

**T.C.**  
**BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**  
**MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**



**ATMOSFERİK BASINÇLI PLAZMA UYGULANMIŞ KARBON  
FİBER TAKVİYELİ POLİMER KOMPOZİT-ALÜMİNYUM  
YAPIŞTIRMA BAĞLANTILARININ MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN  
İNCELENMESİ**

**YUNUS EMRE NEHRİ**

**DOKTORA TEZİ**

**Jüri Üyeleri :** Prof. Dr. Ali ORAL (Tez Danışmanı)  
Prof. Dr. Kadir ÇAVDAR  
Prof. Dr. Raif SAKİN  
Prof. Dr. Pınar DEMİRCİOĞLU  
Doç. Dr. Türker TÜRKOĞLU

**BALIKESİR, NİSAN – 2026**

## **ETİK BEYAN**

Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak tarafımda hazırlanan “**Atmosferik Basıncı Plazma Uygulanmış Karbon Fiber Takviyeli Polimer Kompozit-Alüminyum Yapıştırma Bağlantılarının Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi**” başlıklı tezde;

- Tüm bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Kullanılan veriler ve sonuçlarda herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Tüm bilgi ve sonuçları bilimsel araştırma ve etik ilkelere uygun şekilde sunduğumu,
- Yararlandığım esere atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,

beyan eder, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ederim.

**Yunus Emre NEHRİ**

## ÖZET

**ATMOSFERİK BASINÇLI PLAZMA UYGULANMIŞ KARBON FİBER  
TAKVİYELİ POLİMER KOMPOZİT-ALÜMİNYUM YAPIŞTIRMA  
BAĞLANTILARININ MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ  
DOKTORA TEZİ  
YUNUS EMRE NEHRİ  
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI  
(TEZ DANIŞMANI: PROF. DR. ALİ ORAL)**

**BALIKESİR, NİSAN - 2026**

Bu çalışmada, CFRP kompozitler ile farklı alüminyum alaşımlarının yapıştırma bağlantı performansının iyileştirilmesine yönelik olarak atmosferik basınçlı plazma yüzey işlemlerinin etkileri araştırılmıştır. Çalışma iki etapta oluşmaktadır. Birinci etapta CFRP ile Al-5049 alaşımının, ikinci etapta ise CFRP ile Al 7075-T6 alaşımının yapıştırılması incelenmiştir. Birinci etapta, atmosferik basınçlı soğuk ve sıcak plazma uygulamalarının Al-5049 ve CFRP yüzeylerinin ıslanabilirliği ve yapıştırma dayanımı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Plazma parametreleri olarak uygulama mesafesi ve uygulama sayısı dikkate alınmış, deneysel tasarım RSM kapsamında Merkezi Kompozit Tasarım kullanılarak oluşturulmuştur. Temas açısı ölçümleri gerçekleştirilmiş, ardından tek kademeli bindirme bağlantı numuneleri çekme testine tabi tutularak bindirme kayma dayanımları belirlenmiştir. Temas açılarındaki azalma oranları ve bindirme kayma dayanımındaki artış oranlarının sıcak plazmada daha yüksek olduğu görülmüştür. İkinci etapta, atmosferik basınçlı soğuk plazma işleminin Al-7075-T6 ve CFRP malzemelerinin yüzey temas açıları ve yapıştırma bağlantı performansı üzerindeki etkileri deneysel, sayısal ve istatistiksel yöntemlerin entegrasyonu ile incelenmiştir. Uygulama mesafesi, uygulama sayısı ve uygulama hızını içeren tam faktöriyel deney tasarımı uygulanmıştır. Temas açısı ölçümleri gerçekleştirilmiş, ardından tek kademeli bindirme bağlantı numuneleri çekme testine tabi tutularak bindirme kayma dayanımları belirlenmiştir. Sonuçlar ANOVA ile analiz edilmiş, RSM ile modellenmiş ve LS-DYNA kullanılarak sonlu eleman analizleri gerçekleştirilmiştir. NSGA-II ile çok amaçlı optimizasyon yapılmış, Random Forest modeli ile tahmin doğruluğu artırılmış ve Pareto-optimal çözüm kümesi elde edilmiştir. Elde edilen bulgular, her iki çıktı üzerinde de en etkili parametrenin uygulama mesafesi olduğunu göstermiştir. Yüksek uygulama sayısı, düşük uygulama mesafesi ve düşük uygulama hızının birlikte kullanıldığı koşullarda optimum sonuçlar elde edilmiştir.

Sonuç olarak, atmosferik basınçlı plazma yüzey işlemlerinin CFRP-alüminyum hibrit yapıştırma bağlantılarında yüzey enerjisini artırarak ıslanabilirliği iyileştirdiğini ve buna bağlı olarak mekanik bağlantı performansını anlamlı düzeyde geliştirdiğini ortaya konulmuştur.

**ANAHTAR KELİMELELER:** Matematiksel model, NSGA-II, plazma tedavisi, tek kademeli yapıştırma bağlantıları, temas açıları, yanıt yüzey metodu

## **ABSTRACT**

### **INVESTIGATION OF THE MECHANICAL PROPERTIES OF ADHESIVELY BONDED CARBON FIBER REINFORCED POLYMER COMPOSITE– ALUMINUM JOINTS SUBJECTED TO ATMOSPHERIC PRESSURE PLASMA**

**TREATMENT**

**PH.D THESIS**

**YUNUS EMRE NEHRI**

**BALIKESİR UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE**

**MECHANICAL ENGINEERING**

**(SUPERVISOR: PROF. DR. ALİ ORAL )**

**BALIKESİR, APRIL - 2026**

In this study, the effects of atmospheric pressure plasma surface treatments on improving the adhesive joint performance of CFRP composites and different aluminum alloys were investigated. The study consists of two stages: bonding of CFRP to Al-5049 alloy in the first stage and bonding of CFRP to Al-7075-T6 alloy in the second stage. In the first stage, the effects of atmospheric pressure cold and hot plasma treatments on the wettability and adhesive strength of Al-5049 and CFRP surfaces were examined. Application distance and number of passes were selected as plasma parameters, and the experimental design was established using a Central Composite Design within the framework of Response Surface Methodology (RSM). Contact angle measurements were conducted, and single-lap joint specimens were subjected to tensile testing to determine lap shear strength. The results indicated that hot plasma treatment led to greater reductions in contact angles and higher increases in lap shear strength compared to cold plasma treatment. In the second stage, the influence of atmospheric pressure cold plasma treatment on the surface contact angles and adhesive joint performance of Al-7075-T6 and CFRP materials were investigated through integrated experimental, numerical, and statistical approaches. A full factorial design including application distance, number of passes, and application speed was implemented. The results were analyzed using ANOVA, modeled with RSM, and validated through finite element analyses performed in LS-DYNA. Multi-objective optimization was conducted using NSGA-II, and prediction capability was improved with a Random Forest model. Application distance was identified as the most influential parameter, and optimal performance was achieved at high passes with low application distance and speed.

In conclusion, it was demonstrated that atmospheric pressure plasma surface treatments improved wettability by increasing surface energy in CFRP–aluminum hybrid adhesive joints, thereby significantly enhancing mechanical joint performance.

**KEYWORDS:** Contact angle, mathematical model, NSGA-II, plasma treatment, response surface method, single lap joint

# İÇİNDEKİLER

Sayfa

<b>ÖZET</b> .....	<b>i</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>ii</b>
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	<b>iii</b>
<b>ŞEKİL LİSTESİ</b> .....	<b>iv</b>
<b>TABLO LİSTESİ</b> .....	<b>vi</b>
<b>SEMBOL VE KISALTMA LİSTESİ</b> .....	<b>vii</b>
<b>ÖNSÖZ</b> .....	<b>viii</b>
<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
<b>2. MATERYAL VE YÖNTEM</b> .....	<b>20</b>
2.1 I. Etap CFRP ve Al 5049 Alaşımının Yapıştırılması.....	22
2.2 II. Etap CFRP ve Al 7075 T6 Alaşımının Yapıştırılması .....	30
<b>3. BULGULAR VE TARTIŞMA</b> .....	<b>40</b>
3.1 I. Etap CFRP ve Al 5049 Alaşımının Yapıştırılması Sonucunda Elde Edilen Bulgular ve Tartışma .....	40
3.1.1 I. etap temas açısı ölçümleri .....	40
3.1.2 I. etap sıcaklık ölçüm sonuçları .....	43
3.1.3 I. etap çekme deney sonuçları .....	44
3.1.4 SEM analiz sonuçları .....	46
3.1.5 FT-IR analiz sonuçları .....	47
3.2 II. Etap CFRP ve Al 7075 T6 Alaşımının Yapıştırılması Sonucunda Elde Edilen Bulgular ve Tartışma .....	50
3.2.1 II. etap temas açısı ölçümleri.....	50
3.2.2 II. etap bindirme kayma dayanımı ölçümleri.....	58
3.2.3 II. etap sıcaklık ölçümleri .....	62
3.2.4 II. etap sonlu elemanlar analizi.....	63
3.2.5 II. etap optimizasyon .....	68
<b>4. SONUÇLAR</b> .....	<b>72</b>
4.1 I. Etap Sonuçlar.....	72
4.2 II. Etap Sonuçlar .....	73
<b>5. KAYNAKLAR</b> .....	<b>78</b>

## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

Şekil 1.1	: Yapışma bağlantısında adezyon kuvvetleri.....	3
Şekil 1.2	: Yapıştırma bağlantısında adezyon ve kohezyon kuvvetleri.....	3
Şekil 1.3	: Islanabilirlik .....	4
Şekil 1.4	: Temas açısı ölçümü.....	5
Şekil 1.5	: Faz değişimleri .....	6
Şekil 1.6	: Plazma sınıflandırmaları .....	6
Şekil 1.7	: Plazma işlemine etki eden parametreler.....	8
Şekil 2.1	: Akış diyagramları.....	21
Şekil 2.2	: I. etap akış şeması.....	22
Şekil 2.3	: Plazma cihazı a) atmosferik basınçlı soğuk plazma cihazı, b) sıcak plazma cihazı .....	25
Şekil 2.4	: Plazma işlemine etki eden parametreler.....	26
Şekil 2.5	: Yapıştırılmış numune boyutları.....	27
Şekil 2.6	: Deney numuneleri a) yapıştırma işlemi öncesi, b) yapıştırılmış numuneler....	28
Şekil 2.7	: Al5049 yüzeyinde kalan yapıştırıcı alan ölçüm adımları a) Yüzeyde kalan yapıştırıcının gerçek görseli, b) Yapıştırıcı alanının ayrılması, c) Alanın program içerisine aktarılması, d) Alandaki boşluklu yapıların çıkarılması, e) Alanın belirlenmesi .....	28
Şekil 2.8	: Taramalı elektron mikroskobu, a) kaplama işlemi, b) görüntü alma .....	29
Şekil 2.9	: FT-IR spektrometresi .....	30
Şekil 2.10	: II. etap akış şeması .....	31
Şekil 2.11	: Atmosferik basınçlı soğuk plazma uygulama sistemi.....	32
Şekil 2.12	: Yüzey pürüzlülük değerleri a) Al-7075 T6 yüzey pürüzlülük değeri, b) CFRP yüzey pürüzlülük değeri .....	33
Şekil 2.13	: Temas açısı ölçüm sistemi .....	34
Şekil 2.14	: Yapıştırma kalıbı/fikstürü .....	35
Şekil 2.15	: Model geometrisi ve ağ yapısı (mesh) oluşturulması.....	36
Şekil 2.16	: Random Forest regresyon modeli ile entegre edilmiş NSGA-II optimizasyon algoritmasının şematik diyagramı .....	39
Şekil 3.1	: Temas açısı ölçümleri a) Al5049 yüzeyi, b) CFRP yüzeyi.....	41
Şekil 3.2	: Uygulama sayısı ve uygulama mesafesine bağlı olarak elde edilen temas açısı değerleri a) Al5049 yüzeyine atmosferik basınçlı soğuk plazma uygulanması, b) Al5049 yüzeyine sıcak plazma uygulanması, c) CFRP üzerine atmosferik basınçlı soğuk plazma uygulanması, d) CFRP yüzeyine sıcak plazma uygulanması sonuçları.....	42
Şekil 3.3	: Deney numuneleri a) tek kademeli çekme deney numuneleri, b) çekme deneyi	44
Şekil 3.4	: Çekme testi sonucunda elde edilen ayrılma yüzeyinde kalan yapıştırıcı alanlarının tespit edilmesi.....	45
Şekil 3.5	: Yapıştırıcı ayrılma yüzeyi, a) Al 5049 yüzeyi, b) CFRP yüzeyi.....	47
Şekil 3.6	: Plazma işlemi uygulanmamış ve plazma işlemi uygulanmış Al 5049 alaşımına ait FT-IR spektrumları .....	49
Şekil 3.7	: Plazma işlemi uygulanmamış ve plazma işlemi uygulanmış CFRP kompozite ait FT-IR spektrumları.....	49
Şekil 3.8	: Deney tasarımına bağlı plazma tedavisi sonrası ölçülen temas açısı sonuçları; a) Al-7075 T6 yüzeyine 1 pasoda, b) Al-7075 T6 yüzeyine 3 pasoda, c) Al-7075 T6 yüzeyine 5 pasoda, d) CFRP yüzeyine 1 pasoda, e) CFRP yüzeyine 3 pasoda, f) CFRP yüzeyine 5 pasoda .....	54

## ŞEKİL LİSTESİ (Devam)

### Sayfa

- Şekil 3.9** : Deneysel parametrelerine bağlı olarak elde edilen bindirme kayma dayanımı, a) uygulama sayısı=1, b) uygulama sayısı=3 ve c) uygulama sayısı=5 ..... 60
- Şekil 3.10** : Yüzey sıcaklık ölçümleri a) plazma uygulanmamış Al-7075 T6, b) plazma uygulanmış Al-7075 T6, c) plazma uygulanmamış CFRP, d) plazma uygulanmış CFRP ..... 63
- Şekil 3.11** : 2,5 mm eleman boyutuna sahip modelin ağ yapısı ve katı eleman en boy oranı (aspect ratio) ..... 64
- Şekil 3.12** : 1 mm eleman boyutuna sahip modelin ağ yapısı ve katı eleman en boy oranı (aspect ratio) ..... 64
- Şekil 3.13** : 0,5 mm eleman boyutuna sahip modelin ağ yapısı ve katı eleman en boy oranı (aspect ratio) ..... 65
- Şekil 3.14** : Eleman boyutunun sonlu elemanlar modeli üzerindeki etkisi (gerilme-şekil değiştirme) ..... 65
- Şekil 3.15** : En iyi, orta, en kötü bindirme kayma dayanım deney sonuçları ile FEA ile elde edilen sonuçların karşılaştırılması ..... 67
- Şekil 3.16** : Yapıştırma bağlantısının sonlu elemanlar analizinde elde edilen gerilme dağılımları, a) 7. Deney, b) 15. Deney, c) 28. Deney ..... 68
- Şekil 3.17** : Çok amaçlı optimizasyon sonuçları: bindirme kayma dayanımının maksimize edilmesi ve temas açılarının minimize edilmesi ..... 70

## TABLO LİSTESİ

### Sayfa

<b>Tablo 2.1</b> : Alüminyum 5049 kimyasal bileşenleri.....	23
<b>Tablo 2.2</b> : Alüminyum 5049 mekanik özellikler .....	23
<b>Tablo 2.3</b> : Karbon fiber destekli polimer kompozit malzeme özellikleri.....	23
<b>Tablo 2.4</b> : I. etap deney parametreleri ve seviyeleri .....	25
<b>Tablo 2.5</b> : II. etap deney parametreleri ve seviyeleri.....	32
<b>Tablo 3.1</b> : I. etap temas açıları için varyans analiz sonuçları .....	43
<b>Tablo 3.2</b> : Atmosferik basınçlı soğuk plazma uygulanan numunelerin bindirme kayma dayanımları .....	45
<b>Tablo 3.3</b> : Atmosferik basınçlı sıcak plazma uygulanan numunelerin bindirme kayma dayanımları .....	46
<b>Tablo 3.4</b> : II. etap temas açısı ölçüm sonuçları.....	51
<b>Tablo 3.5</b> : Plazma etkinliğinin en iyi, orta, en kötü temas açısı ve bindirme kayma dayanımı sonuçları.....	52
<b>Tablo 3.6</b> : Giriş parametrelerine bağlı elde edilen temas açıları için varyans analizi.....	56
<b>Tablo 3.7</b> : Temas açısı sonuçlarına ilişkin açıklama güçleri ve uygulama sayısına bağlı olarak oluşturulan temas açısı matematiksel modelleri .....	57
<b>Tablo 3.8</b> : II. etap deney tasarımına bağlı olarak elde edilen bindirme kayma dayanımı ölçüm sonuçları.....	58
<b>Tablo 3.9</b> : Giriş parametrelerine bağlı elde edilen bindirme kayma dayanımı için varyans analiz sonuçları .....	61
<b>Tablo 3.10</b> : Her bileşene ait eleman ve düğüm noktası sayıları .....	66
<b>Tablo 3.11</b> : Eleman boyutunun sonlu elemanlar modeli üzerindeki etkisinin karşılaştırması .....	66
<b>Tablo 3.12</b> : Random Forest tahmin modeli ile NSGA-II optimizasyonuna ait en yüksek kaymadaki kopma dayanımına sahip ilk 15 çözüm.....	70

## SEMBOL VE KISALTMA LİSTESİ

<b>Al</b>	: Alüminyum
<b>ANOVA</b>	: Varyans Analizi (Analysis of Variance)
<b>ASTM</b>	: Uluslararası Amerikan Test ve Malzeme Topluluğu
<b>BKD</b>	: Bindirme Kayma Dayanımı
<b>CFRP</b>	: Karbon Fiber Takviyeli Polimer Kompozit
<b>Cr</b>	: Krom
<b>Cu</b>	: Bakır
<b>Fe</b>	: Demir
<b>FT-IR</b>	: Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi
<b>ISO</b>	: Uluslararası Standardizasyon Örgütü
<b>Mg</b>	: Magnezyum
<b>Mn</b>	: Mangan
<b>NSGA-II</b>	: Non-dominated Sorting Genetic Algorithm-II
<b>P</b>	: Plazma Türü
<b>R<sup>2</sup></b>	: Belirleme Katsayısı
<b>RSM</b>	: Yanıt Yüzey Metodu (Response Surface Methodology)
<b>SD</b>	: Serbestlik Derecesi
<b>SEM</b>	: Taramalı Elektron Mikroskobu
<b>Si</b>	: Silisyum
<b>TA</b>	: Temas Açısı
<b>Ti</b>	: Titanyum
<b>UH</b>	: Uygulama Hızı
<b>UM</b>	: Uygulama Mesafesi
<b>US</b>	: Uygulama Sayısı
<b>Zn</b>	: Çinko

## ÖNSÖZ

Bu doktora tez çalışmasının gerçekleştirilmesi sürecinde, bilgi, deneyim ve destekleriyle yanımda olan, bu zorlu yolculuğu benim için anlamlı ve mümkün kılan tüm değerli insanlara içten teşekkürlerimi sunarım.

Öncelikle, lisansüstü eğitim sürecimin her aşamasında bilgi ve tecrübesiyle bana yol gösteren, sabrı, anlayışı ve akademik bakış açısıyla gelişimime büyük katkı sağlayan, karşılaştığım her zorlukta desteğini hissettiğim kıymetli danışmanım Sayın Prof. Dr. Ali Oral'a en derin şükranlarımı sunarım. Tez izleme komitesi üyelerim, kıymetli hocalarım Sayın Prof. Dr. Kadir Çavdar'a ve Sayın Prof. Dr. Raif Sakin'e, değerli görüşleri, yapıcı eleştirileri ve yönlendirmeleri için teşekkür ederim.

Bu süreçte yalnızca akademik anlamda değil, aynı zamanda manevi anlamda da desteğini hissettiğim, tecrübesiyle bana yol gösteren, özellikle makale süreçlerinde ve deneysel çalışmalarda önemli katkı sağlayan Sayın Doç. Dr. Türker Türkoğlu'na ayrıca teşekkür etmek isterim. Kendisi benim için her zaman bir hocadan öte, yol gösterici bir ağabey ve güvenilir bir dost olmuştur. Benzer şekilde, hem ağabeyliği hem de çalışmalarına sağladığı motivasyon ile bu süreci daha anlamlı kılan, ayrıca bazı numunelerin 3D yazıcı ile üretiminde destek veren Sayın Doç. Dr. Ahmet Çağrı Kılınç'a teşekkür ederim. Deney numunelerinin hazırlanması ve yapılandırılması aşamalarında katkı sağlayan, benim için bir hocadan öte bir ağabey olan ve desteğini her zaman hissettiren Sayın Dr. Öğr. Üyesi Veli Gökhan Demir'e Sayın Doç. Dr. İsmail Caner'e de içten şükranlarımı sunarım. Yapıştırma kalıbının yapılmasında katkı sağlayan, her daim ağabeylik yapan Sayın Doç. Dr. Alaaddin Toktaş'a; numune yüzeylerinin görüntülenmesinde destek veren kadim dostum Makine Yüksek Mühendisi Sayın Melih Sarılıgil'e ve sonlu elemanlar analizlerinde yardımcı olan Sayın Kaan Ferikel'e teşekkür ederim.

Çalışmamda kullanılan 7075-T6 alüminyum alaşımının temininde destek sağlayan Sayın Galip Oğuz'a ve yeterlilik sürecimde yanımda olan değerli arkadaşım Makine Yüksek Mühendisi Sayın Yaprak Nisa Oğuz'a teşekkür ederim. Yapıştırıcı temini konusunda yardımcı olan ve süreci yerinde göstererek önemli katkı sağlayan PF Teknik Teknoloji Elektroteknik Mühendislik Makine San. ve Tic. Ltd. Şti.'den Sayın İsa Demir'e; plazma işlemleri ve yapıştırma süreçlerindeki destekleri için FCB Ar-Ge Mühendislik Hizmetleri Tic. ve San. Ltd. Şti.'den Sayın Yıldız Çavdar'a şükranlarımı sunarım.

Hayatımın en değerli parçası olan aileme ve sevgili eşime ise ayrı bir parantez açmak isterim. Bu uzun ve zorlu süreçte sabırları, anlayışları, koşulsuz sevgileri ve fedakârlıklarıyla her zaman yanımda oldular. Varlıklarıyla bana güç veren, en zor anlarımda bile arkamda dimdik duran, başarılarımın en büyük mimarı olan ailem ve eşim; benim için yalnızca bir destek değil, aynı zamanda en büyük motivasyon kaynağıdır. Onların varlığı, bu süreci tamamlayabilmemin en temel sebebidir. Kendilerine duyduğum sevgi, saygı ve minnet kelimelerle ifade edilemeyecek kadar büyüktür.

**Balıkesir, 2026**

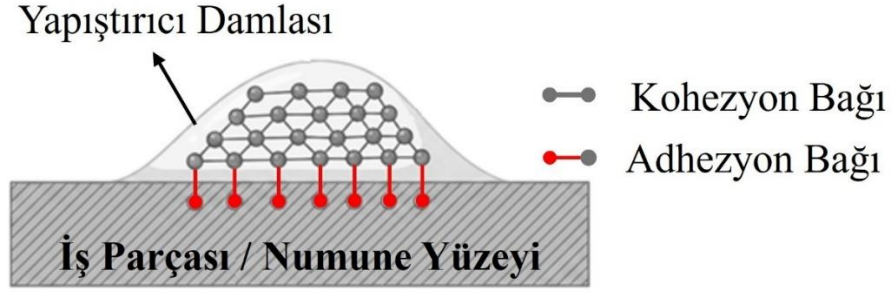
**Yunus Emre Nehri**

# 1. GİRİŞ

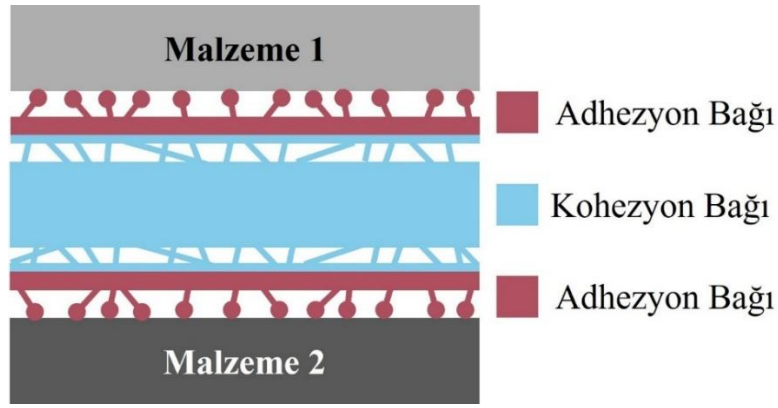
Metal ve kompozit malzemelerin hibrit birleştirilmesi üzerine son zamanlarda havacılık, otomotiv ve savunma sanayi gibi birçok sektör çalışmalar yürütmektedir. Alüminyum malzemelerin yapılarının sünek, yoğunluklarının düşük, mukavemetlerinin, korozyon dirençlerinin, işlenebilme kabiliyetlerinin, ısı ve elektriksel iletkenliklerinin yüksek olmasından dolayı havacılık, otomotiv, denizcilik, inşaat, tıp, uzay ve savunma sanayi gibi alanlarda yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (S. Li et al., 2023; Starke and Staley, 1996). 5xxx serisi alüminyumlar ise esas alaşım elementlerinin alüminyum ve magnezyum olmasından dolayı korozyon dirençleri, sertlikleri ve mukavemetleri yüksek olup sünekliği azdır (Engler et al., 2014; Wu and Curtin, 2015; Ziobro et al., 2017). 7xxx serisi alüminyumlar, yüksek mukavemeti, ısıl işlem ile güçlendirilebilirliği, üstün işlenebilirliği, yüksek aşınma ve yorulma dayanımı sayesinde havacılık ve savunma endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır (L. Wen et al., 2024; Z. Xu et al., 2024). Benzer şekilde, Karbon Fiber Destekli Polimer (Carbon Fiber-Reinforced Polymer / CFRP) kompozitler de yüksek mukavemet/ağırlık oranı, yüksek özgül rijitlik ve yorulma dayanımı gibi avantajlarından dolayı havacılık, denizcilik, savunma sanayi ve otomotiv sektörlerinde kritik bir rol oynamaktadır (Duan et al., 2024; Gu et al., 2024; Keshavarzi and Saeidi Googarchin, 2024; Kilinc et al., 2025; Kim et al., 2021; Özgür Bora et al., 2020). 5xxx serisi alüminyum ile karbon fiber destekli polimer kompozitin hibrit yapıda birleştirilmesinde özgül mukavemeti yüksek malzemeler elde edilmektedir (Duan et al., 2024; Morgado et al., 2019). 7xxx serisi alüminyum ile karbon fiber destekli polimer kompozit malzemenin hibrit bir yapıda birleştirilmesi, hafiflik ile yüksek mukavemet gereksinimlerini aynı anda karşılayan, darbe ve yorulma direnci geliştirilmiş yapısal uygulamalara olanak sağlamaktadır (Kundu et al., 2025; Liu et al., 2019; Samadi et al., 2025). Bu nedenle Al/CFRP hibrit yapıların birleştirme mekanizmalarının anlaşılması, ileri mühendislik uygulamalarında performans ve güvenliği artırmak açısından kritik öneme sahiptir. Birleştirme mekanizması olarak, yapıştırma, cıvata veya perçin kullanılabilir.

Son yıllarda, birleştirme işlemlerinde kaynak, lehim, cıvata ve perçin gibi uygulamalar dışında yapıştırma bağlantıları ön plana çıkmaktadır. Birleştirme yöntemlerinin bazılarında çeşitli dezavantajlar bulunmaktadır. Örneğin, kaynak bağlantıları gerilme yığılmalarına neden olabilmekte, işlem süresinin uzun olması nedeniyle üretim verimliliğini düşürmekte ve sökülme işlemi sırasında parçanın tahrip edilmesine yol açabilmektedir (Gavas vd.,

2015). Lehim bağlantıları, yüksek maliyetleri ve zaman alıcı prosesleri nedeniyle endüstriyel uygulamalarda sınırlamalara sahiptir. Perçin bağlantılarında, perçinin yerleştirilmesi için parçalara delik açılması çentik etkisine neden olmakta ve ayrıca parçaların bindirmeli olarak birleştirilmesi zorunluluğu ortaya çıkmaktadır (Babalık and Çavdar, 2018). Cıvata bağlantılarında ise parçaları birleştirmek için uygun deliğin açılması gerekmekte, montaj ağırlığı artmakta ve bağlantının kendi kendine çözülmesini önlemek için ek emniyet önlemleri alınması gerekmektedir (Koç, 2012). Birçok uygulamada bu mekanik bağlantı yöntemlerine alternatif olarak yapıştırma bağlantıları tercih edilmektedir. Yapıştırma bağlantıları, farklı malzemeleri birleştirebilme, yükün tüm yüzeye düzgün bir şekilde dağılması, hafif olması, sızdırmazlık sağlaması ve delik açılmadığı için dayanım düşüşü veya çentik etkisi olmamasının yanı sıra yapıştırma işlemleri; düşük maliyet, uygulama kolaylığı, yükün düzgün aktarılması ve düşük ağırlık gibi önemli avantajlar sağlamaktadır. Bu avantajlarının yanında yapıştırıcının yüzeye yapışması, düşük termal özellikleri, güvenilirliği, tekrarlanabilirliği, düşük mekanik özellikleri gibi dezavantajları da bulunmakta olup, yüksek performans gerektiren uygulamalarda kullanılması hassasiyet gerektirmektedir (Demir, 2021; Güler, 2023). Ancak avantajlarının büyük öneme sahip olması nedeniyle son yıllarda literatürde ve endüstride yapıştırıcı üzerine araştırmalar artmıştır. Yapıştırıcılar üstün özelliklerinden dolayı havacılık, otomotiv, deniz, demiryolu, elektronik, giyim, protezler, yapay organlar, tıp ve alt yapı sistemleri gibi birçok alanda kullanılmaktadır (Bayramoğlu, 2022; Durmuş, 2019; Şahin, 2021; Yaprak Nisa Oğuz, 2022). Yapıştırma prosesinin başarısı büyük oranda yüzey özelliklerine bağlıdır. Yapışma, yapıştırılacak olan malzeme ile yapıştırıcı arasında adezyon kuvvetlerinden dolayı yapıştırıcının yüzeye tutunmasıdır (Şekil 1.1) (Güler, 2023). Yapıştırma ise iki veya daha fazla malzemenin yapıştırıcı yardımıyla yapıştırıcının yüzeylere adezyon ve yapıştırıcının kendi içerisindeki kohezyon kuvvetleriyle birleştirme işlemidir (Şekil 1.2) (Bayramoğlu, 2022). Adezyon ve kohezyon kuvvetleri yapıştırma bağlantısında birleşmeyi sağlamakta olup, bağlantının mukavemetini oluştururlar. Yapıştırma işleminde adezyon ve kohezyon kuvvetlerinin birbirine yakın veya eşit olması önemlidir. Yapışma bağlantısında mukavemet, yüzeyin ıslanabilirliğine, yüzeyin enerjisine ve moleküller arası teması bağlıdır. Yüzeyin temiz olması, sıcaklık, basınç, zaman, ultraviyole ışınlar, oksijen vb. etkenler yapıştırma bağlarını etkileyen faktörlerdir. Yapışma öncesi yüzey enerjisini artırmak amacıyla yüzey hazırlığı yapılırken; sırasıyla yüzey temizleme, yüzey pürüzlendirme ve yüzeyi aktive etme işlemleri uygulanmaktadır (Esen, 2016).



Şekil 1.1: Yapışma bağlantısında adezyon kuvvetleri



Şekil 1.2: Yapıştırma bağlantısında adezyon ve kohezyon kuvvetleri

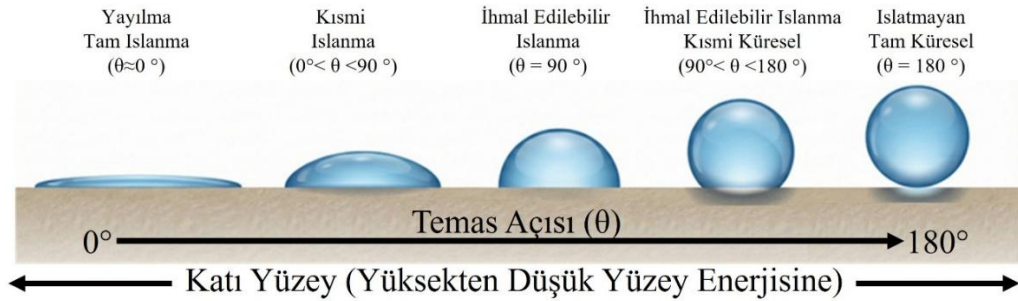
Yapıştırma işlemi öncesinde yüzey enerjisini artırmak yapıştırıcının yüzeye daha iyi tutunmasını sağlamaktadır. Yüzey enerjisi, yüzeydeki moleküllerin etkileşimlerinden doğan kuvvetlerle oluşmaktadır (Esen, 2016). Diğer bir ifadeyle yüzeyi geren enerjidir.

Yüzey gerilimi, atomların bağlı bulunduğu kütlelerin en az enerjiye sahip olma eğilimlerinden dolayı yüzey alanlarını azaltma mekanizması olarak tanımlanabilir (Güler, 2023).

Sıvının yüzey gerilimine karşılık, katının yüzey enerjisinin ilişkisi ıslanabilirlik olarak tanımlanır. Yüzey enerjisi metre başına uygulanan mili Newton (mN/m) olarak ifade edilir. Genellikle test mürekkebi yöntemiyle yüzey enerjisi ölçülmektedir. Yüzey gerilim değeri, bilinen bir mürekkep kullanılarak yüzey enerjisi ölçülmek istenen yüzeye özel mürekkep fırçası ile sürülüp kısa bir süre içerisinde mürekkebin yüzey üzerindeki yayılma durumu ile değerlendirilir. Mürekkep sürüldükten sonra damlacıklar halinde toparlanırsa yüzeyin enerjisinin mürekkebin yüzey geriliminden düşük olduğu değerlendirilir. Islanabilirlik

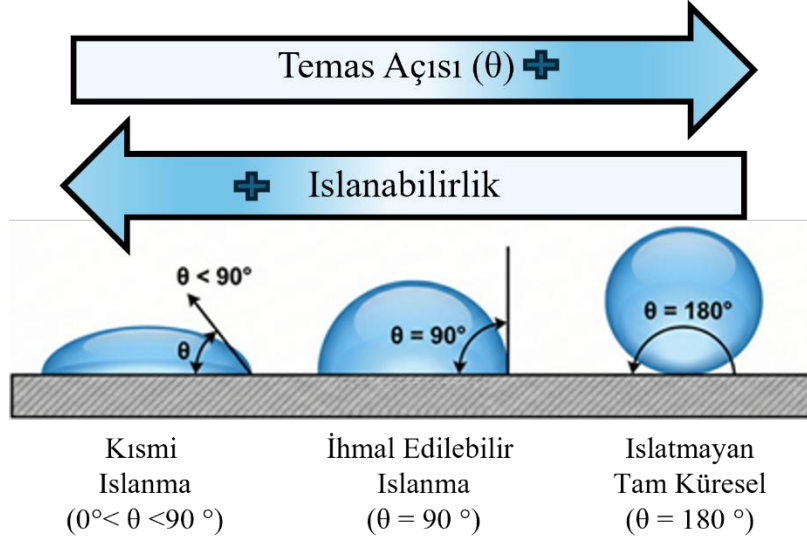
olması için yüzey enerjisinin mürekkebin yüzey geriliminden büyük veya eşit olması gerekmektedir. Bu test farklı yüzey gerilimine sahip mürekkepler kullanılarak tekrarlanır. Yüzeyin enerjisi damlacıkların formu incelenerek belirlenir.

Islanabilirliği değerlendirmek için genelde kullanılan yöntem temas açısı yöntemidir. Yüzeyin enerjisi ve su damlasının yüzey gerilimi, yüzeyin üzerinde damlacığın şeklini almasını veya yayılmasını sağlar (Şekil 1.3) (Özdemir, 2017). Yüzeyin enerjisi suyun yüzey geriliminden çok yüksek olması durumunda su yüzeyi tamamen ıslatır ve yüzeye yayılır. Fakat yüzey enerjisi suyun yüzey geriliminden çok düşük olması durumunda ise su yüzeyi ıslatmayıp küre şekline yakın bir şekil alır.



**Şekil 1.3:** Islanabilirlik

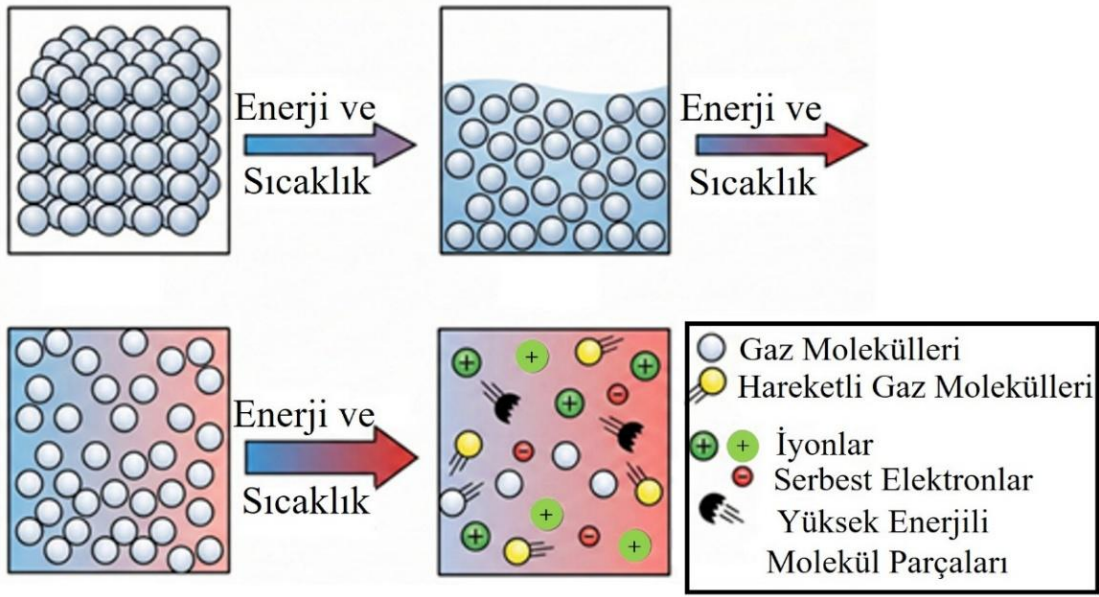
Testin uygulanabilmesi için yüzeyin ölçüm için kullanılan sıvı ile kimyasal reaksiyona girmemesi, pürüzsüz olması ve rijit olması gerekmektedir. Üç fazın da kesişim noktasından damlaya çizilen teğet ile yüzey arasındaki açı temas açısını belirtmektedir (Şekil 1.4) (Esen, 2016; Özdemir, 2017).



**Şekil 1.4:** Temas açısı ölçümü

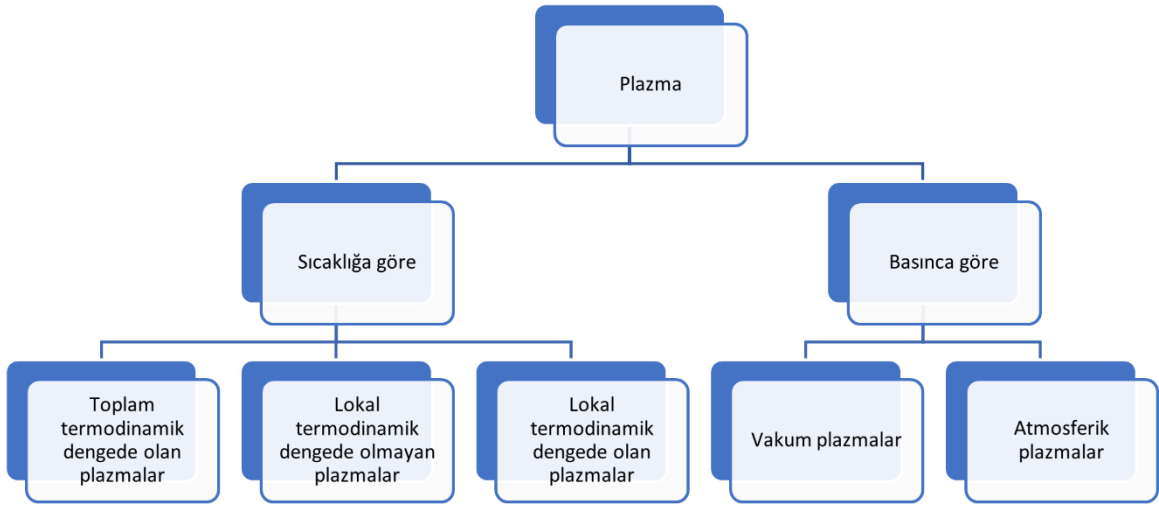
Geleneksel yöntemlerde zımparalama veya kumlama gibi mekanik işlemler kullanılarak yüzey enerjisi artırılmaya çalışılsa da, bu yöntemler yapıştırılacak yüzey üzerinde mikro hasarlar oluşturabilmekte, homojenlik sağlayamamakta ve işlem sonrası toz kalıntılarına neden olabilmektedir (Shi et al., 2021). Bu durum yapıştırıcının yüzeye tutunmasını olumsuz etkilemekte ve yapıştırma bağlantısının verimini düşürmektedir. Yapıştırıcıların verimliliğini artırmak, malzeme yüzeyine tutunmasını sağlamak ve mekanik yapışma dayanımını arttırmak için kullanılan yenilikçi yöntemlerden biri plazma teknolojisidir. Plazmanın yapışma yapılacak yüzeye uygulanması ile yüzey morfolojisinde değişiklikler oluşmaktadır.

Maddenin gaz fazına uygun basınçta yüksek enerji verilmesiyle gaz moleküllerini hareket ettirerek moleküller arasında çarpışmalar meydana gelir. Çarpışmalar sonucunda elektronlar moleküllerden kopmaya başlayarak pozitif yüklü iyonlar ve elektronların oluşturduğu bir sistem haline gelir. Bu sistem plazma olarak adlandırılır. Kısaca plazma, enerji girişiyle madde hal değişimidir. Elektriksel deşarjı yoluyla gaz fazındaki maddeye daha fazla enerji girişi olduğunda faz iyonize olarak plazma haline geçer (Şekil 1.5). Plazma fazı, maddenin üçüncü hali olan gaz fazından farklı olarak ısı ve elektrik iletibilmektedir (Kanbir, 2022).



**Şekil 1.5:** Faz değişimleri

Plazma temelde, plazması elde edilen gazın sıcaklığına ve basıncına bağlı olmak üzere iki şekilde sınıflandırılmaktadır (Şekil 1.6).



**Şekil 1.6:** Plazma sınıflandırmaları

Sıcaklığa göre plazma türleri toplam termodinamik dengede olan, lokal termodinamik dengede olmayan ve lokal termodinamik dengede olan plazmalar olarak sınıflandırılmaktadır. Toplam termodinamik denge hali (sıcak plazma) yüksek sıcaklıkta oluşur; elektron ve parçacıklar aynı sıcaklıktadır. Lokal termodinamik dengede olmama halinde (soğuk plazma) elektronlar yüksek sıcaklıkta olup, ağır parçacıklar düşük

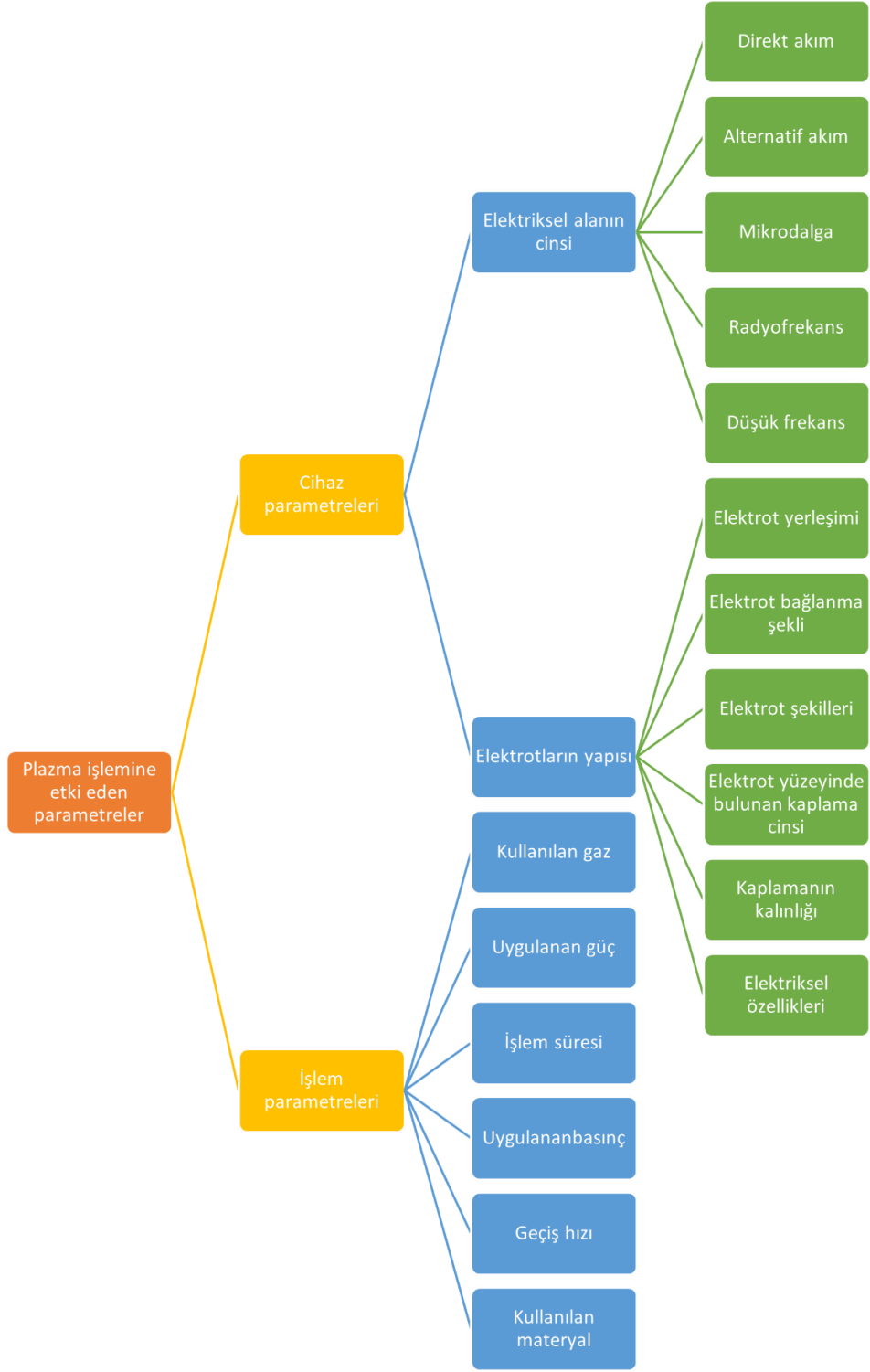
sıcaklıktadır. Bu plazmalar laboratuvar ortamında üretilen ve termodinamik dengesi olamayan plazmalardır. Lokal termodinamik dengede olan plazmalarda, düşük basınçta parçacıkların çarpışma azlığı söz konusudur.

Basınca göre plazma türlerinden biri olan vakum plazmalarda, işlem düşük basınçta, kapalı ve kontrollü bir sistemde gerçekleştirilmektedir. Basıncın düşük olması durumunda elektron ve iyonların ortalama serbest yol uzunluğu artmakta, buna bağlı olarak gaz fazındaki çarpışma sayısı azalmaktadır. Bu durum, enerjik türlerin yüzeye daha az enerji kaybıyla ulaşmasını sağlayarak iyonlar, hareketli gaz molekülleri ve uyarılmış atomlar gibi aktif plazma türlerinin yüzeye etkileşimini artırmaktadır.

Basınca göre plazma türü olan atmosferik plazmalarda, atmosferik koşullar altında meydana gelmektedir. Vakum tertibatına gerek duymadan sürekli çalışabilmektedir.

Vakum plazmaların avantajları; cihaz içine verilen gaz miktarı kontrol edilebilmekte ve hem reaktif hem de reaktif olmayan gazlar birlikte veya ayrı ayrı istenilen oranlarda kontrollü bir şekilde verilebilmektedir. Vakum plazmaların dezavantajları; pahalı olması, işlemin kesikli olması, kapasitenin sınırlı olması ve ekonomik olmamasıdır.

Plazma işlemine etki eden birçok parametre vardır. Etki eden parametreleri iki grup altında toplayacak olursak, bunlar; cihaz ve işlem parametrelerinin etkileridir. Etki eden bu parametreler Şekil 1.7’de detaylı olarak verilmiştir.



**Şekil 1.7:** Plazma işleme etki eden parametreler

Plazma bir malzemenin yüzeyine uygulanırken, yapısında bulunan reaktif parçacıkların enerjisini uygulandığı yüzeyin üzerine aktarmaya çalışır. Yüzeğe çarpan enerji içindeki iyon ve nötr parçacıklar yüzeydeki bazı molekül bağlarını kopararak, yüzeyde malzemenin temel özelliklerini değiştirmeyecek bir değişim sağlar. Plazma işlemi uygulandıktan sonra

malzeme yüzeyi temizlenmiş, aktifleştirilmiş, aşındırılmış, aşınmış ve çapraz bağlanmış olur.

**Yüzey temizleme:** Yüzeydeki organik atıklara ve kir partiküllerine iyon bombardımanı uygulanarak buharlaştırma işlemi yapılır. Bu işlemin etkinliği kullanılan gaza göre ve yüzeyde bulunan radyoaktif maddelerin varlığına bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Bu uygulamayla, mekanik bir etkileşim olmadığı için parçacıklar veya anorganik radyoaktif maddeler uzaklaştırılmamaktadır (Relyon Plasma, 2024).

**Yüzey aktifleştirme:** Malzeme yüzeyindeki zayıf bağlar iyon bombardımanı sırasında hidroksil, karboksil ve karbonil gruplarıyla etkileşime girerler. Etkileşim sonucunda yüzey aktivasyonu gerçekleşir (Encinas et al., 2012).

**Yüzey aşındırma:** Malzeme yüzeyindeki zayıf kovalent bağlı moleküller iyon bombardımanı sırasında gaz fazına geçmektedir. Yüzeyden gaz molekülleri ayrılır ve ayrılan moleküllerin yerinde boşluklar oluşur. Bu durumda da malzeme yüzeyinde aşınmalar meydana getirmiş olur. Aşınma sonucunda artan yüzey alanı malzemenin adezyon özelliğini de artırmaktadır (Carneiro et al., 2001).

**Yüzey aşılama:** Malzeme yüzeyinde nano ölçekli polimer tabaka oluşmaktadır. Kullanılan plazma gazı ve işlem parametreleri, tabakanın hidrofil (sıvıyı çeken) veya hidrofob (sıvıyı iten) olmasını belirler. Bu işlem birkaç dakika sürmekte olup, plazma sonrası yüzeyde oluşan tabaka renksiz, kokusuz ve malzemenin görünümünü etkilememektedir (Karahan, 2007).

**Çapraz bağlama:** İşlem esnasında polimer yapıda parçalar oluşmasıyla, ortaya çıkan reaktif grupların etkileşimi ile çapraz bağlanma oluşmaktadır. Polimer zincirler bağlanarak üç boyutlu ağ yapısı oluştururlar. Bu işlemin olması için plazma gazında karbon, silisyum veya kükürt gibi bağ yapıcı atomlar bulunmalıdır. Bu işlem ayrıca basınç, gaz akışı, uygulanan elektriksel güce de bağlıdır (Gheorghiu et al., 1997).

Bu yüzey modifikasyonları sonucunda da malzeme yüzeyinin yüzey enerjisi, ıslanabilirliği ve hidrofilikliği artar.

Mekanik bağlantı yöntemleri yerine giderek daha fazla tercih edilen yapıştırma bağlantılarında, yapıştırılacak yüzeylerin temizlenmesi ve yüzey enerjisinin artırılması; yüzeyin ıslanabilirliğini artırarak yapıştırıcının yüzeye daha etkin bir şekilde tutunmasını sağlamaktadır. Atmosferik basınçlı plazma, vakum gerektirmeden atmosferik koşullarda çalışabilmesi, düşük maliyeti ve kolay uygulanabilirliği nedeniyle yaygın olarak tercih edilmektedir. Atmosferik basınçlı plazmalar; yüzey modifikasyonu, yüzey temizliği, yapıştırma bağlantıları ve kaplama işlemleri gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Farklı gaz türleri ile metal, inorganik ve organik yüzeylere uygulanabilmektedir. Plazma işlemi sonucunda; yüzeyin temizlenmesi sağlanmış, materyalin ıslanabilirliği artmış, yüzeyin kimyasal reaktivitesi artmış ve adezyon özelliği de artmıştır. Plazma etkisinin değerlendirilmesi ise temas açısı ölçümü ve yüzey gerilimi ölçümüyle yapılmaktadır.

Kanbir'in yapmış olduğu çalışmada, atmosferik basınçlı plazma (ABP) uygulamasının kaplamalı ve kaplamasız çelik üzerine uygulanması ile yapıştırma bağının dayanımları üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Çalışmada 2 farklı malzeme (H300LAD – H300LA) üzerine 2 farklı yapıştırıcı (Maracol 18576 – Erde G Force) kullanılarak 3 farklı plazma hızında (5 – 10 – 15 mm/s) yüzey işleme yapılmıştır. İşlem sonrası su temas açısı değeri iki malzeme üzerinde de %30 un üzerinde iyileşme sağlamış. Tüm olasılıklarda da plazma sonrası yapıştırma bağları dayanımının arttığı değerlendirilmiştir. Yapışma dayanımındaki en fazla artış Erde G- Force marka yapıştırıcı ile yüksek plazma hızında görülmüştür. Marocol 18576 marka yapıştırıcı ile en düşük plazma hızında en az artış görülmüştür. İki marka yapıştırıcıda da plazma uygulama hızı arttıkça yapışma dayanımı artmıştır (Kanbir, 2022).

Güler çalışmasında, polioksimetilen (POM) ve polipropilen (PP) malzeme yüzey enerjilerini plazma ile artırmayı hedeflemiştir. Bunun sonucunda da yapıştırma bağlantılarının iyileşmesi beklenmiştir. Çalışmada 2 farklı malzeme (POM - PP) üzerine 2 farklı uygulama mesafesi (1,5 – 2,5 mm) ve 3 farklı uygulama hızı (0,5 – 1 – 1,5 cm/s) değerlerinde plazma işlemi uygulanmıştır. İki malzemede de su temas açısı, 1 cm/s hızında en düşük değerine ulaşmıştır. POM malzemede 2,5 mm ve PP malzeme ise 1,5 mm uygulama mesafesinde su temas açısının en düşük değeri elde edilmiştir. Plazma sonrasında iki malzemede de yüzey enerjisinde büyük artış meydana gelmiştir. Ayrıca yüzeydeki pürüzlülüğün asimetric formdan simetric forma yaklaştığı görülmüştür. Bu homojen yapışma için önemli bir durumdur. Plazma uygulanmamış yüzey ve 1,5 mm uygulama mesafesinde ve 1 cm/s

uygulama hızında plazma uygulanmış yüzey karşılaştırmalı olarak incelendiğinde nanometre büyüklüğünde yüzey pürüzlülüğünde artışlar olduğu görülmüştür. Genele bakıldığında bazı durumlar hariç plazma sonrasında çekme dayanımının arttığı görülmüştür (Güler, 2023).

Esen çalışmasında, otomobil tamponunun boyanmadan önce plazma ile yüzey aktivasyonunun sağlanabilmesi üzerine durmuştur. Çalışmada propilen malzeme üzerine 2 farklı nozul (22 mm tarama genişliği olan 22826 – 40 mm tarama genişliği olan 22894) ve 2 farklı gaz türü (Azot - Hava) kullanarak, 4 farklı uygulama hız aralığı (10-50 – 60-100 – 110-150 – 160-200 mm/s) ve 3 farklı uygulama mesafe aralığı (2-8 – 10-16 – 18-24 mm) değerlerinde plazma işlemi uygulanmıştır. Sabit 5 mm mesafede 22826 nozul kullanarak 4 farklı hız aralıkları değerinde, uygulama hızı arttıkça azalan aktivasyon süresi sonucunda aktivasyon etkinliği azalmaktadır. Uygulamanın düşük grup hızlarında olması durumunda en yüksek yüzey enerjisi elde edilmiştir. Sürenin artışının yüzeyde kimyasal modifikasyonun artışıyla ilişkilendirilmiştir. Optimum hızda (120 mm/s), 22826 nozul ile 3 farklı grup uygulama mesafesinde, yakın mesafe gruplarında en yüksek yüzey enerjisine ulaşıldığı belirtilmiştir. Optimum hızda (120 mm/s), 5mm mesafede 2 farklı nozul ile yüksek tarama genişliği olan nozulda uygulama mesafesinin azaltılması gerektiği sonucuna varmışlardır. Optimum hızda (120 mm/s), 3 farklı uygulama hızı ile 2 farklı gaz kullanıldığında, azot gazının yüzey enerjisini daha çok artırdığı sonucuna varmışlardır (Esen, 2016).

Penkov ve arkadaşları çalışmalarında, düşük maliyetli ve uygulanabilir olması nedeniyle atmosferik basınçlı plazma jetlerinin kullanımının giderek arttığını belirtmişlerdir. Plazmanın, yüksek yapışma bağı, yüzey aktivasyonu, yüzey temizliği ve aşındırma işlemi için yaygın olarak kullanıldığı ifade edilmiştir. Ayrıca atmosferik basınçlı plazma jetlerinin, termal hasara duyarlı malzemeler için uygun bir yüzey işlem yöntemi olduğu vurgulanmıştır. Farklı gaz türleri kullanımıyla yüzey özelliklerinin kontrol edilebildiği ve plazma uygulaması sonucunda temas açısının önemli ölçüde azaldığı rapor edilmiştir. Polimer malzemelerin düşük yüzey enerjilerine sahip olmaları nedeniyle yapışma performanslarının sınırlı olduğu; ancak plazma ile yüzey aktivasyonu yapıldığı ve güçlü yapışma bağlantılarının elde edildiği sonucuna varmışlardır (Penkov et al., 2015).

Sorrentino ve Carrino çalışmalarında; verimli, çevre dostu ve ekonomik olması nedeniyle soğuk plazma tercih etmişlerdir. 2024 alüminyum alaşımında plazma sonrası ıslanabilirliği

ve yüzey temizliği incelemişlerdir. Çalışmada 2024 alüminyum alaşımı üzerine 3 farklı gerilim (10 – 20 – 30 kV) değerinde plazma, 3 farklı hava akış oranıyla (15 – 35 – 60 dm<sup>3</sup>/saat), 5 farklı uygulama mesafesinde (30 – 75 – 120 – 300 – 600 mm) uygulanmıştır. Yüzey numunelerinin ıslanabilirliğinin ölçülmesinde ASTM D724 normuna göre, yüzey kirlerinin değerlendirilmesi için ise SEM analizi yapmışlardır. Soğuk plazma uygulamasıyla ön temizleme yapılan ve yapılmayan 2024 alüminyum alaşımlı yüzeylerin ıslanabilirliği ve temizliği önemli ölçüde iyileşmiştir. Yaptıkları çalışmada, işlem süresinin önemli bir etkiye sahip olduğu ve 30 saniyelik plazma işleminin ön temizleme yapılmış halden daha iyi ıslanabilirlik sağladığını belirtmişlerdir (Sorrentino and Carrino, 2009).

Carrino ve arkadaşları çalışmalarında, AC elektriksel deşarj soğuk plazma parametrelerinin polimerik yüzeylerin yapışması üzerine etkisi incelemişlerdir. Yapışma özelliği, çekme testi ile kantitatif olarak karakterize edilmiş, ön testler uygulanmış ve yüzey işlemi üzerinde önemli olan; gerilim, hava akış oranı ve uygulama süresi parametreleri seçilmiştir. Çalışmada polipropilen üzerine 3 farklı gerilim (10 – 20 – 30 kV) değerinde plazma, 3 farklı hava akış oranıyla (20 – 40 – 60 dm<sup>3</sup>/saat), 3 farklı uygulama süresinde (30 – 75 – 120 s) uygulanmıştır. Plazma ile yüzey arasındaki mesafe 40mm'dir. Varyans analizi, voltaj ve uygulama süresinin yapışmayı önemli ölçüde etkilediğini göstermiştir. Artan voltaj yapışmayı iyileştirmiş olup, en iyi çekme direnci 30 kV + 120 s + 20 dm<sup>3</sup>/h değerlerinde elde edilmiştir. Bu yöntemin, alevleme yöntemine göre %50'den fazla üstünlük sağladığı sonucuna varmışlardır (Carrino et al., 2002).

Preedy ve arkadaşları çalışmalarında kemik ile ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilenin (UHMWPE) yapışmasını artırmayı hedeflemişlerdir. UHMWPE'nin aşınma direnci ve sürtünme katsayısı düşüktür. Kalça ve diz protezinde kullanılır. Plazma ile polimer zincirler etkili bir şekilde çapraz bağlanarak aşınma direnci arttırılır. Bahsedilen çalışmada, helyum ve helyum/oksijen soğuk plazma uygulanmıştır. Her iki işlemten sonra da yüzeyin ıslanabilirliği artmış ve yüzeydeki plazma aşındırması azalmıştır. Ancak yüzey enerjisinde fark çok az olmuştur. Yapışma mukavemeti artmıştır. Çalışmanın sonuçları, plazma uygulamasının protezlerin yüzey özelliklerini iyileştirerek kemiğe daha iyi tutunmasını sağladığını ve bu sayede protez başarısını artıran önemli bir avantaj sunduğunu ortaya koymuştur (Preedy et al., 2014).

Prat ve arkadaşları çalışmalarında farklı gaz karışımları (He/N<sub>2</sub>, He/O<sub>2</sub> ve He) ile yaşlanma sürelerinin su temas açılarındaki değişimleri incelemişler ve O<sub>2</sub> sessiz elektrik deşarjı ile elde edilen sonuçları karşılaştırmışlardır. Temas açılarındaki değişim işlem süreleriyle birlikte azalmıştır. Yaşlanmaya bırakılan yüzeylerin temas açıları zamanla artmış olup, ortamla temasın ilk birkaç saatinde gerçekleşmiştir. Temas açısı yaşlandırma çalışması, atmosferik basınçlı kızdırma plazmalarının temas açıları üzerindeki etkilerinin sessiz elektrik deşarjına göre daha kalıcı olduğunu göstermiştir (Prat et al., 1998).

Prysiashnyi ve arkadaşları çalışmalarında, Atmosferik RF (radyo frekans) plazma işleminin EN1350 alüminyum levhalar üzerindeki etkileri incelemişlerdir. Çalışmada alüminyum levhalar üzerinde 2 farklı gaz (Ar 5 l/dk – 0,2 l/dk O<sub>2</sub> eklenmiş Ar 5 l/dk) kullanarak, 3 farklı işlem süresinde (0,3 – 3 – 30 s), sabit 2 mm uygulama mesafesinde yüzey işleme yapılmıştır. İşlem, Ar ve Ar/O<sub>2</sub> gaz karışımları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Plazma öncesinde numune temizliği yapılmıştır. Plazma sonrasında numuneler vernik ile kaplanıp kurumaya bırakılmış ve sonrasında yapışma testleri gerçekleştirilmiştir. EN 1350 alüminyum levhalar üzerinde plazma uygulama süresi arttıkça levhanın serbest yüzey enerjisinde artış ve su temas açısında azalma görülmüştür. İşlem görmüş levhaların yüzey enerjisi artmış ve daha yüksek yapışma ile sonuçlanmıştır. Ar ile plazma sonrası yüzey gözenekli hale gelmiştir. Gözeneklerin pürüzsüzleşmesi, Ar akışına az miktarda O<sub>2</sub> eklendikten sonra meydana gelmiştir. İşlem görmüş numuneler üzerindeki kaplama, daha yüksek mekanik gerilim derecelerinde bile daha az çatlak sergilemiş ve delaminasyon göstermemiştir (Prysiashnyi et al., 2012).

Polini ve Sorrentino çalışmalarında, soğuk plazma ile ön işleme tabi tutulan ve daha sonra boya kaplamasıyla korunan 2024 alüminyum alaşımının zorlu koşullarda kullanılabilirliğini incelemişlerdir. 2024 alüminyum alaşımı, çok düşük sıcaklık ve tuz sisi gibi iklim koşullarının çok sert olduğu yerlerde ve agresif kimyasal maddelerin varlığında tercih edilmektedir. Alüminyum gövdenin su, ısı ve hidrokarbonlar, yağlama yağları veya tuz sisi gibi agresif kimyasal maddelerden bir boya kaplaması ile korunması gerekir. Boya ile alüminyum alaşımı arasındaki yapışmanın uzun süre güçlü kalması önemlidir. Temelde kaldırılan boya alanını ölçmek için üç farklı test yöntemi (bant, suda bant, kareleme) kullanmışlardır. 'Al2024 + soğuk plazma + XPD + boya' ve 'Al2024 + Temizleme + Alodine1200 + soğuk plazma + boya' durumlarıyla karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, soğuk plazmanın bir çözücü ile temizlemeyi ortadan kaldırmaya ve uygulanan astar miktarını

azaltmaya ve dolayısıyla kirletici maddelerin kullanımını ve hava araçlarının toplam ağırlığını azaltmaya izin verdiğini göstermektedir (Polini and Sorrentino, 2004).

Palaskar ve arkadaşları çalışmalarında, Poliüretan (PU) kaplamalı üç farklı polipropilen (PP) kumaşın yapışma özellikleri, farklı plazma işlem süresi ve gücüne göre araştırma yapmışlardır. Çalışma iki aşamadan oluşmaktadır. İlk aşamasında malzeme yüzeyine sabit plazma gücünde (1,5 kW), helyum gazı (5 l/dk) ile farklı uygulama sürelerinde (5 – 10 – 15 s) plazma uygulamışlardır. Plazma ile muamele edilmiş numuneler üzerinde poliüretanın yapışmasında önemli bir artış gözlenmiştir. Polipropilen kumaşların ıslanabilirliğini, yüzey kimyasını, yüzey yapısını ve fiziksel özelliklerini incelemişlerdir. Çalışmanın ikinci aşamasında malzeme yüzeyine sabit uygulama süresinde (15 s), helyum gazı (5 l/dk) ile farklı plazma güçlerinde (1,5 – 2,5 – 3,5 kW) işlem yapılmıştır. Genelde plazma işleminin çekme dayanımını olumlu etkilediğini göstermişlerdir. Plazma sonrasında polipropilen numunelerde temas açısı değerinin azaldığı ve yüzey enerjisinin arttığı görülmüştür. Atmosferik basınç plazma işlemi, yığın (çekme mukavemeti) özelliklerini etkilemeden yüzey özelliklerini (ıslanabilirlik, yüzey yapısı ve yüzey kimyası) geliştirmektedir. Tekstil yapısının yanı sıra plazma işlem parametrelerinin de yapışmanın iyileştirilmesinde önemli bir rol oynadığı gösterilmiştir (Palaskar et al., 2020).

Villanueva ve arkadaşları çalışmalarında, plazmanın çelik yüzeylerdeki işleme süreçlerinden kaynaklanan yağlayıcı kirleticileri giderme kabiliyetini ele almışlardır. Çalışma, 3 farklı uygulama hızında (1 – 5 – 10 m/dk) ve 5 farklı uygulama mesafesinde (2 – 4 – 6 – 8 – 10 mm) gerçekleştirilmiştir. Deneysel veriler, atmosferik basınçlı hava plazma torcunun sadece yüksek oranda yüzey yağlayıcı tabakasının ortadan kaldırılması, böylece metal numunelerin solventsiz ve hızlı bir işleme temizlenmesi için değil, aynı zamanda alt tabaka yapışkan bağlanma mukavemetinde kayda değer bir iyileşme elde etmek için etkinliğini göstermişlerdir. Atmosferik basınçlı plazma uygulama başlığı ile temizlenmiş metalik numuneler gerçekten de kohezif yapışma modunda yüksek yapışma direnci (2 MPa'nın üzerinde) göstermiştir. Bu nedenle, işlemin tüm yağlayıcı kapsamını ortadan kaldırmadığı görülse de daha sonraki endüstriyel işlemler (yapışma, boyama vb.) için hazırlanmış yüksek oranda temizlenmiş bir yüzey oluşturduğu kanıtlanmıştır. Bu yöntemin etkinliğinin yanı sıra, kısa işlem süresi ve düşük çevresel etki avantajlarını da içerir. Dolayısıyla, hat içi süreç imkanı ve çevre dostu özellikleri göz önünde bulundurulduğunda, atmosferik basınçlı hava plazma uygulama başlığı endüstriyel proseslerde metal parçaların temizlenmesinde

kullanılmak üzere cazip bir ön işlem olarak görünmektedir (Rodríguez-Villanueva et al., 2013).

Turgut ve arkadaşı çalışmalarında, ıslanabilirliği iyi olan malzeme ile ıslanabilirliği kötü olan iki malzemede plazma uygulamanın, yapışma dayanımına etkisini incelemiştir. Kauçuk ve nonwoven malzeme yüzeylerine plazma işlemi uygulanmadığında çekme testi sonrasında yapıştırıcının büyük kısmının nonwoven malzeme üzerinde kaldığı görülürken, plazma işlemi uygulandıktan sonra her iki malzemede de yapıştırıcı kaldığı görülmüştür. Plazma uygulanan tüm numunelerin yapışmasında dayanımın arttığı görülmüştür. Yüzey geriliminin yapışma mukavemetine etkisinin pozitif olduğu sonucuna varmışlardır (Turgut and Çavdar, 2020).

Ayas ve arkadaşları çalışmalarında, atmosferik basınçlı plazmanın yüzey enerjisi üzerinde etkinliğini kanıtlamışlardır. Farklı plazma üretim tekniklerinin etkinliklerinin karşılaştırılması gerektiği vurgulanmıştır. Polipropilen malzeme yüzeyine atmosferik basınçlı plazma uygulandığında yüzeydeki polar grupların oluşması ve yüzey pürüzlülüğünün artması ıslanabilirliği artırmıştır. İşlem sonrasında malzeme yüzeyini oluşturan atomlarda yüzdesel (karbon oranı düşerken, oksijen ve azot oranları artması gibi) değişiklikler görülmüştür. Seri üretime uygunluğu, maliyetinin düşük olması, sistemin kolay olması ve yüzey aktivasyonunu sağlaması gibi birçok avantaj sağladığını vurgulamışlardır (Ayas vd., 2021).

Dal ve arkadaşı çalışmalarında, polilaktik asidin (PLA) yüzey enerjisini artırarak daha iyi yapışmasını sağlamak için plazma parametrelerinin (uygulama hızı, mesafesi ve tekrar sayısı) optimum değerlerini belirlemişlerdir. Çalışmada 3 farklı uygulama hızında (5 – 10 – 15 mm/s), 3 farklı uygulama mesafesinde (2 – 4 – 6 mm) ve 3 farklı uygulama sayısında (1 – 2 – 3 tekrar) deneyler gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalar için Taguchi L9 deney tasarımı kullanılmıştır. Islanma açısı üzerindeki en etkili plazma parametreleri belirlenmiştir. S/N grafiklerinde en büyük değer, en iyi seviyeyi ifade etmektedir. Temas açısı en düşük değerini almaktadır. Uygulama hızının temas açısı üzerinde en büyük etkiye sahip olduğu görülmektedir. Yüzey enerjilerinin artırılmasına etki eden parametreler incelenirken su damlacık denemeleri kullanılmıştır. Uygulama sonucunda yüzey enerjisinde artış sağlanmıştır (Dal and Çavdar, 2022).

Ayas ve arkadaşları çalışmalarında, yapışmanın daha iyi olabilmesi için alevle dağlama ve atmosferik basınçlı plazma uygulamasını polipropilen malzeme yüzeyine uygulamışlardır. Uygulanan iki yöntem karşılaştırılmıştır. İki yöntemde de yüzey enerjisi artmıştır. Ancak alevle dağlama yöntemi yüzeye bir miktar zarar vermiştir. Atmosferik basınçlı plazma, alevle dağlama yöntemine göre ıslanabilirlik ve yapışma özellikleri üzerinde üstünlük göstermiştir. Plazmanın yavaş uygulanması, hızlı uygulanmasına göre daha iyi sonuç vermiştir (Ayas vd., 2023).

Sönmez ve arkadaşları çalışmalarında, iki ayrı malzemenin (Polipropilen ve galvaniz kaplı çelik) yüzeyine atmosferik basınçlı soğuk plazma uygulayarak yüzey modifikasyonlarını incelemiştir. Uygulama sayısı ve mesafesinin iki malzeme üzerindeki etkileri ayrı ayrı incelenmiştir. Polipropilen malzeme üzerinde 3 farklı uygulama mesafesi (2 – 5 – 8 mm) ve 2 farklı uygulama sayısında (6 – 10 tekrar) deneyler gerçekleştirilirken, galvaniz kaplı çelik numunesi üzerinde 2 farklı uygulama mesafesi (2 – 5 mm) ve 2 farklı uygulama sayısında (6 – 10 tekrar) deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Plazma uygulama sonrasında temas açılarında iki malzemede de büyük oranda azalma olduğu görülmektedir. Uygulama mesafesinin kısa tutulması daha yüksek yapışma mukavemeti sağlamıştır. Polipropilen numunelerde yüzey ve yapıştırıcı arasındaki yapışmanın iyi olması sonucunda ayrılma sonrasında yapıştırıcının iki yüzeyde de kaldığı görülmektedir. Düşük uygulama sayısı ve mesafesinde en iyi sonuçları elde etmişlerdir. Uygulama mesafesinin kısa olması yüzeydeki etkinliği artırarak yüzeyin ıslanabilirliğini arttırdığını ve yapışma dayanımında yükselme olduğu sonucunda varmışlardır. 2 mm uygulama mesafesinde, 6 tarama sayısında elde edilen yapışma dayanımı değerlerinin 10 tarama sayısına göre daha yüksek olmasının; yakın mesafede tarama sayısının artmasına bağlı olarak yüzeyde bozulma meydana geldiği düşünülmektedir. Uygulama mesafesi 5 mm olduğu durumda ise mesafe biraz daha azaldığı için tarama sayısının artması yüzeyi olumsuz yönde fazla etkilemediği sonucuna varmışlardır (Sönmez vd., 2023).

Güler ve arkadaşları çalışmalarında, polipropilen ve polioksümetilen malzemeleri yüzeyine farklı uygulama hızı ve mesafe değerlerinde soğuk atmosferik basınçlı plazma uygulayarak malzemelerin yapışma durumundaki yüzey enerjileri ve yapışma dayanımlarını incelemiştir. Çalışma kapsamında, 2 farklı malzeme üzerine (Polipropilen - Polioksümetilen) 2 farklı yapıştırıcı ( G Force Erde - Marocol), 3 farklı uygulama hızı (0,5 – 1 – 1,5 cm/s) ve 2 farklı uygulama mesafesinde (1,5 – 2,5 mm) deneyler gerçekleştirilmiştir.

Plazma öncesinde temas açıları fazlayken, plazma sonrasında temas açılarında düşüş görülmektedir. İki yapıştırıcının da kullanıldığı yapıştırma işlemlerinde, dayanım plazma uygulandıktan sonra artmıştır. İki malzemede de plazma sonrasında yüzey enerjisi ve mekanik yapıştırma dayanımlarında iyileşme görülmüştür (Güler vd., 2023).

Tsai ve arkadaşları çalışmalarında, eş zamanlı kimyasal işlem ve plazma yüzey işlemiyle alüminyum alaşımı ve cam elyaf takviyeli termoplastik arasındaki yapışma mukavemetini arttırmayı amaçlamışlardır. Çalışmada, deşarj gücünün, uygulama süresinin ve gaz türünün alüminyum alaşımli levhaların yüzey yapısı üzerindeki etkisine odaklanılmıştır. Plazma işlemi alüminyum alaşımlarının yüzey ıslanabilirliğini büyük oranda artmıştır, ancak uygulama süresinin artması yüzey ıslanabilirliğini olumsuz etkileyebilmektedir. Nitrojen gazlı plazma işlemi ıslanabilirlik üzerinde en etkili gaz türüyken, argon gazlı plazma işlemi yüzey topografyasını değiştirmede etkilidir. Cam elyaf takviyeli termoplastik/alüminyum alaşımının yapışma mukavemeti artmıştır. Plazma işleminden sonra havadaki hidrokarbon kirliliği nedeniyle yüzey tekrar kirlenmektedir. Bu nedenle işlemin etkinliğinin sağlanması için zamanında işlemin önemli olduğunu vurgulamışlardır (Tsai et al., 2023).

Literatür incelendiğinde, farklı alüminyum alaşımları ve kompozit malzemelerin üzerine plazma uygulamasının yapışma dayanımını artırdığına dair çalışmalar mevcuttur. Ancak, özellikle korozyon direnci yüksek olan Al-5049 alaşımı üzerine plazma tedavisi uygulayan çalışmalara rastlanmamıştır. Çalışma, Al-5049 alaşımı üzerinde atmosferik basınçlı sıcak ve soğuk plazmaların yüzey üzerindeki etkinliğini, plazma parametrelerinin etkinliğini inceleyen ilk çalışmalardan biri olma niteliğini taşımaktadır. Ayrıca, mevcut literatürün büyük çoğunluğu deneysel çalışmalara odaklanmış olup, plazma parametrelerinin yapıştırma performansına etkisini matematiksel modellerle, sonlu elemanlar yöntemleri ve ileri optimizasyon teknikleriyle bütünleştirildiği çalışmalar sınırlıdır.

Bu çalışma iki kısımdan oluşmaktadır. 1.Etabında Al-5049 ile CFRP malzemelerin hibrit birleşimi, 2.Etabında ise Al-7075 T6 ile CFRP kompozit malzemelerin yapıştırma bağlantılarıyla hibrit birleşimi yapılmıştır.

Bu çalışmanın 1.Etabında, plazma deşarjının oluşturduğu basınca göre atmosferik basınçlı, elektrik yüklü ve kütleli parçaların sıcaklıkları arasındaki dengeye bağlı olarak soğuk ve sıcak plazmalar kullanılmıştır. 5049 alüminyum malzeme ile CFRP malzemelerinin

yapıştırma bağlantılarının daha iyi olması için sıcak ve soğuk atmosferik basınçlı plazma işlemi uygulanmıştır. Sıcak plazma için ayrı soğuk plazma işlemi için ayrı deney tasarımları yapılmıştır. Sıcak plazmada deney parametresi olarak 3 farklı uygulama mesafesi (10, 30 ve 50 mm) ve 3 farklı geçiş sayısı (1, 3 ve 5 tekrar) seçilmiştir. Soğuk plazmada ise 3 farklı uygulama mesafesi (10, 20 ve 30 mm) ve 3 farklı geçiş sayısı (1, 3 ve 5 tekrar) seçilmiştir. Yüzeyle plazma uygulamadan önce ve plazma uygulanmasından sonra su damlası kullanılarak temas açısı ölçümü yapılmıştır. Yüzeyle plazma uygulandıktan sonra Ergo 1675 marka yapıştırıcı kullanılarak yapıştırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Yapıştırılan parçalar çekme deneyine tabi tutulmuştur. Yüzeyle üzerinde kalan yapıştırma alanları tespit edilerek kayma kopma dayanımı belirlenmiştir. Elde edilen veriler değerlendirilerek plazma işleminin yapıştırma bağlantıları üzerine etkileri incelenmiştir.

Bu çalışmanın 2.Etabında, atmosferik basınçlı soğuk plazma yüzey tedavisinin CFRP kompozit malzemeler ile Al-7075 T6 alüminyum alaşımı arasındaki yapıştırma bağlantılarının performansı üzerindeki etkisi deneysel, sayısal ve istatistiksel yöntemlerin entegrasyonu ile incelenmiştir. Plazma işleminin etkinliğini değerlendirmek amacıyla, uygulama mesafesi (10, 20 ve 30 mm), uygulama sayısı (1, 3 ve 5 tekrar) ve uygulama hızı (5, 10 ve 15 mm/s) olmak üzere üç temel işlem parametresi ele alınmış ve tam faktöriyel deney tasarımı kullanılarak sistematik bir deneysel plan oluşturulmuştur. Plazma yüzey tedavisi öncesi ve sonrasında, yüzeylerin ıslanabilirlik özellikleri su damlası yöntemiyle temas açısı ölçümleri yapılarak değerlendirilmiştir. Plazma ile aktive edilen yüzeylerin belirlenen deneysel tasarıma uygun şekilde temas açıları ölçülmüş, sonrasında yapıştırılarak tek kademeli bindirme numuneleri hazırlanmış ve çekme deneyleri yapılarak bindirme kayma dayanımı hesaplanmıştır. Elde edilen deneysel sonuçlar varyans analizi (Analysis of Variance / ANOVA) ile değerlendirilmiş ve Yanıt Yüzey Metodu (Response Surface Methodology / RSM) kullanılarak süreç-çıktı ilişkilerini temsil eden matematiksel modeller ayrı ayrı oluşturulmuştur. Giriş parametreleri sonucunda elde edilen yapıştırma dayanımları ve temas açısı değerleri üzerinde etkin olan parametreler ve parametrelerin katkı oranları belirlenmiş, parametrelerin anlamlılık düzeyleri değerlendirilmiştir. Yapıştırma bağlantılarındaki gerilme dağılımlarını ve mekanik davranışı daha ayrıntılı biçimde incelemek amacıyla, sayısal analizler LS-DYNA sonlu elemanlar yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, plazma işlem parametrelerinin çok amaçlı olarak optimize edilmesi amacıyla Baskın Olmayan Sıralama Genetik Algoritması II (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II / NSGA-II) kullanılmış; temas açılarının minimize edilmesi ve

bindirme kayma dayanımının maksimize edilmesine yönelik Pareto-optimal çözüm kümesi elde edilmiştir. Önerilen deneysel–sayısal–optimizasyon tabanlı yaklaşım sayesinde, deneysel maliyetler azaltılırken plazma işlem parametrelerinin yapıştırma performansı üzerindeki etkileri kapsamlı ve güvenilir biçimde değerlendirilmiştir.

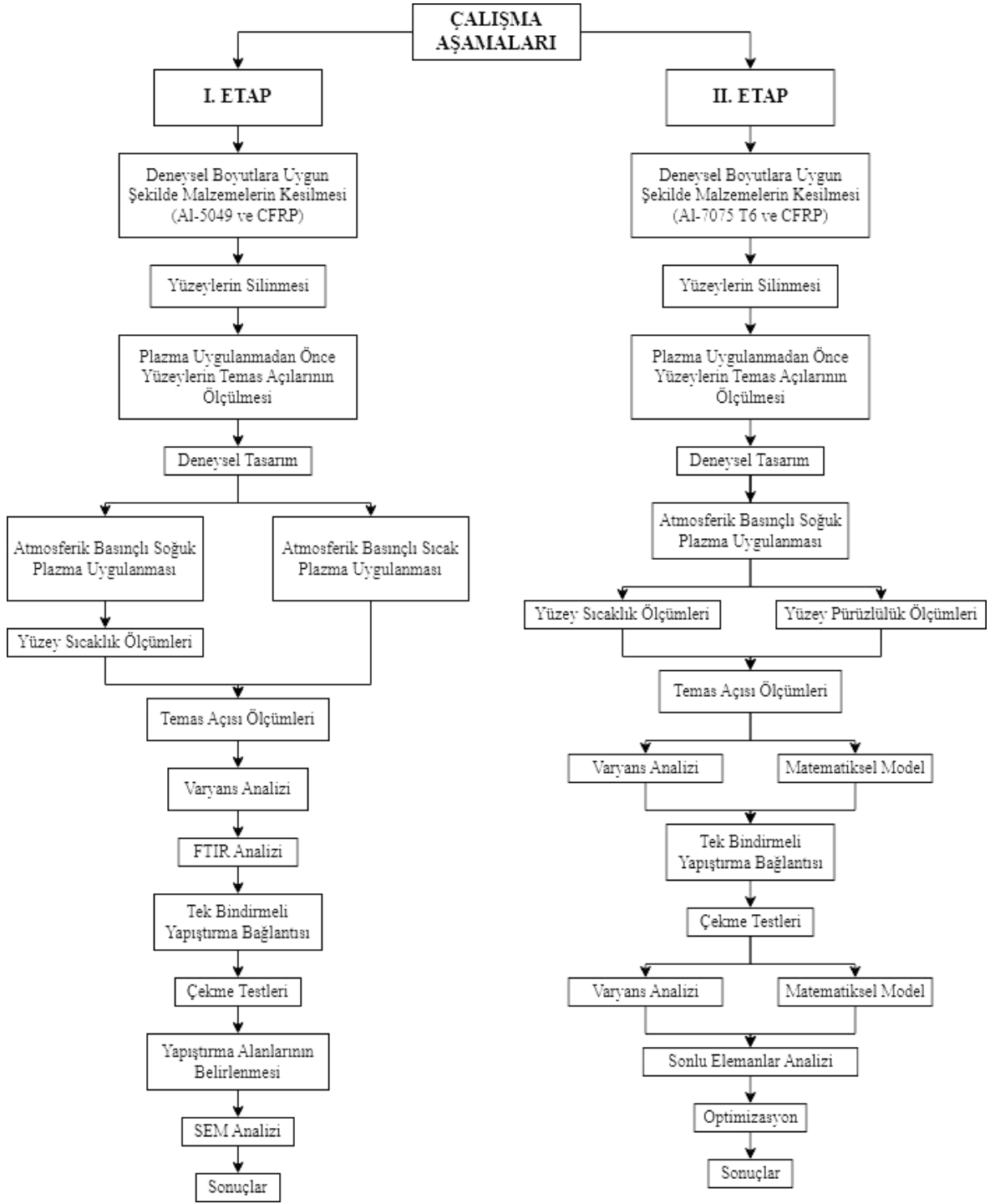
## 2. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışma, Şekil 2.1’de sunulduğu üzere iki aşamadan oluşmaktadır. Tez çalışması, plazma yüzey işlemlerinin metal–kompozit ara yüzeyindeki fiziksel ve mekanik etkilerinin sistematik ve çok yönlü olarak ortaya konulması esasına dayanmaktadır. Bu kapsamda deneysel uygulamalar, yüzey karakterizasyon analizleri, mekanik testler, sayısal modellemeler ve istatistiksel değerlendirmeler bütüncül bir yaklaşımla ele alınmıştır.

İlk etapta; Al 5049 malzeme ile karbon fiber destekli polimer kompozit malzemelerin yüzeyleri üzerinde atmosferik basınçlı soğuk ve sıcak plazmaların etkinliği araştırılmıştır. Bu aşamada plazma türünün (soğuk ve sıcak plazma) ve plazma parametrelerinin yüzey özellikleri üzerindeki etkileri ayrıntılı olarak incelenmiştir. Özellikle plazma türünün ve işlem parametrelerinin temas açıları üzerindeki etkileri değerlendirilmiş; yüzey enerjisi değişimleri ve ıslanabilirlik davranışı analiz edilmiştir. Bununla birlikte, plazma uygulamalarının malzeme karakterizasyonu üzerindeki etkileri ortaya konulmuş ve yüzeyde meydana gelen fiziksel ve kimyasal değişimler incelenmiştir. Ayrıca plazma parametrelerinin yapıştırma bağlantılarının mekanik performansı üzerindeki etkileri deneysel olarak değerlendirilmiş ve yüzey aktivasyonu ile bağlantı dayanımı arasındaki ilişki analiz edilmiştir.

İkinci etapta ise Al 7075-T6 malzeme ile karbon fiber destekli polimer kompozit malzemelerin yüzeyleri üzerinde atmosferik basınçlı soğuk plazmanın etkinliği deneysel, sayısal ve istatistiksel yöntemler kullanılarak kapsamlı biçimde incelenmiştir. Bu aşamada plazma parametrelerinin temas açısı üzerindeki etkileri sistematik olarak değerlendirilmiş, elde edilen veriler üzerinden varyans analizleri gerçekleştirilmiş ve temas açısının tahminine yönelik matematiksel modeller oluşturulmuştur. Benzer şekilde, yapıştırma bağlantıları üzerindeki plazma parametrelerinin etkileri deneysel olarak belirlenmiş; bindirme kayma dayanımı sonuçları istatistiksel yöntemlerle analiz edilerek matematiksel modeller geliştirilmiştir.

Plazma işleminin mekanik performans üzerindeki etkisini daha ayrıntılı değerlendirebilmek amacıyla sonlu elemanlar yöntemi kullanılmış ve deneysel sonuçlar sayısal analizlerle desteklenmiştir. Böylece deneysel bulgular ile sayısal model sonuçları karşılaştırılarak modelin temsil kabiliyeti değerlendirilmiştir.



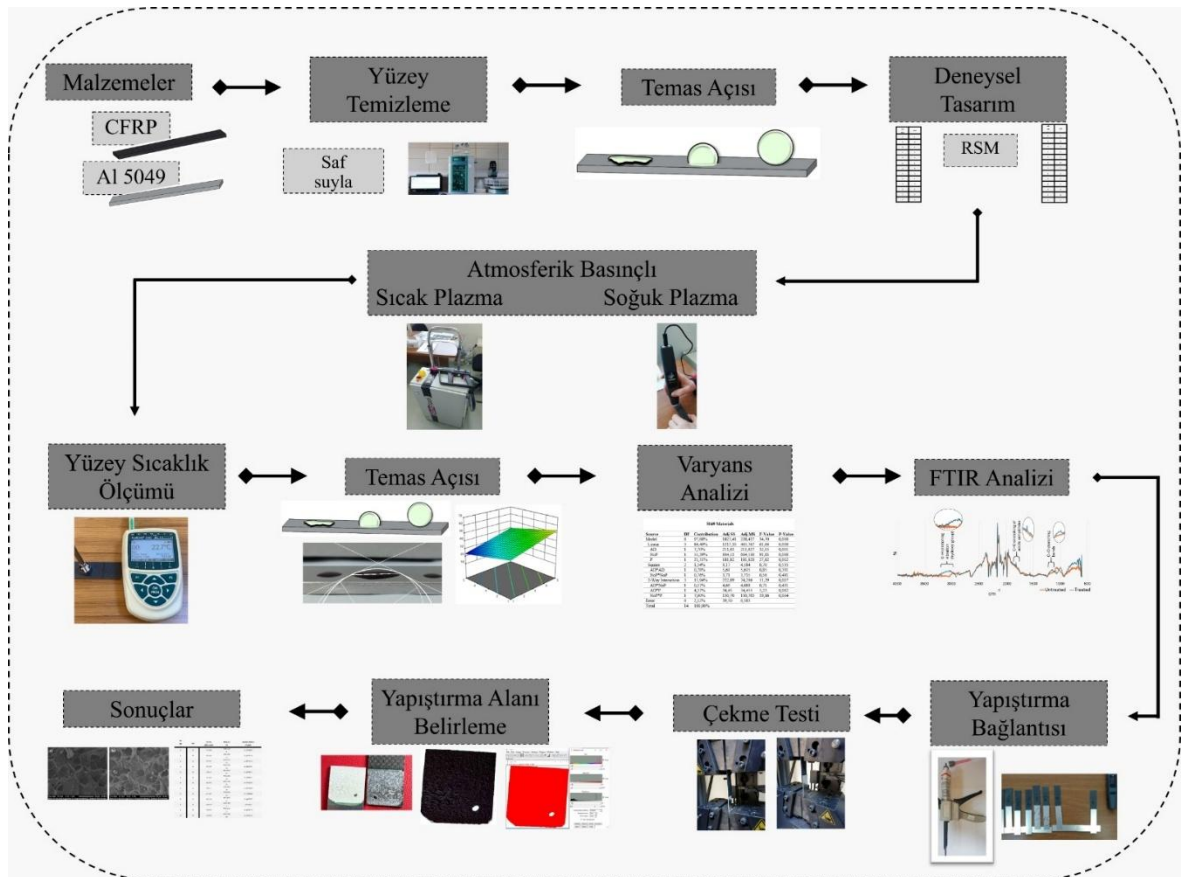
**Şekil 2.1:** Akış diyagramları

Ayrıca, çok amaçlı optimizasyon yöntemleri kullanılarak en düşük temas açısı ve en yüksek bindirme kayma dayanımı değerlerini sağlayan parametre kombinasyonları belirlenmiş; yüzey aktivasyonu ile mekanik dayanım arasındaki denge optimize edilmiştir. Bu iki aşamalı yapı sayesinde, plazma işlem parametrelerinin hem yüzey özellikleri hem de yapıştırma

bağlantı performansı üzerindeki etkileri bütüncül ve karşılaştırmalı bir yaklaşımla ortaya konulmuştur.

## 2.1 I. Etap CFRP ve Al 5049 Alaşımının Yapıştırılması

I. etabın süreci, Al-5049 ve CFRP malzemelerin belirlenen deneysel boyutlara getirilmesi, yüzeyin temizlenmesi, plazma tedavisi uygulanmamış yüzeylerin temas açılarının ölçülmesi, deneysel tasarımın oluşturulması, tasarıma bağlı olarak plazma işlemlerinin uygulanması, numunelerin yapıştırılması, plazma uygulanan yüzeylerin temas açılarının ölçülmesi, temas açıları için istatistiksel analizlerin yapılması, Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi (FT-IR) analizinin yapılması, çekme testlerinin yapılması, ayrılan yüzeylerden yapıştırma alanlarının belirlenmesi, ayrılan yüzeylerin Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ile incelenmesi ve sonuçların değerlendirilmesi şeklindedir (Şekil 2.2).



Şekil 2.2: I. etap akış şeması

Çalışmanın bu etabında Al-5049 alaşımı ve karbon fiber takviyeli polimer kompozit malzemeler tercih edilmiştir. Al-5049 alaşımı, iyi korozyon direnci, yüksek tokluk ve düşük

yoğunluk gibi avantajların yanı sıra temel alaşım elementlerinden biri olan magnezyumun alüminyum ile alaşım oluşturması sayesinde yüksek sıcaklıklara dayanıklı bir yapıya sahiptir (Abdelhady et al., 2023; Leszczyńska-Madej et al., 2017; Poletti et al., 2010; W. Wen et al., 2005). Al-5049'a ait kimyasal bileşenler Tablo 2.1'de, mekanik özellikler ise Tablo 2.2'de verilmiştir. Karbon fiber destekli polimer kompozitler rijitliği yüksek, yoğunluğu düşük, dayanım ve elastisite modülü yüksek bir yapıya sahiptir (Pramanik et al., 2017). Karbon fiber destekli polimer kompozite ait malzeme özellikleri Tablo 2.3'te verilmiştir.

**Tablo 2.1:** Alüminyum 5049 kimyasal bileşenleri

Element	Mg	Mn	Fe	Si	Cr	Cu	Zn	Ti	Diğer
% Oran	2,1	0,6	0,41	0,32	0,1	0,05	0,05	0,03	0,04

**Tablo 2.2:** Alüminyum 5049 mekanik özellikler

Mekanik Özellikler	Çekme Dayanımı (MPa)	Akma Dayanımı (MPa)	Kopma Uzaması
Değer	200	112	23

**Tablo 2.3:** Karbon fiber destekli polimer kompozit malzeme özellikleri

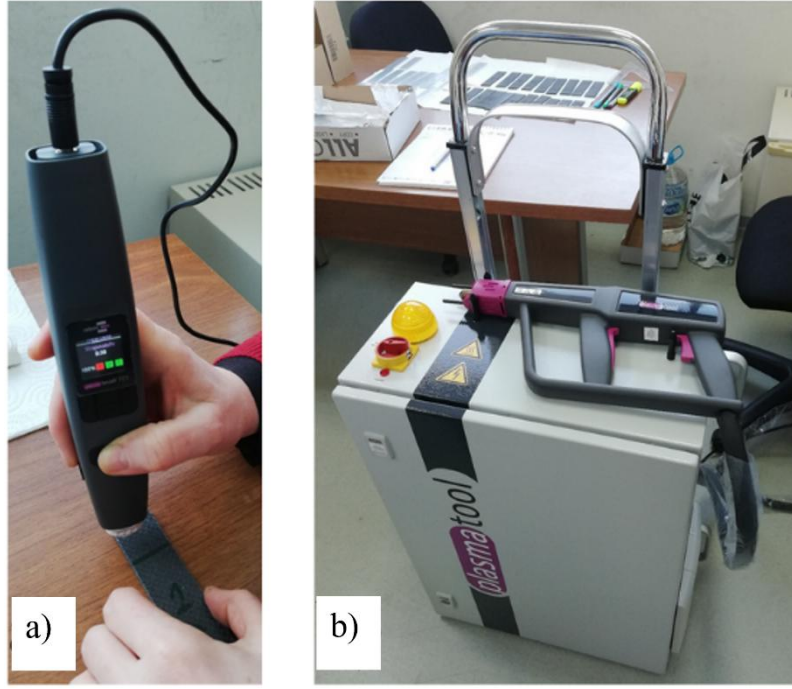
Özellik	Açıklama
Örgü Tipi	3K Plain (Bez) dokuma
Birim Alan Ağırlığı	200±%5 g/m <sup>2</sup>
Elyaf Tipi	3K HS Yüksek Dayanımlı Karbon Elyaf
Elyaf Yoğunluğu	1,79 g/cm <sup>3</sup>
Çekme Dayanımı (Elyaf)	3800 MPa
Elastisite Modülü (Elyaf)	240 GPa
Kopma Uzaması	%1,6
Karbon Oranı	%95

3 mm kalınlığındaki alüminyum 5049 H111 serisi levhalardan 25 × 100 mm boyutlarında numuneler kesilmiştir. 3 mm kalınlığında, çapraz katmanlı [(0/90)<sub>6</sub>]<sub>s</sub> CFRP levhalar; yüzey yoğunluğu 200 g/m<sup>2</sup> olan, düz dokuma yapısına sahip 3K yüksek dayanımlı karbon fiber kumaş kullanılarak vakum infüzyon yöntemiyle üretilmiştir. Bu levhalardan da 25 × 100 mm boyutlarında numuneler kesilmiştir. Test numuneleri, ASTM D5868-95 standardına uygun olarak 25 mm genişlik, 100 mm uzunluk ve 3 mm kalınlıkta üretilmiştir/kesilmiştir.

Deney numunelerinin yüzeylerinde kir, toz ve yağ gibi istenmeyen veya yüzeyi olumsuz etkileyen etmenlerden arındırmak için saf su ve mikrofiber bezlerle yüzeyler silinerek temizlenmiştir.

Çalışma kapsamında, yüzeylerin aktivasyonu ve yüzeylerin kirden arındırılması için Relyon Plasma firmasının geliştirdiği atmosferik basınçlı soğuk plazma olan Piezobrush PZ3 ve atmosferik sıcak plazma olan PlasmaTool el tipi plazma cihazları kullanılmıştır (Şekil 2.3). Piezobrush PZ3, düşük sıcaklıklarda maksimum 18W güç tüketiminde piezoelektrik doğrudan deşarj teknolojisiyle birçok malzemenin yüzey enerjisini artırmak ve temizlemek için kullanılmaktadır (FCB Arge, 2024). Cihaz Hava, Azot, Helyum ve Argon gazları gibi farklı gaz türleriyle de kullanılabilir (Tsai et al., 2023). Piezobrush PZ3 cihazı; temizleme, mikropordan arındırma, yapıştırma ve boyama işlemleri öncesinde genellikle tercih edilmektedir (Deshmukh and Bhat, 2011). Çalışmanın bu etabında cihaz ortam havasıyla kullanılmıştır.

PlasmaTool, yüksek sıcaklıklarda maksimum 1300W güç tüketiminde birçok malzemenin yüzey temizleme, yüzey aktivasyonu, pas çıkarma ve ön hazırlığının yapılmasında kullanılmaktadır. Cihaz içinde dahili olarak basınçlı hava üretilmekte olup, otonom bir hava kaynağı entegre edilmiştir. PlasmaTool cihazı, pas çıkarma, temizleme, yüzey aktivasyonu, yapıştırma ve boyama işlemleri öncesinde ön hazırlık için genellikle tercih edilmektedir (FCB Arge, 2025). Çalışmanın bu etabında, basınçlı hava şebekesinden bağımsız cihaza entegre edilmiş tamamen otonom bir hava kaynağıyla plazma işlemi yapılmıştır.

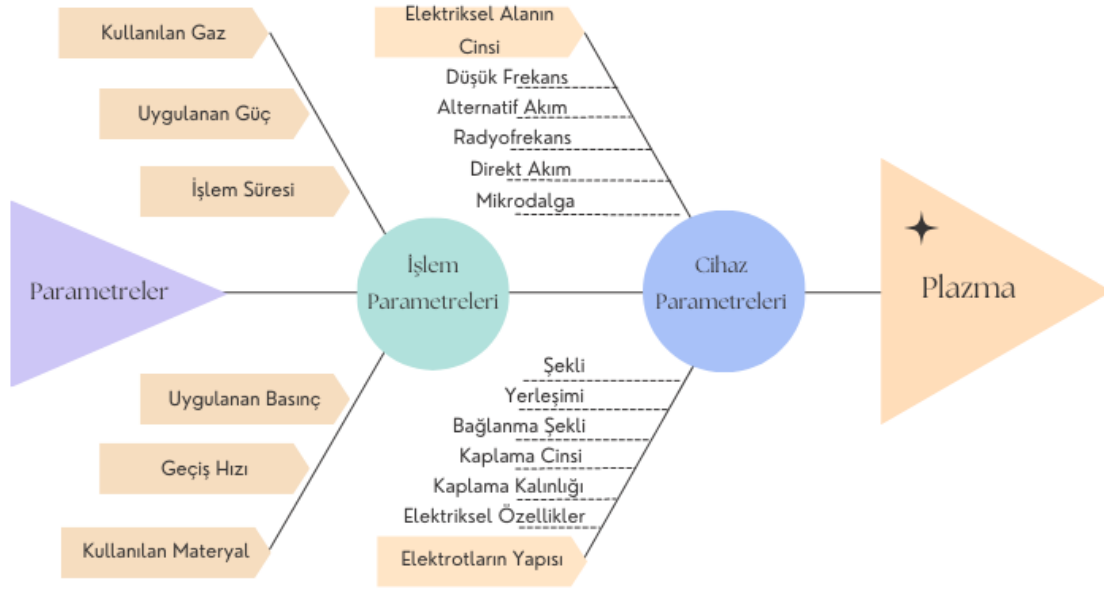


**Şekil 2.3:** Plazma cihazı a) atmosferik basınçlı soğuk plazma cihazı, b) sıcak plazma cihazı

Şekil 2.4’te gösterildiği üzere plazma işlemine etki eden temel parametreler proses ve cihaz parametreleridir (Bárdos and Baránková, 2010; Bellan, 2006; Laroussi and Akan, 2007; Patel and Bhowmik, 2017; Penkov et al., 2015; Schutze et al., 1998). Bu etapta, atmosferik basınçlı soğuk ve sıcak plazma için uygulama mesafesi ve uygulama sayısı dikkate alınmıştır. Tablo 2.4’te sunulduğu üzere, uygulama mesafesi olarak 3 farklı değer (1, 2, 3 cm), uygulama sayısı olarak 3 farklı değerde (1, 3, 5) atmosferik basınçlı soğuk plazma işlemi uygulanmıştır. Atmosferik sıcak plazmada ise uygulama mesafesi olarak 3 farklı değer (1, 3, 5 cm), uygulama sayısı olarak 3 farklı tekrarda (1, 3, 5) plazma işlemi uygulanmıştır.

**Tablo 2.4:** I. etap deney parametreleri ve seviyeleri

Parametreler		Seviyeler
Atmosferik Basınçlı Sıcak Plazma	Uygulama Mesafesi (cm)	1 – 3 – 5
	Uygulama Sayısı	1 – 3 – 5
Atmosferik Basınçlı Soğuk Plazma	Uygulama Mesafesi (cm)	1 – 2 – 3
	Uygulama Sayısı	1 – 3 – 5



**Şekil 2.4:** Plazma işlemine etki eden parametreler

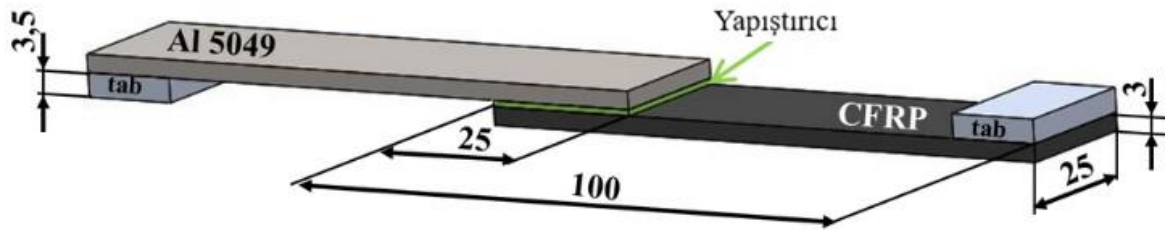
Malzeme yüzeyinin ıslanabilirliği, yüzeye sürülen yapıştırıcının malzeme yüzeyine nüfuz etmesini temsil etmektedir (Peta et al., 2021). Su temas açısı ölçümüyle yüzeylerin ıslanabilirliğinin derecesi ifade edilmektedir. Yüzey enerjisinin düşük veya yüksek olması Şekil 1.3'te gösterildiği gibi düşük yüzey enerjisinde damlanın kendi enerjisini koruma isteğinden dolayı küresel bir formda kalırken, yüksek yüzey enerjisinin olduğu yüzeyde malzeme yüzeyine dağılarak film tabakası oluşturmayı sağlamaktadır. Yüzey enerjisinin düşük olması yüzeyin ıslanabilirliğinin düşük olduğunu, yüksek olması ise ıslanabilirliğinin yüksek olduğunu ifade etmektedir. Islanabilirliği düşük yüzeyde damla/yapıştırıcı küresel şekilde kaldığında, yüzeyin ıslanabilirlik kabiliyetinin düşük olduğu anlaşılır (Cho et al., 2022). Bu durum ise yapıştırma işlemlerinde istenmeyen bir durumdur (Kanbir vd., 2022; Zou et al., 2023). Temas açısının azalması yani yüzeye damlacığın yayılması istenen bir durum olup, malzemenin yüzey enerjisinin ve ıslanabilirlik kabiliyetinin yüksek olduğunu göstermektedir (Savotchenko and Kovaleva, 2023). Alüminyum ve kompozit numunelerinin yüzeylerine soğuk ve sıcak plazma uygulamadan önce ve uygulandıktan sonra ıslatma deneyleri yapılarak temas açıları image J programıyla ölçülmüştür.

Atmosferik basınçlı soğuk plazma ve sıcak plazma için ayrı ayrı deney tasarımı yapılmıştır. Deney tasarımı, değişken parametrelerin sınırı içerisinde uygun noktaları ve uygun parametre değerlerini belirleyerek yanıtın daha uygun biçimde incelenmesini sağlamaktadır (Allen, 2010; Khuri and Mukhopadhyay, 2010). Deney tasarımı oluşturulurken 3 farklı

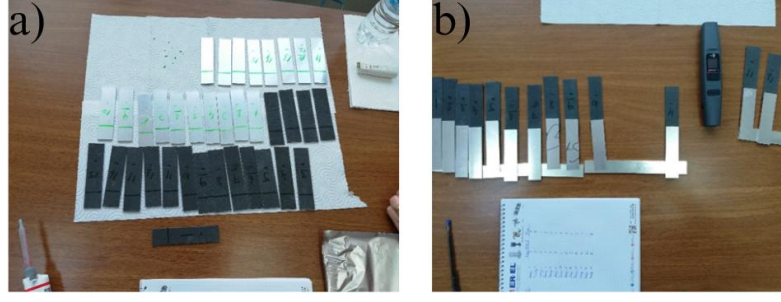
uygulama mesafesi ve 3 farklı geçiş sayısı seçilmiştir. Deney tasarımında Yanıt Yüzey Metodu (Response Surface Methodology) kullanılarak Merkezi Kompozit Tasarım (central composite design) oluşturulmuştur. Merkezi Kompozit Tasarım, sıklıkla kullanılan deney tasarımı türlerinden biridir (Jensen, 2017). Sınır değerler içerisinde tasarım oluşturmak için küp noktaları seviyesi (cube points level) yaklaşımı kullanılmıştır. RSM'nin sunduğu 13 deney, atmosferik basınçlı soğuk plazma ve sıcak plazmayla yapılmıştır.

Alüminyum 5049 ve karbon fiber takviyeli polimer kompozit yüzeylere, oda sıcaklığında, 2 cm uygulama mesafesinde ve 3 geçiş sayısında (yaklaşık 7,2 saniye) plazma işlemi uygulanmıştır. Yüzeyde meydana gelen sıcaklık değişimleri, Almemo E4 Typ K (NiCr) termokupl ile ölçölmüş ve Almemo 2590–3S veri kaydedici kullanılarak kayıt altına alınmıştır.

Tek bindirmeli yapıştırma bağlantılarının çekme testlerinde, alüminyum 5049 ve karbonfiber destekli polimer kompozit malzemelerin birleştirilmesinde Ergo-1675 çift bileşenli metakrilat yapıştırıcı kullanılmıştır. Yapıştırıcının oda sıcaklığında kürlenme süresi oldukça kısa olup, hafif kokuya, yüksek elastiklik ve kopma uzamasına sahiptir. Yapıştırıcı +12°C ile +25°C arasında hızlı bir şekilde kürlenmektedir (PF Teknik, 2024). şekil 2.5'te gösterildiği üzere 25x25 mm<sup>2</sup>'lik bir alana yapıştırıcı uygulanmış ve deney numuneleri uç kısımlarından yapıştırılmıştır. Yapıştırma işlemi sonrasında ilk kürlenme 2-3 dakika arasında gerçekleşmiştir. Sonrasında deney numuneleri nihai kürlenmesine ulaşması için 24 saat oda sıcaklığında tutulmuştur (şekil 2.6). Hazırlanan numuneler, plazma uygulanmasının yapışma dayanımına etkisinin incelenmesi için çekme testlerine tabi tutulmuştur.



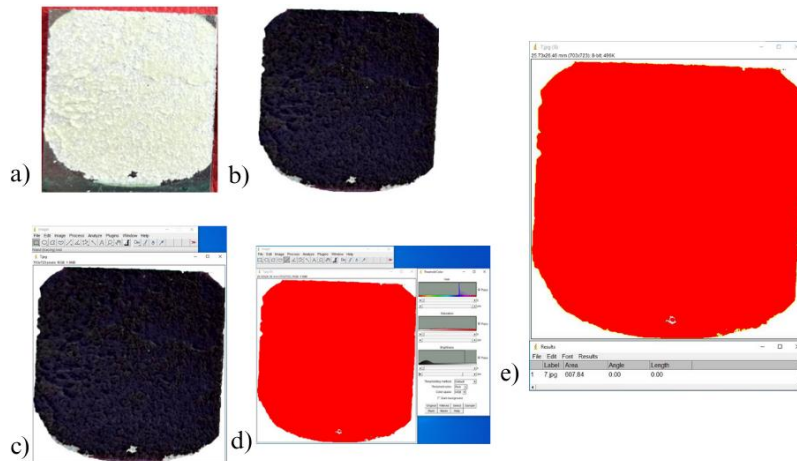
şekil 2.5: Yapıştırılmış numune boyutları



**Şekil 2.6:** Deney numuneleri a) yapıştırma işlemi öncesi, b) yapıştırılmış numuneler

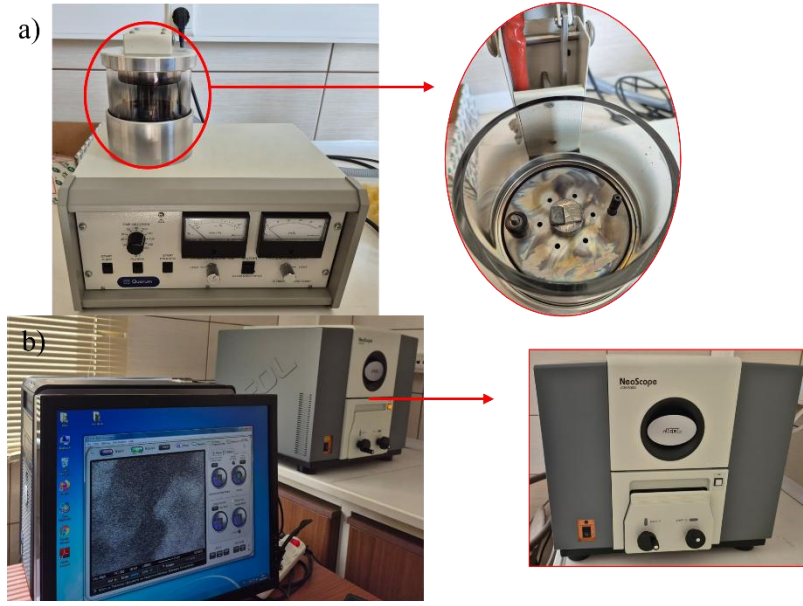
Deney tasarımına uygun olarak oluşturulan plazma ile yüzey işlemleri sonrasında yapılan yapıştırma işlemlerinde yapıştırıcının yüzeylere tutunmasını incelemek için çekme testleri yapılmış ve yapışma dayanımında oluşan farklılıklar incelenmiştir. Tek bindirmeli yapıştırma bağlantısının testi için Zwick/Roell marka 250 kN kapasiteli çekme test cihazı kullanılmıştır. Çekme testleri ISO 4578 standardına uygun bir şekilde 1,3 mm/dk hızında gerçekleştirilmiştir.

Çekme testleri sonrasında ayrılan yüzeylerde kalan yapıştırıcılar incelenmiş ve bazı numunelerde yapıştırıcının yüzeye etkin bir şekilde yayılmadığı görülmüştür. Bu nedenle 25x25 mm<sup>2</sup> lik alana ne kadar yapıştırıcı temas ettiğini belirlenmiştir. Hava kabarcıkları veya numunelerin bastırılması sonucu dağılmayan yapıştırıcılardan dolayı oluşan boşluklar belirlenmiştir. Şekil 2.7’de gösterildiği üzere açık kaynak olan image J programı kullanılarak yapıştırıcı alanları tespit edilmiştir.



**Şekil 2.7:** Al5049 yüzeyinde kalan yapıştırıcı alan ölçüm adımları a) Yüzeyde kalan yapıştırıcının gerçek görseli, b) Yapıştırıcı alanının ayrılması, c) Alanın program içerisine aktarılması, d) Alandaki boşluklu yapıların çıkarılması, e) Alanın belirlenmesi

Atmosferik basınçlı soğuk ve sıcak plazma işlemleri ile yüzey aktivasyonu gerçekleştirildikten sonra, tek bindirmeli yapıştırma bağlantısıyla birleştirilen numunelere çekme testleri uygulanmış ve ayrılma davranışları incelenmiştir. Çekme testi sonrasında ayrılan yüzeyler 60 saniye süre püskürtmeyle kaplama işlemine tabi tutulmuş ve ardından Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) (10 kV hızlandırma gerilimi, X300 kat büyütme) kullanılarak analiz edilmiştir (Şekil 2.8).



**Şekil 2.8:** Taramalı elektron mikroskobu, a) kaplama işlemi, b) görüntü alma

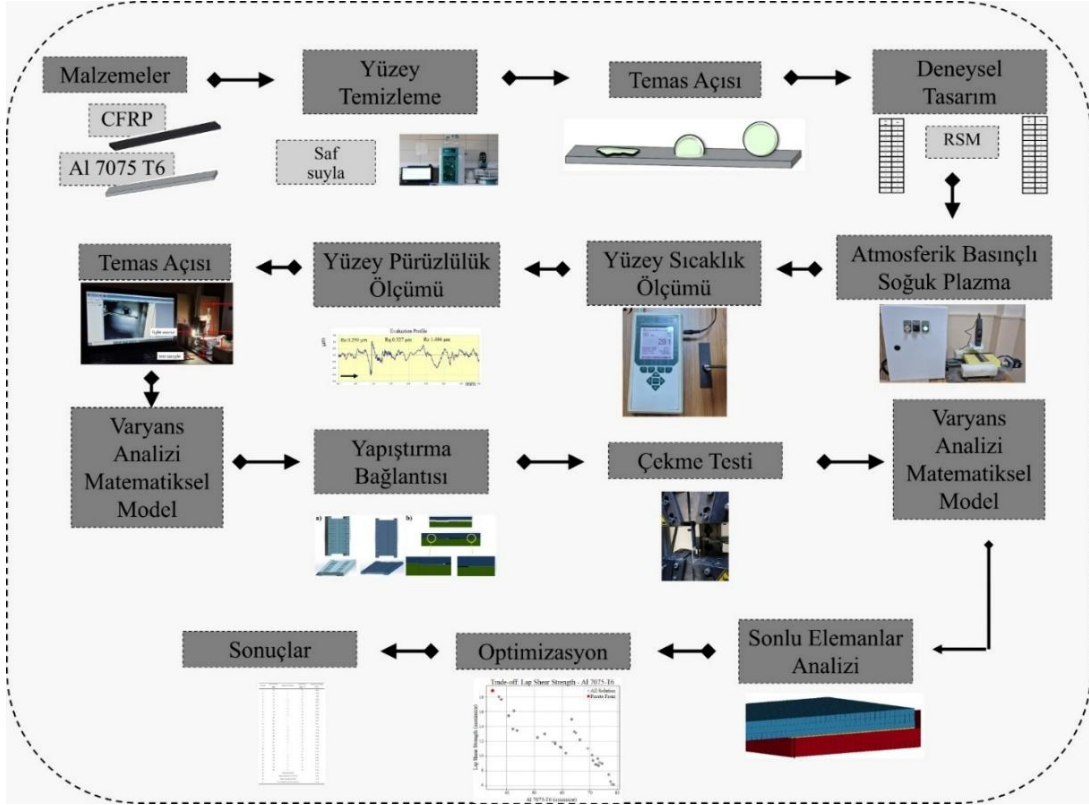
Atmosferik basınçlı plazma işlemi uygulanmış ve uygulanmamış 5049 alüminyum ve CFRP numunelerinin yüzey kimyasal değişimleri Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (FT-IR) ile incelenmiştir (Şekil 2.9). Plazma uygulanmamış ve atmosferik basınçlı soğuk plazma ile aktive edilmiş numunelere ait FT-IR spektrumları, plazma işleminden hemen sonra 4000–400  $\text{cm}^{-1}$  dalga sayısı aralığında PerkinElmer Spectrum 65 model FT-IR spektrometresi kullanılarak elde edilmiştir. Her iki malzeme için plazma işlemi öncesi ve sonrası yüzey kimyasal grupları ile oluşan farklılıklar belirlenmiştir.



**Şekil 2.9:** FT-IR spektrometresi

## **2.2 II. Etap CFRP ve Al 7075 T6 Alaşımının Yapıştırılması**

II. etap çalışma sürecinde; birleştirilecek malzemelerin belirlenmesi ve standartlara uygun olarak kesilmesi, yüzeylerin silinmesi, işlem uygulanmamış yüzeylerde temas açılarının ölçülmesi, deneysel tasarımın oluşturulması, atmosferik basınçlı soğuk plazma işleminin uygulanması, plazma işlemi sonrasında yüzey sıcaklığı değişimlerinin incelenmesi gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda yapıştırılacak parçaların yüzey pürüzlülüklerinin belirlenmesi, plazma uygulanmış yüzeylerin temas açılarının ölçülmesi, varyans analizi yapılması ve matematiksel model geliştirme çalışmaları yürütülmüştür. Devamında yapıştırma bağlantıları oluşturulmuş, çekme testi ile maksimum bindirme kayma dayanım değerleri ölçülmüş, bindirme kayma dayanımı için varyans analizi yapılmış ve matematiksel model geliştirilmiştir. Son aşamada sonlu eleman analizleri gerçekleştirilmiş ve NSGA-II algoritması kullanılarak optimizasyon yapılmıştır (Şekil 2.10).



**Şekil 2.10:** II. etap akış şeması

Çalışmanın bu etabında, mukavemet/ağırlık oranı, yorulma dayanımı, aşınma direnci yüksek ve mekanik özelliklerinin iyi olması nedeniyle havacılık ve savunma sanayide yaygın bir şekilde kullanılan Alüminyum 7075-T6 malzemesi kullanılmıştır. Ayrıca mukavemeti, elastisite modülü, sertliği yüksek ve yoğunluğunun düşük olmasından dolayı endüstride yaygın kullanım alanına sahip CFRP kompozit malzemeler kullanılmıştır. 350x350 mm boyutlarında 3 mm kalınlığında çapraz yerleşimli [(0/90)<sub>6</sub>]s CFRP kompozit levhalar, 200 g/m<sup>2</sup> olan düz dokuma yapıya sahip 3K yüksek mukavemetli karbon fiber kumaşlar kullanılarak vakum infüzyon yöntemiyle üretilmiştir. Alüminyum 7075-T6 ile CFRP kompozitin birleştirilmesiyle hafiflik, yüksek mukavemet, yorulma dayanımı yüksek ve darbe direnci fazla olan yapılar elde edilmektedir. Bu yapıların yapıştırılması; cıvata, perçin ve kaynak bağlantılarının dezavantajlarından kaçınarak mekanik özellikleri etkilenmeden, lif/matris yapısı bozulmadan daha homojen bir gerilme dağılımıyla kullanılmasını sağlamaktadır. ASTM D5868-95 standardına uygun olarak 25 mm genişliğe, 100 mm uzunluğa ve 3 mm kalınlığa sahip numuneler iki malzemedен de üretilmiş/kesilmiştir.

Bu etapta, Relyon Plasma firması tarafından geliştirilen Piezobrush PZ3 atmosferik basınçlı soğuk plazma cihazı kullanılmıştır. Düşük sıcaklıklarda maksimum 18 W güç tüketerek çalışan Piezobrush PZ3, piezoelektrik doğrudan deşarj teknolojisiyle birçok farklı malzemenin yüzeyini temizlemek ve yüzey enerjisini artırmak için kullanılmaktadır (FCB Arge, 2024). Piezobrush PZ3 Hava, Azot, Helyum ve Argon olmak üzere farklı gaz türleriyle de çalışabilmektedir (Deshmukh and Bhat, 2011). Cihaz, yüzey temizleme, yüzey ıslanabilirliğini artırma, mikroplardan arındırma, yapıştırma ve boyama işlemi öncesi hazırlık amacıyla birçok farklı alanda tercih edilmektedir (Tsai et al., 2023). Atmosferik basınçlı soğuk plazma işlemine etki eden temel proses parametreleri; gaz türü, güç, malzeme türü, uygulama mesafesi, uygulama sayısı ve uygulama hızıdır. Bu etapta da, ortam havası kullanılarak, malzeme türü, uygulama mesafesi, uygulama sayısı ve uygulama hızı parametreleri dikkate alınmıştır. Şekil 2.11’de sunulan atmosferik basınçlı soğuk plazma tedavisi için hazırlanan deney düzeneği ile deneyler gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmada metal ve polimer yüzeylere ayrı ayrı plazma tedavisi uygulanmıştır. Atmosferik basınçlı plazma işlemi, literatür ve tecrübelerle dayanarak uygulama mesafesi plazma nozulu ile yüzey arasında 10, 20 ve 30 mm uzaklık, uygulama sayısı olarak 1, 3 ve 5 paso ve uygulama hızı ise 5, 10 ve 15 mm/s hızları tercih edilerek gerçekleştirilmiştir (Tablo 2.5).

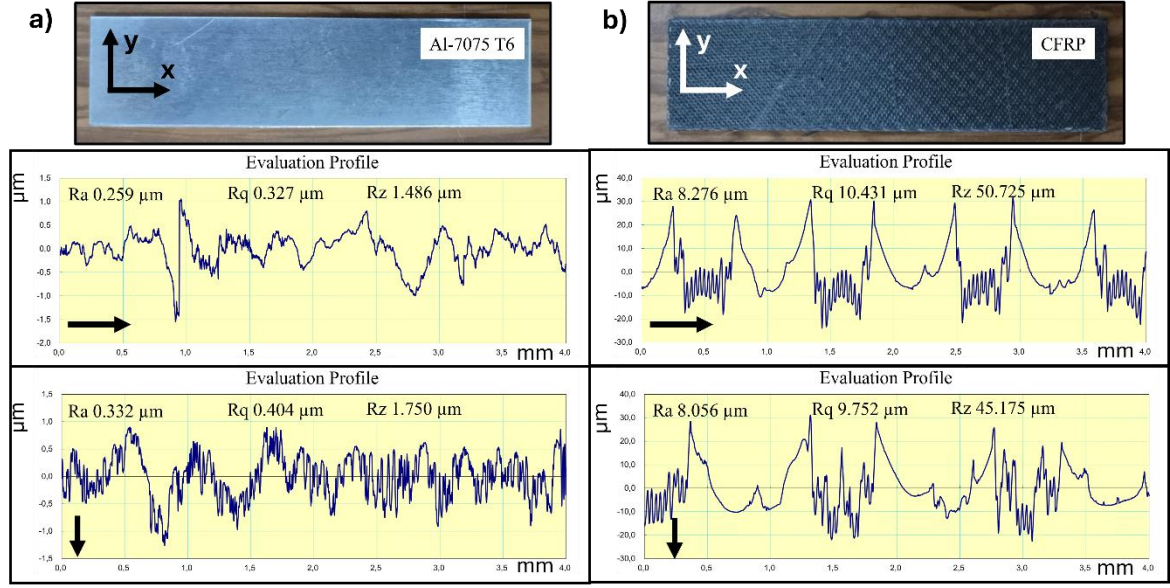
**Tablo 2.5:** II. etap deney parametreleri ve seviyeleri

Parametreler	Seviyeleri
Uygulama Mesafesi (mm)	10 – 20 – 30
Uygulama Sayısı	1 – 3 – 5
Uygulama Hızı (mm/s)	5 – 10 – 15



**Şekil 2.11:** Atmosferik basınçlı soğuk plazma uygulama sistemi

Üretilen/kesilen parçalar, kesme işlemlerinden veya ortamdan dolayı yüzeylerinde kir, toz ve yağ gibi yapıştırma işlemini olumsuz etkileyecek etmenlerden arındırmak için mikrofiber bezlerle silinerek temizlenmiş, plazma uygulamadan önceki ön hazırlığı tamamlanmıştır. Yüzeylerin ortalama yüzey pürüzlülük değerleri Mitutoyo SJ310 cihazıyla Şekil 2.12’de gösterildiği üzere x ve y yönünde tespit edilmiş olup, Al-7075 T6 yüzeyinde Ra yaklaşık 0.3  $\mu\text{m}$ , CFRP kompozit yüzeyinde ise yaklaşık Ra 8.2  $\mu\text{m}$  olarak ölçülmüştür.

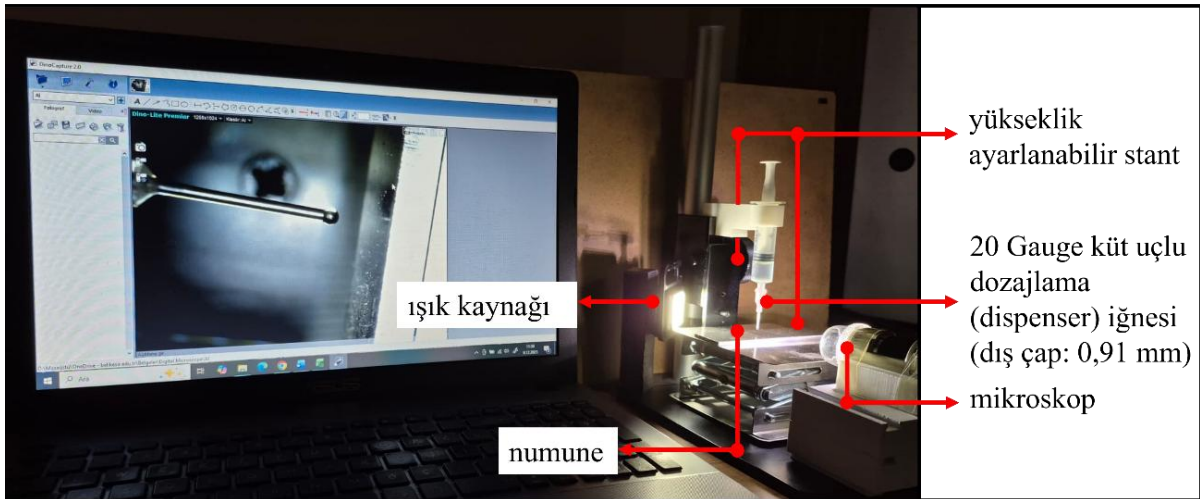


**Şekil 2.12:** Yüzey pürüzlülük değerleri a) Al-7075 T6 yüzey pürüzlülük değeri, b) CFRP yüzey pürüzlülük değeri

Üç farklı parametrenin her biri için üçer seviye belirlenerek, tanımlanan parametre aralıkları içinde tüm kombinasyonları incelemek amacıyla tam faktöriyel deney tasarımı uygulanmıştır. Parametrelerden uygulama mesafesi ve uygulama hızı nümerik, uygulama sayısı ise kategorik değişken olarak tanımlanmış olup, toplam 27 deney gerçekleştirilmiştir. Oda sıcaklığında Al-7075-T6 ve CFRP kompozit yüzeyine 10 mm uygulama mesafesinde, 30 saniye plazma tedavisi uygulandıktan sonra yüzey üzerindeki sıcaklık değişimleri Almemo E4 tip K (NiCr) termokupl ile ölçülerek veriler Almemo 2890-9 veri kaydediciyle kaydedilmiştir.

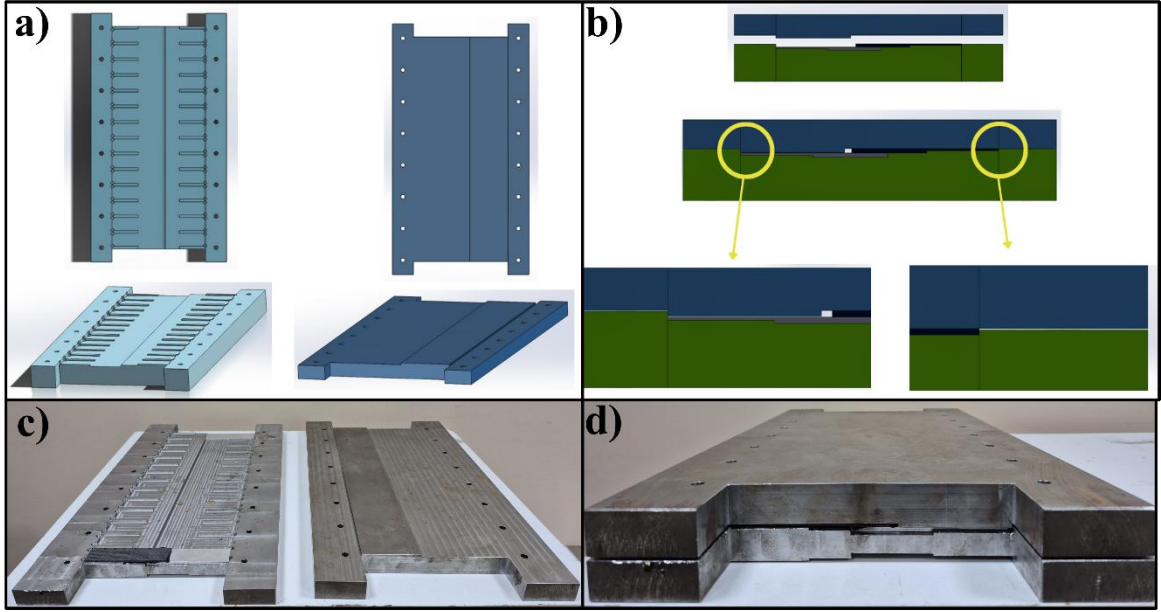
Numune yüzeyine sürülen yapıştırıcının yüzeye nüfuz etmesi, malzeme yüzeyinin ıslanabilirliğiyle ilişkilidir. Yüzeylerin ıslanabilirliği su temas açısı ölçümleriyle derecelendirilmektedir. Su temas açıları su damlasıyla gerçekleştirilirken yüzey üzerine bırakılan su damlası kendi enerjisini koruma isteğinden dolayı küresel formda kalmaya

çalışır. Yüzey enerjisinin, su damlasının yüzey geriliminden yüksek olması durumunda damla küresel formdan ayrılarak yüzey üzerine yayılır ve film tabakası oluşturur. Yüzey enerjisinin düşük olması halinde ise su damlası kendi enerjisini koruyarak mümkün olduğunca küresel formda kalır. Yüzey enerjisinin yüksek olması yüzeyin ıslanılabilir olduğunu gösterirken, düşük olması yüzeyin az ıslanabilir ya da ıslanmaz olduğunu göstermektedir. Yapıştırma bağlantılarında yüzeyin ıslanabilir olması, temas açısının azalması yani damlanın yüzey üzerine dağılarak yüzeye nüfuz etmesi istenmektedir. Alüminyum 7075-T6 ve CFRP kompozit numunelerinin yüzeylerine atmosferik basınçlı soğuk plazma tedavisi uygulamadan önce ve uyguladıktan sonra ıslatma deneyleri çalışma için kurulan düzenek (Şekil 2.13) ile yapıлып, Dino-Lite Pro2 AM4000/AD4000 serisi 1.3 megapiksel dijital mikroskop kullanılarak temas açısı görselleri alınmış ve image J programıyla temas açıları değerlendirilmiştir.



**Şekil 2.13:** Temas açısı ölçüm sistemi

Alüminyum 7075-T6 ile CFRP kompozitler arasındaki tek bindirmeli yapıştırma bağlantılarında epoksi reçine esaslı yapıştırıcı kullanılmıştır. Yapıştırıcı, nispeten uzun kurlenme süresine sahip olmakla birlikte kurlenme sonrasında ısı direnci ve mukavemeti yüksek bir yapıştırma bağlantısı sunmaktadır. Yapıştırıcı numunelerin 25 mm uzunluğundaki uç kısmına gelecek şekilde 25x25 mm<sup>2</sup>'lik alan üzerine plazma tedavisi uygulandıktan sonra sürülmüştür. Yapıştırıcı ilk kurlenmesini 4-5 saat arasında gerçekleştirme olup, 48-72 saat sonunda da nihai kurlenme işlemini tamamlamaktadır. Yapıştırma işlemi sonrasında, nihai kurlenmenin sağlanabilmesi amacıyla numuneler yapıştırma kalıbı içerisinde yük altında tutulmuştur (Şekil 2.14).

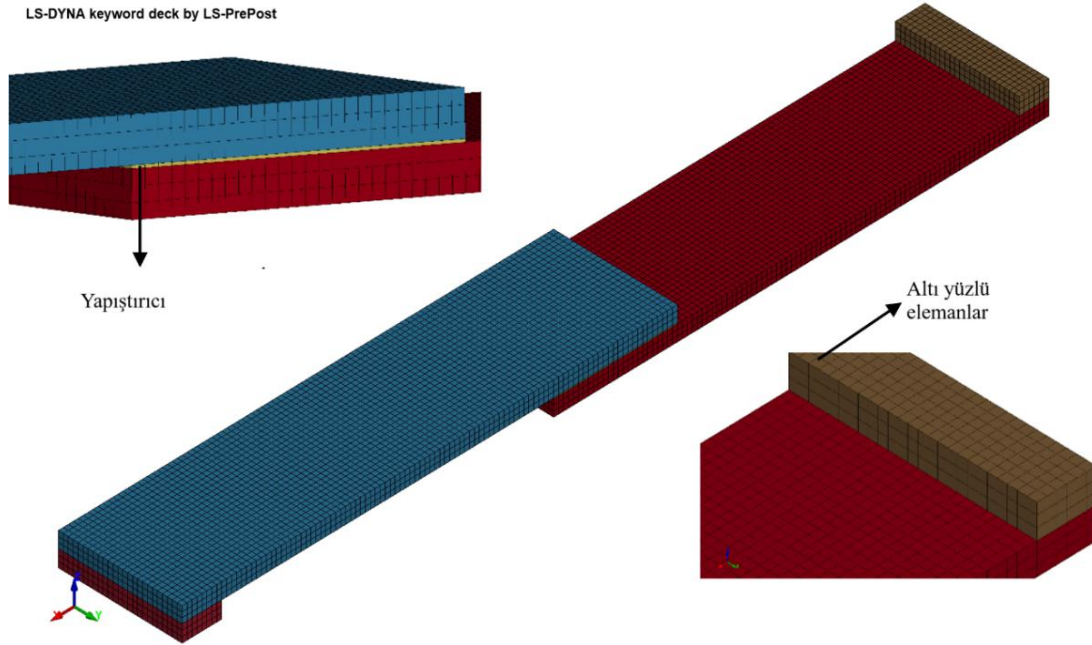


**Şekil 2.14:** Yapıştırma kalıbı/fikstürü

Deney tasarımına bağlı olarak yapılan yapıştırma işlemleri sonrasında numune yüzeylerine yapıştırıcının tutunmasını ve mekanik özelliğini incelemek için çekme testleri yapılmıştır. Çekme testleri sonucunda yapışma dayanımındaki farklılıklar incelenmiş ve bindirme kayma dayanım değerleri ölçülmüştür. Tek bindirmeli yapıştırma bağlantısının testleri Zwick/Roell marka 250 kN kapasiteli çekme test cihazıyla gerçekleştirilmiştir. Çekme testleri ISO 4578 standardına uygun olarak 1,3 mm/dk hızında yapılmıştır.

Sonlu elemanlar yöntemi için oluşturulan model, LS-DYNA yazılımı bünyesinde yer alan LS-PrePost ön işlemcisi kullanılarak hazırlanmıştır. Yapıştırıcı haricindeki tüm yapısal bileşenler için altı yüzlü (hexahedral) ağ yapısı tercih edilmiş ve eleman formülasyonu olarak ‘tam entegrasyonlu, 8 düğümlü katı eleman’ (ELFORM=3) kullanılmıştır. LS-DYNA çözümlerinde tam entegrasyonlu, ikinci dereceden sekiz düğümlü ve düğüm dönmeleri içeren katı elemanların örtük (implicit) tercih edilmesinin temel nedeni, yüksek doğrulukta şekil fonksiyonları ve tam entegrasyon sayesinde elde edilen kararlı ve düzgün bir rijitlik matrisi üretmeleridir (Belytschko et al., 2014). Bu elemanlar, eğilme davranışının baskın olduğu yapılarda kesme kilitlemesini önemli ölçüde azaltarak gerilme-şekil değiştirme alanının daha doğru temsil edilmesini sağlar. Ayrıca saat camı (hourglass) modlarının tamamen ortadan kaldırılması (Flanagan and Belytschko, 1981), Newton iterasyonlarının kararlılığını artırarak örtük çözümün yakınsama performansını belirgin şekilde iyileştirir.

Orta derecede doğrusal olmayan statik veya yarı statik problemlerde daha az ağ yoğunluğu ile yüksek çözüm doğruluğu sağlayan bu formülasyon, temas algoritmalarında daha düzgün yüzey normaleri oluşturduğu için temas stabilitesini de artırmaktadır. Model geometrisi ve ağ yapısı oluşumu Şekil 2.15'te sunulmuştur.



**Şekil 2.15:** Model geometrisi ve ağ yapısı (mesh) oluşturulması

Yapışkan arayüzeyin mekanik davranışını ve hasar mekanizmasını modellemek amacıyla, LS-DYNA kütüphanesinde yer alan \*MAT\_COHESIVE\_ELASTIC (MAT\_184) malzeme modeli tercih edilmiştir. Bu modelin tercih edilme nedenleri:

(i) Örtük (Implicit) Çözüm Uyumluluğu: MAT\_184, malzeme davranışı doğrusal elastik olduğundan ve hasar anında ani bir gerilme düşüşü (bilineer çekme-ayrılma davranışı) sergilediğinden, plastik akma ve sertleşme davranışlarının izlenmesini gerektirmeyen durumlarda örtük çözümler için yüksek yakınsama kararlılığı sunmaktadır.

(ii) Veri Uygunluğu: Deneysel çalışmalardan elde edilen verilerin (maksimum kopma ve kayma dayanımları), detaylı bir plastikleşme eğrisi yerine, tepe noktası (peak stress) odaklı olması, gerilme bazlı hasar kriteri kullanan bu modelin çalışma kapsamında en uygun seçenek olmasını sağlamıştır.

(iii) Hesaplama Verimliliği: Arayüzey elemanlarının "sıfır kalınlık" veya çok ince katmanlar olarak modellenmesi durumunda, MAT\_184, rijitlik matrisine yapay bir sönümlenme eklemekten doğrudan fiziksel rijitlik ve dayanım değerleri ile çalışarak analiz süresini optimize etmektedir (Elder et al., 2008; Pisavadia et al., 2022; S. R et al., 2023).

\*MAT\_COHESIVE\_ELASTIC modelinin teorik altyapısı, arayüzey davranışını tanımlayan iki temel mekanik özelliğe dayanmaktadır: rijitlik (stiffness) ve hasar dayanımı (failure strength). Modelin elastik davranışı, normal (N) ve teğetsel (T) yönlerde tanımlanan arayüzey rijitlik değerleri ile ifade edilmektedir. Yapışkan tabakasının fiziksel kalınlığının  $T_{adh}$  hesaba katıldığı durumlarda, arayüzeyde oluşan normal ve teğetsel gerilmeler ile karşılık gelen ayrılma miktarları arasındaki doğrusal elastik ilişki Denklem 2.1 ve Denklem 2.2 ile ifade edilir:

$$E_N = \frac{E_{mat}}{T_{adh}} \quad (2.1)$$

$$E_T = \frac{G_{mat}}{T_{adh}} \quad (2.2)$$

Burada,  $E_{mat}$  Yapışkan malzemenin elastisite modülü

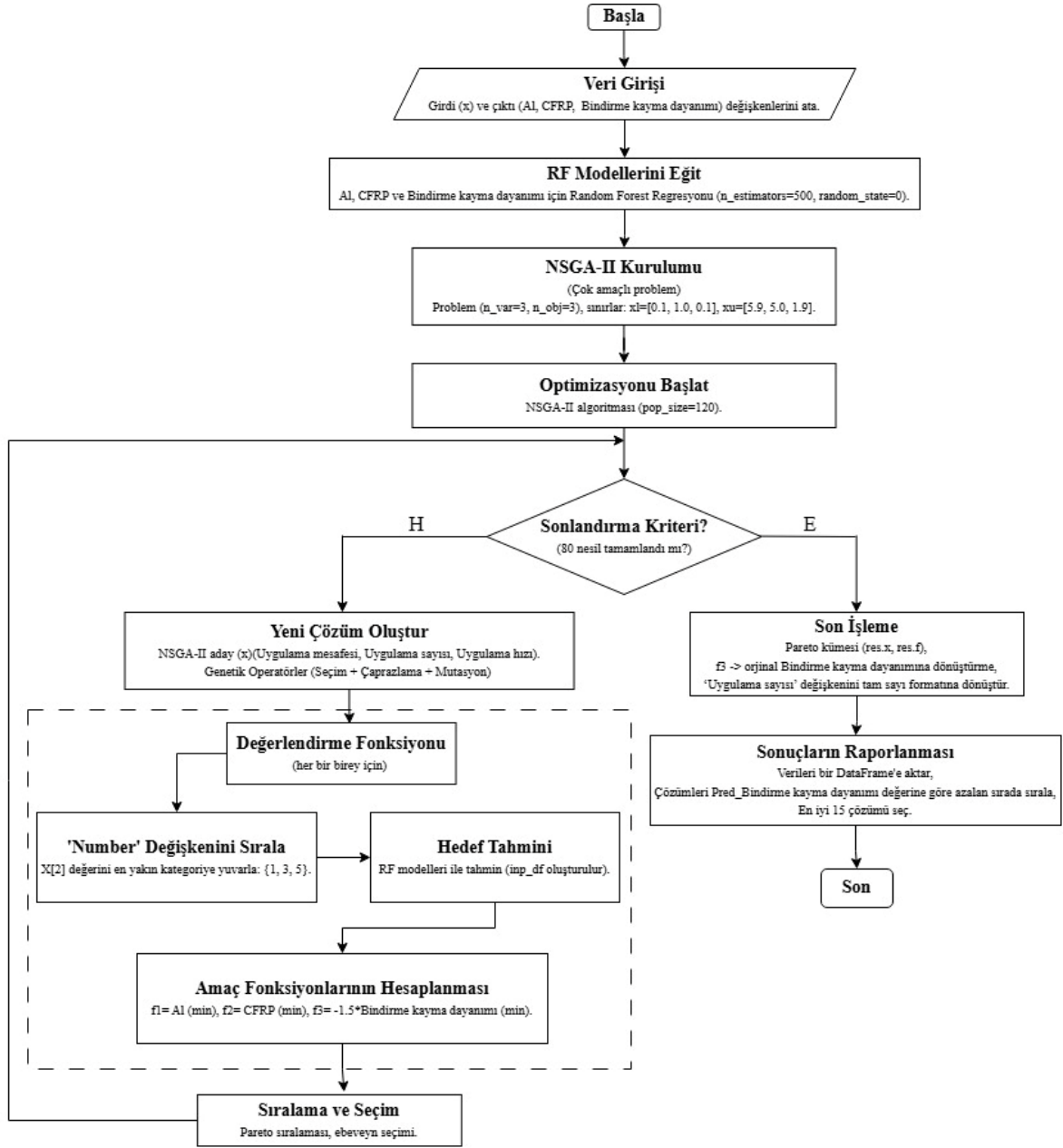
$G_{mat}$  Yapışkan malzemenin kayma modülü

$E_N$  ve  $E_T$  normal ve teğetsel arayüzey rijitlik modüllerini temsil etmektedir.

Hasar kriteri olarak gerilme bazlı bir yaklaşım benimsenmiştir. Eleman üzerindeki gerilmeler belirlenen limit değerlere (NFLS: normal doğrultudaki hasar gerilme sınırı ve SFLS: kayma doğrultusundaki hasar gerilme sınırı) ulaştığında, elemanın yük taşıma kabiliyetini kaybettiği kabul edilmekte ve arayüzey hasarının gerçekleştiği varsayılmaktadır. Bu yaklaşım, karma mod (mixed-mode) hasar davranışını temsil edecek şekilde uygulanmıştır. Deneysel verilerin sonlu elemanlar analizine doğru ve tutarlı biçimde aktarılabilmesi amacıyla özel bir parametrik hesaplama aracı geliştirilmiştir. Bu çalışmada gerçekleştirilen 31 farklı deneysel senaryonun üretim parametreleri olan uygulama sayısı, uygulama mesafesi (mm) ve uygulama hızı (mm/s) ile mekanik dayanım arasındaki ilişki, deneysel verilerden elde edilen ikinci dereceden polinom regresyon (quadratic polynomial regression) yöntemi ile modellenmiştir. Elde edilen regresyon modeli, Python programlama dili kullanılarak bir hesaplama aracına dönüştürülmüştür. Geliştirilen yazılım, üretim

parametrelerini girdi olarak almakta ve LS-DYNA malzeme kartında kullanılacak olan Kayma Hasar Gerilmesi (SFLS - Shear Failure Limit Stress) değerini oluşturulan regresyon denklemi yardımıyla hesaplamaktadır. Geliştirilen bu araç sayesinde, 31 farklı deney setine ait karmaşık malzeme parametreleri standartlaştırılmış, kullanıcı kaynaklı hatalar minimize edilmiş ve analizlerin ön hazırlık (pre-processing) süreci önemli ölçüde hızlandırılmıştır. Yazılımın hesapladığı SFLS değeri LS-DYNA içerisinde FT\_FAIL, NFLS değeri ise FN\_FAIL parametresi olarak tanımlanmıştır. Yapılan analizler sonucunda, yakınsama performansı açısından en iyi, orta ve en zayıf davranışı sergileyen üç temsilci deney durumu seçilerek sayısal ve deneysel sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Çalışmanın bu etabında ayrıca, plazma işlem parametrelerinin (uygulama mesafesi, uygulama sayısı ve uygulama hızı) bindirme kayma dayanımı (maksimizasyon) ile Al-7075 T6 ve CFRP temas açılarının (minimizasyon) eş zamanlı olarak optimize edilmesi amacıyla Non-dominated Sorting Genetic Algorithm-II (NSGA-II) kullanılmıştır. Deneysel verilerden elde edilen üç çıktı için önce Rastgele Orman (Random Forest) tabanlı kestirim modeli kurulmuştur. Girdi değişkenleri; uygulama mesafesi (10, 20 ve 30 mm), uygulama sayısı (1, 3 ve 5 geçiş) ve uygulama hızı (5, 10 ve 15 mm/s) olarak tanımlanmış, tüm modeller 500 ağaç sayılı regresyon yapısı ile eğitilmiştir. Optimizasyon problemi, bindirme kayma dayanımının artırılması, Al-7075 T6 yüzeyinin temas açısının azaltılması ve CFRP yüzeyinin temas açısının azaltılması olarak üç amaç fonksiyonu şeklinde formüle edilmiştir. Pymoo kütüphanesi kullanılarak oluşturulan problemde karar değişkenleri için sınır koşulları 1 – 59 mm uygulama mesafesi, 1 – 5 geçiş uygulama sayısı ve 1 – 19 mm/s uygulama hızı olarak atanmıştır. Kategorik değişken olan uygulama sayısı optimizasyon sırasında sürekli uzayda değerlendirilmiş ve çözüm noktası en yakın kategoriye (1, 3 veya 5) yuvarlanarak modele aktarılmıştır. NSGA-II algoritması için popülasyon büyüklüğü (pop\_size) 120 ve jenerasyon sayısı (n\_gen) 80 olarak belirlenmiştir. Seçim, çaprazlama ve mutasyon işlemleri sonrasında her döngüde elit bireylerin korunması ve baskınlık seviyelerine göre sıralama yapılması sağlanmıştır. Optimizasyon sonucunda elde edilen Pareto optimal çözümleri model çıktılarıyla birlikte yeniden hesaplanmış, tüm aday çözümler tahmini bindirme kayma dayanımına göre sıralanmış ve karar vericiye sunulmak üzere ilk 15 Pareto-optimal çözüm raporlanmıştır (Şekil 2.16).



**Şekil 2.16:** Random Forest regresyon modeli ile entegre edilmiş NSGA-II optimizasyon algoritmasının şematik diyagramı

### **3. BULGULAR VE TARTIŞMA**

Bu bölümde çalışmanın iki aşamasına ait deneysel sayısal ve istatistiksel bulgular sunulmuş ve literatür çerçevesinde tartışılmıştır. Sonuçlar, plazma yüzey işlemlerinin metal-kompozit ara yüzeyindeki ıslanabilirlik ve yapışma performansı üzerindeki etkilerini ortaya koyacak şekilde değerlendirilmiştir.

I. etapta, Al-5049 ve CFRP kompozit malzeme yüzeyleri üzerine uygulanan atmosferik basınçlı soğuk ve sıcak plazmaların temas açısı, yüzey karakterizasyonu ve mekanik dayanım üzerindeki etkilerine ilişkin bulgular sunulmuştur.

II. etapta ise Al-7075 T6 ve CFRP kompozit malzeme yüzeyleri üzerine uygulanan atmosferik basınçlı soğuk plazma parametrelerinin temas açısı ve mekanik dayanım üzerindeki etkilerine ilişkin bulgular sunulmuştur. Elde edilen deneysel sonuçlar; varyans analizleri, matematiksel modelleme, sonlu elemanlar yöntemleri ve çok amaçlı optimizasyon sonuçları ile değerlendirilmiş ve optimum parametre bölgeleri değerlendirilmiştir.

#### **3.1 I. Etap CFRP ve Al 5049 Alaşımının Yapıştırılması Sonucunda Elde Edilen Bulgular ve Tartışma**

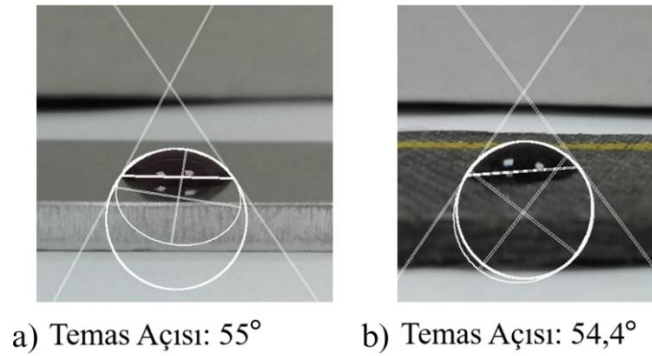
CFRP ve Al-5049 alaşımının yapıştırılması sonucunda elde edilen bulgular sistematik olarak sunulmuştur. Plazma yüzey işlemlerinin yüzey enerjisi, yüzey karakterizasyonu ve mekanik performansı üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir.

Öncelikle ıslanabilirlik davranışını belirlemek amacıyla temas açısı ölçümleri gerçekleştirilmiş, ardından plazma uygulamalarının termal etkileri sıcaklık ölçümleri ile incelenmiştir. Yapıştırma performansları çekme deneyleri ile değerlendirilmiş, elde edilen sonuçlar SEM ve FT-IR analizleri ile desteklenerek ayrılma yüzeyleri ve kimyasal yapıdaki değişimler ilişkilendirilmiştir.

##### **3.1.1 I. etap temas açısı ölçümleri**

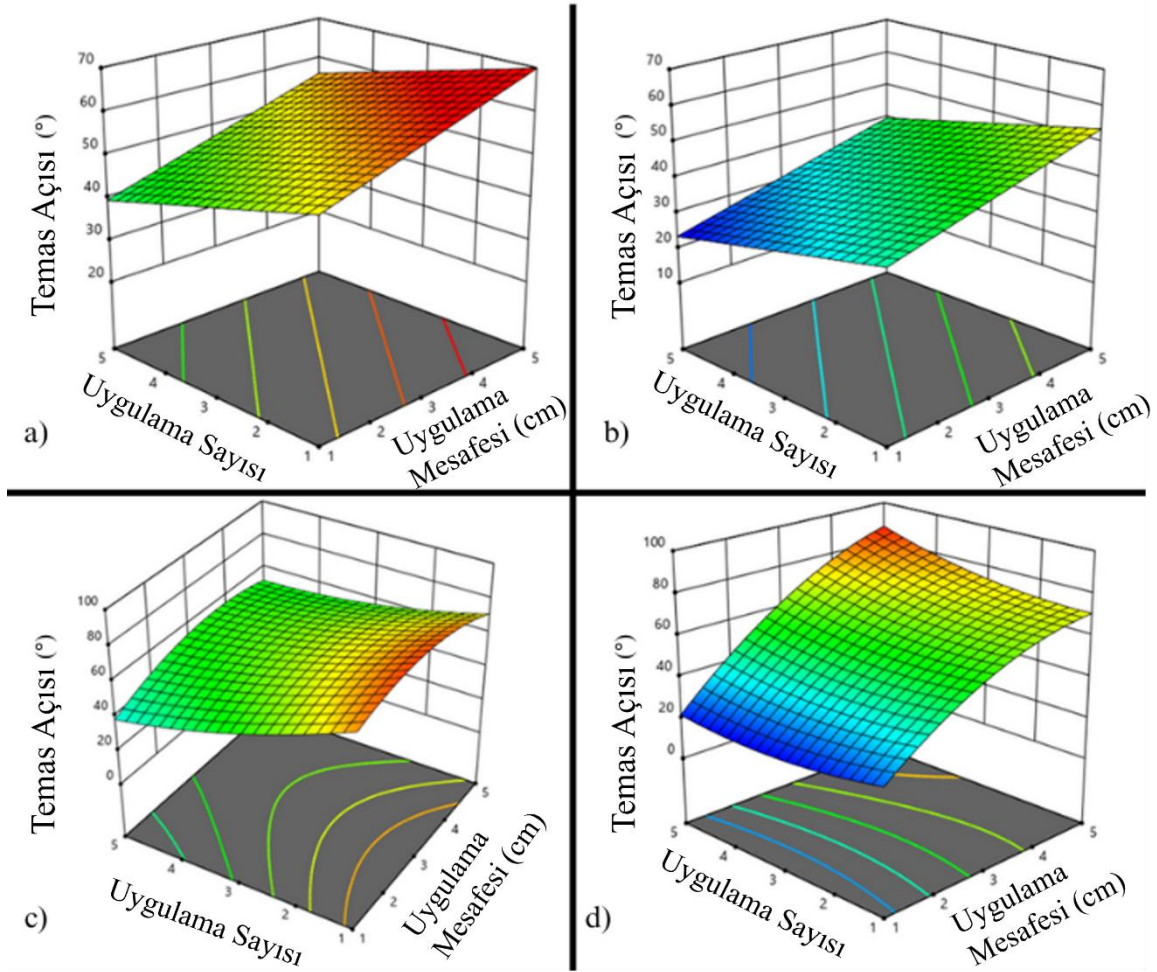
CFRP ve Al-5049 numune yüzeyleri plazma uygulanmadan önce distile su ve mikrofiber bezlerle silinmiş, sonrasında temas açıları ölçülmüştür. Plazma tedavisi uygulanmayan yüzeylerin temas açısı ölçüldükten sonra Tablo 2.4'te sunulan parametrelerle sıcak ve soğuk plazma işlemi numuneler üzerine uygulanmıştır. Plazma uygulanmamış ve yüzeyleri

silinmemiş numunelerde; CFRP ve Al-5049 levhalar için sırasıyla temas açıları  $67,6^\circ$  ve  $65,9^\circ$  olarak ölçülmüştür. Silinmiş numunelerde ise temas açıları, CFRP’de  $75^\circ$  ve 5049’da  $51,9^\circ$  olarak ölçülmüştür. Sıcak plazma uygulanmasından sonra, yüzeylerden ölçülen temas açılarının ortalaması CFRP’de  $53,38^\circ$  ve Al-5049’da  $38,6^\circ$  olarak ölçülmüştür. Atmosferik basınçlı soğuk plazmada uygulandıktan sonra ise yüzeylerden ölçülen temas açılarının ortalaması CFRP’de  $64,8^\circ$  ve Al-5049’da  $50,6^\circ$  olarak ölçülmüştür. Temas açılarının ölçümüyle ilgili örnek görseller Şekil 3.1’de verilmiştir.



**Şekil 3.1:** Temas açısı ölçümleri a) Al5049 yüzeyi, b) CFRP yüzeyi

Atmosferik basınçlı soğuk plazma ve sıcak plazma, yüzeylere uygulama mesafesi ve uygulama sayısına bağlı uygulanarak temas açıları ölçülmüştür. Uygulama mesafesi ve uygulama sayısı sonucunda elde edilen temas açı değerleriyle yüzey grafiği oluşturulmuştur (Şekil 3.2). Parametrelere bağlı olarak temas açılarında önemli değişimler olduğu görülmüştür. Al 5049 malzeme yüzeyinde temas açısındaki değişimler doğrusal bir şekildeyken CFRP malzemedeki doğrusal olmayan şekil değişimleri görülmüştür. Literatürde de polimer malzemelerin temas açısı için yüzeylerine sürekli plazma tedavisi uygulanması, uzun süre uygulanması veya çok yakın olmasıyla değil optimum bir değerde en iyi sonucu verdiğini belirten çalışmalar mevcuttur (Carrino et al., 2002; Güler vd., 2023; Ku et al., 2013; Palaskar et al., 2020; Wang et al., 2025). Şekil 3.2 incelendiğinde uygulama mesafesi düşük ve uygulama sayısı yüksek olduğunda temas açısının azaldığı ve bununla ilişkili olarak ıslanabilirliğin arttığı görülmektedir. Şekil 3.2 c ve d incelendiğinde uygulama mesafesinin düşük olmasıyla CFRP malzemenin yüzeyindeki ıslatma açısı düşmüş ve yüzey ıslanabilirliği artmıştır. Ancak uygulama sayısının 3 olması durumunda ıslatma açısının daha düşük olduğu görülmüştür. CFRP yüzeyi için 1 cm uygulama mesafesinde 3 uygulama sayısı optimum değer olarak ölçülmüştür.



**Şekil 3.2:** Uygulama sayısı ve uygulama mesafesine bağlı olarak elde edilen temas açı değerleri a) Al5049 yüzeyine atmosferik basınçlı soğuk plazma uygulanması, b) Al5049 yüzeyine sıcak plazma uygulanması, c) CFRP üzerine atmosferik basınçlı soğuk plazma uygulanması, d) CFRP yüzeyine sıcak plazma uygulanması sonuçları

CFRP ve 5049 malzemelerine uygulanan plazma işlemlerinin modeline ilişkin istatistiksel değerlendirme amacıyla gerçekleştirilen varyans analizi sonuçları Tablo 3.1’de sunulmuştur. Sonuçlar incelendiğinde, modelin toplam açıklama gücünün 5049 malzemesi için %97,88, CFRP için ise %99,9 olduğu görülmektedir. Modellerin genel anlamlılığı oldukça yüksektir. Parametrelerin temas açısı üzerinde anlamlı bir etkiye sahip olduğu belirlenmiştir. 5049 malzemesinin temas açısı sırasıyla geçiş sayısı, plazma türü ve uygulama mesafesinden etkilenirken; CFRP’nin temas açısı ise uygulama mesafesi, plazma türü ve geçiş sayısından etkilenmektedir.

**Tablo 3.1:** I. etap temas açıları için varyans analiz sonuçları

Kaynak	Al-5049				CFRP			
	S D	Katkı Oranı (%)	F- Değeri	P- Değeri	S D	Katkı Oranı (%)	F- Değeri	P- Değeri
Model	8	97,88	34,70	0,000	7	99,91	479,89	0,000
Lineer	3	84,40	61,64	0,000	3	88,93	170,78	0,001
UM	1	7,70	32,15	0,001	1	40,05	201,67	0,001
US	1	55,39	91,83	0,000	1	12,90	210,32	0,001
P	1	21,31	27,62	0,002	1	35,98	100,86	0,002
Kare	2	1,54	0,70	0,535	1	0,03	74,67	0,003
UM*UM	1	0,78	0,85	0,391	1	0,03	74,67	0,003
US*US	1	0,76	0,56	0,481	-	-	-	-
İkili ilişkiler	3	11,94	11,29	0,007	3	10,95	122,77	0,001
UM*US	1	0,57	0,71	0,431	1	0,07	7,18	0,075
UM*P	1	4,37	5,23	0,062	1	3,42	170,92	0,001
US*P	1	7,00	19,86	0,004	1	7,47	251,03	0,001
Hata	6	2,12			3	0,09		
Toplam	1 4	100,00			1 0	100,00		

### 3.1.2 I. etap sıcaklık ölçüm sonuçları

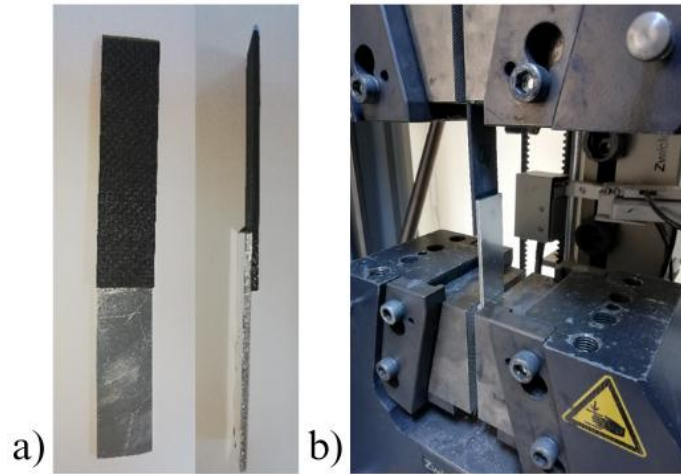
Çalışmada; Al-5049 malzemesi ve CFRP kompozite, oda sıcaklık koşullarında, 2 cm uygulama mesafesinde ve 3 geçiş sayısında (yaklaşık 7,2 saniye) soğuk plazma işlemi uygulanmıştır. Plazma işlemi öncesinde yüzey üzerinden alınan ölçümler ile plazma işlemi sonrasında alınan ölçümler arasındaki sıcaklık farkının 1°C'den düşük olduğu gözlemlenmiştir.

Plazma uygulanmayan durumda 5049 malzemesi ve CFRP yüzey sıcaklıkları 22,7°C olarak ölçülürken, plazma uygulaması sonrasında bu değerler sırasıyla 23,1°C ve 23,3°C olarak ölçülmüş ve atmosferik basınçlı soğuk plazma işleminin yüzey sıcaklığı üzerinde olumsuz bir etki oluşturmadığı görülmüştür.

### 3.1.3 I. etap çekme deney sonuçları

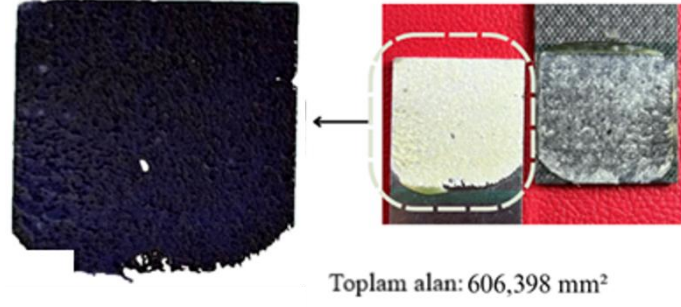
Deney tasarımına göre uygulanan atmosferik basınçlı soğuk ve sıcak plazma işlemleri sonrasında yapıştırılan numuneler çekme deneyine tabi tutulmuştur (Şekil 3.3). Çekme deneyi sonrasında, malzemeler arasındaki yapışma bağı sonlanmış olup ayrılan yüzeylerde boşlukların ve taşmaların olduğu, ayrıca yapıştırıcının bazı kısımlara tam olarak nüfuz etmediği görülmüştür. Kayma gerilmesinin hesaplanma temelini oluşturan etkenlerden birisi alan olduğu için yapıştırma alanları belirlenmiştir (Şekil 3.4).

Yapıştırıcının 25x25 mm<sup>2</sup>'lik alana eşit olarak dağılmaması, yapıştırıcının hızlı kürlenmesi, hava boşluklarının oluşması veya düşük baskı kuvveti nedeniyle yapıştırıcının kenarlara ulaşmamasından kaynaklanmaktadır.



**Şekil 3.3:** Deney numuneleri a) tek kademeli çekme deney numuneleri, b) çekme deneyi

Temas açıları ölçüm sonuçlarına göre 5049 malzeme yüzeyinin yüzey enerjisinin CFRP yüzey enerjisinden daha yüksek olduğu görülmüştür. Literatürde de metalik malzemelerin polimerik malzemelere göre yüzey enerjileri daha yüksek olduğu belirtilmiştir (Dillard, 2010; Fay, 2021; Kaplan and Rose, 1991; Pocius, 2012). Yapıştırma alanları incelendiğinde 5049 yüzeyi tarafında kalan yapıştırıcı kalınlığının CFRP yüzeyinde kalan yapıştırıcı kalınlığına göre daha fazla olduğu net bir şekilde görülmüştür.



**Şekil 3.4:** Çekme testi sonucunda elde edilen ayrılma yüzeyinde kalan yapıştırıcı alanlarının tespit edilmesi

Yapılan çalışmada, yapıştırma işlemi sonrasında 24 saat yapıştırıcının tam kürlenmesi beklenmiştir. Kürlenme tamamlandıktan sonra çekme testleri yapılmış ve ayrılan yüzeylerin görüntüleri incelenmiştir (Şekil 3.4). Deney tasarımına bağlı olarak atmosferik basınçlı soğuk plazma tedavisi sonrasında elde edilen yapıştırıcının nüfuz ettiği alan ve bindirme kayma dayanım değerleri Tablo 3.2’de verilmiştir.

**Tablo 3.2:** Atmosferik basınçlı soğuk plazma uygulanan numunelerin bindirme kayma dayanımları

Uygulama Mesafesi (cm)	Uygulama Sayısı	Uygulama Sayısına Karşılık Plazma Uygulama Süresi (s)	Kesit Alanı (mm <sup>2</sup> )	Uygulanan Kuvvet (N)	Bindirme Kayma Dayanımı (N/mm <sup>2</sup> )
	Plazmasız	0	596,181	6894,829	11,565
1	1	2,4	648,292	8027,661	12,383
1	3	7,2	629,56	7107,778	11,290
1	5	12	607,842	7654,249	12,592
2	1	2,4	605,914	7441,997	12,282
2	3	7,2	663,082	8076,431	12,180
2	3	7,2	627,241	7304,655	11,646
2	3	7,2	584,354	6724,390	11,507
2	3	7,2	564,292	7102,902	12,587
2	3	7,2	515,553	6384,559	12,384
2	5	12	611,533	7652,793	12,514
3	1	2,4	606,398	7629,9106	12,582
3	3	7,2	597,154	7570,211	12,677
3	5	12	615,022	7677,365	12,483

Deney tasarımına bağı olarak atmosferik basınçlı sıcak plazma tedavisi sonrasında elde edilen yapıştırıcının nüfuz ettiği alan ve bindirme kayma dayanım değerleri Tablo 3.3’de verilmiştir.

**Tablo 3.3:** Atmosferik basınçlı sıcak plazma uygulanan numunelerin bindirme kayma dayanımları

Uygulama Mesafesi (cm)	Uygulama Sayısı	Uygulama Sayısına Karşılık Plazma Uygulama Süresi (s)	Kesit Alanı (mm <sup>2</sup> )	Uygulanan Kuvvet (N)	Bindirme Kayma Dayanımı (N/mm <sup>2</sup> )
Plazmasız		0	596,181	6894,829	11,565
1	1	2,4	475,539	5915,918	12,440
1	3	7,2	495,686	5970,603	12,045
1	5	12	578,729	7332,422	12,670
3	1	2,4	487,12	5696,901	11,695
3	3	7,2	577,599	7150,213	12,379
3	3	7,2	540,19	6501,692	12,036
3	3	7,2	607,075	8353,167	13,760
3	3	7,2	617,103	7549,072	12,233
3	3	7,2	509,074	6814,190	13,385
3	5	12	544,596	6590,708	12,102
5	1	2,4	382,236	4923,497	12,881
5	3	7,2	507,907	6332,012	12,467
5	5	12	631,366	7724,671	12,235

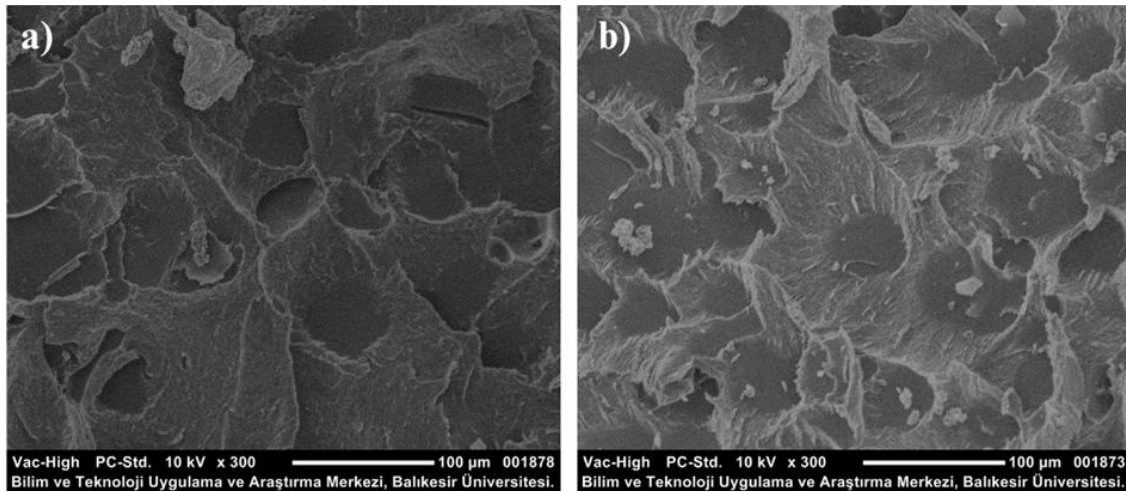
Plazma uygulanmayan deney numunesinde elde edilen kayma gerilmesi değeri 11,565 N/mm<sup>2</sup> olarak ölçülmüştür. Atmosferik basınçlı soğuk plazma uygulanan test numunelerinin ortalama kayma gerilmesi değeri 12,239 N/mm<sup>2</sup> olarak hesaplanmıştır. Sıcak plazma uygulamasında ise bu değeri 12,487 N/mm<sup>2</sup> olarak belirlenmiştir.

### 3.1.4 SEM analiz sonuçları

Çekme deneyi sonrasında Al-5049 ve CFRP yapıştırma bağlantısına ait kırılma yüzeylerinin SEM görüntüleri Şekil 3.5’te gösterilmiştir. Ayrılan Al 5049 yüzeyi Şekil 3.5-a’da, CFRP yüzeyi ise Şekil 3.5-b’de sunulmuştur. Her iki yüzeyde de yapıştırıcının tüm yüzeyi homojen bir şekilde kapladığı görülmektedir. Numuneler ayrıldığında, hasarın yapıştırıcı içerisinde meydana geldiği (kohezif hasar) tespit edilmiş olup, bu durum kırılmanın yapıştırıcının mekanik dayanım sınırında gerçekleştiğini göstermektedir. Yapıştırıcı ile malzemeler arasında herhangi bir ara yüzey ayrılması (adezif hasar) gözlenmemiştir. Kohezif hasarın

varlığı, yüzey hazırlama, plazma işlemi ve yapıştırma uygulamasının etkinliğini ortaya koymaktadır. Benzer kohezif hasar gözlemleri diğer araştırmacılar tarafından da rapor edilmiştir (Ayaz et al., 2024; Ostapiuk and Bieniaś, 2019; L. Wen et al., 2024).

Makro ölçekte yapılan incelemede, hacimsel olarak Al-5049 yüzeyinde daha fazla, CFRP yüzeyinde ise daha az yapıştırıcı kaldığı görülmüştür. Bu bulgu literatürle de uyumlu şekilde, daha düşük temas açısına sahip metalik malzemelerin, polimerik malzemelere kıyasla daha yüksek yüzey enerjisine sahip olduğu gerçeğini desteklemektedir (Drozdziel-Jurkiewicz and Bieniaś, 2022; Y. Xu et al., 2016). Yapıştırıcının ayrılması sırasında oluşan yırtılma izleri kohezif hasara işaret etmektedir. Yüzeyin belirli bölgelerinde gözlenen düzensiz çöküntüler ve ince çatlaklar, yapıştırıcının yük altında enerji soğurduğunu göstermektedir. Plazma işlemleri sonrasında yüzey enerjisindeki artış, her iki malzemenin ıslanabilirliğini önemli ölçüde artırarak yapıştırıcının yüzeylere daha homojen ve daha güçlü bir şekilde tutunmasını sağlamaktadır.



**Şekil 3.5:** Yapıştırıcı ayrılma yüzeyi, a) Al 5049 yüzeyi, b) CFRP yüzeyi

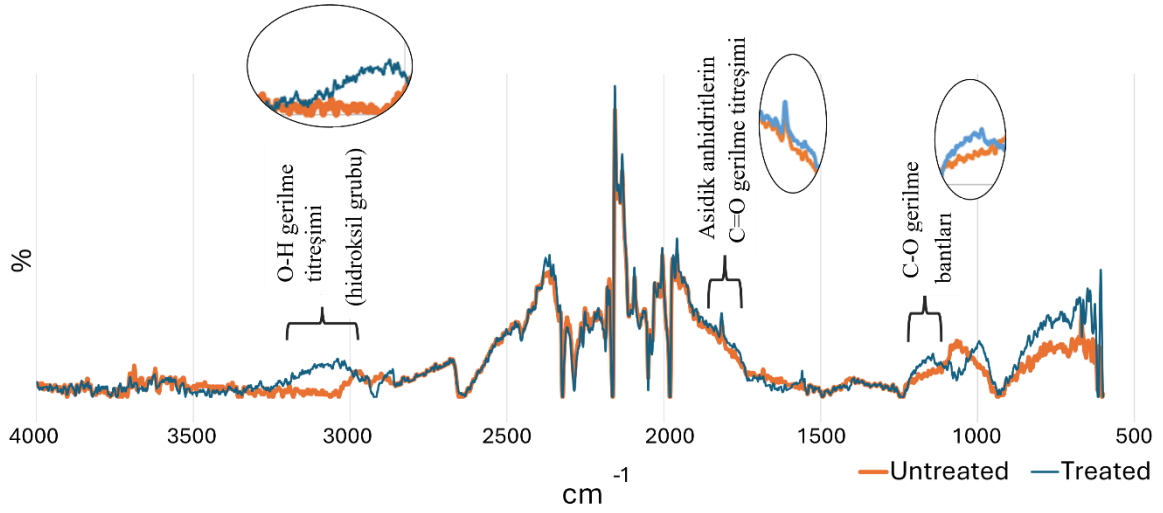
### 3.1.5 FT-IR analiz sonuçları

Atmosferik basınçlı soğuk plazma işleminin yüzeylerde neden olduğu kimyasal değişimleri incelemek amacıyla, plazma işlemi uygulanmış ve uygulanmamış Al-5049 malzemesi ile CFRP üzerinde FT-IR analizi gerçekleştirilmiştir. Plazma işlemi, malzeme yüzeylerine 1 cm uygulama mesafesinden 12 saniye süreyle uygulanmıştır. Al-5049 malzemelerine ait FT-IR spektrumları Şekil 3.6'da, CFRP yüzeylerine ait spektrumlar ise Şekil 3.7'de verilmiştir.

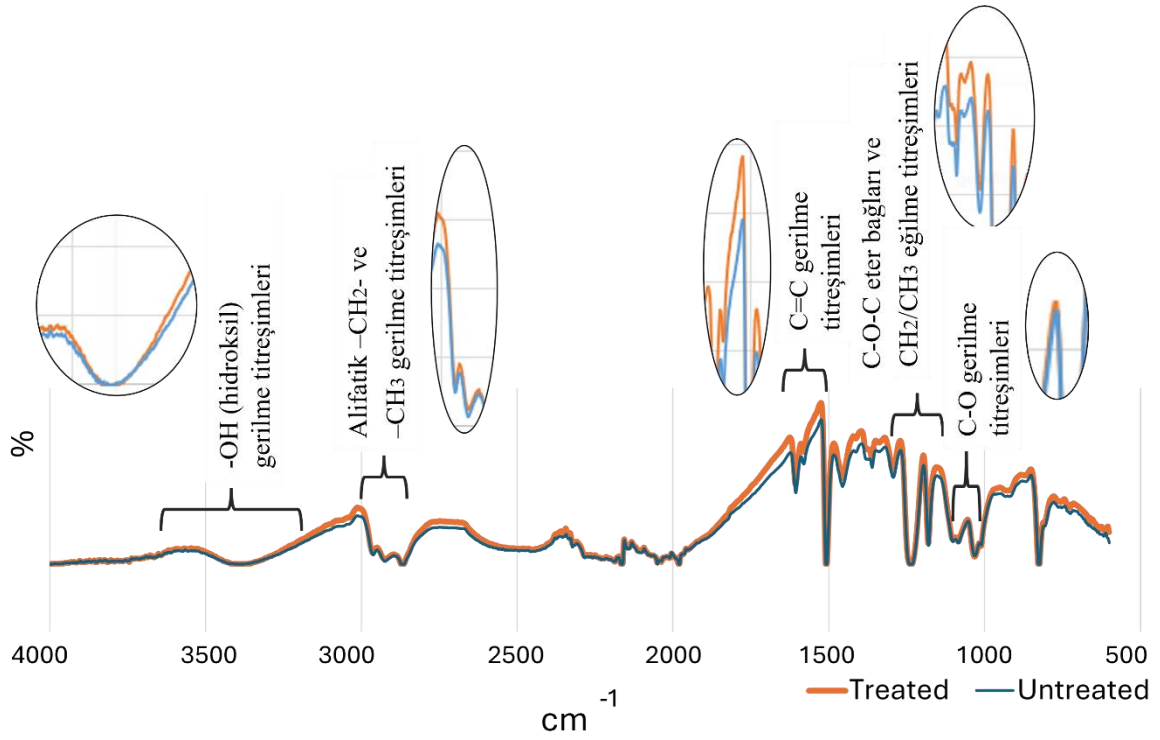
Şekil 3.6’da, plazma işlemi uygulanmamış ve atmosferik basınçlı soğuk plazma uygulanmış Al-5049 malzemelerine ait FT-IR spektrumları karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Spektral analiz sonuçları, plazma işleminin Al-5049 malzemesi yüzeyinde kimyasal değişimlere neden olduğunu göstermektedir. Plazma sonrası 2990–3220  $\text{cm}^{-1}$  aralığında gözlenen yeni bantlar, yüzeyde hidroksil (–OH) gruplarının oluştuğunu göstermekte; bu durum yüzeyin ıslanabilirliğini artırmakta ve yapışma kabiliyetini iyileştirmektedir (Bónová et al., 2015; Ludwig, 2022; Miller et al., 2021). 1810–1815  $\text{cm}^{-1}$  aralığında gözlenen yeni pik, asidik anhidrit gruplarına ait C=O titreşimlerine karşılık gelmekte olup plazmanın oksidatif karakteri sonucunda yüzeyde yeni oksijenli grupların oluştuğunu göstermektedir (Bónová et al., 2020). Ayrıca 1100–1200  $\text{cm}^{-1}$  aralığında ortaya çıkan C–O gerilme bantları, alkol ve eter gruplarının oluşumunu desteklemekte ve yüzeyde oksijenli fonksiyonel grupların artmasına bağlı olarak yüzey enerjisinin yükseldiğini göstermektedir (Rai et al., 2010).

Şekil 3.7’de, işlem uygulanmamış ve atmosferik basınçlı soğuk plazma uygulanmış CFRP yüzeylerine ait FT-IR spektrumları karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Spektral analiz sonuçları, plazma işleminin CFRP yüzeyinde önemli kimyasal değişimlere yol açtığını göstermektedir. Plazma sonrası spektrumda yaklaşık  $\sim 1730 \text{ cm}^{-1}$  civarında yeni bir C=O piki oluşmuş olup bu durum karbonil gruplarının (örneğin –COOH veya ester) yüzeye eklendiğini göstermektedir (Dimitrakellis et al., 2022). Ayrıca 3200–3600  $\text{cm}^{-1}$  aralığında hidroksil (–OH) gruplarına ait geniş absorbands bandında belirgin bir artış gözlenmiş; bu durum yüzeyin hidrofilik karakterinin arttığını ve oksijenli grupların (alkol, karboksil) oluştuğunu ortaya koymuştur (Encinas et al., 2014). 1000–1100  $\text{cm}^{-1}$  aralığında C–O ve C–O–C bağlarına karşılık gelen pik şiddetlerinde artış gözlenmesi, yeni eter veya alkol gruplarının varlığına işaret etmektedir. Plazma sonrası alifatik C–H gerilme bantlarının (2920 ve 2850  $\text{cm}^{-1}$ ) kısmen zayıflaması ise bazı C–H bağlarının oksidatif olarak polar gruplarla yer değiştirdiğini düşündürmektedir (Dufour, 2023).

Sonuç olarak FT-IR analizi, atmosferik basınçlı soğuk plazma işleminin CFRP yüzeyinde oksijenli fonksiyonel grupların oluşumuna neden olarak yüzey aktifleşmesi sağladığını ve bu sayede yüzeyi yapıştırma ve kaplama gibi uygulamalar için daha uygun hale getirdiğini açıkça ortaya koymaktadır (Ayas et al., 2025).



**Şekil 3.6:** Plazma işlemi uygulanmamış ve plazma işlemi uygulanmış Al 5049 alaşımına ait FT-IR spektrumları



**Şekil 3.7:** Plazma işlemi uygulanmamış ve plazma işlemi uygulanmış CFRP kompozite ait FT-IR spektrumları

### **3.2 II. Etap CFRP ve Al 7075 T6 Alaşımının Yapıştırılması Sonucunda Elde Edilen Bulgular ve Tartışma**

CFRP ve Al-7075 T6 alaşımının yapıştırılması sonucunda elde edilen deneysel, sayısal, istatistiksel ve optimizasyon temelli bulgular sistematik olarak sunulmuştur. Plazma parametrelerinin yzey ıslanabilirliği, mekanik dayanım ve sayısal model ıktıları üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir.

Öncelikle yzey aktivasyon düzeyini belirlemek amacıyla temas açısı ölüm sonuçları analiz edilmiş, ardından yapıştırma performansı çekme deneyleri ile ortaya konulmuştur. Plazma uygulamasının termal etkileri sıcaklık ölümleri ile incelenmiş, deneysel bulgular sonlu elemanlar analizi ile desteklenmiştir. Son aşamada ise çok amaçlı optimizasyon sonuçları değerlendirilerek optimum parametre bölgeleri belirlenmiş ve performans kriterleri arasındaki ilişki analiz edilmiştir.

#### **3.2.1 II. etap temas açısı lmleri**

II. etap temas açısı ölümü öncesinde numune yzeyleri; yzeyin üzerinde yağ, büyük boyutlu kir, toz ve istenmeyen etkenlerden önlemek amacıyla distile su ve mikrofiber bezlerle silinmiştir. Silme işlemi sonrasında, yapıştırma işlemi için oluşturulan deney tasarımına bağlı olarak Al 7075 T6 malzeme ve CFRP malzemelerin yzeylerine atmosferik basınçlı soğuk plazma tedavisi uygulanmıştır. Plazma tedavisi uygulanmayan numunelerde Al-7075 T6 yzeyinin temas açısı  $84,6^\circ$  iken CFRP yzeyinin temas açısı  $85,8^\circ$  olarak llmştir. Belirlenmiş deney tasarımına uygun olarak yapılan 27 numune yzeyine plazma tedavisi sonrasında ortalama temas açısı lm Al-7075'te  $62,1^\circ$  iken CFRP'de  $61,96^\circ$  elde edilmiştir. Parametreler haricinde yzeyler üzerine 5 mm mesafeden 30 saniye boyunca uygulanan atmosferik basınçlı plazma işlemi sonrasında Al-7075'te  $32,6^\circ$ , CFRP'de ise  $22^\circ$  olarak llmştir. Yzeyi deforme etmeden yzeye uygulanan plazma süresinin yüksek ve mesafenin düşük olması yzeyin ıslanabilirliği üzerinde pozitif bir etkiye sahiptir (Maroofi et al., 2020; Sönmez et al., 2023). Deney tasarımına bağlı olarak uygulanan atmosferik basınçlı soğuk plazma sonrasında yapılan temas açısı lme değerleri Tablo 3.4'de verilmiştir.

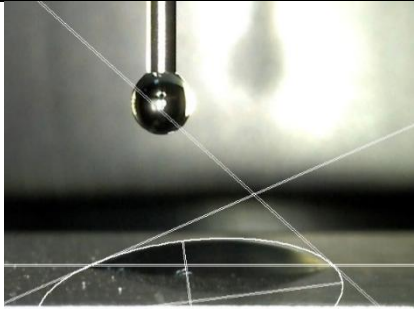
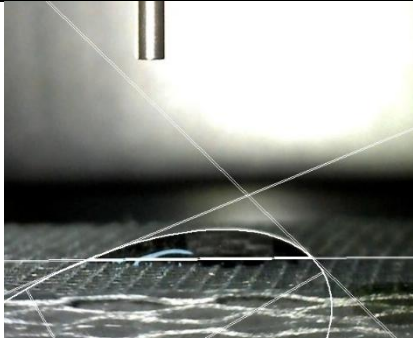
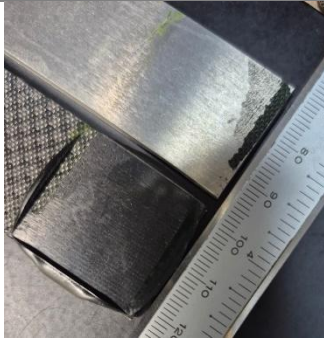
**Tablo 3.4:** II. etap temas açısı ölçüm sonuçları

Deney No	Mesafe (mm)	Uygulama Sayısı	Hız (mm/s)	Al-7075 Temas Açısı	CFRP Temas Açısı
1	10	1	5	65,6	61,80
2	10	1	10	66,8	63,20
3	10	1	15	68,2	64,60
4	10	3	5	39,2	48,90
5	10	3	10	40,0	52,80
6	10	3	15	56,0	55,60
7	10	5	5	32,6	33,00
8	10	5	10	37,4	43,80
9	10	5	15	38,4	46,90
10	20	1	5	69,2	65,6
11	20	1	10	70,5	67,2
12	20	1	15	71,5	67,4
13	20	3	5	59,0	60,4
14	20	3	10	59,2	62,0
15	20	3	15	62,2	64,7
16	20	5	5	51,5	47,2
17	20	5	10	57,4	52,9
18	20	5	15	59,0	56,8
19	30	1	5	76,8	73,2
20	30	1	10	78,0	75,4
21	30	1	15	79,4	85,6
22	30	3	5	70,4	70,7
23	30	3	10	72,0	72,8
24	30	3	15	73,4	71,7
25	30	5	5	73,7	69,0
26	30	5	10	74,0	69,2
27	30	5	15	75,3	70,5
28	Plazmasız			84,6	85,8
29	Yakın plazmalı (5 mm) 30 saniye			32,6	22,0

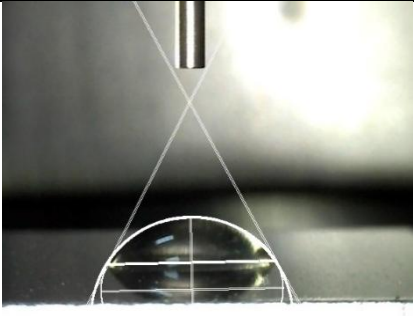
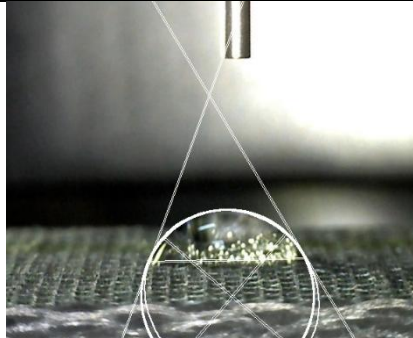
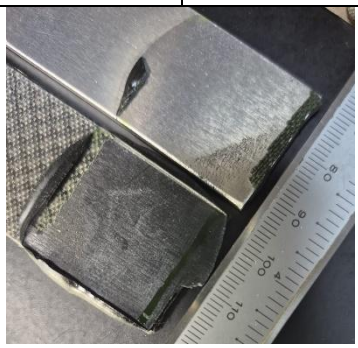
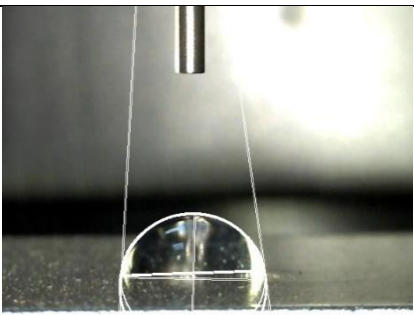
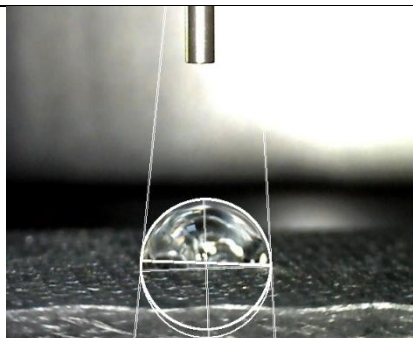
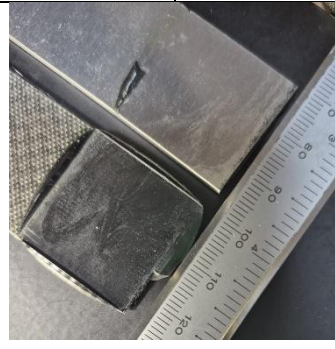
Plazma tedavisi uygulanmayan Al-7075 T6 yüzeyinin temas açısı 84,6° olarak ölçülmüştür. En düşük temas açısı değeri yakın plazma (5 mm mesafe ve 30 saniye maruz kalma) ve 7. Deneyde (10 mm uygulama mesafesi, 5 paso ve 5 mm/s uygulama hızında) 32,6° olarak ölçülmüştür. En yüksek temas açısı değeri plazma tedavisi uygulanmayan numunede 84,6° ve 21. Deneyde (30 mm uygulama mesafe, 1 paso ve 15 mm/s uygulama hızında) 79,4° olarak ölçülmüştür. Uygulama mesafesi 30 mm iken elde edilen temas açısı değerleri 70° üzerindedir. Bu durumda, atmosferik basınçlı soğuk plazma işleminin 30 mm uygulama mesafesinde net bir etkiye sahip olmadığını göstermektedir. Yakın mesafe ve çok pasoda plazma uygulanması Al-7075 T6 yüzeyi üzerinde ıslanabilirliği artırarak, etkinliğini kanıtlamıştır.

Plazma tedavisi uygulanmayan CFRP yüzeyinin temas açısı Al-7075 T6 yüzeyinin temas açısına oldukça yakın değerde  $85,8^\circ$  olarak ölçülmüştür. En düşük temas açısı değeri yakın plazmada (5 mm mesafe ve 30 saniye maruz kalma)  $22^\circ$  olarak ve 7. Deneyde (10 mm uygulama mesafesi, 5 paso ve 5 mm/s uygulama hızında)  $33^\circ$  olarak ölçülmüştür. En yüksek temas açısı değeri plazma tedavisi uygulanmayan numunede  $85,8^\circ$  ve 21. Deneyde (30 mm uygulama mesafe, 1 paso ve 15 mm/s uygulama hızında)  $85,6^\circ$  olarak ölçülmüştür (Tablo 3.5). Uygulama mesafesi 30 mm iken elde edilen temas açısı değerleri genelde  $70^\circ$  üzerindedir. Bu durumda, atmosferik basınçlı soğuk plazma işleminin 30 mm uygulama mesafesinde net bir etkiye sahip olmadığını göstermektedir. Yakın mesafe ve çok pasoda plazma CFRP yüzeyi üzerinde ıslanabilirliği artırarak, etkinliğini kanıtlamıştır.

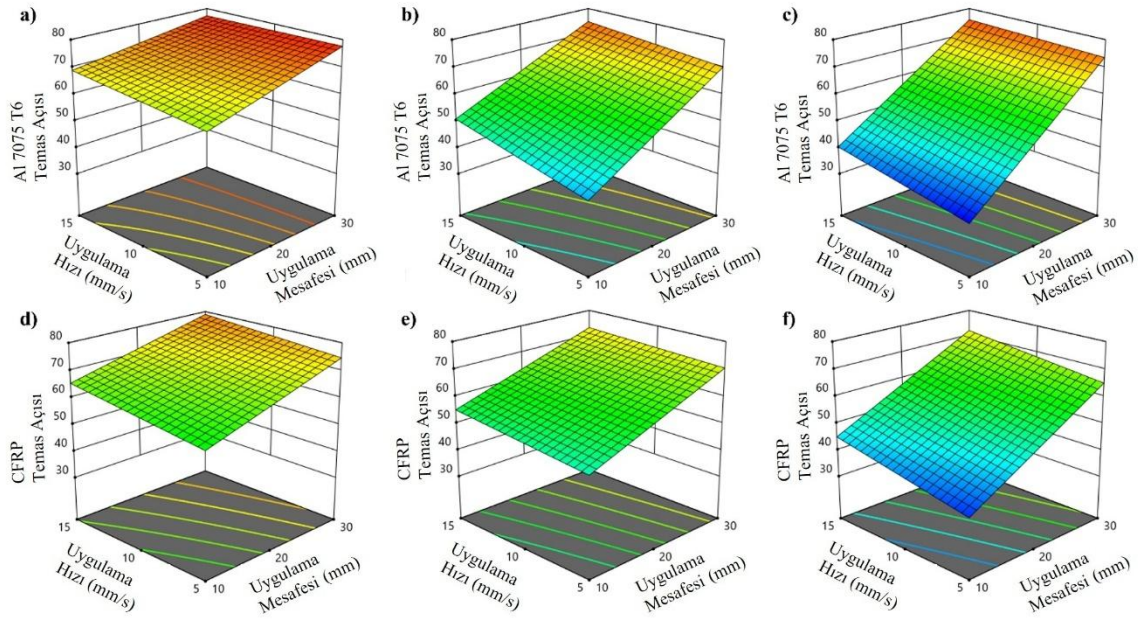
**Tablo 3.5:** Plazma etkinliğinin en iyi, orta, en kötü temas açısı ve bindirme kayma dayanımı sonuçları

Deney Numarası ve Parametreler	Al-7075 T6 Temas Açısı	CFRP Temas Açısı
Deney Numarası: 7 Uygulama Mesafesi: 10 mm Uygulama Sayısı: 5 Uygulama Hızı: 5 mm/s (En iyi)	 32,6°	 33°
Deney Numarası: 7 Bindirme Kayma Dayanımı ( $N/mm^2$ )	 19,62 $N/mm^2$	

**Tablo 3.5 (devam)**

<b>Deneý Numarasý ve Parametreler</b>	<b>Al-7075 T6 Temas Açısı</b>	<b>CFRP Temas Açısı</b>
Deneý Numarasý: 15 Uygulama Mesafesi: 20 mm Uygulama Sayısı: 3 Uygulama Hızı: 15 mm/s (Orta)	 62,2°	 64,7°
Deneý Numarasý: 15 Bindirme Kayma Dayanımı (N/mm <sup>2</sup> )	 10,16 N/mm <sup>2</sup>	
Deneý Numarasý:28 Plazma Uygulanmamış (En kötü)	 84,6°	 85,8°
Deneý Numarasý: 28 Bindirme Kayma Dayanımı (N/mm <sup>2</sup> )	 7,48 N/mm <sup>2</sup>	

Belirlenen parametrelere bağılı olarak uygulanan plazma tedavileri sonucunda elde edilen sonuçlara ilişkin temas açısı değerleri Şekil 3.8’de verilmiştir. Plazma uygulama sayısı, ara veya küsuratlı bir değer olamayacağı için kategorik faktör olarak belirlenmiş olup, uygulama sayısının her bir seviyesi için ayrı ayrı uygulama mesafesi ve uygulama hızına karşılık gelen temas açısı ölçümleri grafiği oluşturulmuştur. Şekil 3.8’de görüldüğü üzere iki yüzey içinde, uygulama sayısının artmasıyla ortalama temas açısı değerlerinde genel olarak azalma görülmüştür. Uygulama mesafesinin azalmasıyla temas açıları belirgin düşüşler olmuş yani yüzey ıslanabilirliğinin arttığı görülmüştür. Al-7075 T6 yüzeyinden elde edilen temas açısı sonuçları incelendiğinde; 10 mm uygulama mesafesinde temas açısı ölçümlerinin ortalaması 49,4°, 20 mm’de ortalama 62,2° ve 30 mm’de ise ortalama 74,8°’dir. CFRP yüzeyinden elde edilen temas açısı sonuçları incelendiğinde; 10 mm uygulama mesafesinde temas açısı ölçümlerinin ortalaması 52,3°, 20 mm’de ortalama 60,5° ve 30 mm’de ise ortalama 73,1°’dir. Uygulama mesafesi kadar etkin olmasa da, uygulama hızının azalması da temas açısı değerlerinin azalmasına sebep olmaktadır. Giriş parametreleri ile temas açısı çıktı sonuçları arasındaki ilişkiyi incelemek için varyans analizi tercih edilmiştir.



**Şekil 3.8:** Deneysel tasarımına bağlı plazma tedavisi sonrası ölçülen temas açısı sonuçları; a) Al-7075 T6 yüzeyine 1 pasoda, b) Al-7075 T6 yüzeyine 3 pasoda, c) Al-7075 T6 yüzeyine 5 pasoda, d) CFRP yüzeyine 1 pasoda, e) CFRP yüzeyine 3 pasoda, f) CFRP yüzeyine 5 pasoda

Varyans analizi, bağımsız değişkenlerin (giriş parametreleri) bağımlı değişken (çıkıtı sonuçları) üzerinde anlamlılığını belirlemek için kullanılan istatistiksel bir analiz tekniğidir. ANOVA, giriş parametrelerinin çıkıtı sonuçları üzerindeki etki oranlarının belirlenmesine ve parametrelerinin anlamlı olup olmadığını belirlemeye yardımcı olmaktadır (Allen, 2010; Jensen, 2017). Uygulama mesafesi, uygulama sayısı ve uygulama hızına karşılık gelen temas açısı ölçümleri için %95 güven aralığında yapılan varyans analizi Tablo 3.6’da sunulmuştur. Tabloda parametrelerin ve parametreler arası etkileşimlerin çıkış değerleri üzerindeki katkı yüzdeleri, F değerleri ve p değerleri verilmiştir. Modellerdeki p değerinin 0,05’ten küçük olması giriş parametrelerinin çıkıtı sonuçları üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bir etkiye sahip olduğunu, F değerinin büyük olması ise ilgili giriş parametrelerinin modele olan etkisinin güçlü olduğunu ifade etmektedir.

Varyans analiz sonuçları incelendiğinde, iki yüzeyde de giriş parametrelerinin temas açısı üzerinde anlamlı bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. Al-7075 T6 yüzeyinin temas açısı üzerinde; %57,61 oranında uygulama mesafesi, %26,18 oranında uygulama sayısı ve %2,27 oranında ise uygulama hızının etki ettiği görülmektedir. CFRP yüzeyinin temas açısı üzerinde; %56,86 oranında uygulama mesafesi, %29,36 oranında uygulama sayısı ve %4,72 oranında ise uygulama hızının etki ettiği görülmektedir. Temas açıları üzerinde en etkin parametrenin uygulama mesafesi olduğu, uygulama hızının ise en az etkiye sahip olduğu tespit edilmiştir. Sönmez ve arkadaşları ile Noeske ve arkadaşları çalışmalarında, uygulama mesafesinin plazma etkinliği üzerinde belirleyici bir etkiye sahip olduğunu ve uygulama hızının ise mesafe kadar etkin olmasa da etkin olduğunu belirtmişlerdir (Noeske et al., 2004; Sönmez vd., 2023).

**Tablo 3.6:** Giriş parametrelerine bağlı elde edilen temas açıları için varyans analizi

Kaynak	SD	Katkı Oranı (%)		F-Değeri		P-Değeri	
		Al-7075 T6	CFRP	Al-7075 T6	CFRP	Al-7075 T6	CFRP
Model	11	%97,96	%96,53	65,43	37,98	0,000	0,000
Lineer	4	%86,06	%90,94	158,07	98,39	0,000	0,000
UM	1	%57,61	%56,86	423,28	246,08	0,000	0,000
UH	1	%2,27	%4,72	16,67	20,41	0,001	0,000
US	2	%26,18	%29,36	96,18	63,54	0,000	0,000
Kare	2	%0,04	%0,89	0,16	1,92	0,852	0,180
UM*UM	1	%0,00	%0,88	0,01	3,79	0,927	0,071
UH*UH	1	%0,04	%0,01	0,31	0,06	0,583	0,812
İkili	5	%11,86	%4,71	17,42	4,07	0,000	0,016
İlişkiler							
UM*UH	1	%0,53	%0,18	3,93	0,76	0,066	0,397
UM*US	2	%10,92	%4,11	40,13	8,90	0,000	0,003
UH*US	2	%0,40	%0,42	1,46	0,90	0,264	0,426
Hata	15	%2,04	%3,47				
Toplam	26	%100,00	%100,00				

Yanıt yüzey metodu, farklı giriş parametreleri ile çıktı sonuçları arasındaki ilişkinin ampirik modellerle belirlenmesine yönelik bir yaklaşımdır (Khuri and Mukhopadhyay, 2010). Çalışmada, nümerik olarak tanımlanan; uygulama mesafesi ve uygulama hızı, kategorik olarak tanımlanan uygulama sayısı faktörlerinin etkisini belirlemek amacıyla, temas açıları çıktısı için yanıt yüzey metoduyla ikinci dereceden matematiksel modeller oluşturulmuştur. Kategorik faktör olan uygulama sayısının seviyeleri için ve iki ayrı malzeme yüzeyi için ayrı ayrı denklemler oluşturulmuştur. Deney sonuçlarına göre; her bir uygulama sayısı için Denklem 3.1 giriş parametreleri ile ölçüm sonuçları arasındaki bağlantı fonksiyonunu vermektedir. Kategorik faktör olarak tanımlanan uygulama sayısına bağlı temas açısı ölçümü için çıkış fonksiyonu:

$$CA_{US} = f(UM, UH) + \varepsilon \quad (3.1)$$

Tanımlanamayan hatalar  $\varepsilon$  ile ifade edilmiştir.

Yanıt Yüzey Metoduna dayanan ikinci dereceden temas açısı ölçüm denklemi tüm uygulama sayıları için Denklem 3.2'de verilmiştir.

$$CA_{US} = \beta_0 + \beta_1 \cdot UM + \beta_2 \cdot UH + \beta_3 \cdot UM \cdot UM + \beta_4 \cdot UH \cdot UH + \beta_5 \cdot UM \cdot UH \quad (3.2)$$

Tablo 3.7’de kategorik olarak tanımlanan uygulama sayısına bağlı olarak regresyon denklemleri oluşturulmuştur. Yanıt Yüzey Metoduyla %95 güven aralığında oluşturulan, Al-7075 T6 ve CFRP malzemelerinin yüzeylerinde oluşacak temas açıları ölçümü için oluşturulan regresyon denklemleri (Denklem 3.3-3.8) Tablo 3.7’te sunulmuştur.

**Tablo 3.7:** Temas açısı sonuçlarına ilişkin açıklama güçleri ve uygulama sayısına bağlı olarak oluşturulan temas açısı matematiksel modelleri

	<b>Al-7075 T6</b>	<b>CFRP</b>	
R <sup>2</sup>	%97,96	%96,53	
R <sup>2</sup> (düzeltilmiş)	%96,46	%93,99	
R <sup>2</sup> (tahmin)	%92,59	%84,58	<b>Denklem Numarası</b>
Uygulama Sayısı	1 $TA_{A1} = 53,74 + 0,9 * UM$	$TA_{C1} = 52,5 - 0,011 * UM$	(3.3)
	$+ 0,37 * UH$	$+ 1,07 * UH$	(3.4)
	$- 0,001 * UM$	$+ 0,0224$	
	$* UM + 0,024$	$* UM * UM$	
	$* UH * UH$	$- 0,0111$	
	$- 0,03 * UM$	$* UH * UH$	
	$* UH$	$- 0,0142$	
		$* UM * UH$	
	3 $TA_{A3} = 20,18 + 1,683 * UM$	$TA_{C3} = 42,58 + 0,211 * UM$	(3.5)
	$+ 0,887 * UH$	$+ 0,91 * UH$	(3.6)
	$- 0,001 * UM$	$+ 0,0224$	
	$* UM + 0,024$	$* UM * UM$	
	$* UH * UH$	$- 0,0111$	
	$- 0,03 * UM$	$* UH * UH$	
	$* UH$	$- 0,0142$	
	$* UM * UH$		
5 $TA_{A5} = 7,98 + 2,25 * UM$	$TA_{C5} = 21,4 + 0,663 * UM$	(3.7)	
$+ 0,617 * UH$	$+ 1,34 * UH$	(3.8)	
$- 0,001 * UM$	$+ 0,0224$		
$* UM + 0,024$	$* UM * UM$		
$* UH * UH$	$- 0,0111$		
$- 0,03 * UM$	$* UH * UH$		
$* UH$	$- 0,0142$		
	$* UM * UH$		

Giriş parametreleri (bağımsız değişken) ile çıkış değerleri (bağımlı değişken) arasındaki ilişkiler incelendiğinde her iki yüzeye ait modelin de açıklama güçleri (R<sup>2</sup>) %95 üzerinde, bağımsız değişken sayısı dikkate alındığında düzeltilmiş belirlilik katsayıları (R<sup>2</sup> düzeltilmiş) %93 üzerinde ve tahmin edebilme güçlerinin (R<sup>2</sup> tahmin) ise %84 üzerinde olduğu belirlenmiştir. Bu sonuçlar, temas açısı için oluşturulan modellerin hem açıklayıcı olduklarını hem de tahmin performansı açısından yüksek güvenilirliğe sahip olduklarını göstermektedir.

### 3.2.2 II. etap bindirme kayma dayanımı ölçümleri

Yapıştırma işlemi sonrasında yapıştırılan malzemeler üzerine yapıştırma kalıbı vasıtasıyla yük yüklenmiştir. Bu yükleme koşullarında yapıştırıcının ilk kürleşmesi 4,5 saat sonunda gerçekleşirken, nihai kürleşme için 3 gün beklenmiştir. Çekme testi sonrasında ayrılan yüzeyler incelenmiştir. Daha önceki çalışmada kullanılan yapıştırıcıdan farklı olarak bu yapıştırıcı hava boşluğu veya dağılmama gibi bir problem getirmemiş olup, tüm yüzeye homojen bir şekilde dağılmıştır. Deney tasarımına bağlı olarak uygulanan atmosferik basınçlı soğuk plazma sonrasında yapılan yapıştırma işlemine ait çekme testinden elde edilen bindirme kayma dayanım değerleri Tablo 3.8’de verilmiştir.

**Tablo 3.8:** II. etap deney tasarımına bağlı olarak elde edilen bindirme kayma dayanımı ölçüm sonuçları

Deney Numarası	Uygulama Mesafesi (mm)	Uygulama Sayısı	Uygulama Hızı (mm/s)	Bindirme Kayma Dayanımı (N/mm <sup>2</sup> )
1	10	1	5	14,91
2	10	1	10	12,89
3	10	1	15	11,89
4	10	3	5	15,93
5	10	3	10	13,37
6	10	3	15	12,21
7	10	5	5	19,62
8	10	5	10	18,73
9	10	5	15	15,50
10	20	1	5	10,66
11	20	1	10	10,51
12	20	1	15	10,11
13	20	3	5	11,65
14	20	3	10	11,33
15	20	3	15	10,16
16	20	5	5	13,69
17	20	5	10	11,88
18	20	5	15	10,72
19	30	1	5	8,20
20	30	1	10	5,85
21	30	1	15	5,83
22	30	3	5	9,53
23	30	3	10	8,96
24	30	3	15	8,86
25	30	5	5	9,75
26	30	5	10	9,18

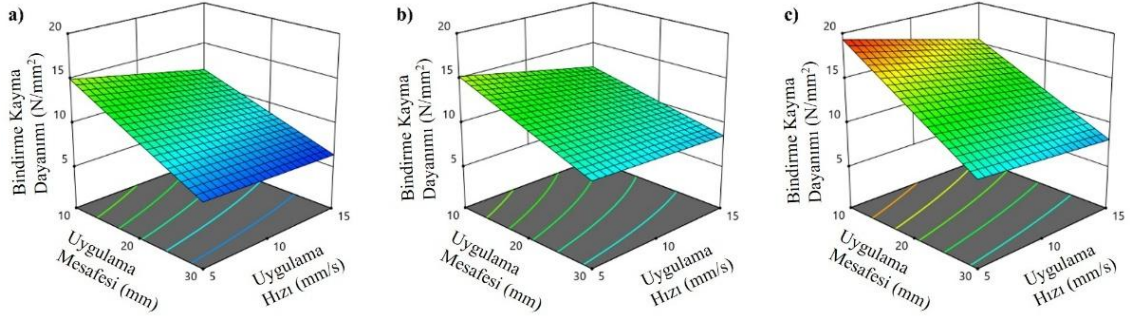
**Tablo 3.8** (devam)

Deney Numarası	Uygulama Mesafesi (mm)	Uygulama Sayısı	Uygulama Hızı (mm/s)	Bindirme Kayma Dayanımı (N/mm <sup>2</sup> )
27	30	5	15	9,12
28	Plazmasız			7,48
29	Yalnızca Al 7075 T6 yüzeyine plazma tedavisi			9,92
30	Yalnızca CFRP yüzeyine plazma tedavisi			11,15
31	5 mm uygulama mesafesinde 30 saniye			21,48

Plazma tedavisi uygulanmayan numunenin bindirme kayma dayanımı 7,48 N/mm<sup>2</sup> olarak ölçülmüştür. En yüksek bindirme kayma dayanım değeri yakın plazmalı (5 mm mesafe ve 30 saniye maruz kalma) işlemde 21,48 N/mm<sup>2</sup> olarak elde edilmiştir. En düşük bindirme kayma dayanım değeri ise 21. deneyde (30 mm uygulama mesafesi, 1 paso ve 15 mm/s ) 5,83 N/mm<sup>2</sup> olarak ölçülmüştür. Bindirme kayma dayanımının düşük değerleri genelde 30 mm uygulama mesafesinde gerçekleşmiştir. Atmosferik basınçlı soğuk plazmanın etkinliği 30 mm uygulama mesafesinde oldukça düşüktür. Uygulama sayısı artması ve uygulama hızının düşmesiyle bindirme kayma dayanım değerleri plazma tedavisi uygulanmamış halde elde edilen bindirme kayma dayanımı değerinin üstüne çıkmıştır. Uygulama mesafesinin 10 mm olduğu deney koşullarında elde edilen bindirme kayma dayanım değerleri ortalamanın üstünde ölçülmüştür. Plazma tedavisi yakın mesafe olması durumunda yüzey üzerindeki etkinliğini kanıtlamaktadır.

Belirlenen parametrelere bağlı olarak uygulanan plazma tedavileri sonucunda elde edilen sonuçlara ilişkin bindirme kayma dayanım değerleri Şekil 3.9'da verilmiştir. Plazma uygulama sayısı ara veya küsuratlı bir değer olamayacağı için kategorik faktör olarak belirlenmiş olup, uygulama sayısının her bir seviyesi için ayrı ayrı uygulama mesafesi ve uygulama hızına karşılık gelen bindirme kayma dayanım grafiği oluşturulmuştur. Şekil 3.9'da görüldüğü üzere uygulama sayısının artmasıyla ortalama bindirme kayma dayanım değerlerinde de genel olarak artış görülmüştür. Uygulama mesafesinin artmasıyla bindirme kayma dayanımı değerlerinde azalma olduğu görülmüştür. Deney sonuçlarında; 10 mm uygulama mesafesinde bindirme kayma dayanımı yaklaşık 15 N/mm<sup>2</sup>, 20 mm'de yaklaşık 11,12 N/mm<sup>2</sup> ve 30 mm uygulama mesafesinde ise yaklaşık olarak 8,37 N/mm<sup>2</sup>'dir. Uygulama hızının artması da bindirme kayma dayanımının azalmasına sebep olmaktadır. Deney sonuçlarında; 5 mm/s uygulama hızında elde edilen bindirme kayma dayanımı ortalama değeri yaklaşık 11,71 N/mm<sup>2</sup>, 10 mm/s'de yaklaşık 11,48 N/mm<sup>2</sup> ve 15 mm/s

uygulama hızında ise yaklaşık  $11,33 \text{ N/mm}^2$ 'dir. Giriş parametreleri ile çıktı sonuçları arasındaki ilişkiyi incelemek için varyans analizi tercih edilmiştir.



**Şekil 3.9:** Deney parametrelerine bağlı olarak elde edilen bindirme kayma dayanımı, a) uygulama sayısı=1, b) uygulama sayısı=3 ve c) uygulama sayısı=5

Uygulama mesafesi, uygulama sayısı ve uygulama hızına karşılık gelen bindirme kayma dayanımı için %95 güven aralığında yapılan varyans analizi Tablo 3.9'da sunulmuştur. Tabloda parametrelerin ve parametreler arası etkileşimlerin çıkış değerleri üzerindeki katkı yüzdeleri, F değerleri ve p değerleri verilmiştir. Modellerdeki p değerinin 0,05'ten küçük olması giriş parametrelerinin çıktı sonuçları üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bir etkiye sahip olduğunu, F değerinin büyük olması ise ilgili giriş parametrelerinin modele olan etkisinin güçlü olduğunu ifade etmektedir.

Varyans analiz sonuçları incelendiğinde, giriş parametrelerinin bindirme kayma dayanımı üzerinde anlamlı bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. Bindirme kayma dayanımı üzerinde; %68,68 oranında uygulama mesafesi, %14,54 oranında uygulama sayısı ve %7,33 oranında ise uygulama hızının etki ettiği görülmektedir. Bindirme kayma dayanımı üzerinde en etkin parametrenin uygulama mesafesi olduğu, uygulama hızının ise en az etkiye sahip olduğu tespit edilmiştir. Literatürdeki bazı çalışmalarda, uygulama mesafesinin plazma etkinliği üzerinde belirleyici bir etkiye sahip olduğunu ve uygulama hızının ise mesafe kadar etkin olmasa da etkin olduğunu belirtmişlerdir (Kostov et al., 2014; Noeske et al., 2004; Sönmez vd., 2023).

**Tablo 3.9:** Giriş parametrelerine bağlı elde edilen bindirme kayma dayanımı için varyans analiz sonuçları

Kaynak	SD	Katkı Oranı (%)	F-Değeri	P-Değeri
Model	11	%96,65	39,39	0,000
Lineer	4	%90,55	101,48	0,000
UM	1	%68,68	307,87	0,000
UH	1	%7,33	32,88	0,000
US	2	%14,54	32,58	0,000
Kare	2	%0,56	1,26	0,312
UM*UM	1	%0,51	2,28	0,152
UH*UH	1	%0,05	0,24	0,629
İkili ilişkiler	5	%5,54	4,96	0,007
UM*UH	1	%1,50	6,71	0,020
UM*US	2	%3,91	8,77	0,003
UH*US	2	%0,13	0,28	0,757
Hata	15	%3,35		
Toplam	26	%100,00		

Çalışmada, nümerik olarak tanımlanan; uygulama mesafesi ve uygulama hızı, kategorik olarak tanımlanan uygulama sayısı faktörlerinin etkisini belirlemek amacıyla, bindirme kayma dayanım çıktısı için yanıt yüzey metoduyla ikinci dereceden matematiksel modeller oluşturulmuştur. Kategorik faktör olan uygulama sayısının seviyeleri için ayrı ayrı denklemler oluşturulmuştur. Deney sonuçlarına göre; her bir uygulama sayısı için Denklem 3.9 giriş parametreleri ile ölçüm sonuçları arasındaki bağlantı fonksiyonunu vermektedir. Kategorik faktör olarak tanımlanan uygulama sayısına bağlı bindirme kayma dayanımı için çıkış fonksiyonu:

$$\tau_{US} = f(UM, UH) + \varepsilon \quad (3.9)$$

Tanımlanamayan hatalar  $\varepsilon$  ile ifade edilmiştir.

Yanıt Yüzey Metoduna dayanan ikinci dereceden denklem tüm uygulama sayıları için Denklem 3.10'da verilmiştir.

$$\tau_{US} = \beta_0 + \beta_1 \cdot UM + \beta_2 \cdot UH + \beta_3 \cdot UM \cdot UM + \beta_4 \cdot UH \cdot UH + \beta_5 \cdot UM \cdot UH \quad (3.10)$$

Yanıt Yüzey Metoduyla %95 güven aralığında oluşturulan, %96,65 güvenilirlik düzeyindeki regresyon denklemleri Denklem 3.11, 3.12 ve 3.13'de verilmiştir.

Uygulama sayısının 1 olması durumunda bindirme kayma dayanımı çıktısı için oluşturulan regresyon denklemi:

$$\tau_{US=1} = 23,27 - 0,648 * UM - 0,567 * UH + 0,00495 * UM * UM + 0,0065 * UH * UH + 0,01201 * UM * UH \quad (3.11)$$

Uygulama sayısının 3 olması durumunda bindirme kayma dayanımı çıktısı için oluşturulan regresyon denklemi:

$$\tau_{US=3} = 22,6 - 0,554 * UM - 0,565 * UH + 0,00495 * UM * UM + 0,0065 * UH * UH + 0,01201 * UM * UH \quad (3.12)$$

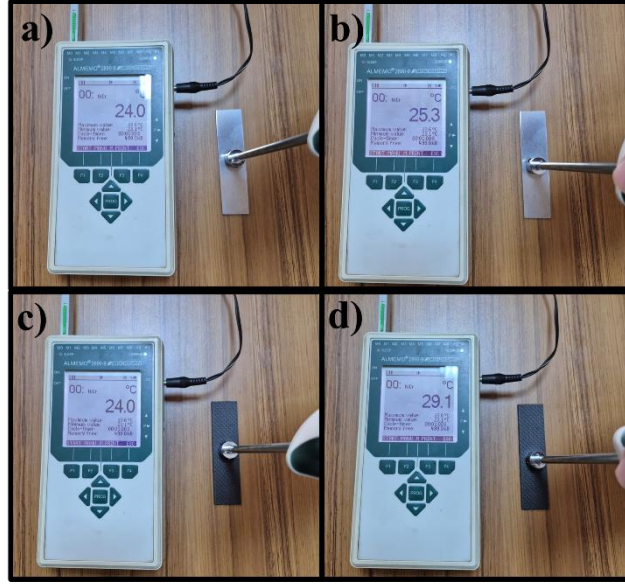
Uygulama sayısının 5 olması durumunda bindirme kayma dayanımı çıktısı için oluşturulan regresyon denklemi:

$$\tau_{US=5} = 28,9 - 0,748 * UM - 0,627 * UH + 0,00495 * UM * UM + 0,0065 * UH * UH + 0,01201 * UM * UH \quad (3.13)$$

Giriş parametreleri (bağımsız değişken) ile çıkış değerleri (bağımlı değişken) arasındaki ilişkiler incelendiğinde modelin açıklama gücü ( $R^2$ ) %96,65, bağımsız değişken sayısı dikkate alındığında düzeltilmiş belirlilik katsayısı ( $R^2$  düzeltilmiş) %94,2 ve tahmin edebilme gücünün ( $R^2$  tahmin) ise %89,83 olduğu belirlenmiştir. Bu sonuçlar, modelin hem açıklayıcı olduğunu hem de tahmin performansı açısından yüksek güvenilirliğe sahip olduğunu göstermektedir.

### 3.2.3 II. etap sıcaklık ölçümleri

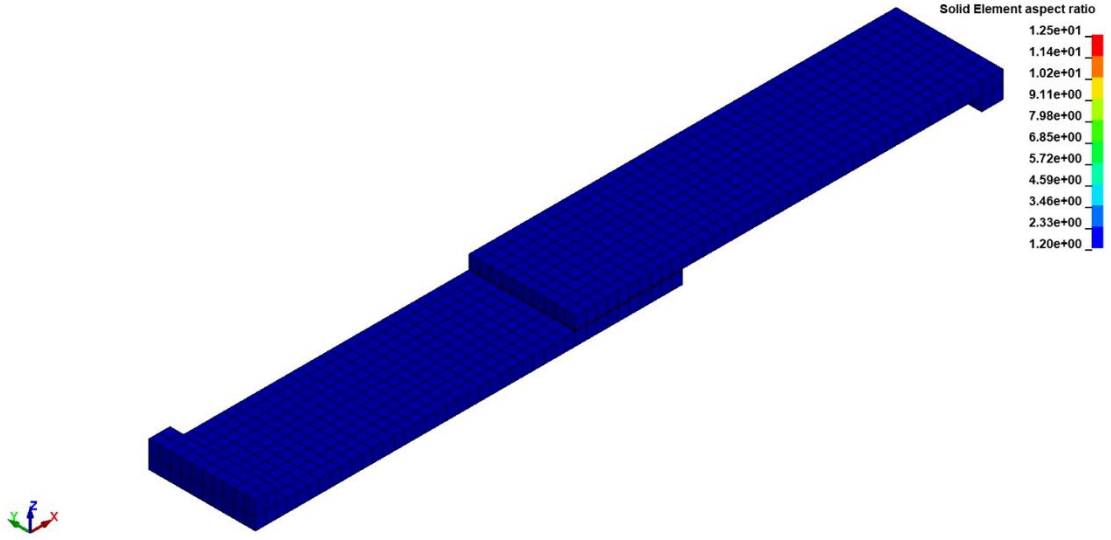
Al-7075 T6 ve CFRP kompozit yüzeyleri üzerine oda sıcaklığında 10 mm uygulama mesafesinde 30 saniye plazma tedavisi uygulanmıştır. Plazma tedavisi uygulanmayan Al-7075 T6 ve CFRP kompozit yüzeylerinin sıcaklıkları 24°C olarak ölçülmüştür. Plazma tedavisi sonrasında yüzeylerin sıcaklıkları Al-7075 T6 yüzeyinde 25,3°C ve CFRP kompozit yüzeyinde ise 29,1°C olarak ölçülmüştür. Plazma işleminin yüzey üzerinde etkin bir sıcaklık değişimine sebep olmadığı görülmüştür (Şekil 3.10).



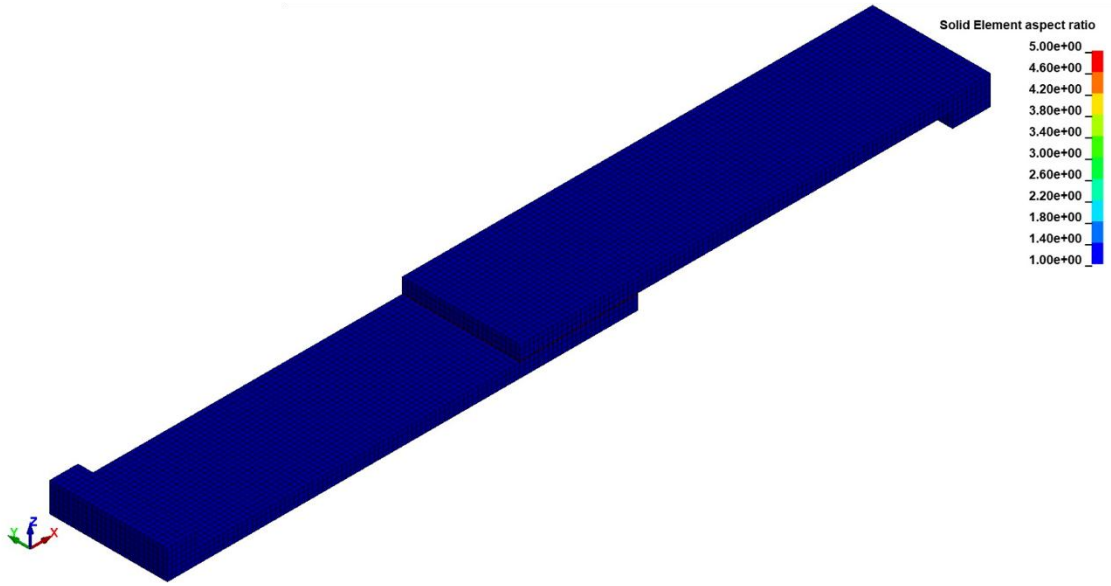
**Şekil 3.10:** Yüzey sıcaklık ölçümleri a) plazma uygulanmamış Al-7075 T6, b) plazma uygulanmış Al-7075 T6, c) plazma uygulanmamış CFRP, d) plazma uygulanmış CFRP

### 3.2.4 II. etap sonlu elemanlar analizi

Sonlu elemanlar analizi için tanımlanan özellikler, söz konusu eleman tipini özellikle yüksek doğruluk ve yakınsama güvenilirliği gerektiren mühendislik analizleri için avantajlı hâle getirmektedir. Eleman boyutunun uygun şekilde belirlenebilmesi amacıyla, 2,5 mm, 1 mm ve 0,25 mm olmak üzere üç farklı eleman boyutunda üç farklı sonlu elemanlar analizi gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. 2,5 mm, 1 mm ve 0,25 mm olmak üzere farklı eleman boyutları kullanılarak oluşturulan sonlu eleman ağ yapıları ve ağ yapılarında elemanların katı eleman en boy oranı (aspect ratio) değerleri sırasıyla Şekil 3.11, Şekil 3.12 ve Şekil 3.13'te verilmiştir. Eleman boyutunun küçülmesiyle modeldeki eleman sayısının önemli ölçüde arttığı ve bu nedenle çözüm süresinde de doğrudan artış olduğu görülmektedir. Analiz süreleri incelendiğinde; 2,5 mm eleman boyutuna sahip modelin ortalama yaklaşık 30 saniyede çözüldüğü, 1 mm eleman boyutuna sahip modelin ortalama 5 dakikada ve 0,25 mm eleman boyutuna sahip modelin ise ortalama 15 saatlik çözüm süresi gerektirdiği belirlenmiştir. Katı eleman en boy oranınının 1'e yakın olması, eleman geometrisinin daha ideal olduğunu ve sayısal çözüm doğruluğunu olumlu yönde etkilediğini göstermektedir. Katı eleman en boy oranları incelendiğinde; 2,5 mm eleman boyutuna sahip model haricinde 1 mm ve 0,25 mm eleman boyutuna sahip modellerin 1'e yakın olması bu eleman geometrilerinin daha ideal olduğunu göstermektedir.



Şekil 3.11: 2,5 mm eleman boyutuna sahip modelin ağ yapısı ve katı eleman en boy oranı (aspect ratio)

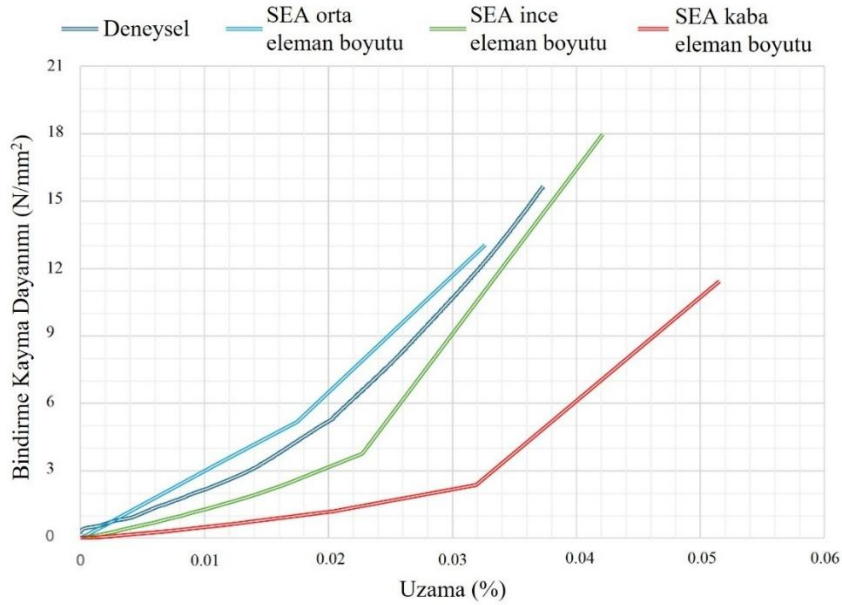


Şekil 3.12: 1 mm eleman boyutuna sahip modelin ağ yapısı ve katı eleman en boy oranı (aspect ratio)



**Şekil 3.13:** 0,25 mm eleman boyutuna sahip modelin ağ yapısı ve katı eleman en boy oranı (aspect ratio)

Yapılan değerlendirme sonucunda, gerçek davranış ile en çok uyum sağlayan ve ortalama sürede çözülebilen 1 mm eleman boyutuna sahip modelin, hata oranı ve çözüm süresi arasındaki denge açısından en verimli olduğu kabul edilmiştir. Eleman boyutunun sonlu elemanlar modeli üzerindeki etkisine ilişkin ayrıntılı karşılaştırmaları Tablo 3.11’de, gerilme–şekil değiştirme davranışları ise Şekil 3.14’de sunulmaktadır.



**Şekil 3.14:** Eleman boyutunun sonlu elemanlar modeli üzerindeki etkisi (gerilme–şekil değiştirme)

Eleman boyutunun 1 mm olduğu modelde, toplamda 16675 Eleman ve 22256 düğüm noktası bulunmaktadır. Her bir bileşene ait eleman ve düğüm noktası sayıları Tablo 3.10’de ayrı ayrı verilmiştir.

**Tablo 3.10:** Her bileşene ait eleman ve düğüm noktası sayıları

Parça/Özellik	Eleman Sayısı	Düğüm Noktası Sayısı
AL-7075 T6 ve CFRP	7500	10504
Yapıştırıcı	625	1352
Tablar	450	728

**Tablo 3.11:** Eleman boyutunun sonlu elemanlar modeli üzerindeki etkisinin karşılaştırması

Model	Bindirme Kayma Dayanım Değeri	% Fark	N/mm <sup>2</sup> Fark	Katı Eleman En-Boy Oranı (Aspect Ratio)
Referans	15,64	-	-	-
Kaba	11,44	26,85	4,2	1,2-12,5
Orta	13,04	16,62	2,6	1-5
İnce	17,98	-14,96	-2,34	1-1,25

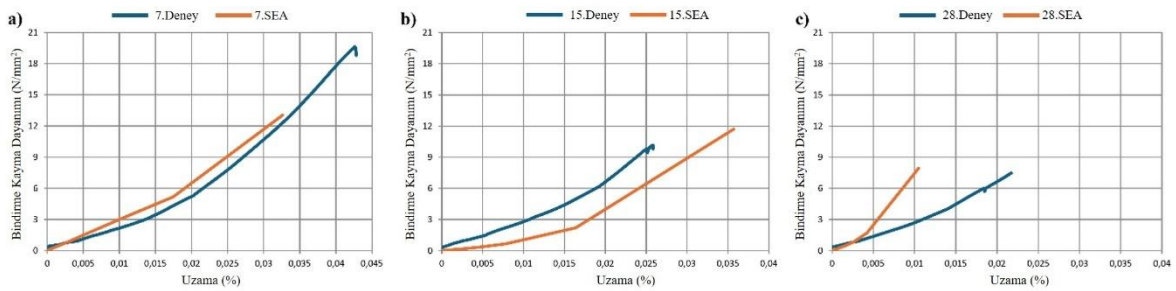
Tablo 3.11’de referans deneysel sonuçlar ile farklı ağ yoğunluklarında elde edilen sayısal sonuçların karşılaştırılması incelendiğinde; kaba ağ (coarse) modelinde hesaplanan maksimum kaymadaki kopma dayanımı 11,44 N/mm<sup>2</sup> olup, referans değere kıyasla %26,85 oranında bir sapma göstermektedir. Orta yoğunluktaki ağ (mid) modelinde elde edilen değer 13,04 N/mm<sup>2</sup> olarak hesaplanmış ve referans değere göre %16.62’lik bir fark oluşmuştur. İnce ağ (fine) modelinde ise maksimum kaymadaki kopma dayanımı 17,98 N/mm<sup>2</sup> olarak belirlenmiş olup, bu durum %14,96 oranında bir sapmaya karşılık gelmektedir.

Deneysel verilerin sonlu elemanlar analizine aktarılabilmesi amacıyla geliştirilen yazılım, üretim parametrelerini girdi olarak almakta ve LS-DYNA malzeme kartında kullanılacak olan Kayma Hasar Gerilmesi (SFLS - Shear Failure Limit Stress) değerini aşağıdaki genel regresyon denklemi Denklem 3.14 ile hesaplamaktadır:

$$SFLS = C_0 + C_1 \cdot d + C_2 \cdot v + C_3 \cdot d^2 + C_4 \cdot v^2 + C_5 \cdot (d \cdot v) \quad (3.14)$$

Burada d uygulama mesafesi, v uygulama hızı ve C<sub>n</sub> ise uygulama sayısına (1, 3 veya 5 paso) göre değişen regresyon katsayılarını temsil etmektedir. Yazılım ayrıca, literatür ve deneysel gözlemlere dayanarak Normal Hasar Gerilmesini (NFLS), bindirme kayma dayanımının bir fonksiyonu olarak (NFLS=1.5\*SFLS) kabul etmektedir.

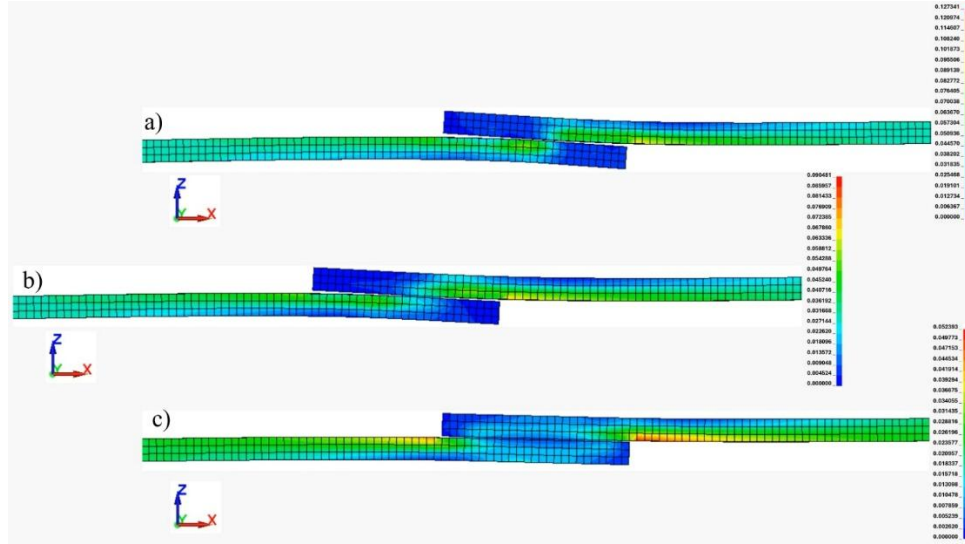
Deney sonuçlarına göre en iyi (7. Deney – 10 mm uygulama mesafesi, 5 uygulama sayısı ve 5 mm/s uygulama hızı), orta (15. Deney – 20 mm uygulama mesafesi, 3 uygulama sayısı ve 15 mm/s uygulama hızı) ve en kötü (28. Deney – Plazmasız) bindirme kayma dayanımının elde edildiği deneyler seçilmiş ve analiz ile karşılaştırmaları yapılmıştır (Şekil 3.15). Plazma tedavisinin en etkin olduğu 7.Deney’de bindirme kayma dayanımı  $19,6 \text{ N/mm}^2$  ölçülmüşken, analiz sonucu  $13 \text{ N/mm}^2$  elde edilmiştir. Yaklaşık %33,7 oranında bir fark olduğu görülmektedir. Bu fark %95 güvenilirlik düzeyinde, bindirme kayma dayanımında %89,83 ve temas açısında %84 civarında tahmin edebilme becerisine sahip olduğu göz önüne alındığında yaklaşık %71 oranında bir doğruluk payı biçilmiştir. Bu durumda %29 hata oranına karşılık yaklaşık %33,7 hata olduğu görülmüştür. Bu tür farklılıklar, yapıştırma bağlantılarına yönelik önceki sayısal çalışmalarda da rapor edilmiş olup, idealize edilmiş kohezyon modelleme yaklaşımlarının doğasından kaynaklanan sınırlılıkları göstermektedir (Öztürk et al., 2024; Völkerink, 2022). Plazma tedavisi sonucunda elde edilen sonuçların ortalama değerine karşılık gelen 15.Deney incelendiğinde ise, bindirme kayma dayanımı  $10,16 \text{ N/mm}^2$  ölçülmüşken, analiz sonucu  $11,7 \text{ N/mm}^2$  elde edilmiştir. Yaklaşık %15,2 oranında bir fark olduğu görülmüştür. Plazma tedavisi uygulanmayan 28.Deney’de, bindirme kayma dayanımı  $7,48 \text{ N/mm}^2$  ölçülmüşken, analiz sonucu  $7,93 \text{ N/mm}^2$  elde edilmiştir. Yaklaşık %6 oranında bir fark olduğu görülmüştür. Genel olarak analiz sonuçları ile gerçek deneyler arasındaki farkın ihmal edilebilir düzeyde olduğu, plazmanın etkinliği ve grafik yakınsamaları, oluşturulan modellerle belirlenen parametreler arasında deney yapmadan simüle ederek ön bilgi sahibi olunabileceği belirlenmiştir.



**Şekil 3.15:** En iyi, orta, en kötü bindirme kayma dayanım deney sonuçları ile FEA ile elde edilen sonuçların karşılaştırılması

Analiz Yapıştırıcı tabakasındaki gerilme dağılımını ve ayrılma davranışını göstermek amacıyla sonlu elemanlar analizinden elde edilen temsili sonuçlar Şekil 3.16’da sunulmuştur. Şekil 16(a)’da 7. Deneye, Şekil 16(b)’de 15. Deneye ve Şekil 16(c)’de plazma

uygulanmayan 28. Deneye ait analiz görselleri yer almaktadır. Görseller, analiz sırasında bindirme bölgesinde oluşan gerilme yoğunlaşmasını ve ayrılma eğilimini karşılaştırmalı olarak göstermektedir.



**Şekil 3.16:** Yapıştırma bağlantısının sonlu elemanlar analizinde elde edilen gerilme dağılımları, a) 7.Deney, b) 15.Deney, c) 28.Deney

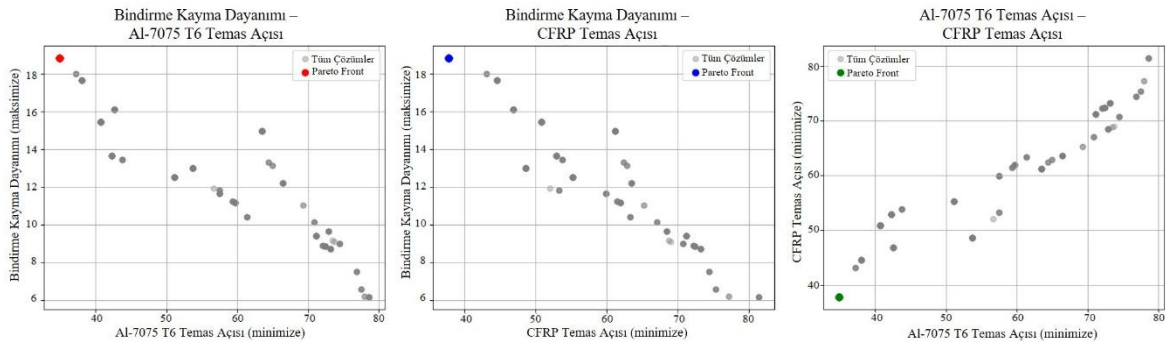
### 3.2.5 II. etap optimizasyon

Varyans analiz sonuçlarına göre, temas açıları ve bindirme kayma dayanımı üzerinde sırasıyla uygulama mesafesi, uygulama hızı ve uygulama sayısının belirgin bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. Al-7075 T6 temas açısı, CFRP temas açısı ve bindirme kayma dayanımı tahmini için ayrı ayrı matematiksel modeller oluşturulmuş olup, her bir çıktı değerinin eş zamanlı optimizasyonu için Multi-objective NSGA-II (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm-II) optimizasyonu kullanılmıştır. Random Forest tahmin modeli, elde edilen çıktıların eş zamanlı olarak iyileştirilmesi için NSGA-II algoritmasının küresel arama ve Pareto-tabanlı optimizasyon yeteneklerinden yararlanılarak oluşturulmuştur. Plazma işlem parametrelerinin çok amaçlı optimizasyonu için oluşturulan Random Forest kestirim modelleri ile NSGA-II algoritmasının birlikte kullanıldığı hibrit yaklaşım başarıyla uygulanmıştır. Bu hibrit yaklaşım, doğrusal olmayan ve çok çıktılı optimizasyon problemlerinde yüksek tahmin doğruluğu ve çeşitli Pareto-optimal çözümler sağlayabilme yeteneği nedeniyle tercih edilmiştir (Jialiang et al., 2025; Kurt et al., 2026; Z. Li et al., 2025). Modeller, uygulama mesafesi-uygulama sayısı-uygulama hızı kombinasyonlarından oluşan 27 deneysel veriyi temel alarak eğitilmiş ve bindirme kayma dayanımı, Al-7075 T6 temas açısı ve CFRP temas açısı için yüksek tahmin doğruluğu sağlanmıştır. Optimizasyon süreci

120 bireyden oluşan bir popülasyon ve 80 jenerasyon sonunda kararlı bir Pareto yakınsaması göstermiştir. NSGA-II sonucunda üç amaç fonksiyonu arasındaki çatışmayı temsil eden geniş bir Pareto optimal çözüm kümesi elde edilmiştir. Genel eğilim olarak, bindirme kayma dayanımını artıran ve temas açılarını düşüren çözümlerin daha düşük uygulama mesafesi, daha yüksek uygulama sayısı ve daha düşük uygulama hız değerleriyle ilişkili olduğu görülmüştür. Değerlendirme aşamasında bindirme kayma dayanımının önemi temas açılara göre öncelikli tutulmuştur. Tüm Pareto çözümleri yeniden hesaplanarak performans değerleri karşılaştırılmış ve karar vericiye sunulmak üzere en yüksek bindirme kayma dayanımına sahip ilk 15 çözüm seçilmiştir (Tablo 3.12). Bu çözümler, bindirme kayma dayanımı - temas açıları çatışmasının en iyi dengeleyen aday parametre setlerini temsil etmektedir. Optimum çözümün oluşturulan parametre seviyeleri dışında olma ihtimali ön görülerek; uygulama mesafesi ve uygulama hızı için deney tasarımında belirlenen seviye aralıklarının dışına çıkacak şekilde seçilmiştir. Seçilen çözümler incelendiğinde, optimum bölgelerin genel olarak 1,1-13,9 mm uygulama mesafesi aralığında, 5 uygulama sayısında ve 1-5,2 mm/s uygulama hızı civarında yoğunlaştığı görülmüştür. Bu parametre aralıkları hem yüzey etkinliğini hem de polimer kompozit – metal ara yüzeyinin yapışma aktivasyonu açısından en verimli bölgeyi işaret etmektedir. Elde edilen Pareto çözümlerinin dağılımı, üç amaç fonksiyonu arasında belirgin bir denge oluşturduğunu ve algoritmanın elit bireyleri koruyarak gerçek Pareto yüzeyine doğru başarılı bir yakınsama gerçekleştirdiğini göstermiştir. Tasarıma ait performans grafiği Şekil 3.17’te gösterildiği üzere tüm çözümler içerisinde Pareto-Front noktaları bindirme kayma dayanımı - Al-7075 T6 temas açısı, bindirme kayma dayanımı – CFRP temas açıları ve Al-7075 T6 temas açısı – CFRP temas açısı için en iyi çözümleri kırmızı, mavi ve yeşil renkli nokta ile sunmaktadır. Bu sonuçlar, benzer yapıştırma ve yüzey modifikasyonu süreçlerinde NSGA-II optimizasyon yönteminin güçlü bir karar destek aracı olarak kullanılabileceğini doğrulamaktadır.

**Tablo 3.12:** Random Forest tahmin modeli ile NSGA-II optimizasyonuna ait en yüksek kaymadaki kopma dayanımına sahip ilk 15 çözüm

	Giriş Parametreleri			NSGA-II Tahminleri			RSM Matematiksel Model Sonuçları		
	UM (mm)	US	UH (mm/s)	BKD (N/mm <sup>2</sup> )	Al-7075 T6 TA	CFRP TA	BKD (N/mm <sup>2</sup> )	Al-7075 T6 TA	CFRP TA
0	10,663	5	3,86	23,53	34,87	37,78	19,66	33,36	35,44
1	6,254	5	3,60	23,53	34,87	37,78	22,51	23,87	30,79
2	10,071	5	2,06	23,53	34,87	37,78	20,86	31,29	32,76
3	6,254	5	2,55	23,53	34,87	37,78	23,05	23,26	29,54
4	6,241	5	1,04	23,53	34,87	37,78	23,86	22,45	27,70
5	12,089	5	4,26	23,53	34,87	37,78	18,64	36,56	37,47
6	10,957	5	5,16	23,53	34,87	37,78	19,92	34,64	37,17
7	1,080	5	5,21	23,53	34,87	37,78	25,08	14,10	28,74
8	1,160	5	1,04	23,53	34,87	37,78	27,41	11,22	23,57
9	1,354	5	1,55	23,53	34,87	37,78	26,96	11,98	24,36
10	11,142	5	3,33	23,53	34,87	37,78	19,61	34,13	35,38
11	13,900	5	1,29	23,53	34,87	37,78	18,88	39,36	36,40
12	2,277	5	5,03	23,53	34,87	37,78	24,37	16,47	29,33
13	10,093	5	1,58	23,53	34,87	37,78	21,07	31,14	32,24
14	4,661	5	1,40	23,53	34,87	37,78	24,73	19,16	26,74



**Şekil 3.17:** Çok amaçlı optimizasyon sonuçları: bindirme kayma dayanımının maksimize edilmesi ve temas açılarının minimize edilmesi

Tablo 3.12’de, tahmin modeli ile matematiksel model arasındaki farkın en düşük olduğu parametreler optimum sonuçlar olarak seçilmiştir. I. etap çalışmaları ve literatür, yakın uygulama mesafelerinin yüzey üzerinde olumsuz etkilere neden olabileceğini gösterdiğinden (Carrino et al., 2002; Güler vd., 2023; Ku et al., 2013; Nehri et al., 2025; Palaskar et al., 2020; Wang et al., 2025), çok yakın uygulama mesafeleri değerlendirme dışı bırakılmıştır. Buna ek olarak, matematiksel modelden elde edilen bindirme kayma dayanımı ile tahmin edilen değerler arasındaki fark dikkate alınmış ve optimizasyon tarafından sunulan ilk 15

özüm arasından bu farkın  $1,02 \text{ N/mm}^2$ 'den düşük olduğu çözümlere öncelik verilmiştir. Buna göre optimum çözümler şu şekilde belirlenmiştir: (i) 6,25 mm uygulama mesafesi, 5 geçiş sayısı ve 3,6 mm/s uygulama hızı; (ii) 6,25 mm uygulama mesafesi, 5 geçiş sayısı ve 2,55 mm/s uygulama hızı; ve (iii) 6,24 mm uygulama mesafesi, 5 geçiş sayısı ve 1,04 mm/s uygulama hızı.

## 4. SONUÇLAR

Bu bölümde, çalışmanın iki aşamasından elde edilen temel bulgular özetlenmiş ve plazma yüzey işlemlerinin metal-kompozit yapıştırma performansı üzerindeki etkilerine ilişkin genel sonuçlar ortaya konulmuştur. Deneysel, sayısal ve istatistiksel analizlerden elde edilen veriler birlikte değerlendirilerek, bu çalışmada plazma parametrelerinin temas açısı ve bindirme kayma dayanımı üzerindeki belirleyici rolü bütüncül bir çerçevede ele alınmıştır.

I. etapta çalışmalarıyla ilgili olarak, Al-5049 ve CFRP kompozit malzemeler üzerinde uygulanan atmosferik basınçlı soğuk ve sıcak plazma işlemlerine ilişkin sonuçlar sunulmuştur. II. etap çalışmalarıyla ilgili olarak da Al-7075 T6 ve CFRP malzemeler için gerçekleştirilen deneysel, sayısal ve optimizasyon çalışmaları doğrultusunda elde edilen bulgular özetlenmiş ve optimum parametre bölgeleri belirlenmiştir.

### 4.1 I. Etap Sonuçlar

Çalışmanın I. etabında, atmosferik basınçlı soğuk plazma ve sıcak plazma tedavisinden sonra CFRP ve Al-5049 malzemelerinin yüzey ıslanabilirliğinde oluşan değişimler incelenmiştir. Ayrıca deney tasarımına bağlı olarak uygulanan plazma tedavileri sonrasında yapıştırma işlemlerinde yapıştırıcı dayanımı incelenmiştir.

Temas açıları incelendiğinde Al 5049 ve CFRP malzemelerinin yüzeylerinin silinmemiş ve silinmiş yüzeylerindeki temas açıları sırasıyla Al 5049 da 65,9° iken 51,9°'a, CFRP de ise 67,6° iken 75° olarak değişiklik göstermiştir. Temas açısı silinmiş numune üzerine atmosferik basınçlı soğuk plazma uygulanması sonucunda Al-5049 yüzeyinde ortalama değerlerden %13,68 ve CFRP yüzeyinde %11,86 oranında değişiklik göstermiştir. Silinmiş numuneye sıcak plazma uygulanması sonucunda ise Al-5049 yüzeyinde %26,04 değişiklik gösterirken, CFRP de %30,08 oranında temas açılarında değişiklik olmuştur. ANOVA analiz sonuçlarına göre, Al-5049 malzemeler için uygulama sayısı ve CFRP için uygulama mesafesi en etkili parametreler olarak bulunmuştur. Plazma türünün temas açıları üzerinde yüksek bir etkisi olduğu tespit edilmiştir.

Yüzeyler üzerinde plazma işleminden önce ve sonra alınan ölçümler arasındaki sıcaklık farkının 1 °C'den az olduğu gözlemlenmiştir. Al-5049 malzemeler üzerinde plazma işleminden sonra yüzeyde %1,8'lik bir sıcaklık artışı gözlemlenirken, CFRP yüzeyinde

%2,6'lık bir sıcaklık artışı gözlemlenmiştir. Bu durum, plazma uygulamasının esas olarak termal mekanizmalar yerine yüzey aktivasyonu ve kimyasal modifikasyon yoluyla etkili olduğunu ortaya koymaktadır.

Çekme deney sonuçları incelendiğinde silinmiş numunenin kayma gerilmesi  $11,565 \text{ N/mm}^2$  ölçülmüştür. Silinmiş yüzeylere atmosferik basınçlı plazma uygulanması sonucunda elde edilen kayma gerilmeleri ortalaması incelendiğinde  $12,239 \text{ N/mm}^2$  değerine çıktığı görülmüştür. Silinmiş yüzeylere sıcak plazma uygulanması sonucunda ise elde edilen kayma gerilmelerinin ortalaması incelendiğinde  $12,49 \text{ N/mm}^2$  değerine çıktığı tespit edilmiştir. Atmosferik basınçlı soğuk plazma sonrasında kayma gerilmesinde %5,83 oranında artış varken, sıcak plazma sonrasında %7,97 oranında artış olduğu görülmüştür.

Uygulama mesafesinin yakın olması ve uygulama sayısının fazla olması sonucunda CFRP ve Al-5049 malzeme yüzeylerinin ıslanabilirliğinin arttığı görülmüştür.

Ayrılan yüzeyler incelendiğinde kohezif ayrılma olduğu, ancak Al-5049 üzerinde yapıştırıcı oranının fazla olduğu görülmüştür. Alüminyum malzemenin yüzey enerjisinin CFRP den yüksek olduğu literatürde ve temas açıları ölçüm sonuçlarında tespit edilmiştir. Al-5049 yüzeyine atmosferik basınçlı soğuk plazma uygulanması sonucunda ortalama temas açısı  $49,1^\circ$  iken, sıcak plazmada ise  $38,61^\circ$  elde edilmiştir. CFRP yüzeyinde atmosferik basınçlı soğuk plazma uygulanması sonucunda ortalama temas açısı  $64,82^\circ$  iken, sıcak plazmada ise  $46,59^\circ$  elde edilmiştir. Alüminyumun yüzey enerjisinin yüksek olması çekme deneyleri sonucunda ayrılan yüzeylere de yansımıştır ki yapıştırıcının alüminyum yüzey tarafında daha fazla kalması durumu desteklemektedir.

## **4.2 II. Etap Sonuçlar**

Çalışmanın II. etabında, Atmosferik Basınçlı Soğuk Plazma işleminin Alüminyum 7075-T6 alaşımı ile CFRP kompozit malzemelerin yüzey temas açıları ve iki malzemenin arasındaki yapıştırma bağlantı performansı üzerindeki etkileri, deneysel, nümerik ve istatistiksel yöntemlerin entegrasyonu ile incelenmiştir.

Al-7075 T6 ve CFRP malzemelerinin yüzeylerindeki temas açısı üzerinde tüm parametrelerin anlamlı bir etkiye sahip olduğu gözlenmiştir. Girdi parametreleri ile çıktı değerleri arasındaki ilişkiler incelendiğinde, modellerin açıklama gücünün ( $R^2$ ) %96'nın

üzerinde, düzeltilmiş belirleme katsayılarının ( $R^2_{\text{düzeltilmiş}}$ ) %93'ün üzerinde ve tahmin kabiliyetlerinin ( $R^2_{\text{tahmin}}$ ) %84'ün üzerinde olduğu belirlenmiştir.

Girdi parametrelerinin temas açılarına katkı oranları şu şekilde analiz edilmiştir: Al-7075 T6 için uygulama mesafesi %57,61, uygulama sayısı %26,18 ve uygulama hızı %2,27; CFRP için ise uygulama mesafesi %56,86, uygulama sayısı %29,36 ve uygulama hızı %4,72.

Temas açıları incelendiğinde, plazma işlemi uygulanmış tüm seviyelerde Al-7075 T6 ve CFRP malzemelerinin ortalama temas açılarının, plazma uygulanmamış yüzeylerdeki temas açılarına göre; Al-7075 T6 yüzeyi için  $84,6^\circ$ 'den  $62,1^\circ$ 'ye ve CFRP yüzeyi için  $85,8^\circ$ 'den  $61,96^\circ$ 'ye düştüğü belirlenmiştir. Temas açılarında Al-7075 T6 için ortalama %26,6, CFRP için ise %27,8 oranında azalma gözlenmiştir. En etkili parametre olan uygulama mesafesine göre ortalama temas açıları değerlendirildiğinde, 10 mm mesafede Al-7075 T6 için  $49,3^\circ$  ve CFRP için  $52,3^\circ$ ; 20 mm mesafede Al-7075 T6 için  $62,2^\circ$  ve CFRP için  $60,5^\circ$ ; 30 mm mesafede ise Al-7075 T6 için  $74,8^\circ$  ve CFRP için  $73,1^\circ$  değerlerine düştüğü görülmüştür. Uygulama mesafesinin azalmasının temas açısı üzerindeki etkisi belirgin bir şekilde gözlenmiştir.

Plazma işlemi öncesinde yüzey sıcaklıkları oda sıcaklığında  $24^\circ\text{C}$  iken, plazma işlemi sonrasında ölçülen sıcaklıklar Al-7075 T6 için  $25,3^\circ\text{C}$  ve CFRP için  $29,1^\circ\text{C}$  olarak ölçülmüştür. Plazma işlemi sonrasında ölçülen yüzey sıcaklıklarındaki sınırlı artış, sürecin termal etkilerden ziyade yüzey aktivasyonu temelli bir mekanizma ile gerçekleştiğini göstermektedir.

Al-7075 T6 ve CFRP malzemelerinin tek kademeli bindirmeli bağlantısı için tüm parametrelerin bindirme kayma dayanımı üzerinde anlamlı bir etkiye sahip olduğu belirlenmiştir. Girdi parametreleri ile bindirme kayma dayanımı değerleri arasındaki ilişkiler incelendiğinde, modelin açıklama gücünün ( $R^2$ ) %96,65, düzeltilmiş belirleme katsayısının ( $R^2_{\text{düzeltilmiş}}$ ) %94,2 ve tahmin kabiliyetinin ( $R^2_{\text{tahmin}}$ ) %89,8 olduğu belirlenmiştir. Girdi parametrelerinin bindirme kayma dayanımı üzerindeki katkı oranları; uygulama mesafesi için %68,68, uygulama sayısı için %14,54 ve uygulama hızı için %7,33 olarak hesaplanmıştır.

Bindirme kayma dayanımı incelendiğinde, plazma işlemi uygulanmamış durumda dayanımın  $7,48 \text{ N/mm}^2$  olduğu, tüm plazma uygulanmış seviyelerde ise ortalama bindirme kayma dayanımının  $11,52 \text{ N/mm}^2$ 'ye yükseldiği belirlenmiş ve bindirme kayma dayanımında %54 oranında artış gözlenmiştir. En etkili parametre olan uygulama mesafesine göre ortalama bindirme kayma dayanımı; 10 mm'de  $15 \text{ N/mm}^2$ , 20 mm'de  $11,19 \text{ N/mm}^2$  ve 30 mm'de  $8,4 \text{ N/mm}^2$  olarak belirlenmiştir. Uygulama mesafesinin azaltılmasıyla bindirme kayma dayanımında belirgin bir artışlar gözlenmiştir.

Sonlu eleman analizleri incelendiğinde, gerçek koşullarla en iyi uyumu sağlayan ve hata oranı ile çözüm süresi arasında en verimli dengeyi sunan 1 mm eleman boyutuna sahip orta yoğunluklu ağ modeli (16675 eleman ve 22256 düğüm noktası) seçilmiştir. Orta yoğunluklu ağ modelinde elde edilen değer  $13,04 \text{ N/mm}^2$  olarak hesaplanmış ve referans değere kıyasla %16,62'lik bir fark belirlenmiştir. Bu fark, yapıştırıcı tabakasının idealleştirilmesine, malzemelerin izotropik olarak varsayılmasına ve ilerleyici hasar modellemesinin kullanılmasına bağlanmıştır. Genel olarak, sayısal sonuçlar ile deneysel veriler arasında iyi bir uyum gözlenmiş olup, plazma işleminin etkinliği ve geliştirilen modellerle belirlenen parametrelerin, deney yapılmaksızın ön değerlendirme amacıyla simülasyonlar yoluyla incelenebileceğini göstermiştir.

Random Forest tabanlı tahmin modelleri ile NSGA-II algoritmasını birleştiren hibrit yaklaşım, plazma işlem parametrelerinin çok amaçlı optimizasyonu için başarıyla uygulanmıştır. Bu çalışma, önerilen RF-NSGA-II tabanlı yaklaşımın, plazma uygulanmış yapıştırma bağlantılarının güvenilir biçimde tahmin edilmesini ve optimize edilmesini sağlarken deneysel maliyetleri azaltabildiğini göstermektedir. Genel olarak, bindirme kayma dayanımını maksimize eden ve temas açılarını minimize eden çözümlerin daha yakın uygulama mesafesi, daha fazla uygulama sayısı ve daha düşük uygulama hızı ile ilişkili olduğu belirlenmiştir. Tüm Pareto çözümleri performans değerleri karşılaştırılarak değerlendirilmiş ve en yüksek bindirme kayma dayanımını sağlayan 15 çözüm seçilmiştir. Optimal bölgelerin genel olarak 1,1–13,9 mm uygulama mesafesi, 5 uygulama sayısı ve yaklaşık 1–5,2 mm/s uygulama hızı etrafında yoğunlaştığı belirlenmiştir. Bu parametre aralıkları hem yüzey aktivasyonu hem de bağlantı dayanımı açısından en verimli bölgeyi temsil etmektedir. Optimum çözümler şu şekilde belirlenmiştir: (i) 6,25 mm uygulama mesafesi, 5 uygulama sayısı ve 3,6 mm/s uygulama hızı; (ii) 6,25 mm uygulama mesafesi, 5 uygulama sayısı ve 2,55 mm/s uygulama hızı; ve (iii) 6,24 mm uygulama mesafesi, 5

uygulama sayısı ve 1,04 mm/s uygulama hızı. Elde edilen bulgular, Al-7075 T6–CFRP yapıştırma bağlantılarını içeren havacılık, otomotiv ve hafif hibrit yapı uygulamaları için pratik bir tasarım referansı sunmaktadır.

Çalışma kapsamında atmosferik basınçlı plazma işlemlerinin Al alaşımları ve CFRP kompozit malzemeler arasındaki yapıştırma performansı üzerindeki etkileri kapsamlı olarak incelenmiştir. Elde edilen bulgular doğrultusunda, ilerleyen çalışmalarda aşağıdaki konuların ele alınması literatür ve endüstriyel uygulamalara önemli katkılar sağlayacağı değerlendirilmektedir:

Plazma işleminin yüzey kimyası üzerindeki etkilerinin daha ayrıntılı olarak ortaya konulabilmesi için X-ışını fotoelektron spektroskopi analizi gibi ileri yüzey karakterizasyon teknikleri kullanılarak kimyasal bağlanma mekanizmaları detaylı olarak incelenmesi, sıcak plazma işlemi sonrasında FT-IR analizleri yapılarak yüzeyde oluşan fonksiyonel grupların incelenmesi ıslanabilirlik artışının temel nedenlerini daha açık şekilde açıklanmasını sağlayacaktır.

Plazma işlemi ile aktive edilmiş yüzeylerin zamanla gösterdiği yaşlanma etkilerinin incelenmesi, özellikle yüzey enerjisinin zamanla azalması ve bunun yapıştırma bağlantısı üzerindeki etkilerinin belirlenmesi ve uygulanan işlem sonrasında yüzeyin etkin olduğu sürenin belirlenmesi, endüstriyel uygulamalar açısından kritik öneme sahiptir.

Çevresel etkiler (sıcaklık, nem ve ultraviyole ışınlar gibi) altında bağlantı performanslarının incelenmesi, gerçek koşullara daha yakın sonuçlar elde edilmesini sağlayacaktır.

Modelleme işleminde izotropik olarak tanımlanan malzemeler ve idealleştirilen yapıştırıcılar yerine anizotropik malzemeler tercih edilerek sonuçlar daha da yakınsanabilir. Sonlu elemanlar analizinde plazma etkisinin yalnızca matematiksel modellerle temsil edilmesi yerine, analiz yazılımlarına entegre edilebilecek bir modül veya kullanıcı tanımlı alt program geliştirilmesi, plazma ile yüzey etkileşiminin daha doğru ve fiziksel olarak temsil edilmesine olanak sağlayacaktır.

Optimizasyon işlemi belirli parametre aralıkları ile sınırlandırılmıştır. Gelecek çalışmalarda plazma gaz türü, gaz debisi, güç seviyesi veya farklı işlem süreleri gibi ek parametrelerin

modele dahil edilmesi, daha kapsamlı bir optimizasyon yapılmasını sağlayacaktır. Farklı optimizasyon yöntemleriyle karşılaştırmalar yapılarak değerlendirme yapılması önerilmektedir.

Son olarak, plazma işlemlerinin endüstriyel uygulanabilirliği açısından enerji tüketimi, işlem süresi ve maliyet analizlerinin yapılması, yöntemin sürdürülebilirlik ve üretim verimliliği açısından değerlendirilmesine katkı sağlayacaktır.

## 5. KAYNAKLAR

- Abdelhady, S. S., Elbadawi, R. E., and Zoalfakar, S. H.** (2023). Metal matrix composite fabricated from electrospun PAN, EGNS/PAN nanofibers and AL 5049 alloy by using friction stir processing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 127(5–6), 2343–2355. <https://doi.org/10.1007/s00170-023-11612-w>
- Allen, T. T.** (2010). Introduction to Engineering Statistics and Lean Sigma. In *Sustainability (Switzerland)* (Vol. 11, Number 1). Springer London. <https://doi.org/10.1007/978-1-84996-000-7>
- Ayas, K., Karaca, A., Çetinkaya, İ. H., and Çavdar, K.** (2023). Atmosferik basınçlı plazma ve alevle dağlama yüzey aktivasyon işlemlerinin karşılaştırılması, astarsız boyanabilirliğinin incelenmesi. *Mühendis ve Makina*, 64(710), 137–152. <https://doi.org/10.46399/muhendismakina.1167343>
- Ayas, K., Karaca, A., Çetinkaya, İ. H., Kanbir, Ö., and Çavdar, K.** (2025). Investigation of the effects of atmospheric pressure plasma on polypropylene automotive bumper surface and its paintability with and without primer. *Polymer Engineering and Science*, 65(4), 2106–2118. <https://doi.org/10.1002/pen.27140>
- Ayas, K., Öztaş Kaplan, Z., and Çavdar, K.** (2021). Atmosferik basınçlı plazma uygulaması ile polipropilen malzemelerde yüzey işlemleri. *Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering*, 26(3), 1179–1190. <https://doi.org/10.17482/uumfd.977508>
- Ayaz, A., Ozdemir, G. D., Ercan, U. K., and Sever, K.** (2024). Influence of air DBD plasma treatment on the shear and flexural strength of adhesively bonded glass fiber reinforced epoxy composite joints. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, 17(2), 100929. <https://doi.org/10.1016/j.jrras.2024.100929>
- Babalık, F., and Çavdar, K.** (2018). *Makine elemanları ve konstrüksiyon örnekleri* (9. bs). Dora.
- Bárdos, L., and Baránková, H.** (2010). Cold atmospheric plasma: Sources, processes, and applications. *Thin Solid Films*, 518(23), 6705–6713. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2010.07.044>
- Bayramoğlu, S.** (2022). *Yapıştırılan malzeme üzerinde oluşturulan çentik ve girintilerin yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantıların mukavemeti üzerine etkisinin incelenmesi* [Yüksek Lisans]. Erzurum Teknik.

## KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Bellan, P. M.** (2006). Fundamentals of Plasma Physics. In *Sustainability (Switzerland)* (Vol. 11, Number 1). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511807183>
- Belytschko, T., Liu, W. K., Moran, B., and Elkhodary, K.** (2014). Nonlinear finite elements for continua and structures. In *John wiley and sons*. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/nme.1620170504>
- Bónová, L., Zahoranová, A., Kováčik, D., Zahoran, M., Mičušík, M., and Černák, M.** (2015). Atmospheric pressure plasma treatment of flat aluminum surface. *Applied Surface Science*, 331, 79–86. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2015.01.030>
- Bónová, L., Zhu, W., Patel, D. K., Krogstad, D. V, and Ruzic, D. N.** (2020). Atmospheric pressure microwave plasma for aluminum surface cleaning. *Journal of Vacuum Science and Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*, 38(2), 23002. <https://doi.org/10.1116/1.5132912>
- Carneiro, N., Souto, A. P., Silva, E., Marimba, A., Tena, B., Ferreira, H., and Magalhães, V.** (2001). Dyeability of corona-treated fabrics. *Coloration Technology*, 117 (5), 298-302. <https://doi.org/10.1111/j.1478-4408.2001.tb00079.x>
- Carrino, L., Polini, W., and Sorrentino, L.** (2002). Adhesion of Polypropylene Surfaces Treated by Cold Plasma. *SAE International Journal of Materials and Manufacturing*, 111(2002), 949–957. <https://doi.org/10.4271/2002-01-2103>
- Cho, Y., Kim, J., and Park, C. H.** (2022). Characterization of critical roughness indicators by digital image processing to predict contact angles on hydrophobic surfaces. *Materials Chemistry and Physics*, 285(November 2021), 125858. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2022.125858>
- Dal, M., and Çavdar, K.** (2022). Atmosferik basınçlı plazma uygulamasının 3B baskılara etkisinin incelenmesi. *Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering*, 27(3), 975–990. <https://doi.org/10.17482/uumfd.1087623>
- Demir, K.** (2021). *Nano-yapı takviyeli kompozit yapıştırıcı ile birleştirilmiş bağlantıların tam değişken yorulme performanslarının incelenmesi* [Yüksek Lisans]. Erzurum Teknik Üniversitesi.
- Deshmukh, R. R. and Bhat, N. V.** (2011). Pretreatments of Textiles Prior to Dyeing: Plasma Processing. In *Textile Dyeing* (Number December 2011). InTech. <https://doi.org/10.5772/19295>

## KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Dillard, D. A.** (2010). Advances in Structural Adhesive Bonding. In *Advances in Structural Adhesive Bonding*. Elsevier. <https://doi.org/10.1533/9781845698058>
- Dimitrakellis, P., Faubert, F., Wartel, M., Gogolides, E., and Pellerin, S.** (2022). Plasma Surface Modification of Epoxy Polymer in Air DBD and Gliding Arc. *Processes*, 10(1), 104. <https://doi.org/10.3390/pr10010104>
- Droździel-Jurkiewicz, M., and Bieniaś, J.** (2022). Evaluation of Surface Treatment for Enhancing Adhesion at the Metal–Composite Interface in Fibre Metal-Laminates. *Materials*, 15(17), 6118. <https://doi.org/10.3390/ma15176118>
- Duan, L., Liang, W., Hou, Y., Wang, D., Cui, J., Li, G., and Jiang, H.** (2024). Investigation on shear and fatigue performance of CFRP/aluminum alloy single-lap adhesive joint. *Thin-Walled Structures*, 196(April 2023), 111421. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2023.111421>
- Dufour, T.** (2023). From Basics to Frontiers: A Comprehensive Review of Plasma-Modified and Plasma-Synthesized Polymer Films. *Polymers*, 15(17), 3607. <https://doi.org/10.3390/polym15173607>
- Durmuş, M.** (2019). *Yapıştırıcıyla birleştirilmiş kademeli bağlantılarda kademe uzunluğu ile bağlantının hasar yükü arasındaki ilişkinin incelenmesi* [Yüksek Lisans]. Erzurum Teknik.
- Elder, D. J., Verdaasdonk, A. H., and Thomson, R. S.** (2008). Fastener pull-through in a carbon fibre epoxy composite joint. *Composite Structures*, 86(1–3), 291–298. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2008.03.041>
- Encinas, N., Abenojar, J., and Martínez, M. A.** (2012). Development of improved polypropylene adhesive bonding by abrasion and atmospheric plasma surface modifications. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 33, 1–6. <https://doi.org/10.1016/J.IJADHADH.2011.10.002>
- Encinas, N., Lavat-Gil, M., Dillingham, R. G., Abenojar, J., and Martínez, M. A.** (2014). Cold plasma effect on short glass fibre reinforced composites adhesion properties. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 48, 85–91. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2013.09.026>
- Engler, O., Brinkman, H. J., and Hentschel, T.** (2014). Simulation-Based Design of 5xxx Series Alloys with Improved Resistivity against Intergranular Corrosion for Automotive Applications. *Materials Science Forum*, 794–796, 622–627. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.794-796.622>

## KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Esen, S. G.** (2016). *Otomobil tampon boya hatlarında plazma yüzey aktivasyonu ile yüzey enerjisinin kontrolü ve uygulanabilirliğinin araştırılması* [Yüksek Lisans]. Sakarya Üniversitesi.
- Fay, P. A.** (2021). Adhesive Bonding. In *Adhesive Bonding: Science, Technology and Applications*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/C2019-0-00395-0>
- FCB Arge**, “piezobrush® PZ3”, <https://www.fcb-arge.com/piezobrushPZ-3.html> (2024) (Erişim tarihi: 16 Nisan 2024)
- FCB Arge**, “Plasmatool El Cihazı”, [https://www.fcb-arge.com/Plasma\\_Tool.html](https://www.fcb-arge.com/Plasma_Tool.html) (Erişim tarihi: 16 Nisan 2024)
- Flanagan, D. P., and Belytschko, T.** (1981). A uniform strain hexahedron and quadrilateral with orthogonal hourglass control. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 17(5), 679–706. <https://doi.org/10.1002/nme.1620170504>
- Gavas, M., Yaşar, M., Aydın, M., and Altunpak, Y.** (2015). *Üretim yöntemleri ve imalat teknolojileri* (4.bs). Seçkin Yayıncılık San. ve Tic. A.Ş.
- Gheorghiu, M., Arefi, F., Amouroux, J., Placinta, G., Popa, G., and Tatoulian, M.** (1997). Surface cross linking and functionalization of poly(ethylene terephthalate) in a helium discharge. *Plasma Sources Science and Technology*, 6(1), 8. <https://doi.org/10.1088/0963-0252/6/1/003>
- Gu, J., Su, X., Jin, Y., Zhang, D., Li, W., Xu, J., and Guo, B.** (2024). Research progress and prospects of laser cleaning for CFRP: A review. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 185(July 2023), 108349. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2024.108349>
- Güler, H.** (2023). *Pom ve pp talk %15 malzemelerin birbirine yapışabilirliğinin artırılmasında atmosferik plazma kullanım parametrelerinin belirlenmesi* [Doktora]. Bursa Uludağ.
- Güler, H., Ayas, K., and Çavdar, K.** (2023). Atmosferik basınç plazma uygulamasının POM ve PP malzemelerin yapıştırma bağı dayanımına etkisinin araştırılması. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 38(3), 1577–1588. <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.1035264>
- Jensen, W. A.** (2017). Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments 4th edition. *Journal of Quality Technology*, 49(2), 186–188. <https://doi.org/10.1080/00224065.2017.11917988>

## KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Jialiang, Z., Jian, L., Ziyuan, D., Zhuoqin, L., Yonglin, X., and Xiaolong, S.** (2025). Multi-objective optimization of toughness and bonding strength in cement-based sealing materials using RSM coupled with NSGA-II hybrid approach: Performance evaluation and engineering application analysis. *Construction and Building Materials*, 496(May), 143808. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.143808>
- Kanbir, Ö.** (2022). *Metal malzeme yapıştırma bağlantılarında atmosferik basınçlı plazma uygulaması etkinliğinin araştırılması* [Doktora]. Bursa Uludağ.
- Kanbir, Ö., Taşyakan, E., and Çavdar, K.** (2022). *Metal Malzeme Yüzeylerine Atmosferik Basınçlı Plazma Uygulamasının Yapıştırma Bağlarına Etkisi Effect of Atmospheric Pressure Plasma Application on Metal Material Surfaces on Adhesive Bonds*. 3(1).
- Kaplan, S. L., and Rose, P. W.** (1991). Plasma surface treatment of plastics to enhance adhesion. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 11(2), 109–113. [https://doi.org/10.1016/0143-7496\(91\)90035-G](https://doi.org/10.1016/0143-7496(91)90035-G)
- Karahan, H. A.** (2007). *Atmosferik plazma kullanılarak doğal liflerinin yüzeysel özelliklerinin değiştirilmesi üzerine bir araştırma* [Yüksek Lisans]. Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Keshavarzi, A., and Saeidi Googarchin, H.** (2024). Local reinforcement of adhesively bonded square shape aluminum energy absorber with CFRP under quasi-static axial loading: An experimental and numerical study. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 135(September), 103835. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2024.103835>
- Khuri, A. I., and Mukhopadhyay, S.** (2010). Response surface methodology. *WIREs Computational Statistics*, 2(2), 128–149. <https://doi.org/10.1002/wics.73>
- Kilinc, F. B., Turkoglu, T., Guler, S., and Kilinc, A. C.** (2025). Optimization of 3D printing parameters for enhanced tensile properties in continuous carbon fiber reinforced PLA composites. *Materials Research Express*, 12(4), 0–17. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/adc5cc>
- Kim, J. H., Lee, C. J., Min, K. D., Hwang, B. U., Kang, D. G., Choi, D. H., Joo, J., and Jung, S. B.** (2021). Intense pulsed light surface treatment for improving adhesive bonding of aluminum and carbon fiber reinforced plastic (CFRP). *Composite Structures*, 258(August 2020), 113364. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.113364>
- Koç, E.** (2012). *Makine elemanları-cilt-1* (5.bs).

## KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Kostov, K. G., Nishime, T. M. C., Castro, A. H. R., Toth, A., and Hein, L. R. O.** (2014). Surface modification of polymeric materials by cold atmospheric plasma jet. *Applied Surface Science*, 314, 367–375. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2014.07.009>
- Ku, J. H., Jung, I. H., Rhee, K. Y., and Park, S. J.** (2013). Atmospheric pressure plasma treatment of polypropylene to improve the bonding strength of polypropylene/aluminum composites. *Composites Part B: Engineering*, 45(1), 1282–1287. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.06.016>
- Kundu, J., Sethi, A., Mandal, S., and Saha, P.** (2025). Heterogeneous adhesive bonding between different CFRPs and Al 7075 after different surface treatments: A study on the selective practical applicability of the resin pre-coating (RPC) technique. *Polymer Composites*, 46(9), 8175–8198. <https://doi.org/10.1002/pc.29486>
- Kurt, E., Yıldız, A. R., İnkaya, T., Özcan, A. R., and Gökdağ, İ.** (2026). Lightweight design of lattice-embedded brake pedals using artificial intelligence -based optimization. *Materials Testing*, 68(1), 83–95. <https://doi.org/10.1515/mt-2025-0390>
- Laroussi, M., and Akan, T.** (2007). Arc-Free Atmospheric Pressure Cold Plasma Jets: A Review. *Plasma Processes and Polymers*, 4(9), 777–788. <https://doi.org/10.1002/ppap.200700066>
- Leszczyńska-Madej, B., Richert, M., Waśnik, A., and Szafron, A.** (2017). Analysis of the Microstructure and Selected Properties of the Aluminium Alloys Used in Automotive Air-Conditioning Systems. *Metals*, 8(1), 10. <https://doi.org/10.3390/met8010010>
- Li, S., Yue, X., Li, Q., Peng, H., Dong, B., Liu, T., Yang, H., Fan, J., Shu, S., Qiu, F., and Jiang, Q.** (2023). Development and applications of aluminum alloys for aerospace industry. *Journal of Materials Research and Technology*, 27, 944–983. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.09.274>
- Li, Z., Tian, W., Huang, S., Chen, Z., and Wang, Y.** (2025). Analysis and optimization of Cu/SiO<sub>2</sub> hybrid bonding interfacial reliability based on FEA and GABP-NSGA II algorithm. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 198(June), 109782. <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2025.109782>
- Liu, X., Shao, X., Li, Q., and Sun, G.** (2019). Failure mechanisms in carbon fiber reinforced plastics (CFRP) / aluminum (Al) adhesive bonds subjected to low-velocity transverse pre-impact following by axial post-tension. *Composites Part B: Engineering*, 172(April), 339–351. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.04.036>

## KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Ludwig, B.** (2022). Infrared Spectroscopy Studies of Aluminum Oxide and Metallic Aluminum Powders, Part II: Adsorption Reactions of Organofunctional Silanes. *Powders*, 1(2), 75–87. <https://doi.org/10.3390/powders1020007>
- Maroofi, A., Navab Safa, N., and Ghomi, H.** (2020). Atmospheric air plasma jet for improvement of paint adhesion to aluminium surface in industrial applications. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 98, 102554. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2020.102554>
- Miller, K. K., Shancita, I., Bhattacharia, S. K., and Pantoya, M. L.** (2021). Surface modifications of plasma treated aluminum particles and direct evidence for altered reactivity. *Materials and Design*, 210, 110119. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.110119>
- Morgado, M. A., Carbas, R. J. C., Marques, E. A. S., and da Silva, L. F. M.** (2019). Reinforcement of CFRP single lap joints using metal laminates. *Composite Structures*, 230(July 2019), 111492. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111492>
- Nehri, Y. E., Oral, A., and Çavdar, K.** (2025). Investigation of the effects of atmospheric pressure cold and hot plasma on the adhesive bond strength of Al 5049 and CFRP. *Materials Research Express*, 12(7), 0–17. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ade99a>
- Noeske, M., Degenhardt, J., Strudthoff, S., and Lommatzsch, U.** (2004). Plasma jet treatment of five polymers at atmospheric pressure: Surface modifications and the relevance for adhesion. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 24(2), 171–177. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2003.09.006>
- Ostapiuk, M., and Bieniaś, J.** (2019). Fracture Analysis and Shear Strength of Aluminum/CFRP and GFRP Adhesive Joint in Fiber Metal Laminates. *Materials*, 13(1), 7. <https://doi.org/10.3390/ma13010007>
- Özdemir, C.** (2017). *Otomotiv Sektöründe Kullanılan DP600 Çeliklerinin CMT Kaynak Yöntemi Kullanılarak Birleştirilmesi ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi*. Sakarya Üniversitesi; Fen Bilimleri Enstitüsü; İmalat Mühendisliği.
- Özgür Bora, M., Çoban, O., Akman, E., Oztoprak, B. G., and Kutluk, T.** (2020). Comparison of novel surface treatments of Al 2024 alloy for al/cfrp adhesive bonded joints. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 103(2020). <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2020.102721>

## KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Öztürk, F. H., Marques, E. A. S., Carbas, R. J. C., and da Silva, L. F. M.** (2024). Experimental and numerical study on mechanical behavior of 3D printed adhesive joints with polycarbonate substrates. *Journal of Applied Polymer Science*, 141(29), 1–18. <https://doi.org/10.1002/app.55657>
- Relyon Plasma**, “Plasma cleaning”, <https://www.relyon-plasma.com/plasma-cleaning/?lang=en> (Erişim tarihi: 23 Haziran 2024)
- Palaskar, S. S., Kale, R. D., and Deshmukh, R. R.** (2020). Application of atmospheric pressure plasma for adhesion improvement in polyurethane coating on polypropylene fabrics. *Journal of Coatings Technology and Research*, 17(2), 485–501. <https://doi.org/10.1007/s11998-019-00300-8>
- Patel, V. K., and Bhowmik, S.** (2017). Plasma Processing of Aluminum Alloys to Promote Adhesion: A Critical Review. *Reviews of Adhesion and Adhesives*, 5(1), 79–104. <https://doi.org/10.7569/RAA.2017.097303>
- Penkov, O. V., Khadem, M., Lim, W.-S., and Kim, D.-E.** (2015). A review of recent applications of atmospheric pressure plasma jets for materials processing. *Journal of Coatings Technology and Research*, 12(2), 225–235. <https://doi.org/10.1007/s11998-014-9638-z>
- Peta, K., Bartkowiak, T., Galek, P., and Mendak, M.** (2021). Contact angle analysis of surface topographies created by electric discharge machining. *Tribology International*, 163(June), 107139. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2021.107139>
- PF Teknik**, “Ergo 1675”, <https://pfteknik.com.tr/urun/ergo-1675/> (Erişim tarihi: 5 Haziran 2024)
- Pisavadia, H., Toussaint, G., Dolez, P., and Hogan, J. D.** (2022). Cohesive zone failure modeling of polymeric adhesives used in ceramic/metal armor. *International Journal of Impact Engineering*, 170(January), 104364. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2022.104364>
- Pocius, A. V.** (2012). Adhesion and Adhesives Technology. In *Adhesion and Adhesives Technology*. Carl Hanser Verlag GmbH andamp; Co. KG. <https://doi.org/10.3139/9783446431775>
- Poletti, C., Balog, M., Simancik, F., and Degischer, H. P.** (2010). High-temperature strength of compacted sub-micrometer aluminium powder. *Acta Materialia*, 58(10), 3781–3789. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2010.03.021>

## KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Polini, W., and Sorrentino, L.** (2004). Analysis of adhesion in an aggressive environment of a protective paint coating on an aluminium alloy surface treated by air cold plasma. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 18(14), 1643–1661. <https://doi.org/10.1163/1568561042411312>
- Pramanik, A., Basak, A. K., Dong, Y., Sarker, P. K., Uddin, M. S., Littlefair, G., Dixit, A. R., and Chattopadhyaya, S.** (2017). Joining of carbon fibre reinforced polymer (CFRP) composites and aluminium alloys – A review. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 101, 1–29. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2017.06.007>
- Prat, R., Suwa, T., Kogoma, M., and Okazaki, S.** (1998). Adhesive Strength Study and Surface Analysis Using Gas-Phase Chemical Reactions of Atmospheric Pressure Plasma-treated Polypropylene. *Journal of Adhesion*, 66(1–4), 163–182. <https://doi.org/10.1080/00218469808009964>
- Preedy, E. C., Brousseau, E., Evans, S. L., Perni, S., and Prokopovich, P.** (2014). Adhesive forces and surface properties of cold gas plasma treated UHMWPE. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 460, 83–89. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2014.03.052>
- Prysiachnyi, V., Svoboda, T., Dvořák, M., and Klíma, M.** (2012). Aluminum surface treatment by the RF plasma pencil. *Surface and Coatings Technology*, 206(19–20), 4140–4145. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2012.04.010>
- R, S., Deb, A., and Gupta, N. K.** (2023). An experimental and numerical study on the behaviors of adhesively-bonded steel double-hat section components under axial impact loading. *International Journal of Impact Engineering*, 179(April), 104629. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2023.104629>
- Rai, V. R., Vandalon, V., and Agarwal, S.** (2010). Surface Reaction Mechanisms during Ozone and Oxygen Plasma Assisted Atomic Layer Deposition of Aluminum Oxide. *Langmuir*, 26(17), 13732–13735. <https://doi.org/10.1021/la101485a>
- Rodríguez-Villanueva, C., Encinas, N., Abenojar, J., and Martínez, M. A.** (2013). Assessment of atmospheric plasma treatment cleaning effect on steel surfaces. *Surface and Coatings Technology*, 236, 450–456. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2013.10.036>

## KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Şahin, R.** (2021). *Tam değişken yorulma yüküne maruz yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantılarda yapıştırılan malzeme kalınlığı etkisinin incelenmesi* [Yüksek Lisans]. Erzurum Teknik.
- Samadi, M. R., Alaei, M. H., and Jam, J. E.** (2025). Numerical and experimental analysis of Al/GFRP joint for optimization of adhesive bonding strength using response surface method by considering surface patterning of the joints. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 136(August 2024), 103877. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2024.103877>
- Savotchenko, S., and Kovaleva, E.** (2023). Experimental study of the influence of the epoxy resin modification with additives on the contact angle. *International Journal of Polymer Analysis and Characterization*, 28(2), 192–199. <https://doi.org/10.1080/1023666X.2022.2164826>
- Schutze, A., Jeong, J. Y., Babayan, S. E., Jaeyoung Park, Selwyn, G. S., and Hicks, R. F.** (1998). The atmospheric-pressure plasma jet: a review and comparison to other plasma sources. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 26(6), 1685–1694. <https://doi.org/10.1109/27.747887>
- Shi, X., Zhang, X., and Xiu, S.** (2021). A research on the mechanism and model of surface micro-damage in grinding hardening. *Advances in Mechanical Engineering*, 13(9), 1–14. <https://doi.org/10.1177/16878140211044958>
- Sönmez, İ., Ayas, K., Dal, M., and Çavdar, K.** (2023). Atmosferik basınçlı soğuk plazma uygulamasının farklı malzemelerin yapışma dayanımına etkisi. *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 25(1), 137–149. <https://doi.org/10.25092/baunfbed.1151784>
- Sorrentino, L., and Carrino, L.** (2009). 2024 aluminium alloy wettability and superficial cleaning improvement by air cold plasma treatment. *Journal of Materials Processing Technology*, 209(3), 1400–1409. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.03.061>
- Starke, E. A., and Staley, J. T.** (1996). Application of modern aluminum alloys to aircraft. *Progress in Aerospace Sciences*, 32(2–3), 131–172. [https://doi.org/10.1016/0376-0421\(95\)00004-6](https://doi.org/10.1016/0376-0421(95)00004-6)
- Tsai, D.-C., Chang, Z.-C., Chen, E.-C., Huang, Y.-L., Jiang, Y.-C., and Shieu, F.-S.** (2023). Influence of Plasma Treatment on Surface Characteristics of Aluminum Alloy Sheets and Bonding Performance of Glass Fiber-Reinforced Thermoplastic/Al Composites. *Materials*, 16(9), 3317. <https://doi.org/10.3390/ma16093317>

## KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Turgut, M., and Çavdar, K.** (2020). Atmosferik plazma işlemleri kullanılarak farklı kauçuk ve nonwoven malzemelerin yapışma davranışının iyileştirilmesi. *Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering*, (17), 289–302. <https://doi.org/10.17482/uumfd.562784>
- Völkerink, O.** (2022). *Simulation-driven design of bonded joints in fibre composite aircraft structures using progressive damage analyses* *Forschungsbericht 2022-24*. <https://doi.org/10.57676/hya4-2a09>
- Wang, J., Yu, Z., Yang, S., Wang, Z., Ren, R., and Xiong, X.** (2025). Effects of argon plasma treatment on carbon fiber surface characteristic and its reinforcing polyimide composites interfacial properties at room and elevated temperatures. *Diamond and Related Materials*, 151(October 2024), 111765. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2024.111765>
- Wen, L., Wang, R., and Xu, E.** (2024). Optimization and Mechanism Study of Bonding Properties of CFRP/Al7075 Single-Lap Joints by Low-Temperature Plasma Surface Treatment. *Coatings*, 14(5), 541. <https://doi.org/10.3390/coatings14050541>
- Wen, W., Zhao, Y., and Morris, J. G.** (2005). The effect of Mg precipitation on the mechanical properties of 5xxx aluminum alloys. *Materials Science and Engineering: A*, 392(1–2), 136–144. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2004.09.059>
- Wu, Z., and Curtin, W. A.** (2015). The origins of high hardening and low ductility in magnesium. *Nature*, 526(7571), 62–67. <https://doi.org/10.1038/nature15364>
- Xu, Y., Li, H., Shen, Y., Liu, S., Wang, W., and Tao, J.** (2016). Improvement of adhesion performance between aluminum alloy sheet and epoxy based on anodizing technique. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 70, 74–80. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2016.05.007>
- Xu, Z., Yip, W., Dong, Z., Uddin, M., and Stevens, G.** (2024). On the laser surface pre-treatment to enhance the surface texture, wettability and adhesion bonding strength of aluminium 7075-T6 laminates. *Composite Interfaces*, 31(1), 123–141. <https://doi.org/10.1080/09276440.2023.2235804>
- Yaprak Nisa Oğuz.** (2022). *Yapıştırma Bağlantılarında Yorulma Dayanımının Deneysel Olarak İncelenmesi* [Yüksek Lisans]. Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

### **KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)**

- Ziobro, G., Richert, M., and Wiewióra, M.** (2017). Influence of corrosion on mechanical properties and microstructure of 3xxx, 5xxx, and 6xxx series aluminum alloys. *Metallurgy and Foundry Engineering*, 43(4), 291. <https://doi.org/10.7494/mafe.2017.43.4.291>
- Zou, X., Liu, L., Chen, T., Wu, L., Chen, K., Kong, L., and Wang, M.** (2023). Laser surface treatment to enhance the adhesive bonding between steel and CFRP: Effect of laser spot overlapping and pulse fluence. *Optics and Laser Technology*, 159(800), 109002. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2022.109002>