

T.C.  
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

PLAZMA YÜZEY İŞLEMİNİN EPOKSİ FİLM  
YAPIŞTIRICILI CFRP KOMPOZİT BAĞLANTILARININ  
PERFORMANSINA ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Ahmetcan ALKOÇ

DOKTORA TEZİ

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Malzeme Programı

Danışman

Prof. Dr. Afife Binnaz HAZAR

Temmuz, 2024

T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**PLAZMA YÜZEY İŞLEMİNİN EPOKSİ FİLM YAPIŞTIRICILI  
CFRP KOMPOZİT BAĞLANTILARININ PERFORMANSINA  
ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

Ahmetcan ALKOÇ tarafından hazırlanan tez çalışması 10.07.2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, Malzeme Mühendisliği Programı **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Afife Binnaz HAZAR  
Yıldız Teknik Üniversitesi  
Danışman

**Jüri Üyeleri**

Prof. Dr. Afife Binnaz HAZAR, Danışman  
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Tarık EREN, Üye  
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Hale BERBER, Üye  
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Ergün KELEŞOĞLU, Üye  
Türk Alman Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Mete BAKIR, Üye  
Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi

Danışmanım Prof. Dr. Afife Binnaz HAZAR sorumluluğunda tarafımda hazırlanan “Plazma Yüzey İşleminin Epoksi Film Yapıştırıcılı CFRP Kompozit Bağlantılarının Performansına Etkisinin İncelenmesi” başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Ahmetcan ALKOÇ

İmza



Bu çalışma, Yıldız Teknik Üniversitesi ile Türk Havacılık ve Uzay Sanayii A.Ş. (TUSAŞ) işbirliğinde gerçekleştirilen TÜBİTAK 2244 Sanayi Doktora Programının 1189B441801030 proje numarasıyla desteklenmiştir.



*Anneme*

*ve*

*eşime*

## TEŞEKKÜR

---

Doktora eğitimim boyunca bilimsel rehberliği ile çalışmamın tüm aşamalarında yanımda olan ve akademik yolculuğumda bana ilham veren kıymetli hocam Prof. Dr. Afife Binnaz HAZAR'a, gösterdiği anlayış, sabır ve desteği için teşekkür ederim.

Tez izleme komitesinde yer alarak değerli görüşleriyle sürece katkı sağlayan Prof. Dr. Tarık EREN ve Doç. Dr. Ergün KELEŞOĞLU'na desteklerinden dolayı teşekkürlerimi sunarım. Lisans, yüksek lisans ve doktora eğitimlerimin her aşamasında bünyesinde bulunmaktan büyük mutluluk ve kıvanç duyduğum Yıldız Teknik Üniversitesi'ne ve tüm yıldızlı üyelerine teşekkür ederim.

Mensubu olmaktan gurur duyduğum Türk Havacılık ve Uzay Sanayii A.Ş. (TUSAŞ)'a, çalışmamı yürütmek için gerekli kaynakları ve profesyonel ortamı sağladığı için TUSAŞ Malzeme Mühendisliği Bölümü'ne ve ayrıca Dr. Öğr. Üyesi Mete BAKIR, Dr. Emre DORUK, Tolga İŞGİR, Alp Aykut KİBAR ve Adem Can UŞAK'a en derin şükranlarımı sunmak isterim.

Uygulama alanındaki katkıları için Müfit KACAR, Kadir KARAMAN, Halil İbrahim FİLİZ, Abdurrahman ADACI, Muharrem ERTÜRK, Münevver ERYILMAZ, Ege DEMİR, Seda TURAN, Merve ATLIOĞLU, Esra ÖZÇELİK, Mertcan KÖÇER, Ayşe Hande ÇALIŞ, Bahri SÖYLEYİCİ, Polatcan ÇAKIROĞLU, Seyit Ali ÖRSEL, Oğuzhan YAVUZ, Baran DOĞAN, Merve ESKİCİ, Uzm. Dr. Ayşegül ERDOĞAN, Araş. Gör. Dr. Çisem ALTUNAYAR ve Öğr. Gör. Murat DİNÇ'e teşekkürü bir borç bilirim.

Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu'na (TÜBİTAK-1189B441801030) ve projedeki değerli arkadaşlarım Dr. Murat Mert UZ, Ebru AYDIN ve Semih BİRİNCİ'ye sağladıkları katkı ve yardımlar için teşekkür ederim.

Her zaman kalbimde taşıdığım, özlemlerle ve sevgiyle andığım annem Ayla'ya, her daim yanımda olan babam Mustafa Kemal'e, canım eşim Hümeysra'ya, sevgili kızlarıma ve tüm aile üyelerime, hayatım boyunca bana gösterdikleri sevgi, anlayış ve fedakârlık için sonsuz minnettarlığımı sunarım.

Ahmetcan ALKOÇ

# İÇİNDEKİLER

<b>TEŞEKKÜR</b>	<b>v</b>
<b>SİMGE LİSTESİ</b>	<b>ix</b>
<b>KISALTMA LİSTESİ</b>	<b>x</b>
<b>ŞEKİL LİSTESİ</b>	<b>xi</b>
<b>TABLO LİSTESİ</b>	<b>xiv</b>
<b>ÖZET</b>	<b>xvi</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>xviii</b>
<b>1 GİRİŞ</b>	<b>1</b>
1.1 Literatür Özeti .....	1
1.2 Tezin Amacı .....	15
1.3 Tezin Hipotezi .....	16
<b>2 YÜZEY HAZIRLAMA STRATEJİLERİ</b>	<b>18</b>
2.1 Yapışma Teorisi .....	18
2.1.1 Islanma Teorisi .....	20
2.1.2 Kimyasal Bağlanma .....	21
2.1.3 Arayüzey, Yüzey Gerilimi ve Yüzey Enerjisi .....	21
2.1.4 Temas Açısı (Young Denklemi) .....	23
2.2 Yüzey Hazırlama Teknikleri .....	23
2.2.1 Peel-ply Yüzey İşlemi .....	25
2.2.2 Çözücü ile Temizleme Yüzey İşlemi .....	25
2.2.3 Aşındırma (Zımparalama) Yüzey İşlemi .....	26
2.2.4 Kumlama Yüzey İşlemi .....	27
2.2.5 Asit ve Baz ile Dağlama .....	27
2.2.6 Lazer Yüzey Hazırlama Tekniği .....	28
2.2.7 Plazma Yüzey Hazırlama Tekniği .....	28
2.2.8 Atmosferik Basıncılı Plazma Yüzey İşlemi .....	29
2.3 Yüzey Karakterizasyon Göstergeleri .....	30
2.3.1 Yüzey Bileşimi .....	31

2.3.2	Yüzey Morfolojisi.....	32
2.3.3	Yüzey Topografisi.....	33
2.4	Yapışma Testleri .....	36
2.5	Kırılma Türleri .....	40
<b>3</b>	<b>MALZEME ÜRETİMİ VE YÜZEY KARAKTERİZASYON YÖNTEMLERİ</b>	<b>42</b>
3.1	Malzemeler ve Üretim Yöntemi .....	42
3.2	Atmosferik Basınçlı Plazma Yüzey Hazırlama İşlemi .....	45
3.3	Yüzey Karakterizasyon Yöntemleri.....	48
3.3.1	Temas Açı Ölçümleri .....	48
3.3.2	Yüzey Serbest Enerjisi.....	49
3.3.3	Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM).....	49
3.3.4	Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi- Zayıflatılmış Toplam Yansıma (FTIR-ATR) .....	50
3.3.5	Profilometre .....	50
3.3.6	Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM).....	50
3.3.7	X-ray Fotoelektron Spektroskopisi (XPS).....	50
3.4	Mekanik Test Yöntemleri .....	51
3.4.1	Tek Bindirmeli Kesme Testi Uygulaması .....	51
3.4.2	Kama Testi Uygulaması .....	52
3.4.3	Fiber Takviyeli Polimerlerin Bağlantı Hata Modlarının Sınıflandırılması.....	56
<b>4</b>	<b>ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRİLMESİ</b>	<b>57</b>
4.1	Temas Açı Ölçüm Sonuçları .....	57
4.2	Yüzey Serbest Enerjisi Sonuçları.....	59
4.3	Profilometre Yüzey Pürüzlülük Ölçüm Sonuçları .....	63
4.4	SEM Sonuçları .....	64
4.5	FTIR-ATR Sonuçları .....	65
4.6	Tek Bindirmeli Kesme Testi Sonuçları.....	67
4.7	Tek Bindirmeli Bağlantıların Kırık Yüzey İncelemesi .....	70
4.8	AFM Sonuçları.....	72

4.9 XPS Sonuçları.....	74
4.9.1 Kalıp Taraf Yüzeyler.....	74
4.9.2 Vakum Torba Taraf Yüzeyler .....	81
4.10 Kama (Wedge) Test Sonuçları.....	86
4.11 Uzun Süreli Dayanım Sonuçlarının Değerlendirmesi.....	94
<b>5 SONUÇ</b>	<b>98</b>
<b>KAYNAKÇA</b>	<b>106</b>
<b>TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR</b>	<b>123</b>



## SİMGE LİSTESİ

---

$\alpha$	Aktif Çatlak Uzunluğu
$R_a$	Aritmetik Pürüzlülük Değeri
$\alpha_0$	Başlangıç Çatlak Uzunluğu
$\gamma^d$	Dispersif Bileşen
$\sigma$	Gerilim
g	Gram
J	Joule
$G_{IC}$	Kırılma Tokluk Enerjisi
MPa	Megapaskal
$\mu m$	Mikrometre
mm	Milimetre
$R_{maks.}$	Maksimum Pürüzlülük Değeri
t	Numune Kalınlığı
p	Plazma Nozul Geçiş Sayısı
v	Plazma Nozul Hızı
h	Plazma Nozul-Yüzey Uzunluğu
$\gamma^p$	Polar Bileşen
$^{\circ}C$	Santigrat Derece
s	Saniye
T	Sıcaklık
$\theta$	Temas Açısı
w	Yapışma Mesafesi Genişliği
l	Yapışma Mesafesi Uzunluğu
E	Young modülü

## KISALTMA LİSTESİ

---

A.U.	Arbitrary Units
ATR	Zayıflatılmış Toplam Yansıma
AFM	Atomik Kuvvet Mikroskobu
APT	Atmosferik Basınçlı Plazma İşlemi
APPJ	Atmosferik Basınçlı Plazma Jeti
BS	Vakum Torba Taraf
CFRP	Karbon Elyaf Takviyeli Polimer
DBD	Dielektrik Bariyer Deşarjı
DCA	Diiyodometan Temas Açısı
DCB	Çift Konsol Kirişi
eV	Elektron Volt
FTIR	Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi
IPA	İzopropil Alkol
kN	Kilo Newton
kVA	Kilo Volt Amper
LSS	Bindirmeli Kesme Mukavemeti
PP	Peel-ply
PL	Plazma
PTFE	Politetrafloroetilen
SEB	İkincil Bağlanma
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
SFE	Yüzey Serbest Enerjisi
SLJ	Tek Bindirmeli Bağlantı
TS	Kalıp Taraf
XPS	X-ışını Fotoelektron Spektroskopisi
WCA	Su Temas Açısı
WT	Kama (Wedge) Test

## ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 Yapışma mekanizmaları ve fenomenoloji: (a) mekanik kilitleme, (b) adsorpsiyon/kimyasal bağlanma, (c) difüzyon, (d) elektrostatik yapışma .....	19
Şekil 2.2 Bir yüzeye yayılan yapıştırıcının iyi ve zayıf ıslatma örnekleri.....	20
Şekil 2.3 Sıvı/sıvı arayüzü ve sıvı molekülleri üzerindeki kuvvet dengesi .....	22
Şekil 2.4 İdeal bir yüzeyde denge temas açısı .....	23
Şekil 2.5 Plastiklerde yaygın kullanılan yüzey hazırlama teknikleri.....	24
Şekil 2.6 Maddenin dördüncü hali plazma .....	29
Şekil 2.7 Atmosferik basınçlı plazma sisteminin bileşenleri.....	30
Şekil 2.8 Kompozitlerin çeşitli yüzey işlemleri kullanılarak oluşturulmuş yüzey morfolojilerine ait SEM görüntüleri .....	33
Şekil 2.9 Farklı yüzey işlemleri kullanılmış kompozit yüzeylerin mekanik profilometre ile elde edilen 2 boyutlu pürüzlülük profilleri.....	34
Şekil 2.10 Değişken işlem hızlarıyla elde edilmiş plazma yüzey işleminin etkilerini gösteren $5 \times 5 \mu\text{m}^2$ alandaki AFM görüntüleri: (a) işlenmemiş, (b) 2,54 mm/s, (c) 12,7 mm/s (d) 25,4 mm/s .....	35
Şekil 2.11 Yapıştırıcılı bağlantılarda temel gerilim türleri: (a) basma, (b) çekme, (c) kesme, (d) soyulma ve (e) yırtılma.....	36
Şekil 2.12 Çekme ve basma gerilmelerinin bağlantı boyunca dağılımı .....	37
Şekil 2.13 Gevrek ve elastik malzemelerde kayma gerilimi dağılımı .....	38
Şekil 2.14 Soyulma ve yırtılma geriliminin dağılımı .....	39
Şekil 2.15 Tek bindirmeli bağlantı; test numunesi (sol) ve kurulum (sağ) .....	40
Şekil 2.16 ISO 10365'e göre hata modları.....	41
Şekil 3.1 Vakum torbalama yöntemi .....	42
Şekil 3.2 Prepreg otoklav kürlenme diyagramı .....	43
Şekil 3.3 Yapıştırıcı otoklav kürlenme diyagramı.....	43
Şekil 3.4 Vakum torbalama yöntemine ait görüntüler: a) prepreg serimi, b) vakum torba altına alma, c) vakum hattına bağlama, d) otoklav öncesi.....	44
Şekil 3.5 Yapıştırma prosesi sonrası kama testi numunelerinin dijital mikroskop görüntüsü.....	45
Şekil 3.6 Plazma cihazının bileşenleri: a) Plasmatreat FG5001 plazma jeneratörü, b) 3 eksenli robot, c) RD2004 Plazma nozulu .....	46
Şekil 3.7 Atmosferik basınçlı plazma yüzey işlem prosesi .....	47
Şekil 3.8 Attension Theta Cihazı .....	48
Şekil 3.9 MarSurf PS 10 pürüzlülük ölçüm cihazı .....	50
Şekil 3.10 Tek bindirmeli kesme testi örnek numune fotoğrafları .....	51

<b>Şekil 3.11</b> EN 2243-1 standartına göre tek bindirmeli kesme testi numune boyutları .....	52
<b>Şekil 3.12</b> Genel kama testinin şematik diyagramı .....	53
<b>Şekil 3.13</b> Kama testi kurulum ve numune boyutları .....	54
<b>Şekil 3.14</b> Üretilen alüminyum kama (sol) ve kama yerleştirilmiş numune (sağ) görüntüleri.....	54
<b>Şekil 3.15</b> Kabine yerleştirilen numunelerin farklı açıdan görüntüleri .....	55
<b>Şekil 3.16</b> Kama testinin dijital mikroskop görüntüsü .....	55
<b>Şekil 3.17</b> Kompozit bağlantıların hata modları.....	56
<b>Şekil 4.1</b> Plazma nozul hızının (v) ve mesafesinin (h) bir fonksiyonu olarak kalıp taraf kompozit yüzeyin temas açısı.....	58
<b>Şekil 4.2</b> Plazma nozul hızının (v), mesafesinin (h) ve geçiş sayısının (p) bir fonksiyonu olarak vakum torba taraf kompozit yüzeyin temas açısı..	59
<b>Şekil 4.3</b> Plazma nozul hızının (v) ve mesafesinin (h) bir fonksiyonu olarak kalıp taraf kompozit yüzeylerin toplam ve polar yüzey enerjisi.....	61
<b>Şekil 4.4</b> Plazma nozul hızının (v), mesafesinin (h) ve geçiş sayısının (p) bir fonksiyonu olarak vakum torba taraf kompozit yüzeylerin toplam ve polar yüzey enerjisi .....	62
<b>Şekil 4.5</b> Farklı yüzey hazırlama işlemlerinin temas açılarının ve yüzey enerjilerinin karşılaştırılması. ....	63
<b>Şekil 4.6</b> CFRP kompozitlerinin SEM görüntüleri: a) Yüzey işlenmemiş, TS-IPA, x136, b) Yüzey işlenmemiş, TS-IPA, x1410, c) Plazma uygulanmış, TS-PL/v10, x96, d) Plazma uygulanmış, TS-PL/v10, x734, ve e) Peel-ply uygulanmış, TS-PP, x112, f) Peel-ply uygulanmış, TS-PP, x247 .....	65
<b>Şekil 4.7</b> Plazma nozul hızının (v) bir fonksiyonu olarak kompozit yüzeyin FTIR-ATR analizi, vakum torba taraf: a) 2600-3700 $\text{cm}^{-1}$ , b) 1400-1600 $\text{cm}^{-1}$ .....	66
<b>Şekil 4.8</b> Plazma nozul-yüzey mesafesinin (h) bir fonksiyonu olarak kompozit yüzeyin FTIR ATR analizi, vakum torba taraf: a) 2600-3700 $\text{cm}^{-1}$ , b) 1400-1600 $\text{cm}^{-1}$ .....	67
<b>Şekil 4.9</b> CFRP kompozit yüzeylere uygulanan farklı yüzey hazırlama işlemlerine ait FTIR-ATR analiz sonuçlarının karşılaştırılması.....	67
<b>Şekil 4.10</b> Farklı yüzey hazırlama tekniklerinin yük-yer değiştirme eğrileri: (a) kalıp taraf yüzeyler ve (b) vakum torba taraf yüzeyler.....	68
<b>Şekil 4.11</b> Farklı yüzey hazırlama tekniklerinin tek bindirmeli kesme mukavemeti sonuçları: (a) kalıp taraf yüzeyler ve (b) vakum torba taraf yüzeyler.....	69
<b>Şekil 4.12</b> Farklı yüzey serbest enerji seviyeleri ile farklı ortalama yüzey pürüzlülüklerine sahip yüzeylerden elde edilen bindirme kesme mukavemeti sonuçlarının üç boyutlu bir haritası.....	70

<b>Şekil 4.13</b> Yüzeylerin AFM görüntüleri a) TS-IPA, b) TS-PL/v10, c) BS-IPA, d) BS-PL/v10, e) TS-PP.....	73
<b>Şekil 4.14</b> Yüzeyde plazma nozul hızının (v) bir fonksiyonu olarak XPS spektrumları (kalıp taraf) .....	75
<b>Şekil 4.15</b> C 1s'yi gösteren XPS spektrumları (kalıp taraf): a) TS-IPA, b) TS-PL/v10, c) TS-PL/v50, d) karşılaştırma.....	77
<b>Şekil 4.16</b> O 1s'yi gösteren XPS spektrumları (kalıp taraf) a) TS-IPA, b) TS-PL/v10, c) TS-PL/v50, d) karşılaştırma.....	78
<b>Şekil 4.17</b> N 1s'yi gösteren XPS spektrumları (kalıp taraf) a) TS-IPA, b) TS-PL/v10, c) TS-PL/v50, d) karşılaştırma.....	79
<b>Şekil 4.18</b> F 1s'yi gösteren XPS spektrumları (kalıp taraf) a) TS-IPA, b) TS-PL/v10, c) TS-PL/v50, d) karşılaştırma.....	80
<b>Şekil 4.19</b> Plazma nozul hızının (v) bir fonksiyonu olarak XPS spektrumları (vakum torba taraf) .....	82
<b>Şekil 4.20</b> C 1s'yi gösteren XPS spektrumları (vakum torba taraf) a) BS-IPA, b) BS-PL/v10, c) BS-PL/v50, d) karşılaştırma .....	83
<b>Şekil 4.21</b> O 1s'yi gösteren XPS spektrumları (vakum torba taraf) a) BS-IPA, b) BS-PL/v10, c) BS-PL/v50, d) karşılaştırma .....	84
<b>Şekil 4.22</b> N 1s'yi gösteren XPS spektrumları (vakum torba taraf) a) BS-IPA, b) BS-PL/v10, c) BS-PL/v50, d) karşılaştırma .....	85
<b>Şekil 4.23</b> F 1s'yi gösteren XPS spektrumları (vakum torba taraf) a) BS-IPA, b) BS-PL/v10, c) BS-PL/v50, d) karşılaştırma .....	86
<b>Şekil 4.24</b> TS-IPA numunesi adeziv hata modu.....	87
<b>Şekil 4.25</b> TS-IPA kama testi sonuçları.....	88
<b>Şekil 4.26</b> TS-PL/v10 kama testi sonuçları .....	89
<b>Şekil 4.27</b> TS-PL/v50 kama testi sonuçları .....	90
<b>Şekil 4.28</b> TS-PL/v70 kama testi sonuçları .....	91
<b>Şekil 4.29</b> TS-PL/v110 kama testi sonuçları .....	92
<b>Şekil 4.30</b> TS-PP kama testi sonuçları.....	93
<b>Şekil 4.31</b> Yüzeylerde çatlak ilerleme sonuçlarının karşılaştırılması: a) TS-PL/v10 b) TS-PL/v50, c) TS-PL/v70, d) TS-PL/v110 .....	95
<b>Şekil 4.32</b> Yüzeylerde çatlak ilerleme sonuçlarının karşılaştırılması: a) TS-PL/v10 b) TS-PL/v50, c) TS-PL/v70, d) TS-PL/v110 .....	96
<b>Şekil 4.33</b> Kama testi bağlantılarının hata modları .....	97

## TABLO LİSTESİ

<b>Tablo 2.1</b> Yapışma teorileri.....	20
<b>Tablo 2.2</b> Lifshitz-Van der Waals ve kimyasal bağ enerjilerine örnekler .....	21
<b>Tablo 2.3</b> Kompozitlerin yüzey işlemleri sırasında istenen ve istenmeyen kimyasal gruplar .....	32
<b>Tablo 3.1</b> Kompozit malzemenin mekanik özellikleri.....	45
<b>Tablo 3.2</b> Kompozit yüzeylere uygulanan yüzey işlemleri.....	46
<b>Tablo 3.3</b> Plazma yüzey işlem proses parametreleri .....	47
<b>Tablo 3.4</b> Test sıvılarının polar ve dispersif yüzey gerilimleri .....	49
<b>Tablo 4.1</b> Plazma nozul hızının ( $v$ ) bir fonksiyonu olarak kompozit yüzeylerin su ve diiyodometan temas açıları, kalıp taraf .....	57
<b>Tablo 4.2</b> Plazma nozul-yüzey mesafesinin ( $h$ ) bir fonksiyonu olarak kompozit yüzeylerin su ve diiyodometan temas açıları, kalıp taraf.....	57
<b>Tablo 4.3</b> Plazma nozul hızının ( $v$ ) bir fonksiyonu olarak kompozit yüzeylerin su ve diiyodometan temas açıları, vakum torba taraf .....	57
<b>Tablo 4.4</b> Plazma nozul-yüzey mesafesinin ( $h$ ) bir fonksiyonu olarak kompozit yüzeylerin su ve diiyodometan temas açıları, vakum torba taraf.....	58
<b>Tablo 4.5</b> Plazma nozul geçiş sayısının ( $p$ ) bir fonksiyonu olarak kompozit yüzeylerin su ve diiyodometan temas açıları, vakum torba taraf.....	58
<b>Tablo 4.6</b> Plazma nozul hızının ( $v$ ) bir fonksiyonu olarak kompozit yüzeylerin yüzey serbest enerjisi, kalıp taraf.....	60
<b>Tablo 4.7</b> Plazma nozul hızının ( $v$ ) bir fonksiyonu olarak kompozit yüzeylerin yüzey serbest enerjisi, kalıp taraf.....	60
<b>Tablo 4.8</b> Plazma nozul hızının ( $v$ ) bir fonksiyonu olarak kompozit yüzeylerin yüzey serbest enerjisi, vakum torba taraf.....	60
<b>Tablo 4.9</b> Plazma nozul-yüzey mesafesinin ( $h$ ) bir fonksiyonu olarak kompozit yüzeylerin yüzey serbest enerjisi, vakum torba taraf.....	61
<b>Tablo 4.10</b> Plazma nozul geçiş sayısının ( $p$ ) bir fonksiyonu olarak kompozit yüzeylerin yüzey serbest enerjisi, vakum torba taraf.....	61
<b>Tablo 4.11</b> Peel-ply yüzey hazırlama yöntemine ait temas açıları, toplam ve polar yüzey enerjileri.....	62
<b>Tablo 4.12</b> Plazma nozul hızının ( $v$ ) ve nozul-yüzey mesafesinin ( $h$ ) bir fonksiyonu olarak kompozit yüzeylerin $R_a$ ve $R_{maks}$ pürüzlülük değerleri, kalıp taraf .....	64
<b>Tablo 4.13</b> Plazma nozul hızının ( $v$ ), nozul-yüzey mesafesinin ( $h$ ) ve geçiş sayısının ( $p$ ) bir fonksiyonu olarak kompozit yüzeylerin $R_a$ ve $R_{maks}$ pürüzlülük değerleri, vakum torba taraf.....	64

<b>Tablo 4.14</b> Farklı yüzey hazırlama tekniklerinin tek bindirmeli kesme mukavemet sonuçları .....	68
<b>Tablo 4.15</b> Farklı yüzey hazırlama tekniklerine sahip SLJ bağlantılarının hasar modları .....	71
<b>Tablo 4.16</b> AFM analiz sonuçları.....	72
<b>Tablo 4.17</b> XPS element analizi (kalıp taraf).....	75
<b>Tablo 4.18</b> C 1s'yi gösteren XPS pik noktaları ve karşılık gelen bağlanma enerjileri (kalıp taraf).....	77
<b>Tablo 4.19</b> O 1s'yi gösteren XPS pik noktaları ve karşılık gelen bağlanma enerjileri (kalıp taraf).....	78
<b>Tablo 4.20</b> N 1s'yi gösteren XPS pik noktaları ve karşılık gelen bağlanma enerjileri (kalıp taraf).....	80
<b>Tablo 4.21</b> F 1s'yi gösteren XPS pik noktaları ve karşılık gelen bağlanma enerjileri (kalıp taraf).....	81
<b>Tablo 4.22</b> XPS element analizi (vakum torba taraf).....	82
<b>Tablo 4.23</b> C 1s'yi gösteren XPS pik noktaları ve karşılık gelen bağlanma enerjileri (vakum torba taraf) .....	83
<b>Tablo 4.24</b> O 1s'yi gösteren XPS pik noktaları ve karşılık gelen bağlanma enerjileri (vakum torba taraf) .....	84
<b>Tablo 4.25</b> N 1s'yi gösteren XPS pik noktaları ve karşılık gelen bağlanma enerjileri (vakum torba taraf) .....	85
<b>Tablo 4.26</b> F 1s'yi gösteren XPS pik noktaları ve karşılık gelen bağlanma enerjileri (vakum torba taraf) .....	86
<b>Tablo 4.27</b> TS-IPA çatlak ilerleme ölçüm sonuçları.....	87
<b>Tablo 4.28</b> TS-IPA kırılma tokluk enerjisi hesaplamaları .....	87
<b>Tablo 4.29</b> TS-PL/v10 çatlak ilerleme ölçüm sonuçları .....	88
<b>Tablo 4.30</b> TS-PL/v10 kırılma tokluk enerjisi hesaplamaları .....	88
<b>Tablo 4.31</b> TS-PL/v50 çatlak ilerleme ölçüm sonuçları .....	89
<b>Tablo 4.32</b> TS-PL/v50 kırılma tokluk enerjisi hesaplamaları .....	90
<b>Tablo 4.33</b> TS-PL/v70 çatlak ilerleme ölçüm sonuçları .....	90
<b>Tablo 4.34</b> TS-PL/v70 kırılma tokluk enerjisi hesaplamaları .....	91
<b>Tablo 4.35</b> TS-PL/v110 çatlak ilerleme ölçüm sonuçları .....	91
<b>Tablo 4.36</b> TS-PL/v110 kırılma tokluk enerjisi hesaplamaları .....	92
<b>Tablo 4.37</b> TS-PP çatlak ilerleme ölçüm sonuçları.....	93
<b>Tablo 4.38</b> TS-PP kırılma tokluk enerjisi hesaplamaları .....	93

## **Plazma Yüzey İşleminin Epoksi Film Yapıştırıcılı CFRP Kompozit Bağlantılarının Performansına Etkisinin İncelenmesi**

Ahmetcan ALKOÇ

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Malzeme Programı

Doktora Tezi

Danışman: Prof. Dr. Afife Binnaz HAZAR

Günümüzde havacılık endüstrisinde yapıştırma teknolojisi; yapıya hafiflik katması, kolay kullanımı ve yüksek verimliliği nedeniyle uçak yapımında geleneksel yöntemlere göre giderek daha fazla tercih edilmektedir. Özellikle kompozit-kompozit yapıştırma işleminden önce, sergilediği düşük yüzey enerjisi ve ıslanabilirlik nedeniyle polimer yüzeylerin ön işlemden geçirilmesi büyük önem arz etmektedir.

Sunulan doktora tez çalışması; karbon fiber takviyeli polimer malzemelerin üretimi, yüzey hazırlığı, yüzey karakterizasyonu ve hızlandırılmış yaşlandırma koşulları altındaki dayanıklılık testleri olmak üzere dört ana bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde, karbon fiber takviyeli epoksi kompozit bağlantılar önceden empenye edilmiş prepreg malzemeler kullanılarak vakum torbalama ve otoklav yöntemiyle üretilmiştir. İkinci bölümde, üretilen plakaların farklı dokuya sahip her iki yüzeyine (vakum torba ve kalıp taraf yüzey) atmosferik basınçlı plazma yüzey işlemi (APT)

uygulanmış ve optimum proses parametreleri belirlenmiştir. Üçüncü bölümde, temas açısı ölçümleri ile yüzeyin hidrofilik davranışı; Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi (FTIR-ATR) ve X-ışını Fotoelektron Spektroskopisi (XPS) kullanılarak yüzeyin kimyasal bileşimi ve fonksiyonel gruplar; Profilometre, Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM) ve Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) kullanılarak yüzey topografyası ve morfolojisi belirlenmiştir. Yüzey karakterizasyon sonuçları, APT işleminin ardından temas açısındaki azalmanın, yüksek oksijen konsantrasyonu ve kompozit yüzey üzerinde polar fonksiyonel grupların (örnek: -OH, C=O, O-C=O, -NH<sub>2</sub>, -NH<sub>3</sub>) varlığıyla ilişkili olduğunu göstermiştir. APT işlemi, **22,41 MPa** tek bindirmeli kesme mukavemet değeri ile **%19,2** oranında dikkate değer bir artışa yol açarak işlemin etkinliğini vurgulamıştır. Dördüncü bölümde, yüzey hazırlama tekniklerinin uzun vadeli bağlantı dayanıklılığı üzerindeki etkisini incelemek amacıyla 576 saat boyunca 71°C ve %95 bağıl nem ortamında çalıştırılan bir iklimlendirme kabininde kama testi gerçekleştirilmiştir. Son olarak, kama testinden elde edilen bulgular; APT işleminin ilk çatlak oluşumuna ve çatlak ilerlemesine karşı üstün direnç göstererek, havacılıkta en yaygın kullanılan peel-ply yöntemine göre **%25** daha yüksek kırılma tokluk enerjisi ( $G_{IC}$ ) sergileyerek **1492 J/m<sup>2</sup>** değeri elde edilmiştir. Bu sonuçlar, APT tekniğinin potansiyel olarak geleneksel yüzey tekniklerinin yerini alabileceğini ve uzun süreli bağlanma mukavemeti sağlayabileceğini göstermiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Uçak kompozitleri, yüzey hazırlama teknikleri, atmosferik basınçlı plazma işlemi, yüzey fizikokimyasal özellikleri, uzun süreli dayanıklılık.

# **Investigation of the Effect of Plasma Surface Treatment on the Performance of CFRP Composite Connections with Epoxy Film Adhesive**

Ahmetcan ALKOÇ

Department of Metallurgy and Materials Engineering

Doctor of Philosophy Thesis

Supervisor: Prof. Dr. Afife Binnaz HAZAR

Today, bonding technology in the aviation industry is increasingly preferred over traditional methods for aircraft construction due to its lightness to the structure, ease of use, and high efficiency. Especially before the composite-composite bonding process, the pre-treatment of polymer surfaces, which exhibit low surface energy and wettability, is of great importance.

This doctoral thesis consists of four main parts: production of carbon fiber reinforced polymer materials, surface preparation, surface characterization, and durability tests under accelerated aging conditions. In the first part, carbon fiber reinforced epoxy composite joints were produced using prepreg materials through vacuum bagging and autoclave methods. In the second part, atmospheric pressure plasma surface treatment (APT) was carried out on both surfaces of the produced plates (vacuum bag and tool side surface), and optimum process parameters were determined. In the third part, a variety of surface characterization techniques including contact angle measurements, Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR-ATR), and X-ray photoelectron spectroscopy (XPS) for analyzing the chemical composition and functional groups, as well as profilometry, atomic force

microscopy (AFM), and scanning electron microscopy (SEM) for evaluating surface topography and morphology were used. The results of surface characterization showed that the decrease in contact angle after APT was associated with the high oxygen concentration and the presence of polar functional groups (e.g., -OH, C=O, O-C=O, -NH<sub>2</sub>, -NH<sub>3</sub>) on the composite surface. The APT process has demonstrated its effectiveness by leading to a remarkable **19.2%** increase, achieving a single lap shear strength value of **22.41 MPa**. In the fourth part, to examine the effect of surface preparation techniques on long-term joint durability, a wedge test (WT) was conducted in a climate chamber operated at 71°C and 95% relative humidity for 576 hours. Finally, the findings from the wedge test revealed that the APT exhibited superior durability to initial crack formation and crack propagation, with a fracture toughness energy ( $G_{IC}$ ) of **1492 J/m<sup>2</sup>**, which was **25%** higher than the most commonly used peel-ply method in aerospace industry. These results suggest that APT technique could potentially replace traditional surface techniques and provide long-term bonding strength.

**Keywords:** Aircraft composites, surface treatment techniques, atmospheric pressure plasma treatment, surface physicochemical properties, long-term durability.

## 1.1 Literatür Özeti

Havacılık endüstrisinde yapıştırma teknolojisi, yapısal hafiflik, kullanım kolaylığı ve yüksek verimlilik sağladığı için uçak tasarım ve üretim süreçlerinde geleneksel yöntemlerin yerini almaya başlamıştır. Örneğin, Boeing 787 ve Airbus A350 uçaklarında yapıştırıcı ile montaj işlemi gerçekleştirilen yapılar, toplam birleştirme teknolojisinin %50'sinden fazlasını oluşturmaktadır [1], [2]. Havacılık endüstrisinde kullanılan karbon fiber takviyeli epoksi reçine (CFRP; Carbon Fiber Reinforced Polymer) kompozitlerin yapıştırma işlemi öncesinde yüzey hazırlığı, yaygın olarak mekanik aşındırma (zımparalama, kumlama vb.) veya soyma katmanı (peel-ply) teknikleri gibi geleneksel yöntemler ile yapılmaktadır. Yüzey hazırlama yöntemleri açısından, havacılık endüstrisi, yapıştırma işleminden önce nispeten geniş bir yüzeyi işlemek için çoğunlukla peel-ply yöntemini kullanmaktadır [3], [4]. Peel-ply kullanımının dezavantajlarından biri, soyma katmanını çıkarma işleminin uygun bir şekilde yapılamaması durumunda alt kompozitin zarar görmesi veya işlem sonrası yüzeydeki kalıntılar nedeniyle verimsiz bir yüzey hazırlığı nedeni olabilmesidir [5], [6]. Atmosferik basınçlı plazma işlemi, yapıştırma etkinliğini ve tutarlılığını koruması yanında geleneksel yüzey hazırlama yöntemlerine ait prosedür sınırlamalarına da çözüm üretebilmektedir [7], [8]. Birçok araştırmada plazma yüzey işleminin, polimer kompozit malzemelerin yapışma gücünü arttırdığı, yüksek proses güvenilirliği sağladığı, çevre dostu olduğu, karmaşık şekillere uygulanabildiği ve otomasyona kolay uyum sağladığı belirtilmiştir [9]–[12].

Kompozit-kompozit yapıştırma işlemi yapılmadan önce iyileştirilmesi gereken en önemli hususlardan biri, özellikle polimerlerin sergilediği düşük yüzey enerjisi ve ıslanabilirlik nedeniyle yüzeyin ön işleminden geçirilmesidir. Birçok araştırmacı, manuel aşındırma [13], kum püskürtme [14], [15], peel-ply [6], [16], [17] kimyasal [18], [19], lazer [20]–[24], alev [25] veya plazma [26]–[35] işlemleri yoluyla kompozit yüzeylerin modifikasyonunu incelemiştir. Fiziksel yüzey hazırlama işlemlerinin amacı, kirleticilerin (kontaminasyon) uzaklaştırılması ve yüzeylerin pürüzlendirilmesidir. Yüzey işleme aşamasında plazma gibi bir fizikokimyasal

prosedür kullanılmasındaki amaç, numunelerin yüzey enerjisini optimum değere arttıracak şekilde işlevselleştirilmesi ve böylece oluşturulan spesifik etkileşimlerin yapıştırıcı-yapışan arayüzeyi boyunca yapışmayı teşvik etmesidir [36], [37]. Birçok çalışma [8], [12], [33], [34], [38]–[41], polimer malzemelerin yüzey modifikasyonu için plazma işleminin etkili bir şekilde uygulanmasının, yapışma gücünü iyileştirebileceğini göstermiştir.

Williams vd. [39], yüzey hazırlık yöntemi olarak atmosferik basınçlı helyum ve oksijen plazmalarının, paslanmaz çelik ve karbon fiber takviyeli epoksi kompozitleri için etkili bir yöntem olduğunu raporlamıştır. Araştırmaları, plazma aktivasyonundan sonra karbon fiber epoksi laminantların bindirme kesme mukavemetinde %150'lik bir artış olduğunu göstermiştir. Ayrıca, X-ışını fotoelektron spektroskopisi ile yapılan yüzey analizinde, plazma işlemi uygulanan yüzeyde spesifik fonksiyonel grupların (örneğin; karboksil) oluştuğu belirtilmiştir.

Sun vd. [12], atmosferik basınçlı plazma işleminde nozul hızını 5 mm/s ve yüzey-nozul mesafesini 18 mm uygulayarak, yüzey kirleticilerinin kaldırılmasını ve yüzeyde polar grupların (örneğin; -OH, -COOH ve -NH<sub>2</sub>) üretilmesini sağladıklarını rapor etmişlerdir. Bu sayede, yapıştırıcı ile birleştirilmiş CFRP bağlantılarının bindirme kesme mukavemetini %267 oranında (8,6 MPa değerinden 31,6 MPa değerine) arttırmışlardır.

Li vd. [42], argon plazma işleminin CFRP yüzeyi üzerindeki yüzey kirleticilerini giderdiğini, azot ve hava plazma işleminin ise hem yüzey kirleticilerini ortadan kaldırdığını hem de CFRP yüzeylerinde -NH<sub>2</sub> ve -OH grupları gibi polar kimyasal fonksiyonel gruplar oluşturduğunu gözlemlemiştir. Ayrıca, CFRP'nin arayüzey bağlanma mukavemetini arttırmada -OH grubunun -NH<sub>2</sub> grubundan biraz daha güçlü bir etkiye sahip olduğunu belirtmişlerdir.

Pizzorni vd. [43], yapıştırıcılı CFRP substratlarına düşük basınçlı plazma işlemi (LPP; Low Pressure Plasma) uygulamış ve yüksek sıcaklık-nem koşullandırması altında bağlantı dayanıklılığını incelemişlerdir. İşlem gazları olarak hava ve saf oksijeni kullanmışlardır. Güç ve maruz kalma süresi gibi değişkenler çalışma parametreleri olarak kullanılmıştır. Dört set LPP-işlem koşulu seçilmiş ve daha sonra hızlandırılmış yaşlandırmaya (her biri 56 döngüden oluşan T=70°C, bağıl nem>%90'da 5 saat ve T=-40°C'de 5 saat) tabi tutulmuştur. Hızlandırılmış

yaşlanma koşulları altında CFRP-epoksi yapıştırıcı sisteminin dayanıklılığını değerlendirmek için paralel olarak çekme kesme mukavemeti (TSS; Tensile Shear Strength) testi ve kama testi (WT: Wedge Test) yapılmıştır. Deneysel sonuçlar, LPP işlemi yapılmış yapıştırıcılı bağlantının kısa süreli kalitesinin artmasının yanı sıra şiddetli yaşlanma koşulları altında bile dayanıklılığın arttığını belirtmişlerdir. Dört set LPP-işlem koşullarının tümünün hem ilk çatlak oluşumunda hem de yaşlanma süresince çatlak ilerlemesinde karşılaştırılabilir performans gösterdiği Kama Testi ile doğrulanmış olup, sonuçlar aşağıda sunulmuştur:

- Aşındırılmış numuneler, ortalama 47,8 mm değeri ile daha büyük başlangıç çatlak uzunluğu ( $a_0$ ) değerleri sunmuştur, bu da  $G_{IC}$  için yaklaşık  $569 \text{ J/m}^2$  değerine karşılık gelmiştir. Tüm LPP ile işlenmiş numunelerde ise aşındırılmış numunelere kıyasla daha düşük  $a_0$  değeri ölçülmüştür. Bu nedenle, daha yüksek enerji salınım değerleri (yaklaşık iki katı) elde edilmiştir; ortalama olarak, hava/100W/180s ile  $1181 \text{ J/m}^2$ ; hava/50W/180s ile  $1267 \text{ J/m}^2$ ;  $O_2/50W/60s$  ile  $1208 \text{ J/m}^2$  ve  $O_2/150W/180s$  uygulamaları ile  $1188 \text{ J/m}^2$  değerleri elde edilmiştir.
- Çatlak ilerleme aşamasında gerçekleştirilen ölçümler, kullanılan yapıştırıcı sistemin genel bir higrotermal kararlılığını göstermiştir. Çatlak büyüme eğilimi her durumda asimptotik olmuştur ve çatlak uzunluğundaki artış, çatlak ucundaki stresin kademeli olarak azalması nedeniyle sifıra düşme eğilimi göstermiştir.

Zaldivar vd. [10] yaptıkları çalışmada, plazma işleme parametrelerinin grafit-epoksi kompozitinin yüzey kimyasını ve bağlanma davranışını nihai olarak nasıl etkilediğini araştırmışlardır. Plazma güç seviyesi, plazma nozul çalışma mesafesi, taşıyıcı gaz (helyum) akış hızı, plazmaya maruz kalma süresi ve plazma içindeki aktif gaz (oksijen) konsantrasyonu değiştirilmiş ve XPS tekniği kullanılarak belirlenen yüzey kimyası varyasyonları ile ilişkilendirilmiştir. Daha sonra yüzeydeki karboksil konsantrasyonu bu değişikliklerin bir fonksiyonu olarak ölçülmüş ve bindirme kesme mukavemetleri ile ilişkilendirilmiştir. Çalışmalar sonucunda aşağıda sunulan sonuçlara ulaşılmıştır:

- Araştırılan plazma işlem parametreleri, işlenmiş kompozitlerin yüzey kimyasında değişikliklere neden olmuş ve özellikle karboksil içeriği, bağ kuvveti ile iyi bir korelasyon göstermiştir.

- Yüzeğe ulaşan oksijen atomlarının mevcudiyetini optimize etmek için prob ile substrat çalışma mesafesi en aza indirilmiş ve bu sayede karboksil konsantrasyonu artırılmış ve bağ kuvvetinde artışlarla sonuçlanmıştır.
- Plazma güç aralığı (80 W–160 W), alt tabakanın karboksil konsantrasyonunu önemli bir oranda etkilememiştir ve mekanik performansta herhangi bir değişiklik oluşturmadığı belirlenmiştir.
- Plazma ile işlenmiş kompozitlerin çatlak delaminasyon direnci, geleneksel yüzey hazırlama teknikleri kullanılarak bağlanan kompozitlere kıyasla önemli ölçüde iyileştirilmiştir.  $G_{IC}$  değerlerinde 280 J/m<sup>2</sup>'den 525 J/m<sup>2</sup>'ye bir artış sağlanmıştır. Bu artışla birlikte plazma uygulanan yüzeylerde istenen kohezif hata modu elde edilmiştir.

Sarikaya vd. [8], otomatik fiber yerleştirme yöntemi kullanılarak üretilen tek yönlü CFRP numunelerde Atmosferik Basınç Plazma Jeti (APPJ; Atmospheric Pressure Plasma Jet) işleminin, yapışma kuvveti üzerindeki etkilerine yönelik bir araştırma yapmışlardır. APPJ işleminden önce ve sonra morfolojideki değişikliği analiz etmek ve silisyum kirleticisinin varlığını ve uzaklaştırılma miktarını ölçmek için XPS, Su Temas Açısı (WCA; Water Contact Angle), AFM ve SEM analizlerini içeren çoklu yüzey karakterizasyon yöntemleri kullanmışlardır. FG5002 plazma jeneratörü tarafından kontrol edilen bir RD1004 nozulundan oluşan tek döner plazma jeti yüzey işleme amacıyla kullanılmıştır. Yüzey işlemi, işlem hızları sırasıyla 2,54 mm/s, 12,70 mm/s, 25,40 mm/s ve işlem örtüşme (Treatment Overlap) miktarları sırasıyla %25, %50, %75 değiştirilerek farklı parametrelerde uygulanmıştır. XPS ölçümleri, plazma işleminden sonra oksijen içeren polar fonksiyonel gruplarda belirgin bir artış olduğunu göstermiştir. Bu durum, su temas açısında bir düşüşe yol açarak, ıslanabilirlikte ve dolayısıyla yüzey enerjisinde önemli bir artış göstermiştir. Bununla birlikte APPJ, silisyum kirleticiyi CFRP yüzeyinden çıkaramamış, ancak yüzeyde bir oksidasyon işlemi yoluyla silisyum dioksite dönüştürmüştür. SEM ve AFM görüntüleri, yüksek işlem sürelerinde aşındırma ve yüzey pürüzlülüğünün arttığını göstermiştir. Çift Konsol Kirişi (DCB; Double Cantilever Beam) test sonuçları, APPJ uygulanmış tüm yüzeylerin, işlem görmemiş ve adeziv hata sergileyen yüzeylere göre daha yüksek kırılma tokluğu ile birlikte kohezif hata verdiğini göstermiştir. Mekanik performans açısından en etkili parametreler; (%25 işlem örtüşmesi ile 12,7 mm/s nozul hızı)

veya (%50 işlem örtüşmesi ile 25,4 mm/s nozul hızı) kombinasyonları olarak tespit edilmiştir.

Oldham vd. [44] yaptıkları çalışmada, düşük sıcaklıkta atmosferik plazma ile işlenen karbon fiber takviyeli termoplastik (CFRTP; Carbon Fiber Reinforced Thermoplastic) kompozitlerin yüzey aktivasyonu için kullanılabilecek yeni tahribatsız karakterizasyon yöntemi keşfettiklerini rapor etmişlerdir. Araştırmacılar, plazma işleminin işlem görmemiş kontrol numunelerinden önemli ölçüde daha büyük bir ortalama potansiyele sahip olduğunu ve oldukça iyi bir elektrokimyasal potansiyel dağılımı gösteren bir yüzey üretilbildiğini ortaya koymuşlardır. Bu sonuç, Kelvin Prob Kuvveti Mikroskobu (KPFM; Kelvin Probe Force Microscope) kullanılarak yapılmış olan yüzey potansiyel haritalaması ile ortaya çıkarılmıştır. Plazma işlemi yoğunluğu ve plazma maruziyetinden sonra geçen süreye bağlı olarak yüzey potansiyel dağılımının genişliği değişmiştir. Farklı plazma işlem yoğunlukları ve işlem sonrasındaki geçen süreler için elde edilen yüzey potansiyel dağılımının standart sapması, CFRTP bağlantılarının çift konsollu kiris (DCB) testi ile belirlenen kırılma tokluğu ile ilişkilendirilmiştir. Yapıştırılmış bağlantılarda elde edilen daha yüksek kırılma tokluğunun, yapıştırmadan önce plazma uygulanan yüzeylerde görülen daha dar yüzey potansiyel dağılımları ile ilişkili olduğu tespit edilmiştir. CFRTP kompozitini düşük sıcaklıktaki atmosferik plazmaya maruz bırakmanın etkileri aşağıda verilmiştir:

- İşlenmemiş kontrole kıyasla daha dar bir yüzey potansiyel dağılımı üretmiştir.
- Ortalama yüzey potansiyelini çok daha negatif değerlere kaydırmış, bu da yüzeydeki ortalama elektron enerjisinde bir artışa işaret etmiştir.
- Yapıştırılmış bağlantıların kırılma tokluğunu ve bindirme kesme mukavemetini arttırmıştır. Bu durumun, yüzeydeki elektronların enerjisiyle ya da diğer bir ifadeyle elektronların temastan önceki elektrokimyasal potansiyeliyle ilgili olabileceği belirtilmiştir.
- Kelvin probu kullanılarak yapılan makroskobik ölçümler, ticari bir tarama probu mikroskobu kullanılarak yapılan nanoskopik ölçümlere benzer sonuçlar ortaya çıkarmıştır. Yüzey potansiyel dağılım ölçümlerinin, yapıştırma öncesinde termoplastiklerin plazma aktivasyonunu içeren proseslerde kalite kontrolü için kullanılabileceği ve kullanım kolaylığı sağlayabileceği belirtilmiştir.

Dighton [33], havacılık ve uzay uygulamaları için yapıştırma ile montaj işlemleri üzerine bir çalışma yapmıştır. Tez kapsamında test edilen kompozit numunelerin tamamı endüstride kullanılan karbon fiber/epoksi reçine sistemlerinden seçilmiştir. Yapıştırılacak yüzeylerin karakterizasyonu ile ilgili olarak, iki husus dikkate alınmıştır: (i) yüzey analitik teknikleri ve yapıştırıcı bağ gücü ölçümleri kullanılarak belirlenmiş silisyum esaslı bir ayırıcı maddenin atmosferik plazma işlemi ile uzaklaştırılması ve (ii) işlem sonrasında zaman içinde çeşitli aralıklarla yapıştırıcı ile bağlanmış tek bindirmeli kesme bağlantılarının kırılma yüzeylerinin analizi. Atomik kuvvet mikroskobu araştırmalarının yardımıyla, atmosferik plazma işlemlerinin, karbon fiber/epoksi reçine kompozitleri üzerinde yüzey pürüzlülüğü etkisine sahip olduğu, bunun da mekanik kilitlenmenin artmasına ve daha güçlü bir bağlantıya yol açtığı belirtilmiştir. Kirilenmiş yüzeylerde, beklendiği gibi, bozulma mukavemetinde 15 MPa değerinden yaklaşık 4 MPa değerine önemli bir düşüş olmuştur (yaklaşık %74'lük bir azalma). Bununla birlikte, plazma işleminden iki hafta sonra bindirme kesme mukavemeti yaklaşık 4 MPa değerinden yaklaşık 11 MPa değerine yükselmiştir. Bu sonuçlar, plazma işleminin, kirleticileri azaltmada etkin olduğunu göstermiştir.

Kaner [45], polimer malzemelerin yapıştırılmasında yüzey işlemlerinin ve yaşlandırmanın etkilerini incelemiştir. Bu çalışmada, çeşitli polimer malzemelere farklı yüzey işlemleri uygulandıktan sonra yapıştırma işlemleri yapılmıştır. Çalışmada; zımparalama, korona ve plazma yüzey işlemleri kullanılmıştır. Yapıştırılan örnekler, 30 gün süreyle -20°C, 20°C ve 0°C sıcaklıklarda şartlandırılmıştır. Ayrıca, yüzey işlemi uygulanmış numuneler yaşlandırma işlemine tabi tutulmuştur. Bu numuneler, 50°C sıcaklık ve %95 nem oranında 30, 60 ve 90 gün süreyle yaşlandırılmıştır. Dayanım değerlerini belirlemek için çekme ve izod darbe testleri uygulanmıştır. Sonuçlar, zımparalama işleminin oluşturduğu fiziksel yüzey değişikliklerinin yapıştırıcının bu alanlara daha iyi yayılmasını sağladığını ve arayüzdeki bağ kuvvetlerinin artmasıyla örneklerin daha sağlam bir bağlantı kurduğunu göstermiştir. Bu sayede, yapıştırılan örneklerin kayma gerilmesi ve darbe dayanımı değerleri artmıştır. Korona yüzey işlemi, yüzeydeki elektron hareketliliğini artırarak örneklerin yapıştırıcı ile kurduğu bağ kuvvetlerini güçlendirmiştir. Çekme testi sonuçlarına göre, örneklerin kayma gerilmesi değeri %60 civarında artmıştır. Düşük sıcaklıkta elde edilen bu değerin,

yapıştırıcı ile arayüzey arasındaki bağ sisteminde hareket olmamasından kaynaklandığı belirtilmiştir. Yaşlandırma süresi uzadıkça dayanım değerlerinin düştüğü gözlemlenmiştir. Plazma uygulanan numunelerde en yüksek kayma gerilmesi -20°C sıcaklıkta elde edilmiştir. Plazma işlemi sırasında yüzeye yapılan elektron bombardımanının oluşturduğu serbest radikallerin arayüzdeki adezyon kuvvetini arttırarak yüksek dayanım sağladığı ifade edilmiştir.

İriş [46], karbon/epoksi kompozit malzemeleri kullanılan uçak yapılarındaki yapışma bağlantıları üzerine bir araştırma yapmıştır. TUSAŞ ile iş birliği içinde yürütülen bu çalışmada, kompozit malzemelerdeki yapışma bağlantılarını etkileyen parametrelerin anlaşılması ve bu bilgilerin uçak yapılarında uygulanması hedeflenmiştir. Çalışmada bindirme uzunluğu, yapıştırıcı türü, konfigürasyon, film yapıştırıcı kalınlığı, birleştirme tekniği ve ortam koşulları gibi birçok parametre incelenmiş olup, çevresel koşulların mukavemet üzerindeki etkisi de araştırılmıştır. Sonuçlar, film yapıştırıcı kalınlıklarının ortak yapışma yönteminde bağlantının taşıyabileceği yük miktarına neredeyse bir etkisinin olmadığını ancak ikincil yapışmada yapıştırıcı kalınlığının artmasının yük miktarının düşmesine sebep olduğunu göstermiştir. Bu durum, ikincil yapışma yönteminde yapıştırıcı kalınlığının artmasıyla yapıştırıcı içinde boşluk oluşma olasılığının artması olarak ifade edilirken, ortak yapışma yönteminde ise seçilen iki kalınlık değerinin de yapıştırıcı için optimum aralıkta olduğu belirtilmiştir. Konfigürasyonun etkisinin hasar modu ile doğrudan ilişkili olduğu bulunmuştur. Hasar modu adeziv veya kohezif şeklinde olduğundan, konfigürasyon etkisi oldukça düşük olmuştur. Ortak yapışma yönteminde, yapıştırıcı ile birlikte kürlenme yapıldığından, farklı termal genişleme katsayılarına bağlı gerilmeler oluşmamıştır. Ancak, ikincil yapışma yönteminde, yapıştırılacak iki malzemenin daha önce kürlenmiş olmaları nedeniyle, farklı termal genişleme katsayılarına bağlı termal gerilmeler ve farklı rijitliğe sahip örneklerin neden olduğu homojen olmayan yük akışı, bağlantının kesme mukavemetini etkilemiştir.

Encinas vd. [37] yapıştırıcı kullanılan uçak kompozitlerinin yüzey modifikasyonu üzerine çalışma yapmıştır. Bu çalışmada, kimyasal, fiziksel ve plazma yüzey işlemlerinin, yüzey enerjisine ve arayüzey kırılma tokluğuna etkisi karşılaştırılmıştır. Literatürden farklı olarak bu çalışmada, farklı yüzey hazırlama tekniklerinin yapışma üzerine etkileri, yüzeyler üzerindeki flor ve oksijen varlığının

etkileri ile birlikte incelenmiştir. Sonuç olarak, aşındırma tekniklerinin flor kirleticilerinin büyük bir kısmını kompozit yüzeylerden başarıyla çıkardığı gösterilmiştir. APT işlemi ile flor kirleticilerinin önemli miktarları ortadan kaldırılamazken, oksijen içeriğinde gözle görülür bir artış ve dolayısıyla daha yüksek yüzey enerjisi ile ıslanabilirlik elde edilmiştir. Çift Konsol Kiriş (DCB) testi, incelenen tüm hazırlama tekniklerinin (zımparalama, kuşlama ve APT) yapıştırıcı ile montaj için uygun yüzeyler oluşturduğunu ve her durumda alt tabaka içinde kohezif bir hata modu verdiğini göstermiştir.

Yang vd. [13], yüzey hazırlama işleminin karbon fiber takviyeli epoksi kompozit bağlantılarının çekme mukavemeti üzerine etkisini inceleyen bir çalışma yapmıştır. CFRP bağlantılarının yapıştırma mukavemetinin, zımpara ile yüzey işlemi yapılarak artırılması ve yüzey işleminin gerilme özellikleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Literatürden farklı olarak, tek bindirmeli bağlantıların (SLJ; Single Lap Joint) bağlantı mukavemetine mekanik kilitlenme ile adsorpsiyon etkisi karşılaştırmıştır. Sonuç olarak, tek bindirmeli bağlantı mukavemetine mekanik kilitlenme etkisinin, adsorpsiyon etkisinden daha büyük olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Mekanik kilitlemenin bağlanma mukavemeti üzerindeki etkisinin, uygulanan kuvvetin yönüne bağlı olduğu da belirtilmiştir. Ayrıca, en iyi yapıştırma performansının, yüzey rastgele yönde aşındırıldığında elde edildiği belirtilmiştir. Hem tek bindirme hem de geçme bağlantıları (scarf) için numunelerin gerilme mukavemeti, zımpara kâğıdının tanecik boyutunun artmasıyla önce artmış ve daha sonra biraz azalmıştır. Bağlantının gerilme mukavemeti ile yüzey pürüzlülüğü arasındaki ilişkinin orantılı olmadığı, optimum bir değere sahip olduğu belirtilmiştir.

Sorrentino vd. [17], karbon fiber takviyeli kompozitlerin yüzey işlemlerinin tek bindirmeli bağlantılara (SLJ) olan etkisi üzerine inceleme yapmıştır. Bu çalışmada, CFRP yüzeyine uygulanan işlemin, mekanik dayanım ve kırılma morfolojisi üzerindeki etkisi analiz edilmiştir. Özellikle tek bindirmeli bağlantı numuneleri hem film hem de macun yapıştırıcılarla hazırlanmıştır. Literatürden farklı olarak yapışma yüzey işleminin, tek bindirmeli bağlantıların mekanik dayanımı üzerindeki etkisi incelenirken, farklı tipte yapıştırıcılar da ele alınmıştır. Sonuç olarak, zımparalamaya tabi tutulan numunelerde AF163-2K (film) ve EA 9309NA (macun) yapıştırıcıları, kum püskürtmeye tabi tutulan numunelerde EA9309NA (macun)

EA934NA (macun) ve peel-ply ile muamele edilmiş numunelerde ise AF163-2K (film) yapıştırıcısı daha iyi mekanik direnç sergilemiştir. Peel-ply yönteminde, macun yapıştırıcı kullanılan yüzeylerin film yapıştırıcı kullanılan yüzeylere göre %50'ye kadar daha düşük bir bağlantı performansı oluşturduğu görülmüştür. Yüzey üzerinde soyulmuş kat liflerine ait parçaların varlığının, bu tür bir farklılaşmanın nedeni olabileceği ve bu nedenle macun yapıştırıcıların kullanımı durumunda aşındırıcı tekniklerin tercih edildiği belirtilmiştir.

Song vd. [47], tek bindirmeli birleştirilmiş kompozit bağlantıların kesme mukavemetine üretim yöntemlerinin etkisini incelemiştir. Daha önce literatürde kompozit üretim yöntemlerinin kompozit bağlantılarına etkileri bu kadar kapsamlı incelenmemiştir. Deneysel olarak, yapıştırıcı kullanılmadan birlikte kürlenme (CCN; Cocuring without Adhesive) ve ikincil bağlanma (SEB; Secondary Bonding) ile elde edilen bağlantıların diğerlerine göre daha yüksek mukavemet gösterdiği bulunmuştur. Özellikle, SEB bağlantıların mukavemeti, yapıştırıcı kullanılarak birlikte kürlenme ile hazırlanan (CCA; Cocuring with Additional Adhesive) bağlantıların mukavemeti ile hemen hemen aynı olmuştur ve birlikte kürlenme (COB; Co-Bonding) bağlantı yerleri, en düşük bağlantı mukavemetini vermiştir. Tek bindirmeli bağlantının (SLJ) eksantrik yüklenmesinden kaynaklanan bükme etkisi ile ilişkili olarak, artan laminant kalınlığının mukavemetin artmasına neden olduğu sonucu elde edilmiştir.

Park vd. [14], yüzey işlemi görmüş CFRP yapıştırıcı ile bağlı tek bindirmeli bağlantıların (SLJ) statik ve yorulma gerilmesi altındaki mukavemet ve hata modları üzerine bir çalışma yapmıştır. CFRP malzemeye uygulanan yüzey işlem yöntemlerinin yapışmaya etkisi, tek bindirmeli birleştirilmiş bağlantıların statik ve yorulma testleri, yüzey enerjisi hesaplamaları ve pürüzlülük ölçümleri ile değerlendirilmiştir. Literatürden farklı olarak bu çalışmada incelenen yüzey işlemi etkisi, tek bindirmeli bağlantıların (SLJ) statik ve yorulma mukavemetini kapsayacak şekilde genişletilmiştir. Sonuç olarak döngüsel yorulma testinde, bir milyon döngüde statik mukavemet koruması kumlama işlemi için %55,4, kum püskürtme için %47,5 ve peel-ply + kum püskürtme için %50,3 olarak hesaplanmıştır. Kumlama yüzey işlemi ile daha iyi yorulma dayanımı elde edilmesinin nedeni, yüzey pürüzlülük seviyelerinin optimum aralıkta olması olarak belirtilmiştir.

Zaldivar vd. [38], atmosferik plazma işlemlerinin grafit/epoksi kompozitlerin yüzey kimyası, morfolojisi ve mekanik özellikleri üzerindeki etkisini değerlendirmek için bir çalışma yapmıştır. Plazma işleminin, işlenmemiş numunelere göre mukavemeti %50'ye kadar arttırdığı gösterilmiştir. Bu iyileştirme, plazma geçiş sayıları ve kimyasal yüzey işlemleri ile ilişkilendirilmiştir. Çalışmada kullanılan plazma geçiş sayıları sırasıyla 0, 1, 3, 6, 12, 24 ve 48 olmuştur. AS4/E765 ile Hysol EA 9394'ün yapıştırıcı bağlantı gücünün, plazma işlemi geçişlerinin bir fonksiyonu olarak arttığı gösterilmiştir. 48 plazma geçiş sayısı sonrasında kontrol numunelerine göre yaklaşık %50'lik bağlantı mukavemeti artışı gerçekleşmiş ve 6 geçiş kadar kısa bir süre sonra %30'luk artış elde edilmiştir. Karboksil türü içeriğin, AS4/E765 kompozitleri için ölçülen bindirme kesme mukavemetindeki artışlarla ilişkili olduğu gösterilmiştir. Bu gelişmelerin, karboksil grupları ve epoksi içeren yapıştırıcı arayüzünde geliştirilmiş bağlanmadan kaynaklandığı düşünülmüştür. AFM ve SEM incelemeleri, plazma işleminin bir fonksiyonu olarak 6 geçişe kadar yüzey topografyasında minimum varyasyonlar olduğunu göstermiş; bu aralıktaki mukavemet iyileştirmelerinin mekanik bağlantıdan ziyade kimyasal bağlanmadan dolayı oluştuğu belirtilmiştir. 12 geçişten sonra mikroyapısal değişiklikler daha belirginleşmiş ve daha pürüzsüz bir yüzey oluşmuştur. Böylece mekanik kilitlenmeden kaynaklanan katkıları azaltan bir yüzey aşındırması elde edilmiştir.

Gilpin vd. [48], polietilen yüzeyler üzerinde çeşitli plazma işlemleri gerçekleştirerek farklı toplam yüzey enerjileri elde etmişlerdir. Plazma işleminde Plasmatreat RD1004 plazma jeti kullanılmıştır. Yüzey enerjisindeki tüm değişimin, yüzey enerjisinin polar bileşeni tarafından oluştuğu; dağıtıcı bileşenin ise yüzey işleminden etkilenmediği belirlenmiştir. Polietilen malzemelerin temas açısı ölçümleri için tek bir polar sıvının kullanımının, yüzey işleminin nicel göstergesi olarak kullanılabileceğini, ayrıca toplam yüzey enerjisi ile doğrusal korelasyon göstermesi nedeniyle toplam yüzey enerjisinin nicel bir ölçüsü olarak kullanılabileceğini de ortaya koymuştur.

Palmieri vd. [24], karbon fiber takviyeli epoksi kompozitlerin yapıştırıcı ile bağlanması için lazer ablasyon yüzey hazırlığı üzerine bir çalışma yapmıştır. Bu çalışmada tek bindirmeli bağlantıya sahip numunelerin yüzey hazırlığı Nd:YAG lazer kaynağı kullanılarak yapılmış, 71°C (160°F) ve %85 bağıl nem koşullarına maruz bırakılarak üç yıllık hızlandırılmış yaşlandırma çalışması ile mekanik

performansı değerlendirilmiştir. Literatürden farklı olarak, numuneler Nd:YAG lazer kaynağı ile yüzey işlemine tabi tutulmuş ve üç yıllık hızlandırılmış yaşlandırma çalışmasında mekanik performansı değerlendirmek için görünür kesme mukavemeti ve hata modları kullanılmıştır. Numunelerin su içeriği, yaşlanmanın ilk 200 gününde hızla artmış ve ardından yaklaşık 500 günde grafikte plato haline gelmiştir. Görünür kesme mukavemetindeki en dik düşüş, su içeriğindeki en yüksek artışa karşılık gelmiştir. Ancak hata modu aynı eğilimi takip etmemiştir. Bu durum, yapıştırıcı/yapışan ara yüzünün yaşlandırma işlemi sırasında bozulmadığını ancak yapışan malzemeye nem girişi ile görünür kesme mukavemetinin azaldığını göstermiştir.

Yang vd. [49], ultrasonik titreşim destekli işlemin CFRP yapışma bağlantılarının mod I kırılma tokluğu üzerindeki etkisi üzerine bir çalışma yapmıştır. Ultrasonik işlem süresinin farklı yapıştırıcılar ile yapıştırılan bağlantıların mod I kırılma tokluğuna etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Literatürden farklı olarak, ultrasonik titreşim destekli işlemin, CFRP bağlantılarının mod I kırılma tokluğunu önemli ölçüde iyileştirebileceği ve işlem süresinin önemli bir faktör olduğu gösterilmiştir. Sonuç olarak, ultrasonik titreşim destekli işlemin, geçici olarak yapıştırıcının viskozitesini azaltabileceği yani akışkanlığını arttırabileceği gösterilmiştir. Ayrıca ultrasonik titreşimin, substratları temizleyebileceği, substratların ıslanabilirliğini geliştirebileceği ve yapıştırıcının substrat mikroyapısına nüfuz etmesini sağlayabileceği de gösterilmiştir. Bu etkilerin, yapıştırıcı ile bağlanmış yapıların kırılma dayanımını önemli ölçüde iyileştirebildiği de gösterilmiştir. DP270 yapıştırıcı ile bağlanan yapılar için ortalama mod I kırılma enerjisi  $G_{IC}$ , işlem süresi arttıkça önce artmış ve sonra hafifçe azalmıştır.  $77,48 \text{ J/m}^2$  optimum  $G_{IC}$  değeri, 20 dakika süreyle ultrasonik işlemeyle elde edilmiş ve işlenmemiş örneklere göre %52 oranında artmıştır. Araldite 2015 yapıştırıcı ile yapıştırılan bağlantılar için ortalama mod I kırılma enerjisi  $G_{IC}$ , işlem süresi arttıkça artan bir eğilim göstermiştir.  $278,93 \text{ J/m}^2$  optimum  $G_{IC}$  değeri, 60 dakika boyunca ultrasonik olarak işlemeyle elde edilmiş ve işlenmemiş örneklere göre %38,3 oranında artış elde edilmiştir. Farklı ajanlarla yapıştırılmış bağlantıların kırılma morfolojisi de bu çalışmada analiz edilmiş ve bağlantıların çeşitli kırılma modlarının alanları hesaplanmıştır. DP270 yapıştırıcı ile yapıştırılan bağlantılar için işlem süresi 20 dakika olduğunda, kohezyon hatası alanı yüzdesi %69,12 olarak belirlenmiştir.

Araldite 2015 yapıştırıcı ile yapıştırılan bağlantılar için işlem süresi 60 dakika iken, uygun kırılma modu alanı maksimum %95,63 değerine ulaşmıştır ve en yüksek kırılma enerjisine karşılık gelmiştir.

Saraç [50], metal ve kompozit bağlantıların yapıştırılmasında yapışma performansını etkileyen parametrelerin incelendiği bir çalışma gerçekleştirmiştir. TUSAŞ ile yürütülen bu çalışmada, kompozit parçaların yapıştırılmasında kullanılan yüzey hazırlama yöntemleri teorik olarak değerlendirilmiş ve kompozit numunelere peel-ply, scotchbrite, kumlama, #80 ve #400 numara zımparalama yöntemleri uygulanmış ve bu yüzey hazırlama yöntemlerinin yapışma performansı üzerindeki etkileri tespit edilmiştir. Sonuçlar, yüzeyde mevcut olabilecek kirlerin uzaklaştırılmasında aseton kullanımının kuru bezle temizlemeye göre çekme testinde daha iyi sonuçlar verdiğini göstermiştir. Ayrıca, yüzeye uygulanan aşındırma işlemlerinin hassasiyeti arttıkça, yüzey yapışmaya daha uygun hale gelmiş ve daha yüksek mukavemet değerleri ölçülmüştür. Yüzey hazırlama yöntemi ve kullanılan malzemeye bağlı olarak yapıştırılacak parçaların, farklı yapışma performansları gösterdiği gözlemlenmiştir. Yapışma yüzeyinde oluşabilecek nemlenmenin, yağlanmaya göre yapışma performansını daha fazla düşürdüğü tespit edilmiştir. Yapışma uzunluğunun 12,5 mm değerinden 25,4 mm değerine artırılması, ortalama %71 oranında daha yüksek çekme mukavemeti değeri vermiştir. Yüzey hazırlama yöntemlerinin yetersiz olduğu durumlarda, kırılmanın yüzeyden kaynaklandığı saptanmıştır. Havacılık sanayinde yaygın olarak kullanılan peel-ply ile hazırlanan örneklere yapılan çekme testlerinin daha yüksek değerler vermesi beklenirken, sonuçlar ortalama değerlere benzer çıkmıştır.

Tiwari vd. [11], karbon fiberlerin yüzey işlemleri üzerine bir inceleme yapmıştır. Bu çalışmada, karbon fiber yüzeyini işlemek için kullanılan çeşitli yöntemlere yoğunlaşmış ve lif özelliklerinde meydana gelen fiziksel, kimyasal ve morfolojik değişiklikler hakkında ayrıntılı bilgiler verilmiştir. Karbon fiberlerin çeşitli matrislere yapışmasını geliştirmek için yüzey işleminin gerekli olduğu sonucuna varılmıştır. Yüzey işlemleri ile ilgili aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

- Yüzey işleme, morfolojiyi değiştirmiş ve lif yüzeyinin pürüzlülüğünü arttırmış olup, artan pürüzlülük ise fiber ile matris arasındaki etkileşimi iyileştirmeye yönelik olarak fiber yüzeyindeki yüzey alanını arttırmıştır.
- Yüzey işleme, liflerin kimyasal yapısını etkilemiş ve matris ile kimyasal bağlanmayı arttırmıştır.
- Farklı yüzey işlemlerinin fiber yüzeyi üzerinde farklı etkileri olduğu, uygulamaya ve istenen özelliklere uygun yöntemi seçmek için optimizasyonun gerekli olduğu belirtilmiştir.

Martínez vd. [19], karbon fiber takviyeli kompozit bağlantılara uygulanan yüzey işlem tipinin yapısal yapıştırıcı ile bağlanma etkinliği üzerine inceleme yapmışlardır. Çalışmada, kompozit malzemelere uygulanan farklı yüzey hazırlama işlemlerinin değerlendirilmesi ve kompozit bağlantıların mekanik özelliklerine etkilerinin incelenmesi amaçlanmıştır. Farklı yüzey işlemlerinin, temas açısında azalmaya ve yüzey geriliminde artışa neden olduğu, kompozit yüzeyin hidrofilik davranışında ise bir iyileşme oluşturduğu gözlenmiştir. Sonuç olarak, peel-ply ve zımparalama işlemleri ile daha yüksek yüzey pürüzlülüğü ve yüzey zenginliği elde edilmiştir. En iyi mekanik sonuçları peel-ply ve kumlama işlemlerinin verdiği belirtilmiş, asitle dağlama işlemine dair gelecekte daha detaylı çalışılması gerektiği vurgusu yapılmıştır.

Özel vd. [51], yapıştırılmış farklı yüzey (kompozit-metal) bağlantılarının mukavemeti üzerine bir çalışma yapılmıştır. Farklı tip alt ve üst yapışan yüzey konfigürasyonlarına sahip yüzeylerin çekme yükü altındaki mekanik özelliklerini incelemiştir. Çalışma, kompozit yapıştırma geniş parametre aralığı ve sayısal analiz programı kullanımını nedenleriyle literatürden farklılaşmıştır. Tek bindirmeli bağlantı (SLJ) uzunluğundaki artış, kompozit-kompozit veya metal-metal bağlantılarında yük taşıma kapasitesini arttırmıştır. Farklı yüzey kalınlıklarındaki mukavemet değerleri ve metal-metal kalınlığındaki azalma, bağlantının maksimum yükünü önemli ölçüde etkilememiştir ancak kompozit-metal bağlantısında üst yapışan yüzey kalınlığındaki azalma, bağlantının maksimum yükünü önemli ölçüde etkilemiştir. Bu sonuç, yapışan yüzey kalınlığına bağlı olarak bağlantı ve bükülme sertliğinde oluşan moment etkisine bağlanmıştır.

Li vd. [52], çekme yüklerine maruz kalan yapıştırılmış CFRP bağlantılar üzerine deneysel çalışmalar yapmıştır. Çalışmada, farklı bindirme parametrelerinin (tek, çift ve geçme tipi), yapıştırıcı ile bağlanmış CFRP bağlantılarının bağ mukavemeti ve kırılma modu üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Sonuç olarak, SLJ için yük-yer değiştirme eğrilerinin, eksantrik yüklemenin neden olduğu eğilme etkisine bağlı olarak yapışma kalınlığındaki artışla birlikte hafifçe doğrusal olmayan davranış eğilimi gösterdiği tespit edilmiştir. Çift bindirme bağlantısı (DLJ; Double Lap Joint) için yük-yer değiştirme eğrilerinin doğrusal olduğu ve nihai kopma yükünün, yapıştırıcının genişliği ile doğru orantılı değiştiği ancak yapıştırıcının kalınlığı ile doğru orantılı değişmediği saptanmıştır. Bununla birlikte, bindirme kesme mukavemetinin, yapıştırıcının genişliği ve kalınlığı ile doğru orantılı değişmediği gözlemlenmiştir. Geçmeli bağlantılar için yük-yer değiştirme eğrileri de doğrusal olarak tespit edilmiştir. Geçme açısı 8,13 dereceden az olduğunda, bindirme kesme mukavemeti ile geçme açısı arasındaki ilişkinin yaklaşık olarak doğrusal olduğu, bununla birlikte, geçme açısı 8,13 dereceyi aştığında bindirme kesme mukavemetinin neredeyse sabit olduğu belirlenmiştir. Bindirme kesme mukavemetinin, yapışma kalınlığı arttıkça hafif bir azalma gösterdiği belirtilmiştir. Üç farklı bindirme türü, benzer parametrelerle karşılaştırılmıştır. Çift bindirmeli bağlantının en yüksek nihai hata yüküne ve geçme tipi bindirme bağlantısının ise en yüksek bindirme-kesme mukavemetine sahip olduğu rapor edilmiştir. Ayrıca, elde edilen bağlantı ağırlığına göre geçmeli bağlantı tipi en verimli olarak hesaplanmıştır.

Gude vd. [53], yapıştırıcı ile bağlanmış karbon fiber/epoksi laminantların, yüzey ve mekanik özellikleri arasındaki ilişkinin incelenmesi üzerine bir çalışma yapmıştır. Bu çalışmada, substratlar kullanılarak hazırlanan bağlantıların yüzey özellikleri (topografik ve kimyasal) ile mekanik davranışı arasında bir korelasyon oluşturulmuş ve farklı test modları için hangilerinin daha uygun olduğu belirlenmiştir. Yüzey pürüzlülük tepelerin yoğunluk ve keskinliklerinin, mekanik kilitlenme üzerinde ortalama pürüzlülük ve yüzey alanından daha fazla etkiye sahip olduğu tespit edilmiştir. Sonuç olarak, karbon fiber/epoksi laminantların yüzey özelliklerinin mekanik özellikleri ile karşılaştırmalı analizi birkaç korelasyonun kurulmasına izin vermiştir. Bindirme kesme mukavemeti, yüzey serbest enerjisinin polar bileşeni ile artmış, ortalama pürüzlülük ( $R_a$ ) ve yüzey alanı ile azalmıştır.

Diğer yandan, mod I kırılma enerjisi, tepelerin yoğunluğu ( $R_{ds}$ ) ve ortalama tepe eğriliği ( $R_{sc}$ ) ile orantılı olarak artmıştır. Bu nedenle, tek bindirmeli bağlantılardaki ana yapışma mekanizmalarının büyük olasılıkla yüzeyin kimyasal bileşiminden (absorpsiyon ve kimyasal bağlanma) etkilendiği, çift dirsekli kiriş bağlantılarında ise mekanik kilitlemenin baskın olduğu sonucuna varılmıştır.

Literatürdeki çalışmalar, atmosferik basınçlı plazma yüzey işleminin ikincil yapıştırılmış kompozit bağlantılar üzerindeki kısa süreli etkilerini araştırmaya odaklanmıştır. Bu nedenle, havacılık sınıfı film yapıştırıcı ile birleştirilmiş CFRP bağlantılarının uzun süreli dayanıklılığını anlamada önemli bir boşluk bulunmaktadır. Ayrıca, atmosferik basınçlı plazma yüzey işlem parametrelerinin vakum torbalama yöntemi kullanılarak otoklavda üretilen kompozit malzeme yüzeylerinin (kalıp ve torba tarafları) dokusunu nasıl etkilediği ile ilgili kapsamlı bir çalışmaya da ihtiyaç duyulmaktadır. Bu boşlukları gidermek amacıyla, farklı atmosferik basınç plazma işlem parametrelerinin ve diğer yüzey işlem tekniklerinin havacılık sınıfı film yapıştırıcı ile birleştirilmiş CFRP bağlantılarının mekanik davranışı üzerindeki etkisini değerlendirmek ve yüzey özelliklerini topografik ve kimyasal açılardan dikkate alarak hangi parametrelerin daha önemli olduğunu belirlemek için deneysel bir araştırma yapılmıştır. Tez çalışması kapsamında, atmosferik basınçlı plazma işleminin yüzey etkinliği, temas açısı ölçümleri, yüzey enerjisi hesaplamaları, FTIR-ATR, XPS, AFM, Profilometre ve SEM karakterizasyon teknikleri kullanılarak incelenmiş ve geleneksel yöntemlerle sistematik olarak karşılaştırılmıştır. Kompozit-epoksi sisteminin kesme dayanımını tespit etmek ve hasar modlarını incelemek için tek bindirmeli bağlantı testi, yüzey hazırlama tekniklerinin bağlantı dayanımı üzerindeki uzun süreli performanslarını değerlendirmek amacıyla Kama Testi (WT) uygulanmıştır.

## **1.2 Tezin Amacı**

Sunulan tez çalışması; halen geliştirilmekte olan atmosferik basınçlı plazma proses parametrelerinin havacılık endüstrisinde kullanılan CFRP-epoksi yapıştırıcı montaj süreçlerine uygun olarak optimize edilmesini, atmosferik basınçlı plazma yüzey hazırlama tekniğinin etki mekanizmasının yüzey karakterizasyon çalışmaları ile incelenmesini ve yüzey hazırlama tekniklerinin hızlandırılmış yaşlandırma koşulları altındaki sistemin uzun süreli dayanıklılığına etkilerinin incelenmesini amaçlamaktadır.

İlk aşamada, üretilen CFRP malzemesine en uygun atmosferik basınçlı plazma parametrelerinin tespit edilmesi için plazma nozul hızı, plazma nozul-yüzey mesafesi ve geçiş sayısı parametrelerinin; su ve diiyodometan temas açısı ölçümleri ile yüzey enerjisi hesaplamaları kullanılarak optimize edilmesi amaçlanmaktadır. Bu sayede APT ile yüzey daha hidrofilik hale getirilerek, CFRP yüzey ile epoksi film yapıştırıcı arasında kimyasal bağlanmanın artırılması ve bağlantı mukavemetinin hem kısa hem de uzun süreli performansının iyileştirilmesi hedeflenmektedir.

İkinci aşamada, uygulanan APT proses parametreleri ile peel-ply ve IPA gibi yüzey hazırlama tekniklerinin, yüzey işlemi öncesi ve sonrası CFRP-epoksi arayüzlerinin kimyasal bileşimi, fonksiyonel grupları, morfolojisi ve topografyasında meydana getirdikleri tüm etkilere ait mekanizmaların kapsamlı olarak incelenmesi amaçlanmaktadır.

Çalışmanın son aşamasında ise yüzey hazırlama tekniklerinin uzun süreli bağlantı dayanıklılığı üzerindeki etkisini incelemek amacıyla kompozitler için henüz geliştirme aşamasında olan kama testinin (Wedge Test) gerçekleştirilmesi hedeflenmektedir. Ayrıca, kompozit bağlantılarının kırılma yüzeylerinin hasar modlarının incelenmesi çalışmanın bir diğer hedefini oluşturmaktadır.

### **1.3 Tezin Hipotezi**

Havacılık ve uzay sanayiinde yüzey hazırlığı için geleneksel olarak kullanılan peel-ply yöntemi, zaman alıcı bir süreç olması yanında nitelikli işgücü de gerektiren bir süreçtir. Bu çalışmada önerilen atmosferik basınçlı plazma yüzey işlemi, yenilikçi bir yaklaşım sunarak peel-ply yöntemine kıyasla yüzey hazırlık sürecini hızlandıracak ve bağlantıların mekanik performanslarını kısa ve uzun vadede yaklaşık %20-25 oranında iyileştirebilecektir. Ayrıca, bu yöntem peel-ply atıklarını sıfıra indirgeyerek çevre dostu bir alternatif sunacak ve sıfır atık hedeflerine ulaşılmasına önemli ölçüde katkı sağlayacaktır. Optimizasyonu yapılmış atmosferik basınçlı plazma yüzey işlemi, Türkiye'nin havacılık endüstrisinde stratejik değeri yüksek parçaların montaj işleminde kullanılarak komponent çeşitliliğini artırmanın yanı sıra, mevcut üretim süreçlerinin kısaltılmasını da sağlayabilecek ve ürün kalitesinde önemli iyileşmelere yol açabilecektir.

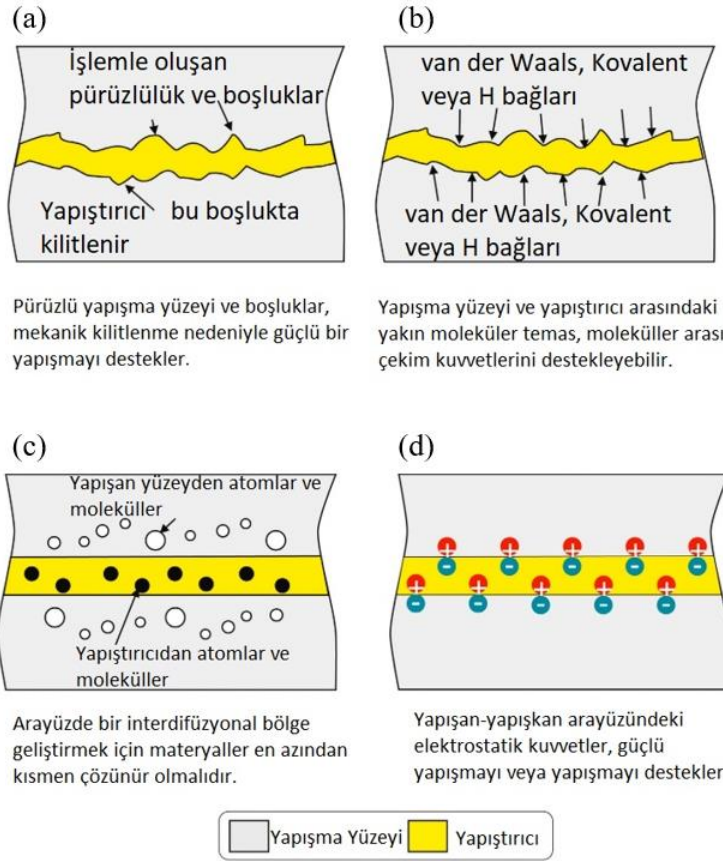
Kompozit malzeme ve yapıştırıcı sisteminin çevresel koşullara ve yaşlandırmaya karşı mekanik performansını değerlendirmek için geliştirilen kama testi özellikle havacılık gibi sektörlerde kritik öneme sahiptir. Çünkü bu alanda kullanılan yapıştırıcı bağlantıların uzun süreli güvenilirliği ve dayanıklılığı esastır. Bu geliştirilmiş yöntem, yapıştırıcı birleşim yerlerinde meydana gelen çatlak ilerlemesinin ve yapışma kaybının erken belirlenmesini sağlayarak, havacılık ve otomotiv sektörlerinde kullanılan yapıştırıcı sistemlerin daha güvenli ve dayanıklı olmasına katkıda bulunacaktır.

Yeni teknolojilerin geliştirilmesi, bu alandaki yüzey hazırlama çeşitliliğini arttıracak ve farklı ürün tipleri için optimum yüzey hazırlama tekniklerinin bulunmasına yardımcı olacaktır. Bu sayede, farklı yapılara özgü en etkili yüzey hazırlama tekniklerinin belirlenmesi mümkün hale gelecek ve maliyet-etkin üretim stratejileri geliştirilebilecektir.

**2.1 Yapışma Teorisi**

Yapışma, yapıştırıcı ve yapışma yüzeylerin arayüzeylerinde meydana gelen bir olgudur [54]. Tarihi olarak, yapışma mekanizmalarını açıklamak için mekanik kilitleme, difüzyon, adsorpsiyon ve yüzey reaksiyonu ile elektrostatik teoriler ortaya atılmıştır. Yapışma, tamamen tek bir mekanizmaya bağlı olmaktan ziyade, belirli bir yapıştırıcı sistem içinde birden fazla mekanizmanın birleşimiyle gerçekleşir ve her bir mekanizmanın rolü, farklı sistemler için değişiklik gösterebilir. Son yıllarda, yapışma mekanizması için başka teoriler de ileri sürülmüştür. Yapışma mekanizmalarının anlaşılması, malzeme bilimi, mühendislik ve birçok endüstriyel uygulama için hayati öneme sahiptir. Bu mekanizmaları anlamaya yardımcı olmak amacıyla her bir mekanizma bir etki ölçeği ile gösterilmiştir (Tablo 2.1). Mekanik kilitlemede mikroskobik parametre, yapıştırıcı ve yapışan maddenin temas yüzey alanıdır. Yapışan yüzeyin özgül yüzey alanı (örneğin; birim ağırlık başına yüzey alanı) bu tür bir ölçüme örnek olarak verilebilir. Kilitlemenin çalıştığı düşünülen yüzey pürüzlülüğü, optik veya elektron mikroskobu ile tespit edilebilmektedir. Elektrostatik mekanizmada ise etki eden makroskobik faktör yüzey yüküdür. Bu duruma, yün bir bezle ovulduktan sonra bir cam çubukta üretilene yük örnek olarak verilebilir. Difüzyon ve ıslanabilirlik, sırasıyla moleküler ve atomik ölçekli etkileşimleri içermektedir. Bu mekanizmalar Şekil 2.1 (a-d) kapsamında şematik olarak gösterilmiştir.

Mekanik kilitleme [Şekil 2.1 (a)]; yapıştırıcının, yapışan yüzeyin pürüzlü veya gözenekli yüzeyine nüfuz etmesiyle meydana gelir ve bu sayede yapıştırıcı ile yapışan arasında mekanik kilitleme (anahtarlama) sağlanır [55]–[57].



**Şekil 2.1** Yapışma mekanizmaları ve fenomenoloji: (a) mekanik kilitleme, (b) adsorpsiyon/kimyasal bağlanma, (c) difüzyon, (d) elektrostatik yapışma [3]

Adsorpsiyon/kimyasal bağlanma [Şekil 2.1 (b)]; yapıştırıcı ve yapışan maddelerdeki moleküllerin atomları arasındaki çekim kuvvetleri nedeniyle moleküller arası bağların oluşumunu içermektedir [55], [58]–[60]. Bu kuvvetler, birincil bağlar (kovalent, iyonik, metalik), ikincil bağlar (hidrojen ve Van der Waals) ve asit-baz etkileşimleri tarafından üretilmektedir.

Difüzyon [Şekil 2.1 (c)]; iki yüzeyden gelen atom veya moleküllerin birbirine karşılıklı olarak difüze olması ile gerçekleşir, böylece başlangıçtaki sınır, yeni bir difüzyon sınırı veya ara faz ile değiştirilir [55], [61]. Güçlü bir yapışma elde etmek için her iki yüzeyden gelen uzun zincirli moleküllerin hareketli, uyumlu ve karışabilir olması gerekmektedir [57], [59].

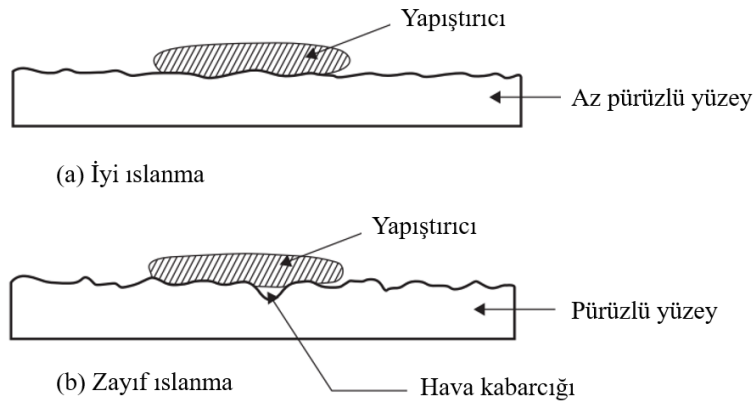
Elektrostatik yapışmada [Şekil 2.1 (d)]; yüzeyler temas ettiğinde bir yüzeyden diğerine elektron transferi olduğu öne sürmektedir. Sonuç olarak, pozitif ve negatif yüklü katmanlardan oluşan çift katmanlı bir sistem oluşur ve bu da çekim kuvvetlerini ortaya çıkarmaktadır [60].

**Tablo 2.1** Yapışma teorileri [62]

Geleneksel	Son Gelişmeler	Aksiyon Boyutu
Mekanik Kilitleme	Mekanik Kilitleme	Mikroskobik
Elektrostatik	Elektrostatik	Mikroskobik
Difüzyon	Difüzyon	Moleküler
Adsorpsiyon/Yüzey Reaksiyonu	Islanabilirlik	Moleküler
	Kimyasal Bağlanma	Atomik
	Zayıf Sınır Tabakası	Moleküler
	Asit-Baz	Moleküler

### 2.1.1 Islanma Teorisi

Islanma teorisi, yapışmanın iki malzemenin moleküler temasından ve aralarındaki yüzey çekim kuvvetlerinden kaynaklandığını öne sürmektedir. Bağ oluşumunun ilk adımı, alt tabakalar ile yapıştırıcı arasında arayüzey kuvvetlerini geliştirmektir [63]. Yapıştırıcı ile yapışan madde arasında sürekli temasın sağlanması sürecine “ıslanma” denmektedir [62]. Bir yapıştırıcının katı bir yüzeyi ıslatabilmesi için, yapıştırıcının yüzey geriliminin katının kritik yüzey geriliminden daha düşük olması gerekmektedir; bu durum, polimerlerin yüzey işlemlerinin esas sebebi olmuştur. Van der Waals kuvvetleri, moleküller arasındaki mesafeye son derece duyarlı olmaktadır [64]. Şekil 2.2, bir yüzey üzerinde yayılan yapıştırıcının iyi ve zayıf ıslanmasını göstermektedir [54]. Yapıştırıcı, alt tabaka yüzeyindeki vadilere ve çatlaklara aktığında “iyi ıslanma” gerçekleşmektedir. Yapıştırıcı vadilerin üzerinden köprü oluşturduğunda ve yapıştırıcı ile yapışan arasındaki gerçek temas alanını azalttığına “zayıf ıslanma” meydana gelmektedir ve bu da genel bağlantı dayanıklılığını düşürmektedir [65]. Zayıf ıslanma, arayüzey kusurları oluşturarak yapışma bağlantı dayanıklılığını azaltmaktadır. Tam ıslanma ise en yüksek bağlantı dayanıklılığını sağlamaktadır.



**Şekil 2.2** Bir yüzeye yayılan yapıştırıcının iyi ve zayıf ıslanma örnekleri [66]

### 2.1.2 Kimyasal Bağlanma

Bu mekanizma, yapışma bağının gerçekleşmesini yüzey kimyasal kuvvetlerine dayandırmaktadır. Yapışan maddeler ile yapıştırıcı arasında oluşan hidrojen, iyonik ve kovalent bağların, dispersif kuvvetlerinin çekici kuvvetlerinden daha güçlü olduğu bilinmektedir [62]. Bu kuvvetlerin ve büyüklüklerinin bir listesi Tablo 2.2’de gösterilmiştir. Genel olarak, kimyasal bağlanma sırasında dört tür etkileşim meydana gelmektedir; kovalent bağları, Lifshitz-Van der Waals kuvvetleri, hidrojen bağları ve asit-baz etkileşimleri.

**Tablo 2.2** Lifshitz-Van der Waals ve kimyasal bağ enerjilerine örnekler [54]

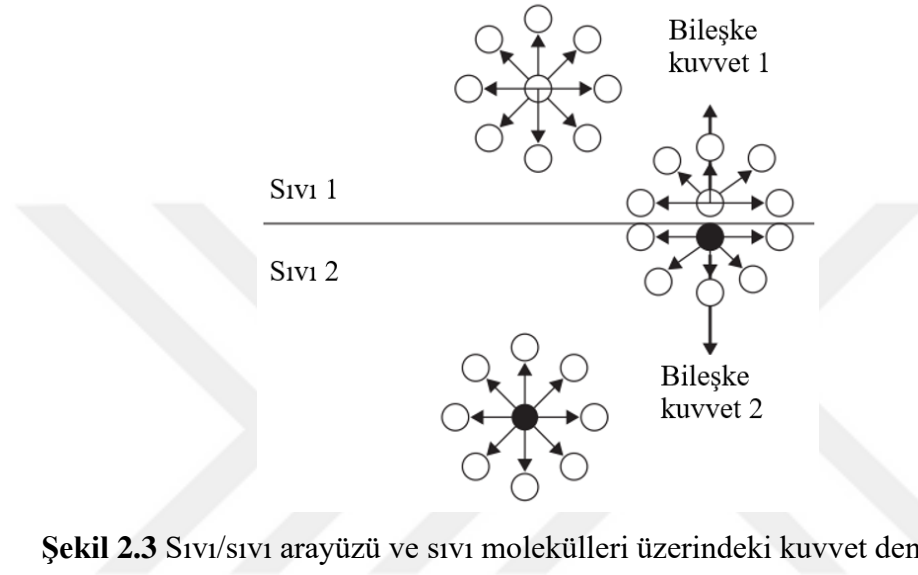
Tür	Bağ Türleri	E (kJ/mol)
Kovalent	C-C	350
İyon-İyon	Na+...Cl-	450
İyon-Dipol	Na+...CF <sub>3</sub> H	33
Dipol-Dipol	CF <sub>3</sub> H...CF <sub>3</sub> H	2
London Dispersiyon	CF <sub>4</sub> ...CF <sub>4</sub>	2
Hidrojen Bağı	H <sub>2</sub> O...H <sub>2</sub> O	24

Kovalent ve iyonik bağlar, kimyasal bağlanmanın örnekleri olup, ikincil kuvvetlerin sağladığı yapışma değerlerinden çok daha yüksek yapışma değerleri sağlamaktadır [67]. Kovalent bağlar, arayüzey boyunca oluşabilir ve termoset kaplamalarda ve çapraz bağlı yapıştırıcılarda meydana gelme olasılığı yüksektir. Bu bağlar genellikle gücü ve dayanımı en yüksek olanlardır [54]. Buna karşın, karşılıklı olarak reaksiyona girebilen kimyasal grupların mevcut olmasını gerektirmektedir. Plastiklerin yüzey hazırlama teknikleriyle, (örneğin; plazma, korona veya alev) bu koşulları bilinçli olarak oluşturmanın yolları bulunmaktadır [3].

### 2.1.3 Arayüzey, Yüzey Gerilimi ve Yüzey Enerjisi

Arayüzey, iki farklı fazın temas ettiği, her iki tarafında da atomlar/moleküller bulunan kalınlığı 0,1 µm değerinden daha az olan düzlem veya bölge olarak tanımlanmaktadır. Arayüzeydeki parçacıklar, faz sınırında bulunmaları ve karşı fazın parçacıklarıyla etkileşimde olmaları nedeniyle enerjik olarak her fazın iç kısmındaki parçacıklardan farklılık göstermektedir. Sıvıların molekülleri, çekici kuvvetlerle bir arada tutulmaktadır. Bir sıvının kütesinde bulunan herhangi bir moleküle etki eden tüm çekici kuvvetlerin toplamı sıfıra eşit olmaktadır. Şekil 2.3’te gösterildiği gibi bir yüzey molekülüne etki eden net kuvvet (aynı

zamanda kohezyon kuvveti olarak da bilinmektedir), kütleye doğru olan yönde sıfırdan farklı bir büyüklük göstermektedir. Bu kuvvet, yüzey alanını arttırmak için karşı konulması gereken kuvvettir; bu süreçte harcanan enerjiye “yüzey enerjisi” denmektedir. Arayüzeydeki dengede olmayan kuvvetler, yüzey alanını minimum değere düşürecek şekilde büzölmeye neden olmaktadır. Bu nedenle, su damlacıkları küreseldir çünkü küre, verilen bir hacim için tüm şekiller arasında en küçük yüzey alanına sahiptir.



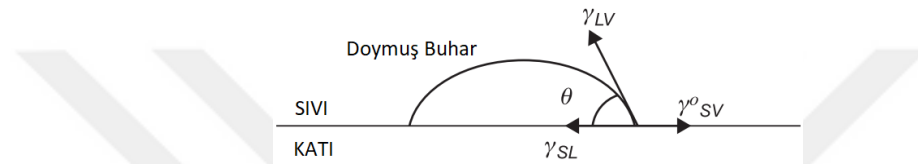
**Şekil 2.3** Sıvı1/sıvı2 arayüzü ve sıvı molekülleri üzerindeki kuvvet dengesi [62]

Yüzey gerilimi ( $\gamma$ ), birim alan başına yüzey enerjisi olarak ve birim uzunluk başına kuvvet olarak ifade edilmektedir [68]. Sıvıların yüzey gerilimi doğrudan ölçülebilir ve birim alan başına iş veya enerji birimlerinde ifade edilebilir ( $\text{erg/cm}^2$ ). Polimerlerin yüzey gerilimi, arayüzeylerdeki çekim kuvvetlerinin türünü dikkate almak için iki bileşene ayrılabilir: polar yüzey gerilim ( $\gamma^p$ ) ve dağılım yüzey gerilimi ( $\gamma^d$ ) [69]. Yüzeyin kimyasal bileşimi, her bileşenin yüzey gerilimine katkısının belirlenmesinde rol oynamaktadır. Polar bileşen; hidrojen bağları, dipol enerjisi ve indüksiyon enerjisi gibi çeşitli polar moleküler etkileşimlerden oluşmaktadır. Dispersiyon bileşeni ise London Dispersiyon çekimlerinden kaynaklanmaktadır. Çekim kuvvetleri (Van der Waals ve London Dağılım Kuvvetleri) toplanabilir nitelikte olduğundan, yüzey gerilimi bileşenleri de Denklem 2.1'deki gibi toplanabilir:

$$\gamma = \gamma^p + \gamma^d \quad (2.1)$$

### 2.1.4 Temas Açısı (Young Denklemi)

Çoğu sıvı, katı yüzeyleri ıslatır ve bir temas açısı ( $\theta$ ) oluşturur. Temas açısı ( $\theta$ ), bir sıvı damlacığı ile katı bir yüzey arasında oluşan açıdır.  $\theta = 0^\circ$  mükemmel ıslanmayı temsil ederken,  $\theta < 90^\circ$  hidrofilik yüzeyi (iyi ıslanabilirlik) ve  $\theta > 90^\circ$  hidrofobik yüzeyi (kötü ıslanabilirlik) temsil etmektedir. Temas açısı, küçük bir sıvı (su, gliserol, formamid, diiyodometan veya etilen glikol) damlasının katı bir yüzeye damlatılması ve bir optik mikroskop kullanılarak damlanın yan görüntüsünün alınması yoluyla ölçülebilir [70]. Daha sonra bu görüntü kullanılarak  $\theta$  büyüklüğü tahmin edilir. Şekil 2.4, katı yüzeyin homojen, düzgün ve rijit olduğu ideal bir sistemdeki temas açısını ifade etmektedir.



Şekil 2.4 İdeal bir yüzeyde denge temas açısı [54]

$\gamma$  ile gösterilen arayüzey gerilimleri, üç fazın kesiştiği noktadaki denge değerlerini temsil etmektedir. Alt simgeler L, S, V sırasıyla sıvı, katı ve buhar fazlarını ifade etmektedir.  $\gamma^\circ$  göstergesi, katı yüzeyin sıvının doymuş buharı ile dengede olma durumunu belirtmek için kullanılmaktadır. Young [71], Denklem 2.2 ile bu durumu açıklamıştır.

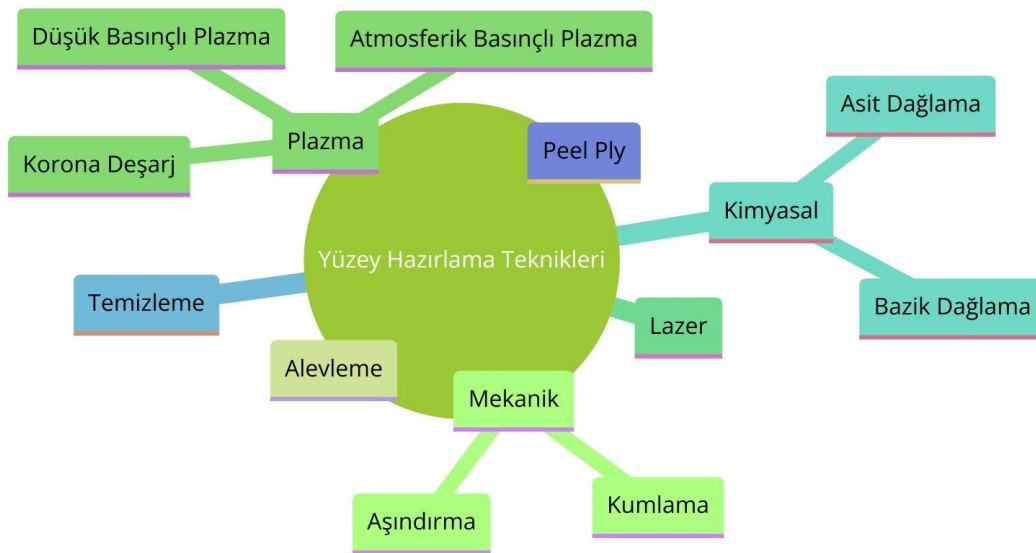
$$\gamma_{LV} \cdot \cos\theta = \gamma_{SV}^\circ + \gamma_{SL} \quad (2.2)$$

## 2.2 Yüzey Hazırlama Teknikleri

Yapıştırıcılı montaj işlemlerinde yüzey hazırlık işlemi, gereken yüzey hazırlama yöntemlerinin malzemeye özgü doğası nedeniyle karmaşık bir süreç içerir. Yapıştırıcı bağlama bir yüzey olgusu olduğundan, başarılı bir yapışma için yapıştırıcı bağlama öncesinde yapılan yüzey hazırlıkları kritik öneme sahiptir. Yüzey hazırlık işlemi, yapışan yüzeylerin güçlü ve dayanıklı bağlantılar oluşturacak şekilde hazırlanmasını sağlamaktadır [72]. Yapışan malzemenin doğrudan yapıştırıcı ile temasının, oksit film, boya, kaplama veya üretimden gelen salım ajanları gibi ara katmanlar olmadan sağlanması arzu edilmektedir. Bu tür katmanlar zayıf sınır tabakaları olarak adlandırılmakta olup, bu tabakaların varlığında yapıştırıcı doğrudan yapışan yüzeyle temas etmemektedir [54], [73].

Yüzey enerjileri açısından metaller ve plastikler arasındaki en önemli fark, polimerlerin doğal olarak metallerden daha düşük yüzey enerjisine sahip olması ve herhangi bir işlem görmeden zayıf yapışma bağları oluşturma eğiliminde olmasıdır [74], [75]. Yüzey işlemi sadece yüzeye yakın bölgeyi etkilemekte ve plastik parçaların kütesel özelliklerini değiştirmedeği bilinmektedir. Plastiklerin yüzeyinde, yüzey işlem yöntemlerinin uygulanmasıyla meydana gelen değişiklikler, temizleme, aşındırma, çapraz bağlama ve yüzey kimyasal modifikasyonu (en yaygın olarak oksidasyon) gibi dört sürecin sonucunda olmaktadır [76].

Şekil 2.5'te yaygın yüzey işlem yöntemleri verilmiştir. Bunların arasında güncel çalışma konularından korona, alev ve plazma işlemi ile yüzey modifikasyonları da bulunmaktadır; tümü plastiklerin yüzey enerjisini arttırmak için kullanılmaktadır.



**Şekil 2.5** Plastiklerde yaygın kullanılan yüzey hazırlama teknikleri [54]

Yüzey hazırlık teknikleri son derece aktif bir araştırma alanı olduğundan, metalik ve kompozit bağlantılar üzerine etkileri birçok çalışmada detaylı olarak gözden geçirilmiştir [77]–[80]. Bununla birlikte literatürde, otomotiv ve havacılık yapıları için yüksek performanslı termoset kompozitlerin (karbon/epoksi, cam/epoksi) artan kullanımı nedeniyle bu malzemelere uygun kullanılacak yüzey işlemleri üzerine detaylı araştırmalara ihtiyaç olduğu raporlanmıştır [3], [37], [62], [72], [76], [81]–[86].

### 2.2.1 Peel-ply Yüzey İşlemi

Peel-ply işlemi, kürleme işleminden önce prepreg kompozit yüzeye dokulu bir kumaşın eklenmesi ve kürleme işlemi sonrası çıkarılması yöntemidir [6]. Peel-ply, sanayide termoset kompozitlerinin (karbon/epoksi ve cam/epoksi) ikincil bağlama işlemlerinden önce yüzeyini hazırlamak için kullanılmaktadır. Yüzey hazırlama stratejisi olarak peel-ply, iyi tekrarlanabilirlik, kolay uygulama ve çıkarma ile maliyet etkinliği sağlamaktadır [5], [87]. Termoset malzemeler için iki tür peel-ply ürünü kullanılmaktadır: kuru peel-ply ve ıslak peel-ply (kısmen kürlenmiş reçine ile "tear-ply" olarak bilinir). Kuru peel-ply, yüzey matrisinin en dış kısmını çıkararak yerine dokulu bir reçine tabakası oluşturmak için kullanılmaktadır. Bu işlem, seçilen dokulu kumaşa özgü bir desen oluşturarak, kürlenmiş yüzeyde fiber demetlerinin şekli nedeniyle karakterize edilen bir topoloji bırakmaktadır [88]. Bu topoloji doğal olarak bir yüzey pürüzlülüğü sergilemekte ve bağlantı dayanıklılığını ve tokluğunu arttıran mekanik kilitlemenin aktivasyonuna önemli ölçüde katkıda bulunmaktadır [89], [90].

Peel-ply üreticileri genellikle, kullanıcıların kürlenmiş kompozitten kolayca çıkarabilmesi için peel-ply yüzeyini bir salım ajanı ile kaplamaktadır. Peel-ply'in kompozit yüzeyden çıkarılma açısı  $135^\circ$  ile  $150^\circ$  arasında ayarlanabilmekte olup, bu açıda gereken kuvvet en düşük seviyede tutulmaktadır. Ancak, salım ajanı kalıntıları (flor, azot veya silisyum gibi) bazı kirleticiler içermekte olup, bağlanma özelliklerini önemli ölçüde kötüleştirilmektedir [89]. Silisyum veya flor kirleticilerini gidermek için hafif zımparalama, kumlama ve atmosferik plazma gibi işlemler uygulanabilmektedir [5], [88].

İkinci tür peel-ply ürünü olan tear-ply, kompozit yüzeyde sadece bir doku bırakmakla kalmaz, aynı zamanda hem tear-ply hem de prepreg yüzeyinden polimerlerin moleküler hareketliliğine (difüzyon) olanak tanıyarak reçine açısından zengin bir tabaka oluşumu sağlamaktadır. Ancak, tear-ply reçinesi her zaman prepreg reçinesi ile uyumlu değildir [78], bu da tear-ply'in kürlenmiş yüzeyden çıkarılması sırasında matris hasarı riskini arttırmaktadır [91].

### 2.2.2 Çözücü ile Temizleme Yüzey İşlemi

Çözücü, diğer maddeleri kimyasal olarak değiştirmeden çözerek sıvı bir karışım oluşturan bir bileşiktir [92]. Yüzey hazırlığı bakımından, çözücü temizliği, farklı türde çözücüler kullanarak yapışan yüzeyindeki kirleticileri (toz, döküntü,

kimyasallar, salım ajanları) ve yağı giderme sürecini içermektedir [93]. Kullanılan çözücüler arasında izopropil alkol (IPA) [19], metil-etil-keton (MEK) [94] ve aseton [95] bulunmaktadır. Çözücü temizliği genellikle kürlenmiş kompozitler (termoset veya termoplastik), plastik ve metallere uygulanmaktadır. Çözücü temizliğinin temel mekanizması, kirleticilerin seçici çekimi ve bu kirleticilerin temizlenen yüzeyden uzaklaştırılmasıdır [3].

Çözücü temizliği, basit silme (temiz ve tüy bırakmayan dokulu veya pamuk kullanılarak), sprey ile veya ultrasonik destekli teknik kullanılarak gerçekleştirilir. Yumuşak bir bez kullanıldığında, çapraz kirlenmeyi önlemek için ideal olarak yalnızca bir kez kullanılmalıdır [95]. Çözücü temizliği, termoset kompozitlerin üretiminden sonra kalan floropolimer salım filminin florunu uzaklaştırmakta yetersiz kalabilir [37]. Bu nedenle, temizleme sonrasında plazma veya hafif zımparalama gibi yüzey işlemleri önerilmektedir.

### **2.2.3 Aşındırma (Zımparalama) Yüzey İşlemi**

Zımparalama, yapışan yüzeyin zımpara kâğıdı kullanılarak elle veya parlatma aletleriyle aşındırılması işlemidir [21]. Zımparalama, karbon/epoksi, cam/epoksi, metal ve ahşap gibi malzemeleri yüzeylerini işlemek için yaygın olarak kullanılan ve maliyet açısından etkili bir işlemdir [96]. Zımparalama işlemi, yalnızca bir zımpara kâğıdı ve operatör için nispeten kısa bir eğitim süresi gerektirdiğinden çok yaygın olarak kullanılmaktadır [97]. Ayrıca, yüzey özelliklerinin (morfoloji, topografi, bileşim) değiştirilmesi ve zayıf sınır tabakalarının ve kirleticilerin uzaklaştırılması zımparalama ile hızlı bir şekilde elde edilebilmektedir. Yapıştırıcının yüzey çıkıntıları içindeki mekanik kilitlenmesini aktive etmesi nedeniyle, zımparalama ile bağlantı dayanımı ve/veya kırılma tokluğu değiştirilebilmektedir [98].

Termoset bazlı kompozitler için en yaygın olarak kullanılan zımpara kâğıdı malzemeleri alüminyum oksit ( $Al_2O_3$ ) ve silisyum karbür (SiC) olup, daha az yaygın olarak kullanılan malzeme ise naylon olmuştur [77], [99]. SiC zımpara kağıdının taneleri  $Al_2O_3$ 'ten daha sert ve keskindir, bu da daha agresif bir aşındırma sağlamaktadır.  $Al_2O_3$  ise daha dayanıklıdır, yani SiC bileşiğine kıyasla daha uzun raf ömrüne sahiptir. Bununla birlikte, her ikisi de karbon/epoksi veya cam/epoksi işlemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Zımpara kağıdının grit boyutu (zımpara kağıdının pürüzlülüğü) ise bu aşamada kritik bir husus olmuştur.

Karbon/epoksi veya cam/epoksi işlemleri için kullanılan zımpara kağıdının grit boyutu genellikle 80 ile 800 grit arasında değişmektedir. Düşük grit boyutu ile daha pürüzlü bir yüzey elde edilebilir. Ancak, 80 grit altındaki kâğıt boyutunun kullanılması fiberlere ciddi zarar verebilir ve yapıştırıcının nüfuz edemeyeceği derin vadiler meydana getirebilir [99], [100].

#### **2.2.4 Kumlama Yüzey İşlemi**

Kumlama işlemi, yapışma yüzeyine aşındırıcı taneleri çarptırmak için yüksek basınçlı hava veya azot ( $N_2$ ) enjekte etme işlemidir. Kumlama teknikleri, kompozitlerin ve metallerin nispeten geniş bir yüzey alanını işlemek için kullanılmaktadır [98], [101]. İstenen yüzey morfolojisini, pürüzlülüğünü, yüzey enerjisini veya kimyasını elde etmek için tane malzemeleri türü, tane boyutu, gaz basıncı, maruz kalma süresi, nozul-yüzey açısı, kumlama mesafesi ve kumlama yönü gibi parametreler ayarlanmalıdır [83], [102].

Kumlama işlemi için yaygın olarak kullanılan tane malzemeleri bakır,  $Al_2O_3$  ve silikat mineralidir [15], [103]. Bu malzemeler, karbon/epoksi alt tabakasının yüzey enerji bileşenlerini doğrudan etkilemektedir. Örneğin, garnet [doğal silikat grubunda olup,  $X_3Y_2(SiO_4)_3$  formülü ile gösterilir. X; iki değerli katyonları (Fe, Mg, Ca, Mn), Y; üç değerli katyonları (Al, Fe, Cr),  $SiO_4$  ise dört oksijen iyonu ile çevrili silikat yapısını gösterir] kullanılarak yapılan kumlama,  $Al_2O_3$  kullanılarak yapılan kumlamaya göre polar bileşeni daha etkili bir şekilde artırır ve dispersiyon bileşenini azaltır. Garnet, aynı zamanda kirleticileri daha iyi uzaklaştırır ve  $Al_2O_3$ 'ten daha fazla serbest radikal oluşturur, bu da yüzeyin daha fazla azot (polar bileşen) içermesine neden olmaktadır [104]. Termoset kompozitlerin yüzey enerjisini etkili bir şekilde değiştirmek için yaygın olarak seçilen grit boyutu 200-220 olmaktadır.

#### **2.2.5 Asit ve Baz ile Dağlama**

Dağlama işlemi, termoset kompozitlerin yüzeyinden kirleticileri uzaklaştırma, yüzey pürüzlülüğünü ve kimyasını değiştirme veya büyük miktarda gözenek oluşturmak amacıyla kullanılmaktadır. İşlem görecekt kompozit genellikle belirli bir konsantrasyonda asit veya baz çözeltisi içeren bir banyoya belirli sıcaklık ve sürede tamamen daldırılmaktadır [105]. Kompozitlerin işlenmesinde yaygın olarak kullanılan asit çözeltileri arasında  $H_2SO_4$  (sülfürik asit),  $H_2CrO_4$  (kromik asit; yüksek konsantrasyonlu sülfürik asit ve dikromat karışımı),  $HNO_3$  (nitrik asit)

bulunurken, baz çözültisi olarak NaOH (sodyum hidroksit) içermektedir. NaOH gibi baz çözültileri, karbon/epoksi yüzeyini işlemek için kullanılmıştır, ancak epoksiye karşı aşındırıcı olduğundan yüzeyde lokal hasara neden olmuş ve mod I kırılma tokluğunu azaltmıştır [19].

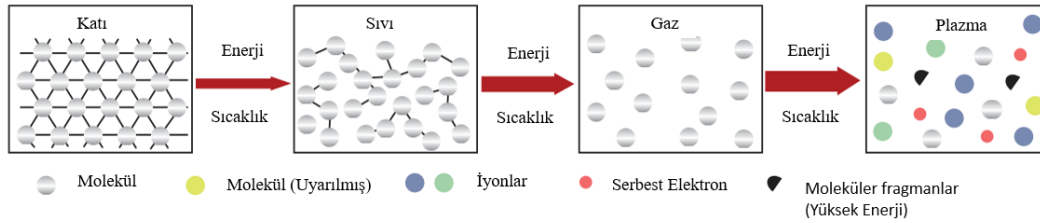
### **2.2.6 Lazer Yüzey Hazırlama Tekniği**

Lazer yüzey işlemi, yüzeyin sıcaklığını artırarak ısı etkili bir bölge (HAZ; Heat-Affected Zone) oluşturur ve yüzeyin kimyasal bileşimini değiştirir [106]. Bu bölgede meydana gelen yanma (oksidasyon), işlenen malzemelerin ısı iletkenliğine bağlıdır [107]. Farklı lazer türleri, kirleticileri, matrisi ve lifleri uzaklaştırmak, yüzey dokusunu geliştirmek, yüzey pürüzlülüğünü arttırmak veya morfolojiyi değiştirmek ve elektriksel özellikleri ölçmek amacıyla bağımsız olarak termoset kompozitleri işlemek için kullanılmıştır [108], [109]. Örneğin, CO<sub>2</sub> ve UV lazerler, karbon/epoksi yüzeyinde bulunan salım ajanının silisyum kirleticilerini gidermek için kullanılmaktadır [109]. Sıcaklığa duyarlı malzemeleri (saf polimer veya polimer film) işlemek için genellikle kısa dalga boylu lazer tercih edilmektedir. Çünkü polimer üzerinde daha düşük fototermal etki göstermektedir [110]. Lazer teknolojisi endüstriyel kullanım için uygundur, çünkü lazer ışını konumlandırması yönlendirilmiş bir sistem kullanılarak otomatik olarak gerçekleştirilebilir. Lazer işlemi ayrıca seçici yüzey işlemlerine olanak tanıyarak yapışma yüzeyinin kontrol edilmesini sağlamaktadır. Lazer tabanlı yüzey desenleme, kırılğan CFRP/epoksi arayüzeyini sertleştirmek için etkili stratejilerden biri olmuştur.

### **2.2.7 Plazma Yüzey Hazırlama Tekniği**

Plazma maddenin dördüncü hali olarak adlandırılmaktadır. Elektrik enerjisi ile bir gazın uyarılmasıyla üretilmektedir. Negatif ve pozitif iyonlardan oluşan yüklü parçacıkların koleksiyonudur (Şekil 2.6). Ayrıca, serbest radikaller, atomlar ve moleküller gibi diğer tür parçacıklar da plazma içerisinde olabilmektedir. Bu parçacıklar genellikle hava, oksijen, azot, flor veya inert gazlar kullanılarak üretilmektedir [111], [112]. Plazma, son derece reaktiftir; bu da tam olarak plastiklerin yüzeylerini değiştirebilmesinin sebebi olmaktadır [3]. Plazma işlemi, iki elektrot kullanarak üretilen parçacıkları (elektronlar, iyonlar, radikaller) elektriksel olarak şarj etmeyi ve bu parçacıkları yapışma yüzeyine bombardıman etmeyi içermektedir. Plazma yüzey işlemi, termoset ve termoplastik kompozitlerin

yüzey morfolojisini değiştirmek, kirleticileri uzaklaştırmak ve yüzey kimyasını modifiye etmek için kullanılmaktadır [113], [114]. Bu modifikasyon ile, yapıştırıcı ve yapışan yüzey arasındaki kimyasal bağlanma ve mekanik kilitlenmenin artırılması ve bu sayede yapışmanın iyileştirmesi amaçlanmaktadır.



**Şekil 2.6** Maddenin dördüncü hali plazma [115]

Plazma işlemi ile polimer yüzeyinde oluşturulan fonksiyonel grupların konsantrasyonu, çevre ve sıcaklık gibi faktörlere bağlı olarak zamanla değişebilmektedir. Polimer yüzeylerindeki kimyasal ve fiziksel değişikliklerin temel nedeni, yüzey zincirlerinin kütledeki zincirlere göre ekstra hareket kabiliyetine sahip olabilmesidir. Polimer yüzeyindeki bu hareketlilik, yüzey polimer moleküllerinin farklı çevre koşullarına yanıt olarak yeniden yönlenmesine olanak tanımaktadır [116]. Yüzey çalışmaları, işlenmiş yüzeyin düşük enerjili bir ortamda (örneğin hava veya vakum) bırakıldığında yüzey enerjisindeki azalma nedeninin, polar grupların kütle içine döndürülmesi veya düşük moleküler ağırlıklı parçaların yüzeye göç ederek arayüzey enerjisini azaltması olduğunu göstermiştir [117].

### 2.2.8 Atmosferik Basıncı Plazma Yüzey İşlemi

Atmosferik basınçlı plazma teknolojisi, gazların atmosferik basınçta elektriksel deşarj kullanılarak oluşturulması ve uygulanması yöntemidir. Şekil 2.7, atmosferik basınçlı plazma sisteminin ana bileşenlerini göstermektedir. Atmosferik basınçlı plazma teknolojisinde, plazma yüksek gerilimli bir jeneratörle üretilmektedir [118].

APT, düşük basınç plazma sistemlerine (LPP; Low Pressure Plasma) kıyasla çeşitli avantajlara sahiptir. APT yöntemi; düşük güç tüketimi ve yüksek işlem hızına, işlem maliyetlerinde tasarruf sağlanmasına ve büyük boyutlu bileşenlerin işlenmesine olanak tanımaktadır. Döner nozulların entegre edilmesiyle geniş yüzey alanları tek geçişte işlenebilmektedir. Buna karşılık, düşük basınç plazma sistemleri (LPP), vakum odalarında çalışma ve yüksek güç tüketimi gerektirmesi nedeniyle maliyeti arttırmakta ve işlem hızını düşürmektedir [119].



yöntemler dahil olmak üzere bir dizi analitik tekniğin kullanımını gerektirmektedir. Bu bölümde, kompozit yüzey analizleri için sıkça kullanılan yüzey karakterizasyon göstergelerine yer verilmiştir.

### 2.3.1 Yüzey Bileşimi

Yüzey işlem teknikleri, kompozit yüzeylerin kimyasını değiştirebilmektedir. Yüzey işlemi sonrasında belirli kimyasal elementlerin (karbon, oksijen, azot, kükürt, silisyum ve flor) ve fonksiyonel grupların (silisyum dioksit, alkoksi, karbonil, karboksil vd.) varlığının anlaşılması, yapıştırıcı ile yapışan yüzey arasındaki yapışma kalitesini arttırmak için önemli bir gösterge olmuştur [121]. Bu kimyasal elementlerin ve fonksiyonel grupların nicel analizi, XPS (X-ışını fotoelektron spektroskopisi; elementel konsantrasyonu belirlemek için) ve FTIR (Fourier dönüşümü kızılötesi spektroskopisi; geniş bir spektral aralıktaki absorpsiyon veya emisyon verilerini yüksek spektral çözünürlükle sağlamak için) kullanılarak yapılmaktadır [60].

Kimyasal analiz için X-ışını fotoelektron spektroskopisi (XPS), polimer yüzeylerini karakterize etmek için yaygın olarak kullanılan bir analitik teknik olmuştur. XPS, hidrojen hariç tüm elementleri tespit edebilmektedir [54]. X-ışınlarının foton enerjisi, numunedeki atomların iç kabuğundaki bir elektrona aktarılır. Bu enerji aktarımı sayesinde elektron, fotoelektron olarak numune yüzeyinden kaçabilir. Bir analizör, fotoelektronun kinetik enerjisini ölçer ve bu enerji, elektronun bağlanma enerjisine eşittir. Bağlanma enerjisinin bilinmesi, hangi elementin mevcut olduğunu belirlemeye olanak sağlamaktadır [122]. Bir atomun diğer elementlerle olan kimyasal bağları, fotoelektronun bağlanma enerjisini daha yüksek veya daha düşük değerlere kaydırabilir. Bu bağlanma enerjisindeki değişiklikler, molekül hakkında yapısal bilgi sağlamaktadır [62].

FTIR-ATR, malzemelerin kimyasal bileşimini analiz etmek için kullanılan bir spektroskopi tekniğidir. Bu teknik, kızılötesi (IR; Infrared) ışınların malzeme ile etkileşimini ölçerek, moleküllerin karakteristik titreşimlerini belirlemektedir. Zayıflatılmış Toplam Yansıma (ATR; Attenuated Total Reflection) yöntemi, numune yüzeyinin doğrudan temas ettiği bir kristal kullanarak kızılötesi ışınların numune içine daha derinlemesine nüfuz etmesini sağlamaktadır [54].

Tablo 2.3, çeşitli çalışmalarda rapor edilen kimyasal elementler ve fonksiyonel grupları özetlemektedir [3]. İşlemler, kompozitlerin üretiminde kalıp ayırıcı veya kaplama gibi istenmeyen veya zararlı kimyasal elementleri de içerebilir [123]. Bu istenmeyen kimyasal elementler [silisyum (Si), kükürt (S) ve flor (F)], potansiyel olarak zayıf bir arayüzey oluşturabilirler [121]. Yapışma için faydalı olan istenen fonksiyonel gruplar ise hidroksil (-OH), karboksil (-COO), oksijen (O<sub>2</sub>) alifatik ve aromatik gruplar olarak belirtilmektedir [122].

**Tablo 2.3** Kompozitlerin yüzey işlemleri sırasında istenen ve istenmeyen kimyasal gruplar [3]

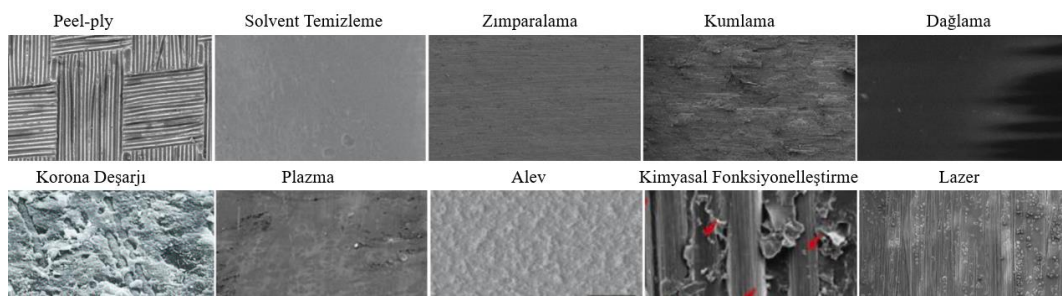
Yüzey Hazırlama Teknikleri	İstenen Kimyasal Gruplar	İstenmeyen Kimyasal Gruplar
Zımparalama	C, O, N	Si
Kumlama	C, O, C-O, C-N, O-C=O	Si
Peel-ply	O, N, C-O, C=O/C-OH, C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	Si, F, S, CF <sub>2</sub>
Çözücü	C-H, C=O, C-O	Si, S
Kimyasal	C, O	Si, S
Lazer	C, O, N, C-OH, C=O, C-O, O-C=O, C-C, COOH	Si, S
Plazma	C, O, N, C-C, C-OH, C=O, C-COOH, C-O, O-C=O	Si, F

### 2.3.2 Yüzey Morfolojisi

Yüzey hazırlama işlemleri genellikle termoset matrisli kompozitlerin yüzey topolojisini ve morfolojisini değiştirmektedir. Ancak bazı işlemler yalnızca kirleticileri uzaklaştırmakta ve yüzey morfolojisini neredeyse hiç değiştirmemektedir [19]. Yüzey morfolojisinin gözlemlenmesi genellikle optik mikroskop, taramalı elektron mikroskobu (SEM; Scanning Electron Microscope) veya atomik kuvvet mikroskobu (AFM; Atomik Force microscope) ile yapılmaktadır. Taramalı elektron mikroskobu (SEM), yüksek çözünürlüklü yüzey görüntüleri elde etmek için kullanılmaktadır. Neredeyse tüm SEM incelemeleri için yüzeyin ince bir altın tabakasıyla kaplanması gerekmektedir. Bu kaplama, yüzeyin iletken olmasını sağlar. SEM analiz yönteminde; bir elektron tabancasından çıkan yoğun elektron demeti hızlandırılarak numune yüzeyine yönlendirir. Bu elektron demeti, numune ile etkileşime girerek sekonder elektronlar, geri saçılan elektronlar ve X-ışını gibi sinyaller üretir. Sekonder elektronlar yüzey topografyasını,

geri saçılan elektronlar atomik numara kontrastını, X-ışını ise elementel bileşimi belirlemek için kullanılmaktadır [124]. Dedektörler bu sinyalleri toplarlar ve toplanan bu sinyaller, bir bilgisayar programı tarafından işlenerek numunenin detaylı bir görüntüsü oluşturulur [54]. SEM, yüzey morfolojisi ve kompozisyonun incelenmesinde kritik bir rol oynamaktadır. Morfoloji gözlemleri çoğunlukla kalitatif olup, morfolojik değişikliklerin varlığını doğrulamak için ilk adım olarak hizmet etmektedir [125].

Bazı yüzey işlemleri sonrasında elde edilen kompozit yüzeylerinin morfolojik incelemelerine ait SEM görüntüleri Şekil 2.8’de sunulmuştur. Peel-ply, zımparalama, kumlama, korona deşarjı, alev ve lazer işlemlerinin kompozit yüzeyinde morfolojik değişikliklere neden olduğu açıkça görülebilmektedir [126], [127]. Peel-ply işlemi sonrası karbon/epoksi yüzeyinin morfolojisi, peel-ply dokuma desenine uygun olarak görülmektedir [128]. Zımparalama ve kumlama işlemleri de yüzeyi cilalamak ve pürüzlendirmek için yüzey morfolojisini değiştirmektedir. Ancak bir aşamadan sonra matriks ve fiberlerde hasara neden olabilmektedir [129], [130]. Yüksek lazer akısı kullanmak epoksiyi tamamen çıkararak fiberlere zarar verebilir [11]. Uzun süreli plazma işlemi de yüzey sıcaklığını artırarak renk değişimine ve matriks hasarına neden olabilir [131]. Tüm bunların aksine çözücü ile temizleme işlemi ise yüzey morfolojisinde önemli bir değişiklik yapmamaktadır. Bu göstergeler taramalı elektron mikroskobundan detaylıca elde edilebilmektedir [99].

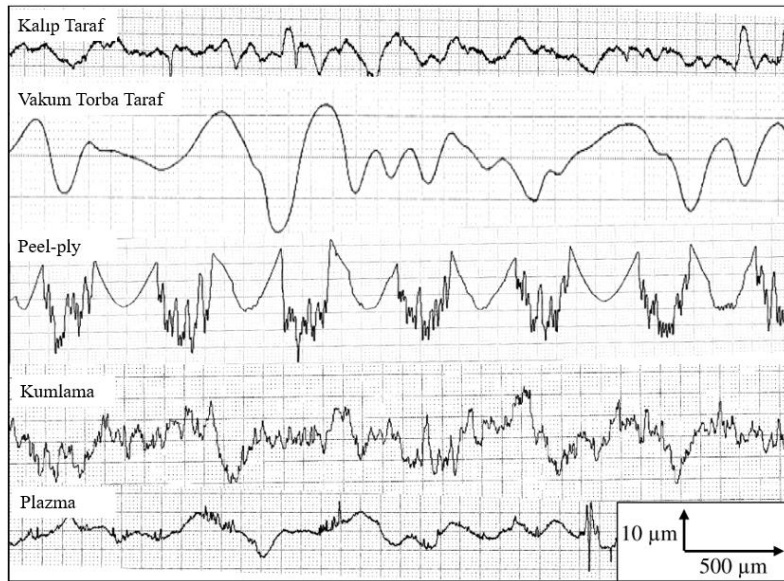


**Şekil 2.8** Kompozitlerin çeşitli yüzey işlemleri kullanılarak oluşturulmuş yüzey morfolojilerine ait SEM görüntüleri [3]

### 2.3.3 Yüzey Topografisi

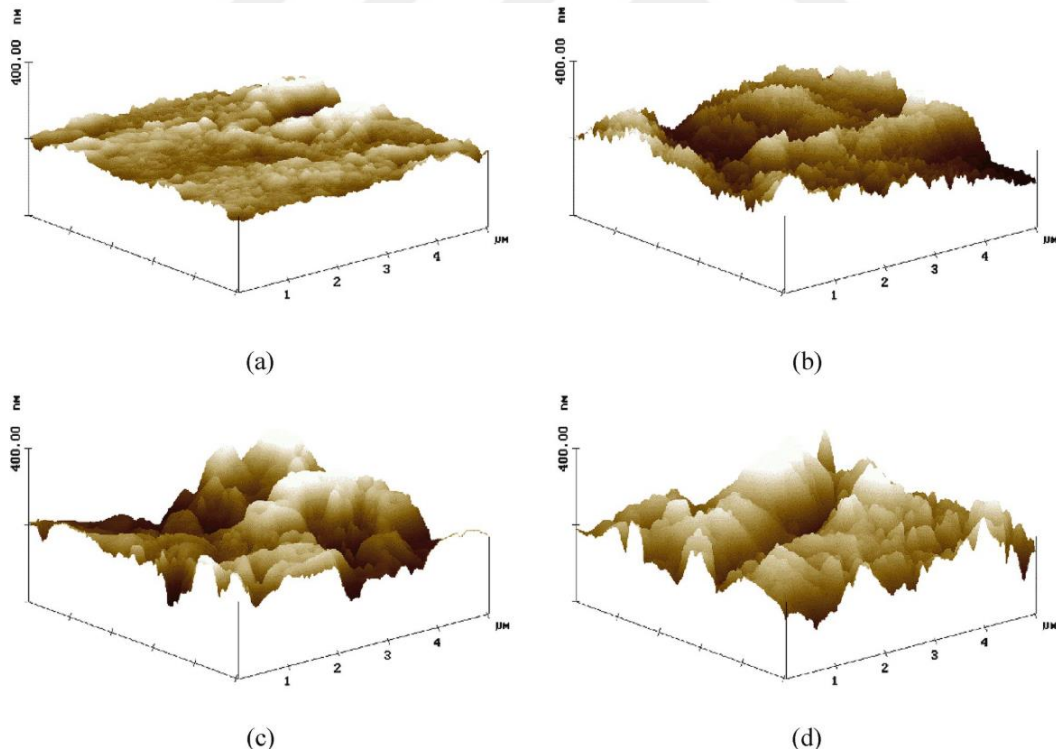
Yüzey hazırlama işlemlerinin yapışan veya alt tabaka yüzeylerine doğrudan etkisi genellikle yüzey pürüzlülüğü gibi topografi metrikleri kullanılarak nicel olarak belirlenmektedir. Pürüzlülük, katı bir yüzeyin çeşitli genişlik, yükseklik ve derinlikteki tepeler ve vadilerle karakterize edilen normal saptamalar serisini temsil

etmektedir [101]. Daha pürüzlü bir yüzeyin genellikle tercih edilmesinin ana nedeni; yüzey enerjisindeki artışla ilişkili daha güçlü bir yapışma sağlanması ve yapıştırıcı ile yapışan yüzey arasında etkili bir temas alanının oluşturulmasıdır [132]. Bu durum mekanik kilitleme mekanizmasını aktive ederek yapıştırıcıdaki gerilmelerin yeniden dağılımını sağlamaktadır [133]. Yüzey pürüzlülüğünün artırılması sonucunda, yapıştırıcı ile bağlanan yapının mukavemetinin ve tokluğunun iyileşmesi beklenmektedir [134]. Ortalama yüzey pürüzlülüğü ( $R_a$ ) değeri, profilometre kullanılarak doğrudan ölçülebilmektedir. Yumuşak bir prob, belirli bir uzunluk boyunca yüzeyin önceden tanımlanmış eksenini (x veya y eksenini) boyunca birçok tepe ve vadi noktasını tarayarak pürüzlülük değerleri elde edebilmektedir. Farklı yüzey hazırlama teknikleri kullanılarak hazırlanmış karbon/epoksi yüzeyine ait profilometre incelemesi Şekil 2.9’da sunulmuştur. Otoklavda üretilen karbon fiber/epoksi kompozitler için en yaygın yüzey bitişleri, cilalı kalıpla temas eden yüzey ve vakum torbasıyla temas eden yüzey olarak bilinmektedir. Beklendiği gibi, en pürüzsüz yüzey, otoklavda işlenirken cilalı kalıpla temas eden kompozit yüzeyidir, en pürüzlü yüzey ise vakum torbasıyla temas eden yüzey olmuştur [53]. Profilin şekli, her bir yüzey işleminin kompozit pürüzlülüğü üzerindeki etkisini açıklayabilmektedir. Örneğin peel-ply ile işlenmiş yüzey, homojen ve periyodik bir yüzey profili ile yüksek bir ortalama pürüzlülük sunmaktadır.



**Şekil 2.9** Farklı yüzey işlemleri kullanılmış kompozit yüzeylerin mekanik profilometre ile elde edilen 2 boyutlu pürüzlülük profilleri [53]

Atomik kuvvet mikroskobu (AFM), yüzeylerin atomik düzeyde incelenmesi için kullanılan bir tekniktir. AFM, bir kirişin ucuna monte edilen keskin bir uç (genellikle birkaç nanometre genişliğinde) kullanarak numune yüzeyini tarar. Numune yüzeyi taranırken, uç ile yüzey arasındaki atomik kuvvetler (örneğin; Van der Waals kuvvetleri) kirişin sapsmasına neden olur. Bir lazer ışını kirişe yönlendirilir ve sapsmalar bir fotodedektör tarafından ölçülür [135]. Bu sapsmalar, yüzey topografisinin yüksek çözünürlüklü bir haritasını oluşturmak için kullanılabilir [136]. En yaygın kullanılan AFM çalışma modu, kesintili temas (tapping) modudur. AFM, hem iletken hem de yalıtkan yüzeylerde çalışabilmekte ve nanometre ölçeğinde detaylı yüzey profilleri sağlamaktadır [38]. Örneğin bir çalışmada, plazma işlemi sonrasında nano ölçekli yüzey aşındırmasının meydana geldiği AFM analizi ile ortaya koyulmuştur. Değişken hızlarla elde edilmiş plazma yüzey işleminin etkilerine ait AFM görüntüleri Şekil 2.10 (a-d) kapsamında verilmiştir [8]. Farklı plazma işlem parametrelerine maruz kalan numunelerin yüzeylerinde belirgin bir tepe-vadi dağılımı oluşmuştur.



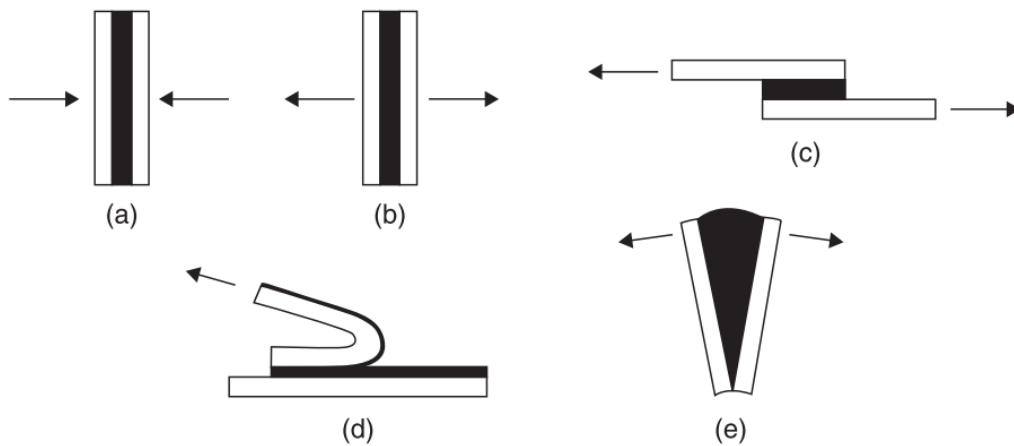
**Şekil 2.10** Değişken işlem hızlarıyla elde edilmiş plazma yüzey işleminin etkilerini gösteren  $5 \times 5 \mu\text{m}^2$  alandaki AFM görüntüleri: (a) işlenmemiş, (b) 2,54 mm/s, (c) 12,7 mm/s (d) 25,4 mm/s [8]

## 2.4 Yapışma Testleri

Yapıştırıcı teknolojisinde, yapışma testleri, yapıştırıcıların performans özelliklerini değerlendirmek için kullanılmaktadır [137], [138]. Testler; yapıştırıcıların çekme mukavemeti, kesme mukavemeti, soyulma mukavemeti ve kırılma tokluk enerjisi gibi temel mekanik özelliklerini belirlemede kritik bir rol oynamaktadır [139], [140]. Yapıştırıcı testlerinin uygulanma nedenleri aşağıda sunulmuştur:

- Mekaniksel özelliklerin karşılaştırılması (çekme, kesme, soyulma, eğilme ve darbe mukavemetleri, dayanıklılık, yorulma, çevresel direnç, iletkenlik, vb.)
- Yapıştırıcıların standartlara uygun olup olmadığını belirlemek için kalite kontrolü
- Yüzey hazırlığı ve/veya diğer hazırlıkların etkinliğinin kontrolü
- Performans tahmininde faydalı olan parametrelerin belirlenmesi (kür koşulları, yapışma hattı kalınlığı, vb.) [141].

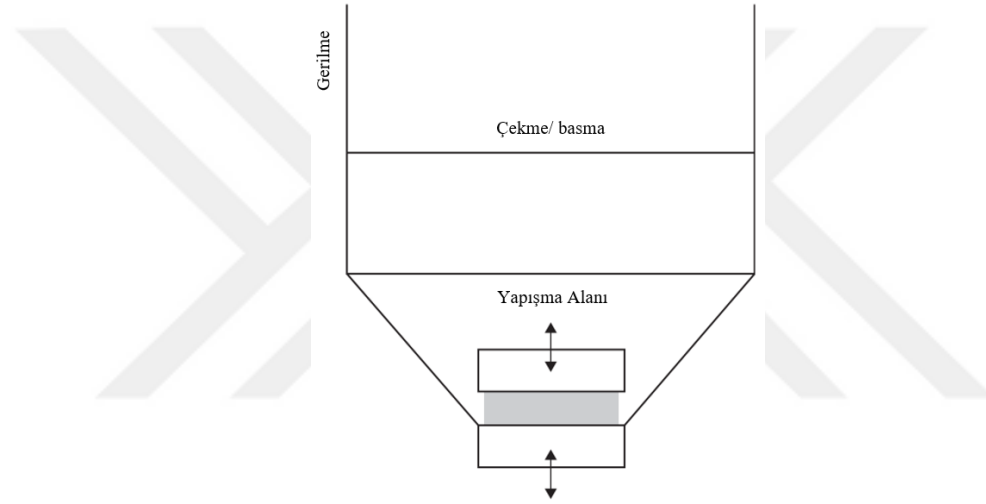
Bağlantı tasarımı ve yük türü, nihai gerilme dağılımını büyük ölçüde etkilemektedir. Bağlantı tasarımının amacı, belirli bir yapışma alanı için maksimum mukavemeti elde etmektir. Yapıştırıcılı bağlantılar, tek bir nokta yerine yüzey alanları üzerinde etki göstermektedir [86]. Bu nedenle, gerilme yoğunluklarını ortadan kaldırmaya odaklanılması gerekmektedir. Çünkü bu yoğunluklar bağlantının mukavemetini ve ömrünü azaltmaktadır [142]. Yapıştırıcı uygulanmış bağlantılarda temel beş tür gerilme Şekil 2.11'de gösterilmiştir. Uygulamalarda bu gerilmelerin herhangi bir kombinasyonu ile de karşılaşılabilmektedir.



**Şekil 2.11** Yapıştırıcılı bağlantılarda temel gerilim türleri: (a) basma, (b) çekme, (c) kesme, (d) soyulma ve (e) yırtılma [143]

Bağlantılar sadece basma yükünde, diğer yükleme biçimlerine kıyasla daha az hata riski taşımaktadır. Çünkü basma kuvveti yeterince yüksekse ve parçalar arasında hareket yoksa, yapıştırıcı kohezyonlu olarak başarısız olmadıkça parçalar birbirine göre konumunu korumaktadır. Bu nedenle, basma yüklemesi altındaki bağlantılar genellikle daha güvenilir kabul edilir, ancak uygulama alanları sınırlı olmaktadır [144].

Dikey kuvvetler bağlantı düzlemine dik olarak uygulandığında, çekme gerilmesi oluşur ve bu kuvvetler tüm yapışma bölgesi üzerinde Şekil 2.12'de gösterildiği gibi eşit olarak dağıtılmaktadır. Çekme durumunda, yapıştırıcının dış tarafında yüksek gerilme alanları oluşmaktadır [141].

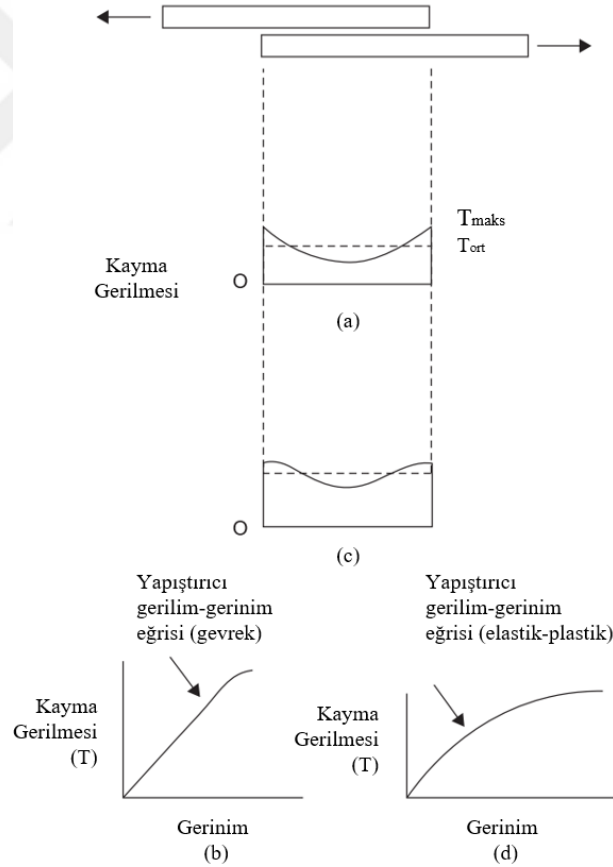


**Şekil 2.12** Çekme ve basma gerilmelerinin bağlantı boyunca dağılımı [145]

Kayma gerilmesi, yapışma düzleminde çalışan kuvvetlerin yapışan parçaları ayırmaya çalışması durumunda ortaya çıkmaktadır. Saf kayma gerilmeleri, yapışma yüzeyine paralel olarak oluşur. Yapıştırıcı, kayma yükü altında gerildiğinde genellikle en güçlü durumdur. Çünkü tüm yapışma alanı bağlantının mukavemetine katkıda bulunduğundan yapışan parçaların hizalanması nispeten kolay olmaktadır [146]. Çekme testlerinde olduğu gibi, gerilme dağılımı eşit değildir ve yapışma hattındaki maksimum gerilme ( $T_{maks}$ ) ortalama gerilmeden ( $T_{ort}$ ) çok daha yüksek olabilmektedir. Yapıştırıcılı bağlantılarda, ortalama gerilme ( $T_{ort}$ ) genellikle uygulanan yükün yapışma alanına bölünmesiyle belirlenmektedir. Ortalama gerilme ( $T_{ort}$ ), tüm yapışma alanı üzerindeki kuvveti temsil etmektedir. Maksimum gerilme ( $T_{maks}$ ) ise başarısızlık meydana gelmeden önce yapışma hattında yaşanan en yüksek gerilmeyi temsil etmektedir. Yapışma içerisindeki lokal

bölgelerdeki gerilme etkileri nedeniyle maksimum gerilme ( $T_{maks}$ ) ortalama gerilmeden ( $T_{ort}$ ) önemli ölçüde yüksek olabilir [147].

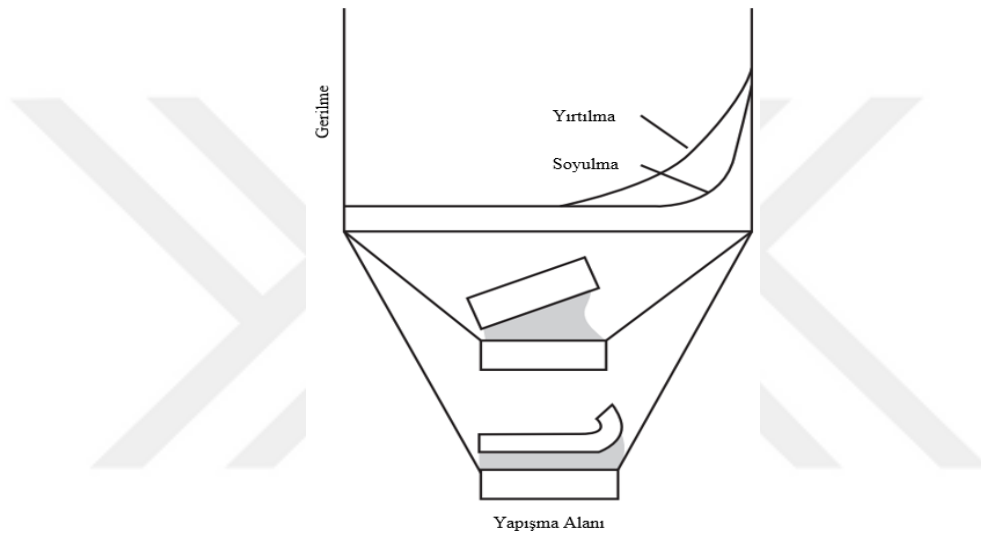
Yapıştırıcının elastik modülü, bir bağlantı içerisindeki gerilme dağılımında önemli bir rol oynamaktadır [54]. Daha gevrek yapılı bir yapıştırıcı, daha yüksek bir modül ile karakterize edildiğinde [Şekil 2.13 (a-b)], bir gerilme-gerinim eğrisi ile bağlantının ortasından uçlarına doğru doğrusal bir artış gösteren bir kayma gerilmesi dağılımına sahip olmaktadır. Buna karşılık, Şekil 2.13 (d)'de gösterildiği gibi daha yüksek uzama davranışına sahip daha elastik yapılı bir yapıştırıcı, doğrusal olmayan bir gerilme dağılımına neden olmaktadır [Şekil 2.13 (c)]. Daha elastik bir yapıştırıcının esnekliği, yapışan parçaların hareketinin karşılanmasına olanak tanır, gerilmenin daha geniş bir alana yayılmasını sağlar ve gerilme oranını (en yüksek gerilme/ortalama gerilme) azaltır. Ancak aşırı deformasyon olmadan yapısal yükleri taşıma konusunda zorlanabilmektedir [141].



**Şekil 2.13** Gevrek ve elastik malzemelerde kayma gerilimi dağılımı [145]

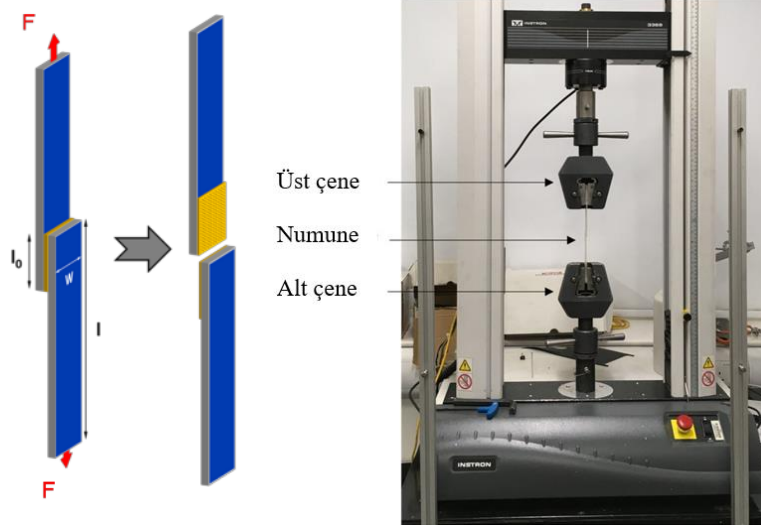
Yırtılma ve soyulma gerilmeleri yapıştırıcılar için istenmeyen gerilmelerdir [148]. Yırtılma, rijit bir yapıştırıcılı bağlantının bir ucundaki kuvvetlerin yapışan parçaları ayırmaya çalıştığıında meydana gelen gerilme olarak tanımlanmaktadır.

Soyulma gerilmesi ise yırtılma gerilmesine benzer, ancak bir veya her iki yapışan yüzeyin esnek olduğu bir bağlantıya uygulanmaktadır. Bu nedenle, soyulma durumunda ayırma açısı yırtılmaya göre çok daha büyük olabilir. Soyulma veya yırtılma altında yüklenen bağlantılar, kayma altında yüklenen bağlantılardan daha düşük mukavemet göstermektedir. Çünkü gerilme, toplam yapışma alanının yalnızca küçük bir bölgesinde yoğunlaşmaktadır. Şekil 2.14'te soyulma ve yırtılma yüklerinin gerilme dağılımı gösterilmiştir. Bu durumda bağlantının diğer ucundaki yapıştırıcı, bağlantının maksimum mukavemetine çok az katkıda bulunmaktadır [141].



**Şekil 2.14** Soyulma ve yırtılma geriliminin dağılımı [145]

Tek bindirmeli bağlantı (SLJ) testi, özellikle havacılık yapılarında karşılaşılan bağlantı türlerini temsil etme yeteneği nedeniyle endüstride önemli bir yere sahip olmuştur [129], [149]. Tek bindirmeli kesme testi (Şekil 2.15); yapıştırıcı bağlantının kayma kuvvetlerine karşı dayanma yeteneğini ifade etmektedir. Bu, bağlanan malzemelerin ve yapıştırıcının kohezyon mukavemetinin bir ölçüsüdür ve bağlantının başarısızlık meydana gelmeden önce taşıyabileceği maksimum yükü göstermektedir [150], [151]. Bağlantı mukavemeti, yapışan bölgenin birim alanına (Yapışan bölgenin genişliği ( $w$ ) ile yapışan bölgenin uzunluğunun ( $l_0$ ) çarpımı) uygulanan kuvvet ( $F$ ) ile nitelendirilir ve genellikle Paskal (Pa) veya Megapaskal (MPa) birimleri ile ifade edilmektedir [152].

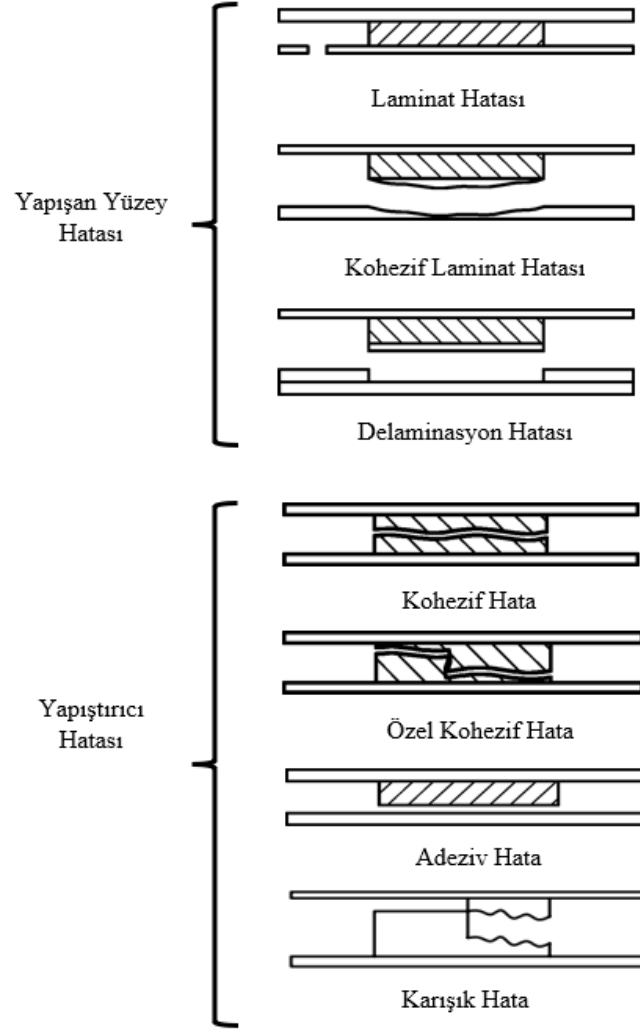


**Şekil 2.15** Tek bindirmeli bağlantı; test numunesi (sol) ve kurulum (sağ) [145]

## 2.5 Kırılma Türleri

Bağlantılar yüklemeye maruz kaldığında, yapıştırıcılı bağlantının farklı yerlerinde ayrılma meydana gelebilmektedir. Yapıştırıcılı bağlantılar için sınıflandırma hataları, mekanik yapışma testlerinin sonucunu daha iyi anlamak için yapılır ve genellikle nicel ölçülen değerlerle ifade edilmektedir. Yapıştırıcılı bağlantıların hata modlarının sınıflandırılması Şekil 2.16'da gösterilmiştir. Eğer hata bir veya her iki yapışan laminantta meydana gelirse, buna “laminant hatası” denmektedir. Bağlantı hatası yapıştırıcı ile bir yapışan yüzey arasında meydana gelirse, buna “adeziv hata” denmektedir. Yapışma hatasının aksine, her iki yapışan yüzeyin de yapıştırıcı ile kaplı kaldığı ayrılma hatasına kohezyon hata olarak adlandırılmaktadır [153]. Yapıştırıcının içinde meydana gelen “kohezyon hata”, bağlantının maksimum mukavemetinin sağlandığını gösterdiği için en iyi hata türüdür. Test edilen bir numunenin hatası nadiren tek bir mod ile gerçekleşir, iki veya daha fazla hata modu içeren kırılma tipleri “karışık hata” olarak tanımlanmaktadır [154].

Hata modu, bir bağlantı için tek kriter olarak uygulanmamaktadır. Bir bağlantının nihai mukavemeti, bağlantı hata modundan daha önemli bir kriter olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte, hata modunun analizi, hatanın zayıf bir arayüzey tabakası veya uygunsuz bir yüzey hazırlığı nedeniyle olup olmadığını belirlemede bir araç olarak sıkça kullanılmaktadır [155].



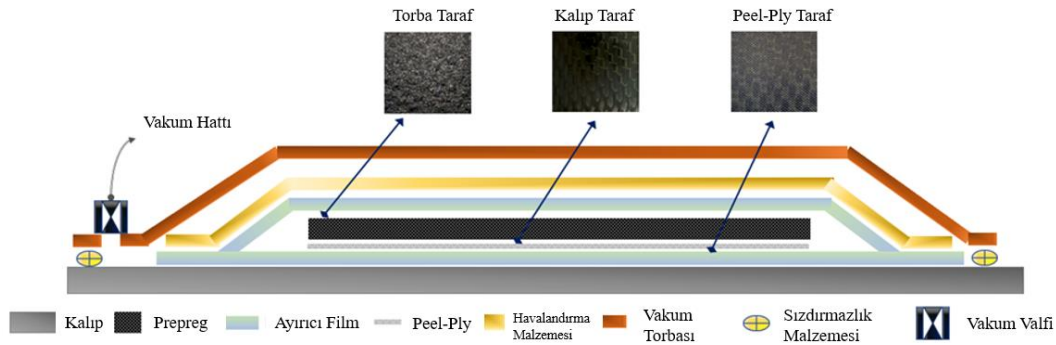
Şekil 2.16 ISO 10365'e göre hata modları [156]

## MALZEME ÜRETİMİ VE YÜZEY KARAKTERİZASYON YÖNTEMLERİ

### 3.1 Malzemeler ve Üretim Yöntemi

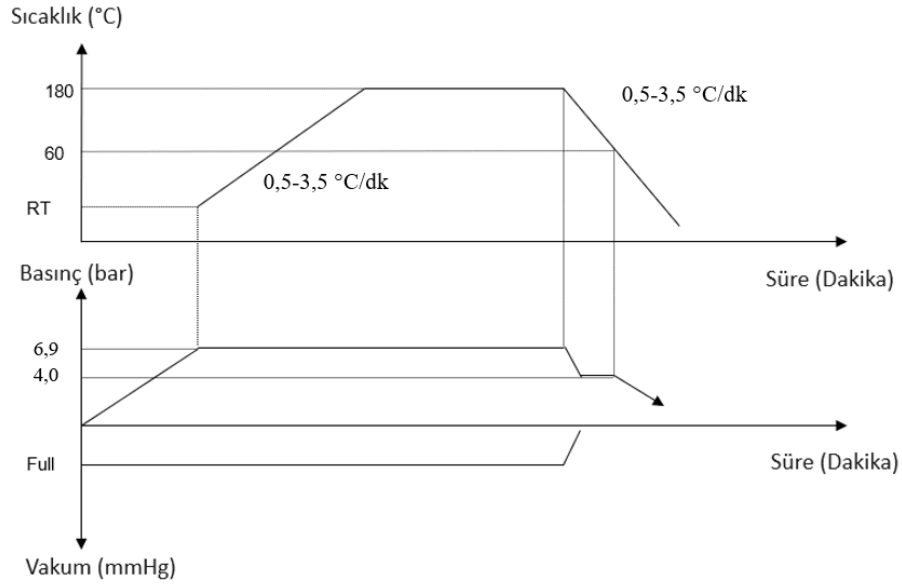
Havacılık ve uzay sanayinde yüksek performanslı kompozit uygulamalarında Hexply 8552/5 harness prepreg malzemesi yaygın olarak tercih edilen bir karbon fiber/epoksi sistemi olmuştur. Vakum torbalama ve otoklav yöntemi, bu malzemenin üretilmesinde kritik rol oynamaktadır [157], [158]. Vakum torbalama işlemi, prepreg katmanlarının arasındaki havanın ve fazla reçinenin uzaklaştırılmasını sağlayarak, malzemenin yoğunluğunu ve homojenliğini arttırmaktadır [159]–[162].

Tez çalışmasında, TUSAŞ bünyesinde kullanılan ticari adı Hexply 8552/5 harness olan prepreg malzemesi kullanılmıştır. Prepreg malzemesi, 0,28 mm nominal kürlenmiş kat kalınlığına ve %37 nominal reçine ağırlık fraksiyonuna (lif hacim fraksiyonu yaklaşık %67) sahip olmuştur. Tek bindirmeli kesme test numuneleri için toplam 2,02 mm nominal kalınlık için  $[0^\circ]_8$  laminant istifleme sırası ile toplam 8 kat ve kama test numuneleri için toplam 3,2 mm nominal kalınlık için  $[0^\circ]_{11}$  laminant istifleme sırası ile toplam 11 kat prepreg malzemesi kullanılmıştır.



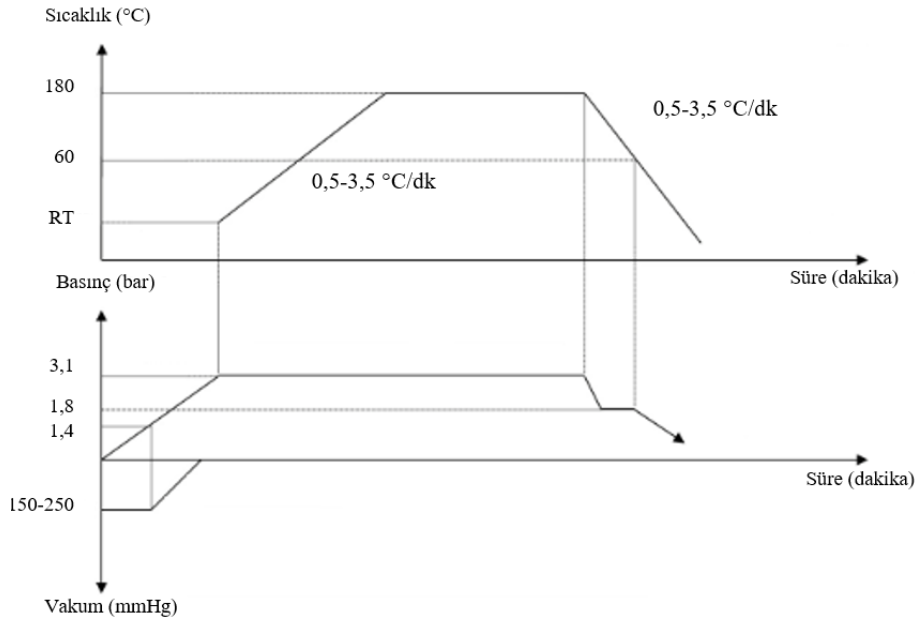
Şekil 3.1 Vakum torbalama yöntemi

Prepreg malzemeleri Şekil 3.1 'de verilen vakum torbalama yöntemi ile otoklavda Şekil 3.2'deki otoklav kürlenme diyagramına göre laminant hale getirilmiştir. Politetrafloroetilen (PTFE; Polytetrafluoroethylene) film, kürlenme aşamasında prepreglerin kalıp yüzeyine yapışmasını önlemek için ayırma filmi olarak kullanılmıştır.



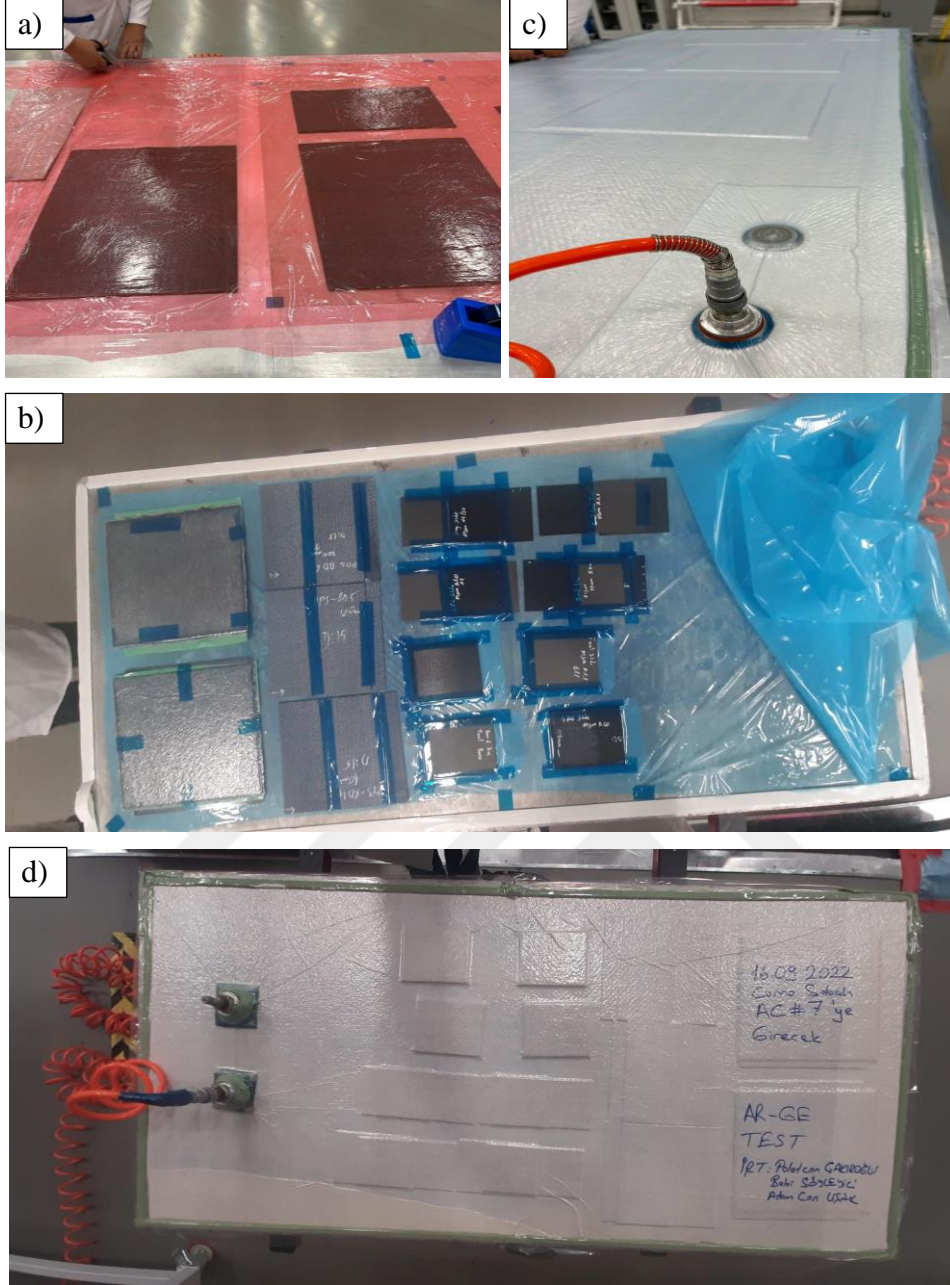
**Şekil 3.2** Prepreg otoklav kürlenme diyagramı

Plakaların yüzeyi izopropil alkol ile temizlendikten sonra, yapıştırma yüzeyinin yüzey işlemi için atmosferik basınçlı plazma yöntemi kullanılmıştır. Yüzey hazırlama prosesinden sonra kompozit laminantlar Şekil 3.3'teki yapıştırıcı otoklav kürlenme diyagramına göre 0,18 mm kalınlığında tek kat Cytec, FM 300K.05 epoksi bazlı film yapıştırıcısı ile birleştirilmiştir.



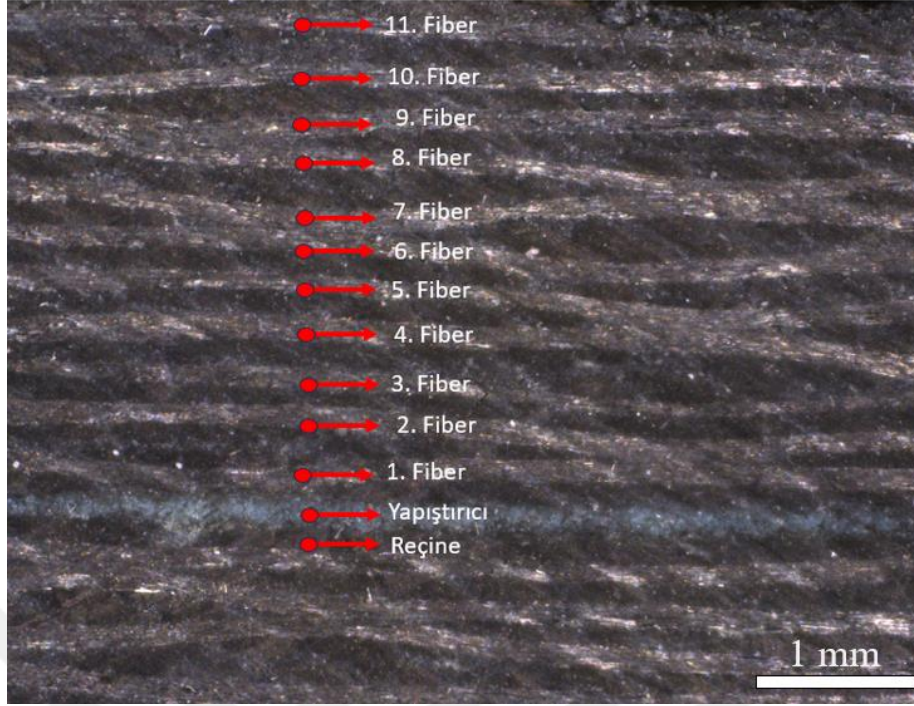
**Şekil 3.3** Yapıştırıcı otoklav kürlenme diyagramı

Vakum torbalama yöntemi uygulama görüntüleri Şekil 3.4'te verilmiştir.



**Şekil 3.4** Vakum torbalama yöntemine ait görüntüler: a) prepreg serimi, b) vakum torba altına alma, c) vakum hattına bağlama, d) otoklav öncesi

Şekil 3.5'te yapıştırma prosesi sonrası elde edilen laminant-yapıştırıcı yüzeyinin dijital mikroskop görüntüsü sunulmuştur.



**Şekil 3.5** Yapıştırma prosesi sonrası kama testi numunelerinin dijital mikroskop görüntüsü

Kompozit malzeme mekanik özellikleri Tablo 3.1’de sunulmuştur.

**Tablo 3.1** Kompozit malzemenin mekanik özellikleri [163]

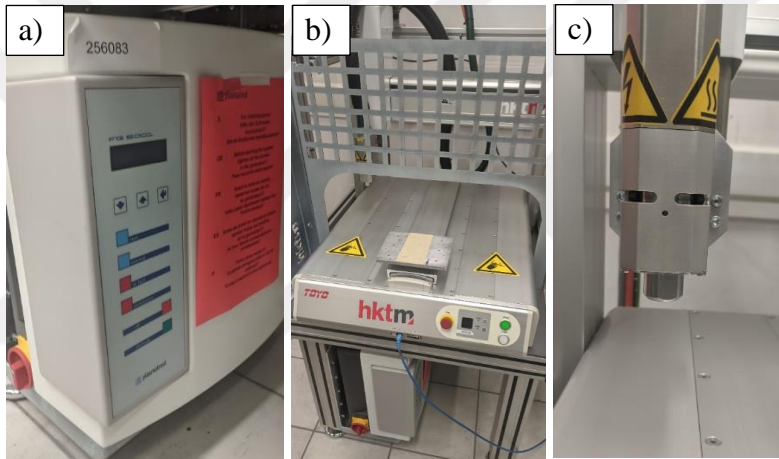
<b>Hexply 8552/ 37%</b>			
Reçine İçeriği (%ağ.)	37	Nominal Kalınlık (mm)	0,28
Serim fiber yönü	[0°]	Serim kat sayısı	8
0° Çekme Mukavemeti (MPa)	805	0° Basma Mukavemeti (MPa)	986
0° Çekme Modülü (GPa)	67	0° Basma Modülü (GPa)	59
90° Çekme Mukavemeti (MPa)	855	90° Basma Mukavemeti (MPa)	930
90° Çekme Modülü (GPa)	66	90° Basma Modülü (GPa)	58
0° Poisson Oranı	0,05	90° Poisson Oranı	0,05

### 3.2 Atmosferik Basıncı Plazma Yüzey Hazırlama İşlemi

Atmosferik basınçlı plazma yüzey hazırlama işlemi, kompozit malzemelerin yüzey modifikasyonu ve iyileştirilmesi açısından büyük önem taşımaktadır. Bu teknolojinin yüzeydeki kir ve oksit tabakalarını etkili bir şekilde temizlediği, aynı zamanda yüzey enerjisini artırarak daha iyi yapışma ve bağlanma özellikleri sağladığı belirtilmiştir [164]–[168]. Atmosferik basınç altında gerçekleştirilebildiği için, vakum gerektirmeden uygulanabildiği ve bunun da endüstriyel ölçekte kullanımını kolaylaştırdığı ve maliyetleri düşürdüğü rapor edilmiştir. Özellikle havacılık ve otomotiv endüstrilerinin yüksek performanslı yapışma ve kaplama gereksinimlerini karşılamak için ideal bir çözüm sunduğu vurgulanmıştır. Ayrıca,

çevre dostu bir teknoloji olduğu ve kimyasal kullanımını en aza indirerek daha sürdürülebilir üretim süreçlerine katkıda bulunduğu belirtilmiştir [169], [170].

Şekil 3.'da atmosferik basınçlı plazma yüzey işlem ekipmanları verilmiştir. FG5001 1kVA plazma jeneratörü (Plasmatreat, Almanya) tarafından kontrol edilen bir Plasmatreat RD2004 nozulundan (çap = 22 mm) oluşan döner plazma jeti, yüzey işleme amacıyla plazma kaynağı olarak kullanılmıştır. Atmosferik basınçlı plazma işlemi ve yapıştırıcı bağlama prosedürleri, her zaman %40 ila %50 aralığında olan aktif olarak izlenen bağıl nem (RH; Relative Humidity) ile temiz oda ortamında gerçekleştirilmiştir. Atmosferik basınçlı plazma işleminden önce veya sonra karakterizasyon ve yapıştırma işlem zamanına kadar kirleticileri önlemek için numuneler alüminyum folyoya sarılmıştır [8].



**Şekil 3.6** Plazma cihazının bileşenleri: a) Plasmatreat FG5001 plazma jeneratörü, b) 3 eksenli robot, c) RD2004 Plazma nozulu

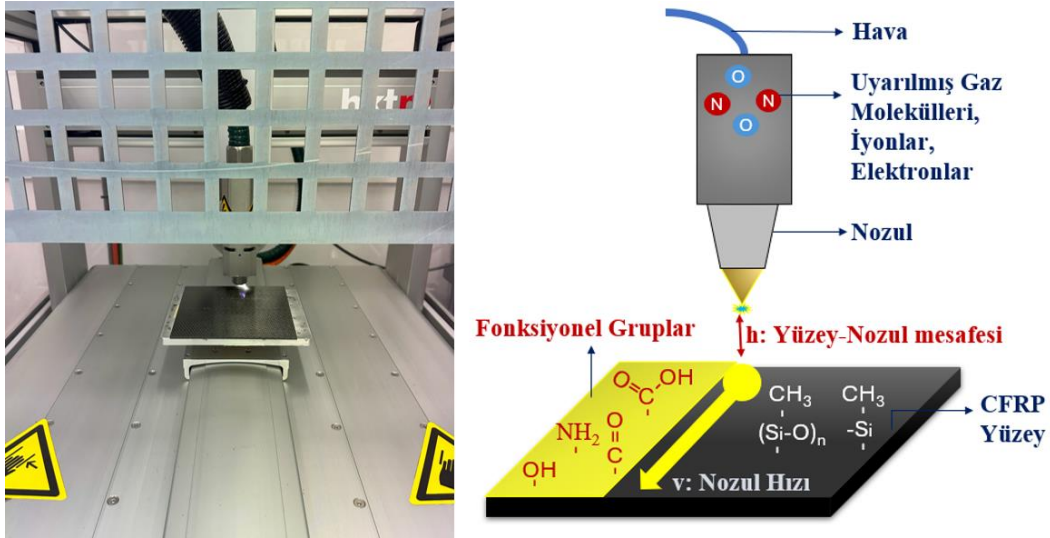
DeneySEL çalışmalar kapsamında kompozit yüzeylere uygulanan yüzey işlemleri Tablo 3.2'de verilmiştir.

**Tablo 3.2** Kompozit yüzeylere uygulanan yüzey işlemleri

Yüzey İşlemi	Kullanılan Ekipman	Markalama
Kalıp Taraf Temizleme	İzopropil Alkol	TS-IPA
Vakum Torba Taraf Temizleme	İzopropil Alkol	BS-IPA
Peel-ply	Polyester	TS-PP
Kalıp Taraf Plazma İşlemi	FG5001 1kVA Jeneratör ve RD2004 Nozul	TS-PL
Vakum Torba Taraf Plazma İşlemi		BS-PL

Yüzeyler, farklı atmosferik basınçlı plazma parametrelerine ayarlanarak işleme tabi tutulmuştur. İşlem parametreleri Tablo 3.3'te özetlenmiştir. Plazma nozul hızı, plazma başlığına göre numunenin işleme tabi tutulma hızını belirtir ve nozul hızının belirlediği bir hızda CFRP yüzeyi taranmıştır. Plazma nozul-yüzey mesafesi ise

Şekil 3.7'de gösterildiği gibi, plazma nozul ucu ile CFRP en üst yüzeyi arasındaki mesafeyi belirtmektedir. Bu işlem, tüm kompozit panel yüzeyi işleme tabi tutulana kadar tekrarlanmış ve ardından yapıştırma işlemi hemen başlatılmıştır.



Şekil 3.7 Atmosferik basınçlı plazma yüzey işlem prosesi

Tablo 3.3 Plazma yüzey işlem proses parametreleri

Parametreler	Plazma-Yüze- Yüze Mesafesi (mm)	Plazma Nozul Hızı (mm/s)	Geçiş Sayısı
TS-PL/v10	11	10	1
TS-PL/v30	11	30	1
TS-PL/v50	11	50	1
TS-PL/v70	11	70	1
TS-PL/v90	11	90	1
TS-PL/v110	11	110	1
TS-PL/h5	5	30	1
TS-PL/h8	8	30	1
TS-PL/h11	11	30	1
TS-PL/h14	14	30	1
TS-PL/h17	17	30	1
TS-PL/h20	20	30	1
BS-PL/v10	11	10	1
BS-PL/v50	11	50	1
BS-PL/h5	5	30	1
BS-PL/h20	20	30	1
BS-PL/p1	7	20	1
BS-PL/p8	7	20	8
BS-PL/p16	7	20	16
BS-PL/p24	7	20	24

### 3.3 Yüzey Karakterizasyon Yöntemleri

Tez çalışmasında, bağlantı kuvvetine katkıda bulunan faktörler hakkında daha detaylı veriler edinmek amacıyla farklı yüzey hazırlama tekniklerinin ve atmosferik basınçlı plazma işleminin etkileri dikkate alınarak yüzeyi hazırlanan substratların kapsamlı yüzey karakterizasyonu gerçekleştirilmiştir. Karakterizasyon teknikleri arasında temas açısı ölçümleri, yüzey serbest enerjisi, Taramalı Elektron Mikroskobu, Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi-Zayıflatılmış Toplam Yansıma, profilometre, Atomik Kuvvet Mikroskobu ve X-ray Fotoelektron Spektroskopisi yer almıştır. Temas açısı ölçümleri ve yüzey serbest enerjisi, yüzeylerin ıslanabilirlik özelliklerini belirlemek için kullanılmıştır [171], [172]. SEM ve AFM analizleri ile yüzey morfolojisi ve topografyası detaylı bir şekilde incelenmiştir. FTIR-ATR, yüzeydeki fonksiyonel grupların kimyasal bileşimini tanımlarken, profilometre yüzey pürüzlülüğünün ölçülmesine olanak tanımıştır. XPS analizleri ise yüzeyin kimyasal bileşimini ve elementel dağılımının analiz edilmesine yardımcı olmuştur. Bu karakterizasyon teknikleri, yüzey modifikasyonlarının etkilerini anlamak ve yapışma performansını iyileştirmek için kritik öneme sahiptir [3], [62], [173]–[175].

#### 3.3.1 Temas Açısı Ölçümleri

Sıvının katı bir yüzeyle temas açısını ölçmek, yüzey özelliklerini değerlendirmek için yaygın olarak kullanılan bir tekniktir ve ıslanabilirlik hakkında bilgiler sağlamaktadır [176]–[178]. Atmosferik basınçlı plazma işleminin CFRP substratların ıslanabilirliği üzerindeki etkisi, kompozit yüzeylerinin su ve diiyodometan temas açıları ASTM D7334-08 standardına göre Şekil 3.8'deki Attension Theta marka bir optik tansiyometre (Biolin Scientific AB, İsveç) kullanılarak belirlenmiştir [179].



Şekil 3.8 Attension Theta Cihazı [180]

Çevresel koşullardan etkilenmemesi ve yüzey modifikasyonunun minimize edilmesi için temas açıları plazma işleminden hemen sonra ölçülmüştür. Yüzey serbest enerjisini değerlendirmek amacıyla, Tablo 3.4'teki bilinen polar ve dispersif bileşenlerine sahip olan iki standart test sıvısı, yani diiyodometan ve deiyonize su seçilmiştir [115], [181]. 5 µL test sıvısı hacmi kullanılmıştır. Test sıvısı CFRP substrat yüzeyine ulaştıktan sonra, temas açıları 10 saniye boyunca kaydedilmiş ve ortalama değer, substratın üç farklı bölgesinden alınan ölçümler baz alınarak hesaplanmıştır.

### 3.3.2 Yüzey Serbest Enerjisi

Yüzey serbest enerjisinin polar ve dispersif bileşenlerini belirlemek için OWRK (Owens-Wendt-Rabel-Kaelble) Denklemi (3.1) kullanılmıştır. Dispersif bileşenler Van der Waals ve London tipi etkileşimlerden kaynaklanırken, polar bileşenler polar grupların kalıcı dipol momentleriyle etkileşmesinden kaynaklanmaktadır [182]. Denklem 3.1'de,  $\theta$ , temas açısını,  $\sigma_S$  ve  $\sigma_L$  sırasıyla katı yüzey serbest enerjisi ve sıvı yüzey gerilimini temsil etmektedir. Ayrıca, üst simgeler polar (P) ve dispersif (D) kısımları ifade eder ve yüzey enerjisi, her iki bileşenin toplamından oluşmaktadır.

$$\sigma_L \cdot (1 + \cos\theta) = 2 \cdot \sqrt{\sigma_S^D \cdot \sigma_L^D} + 2 \cdot \sqrt{\sigma_S^P \cdot \sigma_L^P} \quad (3.1)$$

**Tablo 3.4** Test sıvılarının polar ve dispersif yüzey gerilimleri [62]

Test Sıvısı	$\gamma = \gamma^D + \gamma^P$	$\gamma^D$	$\gamma^P$
Diiodometan	50,8	50,8	0
Deiyonize Su	72,8	21,8	51,0

### 3.3.3 Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)

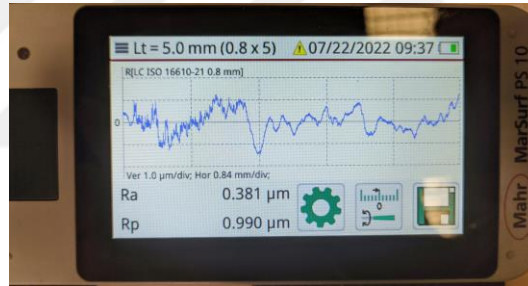
Yüzey morfolojik değişikliklerini incelemek için numuneler mikro-indentasyon işlemine tabi tutulmuş ve ardından SEM (Zeiss–Sigma 300 modeli) ile incelenmiştir. CFRP numuneleri, yük birikimini önlemek amacıyla Quorum Q150R ES kullanılarak altın kaplanmıştır. SEM görüntülemesi yapılmadan önce 20 kV'lık bir ivme alanı kullanılmış ve çalışma mesafesi yaklaşık 7,1 ile 11,1 mm arasında ayarlanmıştır.

### 3.3.4 Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi- Zayıflatılmış Toplam Yansıma (FTIR-ATR)

Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi analizi, Diamond/ZnSe kristaline sahip Universal ATR örnekleme aksesuarı ile donatılmış PerkinElmer Spektrometresi ile gerçekleştirilmiştir. Her numuneden,  $4 \text{ cm}^{-1}$  çözünürlükte ortalama 50 tarama alınmış ve her ölçümden önce bir arka plan taraması yapılmıştır. Kızılötesi spektrum,  $400 \text{ cm}^{-1} - 4000 \text{ cm}^{-1}$  aralığında uzanmıştır. FTIR analizi ile yüzeyi işlenmemiş, peel-ply uygulanmış ve atmosferik basınç plazma yüzey işlemleri yüzeyler analiz edilmiştir. Ölçümler, fiberlerle etkileşimi en aza indirmek amacıyla reçine bakımından zengin yüzeyden alınmıştır [38].

### 3.3.5 Profilometre

Profilometre ölçümleri için  $0,01 \mu\text{m}$ 'lik bir çözünürlüğe ve  $2 \mu\text{m}$  bir elmas uça sahip Şekil 3.9'daki Mahr MarSurf PS 10 profilometre kullanılmıştır. İzleme kuvveti  $5 \text{ mN}$  ve analiz edilen uzunluk  $5 \text{ mm}$  olarak uygulanmıştır. Çalışılan her yüzey için beş ölçüm yapılmıştır [133], [183].



Şekil 3.9 MarSurf PS 10 pürüzlülük ölçüm cihazı

### 3.3.6 Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM)

Atmosferik plazma işlemi sonrasında kompozit yüzey topografyasındaki değişiklikleri gözlemlemek için, tapping modunda çalışan atomik kuvvet mikroskobu (BRUKER Dimension Edge with ScanAsyst) kullanılmıştır. Her bir numune için  $90 \times 90 \mu\text{m}$  tarama alanı,  $11,9 \mu\text{m/s}$  uç hızı ve  $100 \text{ nm}$  yükseklik kullanılmıştır. Her numunenin çeşitli bölgelerinde topografik haritalar elde edilmiştir [184].

### 3.3.7 X-ray Fotoelektron Spektroskopisi (XPS)

Atmosferik basınçlı plazma yüzey işleminin CFRP substratlarının yüzey kimyasal bileşimi üzerindeki etkisini incelemek için,  $300 \mu\text{m}$  spot boyutuna sahip monokromatik bir  $\text{Al-K}\alpha$  X-ışını kaynağı kullanılarak Thermo Scientific K-Alpha+ X-ışını fotoelektron spektroskopisi (XPS) uygulanmıştır. Geniş taramalar ve

yüksek çözünürlüklü spektrumlar için sırasıyla 200 eV ve 50 eV'lik analizör geçiş enerjileri kullanılmış ve XPS analiz odasının taban basıncı  $1 \times 10^{-9}$  Torr olarak ayarlanmıştır.

### 3.4 Mekanik Test Yöntemleri

Deneyisel çalışmalarda, yapıştırılmış kompozit-kompozit bağlantıların mekanik özelliklerini değerlendirmek amacıyla tek bindirmeli kesme testi ve kama testi kullanılmıştır.

#### 3.4.1 Tek Bindirmeli Kesme Testi Uygulaması

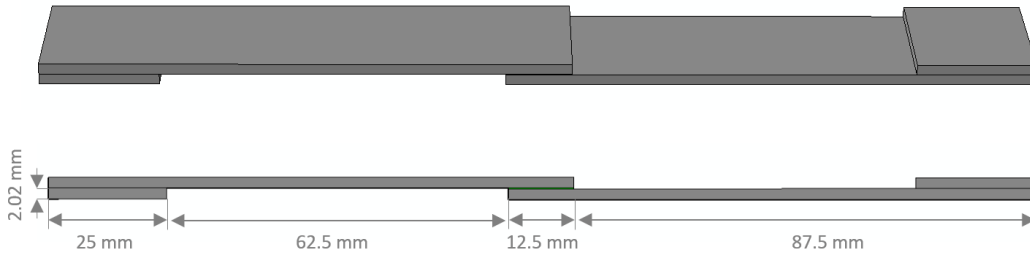
Tek bindirmeli kesme testi, yapıştırılmış kompozit bağlantıların mekanik performansını değerlendirmek için etkili ve güvenilir bir test yöntemi olmuştur [85], [185]–[190]. Tez çalışmasında, farklı yüzey işlemleri ile hazırlanmış bağlantıları değerlendirmek için EN 2243-1'e standardına göre bindirme kesme testi uygulanmıştır [191], [192]. Numune geometrisi ve numune boyutları Şekil 3.10 ve Şekil 3.11'de verilmiştir.



Şekil 3.10 Tek bindirmeli kesme testi örnek numune fotoğrafları

Mekanik ölçümler, Universal Instron 5985 cihazı ile oda sıcaklığında yapılmıştır. Test sırasında gerilim-yer değiştirme grafikleri elde edilmiştir. Çekme testi sırasında oluşan eğilme stresinin etkilerini en aza indirmek için yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantı numunelerinin her iki ucuna iki dolgu plakası eklenmiştir [12]. Aşağıdaki denklemde verildiği gibi, çekme testlerinden elde edilen maksimum yük, CFRP bağlantılarının bindirme kesme mukavemetini ( $\sigma$ ) hesaplamak için yapışma alanına bölünmüştür. Denklem 3.2’de,  $P_{max}$  elde edilen maksimum yük, L örtüşme uzunluğu, B numune genişliğini temsil etmektedir.

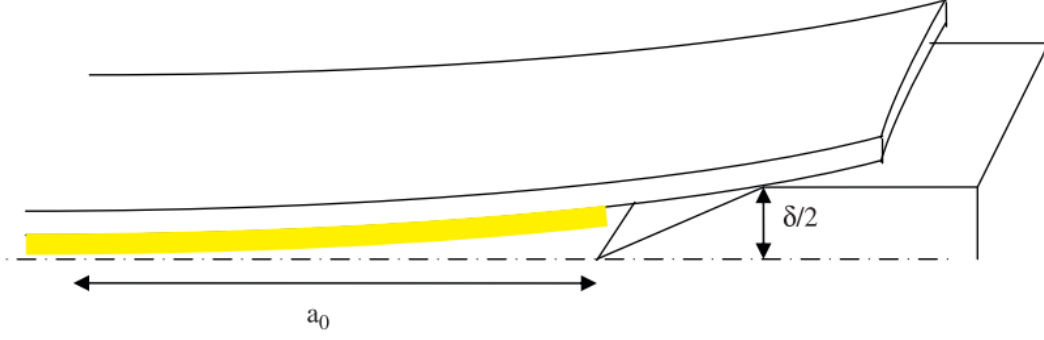
$$\sigma = \frac{P_{max}}{LB} \quad (3.2)$$



**Şekil 3.11** EN 2243-1 standartına göre tek bindirmeli kesme testi numune boyutları [192]

### 3.4.2 Kama Testi Uygulaması

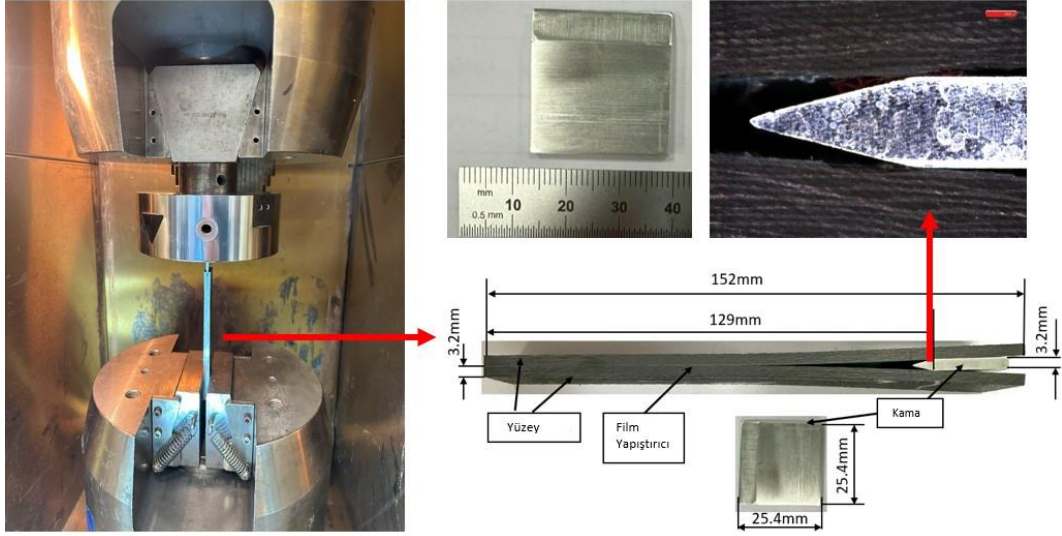
Agresif çevresel koşullar altında bağlantıların davranışını değerlendirmenin en iyi yolu soyulma yüklemesidir. Çünkü bu lokal olarak arayüzü yüklemektedir [82], [193]–[196]. Bindirme kesme yükü ise daha iyi dağıtılmış bir yük sağlamaktadır. Boeing kama testi (BWT; Boeing Wedge Test), uçak imalatında kullanılan alüminyum alaşımlarının farklı yüzey işlemlerinin çeşitli agresif ortamlardaki dayanıklılığını değerlendirmek için 1970'lerde Boeing tarafından geliştirilmiştir [197]. Bu test, o zamandan bu yana hemen hemen tüm metal bağlı imalat programlarının ayrılmaz bir parçası haline gelmiş ve ASTM D 3762 standardında açıklanmıştır [198]. Esas itibarıyla, bir kiriş, yapışan tabakanın gerilme altına alınacağı şekilde yanal olarak yüklenmektedir. Şekil 3.12’de gösterildiği gibi kamanın kirişe temas ettiği yerde bir kuvvet aracılığıyla  $a_0$  uzunluğunda bir çatlakla neden olmaktadır.



Şekil 3.12 Genel kama testinin şematik diyagramı [199]

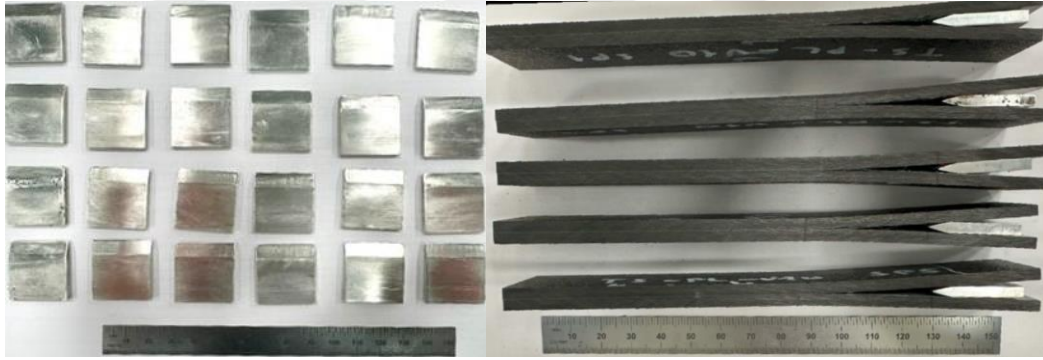
BWT tipik olarak bir test numunesinin çevresel dayanıklılığını değerlendirmek için kullanılır ve numune çevresel olarak agresif bir atmosferdeyken numune üzerinde bir soyulma yükünü korumaktadır. Test, bir yapıştırıcıyla birleştirilmiş iki yapıştırıcıdan (yaklaşık olarak 25 mm genişliğinde ve 150 mm uzunluğunda) oluşur. Numunenin bir ucuna (yapıştırıcının yaklaşık 20 mm dışarıda bırakıldığı) bir kama yerleştirilir. Bağlantı, kenar sabit bir konumda olacak şekilde zorlanarak açılır ve çatlak büyümesi, zamanın bir fonksiyonu olarak kayıt altına alınarak tamamlanmaktadır [200].

Bu tez çalışmasında, atmosferik basınçlı plazma yüzey hazırlama tekniğinin yapıştırıcının çevresel dayanıklılığına olan etkisini değerlendirebilmek için ASTM D3762 standardına göre Kama Test yöntemi kullanılmıştır. Önceki çalışmada belirlenen optimum nozul-yüzey mesafe ve nozul hızı parametreleri kullanılmıştır. Yüzey-nozul uzaklığı 11 mm olarak alınmıştır. Çalışmada nozul hızı 10 mm/s, 50 mm/s, 70 mm/s ve 110 mm/s olarak 4 farklı parametre kullanılmıştır. Testte, yapıştırılmış iki malzeme arasına yerleştirilmiş bir kama şeklindeki bir alüminyum parça kullanılmıştır. Universal Instron 5985 cihazında, numunelere kamalar 20 mm/dk hız oranı ile Şekil 3.13'teki kurulum kullanılarak yerleştirilmiştir. Kamalar, yapıştırıcı arayüzü üzerinde kuvvet oluşturarak yapıştırıcı ve yüzey hazırlığı kalitesine bağlı çatlak başlatan bir stres oluşturmaktadır.



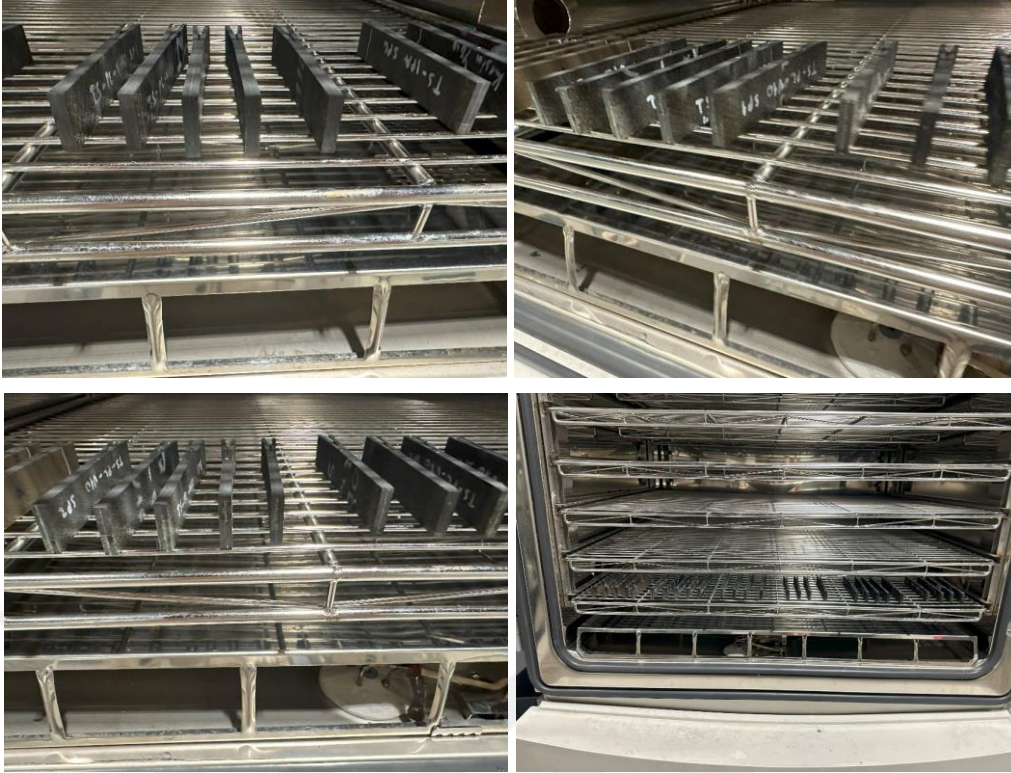
**Şekil 3.13** Kama testi kurulum ve numune boyutları

Üretilen kamalar ve kamaların yerleştirildikten sonraki örnek görüntüleri Şekil 3.14’te verilmiştir.



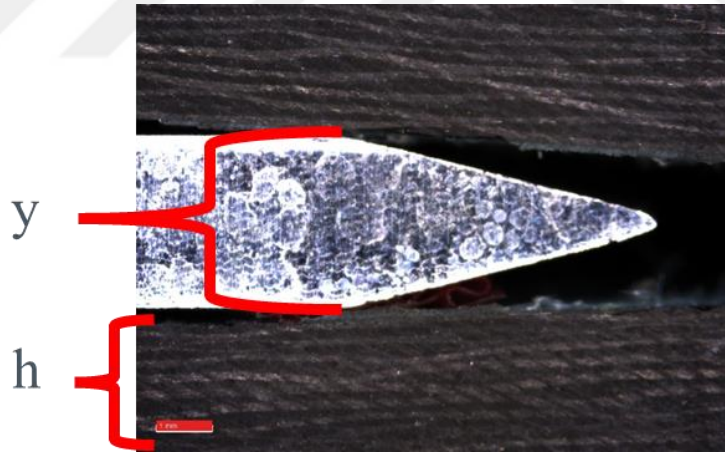
**Şekil 3.14** Üretilen alüminyum kama (sol) ve kama yerleştirilmiş numune (sağ) görüntüleri

Kama yerleştirilen numuneler 80°C ve %95 nem ile şartlandırılmış kabine Şekil 3.15’te verildiği gibi koyulmuştur. Zamana bağlı çatlak ilerlemesi 0, 24, 48, 72, 144, 288 ve 432. saatlerde dijital mikroskop (ZEISS Smartzoom 5, Almanya) ile ölçülmüştür. Kama testi ile belirlenen kırılma tokluk enerjisi, mod I ( $G_{IC}$ ),  $J/m^2$  ile ifade edilir. Ve çatlak oluşumu/ilerlemesi sırasında enerjisi salım oranını temsil etmektedir.



**Şekil 3.15** Kabine yerleştirilen numunelerin farklı açıdan görüntüleri

Kama testinin dijital mikroskop görüntüsü Şekil 3.16'da verilmiştir.



**Şekil 3.16** Kama testinin dijital mikroskop görüntüsü

Denklem 3.3, Sargent [82] tarafından rapor edilmiştir ve lineer-elastik kiriş teorisine dayanmaktadır:

$$G_{IC} = \frac{Ey^2h^3}{16} \frac{[3(\alpha+0.6h)^2+h^2]}{[(\alpha+0.6h)^3+\alpha h^2]^2} \quad (3.3)$$

Burada;

$G_{IC}$ : Kırılma tokluk enerjisi salınım hızı ( $J/m^2$ )

E: Malzemenin Young modülü (Pa)

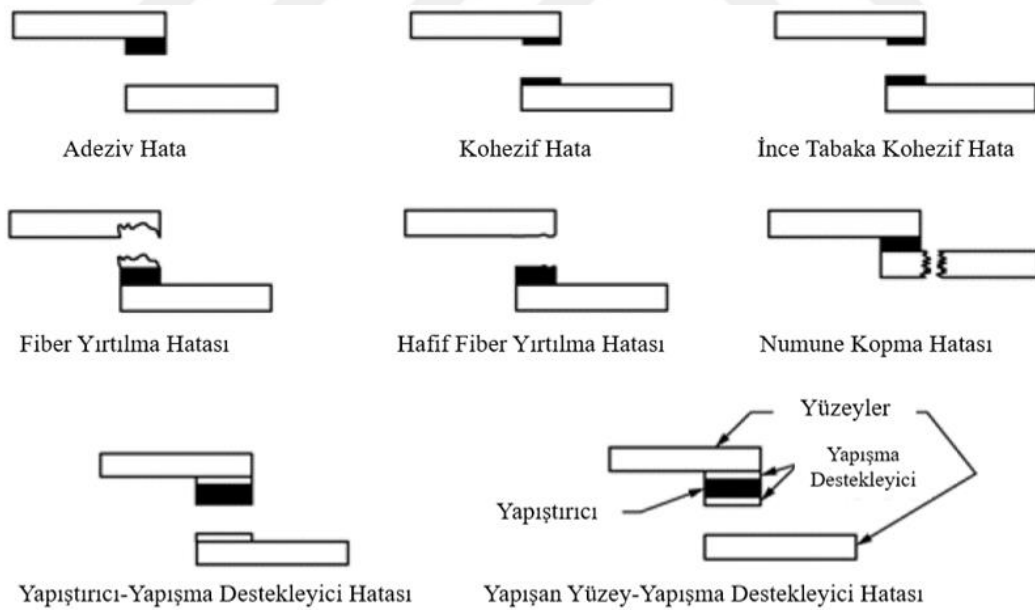
a: Kamanın taşıyıcı kenarlarından çatlak ucuna kadar olan çatlak uzunluğu (m)

h: Yapıştırılan yüzey kalınlığı (m)

y: Yük noktasında yer değiştirme (m)

### 3.4.3 Fiber Takviyeli Polimerlerin Bağlantı Hata Modlarının Sınıflandırılması

Bağlantı kopmasında yer alan yüzeylere hata yeri denmektedir. Testlerden sonra, hata modları görsel inceleme ile analiz edilmiştir ve ASTM D5573'e göre sınıflandırılmıştır [201]. Hata modunun ortaya çıkması için farklı olasılıklar vardır. Şekil 3.17'de gösterildiği gibi yapıştırıcı ile yapıştırılanlardan biri arasında bağ kopması meydana gelirse buna yapıştırıcı hatası (adeziv hata) olarak tanımlanmaktadır. Ayrılmanın, her iki yapışan yüzeyin de yapıştırıcı ile kaplı kaldığı bir şekilde meydana geldiği bir arızaya, kohezyon hatası (kohezif hata) olarak tanımlanmaktadır. Bazen hata bağdan uzaktaki yapıştırıcılardan birinde meydana gelebilir. Buna ince tabaka kohezif hata denilmektedir. Bağ hataları genellikle birden fazla hata modunu içerir ve adeziv veya kohezif hatanın bir yüzdesi olarak tanımlanmaktadır [18].



Şekil 3.17 Kompozit bağlantıların hata modları [201]

## ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRİLMESİ

### 4.1 Temas Açı Ölçüm Sonuçları

Farklı plazma yüzey işleme parametreleri uygulanan numune yüzeylerinden ölçülen temas açıları Tablo 4.1-4.5 ve Şekil 4.1-4.2'de sunulmuştur. Kalıp (tool) ile temas eden ve vakum torbasıyla (bag) temas eden yüzeylerin APT işlemine tabi tutuldukça su temas açılarının keskin bir şekilde azaldığı görülmüştür.

**Tablo 4.1** Plazma nozul hızının (v) bir fonksiyonu olarak kompozit yüzeylerin su ve diiyodometan temas açıları, kalıp taraf

Parametreler	Mesafe (mm)	Hız (mm/s)	Geçiş Sayısı	WCA (°)	Standart Sapma	DCA (°)	Standart Sapma
TS-IPA	-	-	-	55,40	1,07	60,25	4,51
TS-PL/v10	11	10	1	7,46	1,10	25,94	3,90
TS-PL/v30	11	30	1	17,96	0,40	28,42	0,86
TS-PL/v50	11	50	1	25,16	1,14	42,09	4,05
TS-PL/v70	11	70	1	29,92	2,01	42,34	3,05
TS-PL/v90	11	90	1	36,45	3,95	48,80	2,98
TS-PL/v110	11	110	1	44,41	1,24	56,26	3,57

**Tablo 4.2** Plazma nozul-yüzey mesafesinin (h) bir fonksiyonu olarak kompozit yüzeylerin su ve diiyodometan temas açıları, kalıp taraf

Parametreler	Mesafe (mm)	Hız (mm/s)	Geçiş Sayısı	WCA (°)	Standart Sapma	DCA (°)	Standart Sapma
TS-IPA	-	-	-	55,40	1,07	60,25	4,51
TS-PL/h5	5	30	1	13,25	0,87	18,82	1,74
TS-PL/h8	8	30	1	17,14	1,70	19,39	1,20
TS-PL/h11	11	30	1	17,96	0,40	28,42	0,86
TS-PL/h14	14	30	1	34,43	3,54	39,77	3,92
TS-PL/h17	17	30	1	44,66	4,36	44,46	4,86
TS-PL/h20	20	30	1	53,97	1,75	48,36	2,37

**Tablo 4.3** Plazma nozul hızının (v) bir fonksiyonu olarak kompozit yüzeylerin su ve diiyodometan temas açıları, vakum torba taraf

Parametreler	Mesafe (mm)	Hız (mm/s)	Geçiş Sayısı	WCA (°)	Standart Sapma	DCA (°)	Standart Sapma
BS-IPA	-	-	-	80,10	2,81	46,71	2,16
BS-PL/v10	11	10	1	22,98	1,00	32,09	3,88
BS-PL/v50	11	50	1	30,33	2,14	42,39	1,14

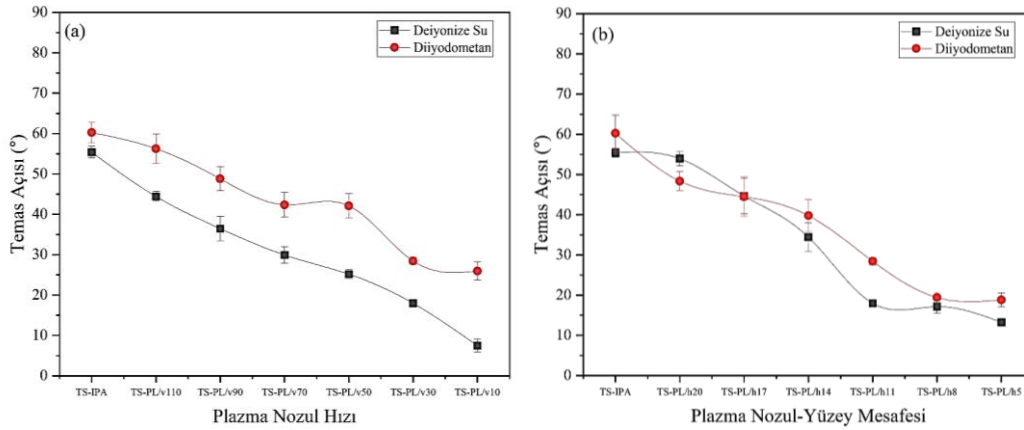
**Tablo 4.4** Plazma nozul-yüzey mesafesinin (h) bir fonksiyonu olarak kompozit yüzeylerin su ve diiyodometan temas açıları, vakum torba taraf

Parametreler	Mesafe (mm)	Hız (mm/s)	Geçiş Sayısı	WCA (°)	Standart Sapma	DCA (°)	Standart Sapma
BS-IPA	-	-	-	80,10	2,81	46,71	2,16
BS-PL/h5	5	30	1	20,02	4,33	30,70	1,79
BS-PL/h20	20	30	1	65,45	2,87	44,73	5,81

**Tablo 4.5** Plazma nozul geçiş sayısının (p) bir fonksiyonu olarak kompozit yüzeylerin su ve diiyodometan temas açıları, vakum torba taraf

Parametreler	Mesafe (mm)	Hız (mm/s)	Geçiş Sayısı	WCA (°)	Standart Sapma	DCA (°)	Standart Sapma
BS-IPA	-	-	-	80,10	2,81	46,71	2,16
BS-PL/p1	7	20	1	24,97	1,85	42,39	1,86
BS-PL/p8	7	20	8	17,80	2,06	30,74	1,20
BS-PL/p16	7	20	16	11,33	0,47	22,20	3,63
BS-PL/p24	7	20	24	9,99	1,57	16,00	0,60

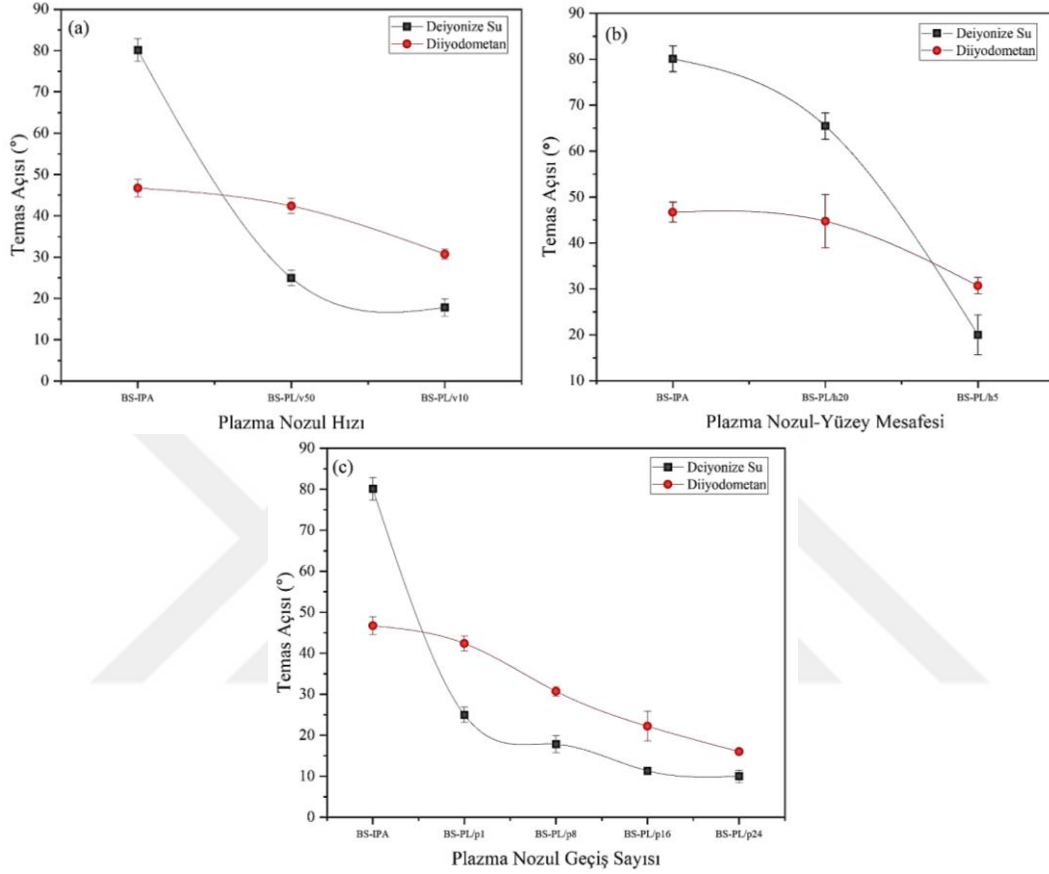
Şekil 4.1 (a,b), sırasıyla plazma nozul hızının ve mesafesinin kalıp tarafıyla temas eden 8552/5h laminantlar için temas açısı üzerindeki etkisini göstermektedir. Çözücü ile temizlenmiş kalıp taraf yüzey, 55°'lik bir temas açısı sergilemiştir. Plazma nozul hızının ve nozul mesafesinin azalmasına ve dolayısıyla plazma maruziyetinin artmasına bağlı olarak kalıp taraf yüzeyde, yaklaşık 7°'ye kadar temas açısı düşüşü gözlemlenmiştir.



**Şekil 4.1** Plazma nozul hızının (v) ve mesafesinin (h) bir fonksiyonu olarak kalıp taraf kompozit yüzeyin temas açısı

Şekil 4.2 (a,b,c) sırasıyla plazma nozul hızının, nozul mesafesinin ve plazma geçiş sayısının vakum torba tarafıyla temas eden 8552/5h laminantlar için temas açısı üzerindeki etkisini göstermektedir. Çözücü ile temizlenmiş vakum torba taraf yüzey, 80°'lik bir temas açısı sergilemiştir. Plazma nozul hızının ve nozul mesafesinin azalmasına ve plazma geçiş sayısının artmasına bağlı olarak vakum

taraf yüzeyde, yaklaşık 10°'ye kadar temas açısı düşüşü tespit edilmiştir. Plazma işlemi uygulanmış numune yüzeylerinin çözücü ile silinmiş yüzeylere kıyasla temas açısındaki düşüşlerin, FTIR (ATR) analizi ile doğrulandığı üzere numunelerin yüzeyindeki toplam oksijen içeriğindeki artışlarla iyi bir korelasyonu olduğu görülmüştür.



**Şekil 4.2** Plazma nozul hızının (v), mesafesinin (h) ve geçiş sayısının (p) bir fonksiyonu olarak vakum torba taraf kompozit yüzeyin temas açısı

#### 4.2 Yüzey Serbest Enerjisi Sonuçları

Plazma işleminin, temas açısı ölçümleriyle yansıtıldığı gibi, polimer yüzeylerin yüzey enerjisi üzerinde önemli bir etki oluşturduğu gözlemlenmiştir. LSS'deki gelişmenin arkasındaki mekanizmayı daha iyi anlamak için, plazma işleminin bir fonksiyonu olarak işlenmiş yüzeylerin derinlemesine karakterizasyonu yapılmıştır. Farklı plazma yüzey işleme parametreleri ile hesaplanan toplam ve polar yüzey enerjileri Tablo 4.6- Tablo 4.10 arasında sunulmuştur. Şekil 4.3 (a,b)'de plazma uygulanmış kalıpla (tool) temas eden yüzeyin ve Şekil 4.4 (a,b,c)'te ise plazma uygulanmış vakum torbasıyla (bag) temas eden yüzeyin toplam ve polar yüzey enerjileri sunulmuştur.

Çözücü ile temizlenen kalıp taraf yüzeyin toplam yüzey enerjisi plazma maruziyet artışına bağlı olarak 49 mN/m'den 80 mN/m'ye kadar artış göstermiştir. Çözücü ile temizlenen vakum torba taraf yüzeyin toplam yüzey enerjisi plazma maruziyet artışına bağlı olarak 41 mN/m'den 81 mN/m'ye kadar artış göstermiştir.

**Tablo 4.6** Plazma nozul hızının (v) bir fonksiyonu olarak kompozit yüzeylerin yüzey serbest enerjisi, kalıp taraf

Parametreler	Mesafe (mm)	Hız (mm/s)	Geçiş Sayısı	Toplam (mN/m)	Standart Sapma	Polar (mN/m)	Standart Sapma
TS-IPA	-	-	-	49,51	1,99	21,08	0,60
TS-PL/v10	11	10	1	79,83	0,81	34,08	0,64
TS-PL/v30	11	30	1	77,10	0,28	32,24	0,06
TS-PL/v50	11	50	1	71,48	0,75	32,98	1,48
TS-PL/v70	11	70	1	69,26	1,69	30,87	0,15
TS-PL/v90	11	90	1	64,28	1,44	29,35	3,08
TS-PL/v110	11	110	1	57,67	1,53	26,95	0,85

Çözücü ile temizlenen kalıp taraf yüzeyin polar yüzey enerjisi plazma maruziyet artışına bağlı olarak 21 mN/m'den 34 mN/m'ye kadar artış göstermiştir. Çözücü ile temizlenen vakum torba taraf yüzeyin polar yüzey enerjisi ise plazma maruziyet artışına bağlı olarak 5 mN/m'den 33 mN/m'ye kadar artış göstermiştir. Polar yüzey enerjisi kalıpla temas eden yüzey için 31 mN/m'de vakum torba taraf ile temas eden yüzey için ise 32 mN/m'de stabilize olmuştur ve sonraki plazma işlemi uygulamalarıyla hemen hemen sabit kaldığı tespit edilmiştir.

**Tablo 4.7** Plazma nozul hızının (v) bir fonksiyonu olarak kompozit yüzeylerin yüzey serbest enerjisi, kalıp taraf

Parametreler	Mesafe (mm)	Hız (mm/s)	Geçiş Sayısı	Toplam (mN/m)	Standart Sapma	Polar (mN/m)	Standart Sapma
TS-IPA	-	-	-	49,51	1,99	21,08	0,60
TS-PL/h5	5	30	1	79,99	0,22	31,88	0,37
TS-PL/h8	8	30	1	78,91	0,64	30,96	0,35
TS-PL/h11	11	30	1	77,10	0,28	32,24	0,06
TS-PL/h14	14	30	1	67,65	1,21	27,97	2,61
TS-PL/h17	17	30	1	60,76	1,62	23,51	3,56
TS-PL/h20	20	30	1	54,01	0,89	18,84	1,44

**Tablo 4.8** Plazma nozul hızının (v) bir fonksiyonu olarak kompozit yüzeylerin yüzey serbest enerjisi, vakum torba taraf

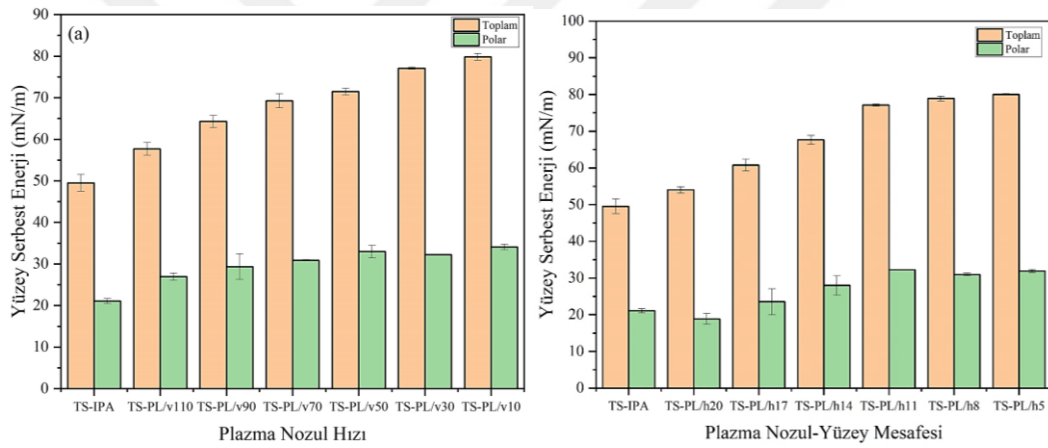
Parametreler	Mesafe (mm)	Hız (mm/s)	Geçiş Sayısı	Toplam (mN/m)	Standart Sapma	Polar (mN/m)	Standart Sapma
BS-IPA	-	-	-	41,15	1,72	5,05	0,94
BS-PL/v10	11	10	1	74,65	1,18	31,32	0,53
BS-PL/v50	11	50	1	68,73	0,89	30,38	1,22

**Tablo 4.9** Plazma nozul-yüzey mesafesinin (h) bir fonksiyonu olarak kompozit yüzeylerin yüzey serbest enerjisi, vakum torba taraf

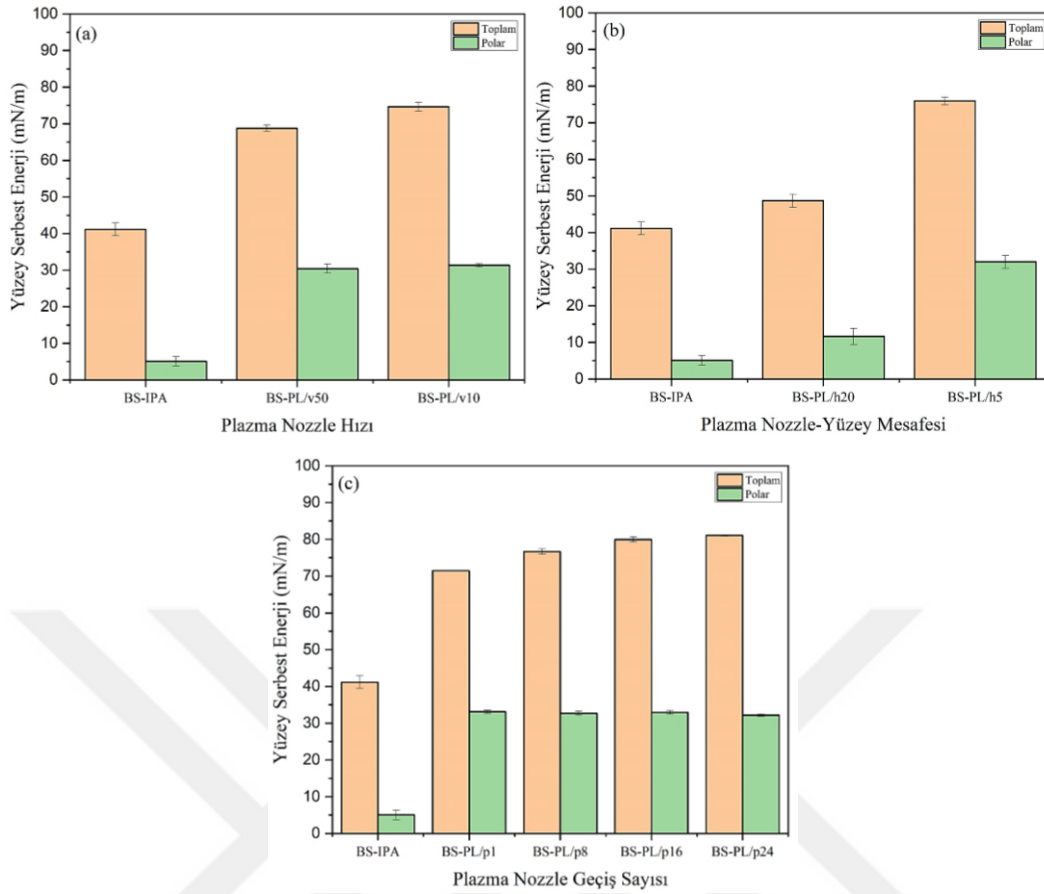
Parametreler	Mesafe (mm)	Hız (mm/s)	Geçiş Sayısı	Toplam (mN/m)	Standart Sapma	Polar (mN/m)	Standart Sapma
BS-IPA	-	-	-	41,15	1,72	5,05	0,94
BS-PL/h5	5	30	1	48,70	1,78	11,62	2,19
BS-PL/h20	20	30	1	75,92	1,01	31,99	1,74

**Tablo 4.10** Plazma nozul geçiş sayısının (p) bir fonksiyonu olarak kompozit yüzeylerin yüzey serbest enerjisi, vakum torba taraf

Parametreler	Mesafe (mm)	Hız (mm/s)	Geçiş Sayısı	Toplam (mN/m)	Standart Sapma	Polar (mN/m)	Standart Sapma
BS-IPA	-	-	-	41,15	1,72	5,05	0,94
BS-PL/p1	7	20	1	71,49	0,10	33,11	0,52
BS-PL/p8	7	20	8	76,68	0,77	32,72	0,51
BS-PL/p16	7	20	16	79,98	0,68	32,91	0,48
BS-PL/p24	7	20	24	81,06	0,20	32,16	0,34



**Şekil 4.3** Plazma nozul hızının (v) ve mesafesinin (h) bir fonksiyonu olarak kalıp taraf kompozit yüzeylerin toplam ve polar yüzey enerjisi



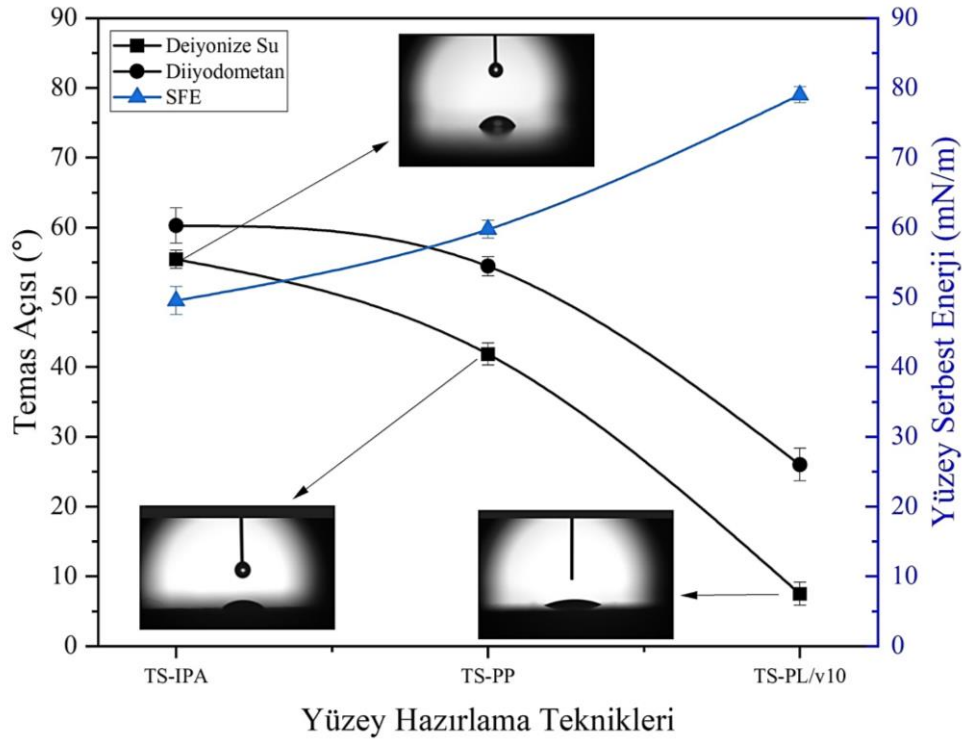
**Şekil 4.4** Plazma nozul hızının (v), mesafesinin (h) ve geçiş sayısının (p) bir fonksiyonu olarak vakum torba taraf kompozit yüzeylerin toplam ve polar yüzey enerjisi

Tablo 4.11’de peel-ply ile hazırlanan yüzeyin temas açısı, yüzey toplam enerjisi ve yüzey polar enerjisi verilmiştir.

**Tablo 4.11** Peel-ply yüzey hazırlama yöntemine ait temas açıları, toplam ve polar yüzey enerjileri

Parametre	WCA (°)	Standart Sapma	DCA (°)	Standart Sapma	Toplam (mN/m)	Standart Sapma	Polar (mN/m)	Standart Sapma
TS-PP	41,84	1,57	54,45	2,26	59,72	0,68	5,05	0,94

Şekil 4.5’te çözücü ile temizlenen yüzey, peel-ply yüzey ve plazma işlemi uygulanan kalıp taraf ve vakum torba taraf yüzeylerin temas açıları ve yüzey enerjileri karşılaştırılmıştır. Çözücü ile temizlenmiş yüzeyde 49 mN/m, peel-ply yüzeyde 59 mN/m ve plazma uygulanmış yüzeyde ise 79 mN/m ile en yüksek toplam yüzey enerjisi değerleri elde edilmiştir.



**Şekil 4.5** Farklı yüzey hazırlama işlemlerinin temas açılarının ve yüzey enerjilerinin karşılaştırılması.

### 4.3 Profilometre Yüzey Pürüzlülük Ölçüm Sonuçları

Farklı yüzey işlemleriyle üretilen kompozit numunelerin yüzey pürüzlülüğünde meydana gelen değişiklikler, profilometre ölçümlerinden belirlenmiştir. Otoklavda üretilen karbon fiber/epoksi kompozitler için en sık karşılaşılan yüzeyler, kalıpla (tool) temas eden yüzey ve vakum torbasıyla (bag) temas eden yüzeylerdir. Bu yüzeylere, iki adet farklı yüzey işlemi uygulanmıştır: peel-ply (PP) ve atmosferik plazma işlem (APT). ASME B46.1’de tanımlanan yüzey pürüzlülük parametrelerinden  $R_a$ , değerlendirilen profilin aritmetik ortalama sapması ve  $R_{maks}$ , maksimum pürüzlülük derinlik değerleri bir profilometre ile belirlenmiştir. Pürüzlülük değerleri Tablo 4.12 ve Tablo 4.13’te sunulmuştur. Sonuç olarak, APT yüzey işlem parametrelerinin, işlenmemiş kalıp ile temas eden termoset yüzeylerin ortalama pürüzlülüğünde profilometre ile belirlenebilecek boyutta bir değişikliğe neden olmamıştır. Ancak vakum torba taraf yüzeylerin ise ortalama pürüzlülük değerlerinde yaklaşık 1  $\mu m$  kadar artışa neden olduğu gözlemlenmiştir.

**Tablo 4.12** Plazma nozul hızının (v) ve nozul-yüzey mesafesinin (h) bir fonksiyonu olarak kompozit yüzeylerin  $R_a$  ve  $R_{maks}$  pürüzlülük değerleri, kalıp taraf

Parametreler	Mesafe (mm)	Hız (mm/s)	Geçiş Sayısı	$R_a$ ( $\mu\text{m}$ )	Standart Sapma	$R_{maks}$ ( $\mu\text{m}$ )	Standart Sapma
TS-IPA	-	-	-	0,42	0,02	3,60	1,26
TS-PL/v10	11	10	1	0,42	0,04	3,03	0,42
TS-PL/v30	11	30	1	0,46	0,04	2,78	0,95
TS-PL/v50	11	50	1	0,36	0,05	2,78	0,95
TS-PL/v70	11	70	1	0,32	0,04	2,55	0,35
TS-PL/v90	11	90	1	0,47	0,08	2,74	0,60
TS-PL/v110	11	110	1	0,44	0,04	3,39	0,78
TS-PL/h5	5	30	1	0,39	0,03	3,09	0,72
TS-PL/h8	8	30	1	0,43	0,06	3,71	2,37
TS-PL/h11	11	30	1	0,46	0,04	2,78	0,95
TS-PL/h14	14	30	1	0,36	0,05	2,55	0,35
TS-PL/h17	17	30	1	0,32	0,04	2,74	0,60
TS-PL/h20	20	30	1	0,30	0,06	6,26	1,72

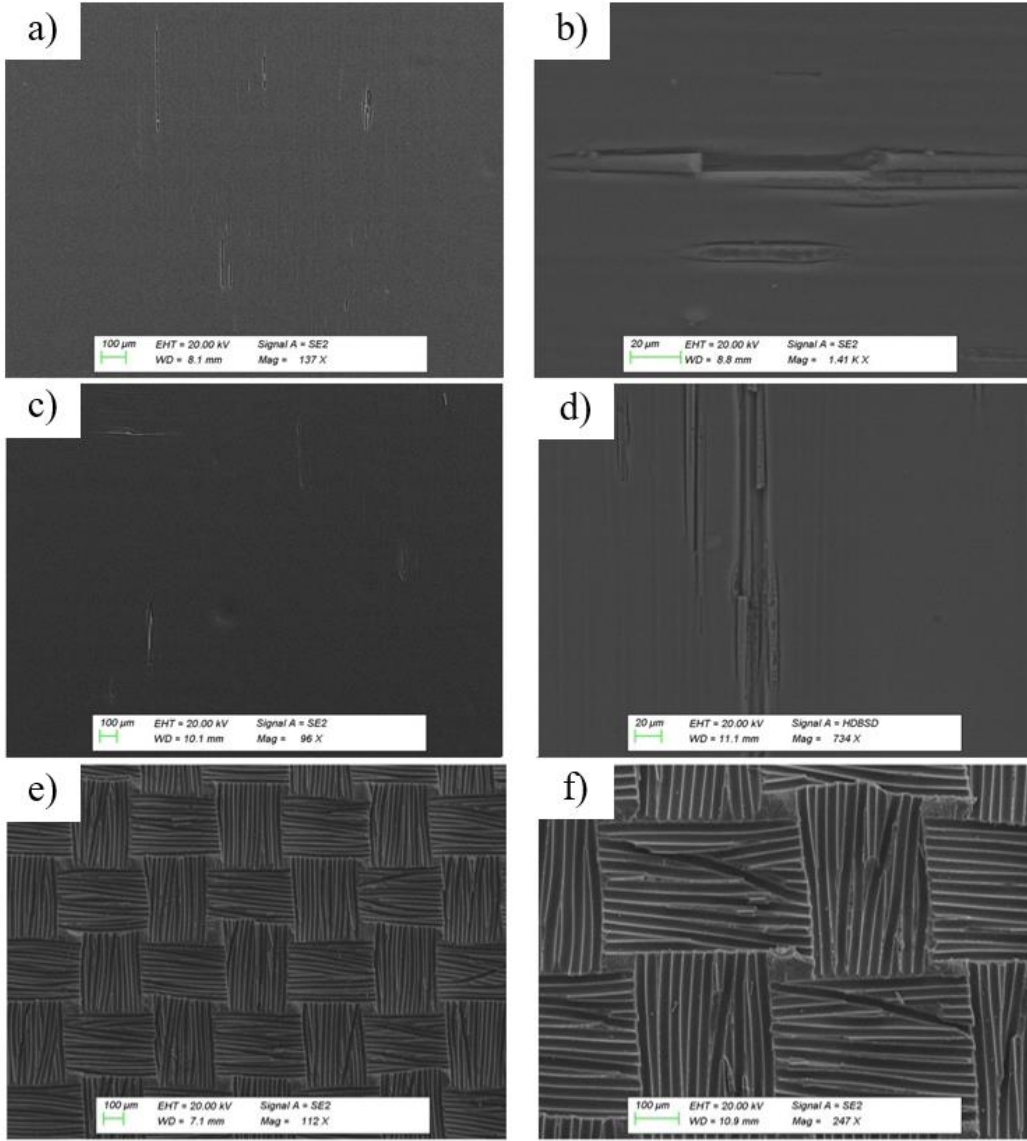
**Tablo 4.13** Plazma nozul hızının (v), nozul-yüzey mesafesinin (h) ve geçiş sayısının (p) bir fonksiyonu olarak kompozit yüzeylerin  $R_a$  ve  $R_{maks}$  pürüzlülük değerleri, vakum torba taraf

Parametreler	Mesafe (mm)	Hız (mm/s)	Geçiş Sayısı	$R_a$ ( $\mu\text{m}$ )	Standart Sapma	$R_{maks}$ ( $\mu\text{m}$ )	Standart Sapma
BS-IPA	-	-	-	9,48	1,13	60,15	10,36
BS-PL/v10	11	10	1	10,66	1,08	63,93	11,75
BS-PL/v50	11	50	1	10,98	1,45	58,15	9,47
BS-PL/h5	5	30	1	9,70	1,25	56,87	5,48
BS-PL/h20	20	30	1	11,37	0,84	60,06	3,66
BS-PL/p1	7	20	1	10,55	1,28	64,73	11,85
BS-PL/p8	7	20	8	10,66	0,94	63,18	12,92
BS-PL/p16	7	20	16	10,14	1,43	53,27	11,06
BS-PL/p24	7	20	24	9,05	1,33	57,41	11,32

#### 4.4 SEM Sonuçları

CFRP kompozitin işlenmemiş yüzeyi, plazma uygulanan yüzeyi ve peel-ply uygulanmış yüzeyi SEM altında incelenmiştir. Şekil 4.6 (a-d) sırasıyla IPA uygulanmış yüzey ve plazma uygulanmış yüzey numunelerine karşılık gelmektedir. Plazma işlemi yüzeyde belirgin bir fiziksel modifikasyon oluşturmadı ve işlem uygulanmamış yüzeye benzer bir morfoloji göstermiştir. Yüzey işlenmemiş numunede serim sırasında kalıp kullanımından gelen çizikler gözlenmiştir. Plazma uygulanan yüzeyde de benzer çizikler görülmüştür. Bu çiziklerin serim sırasında meydana geldiği tahmin edilmektedir. Plazma uygulaması nedeniyle fiberlerde herhangi bir hasar gözlenmemiştir.

Şekil 4.6 (e-f), karakteristik ve düzgün dokumalı peel-ply numunesinin yüzeyini göstermektedir. Peel-ply uygulanan yüzeyin fiberlerinde, peel-ply tabakasının soyulmasından sonra herhangi bir fiber kırılması görülmemiştir.

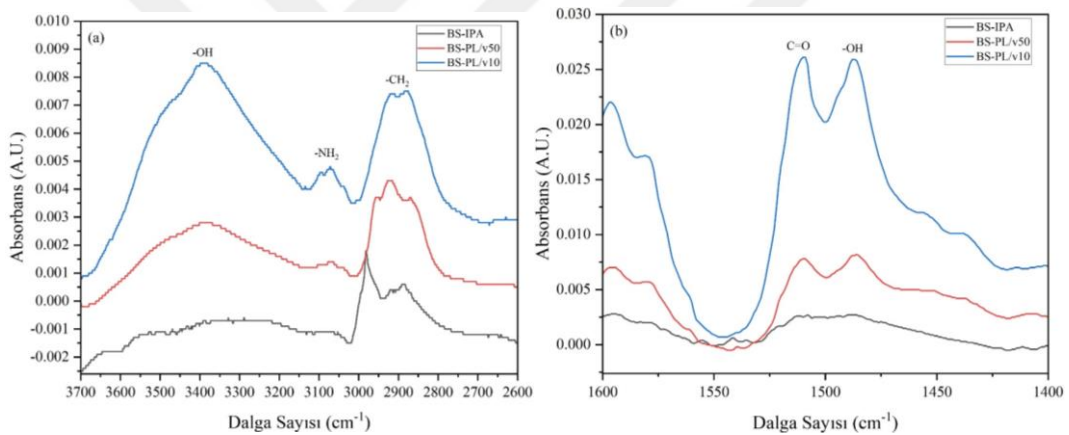


**Şekil 4.6** CFRP kompozitlerinin SEM görüntüleri: a) Yüzey işlenmemiş, TS-IPA, x136, b) Yüzey işlenmemiş, TS-IPA, x1410, c) Plazma uygulanmış, TS-PL/v10, x96, d) Plazma uygulanmış, TS-PL/v10, x734, ve e) Peel-ply uygulanmış, TS-PP, x112, f) Peel-ply uygulanmış, TS-PP, x247

#### 4.5 FTIR-ATR Sonuçları

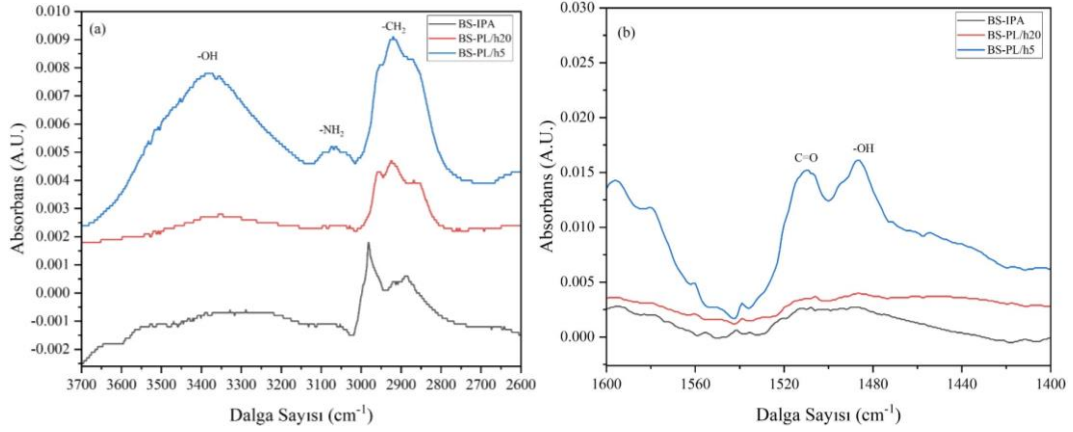
Fourier Dönüşümü Kızılötesi Spektroskopisi (FTIR), CFRP numunelerinde plazma işleminin neden olduğu yüzey değişimlerini analiz etmek ve ayrıca hangi fonksiyonel grupların arayüzey bağ gücünü arttırmaya katkıda bulunduğunu belirlemek için yapılmıştır.

Şekil 4.7 (a,b), plazma nozul hızının (v) bir fonksiyonu olarak kompozit yüzeyin sırasıyla 2600-3000  $\text{cm}^{-1}$  ve 1400-1600  $\text{cm}^{-1}$  dalga boyu aralıklarındaki spektrumlarının bir derlemesini sunmaktadır. 2600 ile 3800  $\text{cm}^{-1}$  ve 1400-1600  $\text{cm}^{-1}$  aralıklarında gözlemlenen farklılıklar dışında, CFRP substrat yüzeyinin genel spektrumu, yüzey işlemi uygulanmamış yüzeyler ile hemen hemen aynı olmuştur. 2800 ve 3000  $\text{cm}^{-1}$  arasındaki absorpsiyon,  $-\text{CH}_2$  ile ilişkilendirilmiştir. Bu metil grupları tipik olarak polimerin omurgasında oldukça kararlıdır ve kütleme ve/veya ısıl işleme hiçbir değişiklik göstermediği bilinmektedir. Ancak, plazma işleminden sonra  $-\text{CH}_2$  grupları oksitlenmiş olarak görünmüştür ve yoğunluğu azalmıştır. Ek olarak, 3500  $\text{cm}^{-1}$  ve 3200  $\text{cm}^{-1}$ 'deki absorpsiyon pikleri  $-\text{OH}$  ve  $-\text{NH}_2$  ile ilişkilendirilmiştir ve her ikisinde de önemli bir artış olmuştur. Plazma işlemi, CFRP substrat yüzeyinde aynı zamanda  $\text{C}=\text{O}$  oluşumunu sağlamıştır [Şekil 4.7 (b)].



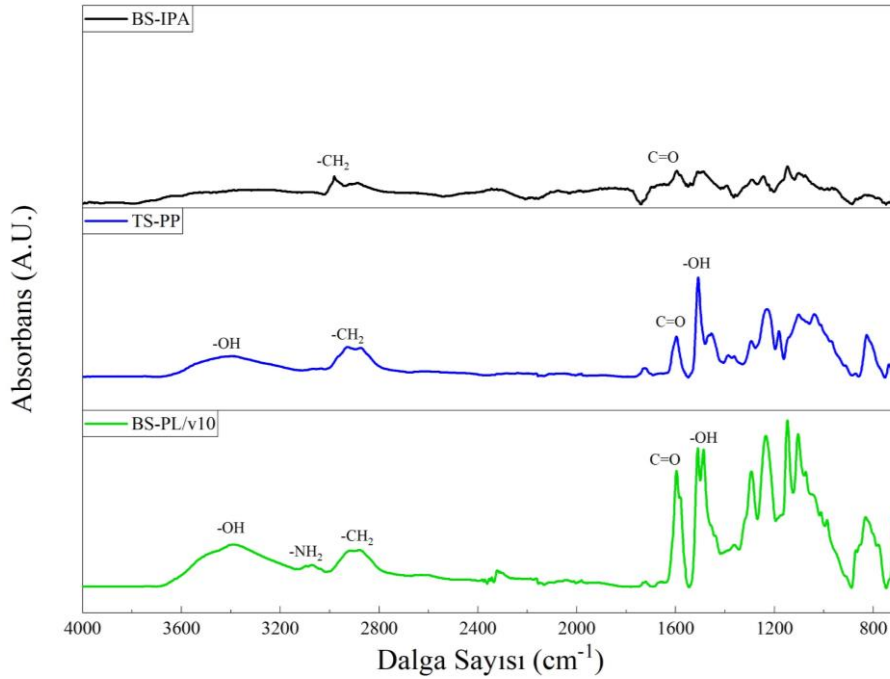
**Şekil 4.7** Plazma nozul hızının (v) bir fonksiyonu olarak kompozit yüzeyin FTIR-ATR analizi, vakum torba taraf: a) 2600-3700  $\text{cm}^{-1}$ , b) 1400-1600  $\text{cm}^{-1}$

Şekil 4.8 (a,b), plazma nozul-yüzey mesafesinin (h) bir fonksiyonu olarak kompozit yüzeyin sırasıyla 2600-3000  $\text{cm}^{-1}$  ve 1400-1600  $\text{cm}^{-1}$  aralıklarındaki spektrumlarına bir derlemesini sunmaktadır. Plazma maruziyetinin artışına bağlı olarak elde edilen temas açısındaki azalmaların, FTIR tarafından doğrulandığı üzere numunelerin yüzeyindeki toplam oksijen içeriğindeki artışlarla iyi bir korelasyonu oluşturduğu görülmüştür. Temas açısı sonuçları, temas açısındaki azalmaları polimer yüzeyindeki  $-\text{OH}$ ,  $-\text{COOH}$  ve  $-\text{OOH}$  gibi polar grupların oluşumuna bağlayan diğer araştırmacıların bulgularıyla benzer bulunmuştur [12], [38], [136].



**Şekil 4.8** Plazma nozul-yüzey mesafesinin (h) bir fonksiyonu olarak kompozit yüzeyin FTIR ATR analizi, vakum torba taraf: a) 2600-3700  $\text{cm}^{-1}$ , b) 1400-1600  $\text{cm}^{-1}$

Şekil 4.9'da karşılaştırma amacıyla farklı yüzey hazırlama işlemlerinin FTIR spektrumları 4000-800  $\text{cm}^{-1}$  aralığında sunulmuştur. Kompozit yüzeylere uygulanan APT işleminin, peel-ply işleminden daha belirgin -OH, -NH<sub>2</sub> ve C=O fonksiyonel gruplarını oluşturduğu belirlenmiştir.



**Şekil 4.9** CFRP kompozit yüzeylere uygulanan farklı yüzey hazırlama işlemlerine ait FTIR-ATR analiz sonuçlarının karşılaştırılması

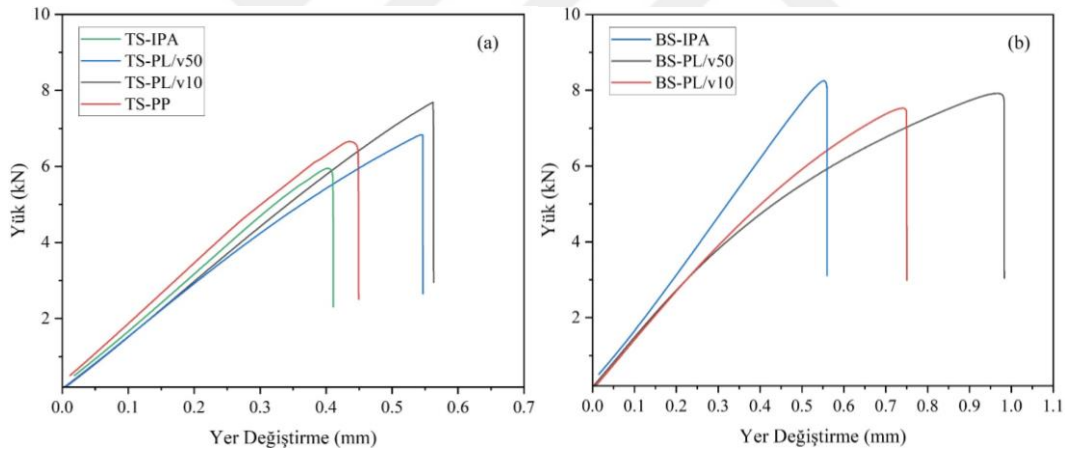
#### 4.6 Tek Bindirmeli Kesme Testi Sonuçları

Tablo 4.14'te plazma nozul hızının (v) bir fonksiyonu olarak kompozit tek bindirmeli kesme mukavemet sonuçları sunulmuştur.

**Tablo 4.14** Farklı yüzey hazırlama tekniklerinin tek bindirmeli kesme mukavemet sonuçları

Parametreler	Mesafe (mm)	Hız (mm/s)	LSS (MPa)	Standart Sapma
TS-PP	-	-	20,24	0,76
TS-IPA	-	-	18,80	0,19
TS-PL/v10	11	10	22,41	1,14
TS-PL/v50	11	50	20,34	0,30
BS-IPA	-	-	24,49	0,46
BS-PL/v10	11	10	16,75	0,39
BS-PL/v50	11	50	23,64	2,91

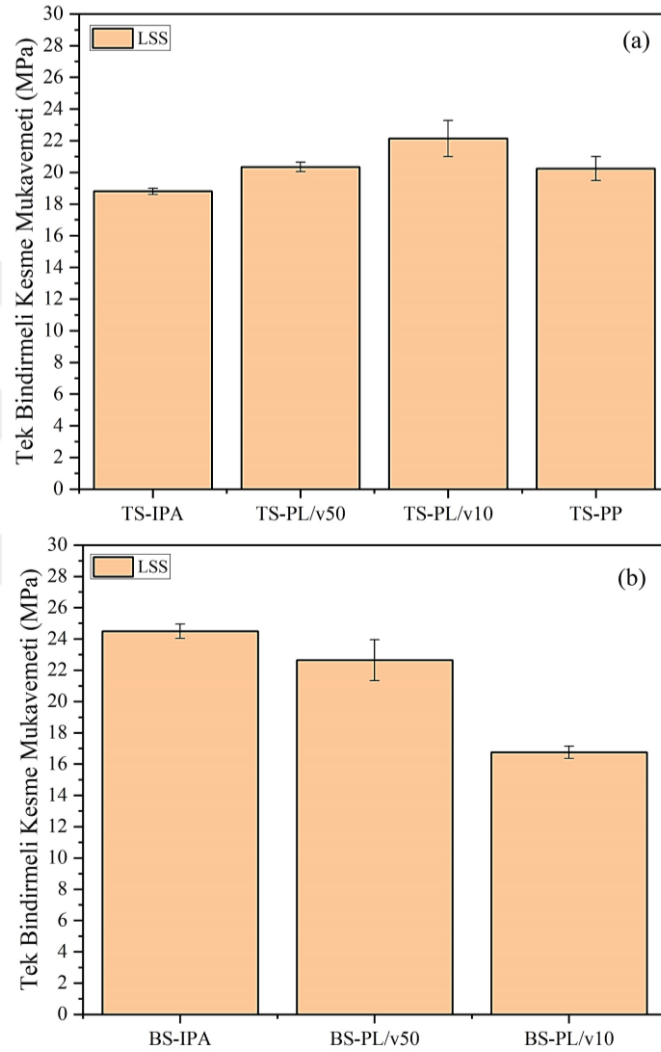
Şekil 4.10'da farklı yüzey işlemleriyle hazırlanan örneklerin yük-deplasman eğrileri sunulmuştur. Burada, kalıp tarafı işlenmiş ve işlem görmemiş yüzeyler için doğrusallık gözlemlenmiştir. Ancak, plazma ile işlem görmüş vakum torba tarafı (BS) yüzeylerindeki yük-deplasman eğrilerinde görülen doğrusal olmayan davranış, Tablo 4.15'teki kırılma yüzeylerinden sağlanan hata modlarına göre, kohezif hatadan adeziv hata modlarına geçişten dolayı olduğu literatürde belirtilmiştir [28], [52].



**Şekil 4.10** Farklı yüzey hazırlama tekniklerinin yük-yer değiştirme eğrileri:  
(a) kalıp taraf yüzeyler ve (b) vakum torba taraf yüzeyler

Şekil 4.11 (a,b)'de kalıp ve vakum torba tarafı bağlantılarındaki tek bindirmeli kesme mukavemeti sonuçları, plazma nozul hızına ( $v$ ) bağlı olarak gösterilmiştir. Sonuç olarak, IPA ile temizlenmiş kalıp tarafı bağlantılardan 18,8 MPa'lık bir kesme mukavemeti elde edilmiştir. Kalıp tarafı yüzey atmosferik plazma ile işlendikten sonra, önce 50 mm/s nozul hızı (TS-PL/v50) parametresi ile 20,34 MPa'ya, ardından 10 mm/s nozul hızı (TS-PL/v10) parametresi ile 22,41 MPa değerine yükselmiştir. Şekil 4.9 (b)'de gösterildiği üzere, IPA ile temizlenmiş vakum torba tarafı yüzey 24,49 MPa bir kesme mukavemeti değeri

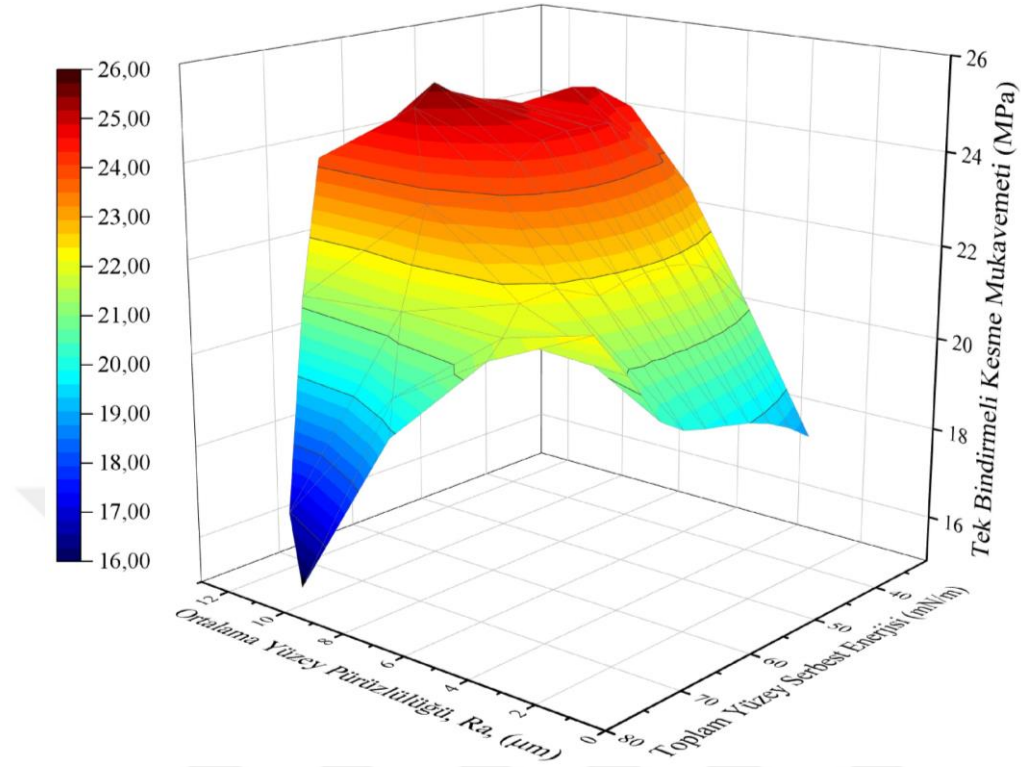
göstermiştir. Torba tarafı yüzey plazma işlemi gördükten sonra, önce BS-PL/v50 parametresi ile 23,64 MPa değerine, ardından BS-PL/v10 plazma parametresi ile 16,75 MPa değerine keskin bir düşüş göstermiştir. Karşılaştırma olarak, peel-ply bağlantılar, plazma ile işlem görmüş yüzeylere kıyasla daha düşük mekanik davranış sergilemiş ve yaklaşık olarak 20,24 MPa değerinde bir kesme mukavemeti göstermiştir.



**Şekil 4.11** Farklı yüzey hazırlama tekniklerinin tek bindirmeli kesme mukavemeti sonuçları: (a) kalıp taraf yüzeyler ve (b) vakum torba taraf yüzeyler

Şekil 4.12’de farklı yüzey serbest enerji seviyeleri ile farklı ortalama yüzey pürüzlülüklerine sahip yüzeylerden elde edilen bindirme kesme mukavemeti sonuçlarının üç boyutlu bir haritası sunulmuştur. Düşük ortalama yüzey pürüzlülüğüne sahip numunelerin yüzey enerjisinin artması ile kesme mukavemetinin arttığı tespit edilmiştir. Yüksek ortalama yüzey pürüzlülüğüne

sahip numunelerde ise yüzey enerjisinin artmasına bağlı olarak önce kesme mukavemeti artmış daha sonra önemli derecede düşüş sergilemiştir.





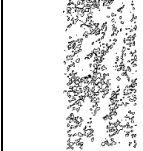

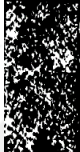





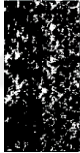


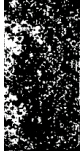
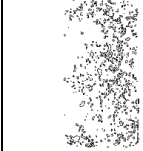


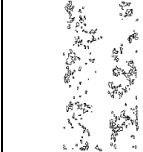



**Şekil 4.12** Farklı yüzey serbest enerji seviyeleri ile farklı ortalama yüzey pürüzlülüklerine sahip yüzeylerden elde edilen bindirme kesme mukavemeti sonuçlarının üç boyutlu bir haritası

#### 4.7 Tek Bindirmeli Bağlantıların Kırık Yüzey İncelemesi

Tablo 4.15'te, farklı yüzey işlemleriyle hazırlanmış bağlantıların hata modları ASTM D5573-99 standardına [201] göre sunulmuştur. ImageJ analiz yazılımı, kohezif ve ince adeziv hata modlarının miktarını tahmin etmek için kullanılmıştır. Bu durumda, niceliksel bir analiz gerçekleştirmek üzere beyaz ve siyah görüntüler üretilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre; plazma yüzey işlemi, kalıp tarafı yüzeylerinde kohezif hata modunu %77'den %91'e çıkararak arayüzey yapışmasına katkı sağlamıştır. Niceliksel analiz, plazma yüzey işleminin vakum torba tarafı yüzeylerinde adeziv hata modunu arttırdığını ve kalıp tarafı ile zıt bir etki sergilediğini göstermiştir. Ancak, torba tarafında reçine zengini sırtların varlığı; torba tarafının matris ve plazma ile kalıp tarafına göre daha yüksek bir etkileşime sahip olduğunu göstermiştir. Torba tarafında aşırı plazma işlemi, yüzey pürüzlülüğünü arttırmış yapıştırıcının nüfuzunu engellemiş ve vadilerde gaz moleküllerinin sıkışmasına neden olmuştur. Aşırı maruziyet, bağlantılarda optimal işlem seviyesinden uzaklaşarak zayıf bir arayüzey tabakasının oluşumuna yol açmış

ve yapıştırıcı- yapışan arayüzünde kademeli bir yapışma kaybına neden olmuştur [13], [33]. Sonuç olarak, işlem görmemiş torba tarafı yüzeylerde gözlemlenen kohezif hata modunun aksine, adeziv hata modu oluşmuş ve bu durum, vakum torba taraf yüzeyler için tek bindirmeli kesme mukavemetinde bir azalmaya yol açmıştır.

**Tablo 4.15** Farklı yüzey hazırlama tekniklerine sahip SLJ bağlantılarının hasar modları

Yüzey Hazırlama Teknikleri	Görüntüler	ImageJ Programından Elde Edilen Görüntüler		Hata Modları
<b>TS-IPA</b>				%77 Kohezif %23 Adeziv
<b>BS-IPA</b>				%82 Kohezif %18 Adeziv
<b>TS-PL/v10</b>				%91 Kohezif %9 Adeziv
<b>TS-PL/v50</b>				%88 Kohezif %12 Adeziv
<b>TS-PP</b>				%90 Kohezif %10 Adeziv
<b>BS-PL/v10</b>				%6 Kohezif %94 Adeziv
<b>BS-PL/v50</b>				%11 Kohezif %89 Adeziv

#### 4.8 AFM Sonuçları

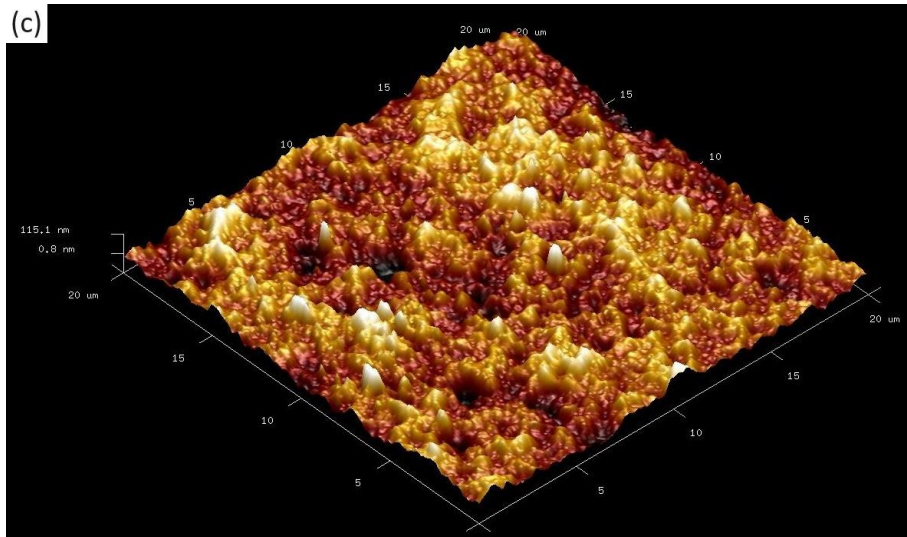
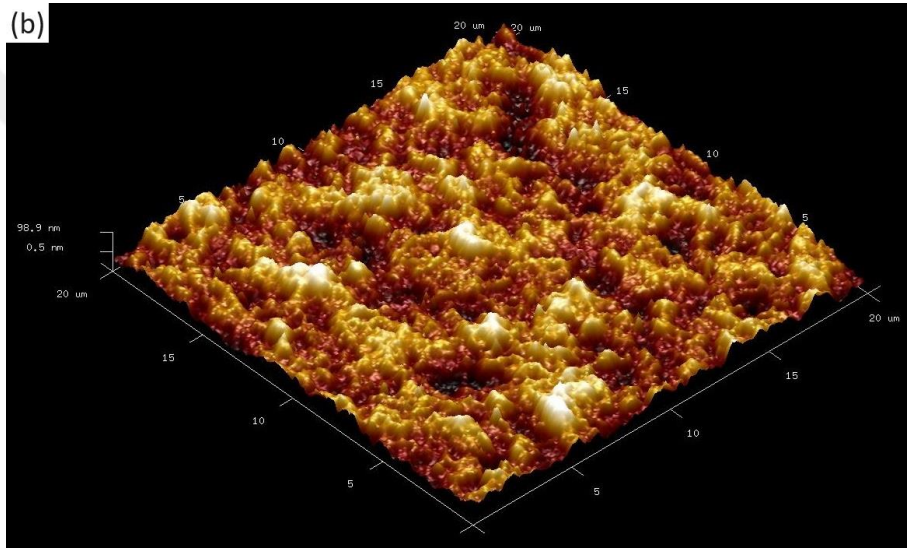
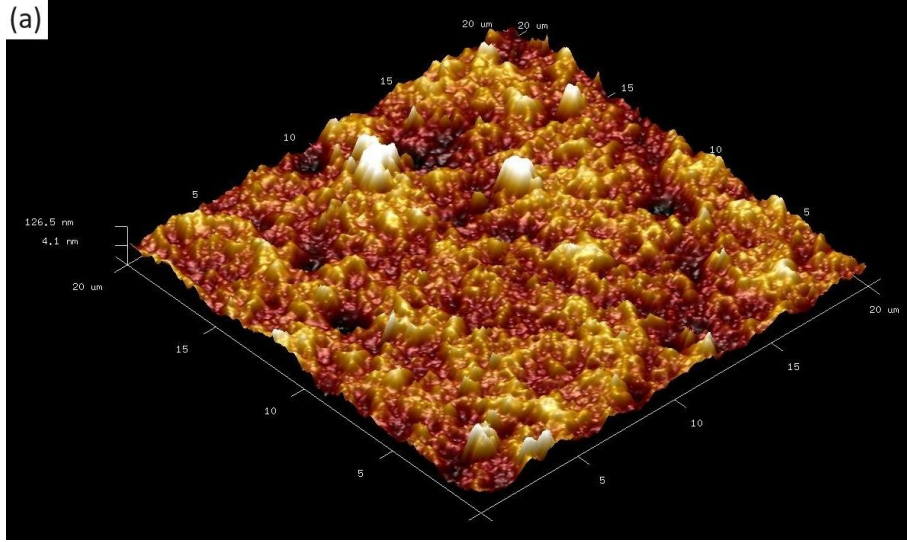
Ortalama pürüzlülük ( $R_a$ ) ve maksimum pürüzlülük ( $R_{maks}$ ) AFM analizi ile incelenmiş ve değerler Tablo 4.16'da sunulmuştur. Kalıp tarafındaki yüzeylerin ortalama pürüzlülük değeri 0,0244  $\mu\text{m}$  (TS-IPA) ve 0,0223  $\mu\text{m}$  (TS-PL/v10) ile en düşük değerlerini vermiştir. Vakum torba tarafında IPA ile temizlenmiş yüzeyin (BS-IPA) ortalama pürüzlülük değeri 0,0236  $\mu\text{m}$  olmuş ve plazma işlemi (BS-PL/v10) sonrasında bu değer 0,0313  $\mu\text{m}$  değerine artmıştır. Peel-ply yüzeyinin ortalama pürüzlülük değeri ise 0,0962  $\mu\text{m}$  olarak en yüksek değer olmuştur.

Kalıp tarafındaki yüzey dalgalı bir profil göstermiştir [Şekil 4.13 (a-b)]. Kalıp tarafı yüzey morfolojisi ve topografyası, TS-PL/v10 plazma işleminden önemli ölçüde etkilenmemiştir. Bu nedenle, kalıp tarafı yüzeyinin kesme mukavemetindeki iyileşme, mekanik kilitlenme mekanizması kaynaklı değil, diğer araştırmacılar [10], [183] tarafından da belirtildiği üzere bu yüzeyde oluşturulan yeni fonksiyonel gruplardan kaynaklanmıştır.

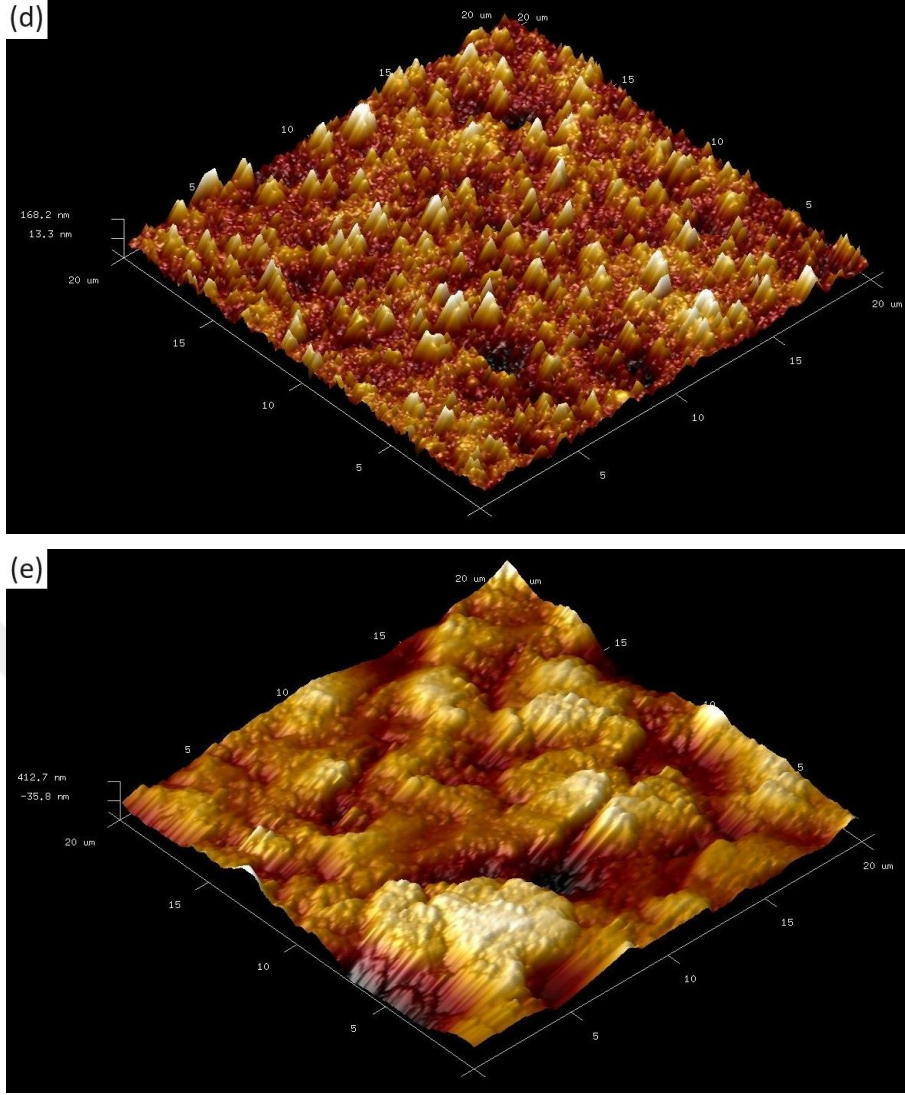
**Tablo 4.16** AFM analiz sonuçları

Parametreler	Mesafe (mm)	Hız (mm/s)	$R_a$ ( $\mu\text{m}$ )	$R_{maks}$ ( $\mu\text{m}$ )
TS-PP	-	-	0,0962	1,0300
TS-IPA	-	-	0,0244	0,4510
TS-PL/v10	11	10	0,0223	0,2100
BS-IPA	-	-	0,0236	0,3850
BS-PL/v10	11	10	0,0313	0,4510

Vakum torba tarafı yüzey topografyasını incelediğimizde, BS-PL/v10 plazma işlemi uygulanan numuneler BS-IPA işlemi uygulananlara göre daha keskin bir fark sergilemişlerdir. Şekil 4.13 (c)'de verilen kompozit yüzey topografyası, yüzeye plazma işlemi uygulanması sonrasında dalgalı bir yapıdan Şekil 4.13 (d)'de görülen daha sık frekans ve periyodikliğe sahip bir yapıya dönüşmüştür. Bu durum, yüzey aşınmasının başlangıcını işaret etmektedir. Ayrıca, peel-ply yüzeyi, daha önce SEM görüntüleri ile doğrulanmış olan homojen bir topografya sergilemiştir.



**Şekil 4.13** Yüzeylerin AFM görüntüleri a) TS-IPA, b) TS-PL/v10, c) BS-IPA, d) BS-PL/v10, e) TS-PP

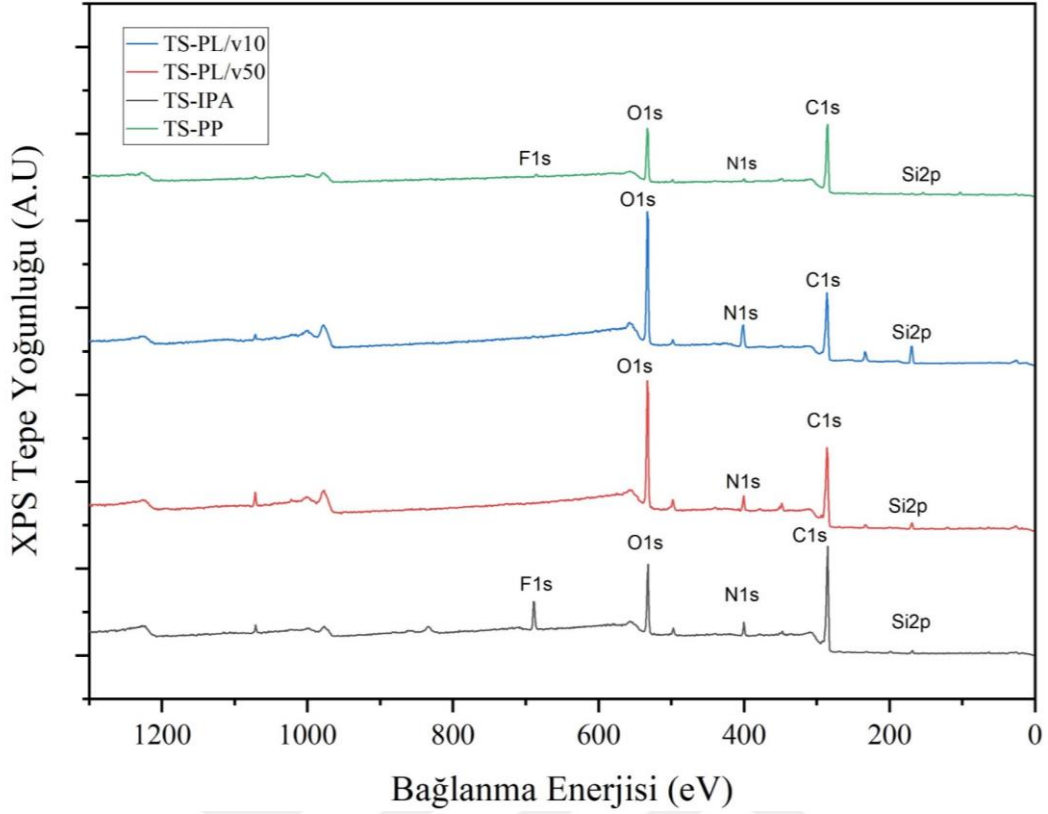


**Şekil 4.13** Yüzeylerin AFM görüntüleri a) TS-IPA, b) TS-PL/v10, c) BS-IPA, d) BS-PL/v10, e) TS-PP (devamı)

## 4.9 XPS Sonuçları

### 4.9.1 Kalıp Taraf Yüzeyler

XPS, malzeme yüzeylerini bir işleme tabi tutuktan sonra yüzey kimyasındaki değişiklikleri analiz etmek için kullanılan hassas bir analiz yöntemidir [54]. Atmosferik basınçlı plazma yüzey işleminin kalıp taraf ve vakum torba taraf CFRP substratlarının yüzey kimyasal bileşimi üzerindeki etkisini incelemek için X-ışını fotoelektron spektroskopisi (XPS) kullanılmıştır. CFRP/ Epoksi substratlarının C 1s, O 1s, N 1s ve F 1s seviyelerinin zirve uyumu analiz edilerek araştırılmıştır. Karşılaştırma için havacılık sektöründe sık kullanılan peel-ply yöntemi de incelenmiştir. Şekil 4.14'te, yüzeyi işlenmemiş, peel-ply ve farklı plazma nozul hızı ile taranmış kalıp taraf yüzeylerin XPS spektrumları verilmiştir.



**Şekil 4.14** Yüzeyde plazma nozul hızının (v) bir fonksiyonu olarak XPS spektrumları (kalıp taraf)

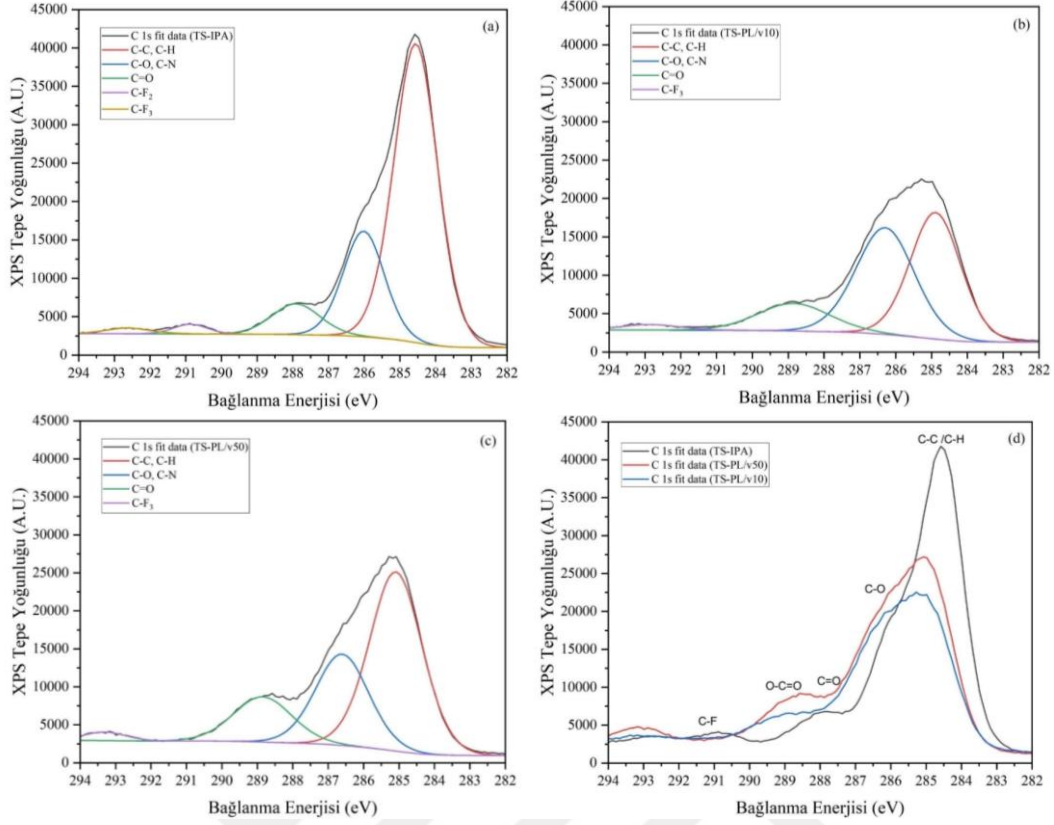
Plazma nozul hızının bir fonksiyonu olarak kalıp taraf yüzey üzerindeki element dağılımı Tablo 4.17’de verilmiştir. Kalıp taraf yüzeyde %75,5 karbon, %13,7 oksijen, %4 azot ve %4 flor ile az miktarda silisyum, kükürt, sodyum ve kalsiyum izleri bulunmuştur.

**Tablo 4.17** XPS element analizi (kalıp taraf)

Parametreler	Yüzey Kimyasal Bileşimi						Artış Oranı (%)		
	%Atom						%Atom/%Atom		
	C	O	N	S	F	Si	O/C	O	O/C
<b>TS-IPA</b>	75,5	13,7	4	1	4	0,2	18	-	-
<b>TS-PL/v10</b>	46,9	38,7	8,4	4,8	0,3	0,2	83	182	361
<b>TS-PL/v50</b>	54,3	33,9	6,4	1,7	-	0,3	62	147	244
<b>TS-PP</b>	73,6	21,2	1,3	0,6	0,7	1,4	29	-	-

Karbon, oksijen, azot ve kükürt, epoksi kompozit reçinede bulunması beklenen elementlerdir. Yüzeyde kükürt, flor, sodyum ve kalsiyum izleri de tespit edilmiştir. Kalıp taraf kompozit yüzeye TS-PL/v50 plazma parametresinin uygulaması sonrası oksidasyon etkisi nedeniyle C konsantrasyonu %75,5'ten %54,3'e düşmüş ve oksijen konsantrasyonu %13,7'den %33,9'a yükselmiştir. O/C oranı %244 oranında artmıştır. Kalıp taraf kompozit yüzeye TS-PL/v10 plazma parametresinin uygulanması sonrasında C konsantrasyonu %75,5'ten %46,9'a düşmüş ve oksijen konsantrasyonu %13,7'den %38,7'ye yükselmiştir. O/C oranı %361 oranında artmıştır. Numune yüzeylerinde yüzey işlem öncesinde %4 ölçülebilir bir flor (F) konsantrasyonu tespit edilmiştir. Bu durum, kompozit laminantların kürlenmesi sırasında ayırıcı film kullanımından kaynaklı olarak floropolimere atfedilmiştir. Bu bulgu, diğer araştırmacılar tarafından da rapor edilmiştir [120], [202].

Şekil 4.15'te yüzey işlemsiz ve farklı plazma nozul hızı ile işlenmiş kalıp taraf kompozit yüzeylerinin tipik yüksek çözünürlüklü C 1s XPS spektrumları verilmiştir. C 1s bölgesinin XPS analizi, plazma işleminden sonra yüzeyde bulunan fonksiyonel grupların belirlenmesine olanak tanımıştır. Plazmasız yüzeyin 284,58 eV'deki tekil piki, hidrokarbon ( $-C_xH_y-$ ) olarak tanımlanmıştır [136], [176]. Plazma işlemleri sonrası yüzeyde meydana gelen her yeni fonksiyonel grup için orijinal hidrokarbon zirvesinin omuzunda yeni zirve noktaları oluşmuştur. Gösterilen spektrumda 286,3 ve 288,8 eV değerlerinde zirve noktaları oluşmuştur. 286,3 eV'deki zirve, alkoksi gruplarına (C-O) atfedilmiştir; 288,8 eV'de zirve karbonil gruplarını (C=O ve C-O=O) temsil ettiği literatürde belirtilmiştir [8], [34], [203]. Ayrıca farklı plazma nozul hızlarının karboksil konsantrasyonu üzerindeki etkisi incelenmiştir. 10 mm/s ile 50 mm/s arasındaki nozul hızlarına ait sonuçlar değerlendirilmiş ve nozul hızı ile kalıp taraf yüzeyde oluşan karboksil konsantrasyonu arasında doğrudan bir ilişki olduğunu ortaya çıkmıştır [38].



**Şekil 4.15** C 1s'yi gösteren XPS spektrumları (kalıp taraf): a) TS-IPA, b) TS-PL/v10, c) TS-PL/v50, d) karşılaştırma

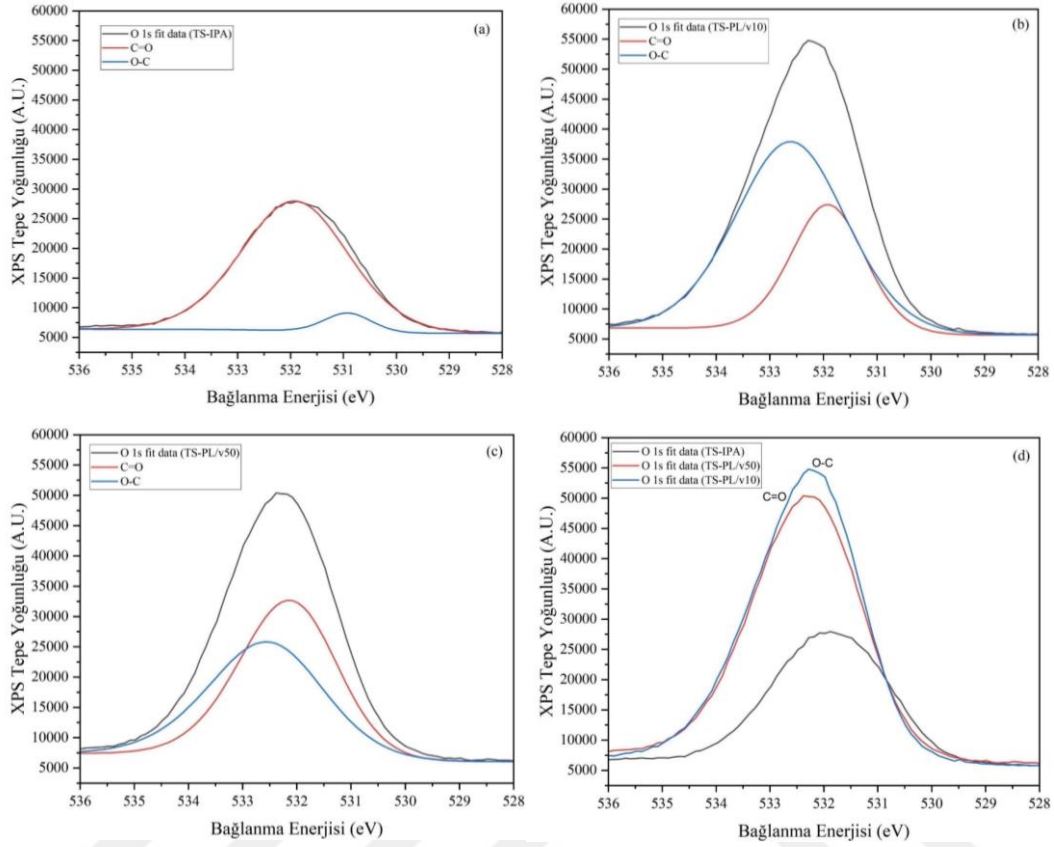
Tablo 4.18'de C 1s'yi gösteren XPS pik noktaları ve karşılık gelen bağlanma enerjileri verilmiştir. Buna göre yarı maksimumdaki tam genişlik (eV) değerlerinde genişleme olduğu görülmektedir. C 1s zirvesinin genişliği, plazma yüzey işleminden sonra genişlemiştir; bu durum, plazma işleminin yüzeydeki atomların enerji düzeylerine etki ederek bağlanma enerjilerinin daha geniş bir aralıkta dağılmasına ve kimyasal bağlarının değişmesine neden olduğunu göstermektedir.

**Tablo 4.18** C 1s'yi gösteren XPS pik noktaları ve karşılık gelen bağlanma enerjileri (kalıp taraf)

Parametre	C 1s Pik Eksen Noktası		C-C, C-H Pik Noktası		C-O, C-N Pik Noktası		O-C=O Pik Noktası	
	Bağlanma Enerjisi (eV)	Yoğunluk (A.U.)	Bağlanma Enerjisi (eV)	Yoğunluk (A.U.)	Bağlanma Enerjisi (eV)	Yoğunluk (A.U.)	Bağlanma Enerjisi (eV)	Yoğunluk (A.U.)
TS-IPA	284,58	41791	285,98	40549	285,98	6668	287,88	4022
TS-PL/v50	285,08	27189	286,38	23992	286,38	16315	288,68	8734
TS-PL/v10	285,28	22543	286,28	18164	286,28	16190	288,88	6338

Şekil 4.16'da O 1s spektrumu, sırasıyla C-O ve C=O, O-C=O oksijen işlevselliklerinin varlığına atfedilebilen 531,8 ve 532,6 eV değerlerinde alt zirve noktalarını göstermektedir. Atmosferik basınçlı plazma işleminden sonra işlenmemiş yüzey O 1s ana eksen zirvesi 531,8 eV'den 532,38 eV'ye ilerlemiştir.

Bu durum, plazma yüzey işlemi ile daha fazla karbonil tipi fonksiyonel grubun oluşturulduğunu göstermiştir.



**Şekil 4.16** O 1s'yi gösteren XPS spektrumları (kalıp taraf) a) TS-IPA, b) TS-PL/v10, c) TS-PL/v50, d) karşılaştırma

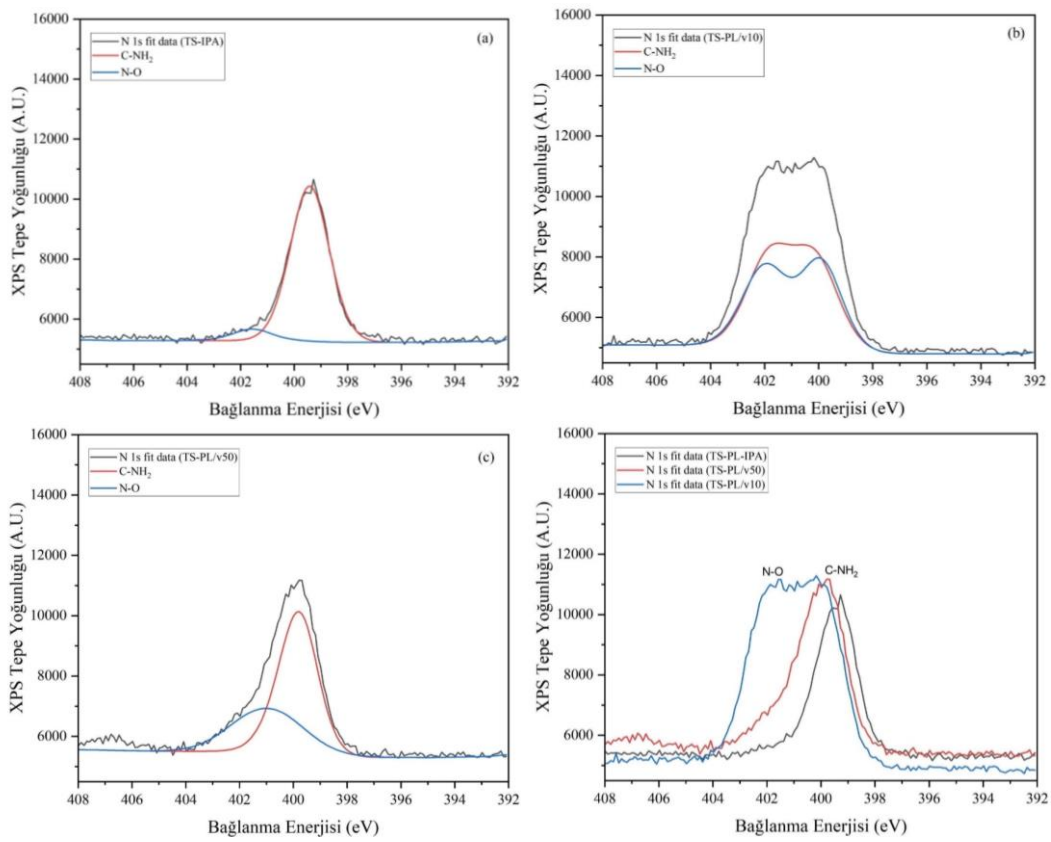
Tablo 4.19'da O 1s'yi gösteren XPS pik noktaları ve karşılık gelen bağlanma enerjileri verilmiştir. Kalıp taraf yüzeylerde plazma nozul hızına bağlı olarak yüzeylere uygulanan plazma hızı azaldıkça, mekanik özelliklere etkisi olan O-C=O fonksiyonel grubunda artış olduğu saptanmıştır.

**Tablo 4.19** O 1s'yi gösteren XPS pik noktaları ve karşılık gelen bağlanma enerjileri (kalıp taraf)

Parametre	O 1s Pik Eksen Noktası		C-O Pik Noktası		C=O, O-C=O Pik Noktası	
	Bağlanma Enerjisi (eV)	Yoğunluk (A.U.)	Bağlanma Enerjisi (eV)	Yoğunluk (A.U.)	Bağlanma Enerjisi (eV)	Yoğunluk (A.U.)
TS-IPA	531,88	27932	531,98	27965	-	-
TS-PL/v50	532,38	50400	532,18	32653	532,58	25824
TS-PL/v10	532,28	54785	531,88	27394	532,58	37905

Kimyasal fonksiyonel grupların oluşumunun, plazmadaki parçacıkların polimerdeki bağların çoğundan daha yüksek enerjilere sahip olmasından kaynaklandığı bilinmektedir. CFRP substratının yüzeyine plazma işlemi

uygulandığında, CFRP substratının yüzeyine çarpan yüksek hızlı parçacıklar (argon iyonu, azot iyonu, oksijen iyonu) epoksi reçinenin mevcut kimyasal bağlarını kırar ve plazmadaki azot ve oksijen iyonları ile yeni fonksiyonel gruplar birçok aktif küçük molekül zinciri oluşturur [204]. N 1s piki, düşük kohezyon enerji alanına sahip bir amin ve yüksek kohezyon enerji alanına sahip bir amid tipine, O 1s zirvesi bir eter ve bir karbonil tipine ayrılabilir [203]. Şekil 4.17’de N 1s spektrumu, 399,38 eV ve 401,58 eV değerlerine sahip olan (-NH<sub>2</sub>) ve (-NH<sub>3</sub>) gibi farklı alt zirve noktalarına ayrıştırılmıştır. Yüzey işlenmemiş kalıp taraf yüzeylere plazma işlemi uygulandıktan sonra -NH<sub>3</sub> pikinin daha belirgin şekilde oluştuğu görülmüştür.



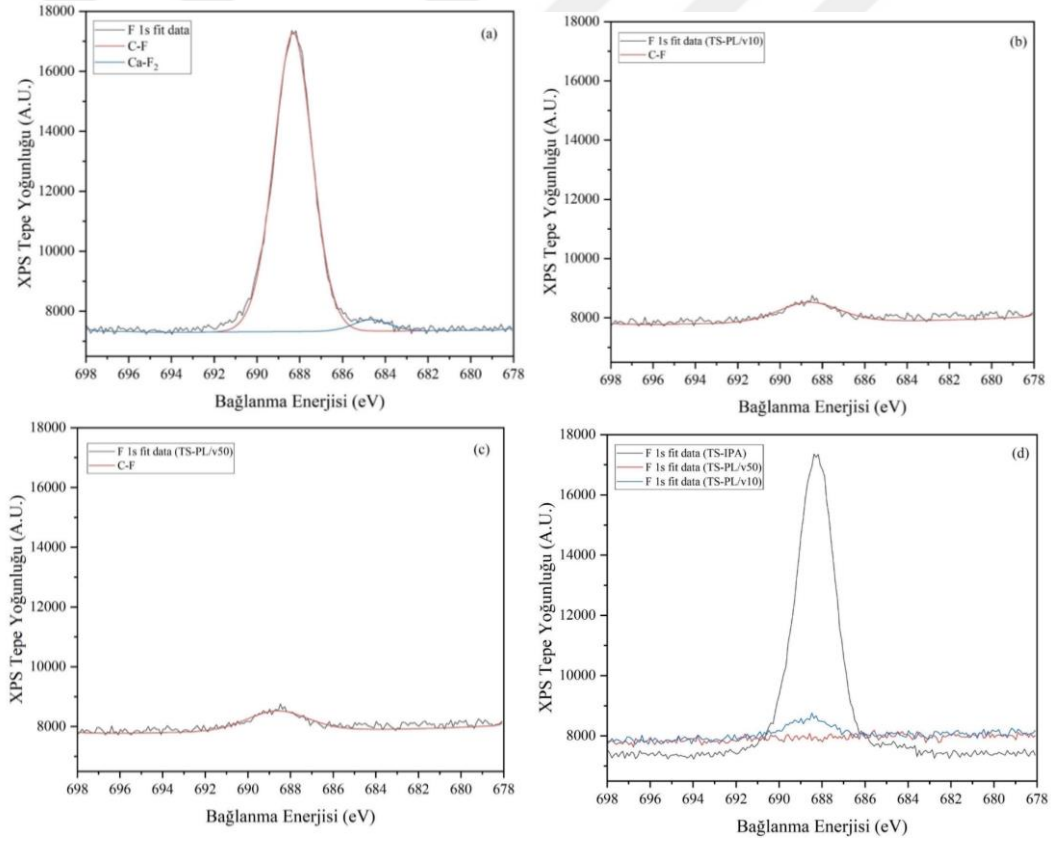
**Şekil 4.17** N 1s’yi gösteren XPS spektrumları (kalıp taraf) a) TS-IPA, b) TS-PL/v10, c) TS-PL/v50, d) karşılaştırma

Tablo 4.20’de N 1s’yi gösteren XPS pik noktaları ve karşılık gelen bağlanma enerjileri verilmiştir. Plazma nozul hızı ile amin ve amid gruplarının artışı arasında doğru orantılı bir ilişki olduğu tespit edilmiştir.

**Tablo 4.20** N 1s'yi gösteren XPS pik noktaları ve karşılık gelen bağlanma enerjileri (kalıp taraf)

Parametre	N 1s Pik Eksen Noktası		Amin Grupları (-NH <sub>2</sub> ) Pik Noktası		Amid Grupları (-NH <sub>3</sub> ) Pik Noktası	
	Bağlanma Enerjisi (eV)	Yoğunluk (A.U.)	Bağlanma Enerjisi (eV)	Yoğunluk (A.U.)	Bağlanma Enerjisi (eV)	Yoğunluk (A.U.)
TS-IPA	399,28	10653	399,38	10428	401,58	5666
TS-PL/v50	399,78	11175	399,78	10133	400,98	6928
TS-PL/v10	400,18	11288	401,48	8458	399,98	7971

Şekil 4.18'de yüzeyi işlenmemiş yüzeyin, yüksek hızda (50 mm/s) ve düşük hızda (10 mm/s) plazma işlemine tabi tutulmuş F 1s XPS spektrumları verilmiştir. Kompozit serim işlemi sırasında kalıp ayırıcı filmde gelen flor konsantrasyonunda plazma işlemi sonrası %4 oranından %0,3'e bir düşüş oluşmuştur. Bu durum, bir yüzey temizleme yöntemi olarak plazmanın etkinliğini göstermiştir.



**Şekil 4.18** F 1s'yi gösteren XPS spektrumları (kalıp taraf) a) TS-IPA, b) TS-PL/v10, c) TS-PL/v50, d) karşılaştırma

Tablo 4.21'de F 1s'yi gösteren XPS pik noktaları ve karşılık gelen bağlanma enerjileri verilmiştir. Kalıp taraf yüzeyde plazma işlemi sonrası C-F ve Ca-F<sub>2</sub> gruplarının zirve noktalarında ciddi bir düşüş olduğu görülmüştür.

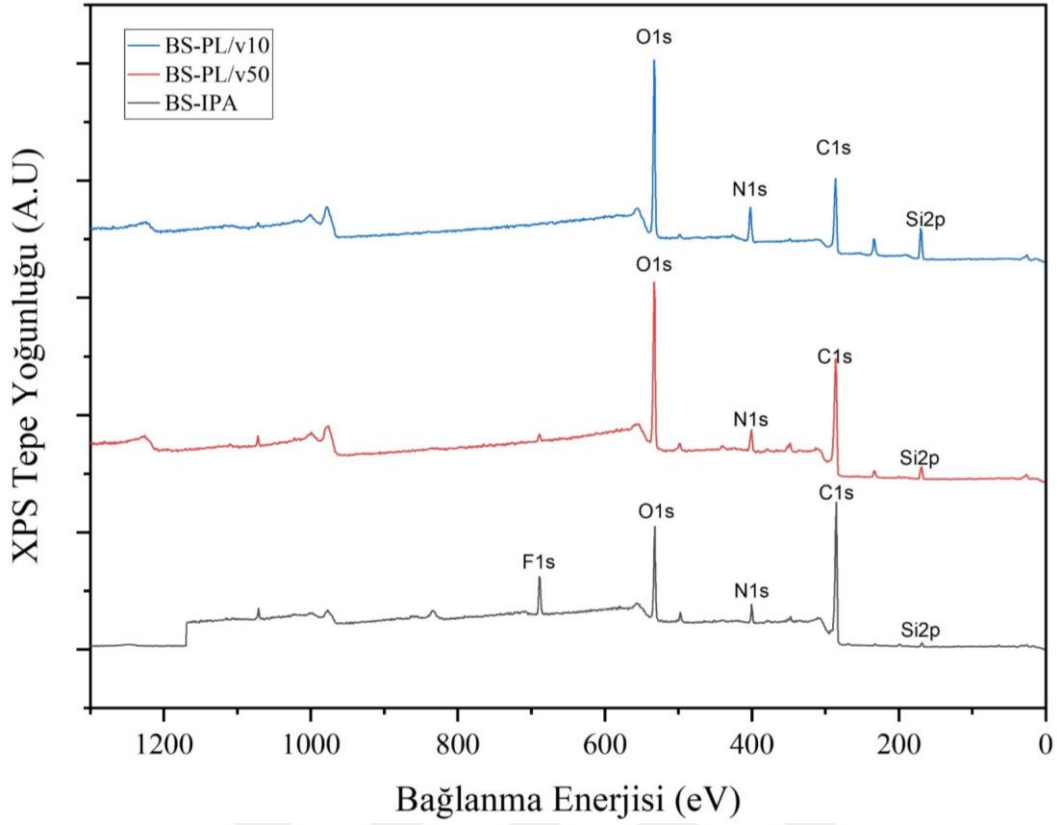
**Tablo 4.21** F 1s'yi gösteren XPS pik noktaları ve karşılık gelen bağlanma enerjileri (kalıp taraf)

Parametre	F 1s Pik Eksen Noktası		C-F Pik Noktası		Ca-F <sub>2</sub> Pik Noktası	
	Bağlanma Enerjisi (eV)	Yoğunluk (A.U.)	Bağlanma Enerjisi (eV)	Yoğunluk (A.U.)	Bağlanma Enerjisi (eV)	Yoğunluk (A.U.)
TS-IPA	688,38	17363	688,28	17281	684,68	7721
TS-PL/v50	688,58	8078	-	-	-	-
TS-PL/v10	688,48	8757	688,58	8526	-	-

#### 4.9.2 Vakum Torba Taraf Yüzeyler

Atmosferik basınçlı plazma yüzey işleminin vakum torba taraf CFRP substratlarının yüzey kimyasal bileşimi üzerindeki etkisini incelemek için X-ışını foto elektron spektroskopisi (XPS) kullanılmıştır. CFRP/Epoksi substratlarının C 1s, O 1s, N 1s ve F 1s seviyelerinin zirve uyumu analiz edilmiştir. Yüzeyi işlenmemiş ve farklı plazma nozul hızına bağlı parametreler (BS-PL/v50 ve BS-PL/v10) ile taranmış yüzeylerin XPS spektrumları Şekil 4.19'da verilmiştir.

Plazma nozul hızının bir fonksiyonu olarak yüzey üzerindeki element dağılımı Tablo 4.22'de verilmiştir. Vakum torba taraf yüzeyde %75,2 karbon, %11,5 oksijen, %2,1 azot ve %8,9 flor ile düşük miktarda silisyum, sülfür, sodyum ve kalsiyum izleri bulunmuştur. Atmosferik basınçlı plazma yüzey işlem uygulaması sonrası oksidasyon etkisi nedeniyle yüzey oksijen konsantrasyonu 50 mm/s plazma nozul hızı ile %11,5'ten %30,3'e ve 10 mm/s plazma nozul hızı ile %11,5'ten %37,2'ye yükselmiştir. Numunelerin herhangi bir ön işlem uygulanmadan önce yüzeylerinde %8,9 ölçülebilir bir flor (F) konsantrasyonu tespit edilmiştir.

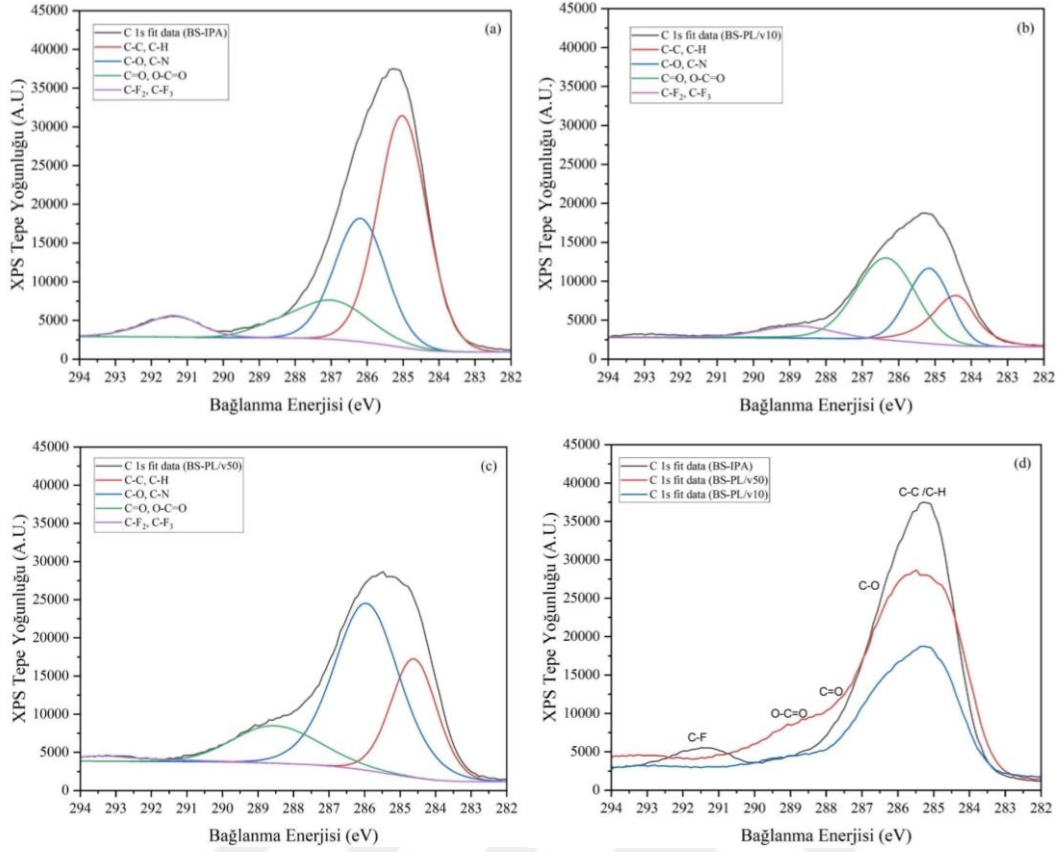


**Şekil 4.19** Plazma nozul hızının (v) bir fonksiyonu olarak XPS spektrumları (vakum torba taraf)

**Tablo 4.22** XPS element analizi (vakum torba taraf)

Parametreler	Yüze Kimyasal Bileşimi						Artış Oranı (%)		
	%Atom						%Atom/%Atom		
	C	O	N	S	F	Si	O/C	O	O/C
<b>BS-IPa</b>	75,2	11,5	2,1	0,9	8,9	0,4	15,3	-	-
<b>BS-PL/v50</b>	59,1	30,3	5,9	2,3	0,7	0,2	51,3	163,5	235,3
<b>BS-PL/v10</b>	47,4	37,2	8,2	6,2	-	0,2	78,5	223,5	413,1

Yüze işlemsiz ve farklı plazma nozul hızı ile taranmış kompozit yüzeylerinin tipik yüksek çözünürlüklü C 1s XPS spektrumları Şekil 4.20’de verilmiştir. 285,98 eV değerindeki zirve, alkoksi gruplarına (C-O) ve 288,58 eV değerindeki zirve karbonil gruplarına (C=O ve C-O=O) atfedilmiştir. Ayrıca torba taraf yüzeyde farklı plazma nozul hızlarının karboksil konsantrasyonu üzerindeki etkisi incelenmiştir. 50 mm/s nozul hızı ile karboksil grubu nispeten artış gösterirken 10 mm/s nozul hızı sonrası düşüş göstermiştir.



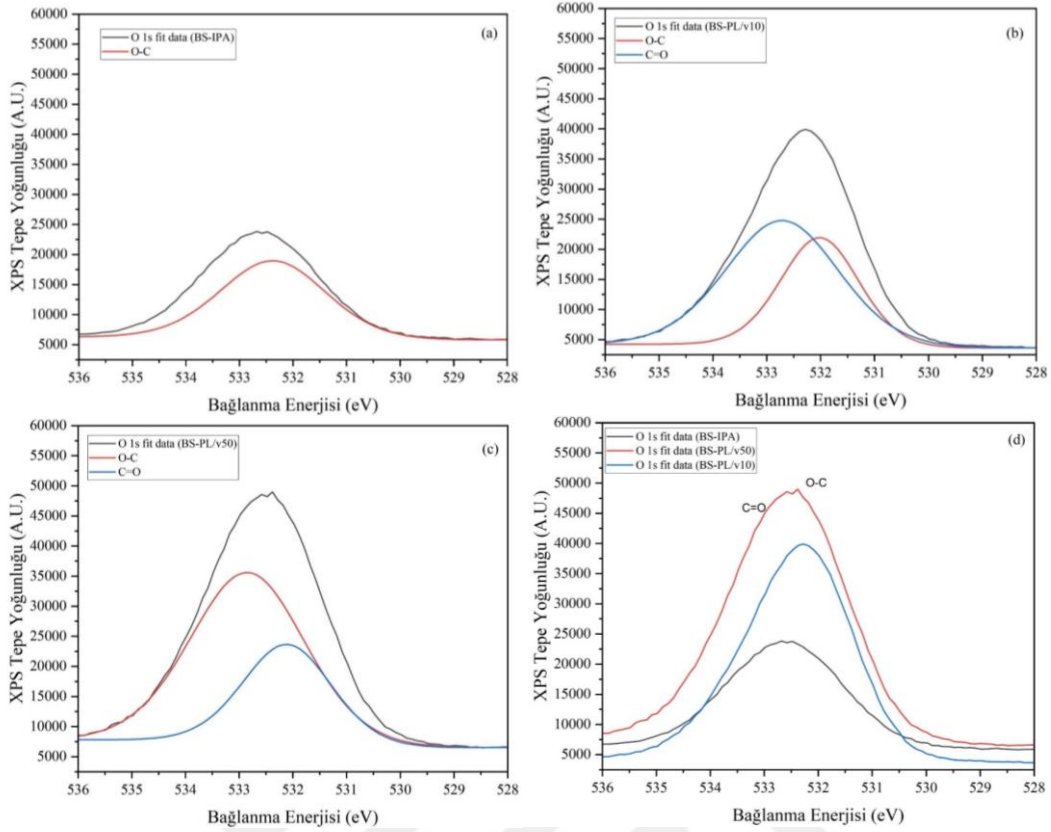
Şekil 4.20 C 1s'yi gösteren XPS spektrumları (vakum torba taraf) a) BS-IPA, b) BS-PL/v10, c) BS-PL/v50, d) karşılaştırma

Tablo 4.23'te C 1s'yi gösteren XPS pik noktaları ve karşılık gelen bağlanma enerjileri verilmiştir.

Tablo 4.23 C 1s'yi gösteren XPS pik noktaları ve karşılık gelen bağlanma enerjileri (vakum torba taraf)

Parametre	C 1s Pik Eksen Noktası		C-C, C-H Pik Noktası		C-O, C-N Pik Noktası		O-C=O Pik Noktası	
	Bağlanma Enerjisi (eV)	Yoğunluk (A.U.)	Bağlanma Enerjisi (eV)	Yoğunluk (A.U.)	Bağlanma Enerjisi (eV)	Yoğunluk (A.U.)	Bağlanma Enerjisi (eV)	Yoğunluk (A.U.)
BS-IPA	285,28	37500	284,98	31415	286,18	18193	287,08	7642,5
BS-PL/v50	285,48	28665	284,58	17237	285,98	24549	288,58	8497,3
BS-PL/v10	285,28	18758	285,18	11686	286,38	12995	288,78	4254,7

O 1s spektrumu BS-PL/v50 parametresi için sırasıyla (C-O) ve (C=O) gibi farklı oksijen işlevselliklerinin varlığına atfedilebilen oksijen içeren grupların 532,88 eV ve 532,08 eV alt zirve noktalarına ayrıştırılmıştır (Şekil 4.21). Atmosferik basınçlı plazma işleminden sonra işlenmemiş yüzeyin O 1s ana eksen zirvesi 532,68 eV değerinden 532,38 eV değerine gerilemiştir.



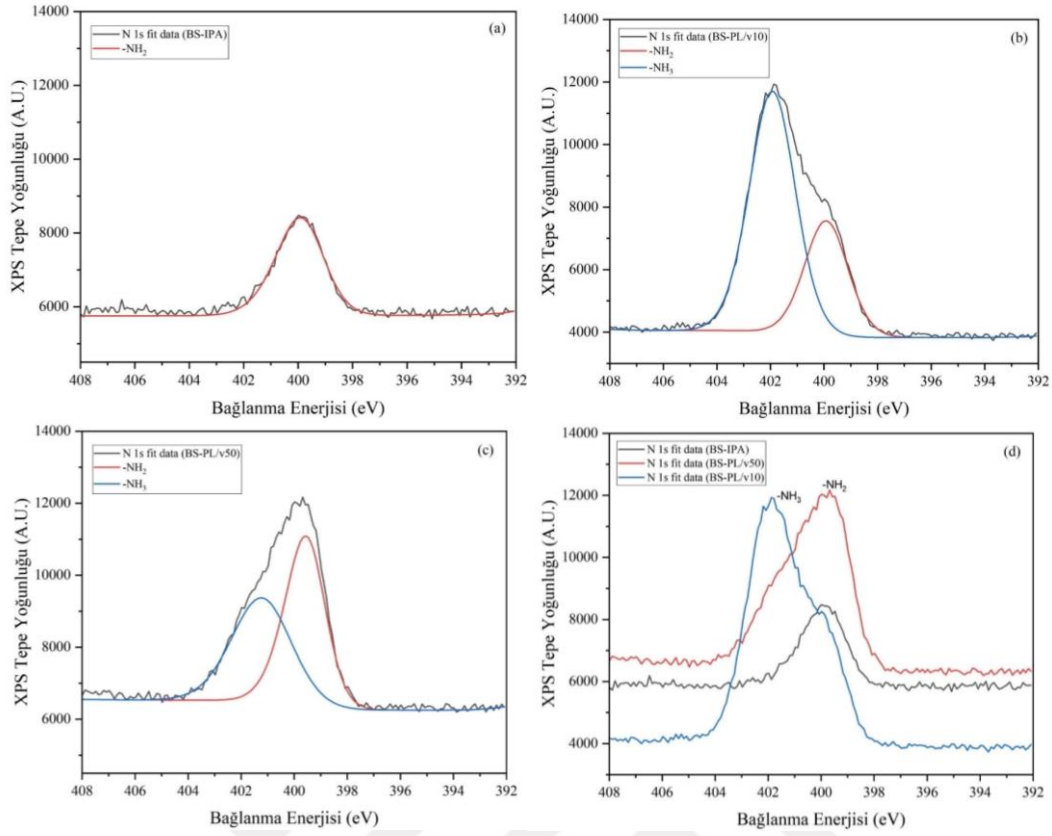
**Şekil 4.21** O 1s'yi gösteren XPS spektrumları (vakum torba taraf) a) BS-IPA, b) BS-PL/v10, c) BS-PL/v50, d) karşılaştırma

Tablo 4.24'te O 1s'yi gösteren XPS pik noktaları ve karşılık gelen bağlanma enerjileri verilmiştir.

**Tablo 4.24** O 1s'yi gösteren XPS pik noktaları ve karşılık gelen bağlanma enerjileri (vakum torba taraf)

Parametre	O 1s Pik Eksen Noktası		C-O Pik Noktası		C=O, O-C=O Pik Noktası	
	Bağlanma Enerjisi (eV)	Yoğunluk (A.U.)	Bağlanma Enerjisi (eV)	Yoğunluk (A.U.)	Bağlanma Enerjisi (eV)	Yoğunluk (A.U.)
BS-IPA	532,68	23843,9	532,38	18963,5	-	-
BS-PL/v50	532,38	48998,1	532,88	35601,6	532,08	23638,1
BS-PL/v10	532,28	39901,8	531,98	21922,9	532,68	24769,7

Şekil 4.22'de N 1s spektrumu, 399,88 eV ve 401,98 eV değerlerine sahip olan (-NH<sub>2</sub>) ve (-NH<sub>3</sub>) gibi farklı alt zirve noktalarına ayrıştırılmıştır. Yüzey işlenmemiş kalıp taraf yüzeylere plazma işlemi uygulandıktan sonra -NH<sub>3</sub> pikinin daha belirgin şekilde olduğu saptanmıştır. Vakum torba taraf yüzeylerde plazma işlemi sonrası N 1s zirvesinin ana eksenini ise 399,98 eV'den 401,88 eV değerine taşınmıştır.



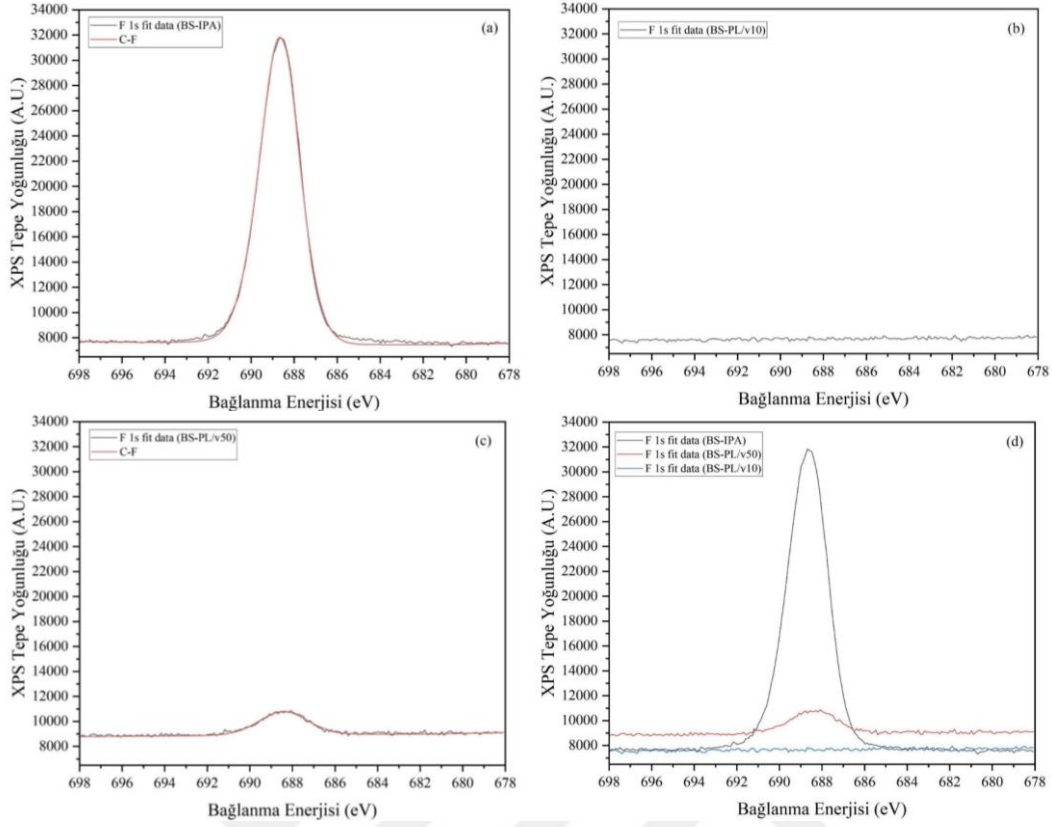
**Şekil 4.22** N 1s'yi gösteren XPS spektrumları (vakum torba taraf) a) BS-IPA, b) BS-PL/v10, c) BS-PL/v50, d) karşılaştırma

Tablo 4.25'te N 1s'yi gösteren XPS pik noktaları ve karşılık gelen bağlanma enerjileri verilmiştir. Plazma nozul hızı 50 mm/s olduğunda amin ve amid gruplarında artış, nozul hızının 10 mm/s olması ile fazla oksidasyon etkisi nedeni ile amin gruplarında azalma ve amid gruplarında ciddi artış olduğu tespit edilmiştir.

**Tablo 4.25** N 1s'yi gösteren XPS pik noktaları ve karşılık gelen bağlanma enerjileri (vakum torba taraf)

Parametre	N 1s Pik Eksen Noktası		Amin Grupları (-NH <sub>2</sub> ) Pik Noktası		Amid Grupları (-NH <sub>3</sub> ) Pik Noktası	
	Bağlanma Enerjisi (eV)	Yoğunluk (A.U.)	Bağlanma Enerjisi (eV)	Yoğunluk (A.U.)	Bağlanma Enerjisi (eV)	Yoğunluk (A.U.)
BS-IPA	399,98	8478,7	399,88	8413,6	-	-
BS-PL/v50	399,68	12172,0	399,58	11088,8	401,28	9369,2
BS-PL/v10	401,88	11933,9	399,88	7557,6	401,98	11694,8

Daha yüksek nozul hızı ile yüzey işlemsiz numunelerin flor konsantrasyonu %8,9'dan %0,7'ye bir düşüş sağlamıştır (Şekil 4.23). Nozul hızı azaldıkça kalıp ayırıcı filminden gelen flor izine rastlanmamıştır. Bu durum, plazma işleminin, yüzey temizleme yöntemi olarak vakum torba taraf yüzeyler için etkinliğini göstermiştir.



**Şekil 4.23** F 1s'yi gösteren XPS spektrumları (vakum torba taraf) a) BS-IPA, b) BS-PL/v10, c) BS-PL/v50, d) karşılaştırma

F 1s'yi gösteren XPS pik noktaları ve karşılık gelen bağlanma enerjileri Tablo 4.26'da verilmiştir. Vakum torba taraf yüzeyde plazma işlemi sonrası C-F gruplarının zirve noktalarında ciddi bir düşüş olduğu gözlemlenmiştir.

**Tablo 4.26** F 1s'yi gösteren XPS pik noktaları ve karşılık gelen bağlanma enerjileri (vakum torba taraf)

Parametre	F 1s Pik Eksen Noktası		C-F Pik Noktası		Ca-F <sub>2</sub> Pik Noktası	
	Bağlanma Enerjisi (eV)	Yoğunluk (A.U.)	Bağlanma Enerjisi (eV)	Yoğunluk (A.U.)	Bağlanma Enerjisi (eV)	Yoğunluk (A.U.)
BS-IPA	688,68	31847,1	688,68	31829,2	-	-
BS-PL/v50	688,08	10887,6	688,38	10798,8	-	-
BS-PL/v10	681,88	7955,3	-	-	-	-

#### 4.10 Kama (Wedge) Test Sonuçları

Farklı yüzey hazırlama teknikleri ile hazırlanan Kama Test numunelerinin zamana bağlı çatlak uzunlukları ölçülmüş ve kırılma tokluk enerjisi değerleri hesaplanmıştır. IPA ile temizlenmiş referans numune çatlak uzunluk ölçümleri ve hesaplanan kırılma tokluk değerleri Tablo 4.27 ve Tablo 4.28'de verilmiştir.

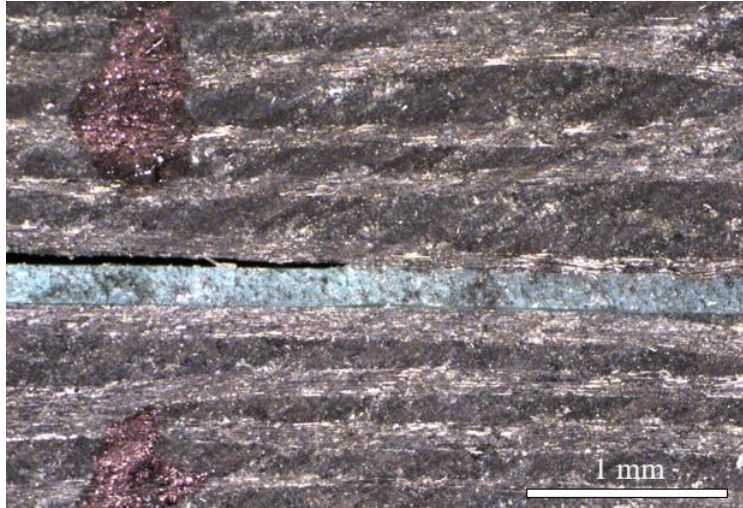
**Tablo 4.27** TS-IPA çatlak ilerleme ölçüm sonuçları

TS-IPA							
Numune No	Saat						
	0	24	48	72	192	384	576
1	58,400	59,458	59,508	59,512	59,520	59,526	59,591
2	66,800	67,833	67,898	67,926	67,936	67,992	68,039
3	60,700	61,519	61,543	61,555	61,625	61,583	61,595
4	67,600	67,700	67,710	68,210	68,210	68,210	68,210
Ortalama	63,375	64,128	64,165	64,301	64,323	64,328	64,359
Standart Sapma	3,921	3,712	3,710	3,837	3,825	3,843	3,832

**Tablo 4.28** TS-IPA kırılma tokluk enerjisi hesaplamaları

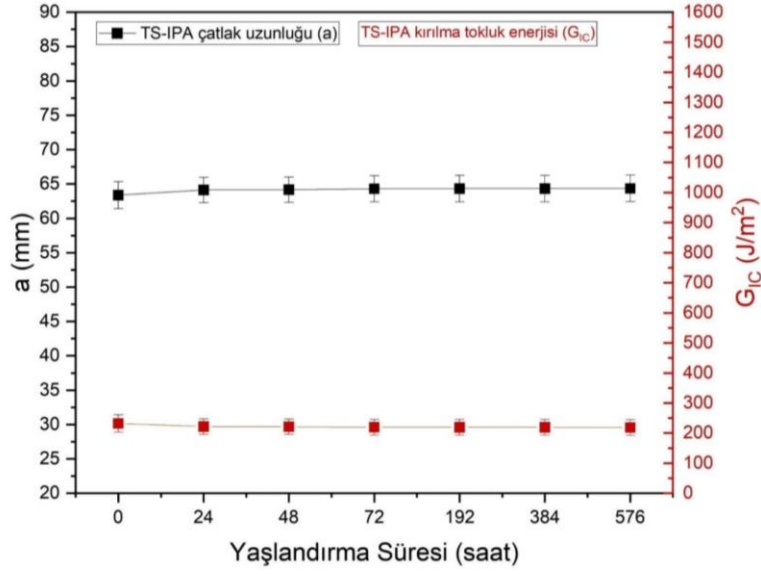
TS-IPA							
Numune No	Saat						
	0	24	48	72	192	384	576
1	318,699	297,277	296,310	296,232	296,078	295,962	294,713
2	189,148	178,186	177,523	177,238	177,137	176,570	176,096
3	274,375	260,473	260,079	259,882	258,738	259,424	259,228
4	180,588	179,552	179,449	174,384	174,384	174,384	174,384
Ortalama	232,085	221,684	221,184	219,372	219,081	219,014	218,605
Standart Sapma	58,071	51,671	51,478	52,723	52,520	52,721	52,393

İzopropil alkol ile temizlenmiş referans numunede çatlak ilerlemesi yapıştırıcı-yapışan arayüzeyinde adeziv bir şekilde meydana gelmiştir (Şekil 4.24).



**Şekil 4.24** TS-IPA numunesi adeziv hata modü

Sadece izopropil alkol ile temizlenmiş referans numune çatlak uzunluk ölçümleri ve hesaplanan kırılma tokluk değerleri Şekil 4.25'te yaşlandırma süresine bağlı olarak verilmiştir. Yaşlandırma koşullarına bağlı olarak ilerleyen çatlak uzaması ile birlikte kırılma tokluk enerji değerleri yaklaşık olarak  $238 \text{ J/m}^2$  değerinden  $218 \text{ J/m}^2$  değerine düşüş göstermiştir.



Şekil 4.25 TS-IPA kama testi sonuçları

IPA ile temizleme işlemi sonrası 11 mm-10 mm/s nozul parametreleri ile yüzeyi işlenen numunelerin çatlak uzunluk ölçümleri ve hesaplanan kırılma tokluk enerji değerleri Tablo 4.29 ve Tablo 4.30’da verilmiştir.

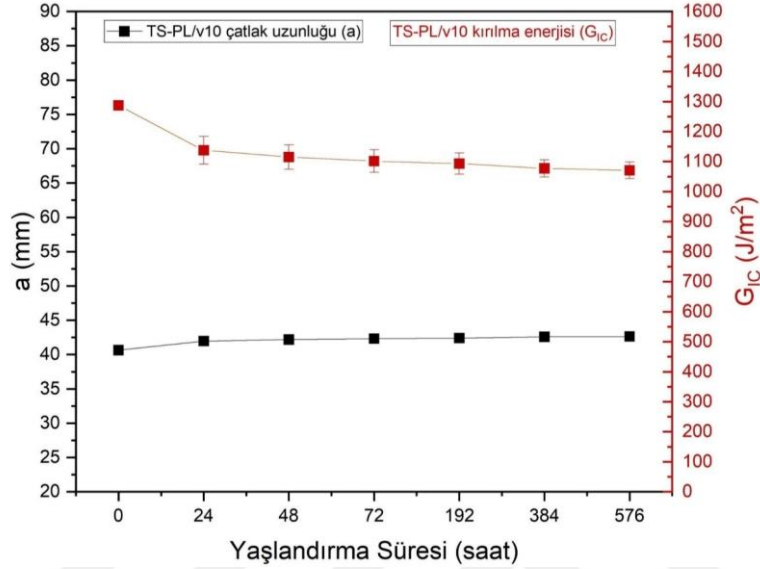
Tablo 4.29 TS-PL/v10 çatlak ilerleme ölçüm sonuçları

TS-PL-V10							
Numune No	Saat						
	0	24	48	72	192	384	576
1	40,500	41,366	41,420	41,738	41,902	41,902	42,036
2	40,300	42,245	42,438	42,550	42,611	42,670	42,694
3	40,100	42,738	43,027	43,135	43,161	43,339	43,420
4	39,900	40,501	41,044	41,200	41,318	41,943	42,028
5	42,400	43,014	43,042	43,016	43,064	43,010	43,023
Ortalama	40,640	41,973	42,194	42,328	42,411	42,573	42,640
Standart Sapma	0,902	0,925	0,824	0,748	0,705	0,572	0,547

Tablo 4.30 TS-PL/v10 kırılma tokluk enerjisi hesaplamaları

TS-PL/v10							
Numune No	Saat						
	0	24	48	72	192	384	576
1	1304,22	1202,85	1196,86	1162,34	1145,02	1145,02	1131,11
2	1329,13	1109,83	1090,62	1079,67	1073,76	1068,08	1065,79
3	1354,64	1061,59	1034,52	1024,63	1022,27	1006,27	999,096
4	1380,76	1304,09	1239,35	1221,49	1208,20	1140,74	1131,93
5	1094,37	1035,72	1033,14	1035,54	1031,12	1036,09	1034,89
Ortalama	1287,12	1137,64	1114,96	1101,54	1093,27	1077,46	1070,95
Standart Sapma	28,529	92,780	81,648	75,495	70,460	57,212	54,867

11 mm-10 mm/s nozul parametreleri ile yüzeyi işlenen numune çatlak uzunluk ölçümleri ve hesaplanan kırılma tokluk değerleri Şekil 4.26'da yaşlandırma süresine bağlı olarak verilmiştir. Yaşlandırma koşullarına bağlı olarak ilerleyen çatlak uzaması ile birlikte kırılma tokluk değerleri yaklaşık olarak 1287 J/m<sup>2</sup> değerinden 1070 J/m<sup>2</sup> değerine düşüş göstermiştir.



Şekil 4.26 TS-PL/v10 kama testi sonuçları

11 mm-50 mm/s nozul parametreleri ile yüzeyi işlenen numunelerin çatlak uzunluk ölçümleri ve hesaplanan kırılma tokluk değerleri Tablo 4.31 ve Tablo 4.32'de verilmiştir.

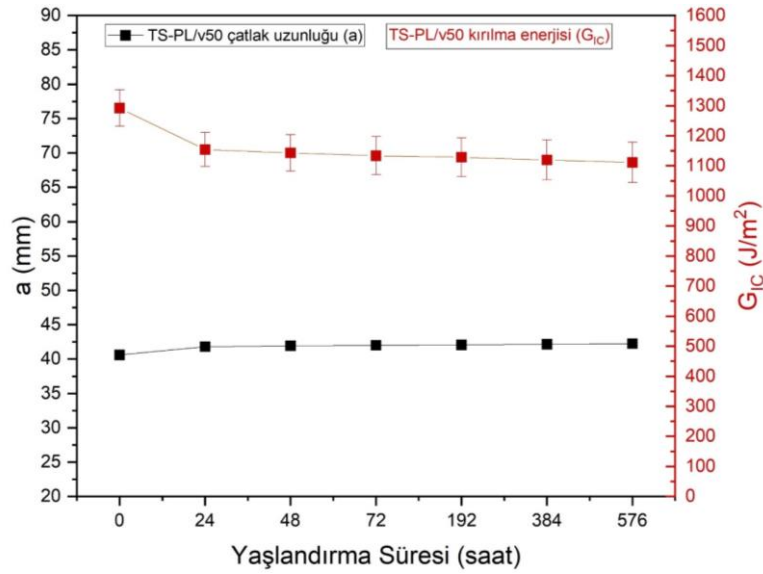
Tablo 4.31 TS-PL/v50 çatlak ilerleme ölçüm sonuçları

TS-PL/v50							
Numune No	Saat						
	0	24	48	72	192	384	576
1	40,800	41,898	41,896	42,000	42,036	42,211	42,463
2	42,200	43,141	43,511	43,701	43,783	43,896	43,934
3	39,600	41,987	42,017	42,056	42,138	42,194	42,235
4	39,800	40,235	40,260	40,282	40,287	40,287	40,305
Ortalama	40,600	41,815	41,921	42,010	42,061	42,147	42,234
Standart Sapma	1,030	1,036	1,151	1,209	1,237	1,277	1,291

11 mm-50 mm/s nozul parametreleri ile yüzeyi işlenen numune çatlak uzunluk ölçümleri ve hesaplanan kırılma tokluk değerleri Şekil 4.27'de yaşlandırma süresine bağlı olarak verilmiştir. Yaşlandırma koşullarına bağlı olarak ilerleyen çatlak uzaması ile birlikte kırılma tokluk değerleri yaklaşık olarak 1291 J/m<sup>2</sup> değerinden 1110 J/m<sup>2</sup> değerine düşüş görülmüştür.

**Tablo 4.32** TS-PL/v50 kırılma tokluk enerjisi hesaplamaları

Numune No	TS-PL/v50						
	Saat						
	0	24	48	72	192	384	576
1	1267,93	1145,44	1145,65	1134,82	1131,11	1113,26	1088,17
2	1114,37	1024,09	991,109	974,687	967,705	958,186	955,011
3	1421,15	1136,17	1133,07	1129,05	1120,66	1114,98	1110,84
4	1394,06	1337,35	1334,18	1331,40	1330,77	1330,77	1328,50
Ortalama	1291,98	1154,14	1143,03	1133,82	1128,54	1119,74	1110,91
Standart Sapma	121,460	112,588	121,935	126,576	128,947	132,603	133,969

**Şekil 4.27** TS-PL/v50 kama testi sonuçları

11 mm-70 mm/s nozul parametreleri ile yüzeyi işlenen numunelerin çatlak uzunluk ölçümleri ve hesaplanan kırılma tokluk değerleri Tablo 4.33 ve Tablo 4.34'te verilmiştir.

**Tablo 4.33** TS-PL/v70 çatlak ilerleme ölçüm sonuçları

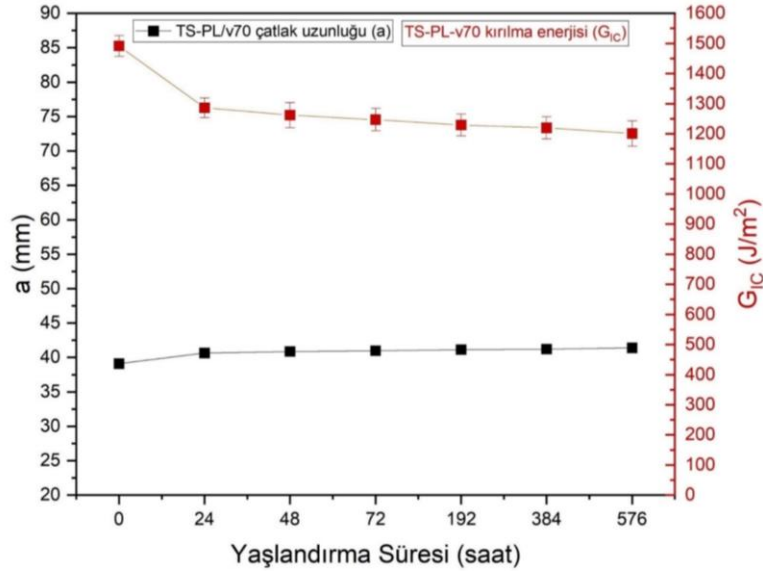
Numune No	TS-PL/v70						
	Saat						
	0	24	48	72	192	384	576
1	39,700	41,248	41,752	41,818	41,941	41,964	42,410
2	39,400	40,747	41,012	41,084	41,167	41,360	41,382
3	38,500	40,792	40,840	40,979	41,237	41,322	41,476
4	38,800	39,800	39,810	40,035	40,190	40,221	40,282
Ortalama	39,100	40,647	40,854	40,979	41,134	41,217	41,388
Standart Sapma	0,474	0,527	0,693	0,634	0,623	0,629	0,754

11 mm-70 mm/s nozul parametreleri ile yüzeyi işlenen numune çatlak uzunluk ölçümleri ve hesaplanan kırılma tokluk değerleri Şekil 4.28'de yaşlandırma süresine bağlı olarak verilmiştir. Yaşlandırma koşullarına bağlı olarak ilerleyen

çatlak uzaması ile birlikte kırılma tokluk değerleri yaklaşık olarak  $1491 \text{ J/m}^2$  değerinden  $1228 \text{ J/m}^2$  değerine düşüş gözlemlenmiştir.

**Tablo 4.34** TS-PL/v70 kırılma tokluk enerjisi hesaplamaları

TS-PL/v70							
Numune No	Saat						
	0	24	48	72	192	384	576
1	1407,52	1216,07	1160,85	1153,85	1140,95	1138,56	1093,38
2	1448,89	1274,25	1243,05	1234,74	1225,24	1203,51	1201,07
3	1582,45	1268,88	1263,19	1246,88	1217,31	1207,75	1190,69
4	1536,28	1394,06	1392,73	1363,06	1343,08	1339,13	1331,40
Ortalama	1491,78	1286,31	1261,59	1246,88	1229,04	1219,60	1200,46
Standart Sapma	69,144	65,150	83,138	74,616	72,269	72,848	84,635



**Şekil 4.28** TS-PL/v70 kama testi sonuçları

11 mm-110 mm/s nozul parametreleri ile yüzeyi işlenen numunelerin çatlak uzunluk ölçümleri ve hesaplanan kırılma tokluk değerleri Tablo 4.35 ve Tablo 4.36'da verilmiştir.

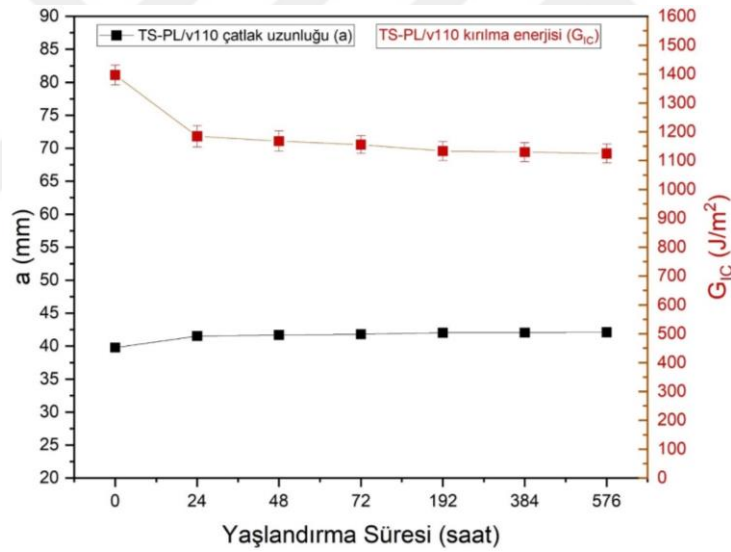
**Tablo 4.35** TS-PL/v110 çatlak ilerleme ölçüm sonuçları

TS-PL/v110							
Numune No	Saat						
	0	24	48	72	192	384	576
1	39,800	42,340	42,422	42,476	42,515	42,565	42,595
2	39,700	40,727	40,965	41,286	41,329	41,346	41,449
3	40,300	41,211	41,231	41,292	41,652	41,685	41,697
4	38,900	42,210	42,367	42,447	42,924	42,949	43,006
5	40,200	41,190	41,458	41,510	41,662	41,717	41,739
Ortalama	39,780	41,536	41,689	41,802	42,016	42,052	42,097
Standart Sapma	0,496	0,629	0,597	0,544	0,601	0,602	0,597

11 mm-110 mm/s nozul parametreleri ile yüzeyi işlenen numune çatlak uzunluk ölçümleri ve hesaplanan kırılma tokluk değerleri Şekil 4.29'da yaşlandırma süresine bağlı olarak verilmiştir. Yaşlandırma koşullarına bağlı olarak ilerleyen çatlak uzaması ile birlikte kırılma tokluk değerleri yaklaşık olarak 1396 J/m<sup>2</sup> değerinden 1124 J/m<sup>2</sup> değerine düşüş gözlemlenmiştir.

**Tablo 4.36** TS-PL/v110 kırılma tokluk enerjisi hesaplamaları

TS-PL/v110							
Numune No	Saat						
	0	24	48	72	192	384	576
1	1394,06	1100,32	1092,20	1086,89	1083,08	1078,21	1075,31
2	1407,52	1276,64	1248,51	1211,79	1206,97	1205,07	1193,66
3	1329,13	1220,25	1217,98	1211,12	1171,55	1168,00	1166,72
4	1521,27	1113,36	1097,64	1089,74	1044,07	1041,74	1036,46
5	1341,81	1222,63	1192,67	1186,96	1170,47	1164,58	1162,23
Ortalama	1396,74	1184,16	1167,62	1155,52	1133,13	1129,42	1124,82
Standart Sapma	69,182	73,700	70,028	61,577	65,546	65,897	64,359



**Şekil 4.29** TS-PL/v110 kama testi sonuçları

Peel-ply ile yüzeyi hazırlanan numunelerin çatlak uzunluk ölçümleri ve hesaplanan kırılma tokluk değerleri Tablo 4.37 ve Tablo 4.38'de verilmiştir.

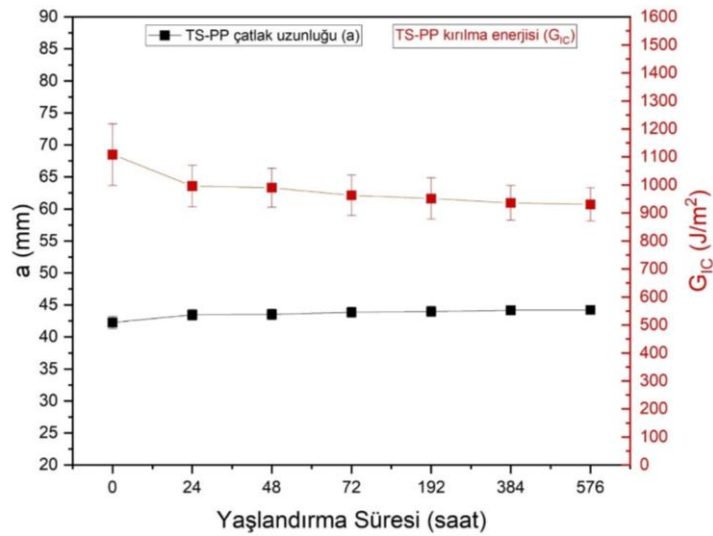
**Tablo 4.37** TS-PP çatlak ilerleme ölçüm sonuçları

Numune No	TS-PP						
	Saat						
	0	24	48	72	192	384	576
1	43,100	44,439	44,396	44,766	44,941	45,081	45,214
2	41,800	42,895	42,974	43,955	44,094	44,200	44,207
3	43,400	43,989	44,001	44,045	44,239	44,285	44,305
4	38,700	40,577	40,758	40,887	40,930	41,508	41,666
5	44,300	45,373	45,488	45,540	45,685	45,751	45,769
Ortalama	42,260	43,455	43,523	43,839	43,978	44,165	44,232
Standart Sapma	1,952	1,645	1,600	1,583	1,626	1,444	1,408

Peel-ply ile yüzeyi hazırlanan numunelerin çatlak uzunluk ölçümleri ve hesaplanan kırılma tokluk değerleri Şekil 4.30’da yaşlandırma süresine bağlı olarak verilmiştir. Yaşlandırma koşullarına bağlı olarak ilerleyen çatlak uzaması ile birlikte kırılma tokluk değerleri yaklaşık olarak  $1108 \text{ J/m}^2$  değerinden  $930 \text{ J/m}^2$  değerine düşüş gözlemlenmiştir.

**Tablo 4.38** TS-PP kırılma tokluk enerjisi hesaplamaları

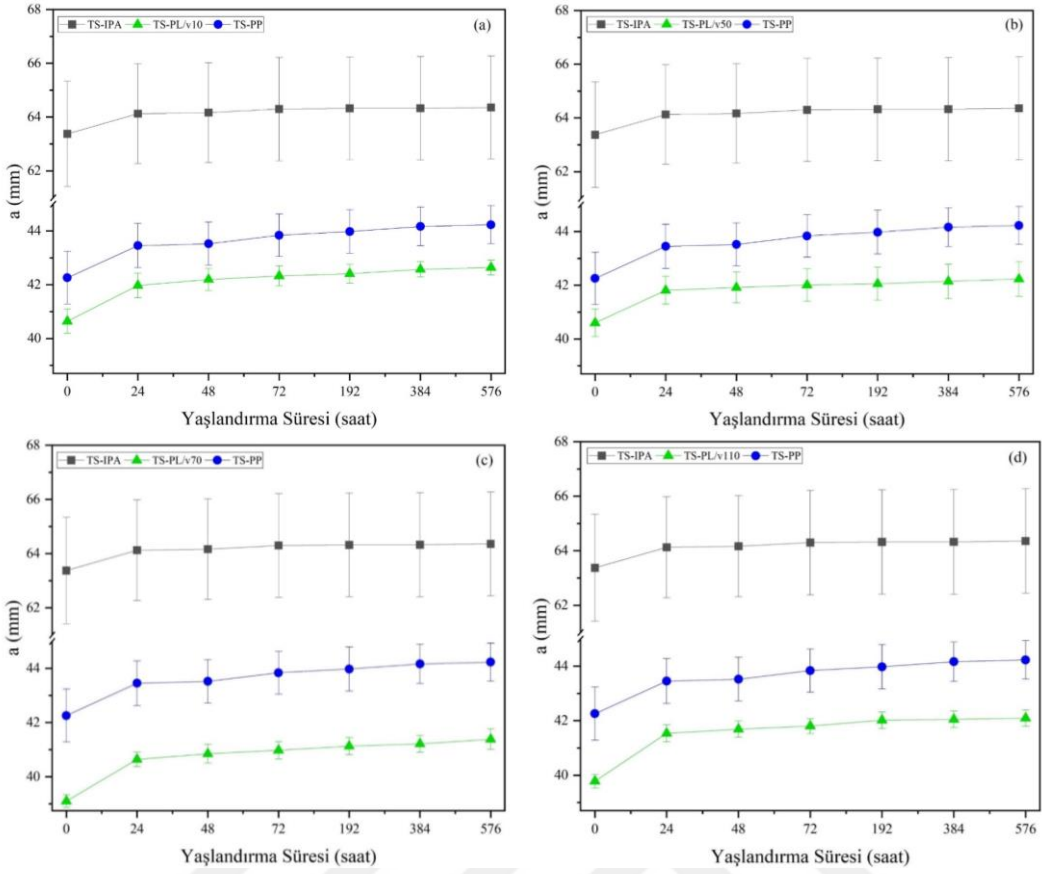
Numune No	TS-PP						
	Saat						
	0	24	48	72	192	384	576
1	1027,83	914,04	917,44	888,68	875,47	865,07	855,34
2	1155,75	1046,78	1039,42	953,263	941,787	933,15	932,58
3	1000,86	950,43	949,44	945,81	930,00	926,29	924,69
4	1551,48	1294,78	1272,94	1257,65	1252,60	1187,18	1170,04
5	925,09	843,89	835,73	832,07	821,97	817,42	816,19
Ortalama	1108,32	996,04	990,02	963,00	951,36	935,99	930,54
Standart Sapma	220,097	148,592	139,094	144,379	147,992	123,686	118,969

**Şekil 4.30** TS-PP kama testi sonuçları

#### 4.11 Uzun Süreli Dayanım Sonuçlarının Değerlendirmesi

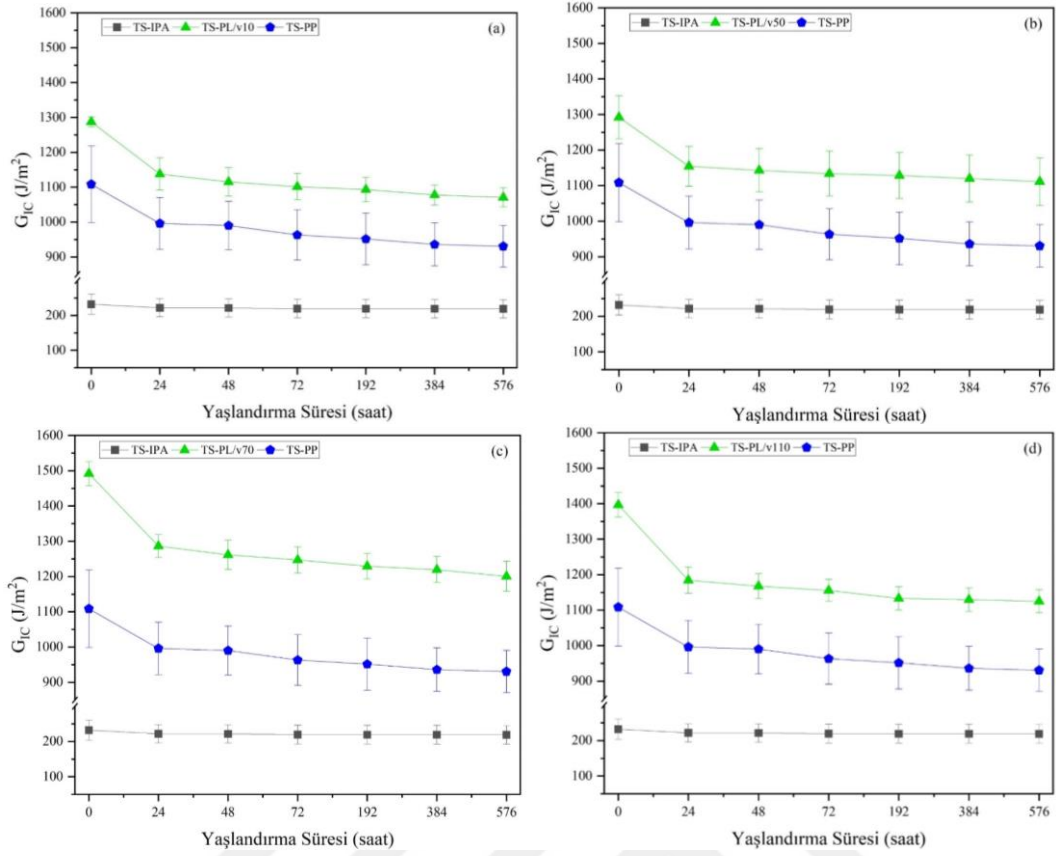
Kama testi, incelenen yapıştırıcı sistem hakkında değerli bilgiler sağlayan iki ayrı aşamayı kapsamaktadır. İlk aşama, oda sıcaklığında örnek içine bir kama yerleştirilmesini içerir ve bu aşamada yapıştırma öncesi uygulanan yüzey işlemlerinin etkinliği değerlendirilmektedir.  $a_0$  olarak belirtilen başlangıç çatlak uzunluğu ve bu noktadaki  $G_{IC}$  kırılma tokluğu enerjisi, tüm yüzey işlemlerinin yeterliliğini onaylayan önemli bir göstergedir. Sonrasında, ikinci aşama yükseltilmiş/nemli çevresel yaşlanma altında çatlak büyümesinin izlenmesini içermektedir. Bu aşamada çatlak yayılması esas olarak yapıştırıcı sistemin özelliklerine, yani termal direnç-stabilite, tokluk ve hem yapıştırıcı hem de yapıştırılanın higroskopik doğasına bağlıdır. İncelenen stabil bir sistemde, çatlak yayılma hızı yaşlanmanın ilk birkaç saatinde yüksek hızda başlar ve zamanla azalarak, çatlak uzunluğu değerleri bir asimptota doğru eğilim gösterir.

Çatlak uzunluğu ölçümleri, örnekler iklim odasına yerleştirildikten sonraki 0, 24, 48, 72, 192, 384 ve toplam 576 saatlik aralıklarla kaydedilmiştir. Şekil 4.31 (a-d), yaşlanma süresi boyunca çatlak uzunluğu (a) değerlerindeki eğilimleri göstermektedir. Hiçbir numune test sırasında erken veya tam kopma göstermemiştir. İşlem görmemiş TS-IPA numuneleri (siyah eğrilerle gösterilmiştir) daha büyük başlangıç çatlak ( $a_0$ ) değerleri sergileyerek, yaklaşık 63,5 mm ortalama ve  $a_0$ 'da yaklaşık 235 J/m<sup>2</sup> bir  $G_{IC}$  ölçülmüştür. Buna karşılık, tüm APT örneklerinde daha küçük bir başlangıç çatlak gözlemlenmiş ve en yüksek kırılma tokluğu enerji değerlerine ulaşmıştır. APT yüzeyleri, izopropil alkolle temizlenen işlem görmemiş yüzeylere göre yaklaşık %38 daha iyi başlangıç çatlak değerleri sergilemiş ve peel-ply ile hazırlananlara göre yaklaşık %11 daha iyi performans sergilemiştir. Ayrıca, en iyi APT ölçümü 1491 J/m<sup>2</sup> ile, peel-ply'e göre %25 daha yüksek bir başlangıç  $G_{IC}$  değeri göstermiş olup, işlem görmemiş örneklerden 6 kat daha yüksek bir değer sağlamıştır. Diğer APT parametreleri birbirlerine yakın performans seviyeleri göstermiştir.



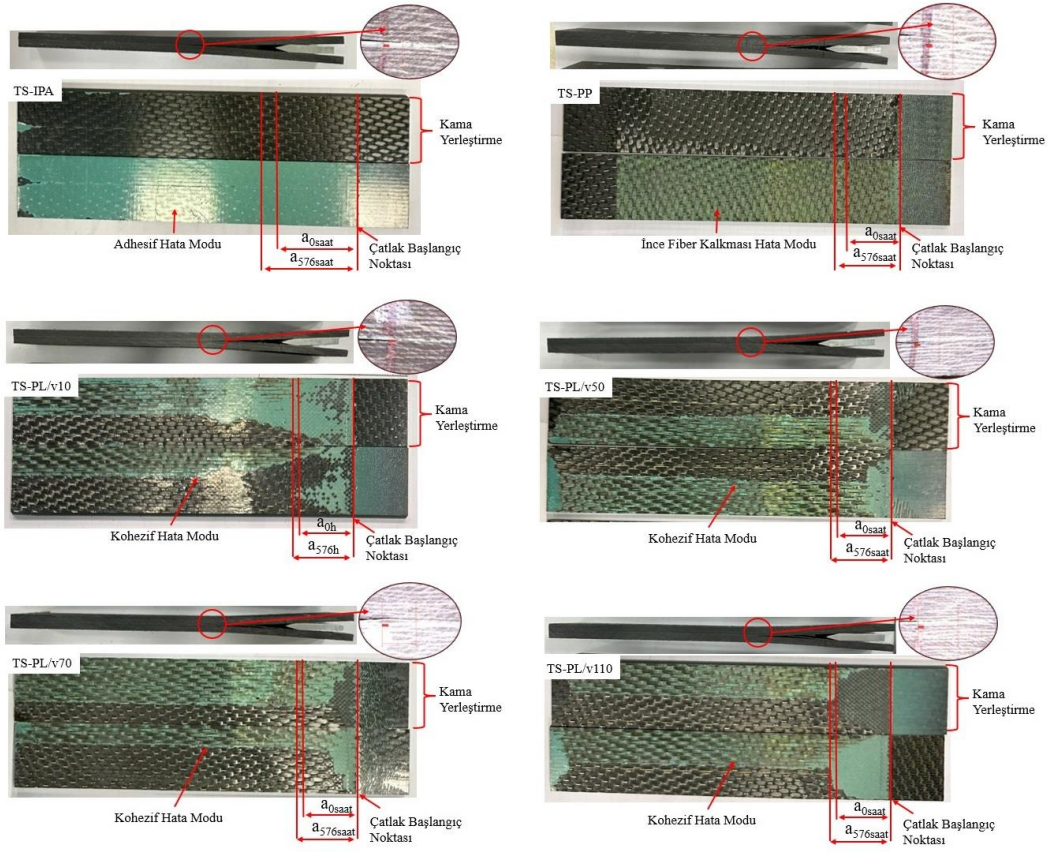
**Şekil 4.31** Yüzeylerde çatlak ilerleme sonuçlarının karşılaştırılması:  
a) TS-PL/v10, b) TS-PL/v50, c) TS-PL/v70, d) TS-PL/v110

CFRP örneklerine 71°C sıcaklık/%95 nem çevre koşullarına maruz kalma süresince ilgili kırılma tokluğu enerji salınım oranı,  $G_{IC}$ , değerlerindeki eğilimlerini Şekil 4.32 (a-d)'de gösterilmektedir. Çevresel maruziyet nedeniyle, APT yüzeylerindeki ortalama çatlak yayılması yaklaşık 1,6 mm olmuş, bu da kırılma tokluğunun ( $G_{IC}$ ) 1292 J/m<sup>2</sup> değerinden 1100 J/m<sup>2</sup> değerine düşmesine ve yaklaşık %14'lük bir azalma oluşmasına neden olmuştur. Peel-ply ile işlem gören yüzeylerde, çevresel maruziyetten dolayı çatlak yayılması yaklaşık 2 mm olmuş ve dayanıklılık enerjisi 1108 J/m<sup>2</sup> değerinden 930 J/m<sup>2</sup> değerine düşerek yaklaşık %16'luk bir azalma meydana gelmiştir.



**Şekil 4.32** Yüzeylerde çatlak ilerleme sonuçlarının karşılaştırılması:  
a) TS-PL/v10, b) TS-PL/v50, c) TS-PL/v70, d) TS-PL/v110

Şekil 4.33 (a-d) kapsamında, kompozit örneklerin kırılma yüzeylerinin görüntüleri verilmiştir. Burada,  $a_{0\text{saat}}$  ve  $a_{576\text{saat}}$  değerleri örneklerin sırasıyla maruziyet sonrası başlangıç ve gerçek çatlak uzunluklarını temsil etmektedir. APT ile işlem gören CFRP örneklerinde çatlak yayılması,  $G_{IC}$  değerine katkıda bulunan bir kohezif hata modu olarak gözlemlenmiştir. Buna karşılık, adeziv hata modları sergileyen işlem görmemiş yüzeylerde  $G_{IC}$  değerindeki azalma, yüzey/yapıştırıcı arayüzünün bozulmasına atfedilmiştir.



**Şekil 4.33** Kama testi bağlantılarının hata modları

Deneysel bulgular, APT parametrelerinin yapıştırıcı ile bağlanmış CFRP bağlantılarının performansı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Bu nedenle, bu parametrelerin planlanan işletme koşullarına göre özelleştirilmesi, daha iyi sonuçlar elde edilmesine katkı sağlayabilir. Son olarak, atmosferik basınç plazma işleminin, sert çevresel koşullarda bile bağlantı dayanıklılığını koruduğu gözlemlenmiştir.

# 5

## SONUÇ

Karbon fiber takviyeli polimer (CFRP) kompozit malzemeler, yüksek mukavemet-ağırlık oranı nedeniyle özellikle havacılık, otomotiv ve uzay endüstrilerinde tercih edilmektedir. Ancak, bu malzemelerin yüzey işlemleri, malzemenin yapışma özelliklerini doğrudan etkileyerek nihai ürünün performansında belirleyici bir rol oynamaktadır. Atmosferik basınçlı plazma işlemi; CFRP kompozit malzemelerin yüzeyini nano düzeyde modifiye ederek, yapışma mukavemetini ve dolayısıyla yapısal bütünlüğü arttırmayı amaçlamaktadır. Tez çalışmasında, vakum torbalama ve otoklav yöntemi ile CFRP kompozit malzeme üretimi gerçekleştirilmiş ve ardından ikincil yapıştırma işlemi öncesinde iki farklı desene sahip yüzeylere (vakum torba taraf ve kalıp taraf) izopropil alkol, peel-ply ve farklı parametrelerde atmosferik basınçlı plazma yüzey işlemleri uygulanmıştır. Yüzey hazırlama tekniklerinin kısa ve uzun süreli etkilerini anlamak için geniş kapsamlı yüzey karakterizasyon teknikleri ve mekanik test yöntemleri kullanılmıştır.

Deneysel çalışmalar kapsamında, kalıpla ve vakum torbasıyla temas eden kompozit yüzeylerin, farklı atmosferik basınçlı plazma işlem parametreleri altında su ve diiyodometan temas açılarındaki değişiklikler değerlendirilmiştir. Atmosferik basınçlı plazma işleminin, yüzeylerdeki temas açılarını keskin bir şekilde azalttığı görülmüştür. Bu durum, plazma nozul hızının ve mesafesinin kalıp tarafıyla temas eden 8552/5h laminantlar için temas açısı üzerindeki etkisini açıkça göstermiştir. Çözücü ile temizlenen kalıp taraf yüzey başlangıçta  $55^\circ$  temas açısı değeri göstermiş ancak plazma nozul hızının ve mesafesinin azalması ile kalıp taraf yüzeyde temas açısı yaklaşık  $7^\circ$  değerine kadar düşmüştür. Bu sonuç, yüzey temas açısında %87 oranında bir azalma olduğu anlamına gelmektedir. Benzer şekilde, çözücü ile temizlenen vakum torba taraf yüzey başlangıçta  $80^\circ$  değerinde bir temas açısı gösterirken, plazmanın uygulama süresinin artması ile vakum torba taraf yüzeyde temas açısı yaklaşık  $10^\circ$  değerine düşmüştür. Bu sonuç ise yüzeydeki temas açısında %88 oranında bir azalma oluşturmuştur.

Temas açısı ölçümlerinden hesaplanmış olan yüzey serbest enerji değerleri, atmosferik basınçlı plazma işleminin yüzeylerin enerjisini arttırdığı ve suyla ıslanabilirliğini önemli ölçüde iyileştirdiği belirlenmiştir. Çözücü ile temizlenen kalıp taraf yüzeyin toplam yüzey enerjisi, plazma maruziyetinin artmasına bağlı olarak 49 mN/m değerinden 80 mN/m değerine artmış ve yaklaşık %63 oranında bir değişim elde edilmiştir. Benzer şekilde, çözücü ile temizlenen vakum torba taraf yüzeyin toplam yüzey enerjisi, plazma maruziyetinin artmasıyla 41 mN/m değerinden 81 mN/m değerine yükselerek yaklaşık %98 oranında artış elde edilmiştir. Polar yüzey enerjisine baktığımızda, çözücü ile temizlenen kalıp taraf yüzeyin polar yüzey enerjisi, plazma maruziyetinin artmasına bağlı olarak 21 mN/m değerinden 34 mN/m değerine artarak yaklaşık %62 oranında yükselmiştir. Çözücü ile temizlenen vakum torba taraf yüzeyin polar yüzey enerjisi ise 5 mN/m değerinden 33 mN/m değerine yükselerek yaklaşık %560 oranında oldukça yüksek bir artış göstermiştir. Her iki yüzey türü için polar yüzey enerjisi, plazma işlemi sonrasında sırasıyla kalıpla temas eden yüzeyde 31 mN/m ve vakum torba taraf yüzeyde 32 mN/m seviyelerinde kararlılığını korumuştur. Ayrıca daha sonraki plazma uygulamalarıyla bu değerler hemen hemen sabit kalmıştır.

Deneysel çalışmalar kapsamında kullanılan diğer bir analiz yöntemi ise Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (FTIR-ATR) analizi olup, CFRP numunelerinde atmosferik basınçlı plazma işleminin neden olduğu yüzey değişimlerini ve belirli fonksiyonel grupların oluşumunu gözlemek için kullanılmıştır. FTIR analizi, 2600 ile 3800  $\text{cm}^{-1}$  ve 1400 ile 1600  $\text{cm}^{-1}$  aralıklarında CFRP yüzeyindeki kimyasal değişiklikleri detaylı bir şekilde ortaya koymuştur. Plazma işleminden sonra, 2800 ve 3000  $\text{cm}^{-1}$  arasındaki absorpsiyon pikinin, -CH<sub>2</sub> (metilen) gruplarının oksitlenmesi sonucu azaldığı gözlemlenmiştir. Bu sonuç, plazma işleminin yüzeydeki hidrokarbon zincirlerini okside ederek yüzey enerjisini arttırdığını göstermiştir. Ayrıca, 3500  $\text{cm}^{-1}$  ve 3200  $\text{cm}^{-1}$  arasındaki absorpsiyon pikleri, sırasıyla -OH (hidroksil) ve -NH<sub>2</sub> (amin) grupları ile ilişkilendirilmiş ve her iki grupta da önemli bir artış tespit edilmiştir. Bu sonuç; plazma işleminin yüzeyde hidroksil ve amin gruplarının konsantrasyonunu arttırdığını, bu grupların yüzey ıslanabilirliğini ve yapışma kapasitesini iyileştirdiğini göstermiştir. Aynı zamanda, CFRP yüzeyinde C=O (karbonil) gruplarının oluşumu da plazma işlemi sonrası belirgin hale gelmiştir.

Plazma maruziyetinin artmasıyla birlikte, temas açısındaki azalmaların FTIR tarafından doğrulandığı ve bu azalmaların yüzeydeki toplam oksijen içeriğindeki artışlarla iyi bir korelasyon gösterdiği tespit edilmiştir. Böylece, plazma işleminin yüzeyde -OH (hidroksil) ve -COOH (karboksil) gibi polar grupların oluşumunu teşvik ettiği ve bu grupların yüzey enerjisini arttırdığı doğrulanmıştır. Sonuç olarak; atmosferik basınçlı plazma işleminin, peel-ply işlemine kıyasla daha fazla yeni fonksiyonel grup oluşturduğu ve daha etkili yüzey özellikleri sunduğu görülmüştür.

Atomik kuvvet mikroskobu (AFM), ve profilometre analizleriyle elde edilen sonuçlar, kalıp tarafı yüzeyinde atmosferik basınçlı plazma işlemine bağlı olarak yüzey topografyasında minimal değişiklikler olduğunu göstermiştir. Öte yandan, vakum torba tarafındaki yüzeyde gözlemlenen değişiklikler daha belirgin olmuştur ve yüzey topografyası, dalgalı bir yapıdan daha sık frekanslı bir yapıya evrilmiştir. Bu durum, atmosferik basınçlı plazma işleminin kalıp tarafındaki yüzeylerde yarattığı kimyasal değişimlerin, yüzey topografyasındaki değişikliklere kıyasla bağlantı performansı üzerinde daha belirgin bir etki oluşturabildiğini göstermektedir. Öte yandan, vakum torba tarafındaki yüzeylerde topografik değişimlerin bağlantı performansını daha fazla etkilediği tespit edilmiştir. Bu bulgular, atmosferik basınçlı plazma işleminin kimyasal değişimler yoluyla, peel-ply işleminin ise mekanik kilitleme ile yüzey pürüzlülüğü artırarak bağlantı performansını iyileştirdiğini göstermektedir. Yapılmış olan çalışmalar ve elde edilmiş olan sonuçlar, atmosferik basınçlı plazma işleminin iki farklı desene sahip yüzeylerin topografik ve morfolojik özelliklerini nasıl etkileyebileceğini anlamada kritik önem taşıdığını göstermiştir.

Karbon fiber takviyeli polimer kompozitin farklı yüzey hazırlama tekniklerine tabi tutulmuş yüzeyleri taramalı elektron mikroskobu (SEM) altında incelenmiştir. İşlenmemiş yüzeyler, atmosferik basınçlı plazma işlemi uygulanmış yüzeylerle kıyaslandığında benzer morfolojik özellikler sergilemiş, belirgin bir yüzey değişimi gözlemlenmemiştir. Bu durum, atmosferik basınçlı plazma işleminin yüzey morfolojisini değiştirmeden kimyasal değişime yol açtığını göstermektedir. Peel-ply uygulanmış yüzeylerde ise fiberlerin morfolojisinde herhangi bir kırılma veya bozulma görülmemiştir. Bu sonuçlar, tez çalışması kapsamında uygulanan peel-ply yönteminin fiber bütünlüğünü koruduğunu ve yüzey pürüzlülüğünü

arttırarak işlenmemiş yüzeylere kıyasla yapışma performansını iyileştirebildiğini göstermiştir.

Deneysel çalışmalar kapsamında, yüzeylerin kimyasal bileşimini ve elementlerin yüzeydeki dağılımını belirlemek için X-ray fotoelektron spektroskopisi (XPS) kullanılmıştır. XPS analizleri atmosferik basınçlı plazma işleminin CFRP kompozit yüzeylerdeki etkilerini ortaya koymada önemli rol oynamıştır. Bulgular; kalıp taraf kompozit yüzeylerde atmosferik basınçlı plazma işlemi sonrası karbon konsantrasyonunun %75,5 oranından %46,9 oranına düştüğünü, oksijen konsantrasyonunun ise %13,7 oranından %38,7 oranına yükseldiğini göstermiştir. Bu sonuçlar, yüzeyde önemli kimyasal değişikliklerin meydana geldiğini ortaya koymuştur. Bu değişimler, yüzey oksidasyonundaki artışı, O/C oranındaki %244 ve %361 artış değerleriyle kanıtlamıştır. Ayrıca, yüzeydeki flor konsantrasyonunun %4 değerinden %0,3 değerine düşüşü, plazmanın yüzey temizleme etkinliğine vurgu yapmıştır. Kompozit malzemenin vakum torba taraf yüzeylerinde, plazma yüzey işlem uygulaması sonrasında oksijen konsantrasyonu %11,5'ten %37,2'ye yükselmiş, flor konsantrasyonu ise %8,9 değerinden %0,7 değerine önemli ölçüde azalmıştır. X-ray fotoelektron spektroskopisi (XPS) analizleri, plazma işleminin yüzeydeki fonksiyonel grupların konsantrasyonunu nasıl arttırdığını detaylı bir şekilde ortaya koymuştur. Özellikle hidroksil (-OH), amin (-NH<sub>2</sub>), karbonil (C=O) ve karboksil (O-C=O) gruplarındaki artış, yüzeylerin kimyasal reaktivitesinde ve bağlanma kapasitesinde büyük ölçüde iyileşmelerin meydana geldiğini açıkça göstermiştir. Bu kimyasal değişiklikler, temas açısı ölçümlerinde oluşan belirgin azalmayla doğrudan ilişkilendirilmiştir.

Numunelere uygulanan tek bindirmeli kesme testi, yapıştırıcıların ve yüzey işlemlerinin bağlantı performansını nasıl etkilediğini belirlemek için kritik bilgiler sağlamıştır. Sonuçlar, izopropil alkol ile temizlenmiş kalıp tarafı bağlantılardan 18,8 MPa değerinde bir kesme mukavemeti elde edilmiştir. Kalıp tarafı yüzey atmosferik basınçlı plazma ile işlendikten sonra, 50 mm/s nozul hızı (TS-PL/v50) parametresi ile kesme mukavemeti %8,2 artışla 20,34 MPa değerine yükselmiştir. Daha sonra, 10 mm/s nozul hızı (TS-PL/v10) parametresi ile bu değer %19,2 artışla 22,41 MPa değerine ulaşmıştır. Bu durum, atmosferik basınçlı plazma işleminin kompozit yüzeydeki kimyasal değişim sonrasında bağlanma kuvvetini arttırdığını göstermiştir. Öte yandan, izopropil alkol ile temizlenmiş vakum torba tarafı yüzey

24,49 MPa değerinde bir kesme mukavemeti değeri sergilemiştir. Ancak, vakum torba tarafı yzey plazma işlemi gördükten sonra, 50 mm/s nozul hızı (BS-PL/v50) parametresi ile kesme mukavemeti %3,5 oranında azalarak 23,64 MPa değerine dşmştir. Daha düşük bir nozul hızı olan 10 mm/s (BS-PL/v10) plazma parametresi kullanıldığında ise, kesme mukavemeti %31,6 oranında keskin bir düşüşle 16,75 MPa değerine dşmştir. Bu sonuçlar, vakum torba tarafında aşırı plazma işleminin olumsuz etkilerini ortaya çıkarmıştır. Dolayısıyla, plazma işlem parametrelerinin optimize edilmesi, CFRP kompozitlerin mekanik ve yapışma özelliklerini iyileştirmede kritik öneme sahip olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Kalıp tarafındaki peel-ply bağlantılar ise, plazma ile işlem görmüş yzeylere kıyasla daha düşük mekanik davranış sergilemiş ve yaklaşık 20,24 MPa değerinde bir kesme mukavemeti elde edilmiştir. Bu değer, peel-ply işleminin yzey modifikasyonu açısından atmosferik basınçlı plazma işlemine kıyasla daha az etkili olduğunu ortaya koymuştur.

Numunelere uygulanan kama testi, yapıştırma öncesi uygulanan yzey işlemlerinin uzun süreli etkinliğini değerlendirmek için kritik bir rol oynamıştır. Çatlak uzunluğu ölçümleri, numuneler kabine yerleştirildikten sonraki 0, 24, 48, 72, 192, 384 ve toplam 576 saatlik aralıklarla alınmıştır. İşlem görmemiş TS-IPA numuneleri, ortalama 63,5 mm başlangıç çatlak ( $a_0$ ) değerleri sergilemiş olup, yaklaşık  $235 \text{ J/m}^2$  bir  $G_{IC}$  değeri llmştir. Buna karşılık, tüm atmosferik basınçlı plazma işlemi bağlantılarında daha küçük başlangıç çatlakları meydana gelmiş ve en yüksek kırılma tokluğu enerji değerlerine ulaşılmıştır. Atmosferik basınçlı plazma işlemlı yzeyler, izopropil alkolle temizlenen işlem görmemiş yzeylere göre yaklaşık %38 ve peel-ply ile hazırlanan yzeylere göre yaklaşık %11 daha iyi başlangıç çatlak değerleri sergilemiştir. Ayrıca, en iyi plazma parametresi (TS-PL/v70) karşılaştırıldığında, peel-ply'a göre %25 ve işlem görmemiş numunelere göre ise 6 kat daha yüksek bir başlangıç  $G_{IC}$  değeri  $1492 \text{ J/m}^2$  elde edilmiştir. Diğer atmosferik basınçlı plazma parametreleri birbirlerine benzer performans sergilemiştir.  $71^\circ\text{C}$  sıcaklık ve %95 bağıl nem çevresel maruziyetten dolayı, atmosferik basınçlı plazma işlemi yzeylerindeki ortalama çatlak ilerlemesi yaklaşık 1,6 mm olmuş, bu sonuç  $G_{IC}$  değerinin  $1292 \text{ J/m}^2$  değerinden  $1100 \text{ J/m}^2$  değerine düşmesine ve %14'lk bir azalmaya neden olmuştur. Peel-ply ile hazırlanan yzeylerde, çevresel maruziyetten dolayı çatlak ilerlemesi yaklaşık

2 mm olmuş ve kırılma tokluğu enerjisi  $1108 \text{ J/m}^2$  değerinden  $930 \text{ J/m}^2$  değerine düşerek %16'lık bir azalma meydana gelmiştir. Bu bulgular; atmosferik basınçlı plazma işlemi uygulanan yüzeylere ait bağlantıların zorlu çevre koşullarında bile uzun süreli mekanik özelliklerini koruduğunu ve yüksek performansını sürdürmek için optimal özellikler sağladığı sonucuna varılmıştır. Bu işlemin optimize edilmiş (TS-PL/v10, TS-PL/v50, TS-PL/v70, TS-PL/v110) parametrelerle uygulanması, kompozit bağlantıların dayanıklılığını yaklaşık %25 oranında iyileştirmiştir.

Çalışmalar kapsamında, kompozit malzemelerin mekanik performansını ve dayanıklılığını anlamada kritik bir role sahip olması nedeniyle “hata modu” değerlendirmesi de yapılmıştır. Tek bindirmeli kesme mukavemeti testi sonrasında elde edilen kırılma yüzeylerine ait sonuçlar; atmosferik basınçlı yüzey işlemi, kalıp tarafı yüzeylerinde kohezif hata modu oranını %77'den %91'e yükselterek arayüzey yapışmasını iyileştirdiğini göstermiştir. Niceliksel analizler, plazma yüzey işleminin vakum torba tarafı yüzeylerinde ise adeziv hata modunu arttırdığını, yani kalıp tarafına kıyasla farklı bir etki yarattığını ortaya koymuştur. Bu durum, vakum torba taraf yüzeyin AFM analizi ile de doğrulandığı gibi yüzeyin pürüzlülüğünün artmasının, yapıştırıcının nüfuzunu engelleyerek vadilerde gaz moleküllerinin sıkışmasına neden olduğunu göstermiştir. Aşırı plazma maruziyeti, vakum torba taraf bağlantılarında optimal işlem seviyesinden uzaklaşarak yapıştırıcı-yapışan yüzey arayüzünde kademeli bir yapışma kaybına neden olmuştur. Öte yandan kama testi kırılma yüzeylerinden elde edilen hata modları değerlendirmesinde ise; kesme mukavemeti sonuçlarına benzer şekilde izopropil alkol ile temizlenmiş referans numunede çatlak ilerlemesi yapıştırıcı-yapışan arayüzeyinde adeziv bir şekilde meydana gelmiştir. Atmosferik basınçlı plazma uygulanmış CFRP örneklerinde gözlenen çatlak ilerlemesi,  $G_{IC}$  değerine katkıda bulunan bir kohezif hata modu olarak değerlendirilmiştir. Sonuç olarak; atmosferik basınçlı plazma yüzey işlemi, kalıp tarafı yüzeylerde kohezif hata modunu arttırarak arayüzey yapışmasını iyileştirirken, vakum torba taraf yüzeylerde aşırı plazma işlemi nedeniyle adeziv hata modunu arttırmıştır. Bu bulgular, yüzey işlem parametrelerinin dikkatli bir şekilde optimize edilmesi ve plazma işleminin farklı yüzeyler üzerindeki etkilerinin iyi anlaşılması gerektiğini göstermiştir. Çalışmada kullanılan atmosferik basınçlı plazma işlemi, uygun koşullarda uygulandığında, kompozit malzemelerin mekanik

ve yapışma özelliklerini önemli ölçüde iyileştirebileceği ve böylece daha dayanıklı ve güvenilir yapılar elde edilebileceği sonucunu ortaya koymuştur.

Sunulan tez çalışması kapsamında, atmosferik basınç plazma yüzey işlemi yönteminin, uçak yapılarında kullanılan kompozit malzemelerin film yapıştırıcıyla hazırlanan bağlantılarının uzun süreli performansı üzerindeki etkileri ilk kez incelenmiştir. Tez çalışmasının özgün yönlerinden biri olan ve bu kapsamda CFRP malzemeler için tarafımızdan önerilen atmosferik basınçlı plazma yüzey işleminin optimum parametrelerle uygulanabilirliği ve uzun süreli performansı belirlenmiş olup, bu işlemin uçak bileşenlerinin yapısal uygulamaları için güvenilir olduğu kanıtlanmıştır.

Literatürde kompozitlerin yüzey hazırlıklarına ait çalışmalar henüz gelişim aşamasında olmasına rağmen, kompozitlerin uzun vade davranışları üzerindeki etkileri yüzey karakterizasyonu ve mekanik testler gerçekleştirilerek tez çalışmasında geniş kapsamlı biçimde araştırılmıştır. Yapılan çalışmaların, yüzey mühendisliği ve malzeme bilimi alanlarına önemli veriler sunarak, bu alandaki bilgi boşluğunu dolduracağı öngörülmektedir. Özellikle, yapısal ömür için kritik olan yaşlandırma koşulları altında zamana bağlı çatlak ilerleme davranışlarının incelenmesi, film yapıştırıcı ile bağlanmış CFRP kompozit-kompozit bağlantılar için yapılan ilk araştırmalar olmuştur. Bu bulguların, kompozit teknolojilerinin daha iyi anlaşılması ve geliştirilmesi açısından büyük önemi vardır. Gerçekleştirilen tez çalışması ile bu yöndeki çalışmaların temeli atılarak, sektördeki uzun süreli uygulamalar için yol gösterici olacağı ve literatüre katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

Tez çalışmasında elde edilen bulgular doğrultusunda gelecekteki çalışmalarda birkaç önemli konuya odaklanılması planlanmaktadır. Atmosferik basınçlı plazma işleminin optimum proses parametreleri belirlenmiş olsa da, komponent seviyesinde bu parametrelerin tekrar optimize edilmesi için detaylı çalışmalar yapılacaktır. Özellikle plazma gücü, nozul hızı, nozul-yüzey mesafesi ve geçiş sayısının farklı kombinasyonları incelenerek, uygulanabilir her bir uçak komponenti için en uygun parametreler belirlenecektir. Çalışmada yüksek sıcaklık ve nem koşullarında yapılan yaşlandırma testleri, yüzey hazırlama tekniklerinin dayanıklılığını değerlendirmek için kullanılmıştır. Gelecek çalışmalarda, farklı çevresel koşullar (örneğin; su banyosu, tuz sisi) altında da testlerin yapılması,

bu koşulların yzey hazırlığı ve bağlantı dayanıklılığı üzerindeki etkilerinin incelenmesi üzerine çalışmalar da yzrztzlecektir. Atmosferik basınçlı plazma işleminin, sadece kompozit-kompozit değil, aynı zamanda kompozit-metal bağlantılarında da etkileri araştırılacaktır. Bu ttr hibrit bağlantıların, zellikle havacılık ve otomotiv endzstrisinde geniş bir uygulama potansiyeli bulunmaktadır. Bu alışmalar, atmosferik basınçlı plazma işleminin daha geniş bir yelpazede uygulanabilirliğini araştırmak ve bu alanda daha derinlemesine bilgi edinmek açısından gelecekte yapılacak yeni çalışmalara da yol gsterici olabilecektir.



- [1] C. V. Katsiropoulos, A. N. Chamos, K. I. Tserpes, and S. G. Pantelakis, “Fracture toughness and shear behavior of composite bonded joints based on a novel aerospace adhesive,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 43, no. 2, pp. 240–248, 2012, doi: 10.1016/j.compositesb.2011.07.010.
- [2] M. Kaufmann, D. Zenkert, and P. Wennhage, “Integrated cost/weight optimization of aircraft structures,” *Struct. Multidiscip. Optim.*, vol. 41, no. 2, pp. 325–334, 2010, doi: 10.1007/s00158-009-0413-1.
- [3] A. Yudhanto, M. Alfano, and G. Lubineau, “Surface preparation strategies in secondary bonded thermoset-based composite materials: A review,” *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 147, no. February, p. 106443, 2021, doi: 10.1016/j.compositesa.2021.106443.
- [4] S. Kumar *et al.*, “Effect of atmospheric pressure plasma treatment for repair of polymer matrix composite for aerospace applications,” *J. Compos. Mater.*, vol. 50, no. 11, pp. 1497–1507, 2016, doi: 10.1177/0021998315594230.
- [5] P. A. Kelly, R. Umer, and S. Bickerton, “Viscoelastic response of dry and wet fibrous materials during infusion processes,” *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 37, no. 6 SPEC. ISS., pp. 868–873, 2006, doi: 10.1016/j.compositesa.2005.02.008.
- [6] M. Kanerva and O. Saarela, “The peel ply surface treatment for adhesive bonding of composites: A review,” *Int. J. Adhes. Adhes.*, vol. 43, pp. 60–69, 2013, doi: 10.1016/j.ijadhadh.2013.01.014.
- [7] Y. Zhao, C. Zhang, X. Shao, Y. Wang, and Y. Qiu, “Effect of atmospheric plasma treatment on carbon fiber/epoxy interfacial adhesion,” *J. Adhes. Sci. Technol.*, vol. 25, no. 20, pp. 2897–2908, 2011, doi: 10.1163/016942411X576572.
- [8] I. Sarikaya, M. Tahiyat, R. Harik, T. Farouk, and J. Connell, “Surface functionalization of automated fiber placement manufactured composites by atmospheric pressure plasma jet,” *Int. J. Adhes. Adhes.*, vol. 99, p. 102570, 2020, doi: 10.1016/j.ijadhadh.2020.102570.
- [9] W. Leahy *et al.*, “Plasma surface treatment of aerospace materials for enhanced adhesive bonding,” *J. Adhes.*, vol. 77, no. 3, pp. 215–249, 2001, doi: 10.1080/00218460108030739.
- [10] R. J. Zaldivar, H. I. Kim, G. L. Steckel, J. P. Nokes, and B. A. Morgan, “Effect of processing parameter changes on the adhesion of plasma-treated carbon fiber reinforced epoxy composites,” *J. Compos. Mater.*, vol. 44, no. 12, pp. 1435–1453, 2010, doi: 10.1177/0021998309355846.
- [11] S. Tiwari and J. Bijwe, “Surface Treatment of Carbon Fibers - A Review,” *Procedia Technol.*, vol. 14, pp. 505–512, 2014, doi: 10.1016/j.protcy.2014.08.064.
- [12] C. Sun, J. Min, J. Lin, and H. Wan, “Effect of atmospheric pressure plasma treatment on adhesive bonding of carbon fiber reinforced polymer,”

*Polymers (Basel)*., vol. 11, no. 1, 2019, doi: 10.3390/polym11010139.

- [13] G. Yang, T. Yang, W. Yuan, and Y. Du, “The influence of surface treatment on the tensile properties of carbon fiber-reinforced epoxy composites-bonded joints,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 160, no. December 2018, pp. 446–456, 2019, doi: 10.1016/j.compositesb.2018.12.095.
- [14] S. M. Park, R. Roy, J. H. Kweon, and Y. Nam, “Strength and failure modes of surface treated CFRP secondary bonded single-lap joints in static and fatigue tensile loading regimes,” *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 134, no. April, p. 105897, 2020, doi: 10.1016/j.compositesa.2020.105897.
- [15] F. J. Boerio, B. Roby, R. G. Dillingham, R. H. Bossi, and R. L. Crane, “Effect of grit-blasting on the surface energy of graphite/epoxy composites,” *J. Adhes.*, vol. 82, no. 1, pp. 19–37, 2006, doi: 10.1080/00218460500418516.
- [16] S. Liu, X. Cheng, Q. Zhang, J. Zhang, J. Bao, and X. Guo, “An investigation of hygrothermal effects on adhesive materials and double lap shear joints of CFRP composite laminates,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 91, pp. 431–440, 2016, doi: 10.1016/j.compositesb.2016.01.051.
- [17] L. Sorrentino, W. Polini, C. Bellini, and G. Parodo, “Surface treatment of CFRP: influence on single lap joint performances,” *Int. J. Adhes. Adhes.*, vol. 85, no. May, pp. 225–233, 2018, doi: 10.1016/j.ijadhadh.2018.06.008.
- [18] I. Jölly, S. Schlögl, M. Wolfahrt, G. Pinter, M. Fleischmann, and W. Kern, “Chemical functionalization of composite surfaces for improved structural bonded repairs,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 69, pp. 296–303, 2015, doi: 10.1016/j.compositesb.2014.10.020.
- [19] V. H. Martínez-Landeros, S. Y. Vargas-Islas, C. E. Cruz-González, S. Barrera, K. Mourtafov, and R. Ramírez-Bon, “Studies on the influence of surface treatment type, in the effectiveness of structural adhesive bonding, for carbon fiber reinforced composites,” *J. Manuf. Process.*, vol. 39, no. August 2018, pp. 160–166, 2019, doi: 10.1016/j.jmapro.2019.02.014.
- [20] F. L. Palmieri *et al.*, “Optimized surface treatment of aerospace composites using a picosecond laser,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 175, p. 107155, 2019, doi: 10.1016/j.compositesb.2019.107155.
- [21] R. Tao, M. Alfano, and G. Lubineau, “Laser-based surface patterning of composite plates for improved secondary adhesive bonding,” *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 109, pp. 84–94, 2018, doi: 10.1016/j.compositesa.2018.02.041.
- [22] S. Harder, H. Schmutzler, P. Hergoss, J. Freese, J. Holtmannspötter, and B. Fiedler, “Effect of infrared laser surface treatment on the morphology and adhesive properties of scarfed CFRP surfaces,” *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 121, pp. 299–307, 2019, doi: 10.1016/j.compositesa.2019.02.025.
- [23] J. ALYousef, A. Yudhanto, R. Tao, and G. Lubineau, “Laser ablation of CFRP surfaces for improving the strength of bonded scarf composite joints,” *Compos. Struct.*, vol. 296, p. 115881, 2022, doi: 10.1016/j.compstruct.2022.115881.
- [24] F. L. Palmieri, M. A. Belcher, C. J. Wohl, K. Y. Blohowiak, and J. W.

- Connell, "Laser ablation surface preparation for adhesive bonding of carbon fiber reinforced epoxy composites," *Int. J. Adhes. Adhes.*, vol. 68, pp. 95–101, 2016, doi: 10.1016/j.ijadhadh.2016.02.007.
- [25] T. Takeda, T. Yasuoka, H. Hoshi, S. Sugimoto, and Y. Iwahori, "Effectiveness of flame-based surface treatment for adhesive bonding of carbon fiber reinforced epoxy matrix composites," *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 119, pp. 30–37, 2019, doi: 10.1016/j.compositesa.2019.01.013.
- [26] A. Alkoc, A. B. Hazar Yoruc, M. Bakir, and A. C. Usak, "Experimental evaluation of atmospheric plasma treatment effects on different textures of CFRP composite for aircraft applications," *Adv. Compos. Mater.*, pp. 1–22, 2024, doi: 10.1080/09243046.2024.2345837.
- [27] R. Avcı, U. G. Çakıcı, B. Çetinkaya, and M. F. Öktem, "Effect of atmospheric plasma treatment and wet blast on adhesion characteristics of carbon fiber reinforced LM-PAEK thermoplastic composites," *Compos. Part B Eng.*, vol. 278, p. 111394, 2024, doi: 10.1016/j.compositesb.2024.111394.
- [28] C. Yildirim, H. Ulus, B. Beylergil, A. Al-Nadhari, S. Topal, and M. Yildiz, "Tailoring adherend surfaces for enhanced bonding in CF/PEKK composites: Comparative analysis of atmospheric plasma activation and conventional treatments," *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 180, no. January, p. 108101, 2024, doi: 10.1016/j.compositesa.2024.108101.
- [29] N. Aliheidari and A. Ameli, "Retaining high fracture toughness in aged polymer Composite/Adhesive joints through optimization of plasma surface treatment," *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 176, 2024, doi: 10.1016/j.compositesa.2023.107835.
- [30] M. H. Lapena and C. M. A. Lopes, "Improvement of aerospace thermoplastic composite adhesion to coating with dielectric barrier discharge atmospheric pressure plasma surface treatment," *Plasma Process. Polym.*, vol. 20, no. 1, 2023, doi: 10.1002/ppap.202200081.
- [31] C. Mandolino, L. Cassettari, M. Pizzorni, S. Saccaro, and E. Lertora, "A design-of-experiments approach to estimate the effect of plasma-treatment parameters on the mechanical resistance of adhesive-bonded joints," *J. Manuf. Process.*, vol. 67, no. April, pp. 177–194, 2021, doi: 10.1016/j.jmapro.2021.04.054.
- [32] M. Atlioglu and C. Kaynak, "Influences of laser and plasma surface treatments on the primer paint adhesion for PPS/CF thermoplastic composite laminates," *J. Thermoplast. Compos. Mater.*, vol. 37, no. 3, pp. 953–982, 2024, doi: 10.1177/08927057231190068.
- [33] C. Dighton, A. Rezai, S. L. Ogini, and J. F. Watts, "Atmospheric plasma treatment of CFRP composites to enhance structural bonding investigated using surface analytical techniques," *Int. J. Adhes. Adhes.*, vol. 91, no. March, pp. 142–149, 2019, doi: 10.1016/j.ijadhadh.2019.03.010.
- [34] J. Lin, C. Sun, J. Min, H. Wan, and S. Wang, "Effect of atmospheric pressure plasma treatment on surface physicochemical properties of carbon fiber reinforced polymer and its interfacial bonding strength with adhesive," *Compos. Part B Eng.*, vol. 199, no. July, p. 108237, 2020, doi:

10.1016/j.compositesb.2020.108237.

- [35] A. C. Uşak and C. Kaynak, “Improving film adhesive joining performance of poly(phenylene sulfide)/carbon fiber thermoplastic composite laminates by plasma surface treatment,” *J. Thermoplast. Compos. Mater.*, vol. 37, no. 5, pp. 1690–1729, 2024, doi: 10.1177/08927057231200009.
- [36] P. Alam *et al.*, “L-Lysine templated CaCO<sub>3</sub> precipitated to flax develops flowery crystal structures that improve the mechanical properties of natural fibre reinforced composites,” *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 75, pp. 84–88, 2015, doi: 10.1016/j.compositesa.2015.04.016.
- [37] N. Encinas *et al.*, “Surface modification of aircraft used composites for adhesive bonding,” *Int. J. Adhes. Adhes.*, vol. 50, pp. 157–163, 2014, doi: 10.1016/j.ijadhadh.2014.01.004.
- [38] R. J. Zaldivar, J. Nokes, G. L. Steckel, H. I. Kim, and B. A. Morgan, “The effect of atmospheric plasma treatment on the chemistry, morphology and resultant bonding behavior of a pan-based carbon fiber-reinforced epoxy composite,” *J. Compos. Mater.*, vol. 44, no. 2, pp. 137–156, 2010, doi: 10.1177/0021998309345343.
- [39] T. S. Williams, H. Yu, P. C. Yeh, J. M. Yang, and R. F. Hicks, “Atmospheric pressure plasma effects on the adhesive bonding properties of stainless steel and epoxy composites,” *J. Compos. Mater.*, vol. 48, no. 2, pp. 219–233, 2014, doi: 10.1177/0021998312470150.
- [40] J. Kim, R. Mauchauffé, D. Kim, J. Kim, and S. Y. Moon, “Mechanism study of atmospheric-pressure plasma treatment of carbon fiber reinforced polymers for adhesion improvement,” *Surf. Coatings Technol.*, vol. 393, p. 125841, 2020, doi: 10.1016/j.surfcoat.2020.125841.
- [41] A. L. Santos, E. C. Botelho, K. G. Kostov, P. A. P. Nascente, and L. L. G. Da Silva, “Atmospheric plasma treatment of carbon fibers for enhancement of their adhesion properties,” *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol. 41, no. 2, pp. 319–324, 2013, doi: 10.1109/TPS.2012.2234484.
- [42] J. Li, Y. Yan, T. Zhang, and Z. Liang, “Experimental study of adhesively bonded CFRP joints subjected to tensile loads,” *Int. J. Adhes. Adhes.*, vol. 57, pp. 95–104, 2015, doi: 10.1016/j.ijadhadh.2014.11.001.
- [43] M. Pizzorni, E. Lertora, and C. Mandolino, “Low pressure plasma treatment of CFRP substrates for adhesive bonding: an investigation of joint durability under severe temperature-moisture conditioning,” *Int. J. Adhes. Adhes.*, vol. 99, no. March, p. 102592, 2020, doi: 10.1016/j.ijadhadh.2020.102592.
- [44] T. Oldham, K. Simon, D. R. Ferriell, M. A. Belcher, A. Rubin, and E. Thimsen, “Highly Uniform Activation of Carbon Fiber Reinforced Thermoplastics by Low-Temperature Plasma,” *ACS Appl. Polym. Mater.*, vol. 1, no. 10, pp. 2638–2648, 2019, doi: 10.1021/acsapm.9b00532.
- [45] S. Kaner, “Plastik Malzemelerin Yapıştırılmasında Yüzey İşlemleri ve Yaşlandırma Etkisinin İncelenmesi,” Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2017.
- [46] M. E. İriş, “Karbon Epoksi Kompozit Malzemelerden Yapılan Uçak Yapılarında Yapışma Bağlantıları,” Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri

Enstitüsü, 2020.

- [47] M. G. Song *et al.*, “Effect of manufacturing methods on the shear strength of composite single-lap bonded joints,” *Compos. Struct.*, vol. 92, no. 9, pp. 2194–2202, 2010, doi: 10.1016/j.compstruct.2009.08.041.
- [48] A. D. Gilpin, B. R. Oakley, and R. G. Dillingham, “Water contact angle as a quantitative measure of total polyethylene surface energy,” *J. Adhes. Sci. Technol.*, vol. 29, no. 9, pp. 890–895, 2015, doi: 10.1080/01694243.2015.1006906.
- [49] G. Yang and W. Yuan, “The influence of ultrasonic vibration-assisted processing on mode-I fracture toughness of CFRP-bonded joints,” *Int. J. Adhes. Adhes.*, vol. 104, no. October 2020, p. 102742, 2021, doi: 10.1016/j.ijadhadh.2020.102742.
- [50] H. SARAÇ, “Metal ve Kompozit Parçaların Yapıştırılmasında Yapışma Performansını Etkileyen Parametrelerin Deneysel Olarak İncelenmesi,” Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2012.
- [51] A. Ozel, B. Yazici, S. Akpınar, M. D. Aydın, and Ş. Temiz, “A study on the strength of adhesively bonded joints with different adherends,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 62, pp. 167–174, 2014, doi: 10.1016/j.compositesb.2014.03.001.
- [52] C. Li, S. Viswanathan-Chettiar, F. Sun, Z. Shi, and B. Blackman, “Effect of CFRP surface topography on the adhesion and strength of composite-composite and composite-metal joints,” *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 164, no. July 2022, p. 107275, 2023, doi: 10.1016/j.compositesa.2022.107275.
- [53] M. R. Gude, S. G. Prolongo, and A. Ureña, “Adhesive bonding of carbon fibre/epoxy laminates: Correlation between surface and mechanical properties,” *Surf. Coatings Technol.*, vol. 207, pp. 602–607, 2012, doi: 10.1016/j.surfcoat.2012.07.085.
- [54] S. Ebnesajjad, *Introduction to Surface Preparation*, Second. Waltham, USA: Elsevier Ltd, 2014. doi: 10.1016/b978-0-323-26435-8.00001-0.
- [55] N. A. Peppas, “Adhesion and adhesives: Science and technology,” *J. Control. Release*, vol. 7, no. 3, pp. 288–289, 1988, doi: 10.1016/0168-3659(88)90066-1.
- [56] D. A. Dillard, “Advances in structural adhesive bonding,” *Adv. Struct. Adhes. Bond.*, vol. 3, pp. 1–637, 2010, doi: 10.1533/9781845698058.
- [57] G. Fourche, “An overview of the basic aspects of polymer adhesion. Part I: Fundamentals,” *Polym. Eng. Sci.*, vol. 35, no. 12, pp. 957–967, 1995, doi: 10.1002/pen.760351202.
- [58] F. Awaja, M. Gilbert, G. Kelly, B. Fox, and P. J. Pigram, “Adhesion of polymers,” *Prog. Polym. Sci.*, vol. 34, no. 9, pp. 948–968, 2009, doi: 10.1016/j.progpolymsci.2009.04.007.
- [59] A. Baldan, “Adhesion phenomena in bonded joints,” *Int. J. Adhes. Adhes.*, vol. 38, pp. 95–116, 2012, doi: 10.1016/j.ijadhadh.2012.04.007.
- [60] Adams RD, “Adhesive bonding: Science, technology and applications.”

Woodhead Publ. Ltd., 2005.

- [61] E. Tsiangou, S. Teixeira de Freitas, I. Fernandez Villegas, and R. Benedictus, “Investigation on energy director-less ultrasonic welding of polyetherimide (PEI)- to epoxy-based composites,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 173, p. 107014, 2019, doi: 10.1016/j.compositesb.2019.107014.
- [62] S. Ebnesajjad and A. H. Landrock, “Adhesive Applications and Bonding Processes,” *Adhes. Technol. Handb.*, vol. 424, pp. 206–234, 2015, doi: 10.1016/b978-0-323-35595-7.00008-5.
- [63] Z. Xu *et al.*, “Wettability of carbon fibers modified by acrylic acid and interface properties of carbon fiber/epoxy,” *Eur. Polym. J.*, vol. 44, no. 2, pp. 494–503, 2008, doi: 10.1016/j.eurpolymj.2007.11.021.
- [64] K. Osouli-Bostanabad, A. Tutunchi, and M. Eskandarzade, “The influence of pre-bond surface treatment over the reliability of steel epoxy/glass composites bonded joints,” *Int. J. Adhes. Adhes.*, vol. 75, pp. 145–154, 2017, doi: 10.1016/j.ijadhadh.2017.03.006.
- [65] Bishopp JA, *Surface pretreatment for structural bonding, Handbook of adhesives and sealants, Vol. 1: adhesives and sealants: basic concepts and high tech bonding*. Elsevier, 2005.
- [66] E. Petrie, *Plastics and adhesives as adhesives. Handbook of Plastics and Elastomers*. New York: McGraw-Hill, 2002.
- [67] I. A. Ashcroft, “Handbook of Adhesion Technology,” *Handb. Adhes. Technol.*, 2011, doi: 10.1007/978-3-642-01169-6.
- [68] S. Wu, “Surface and interfacial tensions of polymer melts. II. Poly(methyl methacrylate), poly(n-butyl methacrylate), and polystyrene,” *J. Phys. Chem.*, vol. 74, no. 3, pp. 632–638, 1970, doi: 10.1021/j100698a026.
- [69] D. Feldman, *Fundamentals of adhesion, by L. H. Lee, Ed., Plenum, New York and London, 1991, 454 pp. Price: \$89.50*, vol. 29, no. 12. New York and London: Plenum, 1991. doi: 10.1002/pola.1991.080291219.
- [70] M. Alfano, G. Lubineau, F. Furgiuele, and G. H. Paulino, “Study on the role of laser surface irradiation on damage and decohesion of Al/epoxy joints,” *Int. J. Adhes. Adhes.*, vol. 39, pp. 33–41, 2012, doi: 10.1016/j.ijadhadh.2012.03.002.
- [71] T. Young, “III. An essay on the cohesion of fluids,” *Philos. Trans. R. Soc. London*, vol. 95, pp. 65–87, 1805, doi: 10.1098/rstl.1805.0005.
- [72] J. Liu, Y. Xue, X. Dong, Y. Fan, H. Hao, and X. Wang, “Review of the surface treatment process for the adhesive matrix of composite materials,” *Int. J. Adhes. Adhes.*, vol. 126, p. 103446, 2023, doi: 10.1016/j.ijadhadh.2023.103446.
- [73] Landrock AH., “Processing handbook on surface preparation for adhesive bonding,” Arsenal, 1975.
- [74] S. Budhe, M. D. Banea, S. de Barros, and L. F. M. da Silva, “An updated review of adhesively bonded joints in composite materials,” *Int. J. Adhes. Adhes.*, vol. 72, pp. 30–42, 2017, doi: 10.1016/j.ijadhadh.2016.10.010.
- [75] A. Rudawska, “Selected aspects of the effect of mechanical treatment on

- surface roughness and adhesive joint strength of steel sheets,” *Int. J. Adhes. Adhes.*, vol. 50, pp. 235–243, 2014, doi: 10.1016/j.ijadhadh.2014.01.032.
- [76] K. D. Fernholz, “Bonding of polymer matrix composites,” in *Advances in Structural Adhesive Bonding*, D. A. Dillard, Ed. Woodhead Publishing, 2010, pp. 265–291. doi: 10.1533/9781845698058.2.265.
- [77] J. R. J. Wingfield, “Treatment of composite surfaces for adhesive bonding,” *Int. J. Adhes. Adhes.*, vol. 13, no. 3, pp. 151–156, 1993, doi: 10.1016/0143-7496(93)90036-9.
- [78] P. Molitor, V. Barron, and T. Young, “Surface treatment of titanium for adhesive bonding to polymer composites: A review,” *Int. J. Adhes. Adhes.*, vol. 21, no. 2, pp. 129–136, 2001, doi: 10.1016/S0143-7496(00)00044-0.
- [79] M. D. Carnes and P. V. Mtenga, “The effect of materials and surface preparation on joining methods: A review,” *J. Reinf. Plast. Compos.*, vol. 34, no. 14, pp. 1167–1178, 2015, doi: 10.1177/0731684415587543.
- [80] S. Deng, L. Djukic, R. Paton, and L. Ye, “Thermoplastic-epoxy interactions and their potential applications in joining composite structures - A review,” *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 68, pp. 121–132, 2015, doi: 10.1016/j.compositesa.2014.09.027.
- [81] K. B. Katnam, L. F. M. Da Silva, and T. M. Young, “Bonded repair of composite aircraft structures: A review of scientific challenges and opportunities,” *Prog. Aerosp. Sci.*, vol. 61, pp. 26–42, 2013, doi: 10.1016/j.paerosci.2013.03.003.
- [82] J. P. Sargent, “Durability studies for aerospace applications using peel and wedge tests,” *Int. J. Adhes. Adhes.*, vol. 25, no. 3, pp. 247–256, 2005, doi: 10.1016/j.ijadhadh.2004.07.005.
- [83] S. Budhe, M. D. Banea, and S. de Barros, “Bonded repair of composite structures in aerospace application: a review on environmental issues,” *Appl. Adhes. Sci.*, vol. 6, no. 1, 2018, doi: 10.1186/s40563-018-0104-5.
- [84] P. Beardmore and C. F. Johnson, “The potential for composites in structural automotive applications,” *Compos. Sci. Technol.*, vol. 26, no. 4, pp. 251–281, 1986, doi: 10.1016/0266-3538(86)90002-3.
- [85] M. Schweizer, D. Meinhard, S. Ruck, H. Riegel, and V. Knoblauch, “Adhesive bonding of CFRP: a comparison of different surface pre-treatment strategies and their effect on the bonding shear strength,” *J. Adhes. Sci. Technol.*, vol. 31, no. 23, pp. 2581–2591, 2017, doi: 10.1080/01694243.2017.1310695.
- [86] C. Marieta, E. Schulz, L. Irusta, N. Gabilondo, A. Tercjak, and I. Mondragon, “Evaluation of fiber surface treatment and toughening of thermoset matrix on the interfacial behaviour of carbon fiber-reinforced cyanate matrix composites,” *Compos. Sci. Technol.*, vol. 65, no. 14, pp. 2189–2197, 2005, doi: 10.1016/j.compscitech.2005.05.008.
- [87] M. Kanerva, E. Sarlin, M. Hoikkanen, K. Rämö, O. Saarela, and J. Vuorinen, “Interface modification of glass fibre-polyester composite-composite joints using peel plies,” *Int. J. Adhes. Adhes.*, vol. 59, pp. 40–52, 2015, doi: 10.1016/j.ijadhadh.2015.01.016.

- [88] J. Holtmannspötter, J. V. Czarnecki, M. Wetzler, D. Dolderer, and C. Eischenschink, “The use of peel ply as a method to create reproduceable but contaminated surfaces for structural adhesive bonding of carbon fiber reinforced plastics,” *J. Adhes.*, vol. 89, no. 2, pp. 96–110, 2013, doi: 10.1080/00218464.2012.731828.
- [89] M. K. Moench, “The Effect of Nylon and Polyester Peel Ply Surface Preparation on the Bond Quality of Composite Laminates,” University of Washington, 2013.
- [90] N. N. A. Silveira, R. C. M. Sales, C. B. G. Brito, G. M. Cândido, and M. V. Donadon, “Comparative fractographic analysis of composites adhesive joints subjected to mode I delamination,” *Polym. Compos.*, vol. 40, no. 8, pp. 2973–2983, 2019, doi: 10.1002/pc.25139.
- [91] A. Baldan, “Adhesively-bonded joints and repairs in metallic alloys, polymers and composite materials: Adhesives, adhesion theories and surface pretreatment,” *J. Mater. Sci.*, vol. 39, no. 1, pp. 1–49, 2004, doi: 10.1023/B:JMSC.0000007726.58758.e4.
- [92] K. Ono and A. Erhard, “Nondestructive Testing, 3. Ultrasonics,” in *Ullmann’s Encyclopedia of Industrial Chemistry*, 2011. doi: 10.1002/14356007.o17\_o02.
- [93] R. W. Messler, *Joining of Materials and Structures: From Pragmatic Process to Enabling Technology*, 1st Editio. Elsevier, 2004. doi: 10.1016/B978-0-7506-7757-8.X5000-3.
- [94] R. F. Wegman and J. Van Twisk, *Surface Preparation Techniques for Adhesive Bonding: Second Edition*, 2nd Editio. Elsevier, 2012. doi: 10.1016/C2012-0-02158-8.
- [95] J. D. (University of C. S. B. Bardis, “Effects of Surface Preparation on the Long-Term Durability of Adhesively Bonded Composite Joints,” 2002.
- [96] B. Whittingham, A. A. Baker, A. Harman, and D. Bitton, “Micrographic studies on adhesively bonded scarf repairs to thick composite aircraft structure,” *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 40, no. 9, pp. 1419–1432, 2009, doi: 10.1016/j.compositesa.2008.12.011.
- [97] M. Davis and D. Bond, “Principles and practices of adhesive bonded structural joints and repairs,” *Int. J. Adhes. Adhes.*, vol. 19, no. 2, pp. 91–105, 1999, doi: 10.1016/S0143-7496(98)00026-8.
- [98] G. Savage, “Failure prevention in bonded joints on primary load bearing structures,” *Eng. Fail. Anal.*, vol. 14, no. 2, pp. 321–348, 2007, doi: 10.1016/j.engfailanal.2005.11.013.
- [99] J. Sang *et al.*, “Adhesion of carbon steel and natural rubber by functionalized silane coupling agents,” *Int. J. Adhes. Adhes.*, vol. 72, pp. 70–74, 2017, doi: 10.1016/j.ijadhadh.2016.10.008.
- [100] I. Choi and D. G. Lee, “Surface modification of carbon fiber/epoxy composites with randomly oriented aramid fiber felt for adhesion strength enhancement,” *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 48, no. 1, pp. 1–8, 2013, doi: 10.1016/j.compositesa.2013.01.003.
- [101] D. E. Packham, “Surface energy, surface topography and adhesion,” *Int. J.*

- Adhes. Adhes.*, vol. 23, no. 6, pp. 437–448, 2003, doi: 10.1016/S0143-7496(03)00068-X.
- [102] A. Hartwig, G. Vittr, S. Dieckhoff, and O. D. Hennemann, “Surface treatment of an epoxy resin by CO<sub>2</sub> laser irradiation,” *Angew. Makromol. Chemie*, vol. 238, pp. 177–189, 1996, doi: 10.1002/apmc.1996.052380115.
- [103] K. Ramaswamy, R. M. O’Higgins, A. K. Kadiyala, M. A. McCarthy, and C. T. McCarthy, “Evaluation of grit-blasting as a pre-treatment for carbon-fibre thermoplastic composite to aluminium bonded joints tested at static and dynamic loading rates,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 185, p. 107765, 2020, doi: 10.1016/j.compositesb.2020.107765.
- [104] B. Qi, “Sanding, Grit Blasting and Plasma Etching: Effect on Surface Composition and Surface Energy of Graphite/Epoxy Composites,” University of Cincinnati, 2009.
- [105] R. Chitsaz Dehaghani, M. M. Shokrieh, and F. Taheri-Behrooz, “An investigation on effects of acid etching duration on adhesive bonding of polyethylene to E-glass/epoxy composites,” *Int. J. Adhes. Adhes.*, vol. 85, pp. 177–183, 2018, doi: 10.1016/j.ijadhadh.2018.06.012.
- [106] F. Fischer, S. Kreling, and K. Dilger, “Surface Structuring of CFRP by using Modern Excimer Laser Sources,” *Phys. Procedia*, vol. 39, pp. 154–160, 2012, doi: 10.1016/j.phpro.2012.10.025.
- [107] T. Ohkubo, M. Tsukamoto, and Y. Sato, “Numerical simulation of combustion effects during laser processing of carbon fiber reinforced plastics,” *Appl. Phys. A Mater. Sci. Process.*, vol. 122, no. 3, pp. 1–5, 2016, doi: 10.1007/s00339-016-9735-1.
- [108] B. Rauh *et al.*, “UV-laser cleaning and surface characterization of an aerospace carbon fibre reinforced polymer,” *Int. J. Adhes. Adhes.*, vol. 82, pp. 50–59, 2018, doi: 10.1016/j.ijadhadh.2017.12.016.
- [109] V. Oliveira, S. P. Sharma, M. F. S. F. de Moura, R. D. F. Moreira, and R. Vilar, “Surface treatment of CFRP composites using femtosecond laser radiation,” *Opt. Lasers Eng.*, vol. 94, pp. 37–43, 2017, doi: 10.1016/j.optlaseng.2017.02.011.
- [110] J. Min, H. Wan, B. E. Carlson, J. Lin, and C. Sun, “Application of laser ablation in adhesive bonding of metallic materials: A review,” *Opt. Laser Technol.*, vol. 128, p. 106188, 2020, doi: 10.1016/j.optlastec.2020.106188.
- [111] C. Mandolino, E. Lertora, and C. Gambaro, “Cold Plasma Pretreatment of Carbon Fibre Composite Substrates to Improve Adhesive Bonding Performance,” *Adv. Aerosp. Eng.*, vol. 2014, pp. 1–7, 2014, doi: 10.1155/2014/325729.
- [112] C. Mandolino, E. Lertora, and C. Gambaro, “Influence of cold plasma treatment parameters on the mechanical properties of polyamide homogeneous bonded joints,” *Surf. Coatings Technol.*, vol. 313, pp. 222–229, 2017, doi: 10.1016/j.surfcoat.2017.01.071.
- [113] D. M. Brewis, *Handbook of adhesive technology*, 2nd editio., vol. 15, no. 4. Marcell Dekker, 1995. doi: 10.1016/0143-7496(95)90006-3.
- [114] N. Encinas, M. Lavat-Gil, R. G. Dillingham, J. Abenojar, and M. A.

- Martínez, “Cold plasma effect on short glass fibre reinforced composites adhesion properties,” *Int. J. Adhes. Adhes.*, vol. 48, pp. 85–91, 2014, doi: 10.1016/j.ijadhadh.2013.09.026.
- [115] A. Gross, “Quality in Adhesive Bonding Technology : merely a cost factor or an investment after all ?,” 2021.
- [116] M. R. Sanchis, V. Blanes, M. Blanes, D. Garcia, and R. Balart, “Surface modification of low density polyethylene (LDPE) film by low pressure O<sub>2</sub> plasma treatment,” *Eur. Polym. J.*, vol. 42, no. 7, pp. 1558–1568, 2006, doi: 10.1016/j.eurpolymj.2006.02.001.
- [117] S. Thakur and S. Neogi, “Tailoring the adhesion of polymers using plasma for biomedical applications: A critical review,” *Rev. Adhes. Adhes.*, vol. 3, no. 1, pp. 53–97, 2015, doi: 10.7569/RAA.2015.097303.
- [118] L. Bárdos and H. Baránková, “Cold atmospheric plasma: Sources, processes, and applications,” *Thin Solid Films*, vol. 518, no. 23, pp. 6705–6713, 2010, doi: 10.1016/j.tsf.2010.07.044.
- [119] R. J. Zaldivar, G. L. Steckel, B. A. Morgan, J. P. Nokes, and H. I. Kim, “Bonding optimization on composite surfaces using atmospheric plasma treatment,” *J. Adhes. Sci. Technol.*, vol. 26, no. 1–3, pp. 381–401, 2012, doi: 10.1163/016942411X576554.
- [120] B. Rodriguez, “Plasma Pre-Treatment for Adhesive Bonding of Aerospace Composite Components,” no. August, pp. 1–133, 2016, [Online]. Available: <http://bura.brunel.ac.uk/handle/2438/14669>
- [121] S. Kreling, F. Fischer, R. Delmdahl, F. Gäbler, and K. Dilger, “Analytical characterization of CFRP laser treated by excimer laser radiation,” *Phys. Procedia*, vol. 41, pp. 282–290, 2013, doi: 10.1016/j.phpro.2013.03.080.
- [122] V. S. A. H. Gilbert Vitr, “Treatment of an epoxy-resin by eximer laser radiation,” *Int. J. Adhes. Adhes.*, vol. 17, no. 4, pp. 373–377, 1997, doi: 10.1016/S0143-7496(97)00057-2.
- [123] I. S. Floros, K. I. Tserpes, and T. Löbel, “Mode-I, mode-II and mixed-mode I+II fracture behavior of composite bonded joints: Experimental characterization and numerical simulation,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 78, pp. 459–468, 2015, doi: 10.1016/j.compositesb.2015.04.006.
- [124] I. M. Stewart, “Microstructural Studies Using the Electron Microprobe Analyzer,” in *Microstructural Analysis*, New York, 1973, pp. 281–285. doi: 10.1007/978-1-4615-8693-7\_11.
- [125] R. Nazari, H. Khoramishad, and R. Hakimi, “The effect of abrading treatment method on the bonding surface characteristics and fracture behavior of glass fiber-epoxy composite adhesive joints,” *J. Adhes. Sci. Technol.*, pp. 1–20, 2024, doi: 10.1080/01694243.2024.2302259.
- [126] J. Comyn, L. Mascia, G. Xiao, and B. M. Parker, “Corona-discharge treatment of polyetheretherketone (PEEK) for adhesive bonding,” *Int. J. Adhes. Adhes.*, vol. 16, no. 4, pp. 301–304, 1996, doi: 10.1016/S0143-7496(96)00010-3.
- [127] E. Hernandez, M. Alfano, G. Lubineau, and U. Buttner, “Improving adhesion of copper/epoxy joints by pulsed laser ablation,” *Int. J. Adhes. Adhes.*, vol.

- 64, pp. 23–32, 2016, doi: 10.1016/j.ijadhadh.2015.10.003.
- [128] R. Tao, M. Alfano, and G. Lubineau, “In situ analysis of interfacial damage in adhesively bonded composite joints subjected to various surface pretreatments,” *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 116, pp. 216–223, 2019, doi: 10.1016/j.compositesa.2018.10.033.
- [129] R. C. Dehaghani, D. Cronin, and J. Montesano, “Performance and failure assessment of adhesively bonded non-crimp fabric carbon fiber/epoxy composite single lap joints,” *Int. J. Adhes. Adhes.*, vol. 105, p. 102776, 2021, doi: 10.1016/j.ijadhadh.2020.102776.
- [130] H. Rahmani, A. Ashori, and N. Varnaseri, “Surface modification of carbon fiber for improving the interfacial adhesion between carbon fiber and polymer matrix,” *Polym. Adv. Technol.*, vol. 27, no. 6, pp. 805–811, 2016, doi: 10.1002/pat.3720.
- [131] D. Hegemann, H. Brunner, and C. Oehr, “Plasma treatment of polymers for surface and adhesion improvement,” *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. B Beam Interact. with Mater. Atoms*, vol. 208, no. 1–4, pp. 281–286, 2003, doi: 10.1016/S0168-583X(03)00644-X.
- [132] T. R. Katona and S. C. Batterman, “Surface roughness effects on the stress analysis of adhesive joints,” *Int. J. Adhes. Adhes.*, vol. 3, no. 2, pp. 85–91, 1983, doi: 10.1016/0143-7496(83)90022-2.
- [133] K. J. Kubiak, M. C. T. Wilson, T. G. Mathia, and P. Carval, “Wettability versus roughness of engineering surfaces,” *Wear*, vol. 271, no. 3–4, pp. 523–528, 2011, doi: 10.1016/j.wear.2010.03.029.
- [134] W. Zielecki, P. Pawlus, R. PerŁowski, and A. Dzierwa, “Surface topography effect on strength of lap adhesive joints after mechanical pre-treatment,” *Arch. Civ. Mech. Eng.*, vol. 13, no. 2, pp. 175–185, 2013, doi: 10.1016/j.acme.2013.02.005.
- [135] H. J. Butt, B. Cappella, and M. Kappl, “Force measurements with the atomic force microscope: Technique, interpretation and applications,” *Surf. Sci. Rep.*, vol. 59, no. 1–6, pp. 1–152, 2005, doi: 10.1016/j.surfrep.2005.08.003.
- [136] A. Vesel, I. Junkar, U. Cvelbar, J. Kovac, and M. Mozetic, “Surface modification of polyester by oxygen- And nitrogen-plasma treatment,” *Surf. Interface Anal.*, vol. 40, no. 11, pp. 1444–1453, 2008, doi: 10.1002/sia.2923.
- [137] A. Yudhanto *et al.*, “Enhancement of fracture toughness in secondary bonded CFRP using hybrid thermoplastic/thermoset bondline architecture,” *Compos. Sci. Technol.*, vol. 199, p. 108346, 2020, doi: 10.1016/j.compscitech.2020.108346.
- [138] J. Shi, L. Bao, R. Kobayashi, J. Kato, and K. Kemmochi, “Reusing recycled fibers in high-value fiber-reinforced polymer composites: Improving bending strength by surface cleaning,” *Compos. Sci. Technol.*, vol. 72, no. 11, pp. 1298–1303, 2012, doi: 10.1016/j.compscitech.2012.05.003.
- [139] J. Mohan, A. Ivanković, and N. Murphy, “Mixed-mode fracture toughness of co-cured and secondary bonded composite joints,” *Eng. Fract. Mech.*, vol. 134, pp. 148–167, 2015, doi: 10.1016/j.engfracmech.2014.12.005.
- [140] M. Pérez-Galmés, J. Renart, C. Sarrado, A. J. Brunner, and A. Rodríguez-

- Bellido, “Towards a consensus on mode II adhesive fracture testing: Experimental study,” *Theor. Appl. Fract. Mech.*, vol. 98, pp. 210–219, 2018, doi: 10.1016/j.tafmec.2018.09.014.
- [141] S. Ebnesajjad and A. H. Landrock, “Testing of Adhesive Bonds,” *Adhes. Technol. Handb.*, pp. 339–352, 2015, doi: 10.1016/b978-0-323-35595-7.00012-7.
- [142] J. Michael, *Handbook of Plastics Joining*, 2nd Editio. Elsevier Inc., 2009.
- [143] W. Brockmann, P. L. Geiß, J. Klingen, and B. Schröder, *Adhesive Bonding: Materials, Applications and Technology*, First. Wiley-VCH Verlag GmbH, 2009. doi: 10.1002/9783527623921.
- [144] K. Schneider, B. Lauke, and W. Beckert, “Compression shear test (CST) - A convenient apparatus for the estimation of apparent shear strength of composite materials,” *Appl. Compos. Mater.*, vol. 8, no. 1, pp. 43–62, 2001, doi: 10.1023/A:1008919114960.
- [145] S. Ebnesajjad and A. H. Landrock, *Adhesives Technology Handbook*, Third Edit. Elsevier Inc., 2014. doi: 10.1016/B978-0-323-35595-7.00023-1.
- [146] M. D. Banea, L. F. M. da Silva, R. J. C. Carbas, and S. de Barros, “Debonding on command of multi-material adhesive joints,” *J. Adhes.*, vol. 93, no. 10, pp. 756–770, 2017, doi: 10.1080/00218464.2016.1199963.
- [147] S. Ebnesajjad and A. H. Landrock, “Joint Design,” *Adhes. Technol. Handb.*, pp. 183–205, 2015, doi: 10.1016/b978-0-323-35595-7.00007-3.
- [148] Saurabh S. Sirsikar, Sangram V. Jadhav, and Amol Sapkal, “Review of Static and Dynamic Testing of Adhesive Joints for Structural Analysis,” *Natl. Conf. Appl. Sci. Humanit. (NCASH 2016)*, vol. 1, no. November, pp. 24–26, 2016.
- [149] S. M. J. Razavi, M. R. Ayatollahi, A. Nemati Giv, and H. Khoramishad, “Single lap joints bonded with structural adhesives reinforced with a mixture of silica nanoparticles and multi walled carbon nanotubes,” *Int. J. Adhes. Adhes.*, vol. 80, pp. 76–86, 2018, doi: 10.1016/j.ijadhadh.2017.10.007.
- [150] C. C. R. G. De Sousa, R. Campilho, E. A. S. Marques, M. Costa, and L. F. M. Da Silva, “Overview of different strength prediction techniques for single-lap bonded joints,” *Proc. Inst. Mech. Eng. Part L J. Mater. Des. Appl.*, vol. 231, no. 1–2, pp. 210–223, 2017, doi: 10.1177/1464420716675746.
- [151] Y. Xie, B. Yang, L. Lu, Z. Wan, and X. Liu, “Shear strength of bonded joints of carbon fiber reinforced plastic (CFRP) laminates enhanced by a two-step laser surface treatment,” *Compos. Struct.*, vol. 232, p. 111559, 2020, doi: 10.1016/j.compstruct.2019.111559.
- [152] L. F. M. da Silva, A. Öchsner, and R. D. Adams, “Handbook of Adhesion Technology: Second Edition,” in *Handbook of Adhesion Technology: Second Edition*, Second., vol. 1–2, Springer Cham, 2018, pp. 1–1805. doi: 10.1007/978-3-319-55411-2.
- [153] K. W. Allen, “Some reflections on contemporary views of theories of adhesion,” *Int. J. Adhes. Adhes.*, vol. 13, no. 2, pp. 67–72, 1993, doi: 10.1016/0143-7496(93)90015-2.
- [154] F. Ducept, P. Davies, and D. Gamby, “Mixed mode failure criteria for a

- glass/epoxy composite and an adhesively bonded composite/composite joint,” *Int. J. Adhes. Adhes.*, vol. 20, no. 3, pp. 233–244, 2000, doi: 10.1016/S0143-7496(99)00048-2.
- [155] E. M. Petrie, *An Introduction to Adhesive and Sealants*. 2007. [Online]. Available: [www.digitalengineeringlibrary.com](http://www.digitalengineeringlibrary.com)
- [156] DIN EN ISO 10365, “Adhesives: Designation of main failure patterns,” *Int. Organ. Stand.*, vol. 2, p. 5, 1995.
- [157] M. H. Arıkan, F. Eroglu, V. Eskizeybek, E. F. Sukur, M. Yildiz, and H. S. Sas, “A Systematic Characterization Approach for Vacuum Bag Only Prepregs towards an Accurate Process Design,” *Materials (Basel)*, vol. 15, no. 2, p. 451, 2022, doi: 10.3390/ma15020451.
- [158] F. Wang, Y. C. Zhang, S. Hu, and Y. Zhang, “Preparation and curing process optimization of an asymmetric impregnated vacuum bag-only prepreg,” *Front. Mater.*, vol. 9, p. 1050074, 2022, doi: 10.3389/fmats.2022.1050074.
- [159] X. S. Xue Luo, Hanbing Liao, Xianlin Luo, “Analysis of vacuum bagging process for composite parts using prepreg,” *Appl. Compos. Mater.*, vol. 20, no. 3, pp. 679–691, 2020, doi: 10.1007/s10443-020-09843-w.
- [160] X. X. Ding Han, Yutao Zhao, Qinghua Zheng, “Influence of Vacuum Bagging Process on the Quality of Aerospace Prepreg Composite Laminates,” *J. Compos. Mater.*, vol. 54, no. 17, pp. 2293–2304, 2020, doi: 10.1177/0021998319894613.
- [161] Hassan Bahramian and Mehdi Zohdi, “Vacuum bagging method and its effects on mechanical properties of carbon fiber/epoxy composites,” *J. Reinf. Plast. Compos.*, vol. 39, no. 24, pp. 963–977, 2020, doi: 10.1177/0731684420962793.
- [162] D. K. Hyun, D. Kim, J. Hwan Shin, B. E. Lee, D. H. Shin, and J. Hoon Kim, “Cure cycle modification for efficient vacuum bag only prepreg process,” *J. Compos. Mater.*, vol. 55, no. 8, pp. 1039–1051, 2021, doi: 10.1177/0021998320963541.
- [163] Hexcel, “Hexcel Prepreg\_Tecnology,” *FGU 017c*, 2013. <https://www.hexcel.com/Resources/DataSheets/Prepreg>
- [164] W. Guo, Y. C. Lim, C. H. Ong, and A. Senthil Kumar, “Atmospheric pressure plasma application on the adhesive bonding improvement of CFRP via surface configuration comparison,” *Polym. Compos.*, vol. 45, no. 2, pp. 1461–1471, 2024, doi: 10.1002/pc.27866.
- [165] C. Tendero, C. Tixier, P. Tristant, J. Desmaison, and P. Leprince, “Atmospheric pressure plasmas: A review,” *Spectrochim. Acta - Part B At. Spectrosc.*, vol. 61, no. 1, pp. 2–30, 2006, doi: 10.1016/j.sab.2005.10.003.
- [166] H. Lee, I. Ohsawa, and J. Takahashi, “Effect of plasma surface treatment of recycled carbon fiber on carbon fiber-reinforced plastics (CFRP) interfacial properties,” *Appl. Surf. Sci.*, vol. 328, pp. 241–246, 2015, doi: 10.1016/j.apsusc.2014.12.012.
- [167] M. Yoozbashizadeh, M. Chartosias, C. Victorino, and D. Decker, “Investigation on the effect of process parameters in atmospheric pressure plasma treatment on carbon fiber reinforced polymer surfaces for bonding,”

- Mater. Manuf. Process.*, vol. 34, no. 6, pp. 660–669, 2019, doi: 10.1080/10426914.2019.1566613.
- [168] F. Fanelli and F. Fracassi, “Atmospheric pressure non-equilibrium plasma jet technology: general features, specificities and applications in surface processing of materials,” *Surf. Coatings Technol.*, vol. 322, pp. 174–201, 2017, doi: 10.1016/j.surfcoat.2017.05.027.
- [169] L. Brès, N. Gherardi, N. Naudé, and B. Rives, “Experimental investigations of a remote atmospheric pressure plasma by electrical diagnostics and related effects on polymer composite surfaces,” *EPJ Appl. Phys.*, vol. 95, no. 3, p. 110110, 2021, doi: 10.1051/epjap/2021210110.
- [170] B. G. Rusu, “Recent Advances in Atmospheric-Pressure Plasma Technology,” *Appl. Sci.*, vol. 12, no. 21, p. 10847, 2022, doi: 10.3390/app122110847.
- [171] M. Berczeli and Z. Weltsch, “Enhanced wetting and adhesive properties by atmospheric pressure plasma surface treatment methods and investigation processes on the influencing parameters on HIPS polymer,” *Polymers (Basel)*, vol. 13, no. 6, pp. 1–13, 2021, doi: 10.3390/polym13060901.
- [172] M. Noeske, J. Degenhardt, S. Strudthoff, and U. Lommatzsch, “Plasma jet treatment of five polymers at atmospheric pressure: Surface modifications and the relevance for adhesion,” *Int. J. Adhes. Adhes.*, vol. 24, no. 2, pp. 171–177, 2004, doi: 10.1016/j.ijadhadh.2003.09.006.
- [173] Z. A. Aga and E. Woldesenbet, “Surface preparation effect on performance of adhesively-bonded graphite/epoxy composites subjected to impact,” *J. Adhes. Sci. Technol.*, vol. 21, no. 1, pp. 51–65, 2007, doi: 10.1163/156856107779976132.
- [174] N. Manente André, S. M. Goushegir, N. Scharnagl, J. F. dos Santos, L. B. Canto, and S. T. Amancio-Filho, “Composite surface pre-treatments: Improvement on adhesion mechanisms and mechanical performance of metal–composite friction spot joints with additional film interlayer,” *J. Adhes.*, vol. 94, no. 9, pp. 723–742, 2018, doi: 10.1080/00218464.2017.1378101.
- [175] M. G. Romano, M. Guida, F. Marulo, M. G. Auricchio, and S. Russo, “Characterization of adhesives bonding in aircraft structures,” *Materials (Basel)*, vol. 13, no. 21, pp. 1–13, 2020, doi: 10.3390/ma13214816.
- [176] S. Capelli *et al.*, “Effect of carbon support, capping agent amount, and PD NPS size for bio-adipic acid production from muconic acid and sodium muconate,” *Nanomaterials*, vol. 10, no. 3, p. 1273, 2020, doi: 10.3390/nano10030505.
- [177] J. Sánchez Serrano, A. Ureña, S. Lazcano Ureña, and T. Blanco Varela, “New approach to surface preparation for adhesive bonding of aeronautical composites: Atmospheric pressure plasma. Studies on the pretreatment lifetime and durability of the bondline,” *Compos. Interfaces*, vol. 22, no. 8, pp. 731–742, 2015, doi: 10.1080/09276440.2015.1056671.
- [178] C. Ma *et al.*, “Atmospheric-pressure plasma assisted engineering of polymer surfaces: From high hydrophobicity to superhydrophilicity,” *Appl. Surf. Sci.*,

vol. 535, pp. 1–12, 2021, doi: 10.1016/j.apsusc.2020.147032.

- [179] (ASTM), “ASTM D7334-08 Standard Practice for Surface Wettability of Coatings, Substrates and Pigments by Advancing Contact Angle Measurement,” *ASTM Int.*, vol. 08, no. Reapproved 2013, pp. 1–3, 2008, doi: 10.1520/D7334-08R22.Copyright.
- [180] Biolinscientific, “optical-tensiometers”, 10 Nisan 2024, erişim adresi: <https://www.biolinscientific.com/attension/optical-tensiometers>
- [181] H. Kaelble and K. C. Uy, “A Reinterpretation of Organic Surface Interactions,” *J. Adhes.*, vol. 2, no. 1, pp. 50–60, 1970, [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1080/0021846708544579>
- [182] D. K. Owens and R. C. Wendt, “Estimation of the surface free energy of polymers,” *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 13, no. 8, pp. 1741–1747, 1969, doi: 10.1002/app.1969.070130815.
- [183] S. G. Prolongo, M. R. Gude, G. Del Rosario, and A. Ureña, “Surface pretreatments for composite joints: Study of surface profile by SEM image analysis,” *J. Adhes. Sci. Technol.*, vol. 24, no. 11–12, pp. 1855–1867, 2010, doi: 10.1163/016942410X507623.
- [184] G. Poletti, F. Orsini, A. Raffaele-Addamo, C. Riccardi, and E. Selli, “Cold plasma treatment of PET fabrics: AFM surface morphology characterisation,” *Appl. Surf. Sci.*, vol. 219, no. 3–4, pp. 311–316, 2003, doi: 10.1016/S0169-4332(03)00703-7.
- [185] L. Wen, X. Xu, and L. Qin, “Effect of Low-Temperature Plasma Surface Treatment on Bonding Properties of Single-Lap Joint of Thermosetting Composites,” *Polymers (Basel)*, vol. 15, no. 7, p. 1631, 2023, doi: 10.3390/polym15071631.
- [186] S. Lou, B. Cheng, G. Ren, Y. Li, X. Bai, and P. Chen, “Effect of adhesive modification and surface treatment of laminates on the single lap bonding joint properties of carbon fibre composites,” *J. Adhes.*, vol. 99, no. 12, pp. 1916–1932, 2023, doi: 10.1080/00218464.2022.2163893.
- [187] J. Lopes, D. Stefaniak, L. Reis, and P. P. Camanho, “Single lap shear stress in hybrid CFRP/Steel composites,” *Procedia Struct. Integr.*, vol. 1, pp. 58–65, 2016, doi: 10.1016/j.prostr.2016.02.009.
- [188] Z. Hu *et al.*, “Effect of Nonwoven Carbon Tissue-Reinforced Epoxy Resin Adhesive Layer on the Single Lap Bonding Strength of Aluminum Alloy Joints,” *ACS Omega*, vol. 6, no. 37, pp. 23802–23813, 2021, doi: 10.1021/acsomega.1c02635.
- [189] V. R. Darla, B. Satish Ben, K. V. Sai Srinadh, and K. Venkata Rao, “Evaluation of aluminum to composite bonded lap joints,” *High Perform. Polym.*, vol. 34, no. 10, pp. 1152–1163, 2022, doi: 10.1177/09540083221111443.
- [190] A. Redmann, V. Damodaran, F. Tischer, P. Prabhakar, and T. A. Osswald, “Evaluation of single-lap and block shear test methods in adhesively bonded composite joints,” *J. Compos. Sci.*, vol. 5, no. 1, pp. 1–13, 2021, doi: 10.3390/jcs5010027.
- [191] A. Higgins, “Adhesive bonding of aircraft structures,” *Int. J. Adhes. Adhes.*,

- vol. 20, no. 5, pp. 367–376, 2000, doi: 10.1016/S0143-7496(00)00006-3.
- [192] DIN and EN, “Non-metallic materials – Structural adhesives – Test method – Part 1: Single lap shear,” *Eur. Stand.*, no. 2243–1, 2007.
- [193] D. A. Dillard, D. J. Pohlit, G. C. Jacob, J. M. Starbuck, and R. K. Kapania, “On the use of a driven wedge test to acquire dynamic fracture energies of bonded beam specimens,” *J. Adhes.*, vol. 87, no. 4, pp. 395–423, 2011, doi: 10.1080/00218464.2011.562125.
- [194] J. Cognard, “The mechanics of the wedge test,” *J. Adhes.*, vol. 20, no. 1, pp. 1–13, 1986, doi: 10.1080/00218468608073236.
- [195] S. Yu, M. N. Tong, and G. Critchlow, “Wedge test of carbon-nanotube-reinforced epoxy adhesive joints,” *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 111, no. 6, pp. 2957–2962, 2009, doi: 10.1002/app.29294.
- [196] J. H. Back *et al.*, “Resistance to cleavage of core-shell rubber/epoxy composite foam adhesive under impact wedge-peel condition for automobile structural adhesive,” *Polymers (Basel)*, vol. 11, no. 1, p. 152, 2019, doi: 10.3390/polym11010152.
- [197] Parker, B.M, “An Evaluation of the Boeing Wedge Test for the Assessment of CFRP Surface Pretreatment,” Royal Aircraft Establishment Technical Memo Mat/Str 1038, March 1984.
- [198] ASTM D 3762-03. Standard test method for adhesive-bonded surface durability of aluminum (wedge test). Annual Book of ASTM Standards, 277–280. Philadelphia, PA: ASTM International, 2001.
- [199] R. D. Adams, J. W. Cowap, G. Farquharson, G. M. Margary, and D. Vaughn, “The relative merits of the Boeing wedge test and the double cantilever beam test for assessing the durability of adhesively bonded joints, with particular reference to the use of fracture mechanics,” *Int. J. Adhes. Adhes.*, vol. 29, no. 6, pp. 609–620, 2009, doi: 10.1016/j.ijadhadh.2009.02.010.
- [200] J. Manterola, J. Renart, J. Zurbitu, A. Turon, and I. Urresti, “Mode I fracture characterisation of rigid and flexible bonded joints using an advanced Wedge-Driven Test,” *Mech. Mater.*, vol. 148, p. 103534, 2020, doi: 10.1016/j.mechmat.2020.103534.
- [201] American Society of Testing Materials, “ASTM D5573: Standard Practice for Classifying Failure Modes in Fiber-Reinforced-Plastic (FRP) Joints,” *Annu. B. ASTM Stand.*, vol. 99, 2019.
- [202] J. A. Jofre-Reche, J. Pulpytel, H. Fakhouri, F. Arefi-Khonsari, and J. M. Martín-Martínez, “Surface treatment of polydimethylsiloxane (PDMS) with atmospheric pressure rotating plasma jet. Modeling and optimization of the surface treatment conditions,” *Plasma Process. Polym.*, vol. 13, no. 4, pp. 459–469, 2016, doi: 10.1002/ppap.201500118.
- [203] M. H. Kim, K. Y. Rhee, and Y. N. Paik, “Plasma treatment of a carbon/epoxy prepreg and its effect on the durability of carbon/epoxy laminated composites,” *J. Korean Phys. Soc.*, vol. 54, no. 3, pp. 1325–1329, 2009, doi: 10.3938/jkps.54.1325.
- [204] A. Alam, C. Wan, and T. McNally, “Surface amination of carbon nanoparticles for modification of epoxy resins: plasma-treatment vs. wet-

chemistry approach,” *Eur. Polym. J.*, vol. 87, pp. 422–448, 2017, doi: 10.1016/j.eurpolymj.2016.10.004.



# TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

---

## **Konferans Bildirileri**

1. A. Alkoc, A. B. Hazar Yoruc, and A. C. Usak, “Environmental durability assessment of CFRP-Epoxy adhesive joints: a comprehensive study on advanced surface treatments and boeing wedge test,” 3rd International Materials Engineering and Advanced Manufacturing Technologies Congress (IMEAMTC'24), Turkey, 46-54, 2024.

## **Makaleler**

1. A. Alkoc, A. B. Hazar Yoruc, M. Bakir and A. C. Usak, “Experimental evaluation of atmospheric plasma treatment effects on different textures of CFRP composite for aircraft applications”, Advanced Composite Materials, 1-22, 2024, doi:10.1080/09243046.2024.2345837.

## **Projeler**

1. Yıldız Teknik Üniversitesi (YTÜ)-Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK)-Türk Havacılık ve Uzay Sanayii A. Ş. (TUSAŞ), 2244-Sanayi Doktora Programı, Proje Numarası: 1189B441801030.