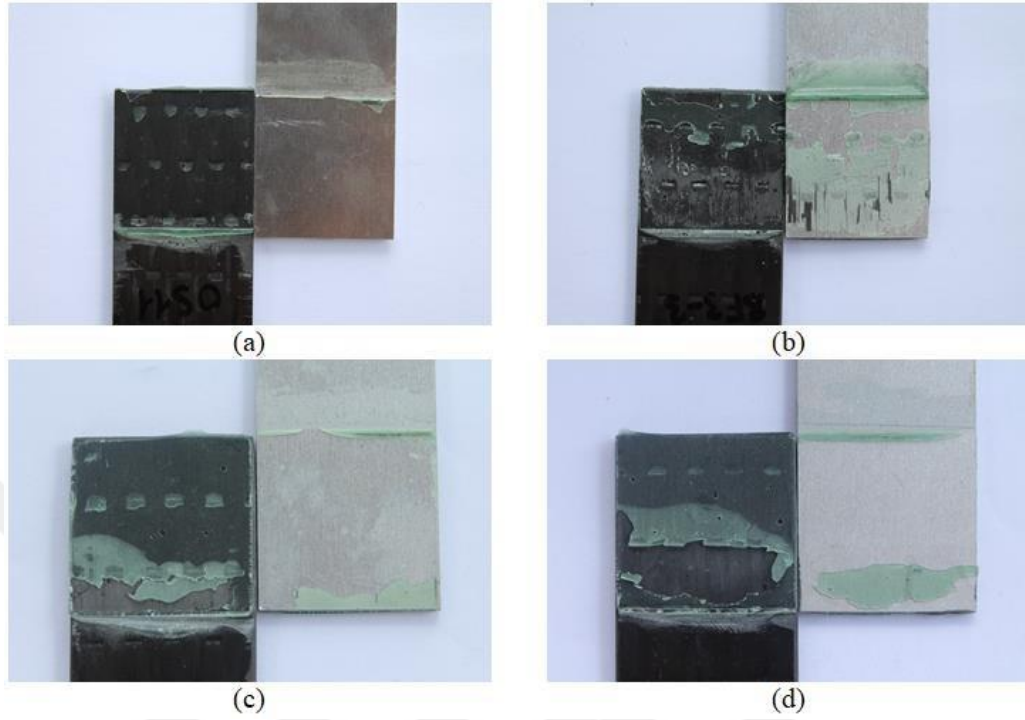


Şekil 4.14. FPL dağlama işlemine bağlı olarak yapışma dayanımını değişimi

FPL dağlama işlemi ile Al/CFRP yapışma dayanımında elde edilen 3,5 katlık iyileşme görsel olarak da kopmuş numune yüzeylerinde ortaya çıkan hasar modları ile desteklenmelidir. Bu amaçla dijital kamera ile kopan yüzeylerin fotoğrafları çekilmiş olup hasar modlarının irdelenmesi için Şekil 4.15'te verilmiştir. Hasar görüntüleri incelendiğinde işlenmemiş AA2024-T3 numunesi ile yapılmış bağlantıda hiçbir yapışma emaresi gözlenmediğinden elde edilen hasar mekanizmasının tamamıyla yapışma hasar modunda gerçekleştiği söylenebilir. Bu durum zaten çok düşük dayanım değeri olarak da elde edilen sayısal sonucu desteklemektedir. Bunun yanında

60 °C'de yapılan FPL dağlama işlemi sonrası CFRP ile yapıştırılmış kupon numunesinin mekanik test sonrası çekilmiş görüntüsüne bakıldığında AA2024-T3 yüzeyinde ciddi yapıştırıcı kalıntıları neticesinde çok iyi bir tutunma ile yapışma dayanımının yaklaşık 3,5 kat çıktığı buradan da açıkça tespit edilmiştir. Ancak 70 °C ve 80 °C ile yapılmış FPL dağlama işlemleri sonrası CFRP ile yapıştırılmış AA2024-T3 alaşımlarının mekanik testler sonrası hasar görüntüleri incelendiğinde işlenmemiş numunenin hasar görüntüsüne kıyasla bir miktar yapıştırıcı kalıntısı ile tutunmanın daha iyi olduğu ancak dayanıma çok fazla katkı sunmadığı hasar analizi sonucunda da

görülmüştür.



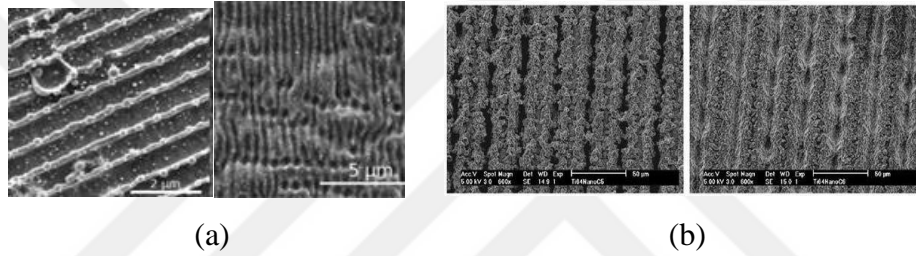
Şekil 4.15. FPL dağlama işleminin mekanik testler sonrası ortaya çıkan hasar modlarının yüzey fotoğrafları; işlenmemiş (a), 60 °C-20 dk (b), 70 °C-20 dk (c) and 80 °C-20 dk (d)

AA2024-T3 ile CFRP'nin farklı kimyasal yüzey yapıları nedeniyle yapışma dayanımı açısından iyi bir sonuç elde edilemeyeceği az çok bilinmektedir. Ayrıca yapıştırıcının da yüzeylere mekanik anlamda çok iyi tutunamaması 6,46 MPa gibi zayıf bir yapışma dayanımı değerinin elde edilmesini sağlamıştır. Literatür de bu anlamda alüminyum alaşımlarının mutlaka bir yüzey modifikasyon işlemi ile yapışmaya hazır hale getirilmesini önermektedir. Bu nedenle AA2024-T3'ün yüzeyinde yapışma mekanizmalarından hem kimyasal hem de mekanik kilitlemenin birlikte çalışacağı bir yüzey yapısı ancak optimum parametreler olarak 60 °C ve 20 dakikada yapılan FPL dağlama işlemi ile elde edilebilmiştir.

### 4.3. AA2024-T3'ün Lazer İle İşlenmesinde Homojen Bir Yüzey ve Optimum Yapışma Dayanımı Sağlayacak Lazer İşleme Parametrelerin Belirlenmesi

Yoğunlaştırılmış elektromanyetik ışımının malzeme ile etkileşimi malzeme yüzeyinde fiziksel ve kimyasal değişimlere neden olmaktadır. Metalik malzemelerin yüzey işleme uygulamaları temelde iki yaklaşımla gerçekleştirilir. Bunlardan ilki polarize

ışık demeti ve malzemenin aşınma eşik değerine yakın, düşük lazer akılarında gerçekleştirilen Doğrudan Lazer Tekstürleme (DLT-DA) olarak adlandırılan yöntemdir. Bu durumda, oryantasyonu ve şekli polarizasyona bağlı olan düzenli bir dalgalanma yapısı olarak görünen lazer kaynaklı periyodik yüzey yapıları (LIPSS) (Şekil 4.16-a) oluşur. Burada, periyodik yapı tek bir lazer noktasında oluşur ve üst üste gelen lazer darbeleriyle büyük bir yüzey işlenebilir. İkinci yaklaşım, lazer polarizasyonunun çok önemli olmadığı yüksek lazer akılarındaki (DLT-YA) doğrudan lazer tekstürlemedir. Burada, belli oranlarda üst üste getirilen spotlar mikro kanalları oluşturur ve malzemenin erimesi ve oksidasyonu nedeniyle hiyerarşik bir yapı ortaya çıkar [85].



Şekil 4.16. (a) Düşük lazer akılarında polarizasyon etkisi ile oluşan periyodik yapılar [88], (b) yüksek lazer akılarında malzeme yüzeyinde oluşturulan mikro kanallar [86].

Lazerler, atımlı ve sürekli modda ışımaya veren lazerler olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Atımlı lazerler ile yapılan aşındırma işleminde kullanılan lazerin atım uzunluğuna ve dalga boyuna bağlı olarak lazer demeti ile malzeme etkileşim mekanizması farklılaşmaktadır [54]. 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 [53].

Metalik malzemelerin yüzey işleme çalışmaları yapışma dayanımını arttırmak için

malzeme yüzeylerinde mekanik kilitleme ve kimyasal bağlanma yolu olmak üzere 2 temel mekanizmada iyileştirme sağlayabilmek için yapılır.

Mekanik kilitleme sağlayabilecek pürüzlü yüzeyler her atım süresinde lazer ile gerçekleştirilebilirken, kimyasal bağ sağlayabilecek yapıların oluşabilmesi için ısı etkileşimi ile yüzeyde işlem yapabilecek lazerlerin kullanımı daha uygundur. Bu nedenle çalışma sürecinde nanosaniye atım uzunluğuna sahip alüminyum alaşımlar ile foto-termal bir aşındırma mekanizması gerçekleştiren fiber lazer kullanılmıştır.

Lazerle malzeme işleminin temel amacı yoğunlaştırılmış elektromanyetik ışımının gücünü kullanarak malzemede kontrollü bir şekilde istenilen değişiklikleri yapmaktır [62].

Bu işlemden istenilen sonuca ulaşmak malzeme, lazer ve uygulama yöntemine ait parametrelere bağlı olarak değişkenlik gösterir. Lazer ile malzeme işlemede; lazer gücü, frekansı, atım süresi, hareket hızı vb. kontrol edilmesi gereken birçok parametre vardır. Ancak bu parametrelerden bir kısmı kullanıma açık olup diğer kısmı ise lazerin tasarımına bağlı olarak sabit kalmaktadır.

Bu çalışmada en uygun yüzeyleri elde edebilmek için lazer gücü, lazer frekansı (atım tekrarlama oranı) ve lazer demeti hareket hızı (tarama hızı) değişken olarak belirlenmiştir. Bu değişkenlerin işleme sonucu elde edilen yüzeyin yapışma performansı üzerindeki önemini belirlemek ve deney sayısını azaltmak için L9 ortogonal dizi Taguchi yöntemi (3 değişken ve 3 seviye) kullanılmıştır. Ayrıca, her bir lazer parametresi için hangi süreç parametresinin istatistiksel olarak anlamlı olduğunu belirlemek için istatistiksel bir varyans analizi (ANOVA) yapılmıştır.

Taguchi Metodu ile deneysel tasarım matrisi Tablo 4.2’de görülmektedir. Tablo 4.2’de belirtilen lazer parametreleri kullanılarak elde edilen yüzeylere ait optik mikroskop görüntüleri Şekil 4.17’de görülmektedir.

Optik mikroskop görüntüleri incelendiğinde yüzeylerin 3 farklı yapıda oluştuğu dikkati çekmektedir.

Tablo 4.2. Taguchi metodu ile deneysel tasarım matrisi

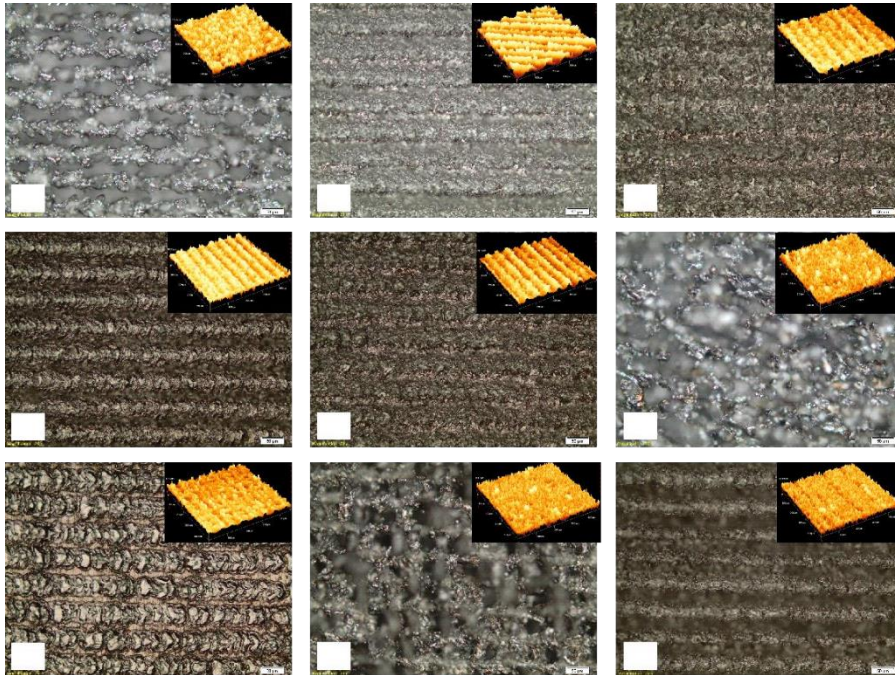
Örnek no	Frekans (kHz)	Lazer gücü (W)	Tarama hızı (mm/s)
D1	20	20	100
D2	20	35	800
D3	20	50	1500
D4	50	20	800
D5	50	35	1500
D6	50	50	100
D7	80	20	1500
D8	80	35	100
D9	80	50	800

Lazer akı değerlerine bağlı olarak değişim gösteren bu yapıları tam sınır değerlerini belirtememekle birlikte;

$F < 100 \text{ J/cm}^2$ , (D7)

$100 \text{ J/cm}^2 < F < 300 \text{ J/cm}^2$  (D2, D3, D4, D5 ve D9)

$F > 300 \text{ J/cm}^2$  (D1, D6 ve D8) şekilde sınıflandırabiliriz.

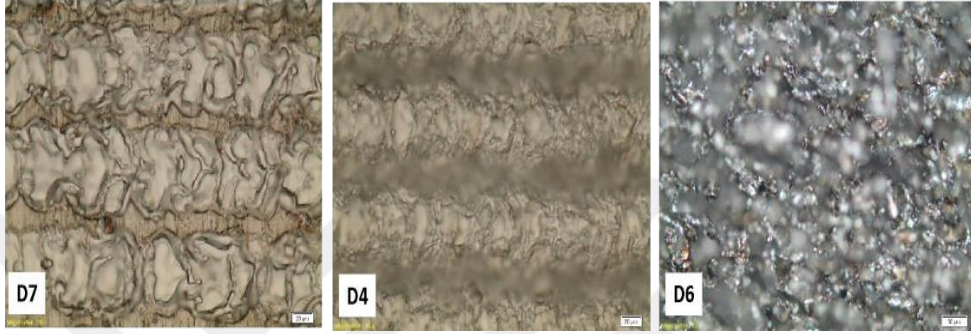


Şekil 4.17. Taguchi deneysel tasarım matrisindeki işleme örneklerinin optik mikroskop görüntüleri



Bu 3 farklı yapının (Şekil 4.18) ilkinde düşük lazer akısı nedeniyle oluşan yapılar diğer örneklere göre oldukça yüzeysel kanalların oluştuğu bir yapıdır.

Üretilen D7 örneğinin pürüzlülük değeri 1,6  $\mu\text{m}$  olup diğer örneklere göre nispeten düşüktür ( $>2 \mu\text{m}$ ). İkinci grupta değerlendirilen yüzeylerde ise lazer demetinin yarattığı kanallar net bir şekilde görülebilmektedir. Üçüncü grup yüzey ise çukurlardan oluşan bir yapıdır.



Şekil 4.18. Alüminyum yüzeylerinin lazer ile işlenmesi sonucu oluşan farklı yüzey yapıları

Lazer işleme parametreleri olarak, lazer gücü, lazer tarama hızı ve frekans parametreleri alüminyum yüzeyinde oluşturacağı mikro yapı değişimine bağlı olarak CFRP malzeme ile yapacağı yapışma kayma dayanımı açısından optimize edilmiştir. Optimizasyon amacıyla Taguchi deney tasarımı metodunda 9' luk matris uygulanarak hem zamandan hem de malzemedan tasarruf sağlanmıştır.

9 ayrı lazer işleme prosesi Tablo 4.3'te gösterildiği gibi farklı seviyelerdeki işleme parametrelerinden ibaret olup bu prosesler ile işlenen AA2024-T3 malzemeleri CFRP numuneleri ile yapıştırılıp kayma dayanımları test edilmiştir.

Her faktörün, Al/CFRP yapıştırma bağlantısı için lazer yüzey işleme prosesinde çoklu performans özelliklerine katkısı, varyans analizi (ANOVA) kullanılarak belirlenmiştir. Analiz,  $\alpha=0,05$  anlamlılık düzeyinde (%95 güven seviyesi) yapılmıştır. Lazer yüzey işleme parametresinin, gösterildiği gibi yapışma kayma dayanım sonuçlarını önemli ölçüde etkilediği değişikliği belirlemek için F-testi kullanılmıştır.

Lazer işlem parametrelerinin optimizasyonuna ilişkin ANOVA sonuçları Tablo 4.4'de görülmektedir. ANOVA sonuçları, maksimum bağlantı dayanımına 80 kHz frekans, 50 W lazer gücü ve 100 mm/sn tarama hızında ulaşabileceğini göstermiştir. Tarama

hızı, incelenenler arasında yapışma performansına en yüksek oranda (% 68.86) katkı sağlayan lazer yüzey işleme parametresidir. En etkin parametre sıralaması Taguchi ve ANOVA analizine göre lazer tarama hızı, lazer gücü ve lazer frekansı şeklinde elde edilmiştir. Yaklaşık %70'lik katkı oranı ile en etkin parametre lazer tarama hızı olarak tespit edilmiştir. Optimizasyon sonucunda yapışma kayma dayanımının en yüksek elde edilebilirliği açısından lazer tarama hızının 100 mm/s, lazer gücünün 50 W ve lazer frekansının da 80 kHz olması gerektiği tespit edilmiştir. AA2024-T3 malzemesinin bu optimize proses ile yapılan lazer işleme sonrası CFRP ile yapılan yapıştırma bağlantısının dayanımı  $23,58 \pm 2,5$  MPa olarak tespit edilmiştir.

Tablo 4.4'deki yapışma kayma dayanımı sonuçları incelendiğinde D8 ve D9 proseslerinin en yüksek yapışma dayanımı elde ettiği görülmektedir. Ayrıca en düşük yapışma kayma dayanımının da D7 prosesi ile elde edildiği açıktır. Bu 3 süreçte ilginç olarak en etkin parametre olan lazer tarama hızının her bir seviyesi mevcuttur. Bu denli önemli yapışma kayma dayanımı farkını mikro yapı incelemeleri ile belirlemek amacıyla D7, D8 ve D9 ile işlenmiş numunelerin hem SEM görüntüleri hem de kesit görüntüleri çekilmiş olup görüntüleri Şekil 4.19'da verilmiştir.

Tablo 4.3. Lazer parametreleri optimizasyonu için Taguchi deney tasarımı.

Numune Kodu	Frekans (kHz)	Lazer Gücü (W)	Tarama Hızı (mm/s)	Akı (Fluence) (J/cm <sup>2</sup> )	Sinyal Gürültü Oranı (S/N)	Yapışma Kayma Dayanımı (Ort. MPa)
D1	20	20	100	900	25,57215	19,28
D2	20	35	800	197	22,92852	16,11
D3	20	50	1500	150	21,53424	12,26
D4	50	20	800	112	23,35408	15,40
D5	50	35	1500	105	22,47359	13,45
D6	50	50	100	2251	25,22350	18,91
D7	80	20	1500	60	19,97041	10,03
D8	80	35	100	1576	26,10466	20,78
D9	80	50	800	281	26,95379	22,68

Tablo 4.4. Lazer işleme parametrelerinin optimizasyonu için ANOVA sonuçları

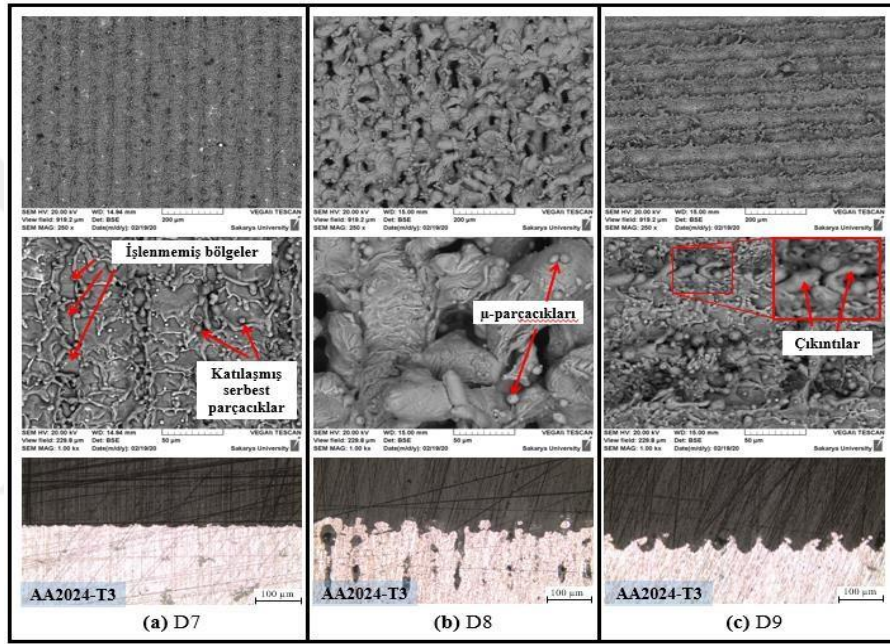
	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>		
<b>Varyasyon kaynağı</b>	Frekans	Lazer Gücü	Tarama hızı	Hata	Toplam
<b>Serbestlik derecesi</b>	A	B	C		
<b>Seviye 1</b>	23,34	22,97	25,63		
<b>Seviye 2</b>	23,68	23,84	24,41		
<b>Seviye 3</b>	24,34	24,57	21,33		
<b>Serbestlik Derecesi</b>	2	2	2	47	53
<b>Karelerin toplamı</b>	1,55	3,87	29,57	7,95	42,94
<b>Ortalama kareler</b>	0,77	1,94	14,78	0,17	
<b>Katkı yüzdesi (%)</b>	3,60	9,02	68,86	18,52	100
<b>F</b>	21,26	53,29	406,87		
<b>Güven Aralığı (95%) F<sub>2,4</sub>=6.94</b>	<b>X</b>	<b>XX</b>	<b>XXX</b>		

Kanallar arası mesafe 60  $\mu\text{m}$  olarak kabul edilmiş olup işlemler bu şekilde gerçekleştirilmiştir. Bu mesafenin de etkisi ilerleyen kısımlarda açıklanacaktır. D7 (Şekil 4.19-a) numunesinde en etkin parametre olan tarama hızının yüksek olması ve ayrıca lazer gücünün de düşük olması nedeniyle lazer-malzeme etkileşimi için yeterli süre olmadan işleminin gerçekleştiği ve bu nedenle de daha sığ bir izin meydana geldiği tespit edilmiştir. İşlenmiş sığ kanalların yanı sıra işlenmemiş bölgeler de belirlenmiş ve kırmızı çizgiler ile gösterilmiştir.

Lazer tarama hızının en düşük seviyesinde (100 mm/s) ve gücün de orta seviyede (35W) olması nedeniyle D8 (Şekil 4.19-b) numunesinde oluşan mikro yapının literatürde de “*kaotik*” olarak adlandırılan şekilde oluştuğu görülmektedir. Lazer-malzeme etkileşimi açısından yeterli enerji ve süre ile malzeme yüzeyinde açılan yere hemen bir başka spotun düşmesi nedeniyle oluşan izin kanaldan ziyade heterojen girinti- çıkıntılardan ibaret olduğu belirlenmiştir. D7 ve D8 numunelerinin arasında lazer tarama hızı (800 mm/s) için D9 (Şekil 4.19-c) numunesinde işleme sonrası oluşan kanalların D7’dekine benzer ancak çok daha derin ( $\approx 30\mu\text{m}$ ) olduğu görülmektedir. D7 numunesinde düşük yapışma kayma dayanımının elde edilmesinde ortaya çıkan sığ kanalların rol oynadığı diğer taraftan D9 numunesinde de yüksek yapışma kayma dayanımının sağlanmasında da elde edilen kanalların derin olmasının rol aldığı açıkça görülmektedir. D8 numunesinde ise kanal yapısı oluşmamışken yine de yüksek

yapışma kayma dayanımı elde edilmesi yüzeyde oluşan girinti-çıkıntılı yapı sayesinde heterojen de olsa yüksek yapışma yüzey alanı ile açıklanabilir.

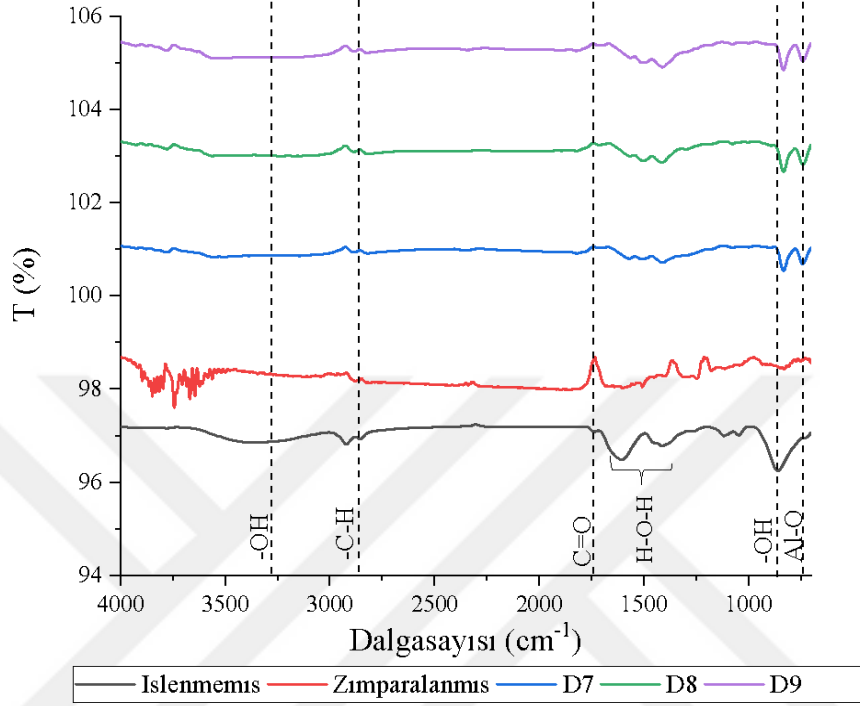
Taguchi deney tasarımı ile optimize edilen lazer işleme parametreleri kullanılarak yapılan işlemler sonrası elde edilen yüzey mikroyapısı D8'inkine benzer şekilde kaotik olarak elde edilmiştir. Çünkü lazer tarama hızı oldukça düşük ve gücü de oldukça yüksek olduğundan malzeme ile etkileşim çok fazla ve işleme genel olarak üst üste bindirme şeklinde ilerleyerek girinti-çıkıntılı bir yapı oluşturmuştur.



Şekil 4.19. Optimizasyon proseslerinden (a) D7, (b) D8 ve (c) D9 numunelerinin SEM ve kesit görüntüleri.

Optimum lazer yüzey işlemi ile yapışma kayma dayanımının artırılması, mekanik kilitlemenin yapışma mekanizmasını destekleyen fiziksel değişikliklerle açıklanmaya çalışılmaktadır, yapışma dayanımını etkileyen diğer mekanizma ise kimyasal bağlanmadır. Lazer malzeme yüzeyi etkileşimine bağlı oluşan ince oksit tabakaları, lazer enerji yoğunluğuyla değişen karmaşık bir fiziko-kimyasal yapıya sahiptir. Fiber lazerin atım süresine (100 ns) bağlı olan lazer-malzeme etkileşimi ile tavlanan yüzeyde oluşan tabakalar büyümektedir [87]. Yüzeyde ısıl işlem ile üretilen ince oksit tabaka ve malzeme arasındaki net sınır belirlenemediği ve yüksek hassasiyette (nm-μm) yüzey analizi tekniklerine ihtiyaç duyulduğu için lazerle işlenmiş alüminyum alaşımların yüzey analizini gerçekleştirmeyi zorlaştırmaktadır. Fiber lazer kullanılarak farklı frekans, lazer gücü ve tarama hızı kullanılarak gerçekleştirilen değişik lazer

parametreleri ile işlenen numuneler arasından yapışma kayma dayanımı değerleri de dikkate alınarak seçilen 3 farklı yüzey yapısına sahip (D7, D8 ve D9), işlenmemiş ve zımparalanmış numunelerin FTIR-ATR spektrumları Şekil 4.20’de görülmektedir.



Şekil 4.20. Farklı lazer parametreleri ile işlenmiş numunelerin, işlenmemiş ve zımparalanmış yüzeylerin FTIR-ATR spektrumları.

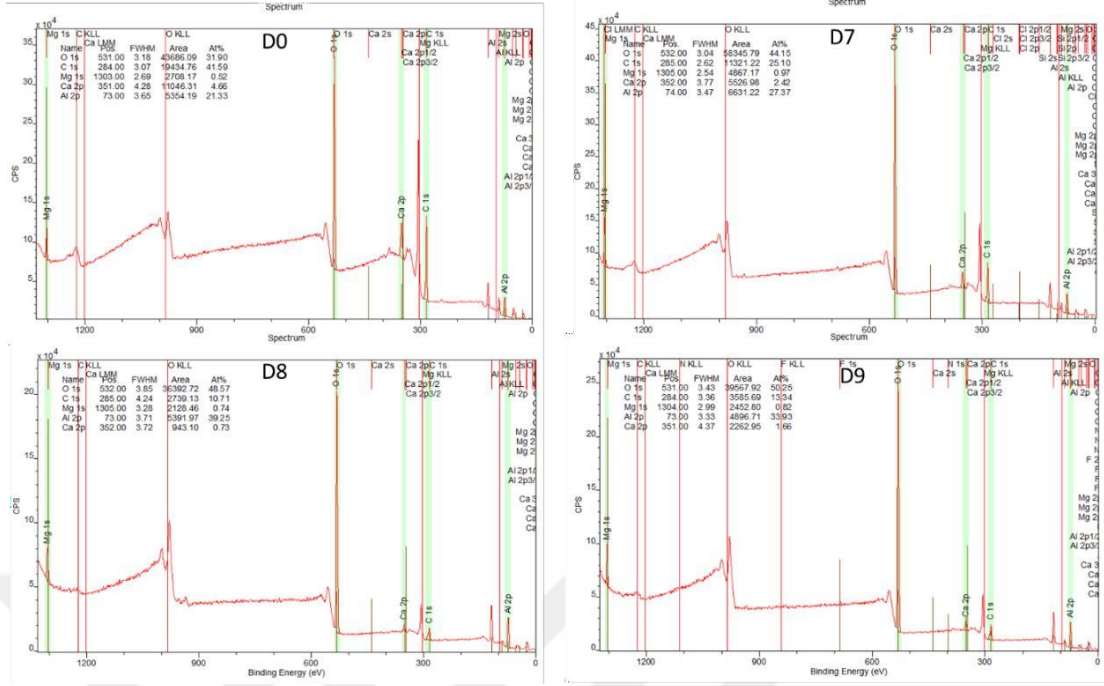
Silanlama ve FPL dağlama işlemi uygulanmış numunelerin spektrumlarında gözlenen, C-H bandı hariç olmak üzere, aynı bantlar gözlenmiştir. Fiber lazerle işlenmiş AA2024-T3 numunesinin D7, D8 ve D9 yüzeylerinin spektrumlarında, tüm bantların şiddet değerlerinde, özellikle hidrokarbonun C-H germe bandında önemli derecede bir azalma eğilimi vardır. İşlenmemiş numune spektrumunda belirlenen  $1742\text{ cm}^{-1}$  etiketli band C=O (karbonil) germe titreşimlerini göstermektedir. İşlenmemiş numune spektrumunda belirgin bir C=O piki gözlemlenirken zımparalanmış yüzeyin spektrumunda C=O piki yok olmuştur, ayrıca zımparalanmış numune spektrumuna benzer şekilde lazerle yüzey işleme uygulanmış numunelerin spektrumunda da C=O bağı çok düşük şiddette görülmektedir. İşlenmemiş numunede  $857\text{ cm}^{-1}$ ’de karakteristik O-H bandı belirlenirken, fiber lazer ile işlenmiş numunelerde de tıpkı diğer spektrumlarda olduğu gibi bant  $830\text{ cm}^{-1}$  gibi daha kısa dalga sayılarına kaydığı gözlemlenmiştir. Lazerle işlenmiş numunelerde diğer bantlarda daha düşük şiddette olduğu için en çok dikkat çeken  $740\text{ cm}^{-1}$ ’de gözlenen bant AIO4 ünitesinin 4

koordineli Al–O bağının gerilme titreşimi olarak adlandırılmaktadır. Yüksek lazer güçleri ve düşük tarama hızı parametreleri kullanılan numunelerde Al-O band şiddetlerinin daha fazla olduğu dikkat çekmektedir, ancak işlenmemiş numune spektrumundaki  $857\text{ cm}^{-1}$  bandı ile karşılaştırıldığında band kısa dalga sayısına doğru kaymış ( $830\text{ cm}^{-1}$ ) ve çizgi şiddeti değerleri oldukça düşüktür.

Fiber lazerle yüzeyi işlenmiş numune yüzeylerinin kontaminasyonlarının temizlenmesiyle yapışma kayma dayanımının arttığı, hidrokarbon (C-H) bant şiddetlerindeki önemli düşüşün de bu sonucu desteklediği sonucuna varılmıştır. Bu şekilde, optimize edilmiş lazer işlemi ile elde edilen yapışma kayma dayanımındaki artış, bu kimyasal değişim ile desteklenebilir. Ayrıca, temas açılarındaki azalmada, lazerle işlenmiş numunelerin yüzeyindeki apolar C-H bantlarındaki azalan miktara bağlı olduğu da düşünülmektedir.

Lazerle işlenmiş yüzeylerin yapışma kayma dayanımı (MPa) sonuçları incelendiğinde D9 numunesinin (yüksek lazer gücü ve düşük tarama hızı parametreleri uygulanmış) en yüksek değer elde edilmiştir, D9 numunesinin spektrumu incelendiğinde Al-O ve OH spektral bantlarının diğer numunelere oranla daha yüksek olduğu görülmektedir. Ancak, FTIR-ATR spektroskopisi ile yüzeyin nicel analizi yapılamamaktadır, bu sebeple yüzeyde oluşan kimyasal bileşimin miktarını belirlemek amacı ile X-ışını fotoelektron spektroskopisi (XPS) ile yüzeyler incelenmiştir.

Farklı lazer parametreleri ile işlenen D7, D8 ve D9 numunelerinin yüzey kimyasal bileşimini incelemek için XPS (SPECS) analizleri ultra yüksek vakum altında yapılmıştır. X-ışını kaynağından  $1486,71\text{ eV}$  foton enerjili monokromatik ışınlar ile yüzey uyarılmıştır. Geniş tarama spektrumları  $1\text{ eV}$  çözünürlükte kaydedilmiştir. İşlenmemiş, D7, D8 ve D9 numunelerinin geniş tarama XPS spektrumları Şekil 4.21'de görülmektedir. Numune kesme ve hazırlık sırasında oluşabilecek kontaminasyonları engellemek amacı ile AA2024-T3 numune yüzeyleri lazerle işlenmeden önce isopropil alkol (IPA) ile temizlenmiştir. İşlenmemiş ve farklı lazer parametreleri ile işlenmiş numunelerin XPS analizleri yüzeyler lazerle işlendikten 3 gün sonra gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.21. İşlenmemiş ve farklı lazer parametreleri ile işlenmiş (D7, D8 ve D9 ) numunelerin XPS spektrumları.

Yüzeyi işlenmemiş ve farklı lazer parametreleri ile işlenen D7, D8 ve D9 numunelerinin XPS spektrumları incelendiğinde; işlenmemiş yüzeyin C miktarı %41.59 iken, en düşük akının uygulandığı D7 ( $60 \text{ J/cm}^2$ ) numunesi için %2,1, D9 ( $289 \text{ J/cm}^2$ ) numunesi için %13,34 ve en yüksek enerji akısının uygulandığı D8 ( $1576 \text{ J/cm}^2$ ; yüksek lazer gücü, düşük tarama hızı) numunesinde ise yüzeydeki karbon miktarının en düşük seviyeye %10,71 değerine ulaştığı Tablo 4.5’de görülmektedir. Yüzeye aktarılan enerji akısının artması ile yüzeyin büyük oranda kontaminasyondan (kirlilikten) arındığı sonucuna varılmıştır, bu sonuçlar FTIR-ATR spektrumlarında kaybolan hidrokarbon piklerini de desteklemektedir.

İyi bir yapışma için mekanik kilitleme için uygun yüzey yapısı, kirlilikten arınmış bir yüzeyin yanı sıra yüzeyin kimyasal bağlanmasını destekleyecek oksit yüzeyine ihtiyaç duyulmaktadır. İşlenmemiş numunede belirlenen oksit miktarı %31,9 iken, en yüksek oksit miktarı %50.25 değeri ile D9 numunesinde elde edilmiştir. Numune yüzeylerindeki oksit miktarının ise uygulanan akı değerleri ile doğru orantılı artmadığı görülmektedir. Yüzeyde artan oksit miktarının yapışma dayanımını arttırdığına yönelik olarak Tablo 4.5’de belirtildiği üzere en yüksek oksit miktarına sahip D9 numunesi için  $22,68 \text{ MPa}$  ile en yüksek kayma dayanımı değerinin elde edildiği görülmektedir.

Tablo 4.5. Numunelerin yüzey kimyası bileşimi XPS analizi ve element oranları.

Numune	Al (%)	O (%)	C (%)	C/Al	O/Al	O/C	Yapışma Dayanımı (MPa)
İşlenmemiş	21,33	31,9	41,59	1,95	1,50	0,77	6,46
D7	27,37	44,15	25,1	0,92	1,61	1,76	10,03
D8	39,25	48,57	10,71	0,27	1,24	4,54	20,78
D9	33,93	50,25	13,34	0,39	1,48	3,77	22,68

Yüzeyin oksit özelliği ve kontaminasyon özelliklerinin belirteci olarak, elde edilen O/C oranlarını incelediğimizde en yüksek O/C oranı D8 numunesinde elde edilmesine rağmen D8 numunesinin çekme dayanımı sonucu D9 numunesine göre daha düşük çıktığı Tablo 4.4'de görülmektedir. Bu sonuç yüzey oksit yapısı ve temiz bir yüzeyin yapışma için gerekli olmasına rağmen, mekanik kilitlemeye katkı sağlayan yüzey morfolojisinin yapışma dayanımında önemli bir etken olduğunu desteklemektedir. Mekanik kilitleme sağlayacak bir yüzey yapısı ayrıca yüksek oksijen yüzdesi ile beraber yapışma dayanımına önemli oranda katkı sağlamışlardır.

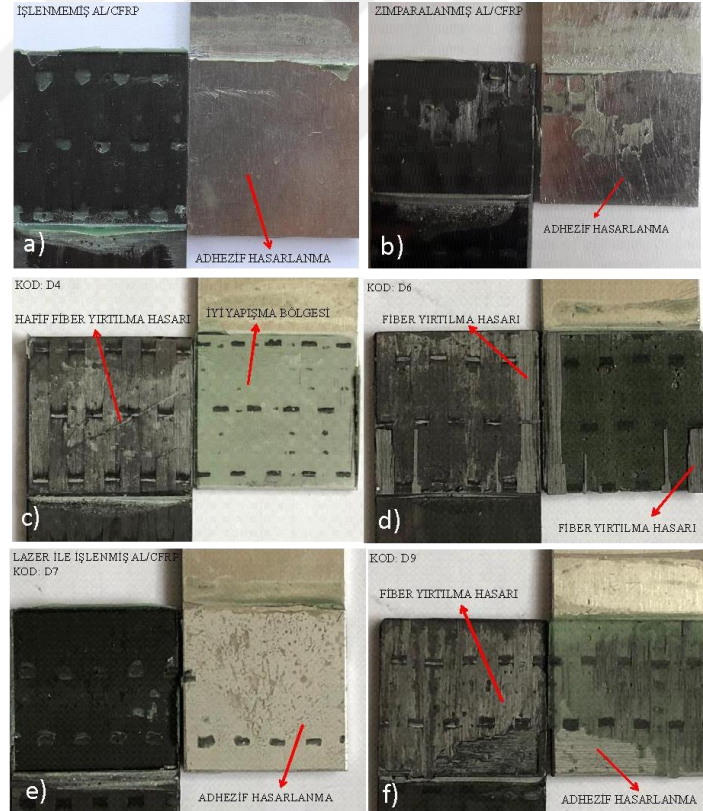
Hem işlenmemiş hem de fiber lazerle işlenmiş Al/CFRP yapıştırma bağlantılarının hasar mekanizmaları, Şekil 4.22'de gösterilmektedir. İşlenmemiş Al/CFRP yapıştırma bağlantılarının nispeten düşük dayanımının yüzey kirliliğine neden olan ayırıcı ajanların etkisi olduğu Şekil 4.22-a'dan kolaylıkla görülebilmektedir [54]. Epoksi bazlı yapıştırıcının AA2024-T3 malzeme yüzeyine hiçbir şekilde tutunmadığı ve hasar mekanizmasının alüminyum/epoksi ara yüzeyinden adheziv hasarlanma şeklinde olduğu tespit edilmiştir. Zımpara kullanılarak yapılan mekanik işlemde dolayı (Şekil 4.22-b), epoksi bazlı yapıştırıcının yerel olarak alüminyum yüzeyine bağlandığı görülmektedir. Bu şekilde, Al/CFRP yapıştırma bağlantılarının yapışma kayma dayanımı değeri iyileştirildiği görülmektedir.

Ek olarak yine de, arzu edilen alüminyum/epoksi ara yüzey uyumu elde edilememiştir. Genellikle yapıştırma bağlantılarının metal/yapıştırıcı ara yüzeyinden adheziv hasarlanma şeklinde hasara uğradığı gözlenmiştir. Lazerle işlem görmüş Al/CFRP yapıştırma bağlantılarının hasar türlerine odaklanarak, hassas bir işlem yoğunluğunu tespit etmek için, yüksek güçlü lazer işlemlerinde, CFRP yüzey bölgesinde fiber yırtılma hatası (Şekil 4.22-d ve f) meydana geldiği tespit edilmiştir. Fiber yırtılma hasarının yapıştırma bağlantılarında oluşması CFRP/epoksi yapıştırıcı ara yüzeyinde



iyi tutunmanın sağlandığı bununla birlikte alüminyum/epoksi ara yüzeyinde de iyi bir yapışma sağlandığını göstermektedir.

Özellikle CFRP/epoksi yapıştırıcı ara yüzeyinde uygulanan kuvvetin sönmüldüğü artan kuvvet miktarı ile CFRP malzemeyi oluşturan en üst katmanın yapıştırıcı ile birlikte hasarlandığı görülmüştür. Yapıştırma bağlantılarının kayma dayanımı değerlerinde, işlem görmemiş Al/CFRP yapıştırma bağlantılarına kıyasla önemli bir artış sağlandığı, ek olarak, alüminyum yüzeylerde düşük güçlü lazer işlemlerinde epoksi yapıştırıcı ile iyi bir yapışma meydana geldiği gözlenmiştir (Şekil 4.22-c). Lazer işleminin, alüminyum malzemeyi, yapıştırıcı malzemeye daha iyi yapışması için etkilediği tahmin edilmektedir. Bunun yanında, yüksek hızda lazerle işlem görmüş numuneler için (Şekil 4.22-e), işlenmemiş numunelere benzer şekilde adheziv hasarlanma görülmüştür. Bu tür bir işlemin alüminyum yüzeylerini nispeten olumsuz etkilediği sonucuna varılabilir.



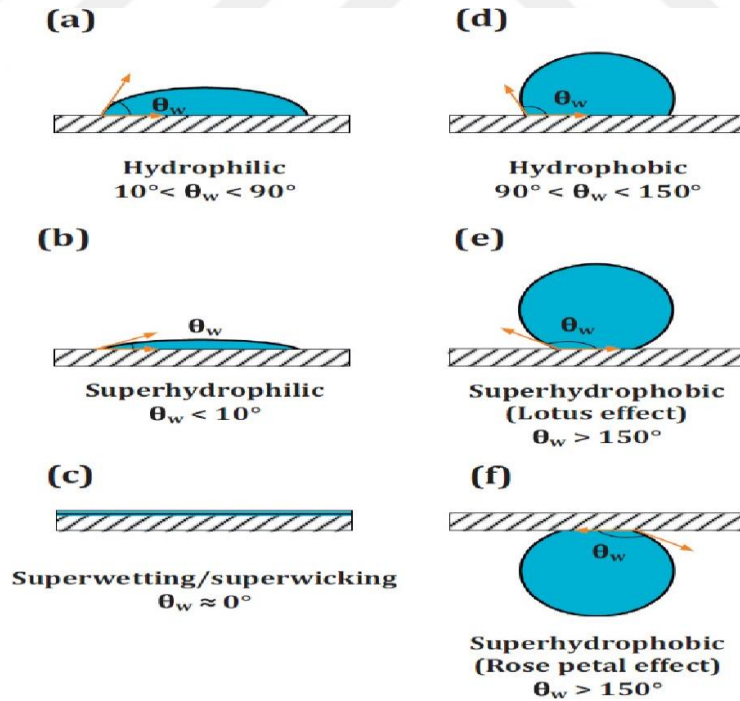
Şekil 4.22. Al/ CFRP yapışma bağlantılarının hasar fotoğrafları

Yüzeylerin yapışma dayanımı, yüzey pürüzlülüğü ve yüzey kimyasına bağlı olan

yüzeyin temas açısından etkilenmektedir. Literatürde, daha iyi yapışma elde edebilmek için daha yüksek ıslanabilirlik olması gerektiği pek çok çalışma ile gösterilmiştir.

Su ile ıslanma Şekil 4.23'de görüldüğü gibi altı kategoriye ayrılmaktadır: (a) hidrofilik, (b) süperhidrofilik, (c) süper ıslanma/süper esneklik, (d) hidrofobik, (e) süperhidrofobik lotus etkisi ve (f) süperhidrofobik gül etkisi.

Temas açısı ( $\theta_w$ )  $<90^\circ$  olan yüzeyler iyi ıslanma özelliği göstermektedir. Temas açısı  $10^\circ < \theta_w < 90^\circ$  arasında ise yüzey hidrofilik (Şekil 4.23-a) olarak tanımlanmaktadır. Temas açısı  $\theta_w < 10^\circ$  'nin ise, yüzey süperhidrofilik olarak kabul edilir ve su yüzeye yayılma eğilimindedir (Şekil 4.23-b). Temas açısı  $\theta_w = 0^\circ$  hidrofilik yüzeylerin özel bir kategorisi olarak kabul edilmektedir ve süper esnek (Şekil 4.23-c) yüzeyler olarak isimlendirilmektedir, aynı zamanda süper ıslanan yüzeyler olarak da bilinmektedir. Bu özel süperhidrofilik durumda sıvı damlacığı yüzeye ulaştığında çok yüksek hızda yayılma gerçekleştirmektedir.



Şekil 4.23. Yüzeylerin temas açılarına göre ıslanabilirlik özelliklerinin sınıflandırılması  $\theta_w$ : (a) hidrofilik; (b) süperhidrofilik; (c) süper ıslanma /süper esneme; (d) hidrofobik; (e) süperhidrofobik (lotus etkisi: suyu itme); (f) süperhidrofobik (gül etkisi: yüksek yapışma) [88]

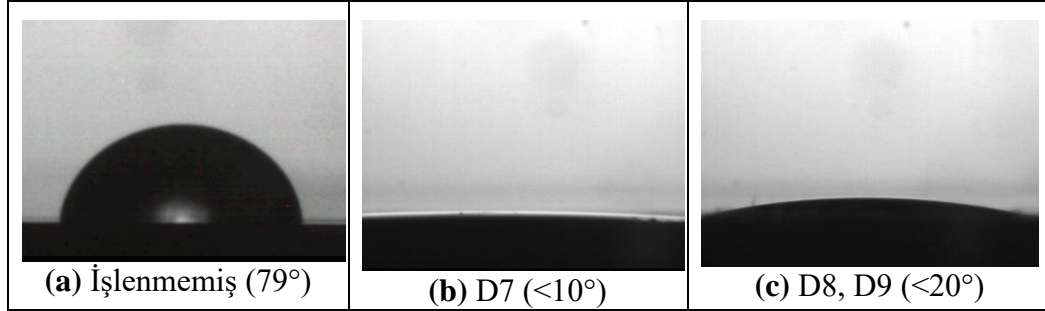
Sıvı yüzeye dikey tutulsa bile bu yüzeylerde sıvı yukarı tırmanma eğilimi gösterir.  $\theta_w$  temas açısının  $>90^\circ$  olduğu yüzeyler ıslanmama (hidrofobik) özelliği göstermektedir, bu tür yüzeylerde statik temas açısı ölçümleri sıvının yüzeydeki etkisini tamamen gösteremediği için yetersiz kalmaktadır, bunun için hidrofobik yüzeylerde ıslanmama özelliği yuvarlanma açısı ( $\theta_{\text{Roll-off}}$ ) ve temas açısı histerisisi ( $\theta_H$ ) gibi 2 ek parametre daha değerlendirilmektedir.

Temas açısı  $90^\circ < \theta_w < 150^\circ$  yüzeyler hidrofobik olarak değerlendirilmektedir (Şekil 4.23-d). Yüzeyin hidrofobikliği arttığında, yüzeydeki damlacıkların temas açısı da artar,  $\theta_w > 150^\circ$ 'den yüksek olduğunda, yüzey süper hidrofobik olarak tanımlanmaktadır. Yüzey hidrofobik özellik gösteriyorsa; lotus yaprağı veya gül yaprağı gibi 2 farklı türden etkinin bir çeşidine sahiptir, sırası ile (Şekil 4.23-e) ve (Şekil 4.23-f).

Yüzey lotus etkisi gösteriyorsa yüzey küçük bir açı ile eğildiğinde yüzeyden kayma eğilimi gösterir, kayma açısı ( $\theta_{\text{Roll-off}}$ ) ve temas açısı histerisisi ( $\theta_H$ )  $< 10^\circ$ 'dir. Gül etkisinde ise yüzey yüksek yapışma güçlerine sahiptir ve yüzey  $90^\circ$  eğilse bile su damlası yüzeye yapışık olarak kalmaktadır. Yapışma dayanımını arttırmak için yüzeyin iyi ıslanabilirlik özelliği göstermesi önemli bir faktördür. Yüzeylerin lazerle işlenmesi ile oluşturulan birbirine paralel mikro kanallar yüzeyde güçlü kılcal kuvvet üretmektedir. Bu kılcal etki nedeni ile su lazerle oluşturulan yüzey üzerinde hızla yayılmaktadır.

Yapışma kayma dayanımı sadece oluşturulan kanalların derinliğine bağlı olarak ortaya çıkan pürüzlülük durumuna göre değil aynı zamanda yapıştırıcının yayılma kabiliyeti açısından da değerlendirilmesi için D7, D8 ve D9 numunelerinin kontak açısı ölçüm sonuçları Şekil 4.24'te verilmiştir. İşlenmemiş numunede  $79^\circ$  olarak tespit edilen kontak açısı değeri yapıştırma kayma dayanımının da düşük olmasını (6,46 MPa) desteklemektedir. Çünkü yapıştırıcının iyi yayılamadığı ve ayrıca pürüzlülüğü de olmayan işlenmemiş numunede yapışma kayma dayanımının düşük çıkması beklenen bir sonuçtur. Diğer taraftan D7, D8 ve D9 numunelerinde ise oldukça düşük kontak açısı değerleri elde edilmiş ve bu durum işlenmemiş numuneye göre daha yüksek yapışma kayma dayanımı sonuçlarının elde edilmesini desteklemektedir. Ancak D8 ve D9'un D7'den daha yüksek yapışma kayma dayanımı sonucu elde etmesi kimyasal

bağlanmanın yanında mekanik kilitlemenin de önemli derecece aktif rol aldığını kanıtlamaktadır.



Şekil 4.24. Optimizasyon proseslerinden D7, D8 ve D9 ile işlenen AA2024-T3 numunelerinin kontak açıları.

#### **4.4. Fiber Lazer Tekniği İle AA2024-T3 Malzeme Yüzeyinde Mekanik Kilitleme Sağlayacak Kanalların Açılması**

Bu kapsamda lazer cihazının AA2024-T3 yüzeyini kanal mikro yapısında en uygun işleyecek parametreleri optimize edildikten sonra işleme parametreleri olarak kanal yapısının geometrisine odaklanılmıştır. Bu amaçla AA2024-T3/CFRP yapıştırma bağlantılarının performansı lazer geçiş sayısının değişimine, kanallar arası mesafeye, kanalların çekme yönüne göre açısına ve bu açılardan oluşan desenli işlemeye bağlı olarak incelenmiş ve her bir parametre optimize edilerek en iyi yapışma dayanımı elde edilmeye çalışılmıştır. Tablo 4.5’de belirtildiği üzere en yüksek oksit miktarına sahip D9 numunesi için 22,68 MPa ile en yüksek kayma dayanımı değerinin elde edildiği görülmektedir. En iyi kayma dayanımının D9 numunesinde elde edildiği için çalışmalarda D9 lazer işleme prosesi üzerinden devam edilmiştir.

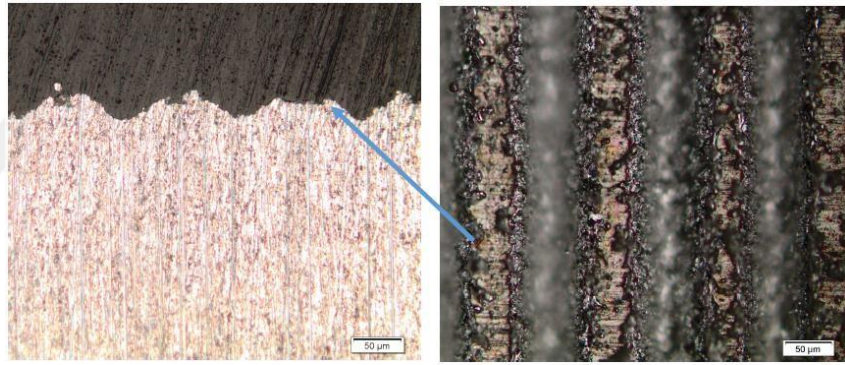
##### **4.4.1. Lazer geçiş sayısının artırılmasına bağlı olarak elde edilen kanalların değişen geometrik parametrelerinin yapışma özelliklerine etkileri**

Bu hedef için öncelikle D9 lazer işleme prosesi ile AA2024-T3 alaşımı yüzeyinde farklı derinlik, genişlik ve oranlarının oluşturulmasına bağlı olarak CFRP ile yapılacak bağlantının yapışma kayma dayanımı üzerine olan etkileri incelenmiştir. Farklı derinlik ve genişliklerin oluşturulması amacıyla lazer geçiş sayısı artırılmıştır. Ancak işleme açısından lazer etki alanı göz önüne alındığında kanallar arası mesafenin 60  $\mu\text{m}$ ’den daha büyük olmasına bu sayede de oluşan kanal geometrik yapısının çok daha

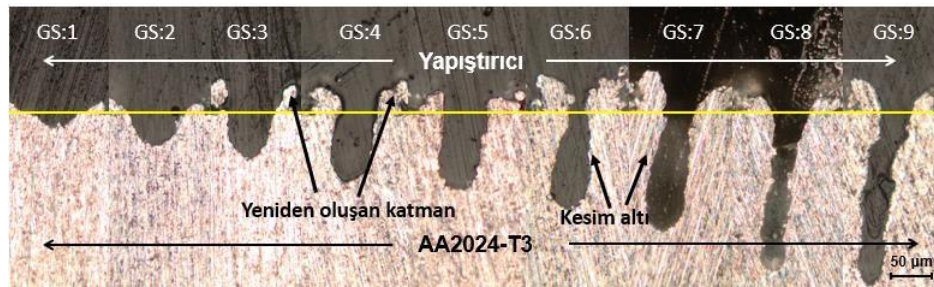
net incelenmesine olanak sağlanmıştır. Bu amaçla kanallar arası mesafe 120 µm olarak kabul edilmiş olup 25x25 mm<sup>2</sup>'lik lazer işleme alanı için 208 adet kanalın genişlik boyunca işlenmesi sağlanmıştır (Şekil 4.25-a). Lazer geçiş sayısının artırılmasına bağlı olarak modifiye edilen metalin kesit görüntüleri alınarak Şekil 4.25-b'de verilmiş ve ayrıca oluşan kanalların derinlik ve genişlik gibi geometrik parametreleri mikroskop altında incelenerek boyut değişimleri kaydedilmiştir.

Elde edilen kanalların geometrik parametreleri Şekil 4.26-a'da şematize edildiği gibi ölçülerek değişim durumları grafik halinde çizdirilmiş ve Şekil 4.26-b ve c'de gösterilmiştir. Şekil 4.25 ve 4.26'de görüldüğü üzere lazer geçiş sayısı artırdıkça derinlik de lineer bir şekilde yaklaşık 25 µm'den 200 µm'ye kadar artırılmıştır.

Derinliğin artırılmasının aksine lazer geçiş sayısı arttıkça genişlik 6 geçişe kadar yavaş da olsa azalma göstermiş, ardından tekrardan artış göstermiştir



(a)

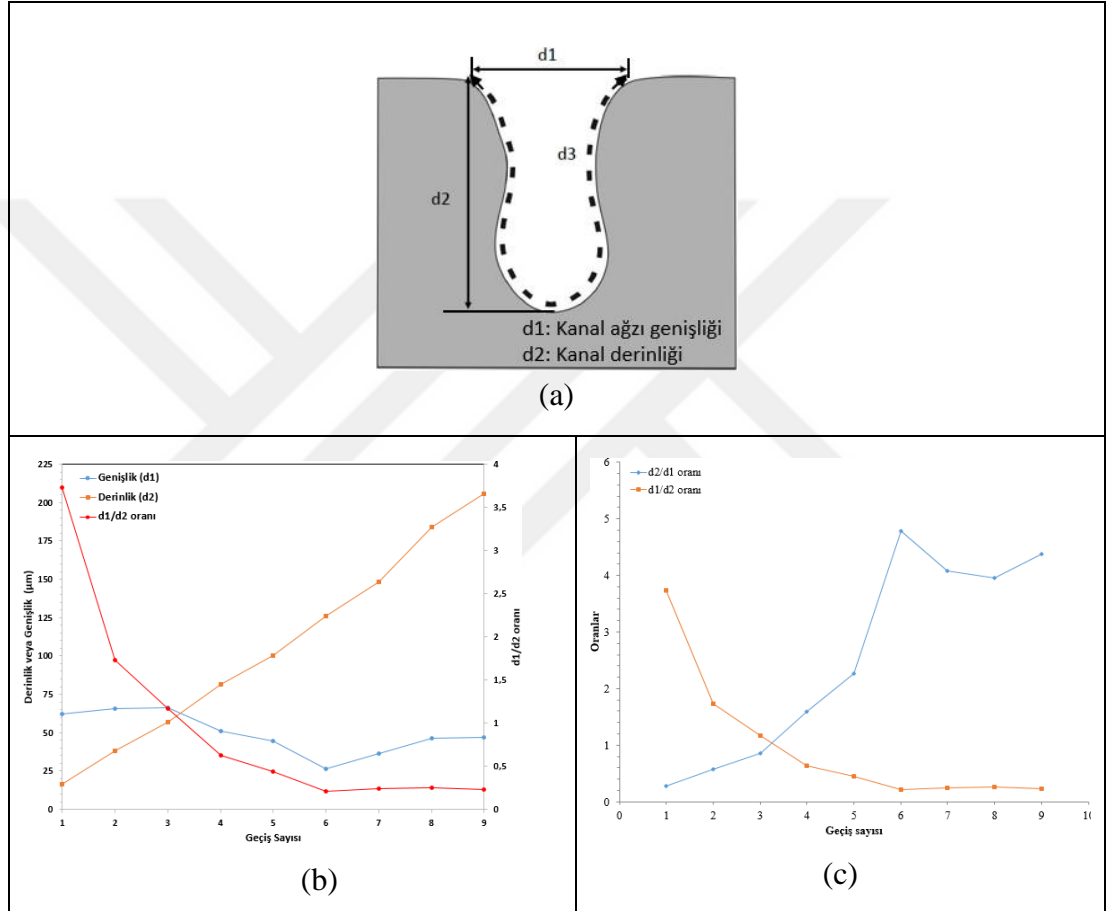


(b)

Şekil 4.25. D9 lazer prosesi ile (a) 120 µm aralıklı işlenen kanalların üstten görüntüsü (b) geçiş tekrar sayısına bağlı olarak oluşan kanalların kesit görüntüleri

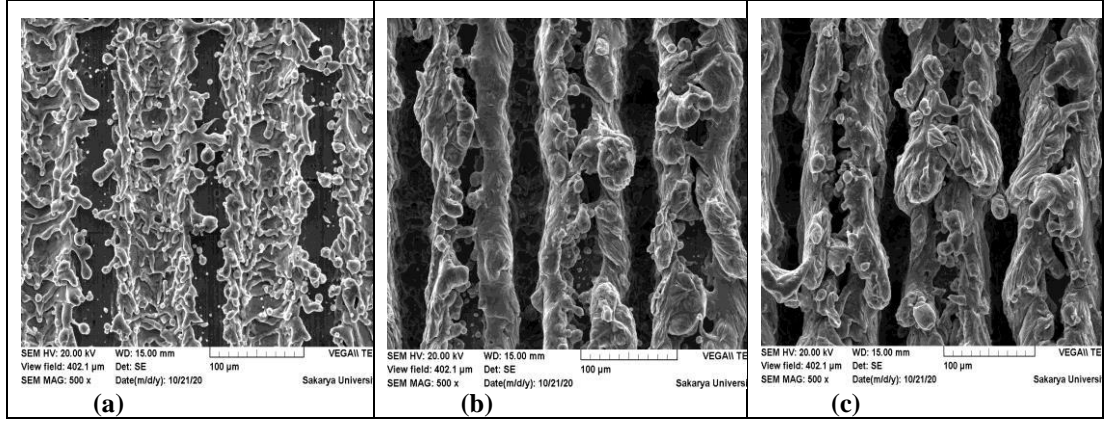
Şekil 4.25'de açıkça görüldüğü üzere 5. lazer geçişine kadar kesim altı oranı oluşmadan kanal aynı genişlikte derine inmiştir. 6. lazer geçişinde ise kanalın giriş

genişliğinde önemli bir azalma sonucu dar bir giriş kısmı ardından kesim altı oranının oluştuğu yani kanalın derinleştikçe genişliğinin değiştiği görülmektedir. 7. lazer geçişinden sonra genişliğin önemsiz derecede arttığı ancak derinliğin ise ciddi oranda artışa devam ettiği tespit edilmiştir. İlave edilecek olursa 8. geçişi ve sonrasında kanal derinliği artarken duvarının ise daha girintili çıkıntılı bir hal aldığı net bir şekilde görülmektedir.



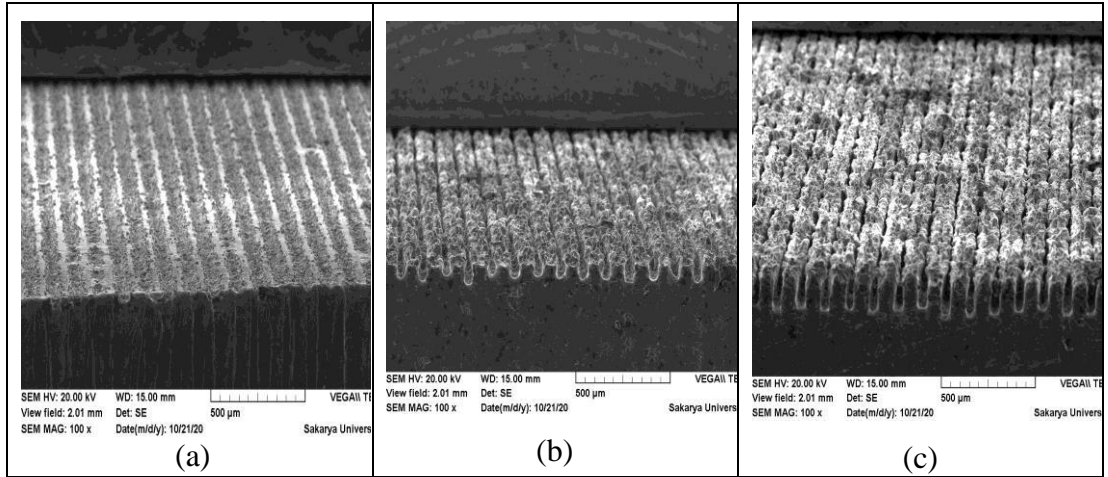
Şekil 4.26. D9 lazer işleme prosesinin geçiş sayısının artırılmasına bağlı olarak oluşan kanalın geometrik ölçülerinin şematik gösterimi (a), geometrik parametrelerinin değişimi (b) ve (c)

Şekil 4.27’de farklı geçiş sayılarında (1, 5 ve 6 geçiş sayısı) fiber lazer ile AA2024-T3 malzemelerinin işleme yüzeyleri gösterilmiştir. Şekil 4.27’de genel olarak artan geçiş sayısı ile yüzeyde yeniden oluşan katman miktarının arttığı ve kanallar arası işlenmemiş yüzeylerin yeniden oluşan katmanlar ile kaplandığı gözlemlenmiştir. Özellikle Şekil 4.27-a’da sığ bir kanal derinliği bulunurken, Şekil 4.27-b ve c’de artan geçiş sayısı ile malzeme yüzeyinde daha derin kanalların oluştuğu tespit edilmiştir.



Şekil 4.27. Fiber lazer tekniği ile D9 işleme prosesinde; (a) 1 geçiş; (b) 5 geçiş ve (c) 6 geçiş ile işlenmiş AA2024-T3 malzeme yüzeylerinin üstten SEM görüntüleri (500x).

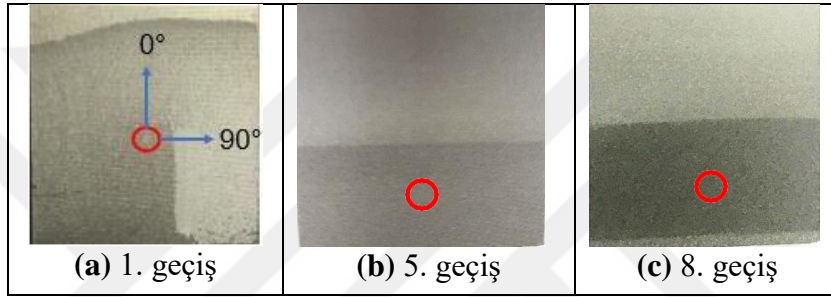
Farklı geçiş sayılarında (1, 5 ve 6) fiber lazer ile AA2024-T3 malzemelerinin işleme yüzeylerinde oluşturulan kanal profillerinin tekrarlanabilir olduğu ve kanal profillerinin kesit boyunca aynı derinliğe sahip olduğunu belirlemek adına açılı olarak SEM görüntüleri alınmış ve Şekil 4.28’de elde edilen görüntüler verilmiştir. Şekil 4.28’den da görüldüğü gibi fiber lazer tekniği ile AA2024-T3 malzeme yüzeyinde aynı işleme parametreleri için tekrarlanabilir kanal profillerinin oluştuğu tespit edilmiştir. Kanal derinliğinin artan geçiş sayısı ile kayda değer bir şekilde arttığı kanal giriş genişliğinin ise 6. geçiş sayısına kadar azaldığı SEM görüntülerinde de açıktır (Şekil 4.28. -c).



Şekil 4.28. Fiber lazer tekniği ile D9 prosesinde; (a) 1 geçiş; (b) 5 geçiş ve (c) 6 geçiş ile işlenmiş AA2024-T3 malzeme yüzeylerinin açılı SEM görüntüleri (100x).

D9 lazer prosesi ile 120 µm aralıklı kanallar şeklinde işlenen numunelerde lazer geçiş sayısının kontak açısı ve yapıştırıcı yayılma performansı üzerine etkisini incelemek

amacı ile ölçümler gerçekleştirilmiştir. Yüzeğe saf suyun Şekil 4.29'teki kırmızı daire ile gösterildiği yere damlatılması ile çok hızlı bir şekilde yayıldığı gözlemlenirken kontak açısını analiz edebileceğimiz bir fotoğraf kaydedilememiştir. Tüm geçiş sayıları için durum aynı iken kontak açıları  $\approx 0^\circ$  olarak kabul edilmiş ve yüzeylerin bu durumda süper hidrofilik karakterde olduğu tespit edilmiştir. En azından yayılmanın üstten görünüşünü incelemek adına çekilen dijital görüntülerden sadece 1, 5 ve 8 geçiş için olanları Şekil 4.29'da verilmiştir. Yüzeylerin süper hidrofilik olması Şekil 4.25-b'deki görüldüğü gibi yapıştırıcının kanallara rahatlıkla sızıp tamamıyla doldurduğunu desteklemektedir.



Şekil 4.29. Geçiş sayısına bağlı olarak kontak açısı sonuçları

Lazer geçiş sayısına bağlı olarak AA2024-T3 alaşımını yüzeyinde oluşturulan kanalın geometrik parametrelerindeki değişime göre CFRP ile yapacağı bağlantının yapışma kayma dayanımı sonuçları Şekil 4.30'da verilmiştir. AA2024-T3/CFRP yapışma kayma dayanımı D9 lazer prosesinin 60  $\mu\text{m}$  aralıklı (416 adet kanal) uygulanması sonucu 22,68 MPa elde edilmiş iken kanallar arası mesafesinin 120  $\mu\text{m}$  olması ile (208 adet kanal) 19,03 MPa'a düşmüştür. Aynı lazer işleme prosesinin geçiş sayısı artırıldıkça en yüksek değeri 26,48 MPa olarak 5. geçişte elde edilmiştir. Yapışma kayma dayanımında kaydedilen bu artış pek ciddi olmayan genişlikteki düşüğe rağmen derinlikte elde edilen artışa bağlanmıştır.

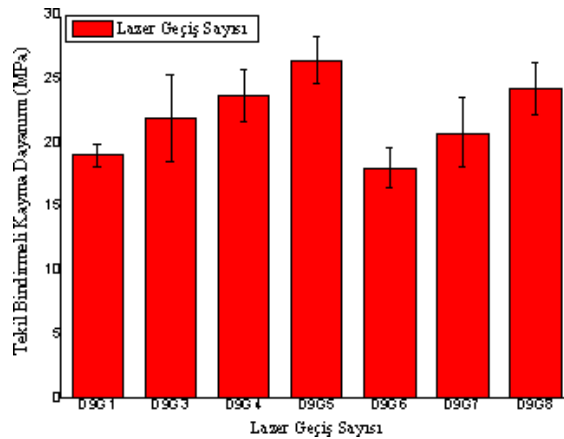
Kademeli olarak her geçiş sonrası yapışma kayma dayanımında artış görülürken 6. geçişte birden 18,04 MPa ciddi bir düşüş olduğu dikkati çekmektedir. Buradaki önemli görülen düşüş öncelikle yapıştırıcının kanal içini dolduramamasına bağlanabilecek iken Şekil 4.25-b'de görüldüğü üzere yapıştırıcının her bir geçiş sonucu kanalları iyice doldurduğu açıkça görülmektedir. Yapışma kayma dayanımındaki düşüşün nedeni olarak kanal ağzı genişliğinin oldukça dar olması ve kayma doğrultusunda yükü taşıyan bu kesitin de doğal olarak düşük olmasına bağlanabilir.



6. geçiştikten sonraki geçişlerle birlikte bu giriş kısmının tekrardan ortadan kalktığı ve derinliğinden artışa devam etmesi sonucu yapışma kayma dayanımının da tekrardan artışa geçtiği tespit edilmiştir.

Wu vd. (2020) [63] kanal derinliğinin yapışma kayma dayanımına negatif etkisi olduğunu kaydetmişlerdir. Bu durumda kanalı dolduracak olan polimerin viskozitesi önem arz etmektedir. Araştırmacılar 5052-A1 alaşımı ile poliamid 6 esaslı CFRTP malzemelerini yapıştırırken kompozit yapı içindeki PA6 polimerinin termoplastik esaslı olup ısı altında ergitilerek alüminyum alaşımı tarafında derinliği 120  $\mu\text{m}$ 'den

240  $\mu\text{m}$ 'ye artış gösteren pürüzlü yapıya sızmadığını ve boşluklu bir bağlantı sağlandığını bu sebeple de dayanımın düştüğünü belirtmişlerdir. Termoplastik esaslı polimerin ergitilerek elde edildiği viskozite termoset esaslı yapıştırıcılardan oldukça yüksek olması nedeniyle bu tarz sorunlar ile karşılaşılması muhtemeldir. Projemizde bu durum göz önünde bulundurularak başlangıç aşamasında yapıştırıcı seçimi yapılırken viskozitesi düşük olanın proje hedefine daha iyi hizmet edeceği düşünülerek temin edilmiştir. Elde edilen sonuçlara paralel olarak Vidal vd. (2014) [64] benzer şekilde kanal geometrik değişimi stratejisini çelik yüzeyinde oluşturmaya çalışmış ve cam elyaf takviyeli PA6 kompoziti ile olan yapışma dayanımını incelemişler. Tespit ettikleri sonuçlara bakıldığında geometrik parametre değişimini geçiş sayısını değiştirerek oluştururken genişliği değiştirmeden derinliği çok fazla olmayacak şekilde 19'dan 56  $\mu\text{m}$ 'ye artırarak PA6'nın kolaylıkla sızabileceği kanalları meydana getirmişlerdir. Bu kanalların derinliğine bağlı olarak da yapışma dayanımının da ciddi bir artış kaydetmişlerdir.



Şekil 4.30. Lazer geçiş sayısına bağlı olarak yapışma kayma dayanımı

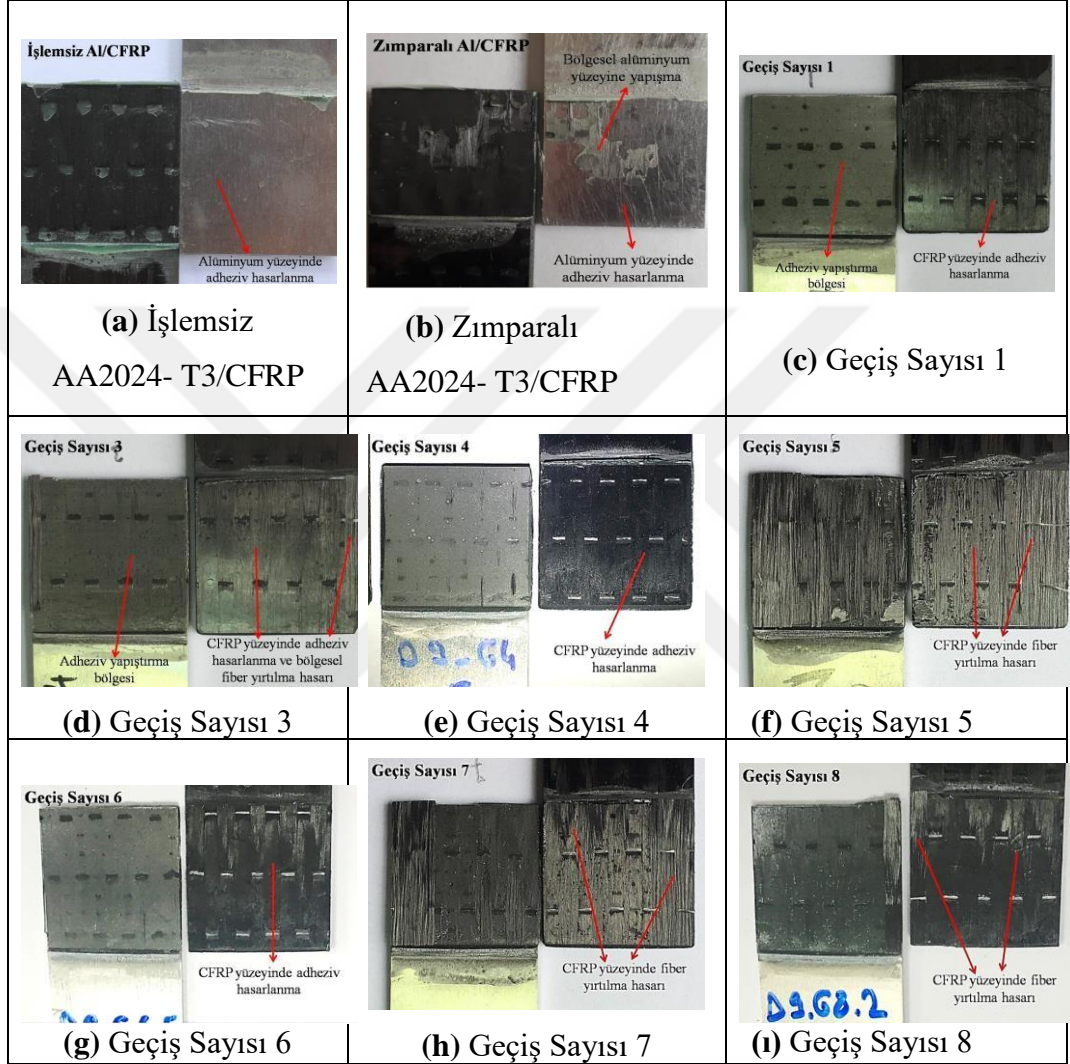
Farklı geçiş sayılarında yüzeyleri işlenmiş AA2024-T3 alaşımı ile CFRP malzemesi adheziv olarak yapıştırılmış ardından yapışma performanslarının tespit edilmesi için yapışma kayma dayanımı testlerine tabi tutulmuştur. Mekanik testler sonrası kopan bağlantıların hasar modları incelenmek üzere kopan kupon numune çiftlerinin fotoğrafları çekilmiş ve Şekil 4.31’de verilmiştir. Bağlantılarının hasar türleri işlemsiz ve zımparalı AA2024-T3/CFRP yapıştırma bağlantıları ile karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Şekil 4.31’den genel olarak işlemsiz ve zımparalı AA2024-T3/CFRP yapıştırma bağlantılarına göre hasar türlerinin alüminyum yüzeyinde oluşan adheziv hasarlanmadan (Şekil 4.31-a ve b), CFRP yüzeyinde adheziv hasarlanma ve fiber yırtılması (Şekil 4.31-c-1) şeklinde değıştiğı tespit edilmiştir. Ebnesajjad ve diğ. [89] çalışmasında belirttiğı üzere yapıştırıcı yapıştırılan yüzeyi tam olarak ıslatamadığı taktirde, optimum yapışma elde edilememektedir. Bu bağlamda hem işlemsiz hem de zımparalı AA2024-T3/CFRP bağlantılarında hasar alüminyum/yapıştırıcı ara yüzeyinde oluşmuştur. Fiber lazer prosesi ile yapılan tüm geçiş sayısı işlemlerinin yapıştırıcı ile alüminyum malzemesinin yapışma uyumunu arttırdığı ve yapıştırma bağlantısında mekanik testler nedeniyle oluşan hasarların herhangi bir ön yüzey işlemi yapılmayan CFRP malzeme yüzeyine kaydığı saptanmıştır.

Özellikle yapışma kayma dayanım test sonuçlarında görüldüğü üzere lazer geçiş sayısının 5, 7 ve 8 olduğu durumlarda kayma dayanımı değerlerinin en yüksek değerlere ulaştığıdır. Şekil 4.31-f-h- ve ı’da verilen dijital görüntülerden özellikle fiber yırtılma hasarının ön planda olduğu açıktır. Alüminyum malzeme yüzeyinde farklı geçiş sayısı ile oluşturulan farklı derinlikte ve genişlikteki kanalların varlığı mikro kilitleme mekanizmasını sağlayarak alüminyum/yapıştırıcı tutunmasını arttırmıştır.

Şekil 4.31-f-h ve ı’da belirtilen lazer geçiş sayılarında elde edilen kanalların derinliğı ve yapışma genişliğı miktarının diğer geçiş sayılarına göre daha fazla olması sebebi ile fiber yırtılma hasarının ana hasar türü olarak ön plana çıktığı tespit edilmiştir. Fiber yırtılma hasarının varlığı alüminyum/yapıştırıcı yapışma dayanımının iyileştiğinin bir kanıtıdır. Geçiş sayısının 6 olduğu (Şekil 4.27-g) durumda ise kanal ağız genişliğinin dar olması sebebiyle mikro kilitleme istenilen düzeyde oluşturulamamıştır. Bu nedenle de CFRP yüzeyinde adheziv hasarlanma meydana gelmiştir. Amend ve diğ. [90]

çalışmalarında alüminyum/termoplastik esaslı polimer malzemelerin yapıştırma bağlantılarının dayanımına alüminyum yüzeyinde oluşturulan kanal yapıların etkisini araştırmışlardır. 6-8 ve 10 lazer geçiş sayılarında alüminyum malzeme yüzeyinde oluşturdukları kanal yapıların derinlikleri sırasıyla 200 µm, 320 µm ve 450 µm'dir.



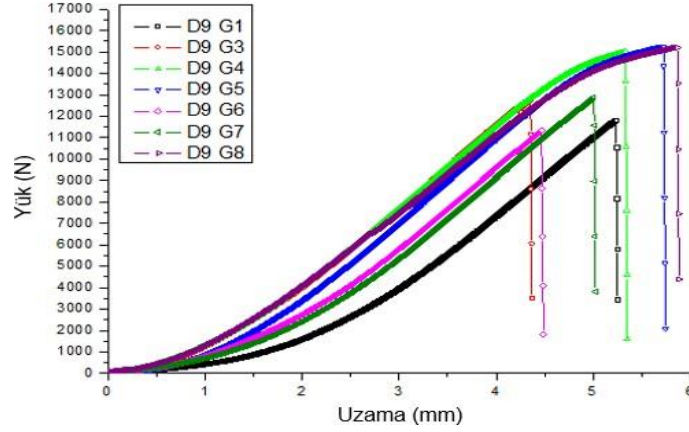
Şekil 4.31. İşlemsiz ve zımparalı AA2024-T3/CFRP yapıştırma bağlantıları ile farklı geçiş sayıları için bağlantıların mekanik testler sonrası hasar türlerine ait fotoğraflar

Özellikle lazer geçiş sayısı arttıkça derinlik boyunca kesim altı (undercut) denilen derinlik boyunca oluşan yapıların ortaya çıktığı belirtilmiştir. Elde edilen sonuçlardan lazer geçiş sayısının artması ile kayma dayanımı değerlerinin kayda değer bir şekilde arttığı belirtilmiştir. Kırılma davranışı incelendiğinde ise polikarbonat polimerinin metal yüzeyinden tamamen adheziv hasarlanma şeklinde ayrıldığı belirtilmiştir.

Bir başka çalışmada ise Vidal ve diğ.(2016) [91] cam fiber takviyeli polyamid ile düşük alaşımli çeliğin epoksi esaslı yapıştırıcı ile yapışma dayanımını kanal genişliği, kanallar arası mesafe ve kanal tepe yüksekliğine göre incelemiştir. Bu amaçla gerçekleştirilen çalışmada 2-8 geçiş sayısı tekrarında nanosaniye fiber lazer ile metal yüzeyinde kanallar oluşturulmuştur. Yapışma kayma dayanımı testlerinden elde edilen sonuçlara göre geçiş sayısının 4 olduğu durumda maksimum kuvvet değerlerine ulaşıldığı, geçiş sayısı değerlerinin 8'e çıktığı durumda ise polimer malzemede hasarlanma gözlemlendiği belirtilmiştir. Bunun sebebinin ise 2 ve 4 geçiş sayısında kanal genişliğinin sabit bir değerde kaldığı fakat artan geçiş sayısı ile kanal genişliğinin kayda değer bir şekilde azaltan erimiş ve tekrar katılmış metalin kanal girişinde oluşmasından kaynaklandığı belirtilmiştir.

Literatürle de uyumlu olan hasar türlerinin desteklenmesi amacıyla iyi derecede tutunmaya bağlı fiber yırtılma hasarlarının yapışma kayma dayanımı testleri sonucuna da tesir ettiği düşünülmüştür. Bu nedenle mekanik testlerde elde edilen kuvvet-uzama eğrileri karşılaştırmalı olarak çizdirilip Şekil 4.32'de verilmiştir. Tutunmanın yüksek olduğu yani yapışma kayma kuvvetinin yüksek çıktığı geçiş sayıları için ayrıca uzama değerlerinin de yüksek çıktığı tespit edilmiştir. Özellikle fiber yırtılma hasarlarının gözlemlendiği 5. ve 8. geçişler için uzama miktarlarının da yüksek olduğu görülmüştür. Bu iki sonucun birbirini tamamlaması yapışma kayma dayanımının yüksek oluşunu desteklemektedir.

Geçiş sayısının 9 ve sonrasında muhtemel yapışma dayanımı değişimi için yapıştırıcının kanal içini doldurma gibi problemler ile birlikte zaman ve maliyet gibi endüstriyel şartlar da göz önüne alınarak geçiş sayısının optimum 5 olarak sınırlı tutulmasına karar verilmiştir. Bu sayede AA2024-T3 alaşımının D9 prosesi ile 120 µm aralıklı kanallı işleme 5 geçiş sonrasında yaklaşık %30'luk bir artış sağlanmıştır. Ancak D9 ile işlemede normalde 60 µm aralıklı kanallar ile elde edilen yapışma kayma dayanımı 22,68 MPa olarak tespit edilmiş olup 5 geçiş işleminin ardından kanallar arası mesafenin de optimize edilmesi gerekliliği ortaya çıkmıştır.



Şekil 4.32. Lazer geçiş sayısına bağlı olarak elde edilen yapışma kayma dayanımı testi grafikleri

#### 4.4.2. Kanallar arası mesafenin değişimine bağlı olarak yapışma özelliklerinin incelenmesi

Lazer ile alüminyum alaşımının yüzeyinin yapışma özellikleri açısından modifikasyonunda lazer cihazı parametrelerinin optimizasyonuna bağlı olarak D9 prosesi hem kanal esaslı işlemeye hem de yüksek yapışma dayanımını sağlaması açısından optimum proses olarak seçilmiştir. Ardından ilk olarak D9 prosesi kullanılarak kanallar arası mesafenin geniş tutulup (120  $\mu\text{m}$ ) sadece kanalın derinlik ve genişlik esaslı geometrik parametrelerinin yapışma performansına etkileri incelenmek üzere lazer geçiş sayısı optimize edilmiştir.

AA2024-T3/CFRP bağlantılarının yapışma kayma dayanımına göre yapılan bu optimizasyon sonucunda en yüksek değer 5. geçiş ile sağlandığından dolayı optimum lazer geçiş sayısı 5 olarak seçilmiştir. Yapılan bu lazer işlemlerinde kanallar arası mesafenin 120  $\mu\text{m}$  seçilmesinin esas nedeni lazer-malzeme etkileşimi sürecinde kanalların kenarlarında yeniden katılma ile oluşan metal yığınlarının birbirlerini kapatmayacak kadar uzak olacak şekilde açılıp sadece derinlik ve genişlik gibi geometrik parametrelerinin yapışma özelliklerine olan etkilerinin incelenebilmesidir.

Lazer spot çapı yaklaşık 50  $\mu\text{m}$  olmasından dolayı lazer-malzeme etkileşimine bağlı olarak üst üste bindirme yapmayacak şekilde en düşük 60  $\mu\text{m}$  olmak üzere kanallar arası mesafenin değişimine bağlı olarak tarama alanındaki mekanik kilitleme sağlayabilecek kanal sayısının da değiştirilerek yapışma performansına etkilerinin incelenmesine karar verilmiştir. Bu amaçla bu mesafenin 60, 90, 120 ve 150  $\mu\text{m}$  olacak

şekilde alüminyum alaşımı yüzeyinde lazer işlemleri yapıp CFRP ile yapacağı yapışma kayma dayanımı belirleme çalışması yapılmıştır.

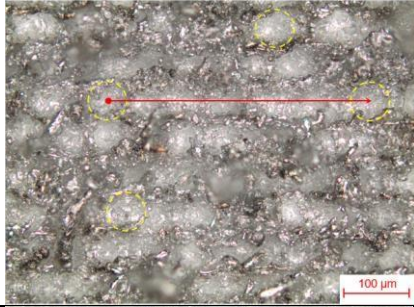
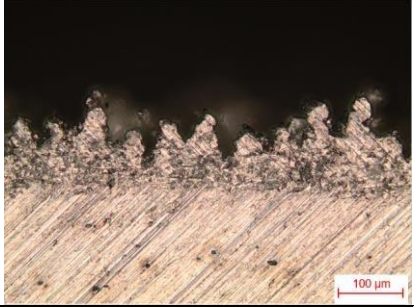
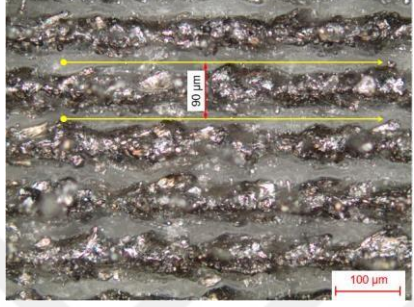
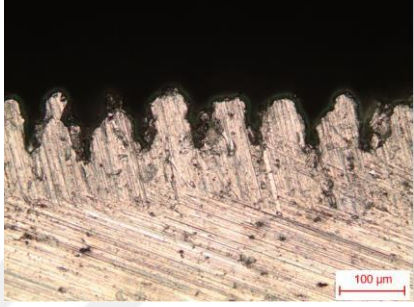
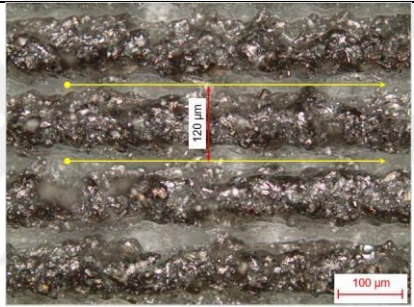
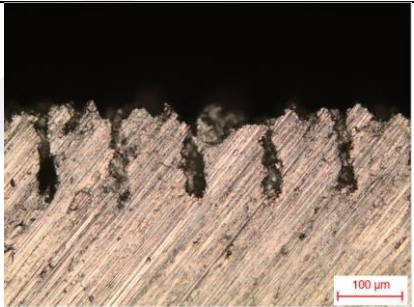
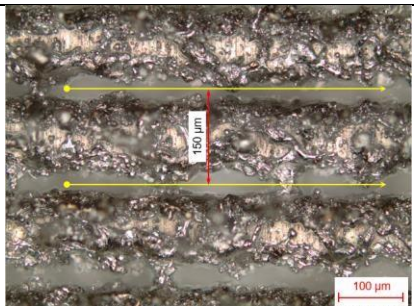
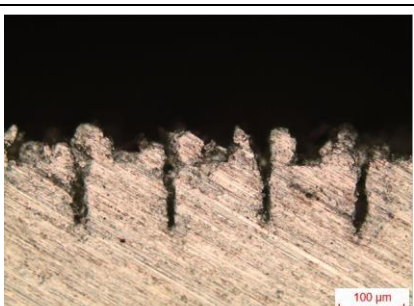
Açılan kanalların kesit ve üstten görünüşleri Şekil 4.33'da gösterilmiştir. 60 µm kanal aralığı için spotun izleri üstten görünümde sarı renkli daireler ile gösterilmiş olup net bir kanal oluşumdan bahsetmek mümkün olmamaktadır. Kesit görünümde de görüldüğü üzere düzenli bir kanal oluşumundan ziyade kaotik bir yapının oluştuğu dikkati çekmektedir. Spotun izleri yaklaşık 60 µm çapında olup düzenli bir kanal yapısı için aslında minimum 60 µm olmak üzere mesafe ne kadar fazla olursa o denli ayrık bir kanal oluşacağı açıktır.

Önceki geçiş çalışmasında bu nedenle kanal aralığı olarak 120 µm seçilmişti. 90 µm aralık ile birlikte kanalların daha belirgin bir şekilde ortaya çıktığı ve oluşan yapının düzenli olarak yapışma dayanımına ne gibi etkisi olduğu incelenebilecektir. Kanal aralığının 120 ve 150 µm olması ile birlikte artık çok daha net bir şekilde birbirlerinden ayrılmış ve lazer-malzeme etkileşim bölgelerinin ve buna bağlı olarak ortaya çıkan kanal genişlik ve derinliklerinin de bariz bir şekilde değiştiği dikkati çekmiştir (Şekil 4.33).

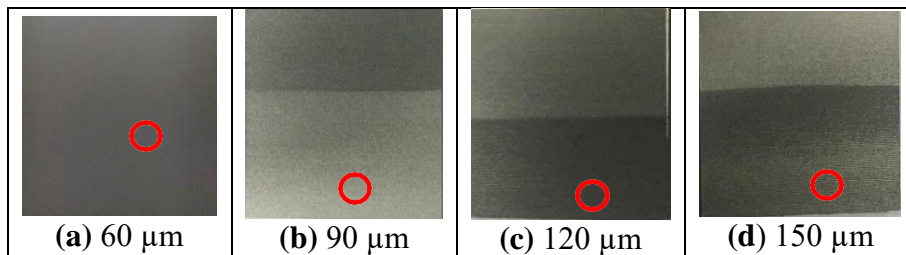
Kanallar arası mesafenin yüzey ıslanmasındaki etkisini belirlemek amacı ile 60, 90, 120 ve 150 µm aralıklar ile optimum lazer parametreleri ile işlenmiş numunelerin temas açıları incelenmiştir (Şekil 4.34).

Şekilde gösterildiği gibi saf suyun kırmızı dairelerin olduğu yere damlatılarak gerçekleştirildiği kontak açısı ölçümlerinde su damlası yüzeyde hızlı bir yayılım göstermiş ve tüm numunelerin yüzeyleri süper hidrofilik bir davranış göstermiştir.

Özellikle 60 µm aralıklı yapıda kanalların düzensiz kaotik bir yapıda olması nedeniyle suyun kendisine her yönde ilerleme imkânı bularak tüm yüzeyi ıslatabildiği görülmektedir. Kanallar arası mesafenin artırılması ile suyun sadece kanallar doğrultusunda ilerleyebilmesine olanak sağlanmış olduğu tespit edilmiştir. Daha geniş aralık ile işlenen numunelerde ilginç bir şekilde aynı miktarda su damlasının daha geniş bir alana yayıldığı görülmektedir. Bu durum oluşturulan kanalların sayısı azaldıkça aynı miktardaki suyun daha fazla kanalda yayılması ile ilişkilendirilmiştir.

	Üstten görünüm	Kesit görünümü
Kanallar arası mesafe 60 $\mu\text{m}$		
Kanallar arası mesafe 90 $\mu\text{m}$		
Kanallar arası mesafe 120 $\mu\text{m}$		
Kanallar arası mesafe 150 $\mu\text{m}$		

Şekil 4.33. Kanallar arası mesafenin değişimine bağlı olarak yapılarının üstten ve kesitten görüntüleri



Şekil 4.34. Kanallar arası mesafeye bağlı olarak kontak açısı için yüzeye su damlatılan noktaların fotoğrafları

Kanalların arası mesafenin yapışma performansına etkilerini araştırmak üzere yapılan yapışma kayma dayanımı testi sonuçları Şekil 4.35’de verilmiştir.

D9 optimum lazer işleme prosesinin optimum 5 geçişli işleminde kanallar arası mesafenin de yapışma performansına önemli ölçüde etkisi olduğu açıkça görülmektedir. Bir önceki çalışmada geçiş sayısı optimize edilirken kullanılan 120 µm aralıklı kanal yapısında 26,48 MPa olarak bulunan yapışma dayanımı en yüksek seviyesini korumuştur.

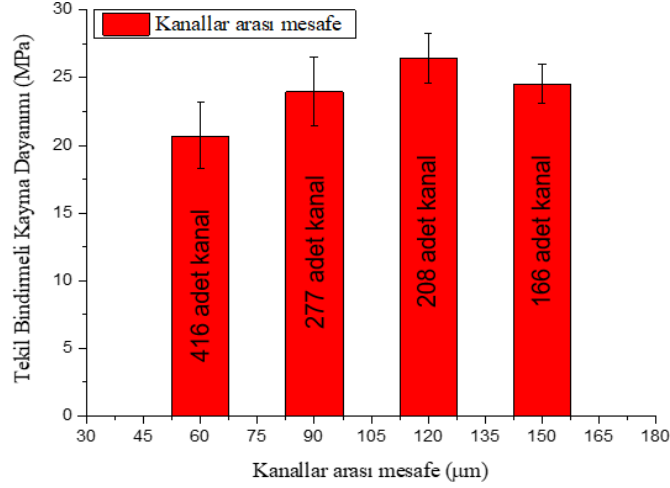
Kanallar arası mesafe azalırken kanal sayısının artmasına bağlı olarak mekanik kilitleme mekanizmasının daha etkin çalışacağı beklentisi ile daha yüksek yapışma performansı elde edileceği düşüncesinin pek de doğru orantılı olmadığı tespit edilmiştir. Kanallar arası mesafe azalırken kanal sayısının artmasına bağlı olarak kanalların yapısı etkili mekanik kilitleme sağlayamayacak hale gelmektedir.

5 geçişli kanallarda yeniden katılma gösteren kanal ağzı kenarındaki yapılar aralığın azalmasına bağlı olarak üst üste çakışmaya başladığında mekanik kilitleme sağlayamayacak geometrik yapıya dönüşmüş olmaktadır.

Diğer taraftan özellikle kanallar arası mesafenin 120 µm’ye kadar artmasına bağlı olarak hem kanal sayısının 416’dan 208’e kadar düşmesine hem de oluşan kanalların genişliğinin daralmasına rağmen kanalların derinliğinin artmasına bağlı olarak yapışma kayma dayanımında artış tespit edilmiştir. Bu durum kanallar arası mesafenin daha artmasına bağlı olarak kanal sayısının azalmasının devam etmesi sonucunda hem kanal sayısının 208’den 166’ya düşmesi hem de kanalların daha derin olmasına nazaran çok daha dar olması nedeniyle yapışma kayma dayanımında düşüş gözlenmiştir. Kanal ağzı genişliği kanal ne kadar derin olursa olsun belirli bir darlığa ulaştığında test yönüne bağlı olarak kayma kesit alanının da o derece daralmasından dolayı taşıyıcı kuvvet düşüş göstermektedir.

Benzer durum 6. Geçişte de karşımıza çıkmıştır. Eğer kanal ağzı belirli bir seviyenin altına inmeden kanal derinliği artırılabilirse ya da hem kanal derinliği hem de genişliği artırılabilirse bu durumda yapışma dayanımında mekanik kilitleme mekanizmasının etkin bir şekilde çalışabileceğini söyleyebiliriz.





Şekil 4.35. Kanallar arası mesafeye bağlı olarak yapışma kayma dayanımı

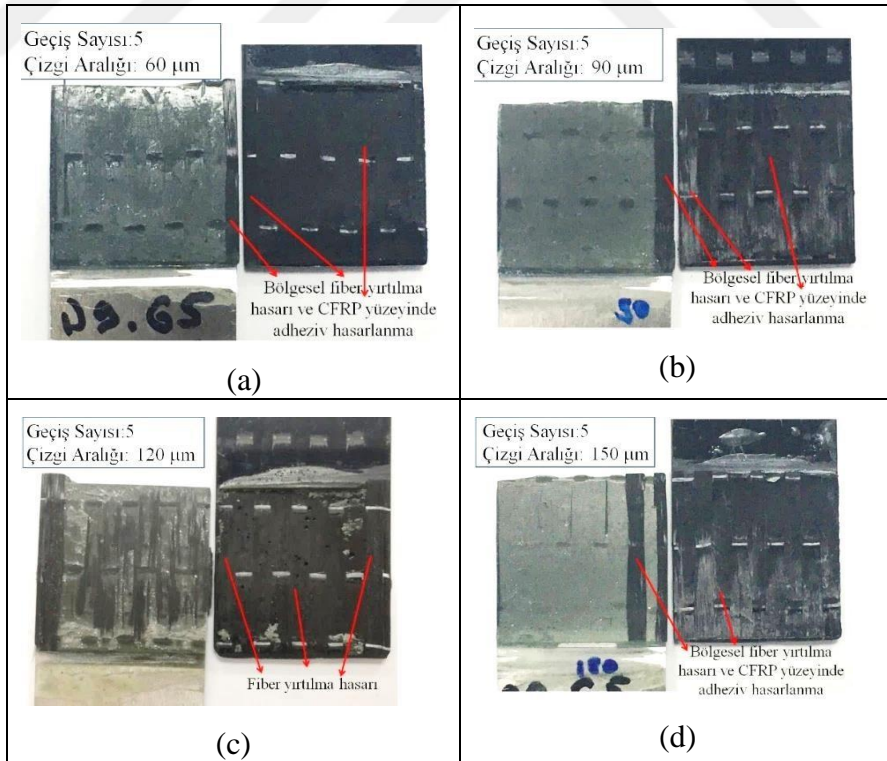
Şekil 4.36’da geçiş sayısı 5 olan farklı lazer kanal aralıkları ile alüminyum yüzeyleri işlenmiş AA2024-T3/CFRP yapıştırma bağlantılarının yapışma kayma dayanımı testleri sonrası elde edilen yüzey görüntüleri verilmiştir. Şekil 4.36’den genel olarak ana hasar mekanizmasının fiber yırtılma hasarı ve CFRP yüzeyinden adheziv olarak hasarlanma şeklinde olduğu tespit edilmiştir. Özellikle 60 µm (Şekil 4.36-a), 90 µm (Şekil 4.36-b) ve 150 µm (Şekil 4.36-d) kanal aralığı ile işlenmiş bağlantılarında bölgesel fiber yırtılma hasarı oluşurken, 120 µm (Şekil 4.36-c) kanal aralığına sahip bağlantılarda fiber yırtılma hasarı tüm yapıştırma yüzeyinde olduğu gözlenmiştir.

Kanal aralığının 120 µm’den daha dar ya da geniş olması durumunda ise bölgesel fiber yırtılma hasarından ziyade ana hasar mekanizmasının CFRP yüzeyinde adheziv hasarlanma şeklinde olduğu görülmüştür. Yapışma kayma dayanımı değerleri incelendiğinde maksimum kayma dayanımı değerinin 120 µm kanal aralığında elde edildiği belirtilmiştir. Yüzeyde bölgesel fiber yırtılma hasarından ziyade 120 µm çizgi aralığında tüm yüzeyde fiber yırtılma hasarının oluşumu alüminyum/yapıştırıcı ara yüzeyinin kayda değer bir şekilde iyileştirildiğini göstermektedir.

Vidal ve diğ. (2016) [91] çalışmalarında T bağlantısı şeklinde cam fiber takviyeli poliamid ile düşük alaşımlı çelik malzemeleri lazer tekniği ile birleştirmişlerdir. Birleştirme öncesi metal malzeme yüzeyine 200 µm ve 600 µm aralıklarda kesit genişliği boyunca kanallar oluşturmuşlar ve kanal aralıklarının kayma dayanımı değerlerine etkisini araştırmışlardır. Bağlantının kayma dayanımı değerleri incelendiğinde malzeme yüzeyinde oluşturulan kesit genişliğince oluşturulan

kanalların aralığı 200  $\mu\text{m}$  olduğunda 600  $\mu\text{m}$  aralığına göre yaklaşık 3,4 kat dayanım artışına ulaşıldığı saptanmıştır.

Gerçekleştirilen çalışmada kırılma yüzeylerinin taramalı elektron mikroskobu tekniği ile görüntülenmesi ile elde edilen sonuçlardan, 200  $\mu\text{m}$ 'lik kanal aralıklarında kanallara dolan polimer malzeme miktarı ile metal/polimer ara yüzeyinde tutunma miktarının arttığı belirtilmiştir. Roesner ve dig. [92] çalışmalarında 200  $\mu\text{m}$ -800  $\mu\text{m}$  kanal aralıklarında paslanmaz çelik malzeme yüzeylerinde 40  $\mu\text{m}$  genişliğinde 50  $\mu\text{m}$  derinliğinde kanallar oluşturup polikarbonat, poliamid 6,6 ve cam fiber takviyeli poliamid 6,6 malzemeleri ile lazer tekniği ile birleştirilmiş. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde kanal aralıklarının 200  $\mu\text{m}$ 'ye yaklaştığı durumlarda kayma dayanımı değerlerinin arttığı ve aynı kanal aralıklarında polimer malzemelerin metal malzeme yüzeyindeki kanalları tamamen doldurduğu gösterilmiştir. Literatüre paralel görünen sonuçlar ışığında kanallar arası mesafenin 120  $\mu\text{m}$  olarak en iyi yapışma performansını sağladığı tespit edilmiş olup optimize edilmesinin ciddi derece önemli olduğu da belirlenmiştir.

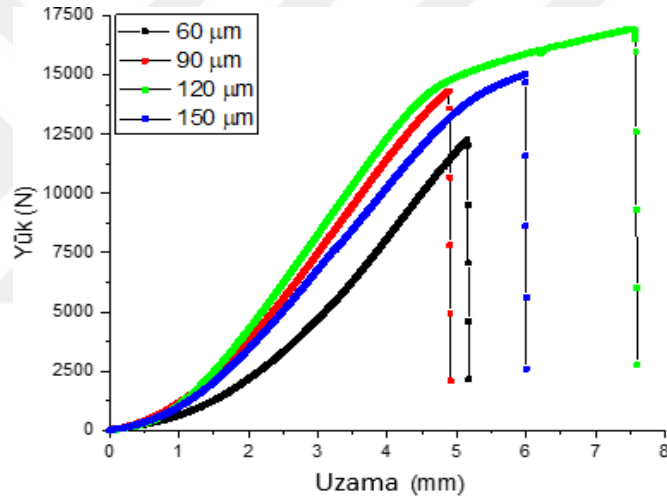


Şekil 4.36. 5 geçiş sayısında farklı lazer kanal aralığı ile alüminyum yüzeyleri işlenmiş AA2024-T3/CFRP yapıştırma bağlantılarının hasar türlerine ait fotoğraflar

Hasar türleri incelendiğinde tutunmanın daha iyi olmasına bağlı olarak daha yüksek dayanım değerlerinin elde edilmesini desteklemek amacıyla yapışma kayma dayanımı testi sonuçları kuvvet-uzama eğrileri şeklinde karşılaştırmalı olarak çizdirilmiş ve Şekil 4.37’te gösterilmiştir.

Grafikler incelendiğinde kuvvetin yüksek çıkmasının yanında uzamanın da yüksek çıkması daha iyi tutunmanın ve dolayısıyla fiber yırtılma hasarının oluştuğunu desteklemektedir.

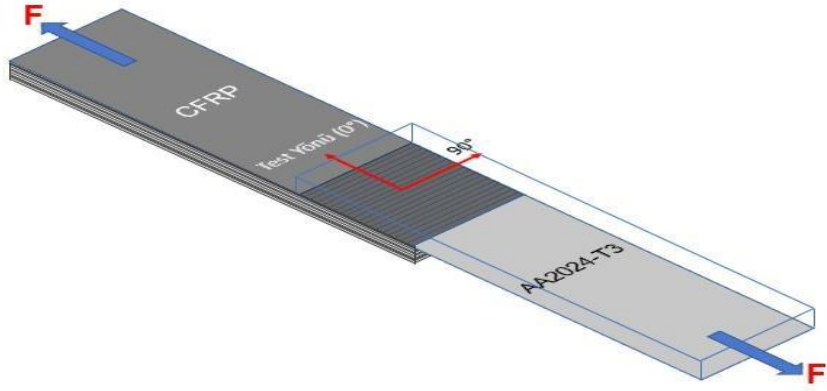
Bölgesel fiber yırtılma hasarı ya da CFRP tarafında adeziv hasarı neticesinde daha düşük tutunmanın bir diğer göstergesi olarak uzama değerlerinin de düşük çıkması sonuçları pekiştirmiştir.



Şekil 4.37. Kanallar arası mesafeye bağlı olarak elde edilen yapışma kayma dayanım testi grafikleri

#### 4.4.3. Kanal açısının değişimine bağlı olarak yapışma özelliklerinin incelenmesi

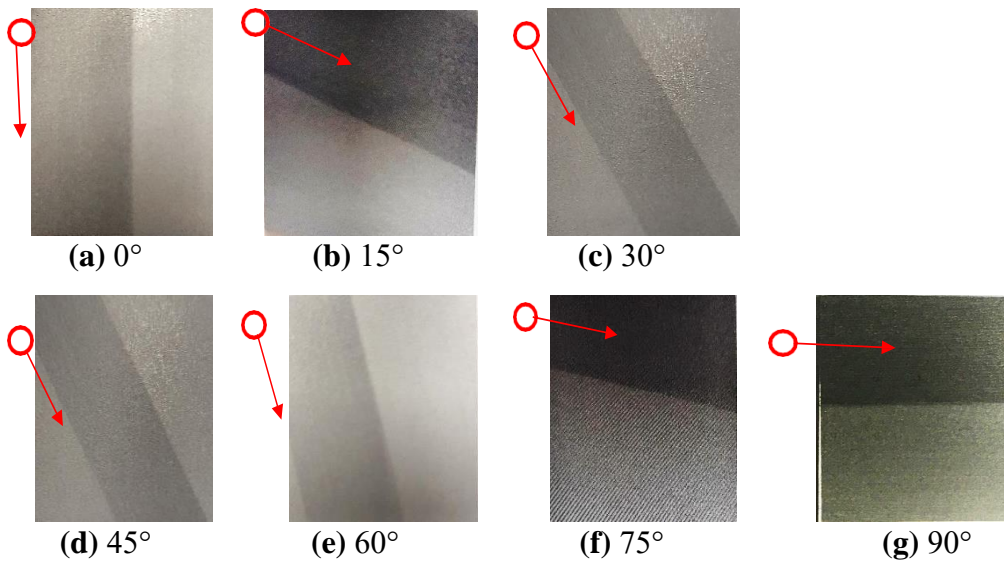
Kanallar arası mesafenin de optimize edilmesinden sonra literatürden edinilen bilgiler ışığında araştırılması düşünülen bir diğer konu da kanalların yapışma bağlantısının test yönüne göre açısının yapışma performansına etkisinin incelenmesidir. Bu amaçla AA2024-T3 alaşımı yüzeyleri şimdiye kadar optimize edilerek belirlenen lazer prosesi ile Şekil 4.38’te gösterilen yapışma kayma dayanım test yönü 0° kabul edilerek sırasıyla 90°, 75°, 60°, 45°, 30°, 15° ve 0° kanal açılarında işlenmiştir.



Şekil 4.38. Kanal açılarının test yönüne göre konumlandırılması

Kanal açısı şimdiye kadar yapılan çalışmalarda  $90^\circ$  olarak yani test yönüne dik olacak şekilde kabul edilmiştir. Mantık olarak en iyi mekanik kilitlemeyi ve dolayısıyla yapışma özelliklerini bu açıda elde edeceğimizi düşünürken bu açının da yapışma kayma dayanımı üzerine olan etkilerinin incelenmesi gerekliliği fikri doğmuştur.

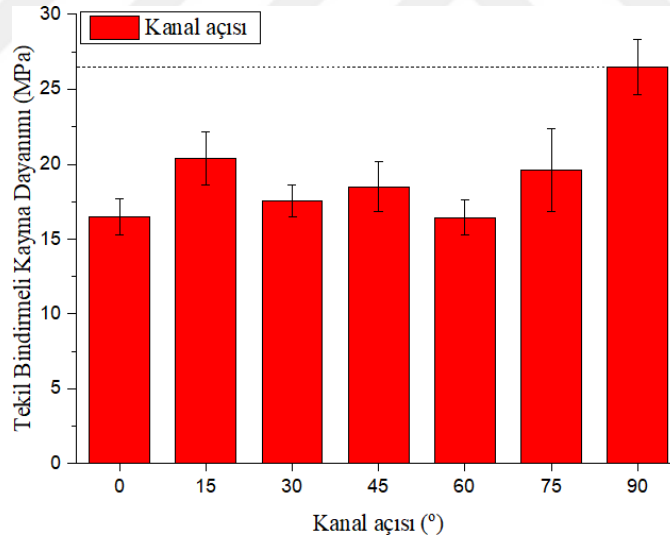
Literatür incelemeleri kısmında belirtildiği üzere benzer yaklaşımı sadece zımparalama yönü olarak deneyen ve neticede belirli bir pürüzlülüğe ulaşarak yapışma dayanımı üzerindeki etkilerini inceleyen Ghumatkar ve diğ. (2016) [67] incelenmesine karar verilen fikre ışık tutmuşlardır. Farklı açılarda işlenen alüminyum numune yüzeylerine yapılan kontak açısı ölçümü için yüzeye su damlatma açılarına ait fotoğraflar Şekil 4.39’te verilmiştir.



Şekil 4.39. Farklı kanal açılarında işlenen AA2024-T3 numunelerinin kontak açısı ölçümüne ait su damlatma noktalarının fotoğrafları

Tüm açılar için yüzeyler süper hidrofilik özellik göstermektedir. Su damlacığı tüm numune yüzeylerinde tarama açısı yönünde yayılmıştır. Bu sonuç yapıştırıcının da özellikle kanal yönünde daha rahat yayılacağını ve yapışma kayma dayanımı sonuçlarını etkileyeceğini göstermektedir

Farklı açılarda işlenen kanallar neticesinde elde edilen bağlantıların yapışma kayma dayanımı testleri yapılarak elde edilen sonuçlar Şekil 4.40'da verilmiştir. Tahmin edildiği üzere en yüksek yapışma dayanımı 90° kanal açısında elde edilirken, sonuçların kanal açısına da önemli ölçüde bağlı olduğu tespit edilmiştir. En düşük yapışma kayma dayanımını 0° yönünde açılan kanallı yüzeyle elde edilen bağlantı sağlarken sonuçların herhangi bir düzenli eğilim göstermediği dikkati çekmiştir. Özellikle hacimsel (bulk) yapılarda kayma gerilmelerinin en yüksek olduğu 45° yönünde açılan kanalların yapışma dayanımını artırabileceği düşünülürken yapışma bağlantılarında durumun çok daha farklı olarak özellikle mekanik kilitleme mekanizmasına bağlı olduğu sonucu desteklenmiştir.

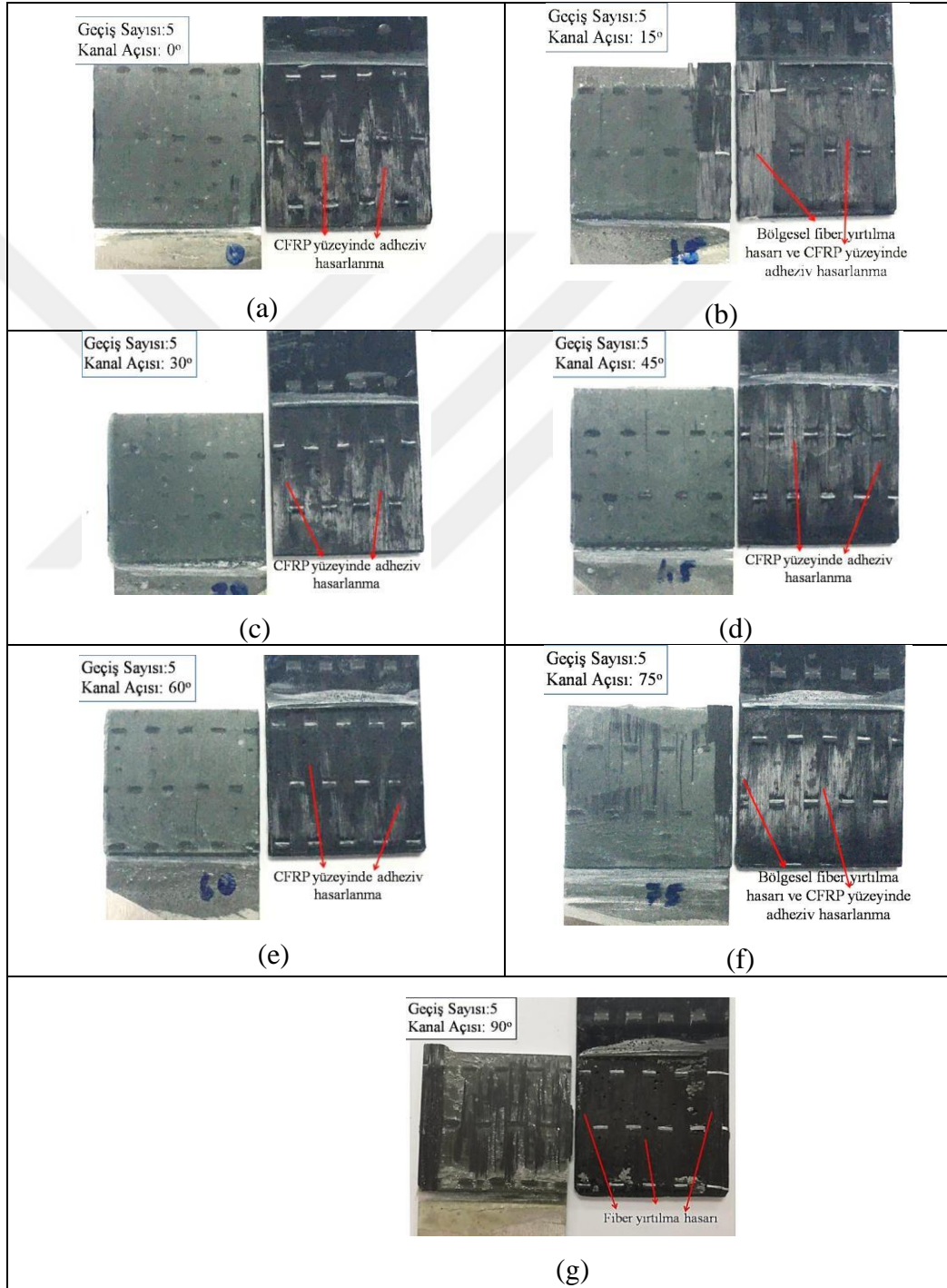


Şekil 4.40. Kanal açısına bağlı olarak yapışma kayma dayanımı özellikleri

Farklı kanal açılarında alüminyum yüzeyleri işlenmiş AA2024-T3/CFRP yapıştırma bağlantılarının hasar türlerinin karşılaştırılması Şekil 4.41'de verilmiştir. Görüldüğü üzere iki hasar türü ön plana çıkmaktadır; bunlardan biri CFRP yüzeyinde oluşan adheziv hasarlanma diğeri ise fiber yırtılma hasarıdır.

Fiber yırtılma hasarının oluşumu AA2024-T3/CFRP yapıştırma bağlantılarının kayma

dayanımı değerlerini kayda değer bir şekilde arttırdığı Şekil 4.31 ve 4.36’da belirtilen değerlendirmelerde vurgulanmıştır. Yapışma kayma dayanımı testlerinde yük uygulama doğrultusuna göre Şekil 4.41-b-f ve g’de sırasıyla belirtilen 15°, 75° ve 90° lazer kanal açılarında alüminyum yüzeyleri işlenmiş AA2024-T3/CFRP yapıştırma bağlantılarında fiber yırtılma hasarı ana hasar türü olarak ortaya çıkmıştır.



Şekil 4.41. Farklı kanal açılarındaki alüminyum yüzeyleri işlenmiş AA2024-T3/CFRP yapıştırma bağlantılarının hasar türlerine ait fotoğraflar

Yapışma kayma dayanımı değerleri incelendiğinde bu üç kanal açısıyla yüzeyleri işlenmiş alüminyum içeren AA2024-T3/CFRP bağlantılarının kayma dayanımı değerlerinin diğer kanal açılarıyla yüzeyleri işlenmiş numunelere göre daha yüksek değerlere ulaştığı ve fiber yırtılma hasarının yüzeylerde oluşmasının da bunu desteklediği sonucuna varılmıştır.

Kayma dayanımı değerleri incelendiğinde 90° kanal açısında alüminyum yüzeyleri işlenmiş AA2024-T3/CFRP yapıştırma bağlantılarının en yüksek dayanım değerlerine ulaştığı görülmektedir. Bunun sonucu olarak da fiber yırtılma hasarının tüm yapıştırma yüzeyine yayıldığı belirlenmiştir.

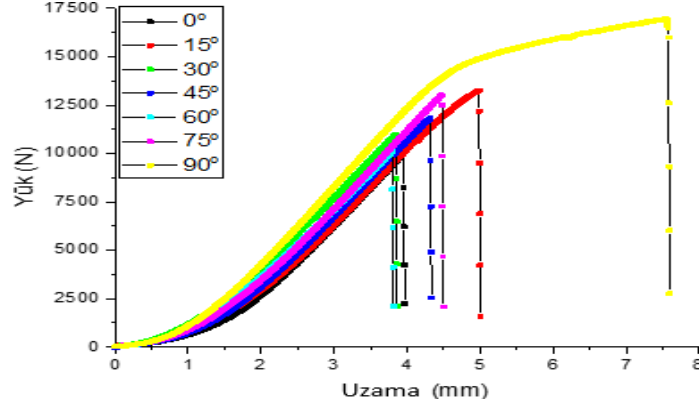
15° ve 75° kanal açılarında alüminyum yüzeyleri işlenmiş AA2024-T3/CFRP yapıştırma bağlantılarında ise bölgesel fiber yırtılma hasarının olduğu, bunun da kayma dayanımı değerlerini diğer kanal açılara sahip numunelere göre daha yüksek çıkmasına sebep olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Diğer lazer kanal açılarında ise (0°, 30°, 45° ve 60°) CFRP yüzeyinden adheziv olarak hasarlanma şeklinde AA2024- T3/CFRP bağlantılarının hasarlandığı gözlenmiştir (Şekil 4.41-a-c-d ve e).

Tüm yapıştırma yüzeyinde adheziv hasarlanmanın oluşmasının ise dayanım değerlerini düşürdüğü tespit edilmiştir.

Kanal açısının değişimine bağlı olarak yapışma kayma dayanımında önemli derecede farklılık olmakla birlikte daha yüksek kuvvetlere ulaşıldığında hasar türünün de fiber yırtılma olarak baskın hale geldiği belirtilmiştir.

Bu durumu desteklemek amacıyla yapışma kayma dayanımı testlerinin kuvvet-uzama eğrileri karşılaştırmalı olarak çizdirilmiş ve Şekil 4.42’de gösterilmiştir.

90° kanal açısı için daha yüksek tutunma kuvvetinin yanında daha büyük uzama miktarı da yapışma performansının yüksek olmasını kanıtlamaktadır. Diğer taraftan en düşük yapışma performansının gözlemlendiği 0°, 30° ve 60° açılarında ise daha düşük kuvvetlerin yanında daha düşük uzama miktarı ve de yapışma performansının düşük olduğu desteklenmektedir.

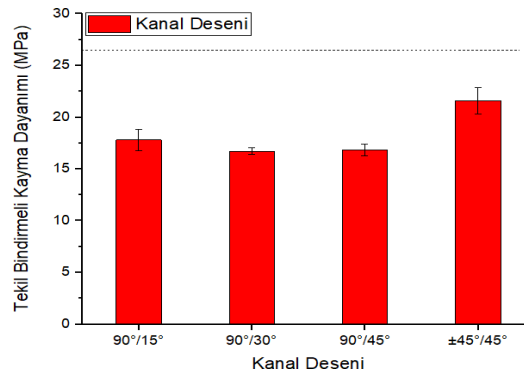


Şekil 4.42. Kanal açısına bağlı olarak elde edilen yapışma kayma dayanım testi grafikleri

#### 4.4.4. Malzeme yüzeyinde oluşturulan açısall desenlerin yapışma özelliklerine etkisi

AA2024-T3 malzeme yüzeyine D9G5 işleme parametresi ile fiber lazer tekniği kullanılarak açılan açısall kanalların Al/CFRP adheziv yapıştırma bağlantılarının kayma dayanıma etkileri belirlendikten sonra özellikle 90° ve 45° açılarda kayma dayanımı değerlerinin yüksek çıkabileceği düşünülerek AA2024-T3 malzeme yüzeylerine yapıştırma öncesi farklı açılı doğrultularında kanallar açılmıştır.

AA2024-T3 malzeme yüzeylerinde oluşturulan kanal desenleri 90°/15°, 90°/30°, 90°/45° ve ±45°/45°'dir. Belirtilen kanal desenleri D9G5 işleme parametreleri ile işlenmiş olup kanallar arası mesafe 120 µm olarak seçilmiştir. AA2024-T3 malzeme yüzeylerine açılan kanallar için işlem önce bir açılı ile bir geçiş ile işleme daha sonra ise diğer açılı ile bir geçiş işleme şeklinde olup bu işlem beş kere tekrarlanmıştır. Şekil 4.43'de dört farklı kanal deseni ile yüzeyleri işlenmiş AA2024-T3 içeren Al/CFRP adheziv yapıştırma bağlantılarının yapışma kayma dayanımı değerleri gösterilmiştir.



Şekil 4.43. Kanal desenine bağlı olarak yapışma kayma dayanımı.



Şekil 4.43'den genel olarak AA2024-T3 malzeme yüzeyinin  $+45^{\circ}/-45^{\circ}$  kanal deseni ile işlenmesi ile Al/CFRP adheziv yapıştırma bağlantılarının kayma dayanımı değerlerinin arttığı,  $90^{\circ}/15^{\circ}$ ,  $90^{\circ}/30^{\circ}$ ,  $90^{\circ}/45^{\circ}$  gibi kanal desenleri ile malzeme yüzeyleri işlendiğinde ise bağlantıların kayma dayanımı değerlerinin düştüğü gözlemlenmiştir. Bölüm 4.4.3'te belirtilen kanal açısının  $90^{\circ}$  olduğu duruma göre tüm kanal desenlerinde kayma dayanımı değerlerinde düşüş tespit edilmiştir. Bunun nedeninin ise AA2024-T3 malzeme yüzeylerinin iki farklı açı ile işlenmesi esnasında malzeme yüzeylerinde yeniden oluşan katmanın varlığı olduğu düşünülmektedir.

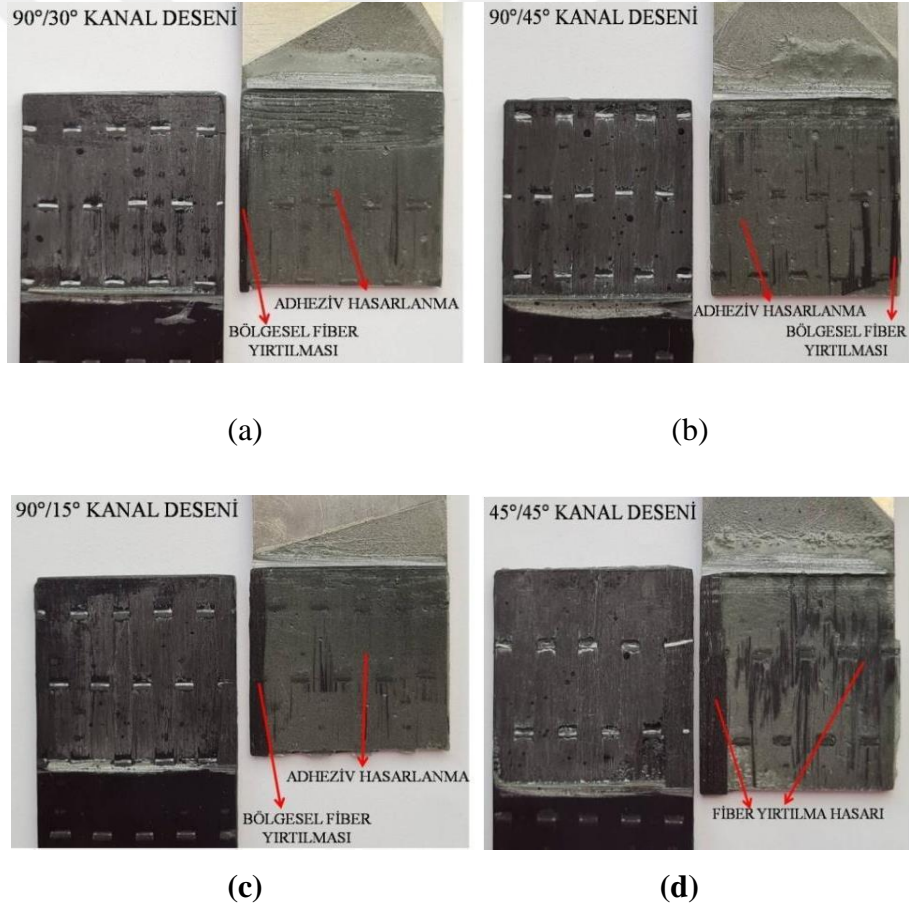
Fiber lazer tekniği ile yapılan işlemlerde bir açı ile malzeme yüzeyi işlenirken yeniden oluşan katmanların diğer yöndeki açı ile işlemede üst üste binmesine neden olduğu bunda kontrollü yüzey pürüzlülüğünün kaybına yol açtığı öngörülmektedir.

Kanal açısının  $90^{\circ}$  olduğu durumda Al/CFRP adheziv yapıştırma bağlantılarının kayma dayanımı değeri 26,48 MPa iken, AA2024-T3 malzeme yüzeylerinde oluşturulan kanal desenlerinin  $90^{\circ}/15^{\circ}$ ,  $90^{\circ}/30^{\circ}$ ,  $90^{\circ}/45^{\circ}$  ve  $+45^{\circ}/-45^{\circ}$  olması durumunda yapıştırma bağlantılarının kayma dayanımı değerleri sırasıyla 17,8 MPa, 16,72 MPa, 16,84 MPa ve 21,6 MPa olarak düşüş göstermiştir.  $+45^{\circ}/-45^{\circ}$  kanal desenli yapıştırma bağlantılarının kayma dayanımı değerlerinin diğer kanal desenleri ile işlenmiş numunelere göre yüksek çıkmasının sebebinin yapıştırma bölgesine gelen yükün oluşturduğu kayma gerilmeleridir. Bu doğrultuda malzeme yüzeyine açılan kanal desenleri ile belli bir miktar yük karşılanmakla birlikte kontrollü yüzey pürüzlülüğünün yüzeyde oluşan katmanlar nedeni ile kaybolması kayma dayanımı değerlerini 26,48 MPa' dan 21,6 MPa değerlerine düşürmüştür.

Şekil 4.44'da D9G5 prosesi ile fiber lazer tekniği kullanılarak işlenmiş AA2024-T3 malzeme yüzeyinde oluşturulan kanal desenlerin Al/CFRP yapıştırma bağlantılarında yapışma kayma dayanımı testleri sonrası oluşan hasar türlerinin değişimine etkisi gösterilmiştir. Malzeme yüzeyinde oluşan hasar türleri incelendiğinde iki önemli hasarın ortaya çıktığı tespit edilmiştir; CFRP yüzeyinden adheziv hasarlanma ve bölgesel fiber yırtılması (Şekil 4.44-a, b ve c). Her iki tür hasarlanmada yapıştırıcının AA2024-T3 malzeme yüzeyine tutunduğu bununla birlikte CFRP malzeme yüzeyinden bölgesel fiber yırtılması şeklinde malzeme kaldırdığını göstermektedir. Bölüm 4.4.3 Şekil 4.41-g'de belirtilen  $90^{\circ}$  kanal açısında alüminyum yüzeyleri

işlenmiş AA2024-T3/CFRP yapıştırma bağlantılarının hasar türünden görüleceği gibi, kanal desenlerine sahip yapıştırma bağlantılarında fiber yırtılması hasarından çok bölgesel fiber yırtılması ve CFRP bölgesinden adheziv hasarlanmanın ön plana çıktığıdır.

Adheziv hasarlanmanın ve bölgesel fiber yırtılmasının varlığı kayma dayanımı değerlerini belli oranda düşürmüştür. +45°/-45° kanal desenine sahip yapıştırma bağlantılarında ise fiber yırtılma hasarının oluşumu gözlenmiştir. Fiber yırtılma hasarının varlığı ile bağlantının kayma dayanımı değerlerinin 21,6 MPa'a yükselmesi sağlanmıştır. Fiber yırtılma hasarının tüm yapıştırma alanı boyunca olmaması kayma dayanımı değerlerini bu seviyelerde tutmaya sebep verdiği öngörülmektedir.



Şekil 4.44. Fiber lazer ile işlenmiş AA2024-T3 malzeme yüzeyinde oluşturulan desenlerin; (a) 90°/30° ; (b) 90°/45°; (c)90°/15°; (d) +45°/-45° Al/CFRP yapıştırma bağlantılarının hasar türleri

## 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

AA2024-T3/CFRP gibi hibrit malzemeli yapıştırma bağlantılarında özellikle homojen ve düzenli karakterdeki metal bileşen malzemenin yüzeyini lazer cihazı tipine bağlı olarak hangi parametrelerle işleyip optimum fiziksel ve kimyasal fonksiyona sahip olarak en yüksek yapışma dayanımının elde edilmesi üzerine yapılan çalışmada hedeflenenin üstünde başarılı sonuçlar alınmıştır.

Çalışmanın ana hedefi doğrultusunda özellikle düzenli ve homojen özelliklere sahip AA2024-T3 malzememizin lazer ile işlemeye iyi cevap vereceğini öngörmekteydik. Diğer taraftan metal bileşenimiz üzerinde elde edilecek kanal tipi girintiler sayesinde mekanik kilitleme sağlanarak CFRP ile yapacağı hibrit malzemeli yapıştırma bağlantısının dayanımında gelişmeler kaydedilmeye çalışılmıştır.

Bu kapsamda literatürde özellikle farklı tipte lazer cihazları kullanılarak farklı alüminyum alaşımları, çelik alaşımları ve titanyum alaşımları üzerinde çalışmalar yapıldığı tespit edilmiş olup, üzerinde çalışılması düşünülen mekanik kilitleme tasarım detaylarının hakkında emin olunmuştur.

Literatürden ayrıca elde etmeye çalışacağımız sonuçları kıyaslamak adına hali hazırda yıllardır uygulanmakta olan ancak kimyasal olmaları nedeniyle kullanımlarının kısıtlanması gerekliliği göz önünde bulundurulan “*silanlama*” ve “*FPL dağlama*” metotları uygulanarak referans değerler kaydedilmiştir.

Lazer işleme çalışmalarında elde edilen en önemli çıktılardan birisi de herhangi bir malzeme ve herhangi bir lazer türüne göre oluşan kombinasyona bağlı olarak birbirinden çok farklı lazer işleme prosesleri mevcuttur.

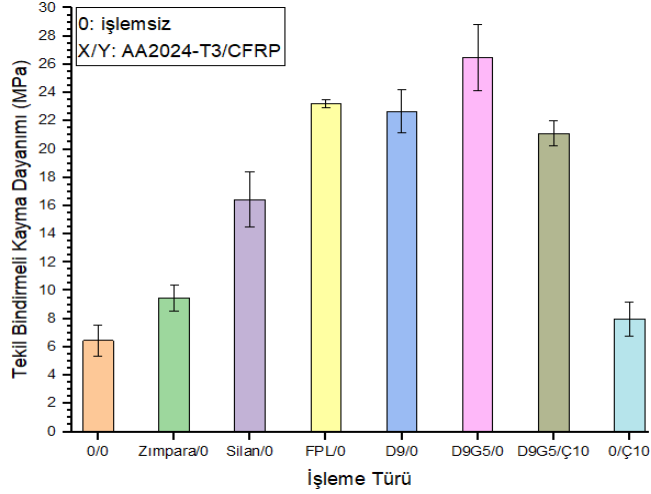
Mekanik kilitleme sağlanması düşünülen kanal tipi girintilerin hangi malzeme yüzeyinde hangi lazer türü ile açılacağı çok önemli farklılıklar yaratacaktır. Bu amaçla öncelikle AA2024-T3 alüminyum alaşımımız ve kullanılmasının uygun olduğuna karar verilen fiber lazer için kanal tipi girinti çıkıntı için cihaz parametre optimizasyonu yapılmıştır.

Lazerin işleme parametreleri alüminyumun işlenmesi açısından ele alındığında AA2024-T3/CFRP yapıştırma bağlantısı üzerinde en etkin parametrenin “tarama hızı” olduğu tespit edilmiştir. Bu amaç için sadece lazere bağlı olarak maksimum mekanik kilitleme sayesinde yapıştırma dayanımında en yüksek gelişmenin kaydedilmesine çalışılmıştır.

Ulaşılan kanal tipi geometrisine bağlı olarak çalışmanın devamı amacıyla “lazer geçiş sayısının artırılması”, “kanal aralığının değiştirilmesi”, “kanal açısının değiştirilmesi”, “farklı açılarda düzenlenmiş kanallardan oluşan desenlerin” kullanılması ile AA2024-T3/CFRP yapıştırma dayanımında daha da yüksek seviyelere ulaşılmıştır. Her bir parametre için kendi içinde sınırlar belirlenerek optimizasyon çalışmaları yapıp yapıştırma dayanımı üzerindeki etkileri değerlendirilerek optimum seviyeler tespit edilerek bir sonraki parametrenin optimizasyon denemelerine geçilmiştir.

Sırasıyla kat edilen tüm aşamalardaki optimum sonuçları içeren AA2024-T3/CFRP yapıştırma bağlantısı toplu sonuçları Şekil 5.1’de gösterilmiştir.

Toplu sonuçlar değerlendirildiğinde işlenmemiş AA2024-T3/CFRP yapıştırma bağlantısının yaklaşık 6,5 MPa olan dayanımı zımparalanmış alüminyum kullanıldığında yaklaşık 9,5 MPa’ya, silan kaplanmış alüminyum kullanıldığında yaklaşık 16 MPa’ya, FPL dağlanmış alüminyum kullanıldığında yaklaşık 22,5 MPa’ya çıkarıldığı görülmektedir. Nitekim literatürde uygulanan metotlardan FPL dağlama ile AA2024-T3/CFRP yapıştırma bağlantısı dayanımı en yüksek 23 MPa seviyesine ulaşmıştır. Bu değer lazer uygulamaları için referans kabul edilmiştir. Sadece lazer türü malzeme etkileşimine bağlı olarak işleme prosesi parametreleri en iyi mekanik kilitlemeyi sağlayarak yapıştırma dayanımını geliştirecek kanal tipi yüzey morfolojisi için optimize edilmiş ve yapıştırma bağlantısı dayanımı FPL dağlama metodu ile kıyaslanabilecek seviyeye yani yaklaşık 22,5 MPa’ya ulaştırılmıştır. Ardından AA2024-T3 yüzeyinde lazer işleme ile oluşturulan kanal tipi girintilerin boyutları mekanik kilitleme ve yapıştırma bağlantısını artırmak üzere modifiye edilerek yapıştırma bağlantısı dayanımı yaklaşık %17 oranında daha artış sağlanarak 26,48 MPa seviyesine çıkarılabilmektedir.



Şekil 5.1. Tüm sonuçların toplu grafiği.

Sadece AA2024-T3 alaşımı yüzeyinin lazer ile modifiye edilerek AA2024-T3/CFRP yapıştırma bağlantısında işlenmemiş bağlantıya göre hedefinin çok çok üzerinde bir başarı elde edildiği açıktır. Hibrit malzemeli yapıştırma bağlantılarına örnek olarak havacılıkta yaygın kullanımı olan AA2024-T3/CFRP yapıştırma bağlantılarında farklı kalınlık veya farklı elastisite modülleri nedeniyle bağlantının dayanımını olumsuz etkileyen tasarım kriterleri olduğu belirlenmiştir.

Hibrit olarak homojen ve düzenli olan AA2024-T3 gibi bir metal bileşenin lazer ile yüzey modifikasyonunun yapıştırma bağlantısı iyi bir optimizasyon çalışması ile hiç işlenmemiş bağlantıya göre en az dört (4) katına kadar artırılabilirdiği rapor edilmiştir. Bu sonuca dayanarak hibrit malzemeli yapıştırma bağlantılarında dayanımın artırılması için yapılacak yüzey modifikasyonunun heterojen yapıya bileşenden ziyade homojen ve düzenli olan bileşene yapılması önerilmektedir.

Metal/kompozit hibrit bağlantılar havacılık ve otomotiv endüstrisinde hafif ve dayanıklı yapısal tasarımlarda yaygınca kullanılmakta olup yüzeyi işlenmemiş malzemelere kıyasla optimize edilmiş lazer işleme tekniği ile elde edilen 4 kat yapışma performansı artışı sayesinde, gelişmekte olan havacılık endüstrimizde IHA-SIHA gibi araçların yapıştırma bağlantılarında güvenle kullanabilecek sağlığa ve çevreye duyarlı lazer yüzey işleme prosesi tasarım optimizasyonu bilgi birikimi *çalışmanın önemini* teşkil etmektedir.

Bu amaç doğrultusunda bilinmesi gereken en önemli husus olarak hangi malzeme ve hangi lazer türünün etkileşiminin uygun olacağına en baştan karar verilmesi

*önerilmektedir.* Bu husus derinlemesine ve uzun yıllarda elde edilmiş bilgi birikimi ve tecrübelerle dayanmaktadır. Sadece bu etkileşime dahil parametrelerin dahi optimize edilmesi ile yapıştırma dayanımında kimyasal metotlar ile rekabet edebilecek dayanım sonuçları elde edilebilmektedir.

Gerçekleştirilen çalışmalarda alüminyum yüzeyinin işlenmesinin yapışma kayma dayanımını artırıcı etkisi olduğu anlaşılmıştır ve bu nedenle kompozit malzeme yüzeyinde de başka bir çalışma daha yapılabilir.



## KAYNAKLAR

- [1] Zhan X., Yun L., Chuanyun G., Hongen W., Yang Y., Effect of Infrared Laser Surface Treatment on The Microstructure And Properties of Adhesively Cfrp Bonded Joints, *Optics And Laser Technology*, 2018, **106**(2018), 398-409.
- [2] Özes Ç., Neşer N., Experimental Study on Steel to FRP Bonded Lap Joints in Marine Applications, *Advances in Materials Science and Engineering*, 2015, **2015**.
- [3] Goushegir S. M., Dos Santos J. F., Amancio-Filho S. T., Friction Spot Joining Of Aluminum Aa2024/Carbon-Fiber Reinforced Poly (Phenylene Sulfide) Composite Single Lap Joints: Microstructure and Mechanical Performance, *Materials And Design*, 2014, **54**(2014), 196-206.
- [4] Özkara, İ. M., 2024 Alüminyum Alaşımının Mikro Ark Oksidasyon Yöntemiyle Kaplanması ve Yüzey Özelliklerinin Geliştirilmesi, Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2009.
- [5] Tao R., Alfano M., Lubineau G., In Situ Analysis of Interfacial Damage in Adhesively Bonded Composite Joints Subjected to Various Surface Pretreatments, *Composites Part A*, 2019, **116**, 216-223.
- [6] Krishnaraj V. Z., Zitoune R., Collombet F., Comprehensive review on drilling of multi material stacks, *J Mach Form Technol*, 2010, **2**(3-4), 1-32.
- [7] Löbel T., Holzhüter D., Sinapius M., Hühne C., A Hybrid Bondline Concept for Bonded Composite Joints, *International Journal of Adhesion&Adhesives*, 2016, **68**, 229-238.
- [8] Sinmazçelik T., Avcu E., Bora M. Ö., Çoban O., A Review: Fibre Metal Laminates, Background, Bonding Types and Applied Test Methods Volume, *Materials & Design*, 2011, **32**, 3671-3685.
- [9] Campbell F. C., Structural Assembly, Editor: Campbell F. C., *Manufacturing Technology For Aerospace Structural Materials*, Elsevier Science, Oxford, 495-537, 2006
- [10] Gkikas G., Sioulas D., Lekatou A. , Barkoula N. M., Paipetis A. S., Enhanced Bonded Aircraft Repair Using Nano-Modified Adhesives, *Materials & Design*, 2012, **41**, 394-402.
- [11] Melhem G. N., *Aerospace Fasteners: Use In Structural Applications*, Encyclopedia Of Aluminum And Its Alloys, 2018.

- [12] Özenç M., Yapıştırma Bağlantılarının Darbe Yükleri Altındaki Davranışlarının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli, 2007.
- [13] Higgins, A., Adhesive bonding of aircraft structures, *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 2000, **20**, 367-376.
- [14] Hart-Smith L. J., *Adhesively Bonded Joints in Aircraft Structures*, In: da Silva, 2011.
- [15] <https://www.ngaircraft.com> (Ziyaret tarihi:12 Eylül 2019 )
- [16] Megson T. H. G., *Aircraft Structures*, Chapter 1,2007, Page 1-21.
- [17] Ribeiro T. E. A., Campilho R. D. S. G., da Silva L. F. M., Goglio L., Damage Analysis of Composite-Aluminium Adhesively-Bonded Single-Lap Joints, *Composite Structures*, 2016, **136**, 25-33.
- [18] Budhe S., Banea M. D., De Barros S., Da Silva L. F. M., An Updated Review of Adhesively Bonded Joints in Composite Materials, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2017, **72**, 30-42.
- [19] Altan G., Değişik Sıcaklık ve Nem Etkisinde Çalışan Birleştirilmiş Kompozit Malzemelerin Yorulma Mukavemetlerinin İncelenmesi, Doktora Tezi, Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli, 2009.
- [20] Reitz V., Meinhard D., Ruck S., Riegel H., Knoblauch V., A Comparison of IR-And UV-Laser Pretreatment to Increase The Bonding Strength of Adhesively Joined Aluminum/CFRP Components. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2017, **96**, 18-27.
- [21] Assessment of bonding, **1**, **4**, [http://www.wellmid.com/down/down/UsersGuidetoAdhesives\(en\).pdf](http://www.wellmid.com/down/down/UsersGuidetoAdhesives(en).pdf) (Ziyaret tarihi: 27 Haziran 2019)
- [22] Kinloch A. J., Adhesives in Engineering, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, 1997, **211**, 307-335.
- [23] Rudawska, A., Adhesive Properties of Metals and Metal Alloys, *InTech: Rijeka, Croatia*, DOI: 10.5772/60599.
- [24] Pramanik A., Basak A. K., Dong Y., Sarker P. K., Uddin M. S., Littlefair G., Chattopadhyaya, S., Joining of Carbon Fibre Reinforced Polymer (CFRP) Composites and Aluminium Alloys–A Review, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2017, **101**, 1-29.
- [25] 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.



- [26] Chi-Vinh N., Chun D. M., Control of Laser-Ablated Aluminum Surface Wettability To Superhydrophobic or Superhydrophilic Through Simple Heat Treatment or Water Boiling Post-Processing, *Applied Surface Science*, 2018, 435, 974-982.
- [27] Prolongo, S. G., Ureña A., Effect of Surface Pre-treatment on the Adhesive Strength of Epoxy-aluminum Joints, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2015, **29**(2008), 23-31.
- [28] Monetta T., Acquesta A., Maresca V., Signore R., Bellucci F., Di Petta P., Lo Masti M., Characterization of Aluminum Alloys Environmentally Friendly Surface Treatments for Aircraft and Aerospace Industry, *Surface and interface analysis*, 2013, **45**(10), 1-8.
- [29] Wenzel, R. N., Resistance of Solid Surfaces to Wetting By Water, *Industrial and Engineering Chemistry*, 1936, **28**, 988-994.
- [30] Cassie, A. B. D., Baxter, S., Wettability of Porous Surfaces, *Transactions of the Faraday Society*, 1944, **40**, 546-551.
- [31] Singh H. K., Determining Interfacial Adhesion Performance and Reliability For Microelectronic Applications Using A Wedge Test Method, Master Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, 2004.
- [32] Packham D. E., The Mechanical Theory of Adhesion-Changing Perceptions, *Journal of Adhesion*, 1992, **39**, 137-144.
- [33] Mercier, S., Assessment of Residual Performances of Al-CFRP Cocured Hybrid Samples Subjected to Galvanic Corrosion, *Journal of Aerospace Engineering*, 2019, **32**(5), 1-9.
- [34] Domingues, L., Anodising of Al 2024-T3 in A Modified Sulphuric Acid / Boric Acid Bath for Aeronautical Applications, *Corrosion Science*, 2003, **45**, 149-160.
- [35] Wegman R., Twisk J., *Surface Preparation Techniques for Adhesive Bonding*, 2nd ed., Elsevier, United States, 2013.
- [36] Zhang J., The Bonding Strength and Corrosion Resistance of Aluminum Alloy By Anodizing Treatment in a Phosphoric Acid Modified Boric Acid / Sulfuric Acid Bath, *Surface & Coatings Technology*, 2008, **202**, 3149-3156.
- [37] Park S. Y., Choi W. J., Choi H. S., Kwon H., Kim S. W., Recent Trends in Surface Treatment Technologies for Airframe Adhesive Bonding Processing: A Review (1995- 2008), *The Journal of Adhesion*, 2010, **86**(2), 192-221.
- [38] Kwakernaak A., *Improvements in bonding metals for aerospace and other applications*, Woodhead Publishing Limited, 2012.
- [39] Driver D., Adhesive Bonding for Aerospace Applications, Editor: Flower H. M., *High Performance Materials in Aerospace*, Springer, Netherlands, 1995.

- [40] Rechner, R., Jansen, I., Beyer, E., Optimization of The Aluminum Oxide Properties For Adhesive Bonding By Laser Surface Pretreatment, *Journal of Laser Applications*, 2012, **24**(3), 1-10.
- [41] Withy, B., Hyland M., James B., Pretreatment Effects on the Surface Chemistry and Morphology of Aluminium, *International Journal of Modern Physics B*, 2006, **20**(25n27), 3611-3616.
- [42] Wegman R. F., Van Twisk, J., *Surface preparation techniques for adhesive bonding*, 2nd ed., 2013.
- [43] Mohseni M., Mirabedini, M., Hashemi, M., Thompson, G. E., Adhesion Performance of an Epoxy Clear Coat on Aluminum Alloy in The Presence of Vinyl and Amino-Silane Primers, *Progress in Organic Coatings*, 2006, **57**, 307-313
- [44] Zhu D., van Ooij W. J., Corrosion Protection of Metals by Water-based Silane Mixtures of Bis-[trimethoxysilylpropyl]amine and Vinyltriacetoxysilane, *Progress in Organic Coatings*, 2004, **49**(1), 42-53.
- [45] Metroke, T. L., van Ooij W. J., Senthilkumar C., Electrodeposition of Aromatic Bis-Silanes For Pretreatment of Aluminum Alloys, *Silanes and Other Coupling Agents*, 2007, **4**(4), 217-230.
- [46] Montemor, M. F., Trabelsi W., Zheludevich M., Ferreira M. G S., Modification of Bissilane Solutions with Rare-earth Cations for Improved Corrosion Protection of Galvanized Steel Substrates, *Progress in Organic Coatings*, 2006, **57**(1), 67-77.
- [47] Diaz-Benito B., Velasco F., Pantoja M., Mechanical properties of polyester films painted after silanization of 6063 aluminium alloy with different pretreatment conditions, *Progress in Organic Coatings*, 2011, **70**, 287-292.
- [48] Del Real J. C., Cano de Santayana M., Abenojar J., Martínez M. A., Adhesive Bonding of Aluminium With Structural Acrylic Adhesives: Durability in Wet Environment, *Journal of Adhesive Science Technol*, 2006, **20**(16), 1801-1818.
- [49] Cicek V., Characterization Studies of Aluminum Alloy Substrate Surfaces Treated By Oxyanion Esters of A-Hydroxy Acids and Their Salts, *Amer Chem Sci J.*, 2013, **3**(3), 264-286.
- [50] Spadaro C., Sunseri C., Dispenza C., Laser Surface Treatments For Adhesion Improvement of Aluminium Alloys Structural Joints, *Radiation Physics and Chemistry*, 2007, **76**(8-9), 1441-1446.
- [51] Akman E., Yapıştırma Bağlantılarında Dayanımı Arttırmak için Kompozit Yüzeylerinin Lazer ile İşlenmesi, 20.Ulusal Optik, Elektro-Optik ve Fotonik Çalıştayı, 2018.

- [52] Leitzka, K. H., Redlingshöfera, B., Regc, Y., Otto, A., Schmidt, M., Metal Ablation with Short and Ultrashort Laser Pulses, *Physics Procedia*, 2011, **12**, 230-238.
- [53] Dyer, P. E., Excimer Laser Polymer Ablation: Twenty Years On, *Applied Physics A: Materials Science And Processing*, 2003, **77**, 167-173.
- [54] 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.
- [55] Mandolino, C., Lertora, E., Genna, S., Leone, C., Gambaro, C., Effect of Laser and Plasma Surface Cleaning on Mechanical Properties of Adhesive Bonded Joints, *Procedia CIRP*, 2015, **33**, 458-463.
- [56] Gendler, Z., Rosen, A., Bamberger, M., Improvement of Adhesive Bonding Strength in Sealed Anodized Aluminium Through Excimer Laser Prebond Treatment, *Journal of Materials Science*, 1994, **29**, 1521-1526.
- [57] Spadaro, C., Sunseri, C., Dispenza, C., Laser Surface Treatments For Adhesion Improvement of Aluminium Alloys Structural Joints, *Radiation Physics and Chemistry*, 2007, **76**, 1441-1446.
- [58] Sabau A. S., Greer C. M., Chen J., Warren C. D., Daniel C., Surface Characterization of Carbon Fiber Polymer Composites and Aluminum Alloys After Laser Interference Structuring. *JOM*, 2016, **68**(7), 1882-1889.
- [59] Critchlow, G. W., Brewis, D. M., Emmony, D. C., Cottam, C. A., Initial investigation into the effectiveness of CO<sub>2</sub>-laser treatment of aluminium for adhesive bonding, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 1996, **15**(4), 233-236.
- [60] Xie, Y., Yang, B., Lu, L., Wan, Z., Liu, X., Shear Strength of Bonded Joints of Carbonfiber Reinforced Plastic (CFRP) Laminates Enhanced By a Two-step Laser Surface Treatment, *Composite Structures*, 2020, **232**, 111559.
- [61] Starikov D., Pillai R., Glenn T., Gandhi J., Price A., Delaney R., Bensaoula A., Improvements in Bonding of Silicon Carbide Ceramic to Metals, *International Journal of Materials Engineering*, 2014, **4**(6), 196-202.
- [62] Sugioka, K., Meunier M., Pique A., *Laser Precision Microfabrication*, Springer, New York, 2010.
- [63] Wu L. H., Xiao B. L., Nagatsuka K., Nakataa K., Ma Z. Y., Achieving Strong Friction Lap Joints of Carbon-Fiber Reinforced Plastic and Metals By Modifying Metal Surface Structure Via Laser-Processing Pretreatment, *Composite Structures*, 2020, **242**, 112167.

- [64] Rodríguez-Vidal E., Lambarri J., Soriano C., Sanz C., Verhaeghe G., A Combined Experimental And Numerical Approach To The Laser Joining of Hybrid Polymer - Metal Parts, *Physics Procedia*, 2014, **56**, 835-844.
- [65] Wunderling C., Mayr L., Meyer S. P., Zaeh M. F., Laser-Based Surface Pre-Treatment For Metal-Plastic Hybrids Using A New Process Strategy, *Journal of Materials Processing Technology*, 2020, **282**, 116675.
- [66] Huhtamäki T., Tian X., Korhonen J. T., Ras R. H., Surface-wetting Characterization Using Contact-Angle Measurements, *Nature Protocols*, 2018, **13**(7), 1521-1538.
- [67] Ghumatkar A., Budhe S., Sekhar R., Banea M. D., Barros S. D., Influence of Adherend Surface Roughness on the Adhesive Bond Strength, *Latin American Journal of Solids and Structures*, 2016, **13**, 2356-2370.
- [68] Borsellino C., Bella G. D., Ruisi V. F., Adhesive joining of aluminium AA6082: The Effects of Resin and Surface Treatment, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2008, **29**, 36-44.
- [69] Kim J. G., Park S. W., Yoon S. H., Lee D. G., Optimum Silane Treatment for the Adhesively Bonded Aluminum Adherends at the Cryogenic Temperature, *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2010, **24**(4), 775-787.
- [70] Guruscu, A., Joining and Interfacial Properties of Aluminum/Glass Fiber Reinforced Polypropylene Sandwich Composites, MSc Thesis, Graduate School of Engineering and Sciences of İzmir Institute of Technology, 2009.
- [71] Torun B., Giner I., Grundmeier G., Ozcan O., In Situ PM-IRRAS Studies of Organothiols and Organosilane Monolayers-Zno Interfaces at High Water Activities, *Surface and Interface Analysis*, 2017, **49**, 71-74.
- [72] Mrad M., Amor B., Dhouibi Y. L., Montemor M. F., Effect of AA2024-T3 Surface Pretreatment on The Physicochemical Properties and The Anticorrosion Performance of Poly( $\Gamma$ -Glycidoxypropyltrimethoxysilane) Sol-Gel Coating, *Surface Interface Analysis*, 2017, **50**(2), 1-11.
- [73] Palomino L., Pászti Z., Aoki I. V., Melo H. G., Comparative Investigation of the Adhesion of Ce Conversion Layers and Silane Layers to a AA2024-T3 Substrate Through Mechanical and Electrochemical Tests, *Materials Research*, 2007, **10**(4), 399-406.
- [74] Buckton G., Darcy P., Mccarth D., The Extent of Errors Associated With Contact Angles. 3. The Influence of Surface-Roughness Effects on Angles Measured Using A Wilhelmy Plate Technique For Powders, *Colloids Surf. A Physicochem. Eng. Asp.*, 1995, **95**, 27-35.
- [75] Dawood M., Rizkalla S., Environmental Durability Of A CFRP System for Strengthening Steel Structures, *Construction and Building Materials*, 2010, **24**(9), 1682-1689.

- [76] Latthe S. S., Sudhagar P., Devadoss A., Kumar A. M., Liu S., Terashima C., Nakata K., Fujishima A., Mechanically Bendable Superhydrophobic Steel Surface With its Self-Cleaning And Corrosion- Resistant Properties, *Journal Of Materials Chemistry A*, 2015, **3**, 14263-14271.
- [77] Venables J. D., McNamara D. K., Chen J. M., Sun T. S., Hopping J. L., Oxide morphologies on aluminum prepared for adhesive bonding, *Applied Surface Science*, 1979, **3**(1), 88-98.
- [78] Li V., Breedveld and Hess D. W., Creation of Superhydrophobic Stainless Steel Surfaces by Acid Treatments and Hydrophobic Film Deposition, *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2012, **4**, 4549-4556.
- [79] Yuan S., Pehkonen S. O., Liang B., Ting Y. P., Neoh K. G., Kang E. T., Superhydrophobic Fluoropolymer-Modified Copper Surface Via Surface Graft Polymerization for Corrosion Protection, *Corrosion Science*, 2011, **53**(9), 2738- 2747.
- [80] Yeganeh M., Mohammadi N., Superhydrophobic surface of Mg alloys: A review, *Journal of Magnesium and Alloys*, 2018, **6**(1), 59-70.
- [81] Qian B., Langmuir Z. S., Fabrication of Superhydrophobic Surfaces By Dislocation Selective Chemical Etching on Aluminum, Copper, And Zinc Substrates, *Langmuir*, 2005, **21**, 9007-9009.
- [82] Williams T. S., Yu H., Hicks R. F., Atmospheric Pressure Plasma Activation as a Surface Pre-Treatment for The Adhesive Bonding of Aluminum 2024, *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2014, **28**(7), 653-674.
- [83] Wit F. M., Mol J. M. C., Terryn H., The Influence of Chemical Pre-treatment and Magnesium Surface Enrichment on Bonding of Succinic Acid Molecules to Aluminium Alloy, *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2008, **22**, 1089-1104.
- [84] Gurevich E. L., Gurevich, S. V., Laser Induced Periodic Surface Structures Induced By Surface Plasmons Coupled Via Roughness, *Applied Surface Science*, 2014, **302**, 118-123.
- [85] Fasasi A. Y., Mwenifumbo S., Rahbar N., Chen J., Li M., Beye A. C., Soboyejo W. O., Nano-Second UV Laser Processed Micro-Grooves on Ti6Al4V for Biomedical Applications, *Materials Science and Engineering C*, 2009, **29**(1), 5-13.
- [86] Mroczkowska K. M., Antonczak A. J., Gasiorek J., The Corrosion Resistance of Aluminum Alloy Modified by Laser Radiation, *Coatings*, 2019, **9**, 672.
- [87] Samanta A., Wang Q., Shaw S. K., Ding H., Roles of Chemistry Modification for Laser Textured Metal Alloys to Achieve Extreme Surface Wetting Behaviors, *Materials and Design*, 2020, **192**, 108744.

- [88] Ebnesajjad S., *Surface Treatment of Materials for Adhesive Bonding*, 2nd ed., USA, 2014,
- [89] Amend P., Pfindel S., Schmidt M., Thermal Joining of Thermoplastic Metal Hybrids By Means of Mono-and Polychromatic Radiation, *Physics Procedia*, 2013, **41**, 98-105.
- [90] Rodríguez-Vidal E., Sanz C., Soriano C., Leunda J., Verhaeghe G., Effect of Metal Microstructuring on The Mechanical Behavior of Polymer- Metal Laser T-Joints, *Journal of Materials Processing Technology*, 2016, **229**, 668-677.
- [91] Roesner A., Scheik S., Olowinsky A., Gillner A., Uwe Reisinger Markus Schleser, Laser Assisted Joining of Plastic Metal Hybrids, *Physics Procedia*, 2011, **12**, 370-377.



## KİŞİSEL YAYINLAR VE ESERLER

- [1] **AYBALIK S., ÇOBAN O., BORA M.Ö., AKMAN E., GENÇ Ö.B.,** ‘Investigation Of The Effect Of Varying Laser Scribe Sizes On The Adhesion Performance Of The Aa2024-T3/Cfrp Joints Depending On The Number Of Laser Scan Repeats’, *International Conference on Technology, Engineering and Science (IConTES)*, October 29-November 1, 2020, **11**, Pages: 33 – 40.



## ÖZGEÇMİŞ

İlk, orta ve lise öğrenimini Malatya'da tamamladı. 2013 yılında girdiği Erciyes Üniversitesi Kayseri Uçak Elektrik ve Elektronik Bölümü'nden 2018 yılında mezun oldu. 2018-2021 yılları arasında, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Havacılık Bilimi ve Teknolojileri Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans öğrenimini tamamladı.

