

**T.C.  
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**GRAFEN TAKVİYELİ KOMPOZİT KAPLAMALARIN  
FİZİKSEL VE KİMYASAL ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

**TAHA ALBULAT  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**GEBZE  
2022**

**T.C.**  
**GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**GRAFEN TAKVİYELİ KOMPOZİT**  
**KAPLAMALARIN FİZİKSEL VE**  
**KİMYASAL ÖZELLİKLERİNİN**  
**İNCELENMESİ**

**TAHA AKBULAT**  
**YÜKSEK LİSANS TEZİ**  
**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**DANIŞMANI**  
**DR. ÖĞR. ÜYESİ RECEP ÖNLER**

**GEBZE**

**2022**

**T.R.**  
**GEBZE TECHNICAL UNIVERSITY**  
**GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES**

**INVESTIGATION OF THE PHYSICAL AND  
CHEMICAL PROPERTIES OF GRAPHENE  
REINFORCED COMPOSITE COATINGS**

**TAHA AKBULAT**

**A THESIS SUBMITTED FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF SCIENCE  
DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING**

**THESIS SUPERVISOR  
ASSIST. PROF. DR. RECEP ÖNLER**

**GEBZE  
2022**



## YÜKSEK LİSANS JÜRİ ONAY FORMU

GTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 07/07/2022 tarih ve 2022/34 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 27/07/2022 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Taha AKBULAT'ın tez çalışması Makine Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

### JÜRİ

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI)

: Dr. Öğr. Üyesi Recep ÖNLER

ÜYE

: Doç. Dr. Ahmet Sinan ÖKTEM

ÜYE

: Prof. Dr. Mustafa TUNCER

### ONAY

Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun

...../...../..... tarih ve ...../..... sayılı kararı.

İMZA/MÜHÜR

## ÖZET

Grafen, karbon atomlarının, sp<sup>2</sup> hibritleşmesi sonucu oluşan iki boyutlu, bir atom kalınlığında ve bal peteği formundaki halidir. Sağladığı üstün mekanik özellikleri, kimyasal özellikleri, yüksek elastisite modülü, oda sıcaklığında yüksek elektron hareketi gibi özelliklerinden dolayı, otomotiv, denizcilik, elektronik vb. birçok alanda tercih edilmektedir.

Bu çalışmada, otomotiv sektöründe gerçekleştirilen çok katmanlı kaplama metodu kullanılarak farklı katmanlara katkılanan indirgenmiş grafen oksidin korozyon direncine, temas açısına ve sertliğe nasıl etki ettiği incelenmiştir. Altlık olarak tercih edilen düşük karbonlu çelik, sırasıyla, elektro galvaniz kaplama, kimyasal dönüşüm kaplama, primer astar kaplama ve son katman olarak Poliamid 12 (PA12) ile kaplanmıştır. Grafen katkısının farklı katmanlardaki performansının belirlenmesi amacıyla takviyelendirme işlemi primer astar katmanında bir oran ve PA12 katmanlarında dört farklı oranda hazırlanan dispersiyonlar ile gerçekleştirilmiştir.

Kaplanmış numunelerin tabaka kalınlıkları ve iç yapıları SEM analizi ile incelendi. Hazırlanan numuneler korozyon dayanımı için potansiyel-dinamik testine, sertlik için Shore sertlik testine ve suya karşı gösterdiği davranışı görmek için temas açısı testine tabi tutuldu. Bu testler neticesinde korozyon ölçümleri astar katmanında gerçekleştirildi ve grafen oksit katkılanmış astardan katkılanılmamış haline göre yaklaşık 15 katlık bir korozyon dayanım artışı elde edilmiştir. Sertlik testlerinde Shore testi gerçekleştirilmiştir ve ölçülen değerler grafen oksidin son katmanda katkılanılmasının sertlik değerini azalttığı yönünde olmuştur. Bu düşüş maksimum %6,5 iken minimum %2,5 olarak ölçüldü. Gerçekleştirilen bir diğer test olan temas açısı testinde, astar katmanı ile kıyaslandığı takdirde, grafen katkılanılmak hidrofobik özelliği artırırken son katman olan PA12 katmanında kıyaslandığında grafen katkılanılmanın hidrofilik özelliği arttırdığı sonucu elde edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler: Grafen, İndirgenmiş Grafen Oksit, Sertlik, Temas Açısı, Korozyon, Kompozit Kaplama.**

## SUMMARY

Graphene is a two-dimensional, one-atom-thick honeycomb form formed as a result of sp<sup>2</sup> hybridization of carbon atoms. It is preferred in many fields such as automotive, marine, electronics, due to its superior mechanical properties, chemical properties, high Young's modulus, high electron movement at room temperature.

In this study, the effects of reduced graphene oxide added to different layers on corrosion resistance, contact angle and hardness were investigated using the multi-layer coating method carried out in the automotive industry. Low carbon steel, which is preferred as the substrate, is coated with electro galvanized coating, chemical conversion coating, primary primer coating and Polyamide 12 (PA12) as the last layer, respectively. In order to determine the performance of the graphene additive in different layers, the reinforcement process was carried out with dispersions prepared in one ratio in the primary primer layer and four different ratios in the PA12 layers.

Layer thicknesses and internal structures of the coated samples were examined by SEM analysis. Prepared samples were subjected to potentiodynamic test for corrosion resistance, Shore hardness test for hardness and contact angle test to see its behavior against water. As a result of these tests, corrosion measurements were carried out on the primer layer and approximately 15 times better corrosion resistance was obtained from the graphene oxide doped primer compared to the undoped version. Shore test was performed in the hardness tests and the measured values were that the doping of graphene oxide in the last layer reduces the hardness value. This decrease was measured as a maximum of 6,5% and a minimum of 2,5%. In another test performed, the contact angle test, it was concluded that while graphene doping increased the hydrophobic property when compared to the primer layer, when compared to the last layer, PA12 layer, graphene reinforcing increased the hydrophilic property.

**Key Words: Graphene, Reduced Graphene Oxide, Hardness, Contact Angle, Corrosion, Composite Coating.**

## TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim öğrenimim sürecinde desteğini ve yardımlarını esirgemeyip bilgisi ve tecrübeleri ile hem bana eşlik eden hem de bu çalışmanın oluşmasını sağlayan danışmanım Dr. Recep ÖNLER ve kıymetli hocam Doç Dr. Ahmet Sinan ÖKTEM'e,

Korozyon testlerinde yardımları için Doç. Dr. Mustafa Fazıl SERİNCAN ve Ongun Bora SABAN'a, sertlik testlerinde yardımını esirgemeyen arkadaşım Okan KÖKEN'e, SEM analizlerinde yardımlarından dolayı Ahmet Nazım ve Adem ŞEN'e, temas açısı testlerinde yardımlarından dolayı Doç. Dr. Ercan ÖZDEMİR, Züleyha SARAÇ ve Ümran ÜNLÜ'ye,

Tez süresince bilgi birikimi ve tecrübelerini her zaman paylaşan oluşan sorunların çözülmesine yardımcı olan Erdal TOPAÇ'a ve bu tez çalışmasının gerçekleştirildiği Grafen Teknolojileri Laboratuvarını açtığı için HAZERFEN firmasına en içten teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak her koşulda yanımda olan desteğini eksik etmeyen aileme teşekkürü bir borç bilirim.

# İÇİNDEKİLER

	<b><u>Sayfa</u></b>
ÖZET	v
SUMMARY	vi
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER	viii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	x
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
TABLolar DİZİNİ	xiii
1. GİRİŞ VE AMAÇ	1
1.1. Grafen	1
1.1.1. Grafen Oksit	2
1.1.2. İndirgenmiş Grafen Oksit	3
1.2. Yüzey Kaplamaları	4
1.3. Kompozit Malzemeler	5
1.4. Literatür Taraması	6
1.5. Tezin Amacı	11
1.6. Tezin Organizasyonu	12
2. NUMUNE ÜRETİM AŞAMALARI	13
2.1. Altlık/Altaş Hazırlama Süreci	13
2.2. Kaplama Uygulama Aşamaları	14
2.2.1. Galvaniz Kaplama İşlemi	14
2.2.2. Kimyasal Dönüşüm Kaplaması	15
2.2.3. Katkılı ve Katkısız Primer Kaplama	18
2.2.4. Katkılı ve Katkısız PA12 Kaplama	21
3. GERÇEKLEŞTİRİLEN ANALİZ VE TESTLER	24
3.1. Mikro Yapı Analizi	24
3.2. Korozyon Testi	25
3.3. Sertlik Testi(Shore D)	27
3.4. Temas Açısı Testi	28

4. ANALİZ VE TEST SONUÇLARI	30
4.1. Mikro Yapı Analiz Sonuçları	30
4.2. Korozyon Testi Sonuçları	31
4.3. Sertlik Testi Sonuçları	33
4.4. Temas Açısı Testi Sonuçları	34
5. SONUÇLAR VE GELECEK ÇALIŞMALAR	36
KAYNAKLAR	38
ÖZGEÇMİŞ	46
EKLER	47



# SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

## Simgeler ve Açıklamalar

### Kisaltmalar

Ag	: Gümüş
AgCl	: Gümüş Klorür
Cr	: Krom
CVD	: Kimyasal Buhar Biriktirme
dk	: Dakika
Ecorr	: Korozyon Potansiyeli
Gpa	: Grafen Katkılı Poliamid 12 Dispersiyonu
Icorr	: Korozyon Akım Yoğunluğu
KDK	: Kimyasal Dönüşüm Kaplaması
mm	: Milimetre
mV	: Mili Volt
NaCl	: Sodyum Klorür
PA12	: Poliamid 12
rpm	: Dakikada Dönüş Miktarı
s	: Saniye
SEM	: Elektron Taramalı Mikroskop
µm	: Mikrometre

# ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil No:</u>	<u>Sayfa</u>
1.1: İki boyutlu grafen tabakası.	1
1.2: Grafen oksidin oluşum şeması.	2
1.3: İndirgenmiş grafen oksidin oluşum şeması.	3
1.4: Çok katmanlı kaplama sistemi.	4
1.5: Kompozit malzeme örneği.	5
2.1: Numune üretim aşamaları.	13
2.2: (a) İşlenmemiş numune yüzeyi, (b) Yüzey işlemleri tamamlanmış numune yüzeyi.	14
2.3: Galvaniz kaplanmış numune örnekleri.	15
2.4: (a) Karıştırıcıya sabitlenmiş numune , (b) Kimyasal dönüşüm kaplaması yapılan numune, (c) Fazla kimyasal dönüşüm kaplamasının yüzeyden arındırılması,(d) Kaplanmış numunenin fırında kurutulması.	17
2.5: (a) Grafenin astar içerisinde karıştırıcı yardımı ile dağıtılması, (b) Astar kaplama işlemi, (c) Fazla astarın yüzeyden arındırılması, (d) Kaplanan numunelerin fırında kurutulması.	19
2.6: (a) Grafensiz astar ile kaplanmış numune, (b) Grafen katkılı astar ile kaplanmış numune.	20
2.7: Grafen katkılı PA12 dispersiyonları.	21
2.8: (a) Ultrasonik tip ile dispersiyonların muamele edilmesi, (b) Mastar yardımı ile fazla dispersiyonun yüzeyden arındırılması.	22
2.9: PA12 kaplama işlemi yapılmış ve kurutulmuş numune örnekleri.	23
2.10: Son katman kaplama işlemi yapılmış numune örneği.	23
3.1: Numune kaplama katmanları.	24
3.2: SEM numunesi örneği.	25
3.3: Korozyon testi hücresi.	26
3.4: Shoremetre (Durometre) sertlik ölçüm cihazı.	27
3.5: Temas açısı ölçüm cihazı.	28

4.1: (a) Grafen-1 ile gerçekleştirilen kaplamanın SEM analizi, (b) Grafen-2 ile gerçekleştirilen kaplamanın SEM analizi.	30
4.2: (a) Grafensiz astar tafel eğrisi, (b) Grafen-1 katkılı astar tafel eğrisi, (c) Grafen-2 katkılı astar tafel eğrisi.	32
4.3: Shore D sertlik değerleri ortalaması.	34
4.4: Ortalama temas açısı değerleri.	35
4.5: Temas açısı ölçümleri.	35



# TABLÖLAR DİZİNİ

<b><u>Tablo No:</u></b>	<b><u>Sayfa</u></b>
1.1: Grafenin özellikleri.	1
4.1: Numunelerin ortalama korozyon değerleri.	33



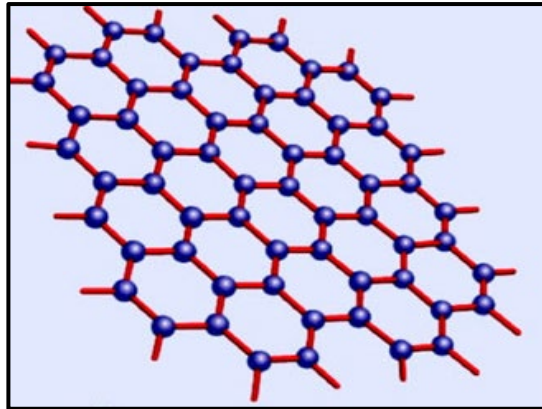
# 1. GİRİŞ VE AMAÇ

## 1.1. Grafen

Karbon atomları birbirlerine farklı şekillerde bağlanarak birbirlerinden çok farklı özelliklere sahip yapılar oluştururlar. Bu yapılardan biri de grafen'dir. Şekil 1.1'de görüldüğü gibi grafen karbon atomlarının, sp<sup>2</sup> hibritleşmesi sonucu oluşan iki boyutlu, bir atom kalınlığında ve bal peteği formundaki halidir [1]-[3],[15]. Grafen üstün mekanik özellikleri, kimyasal özellikleri, yüksek elastik modülü, oda sıcaklığında yüksek elektron hareketi gibi özelliklerinden dolayı son 10 yılda üzerinde çokça çalışmanın bulunduğu bir malzemedir [4]-[8]. Bu özellikler Tablo 1.1'de görülmektedir [7],[8],[13],[14]. Grafenin merak uyandıran tüm özellikleri grafeni tek başına ve kompozitler de bir takviye malzemesi olarak kullanılmasına olanak sağlamaktadır [9]. Bu özellikleri grafenin otomotiv, denizcilik, elektronik, sağlık, kaplama teknolojileri gibi birbirinden bağımsız birçok alanda kullanılabilceğini göstermektedir [10]-[12].

Tablo 1.1: Grafenin özellikleri.

Özellikler	Değer	Referans
Optik Geçirgenlik	97,70%	Nair 2008
Elektron Hareketliliği	200.000 cm <sup>2</sup> v <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup>	Bolotin 2008
Elastik Modül	1 TPa	Lee 2008
Kırılma Direnci	42 N m <sup>-1</sup>	Lee 2008
Termal İletkenlik	5.000 W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>	Balandin 2008

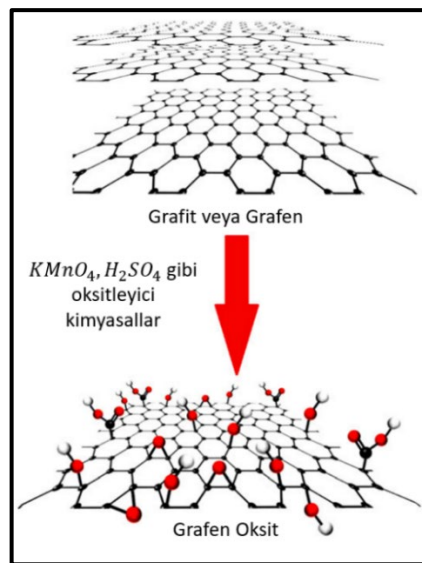


Şekil 1.1: İki boyutlu grafen tabakası.

Etki edebileceği özellikleri, net bir şekilde değiştirmesiyle ilgili henüz tam bir kanı olmamakla birlikte genel olarak korozyon engelleyici kaplamalar, türevleri sayesinde bazı çalışmalarda hidrofobik bazı çalışmalarda hidrofilik davranış sergileyen malzemelerde, sertlik veya tokluk özelliğinde geliştirmeler yapmayı amaçlayan kompozitlerde, grafinin yüksek iletkenlik özelliğinden faydalanılarak devre bileşenleri ve özellikle şeffaf iletken elektrotlarda kullanılabilme fikri kendisine olan ilginin artmasına sebep olmuştur [16],[17].

### 1.1.1. Grafen Oksit

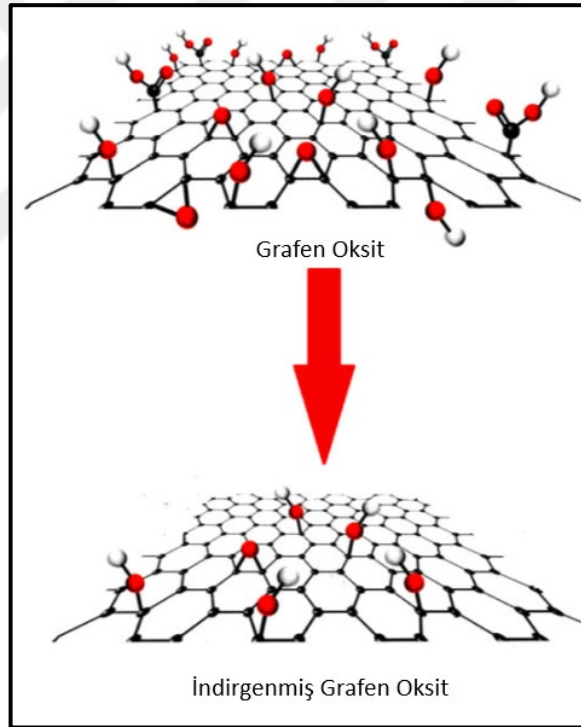
Grafitin kimyasal oksidasyon sonucu içerisinde epoksi, hidroksil, karbonil ve karboksil gibi oksijen grupları barındıran grafitin türevine grafit oksit denmektedir [18]. Grafen yapısı gereği hidrofobik özelliğe sahip bir malzemedir. Ancak oksidasyon sonrası oluşan grafit oksit ise içerisinde barındırdığı oksijen grupları sayesinde yalıtkan iken aynı zamanda hidrofildir ve sıvı dispersiyonları içerisinde kolay dağılıbilir yapıya sahip bir malzemedir [19],[20]. Grafen oksit sentez sonrası özellikleri saf Grafenden düşük olmasına rağmen, ucuz elde edilebilirliği, sıvı dispersiyonları içerisinde kolay hazırlanabilmesi sayesinde mekanik, termal, elektronik ve medikal özelliklerinin gelişmesini isteyen uygulamalarda tercih edilerek malzemelerin özelliklerine katkı sağlamaktadır [21]-[24]. Şekil 1.2’de şematik olarak grafitin grafit oksidin oluşumu gösterilmektedir [15].



Şekil 1.2: Grafen oksidin oluşum şeması.

## 1.1.2. İndirgenmiş Grafen Oksit

Saf grafene yakın özellikler sağlamak için çeşitli indirgeme işlemlerine tabi tutulan grafen oksidin içerisinde bulundurduğu oksijen gruplarından arındırılmış haline indirgenmiş grafen oksit ismi verilmektedir. İndirgenmiş grafen oksit yapısında az bulundurduğu oksijen grupları sayesinde grafen oksidin aksine hidrofobik bir yapıya sahipken aynı zamanda yüksek mukavemet, elektriksel ve kimyasal özellikleri sebebiyle üzerinde çokça çalışma yapılmaktadır [23],[25],[26]. İndirgenmiş grafen oksit, sahip olduğu bu özelliklerinin yanı sıra istenilen miktarda, grafen oksitten ucuz bir şekilde elde edilebiliyor olması birçok polimer veya kompozit yapılarda dolgu malzemesi olarak tercih edilmesini sağlamaktadır [27],[28]. Şekil 1.3' te indirgenmiş grafen oksidin oluşumu şematik olarak gösterilmektedir [15].

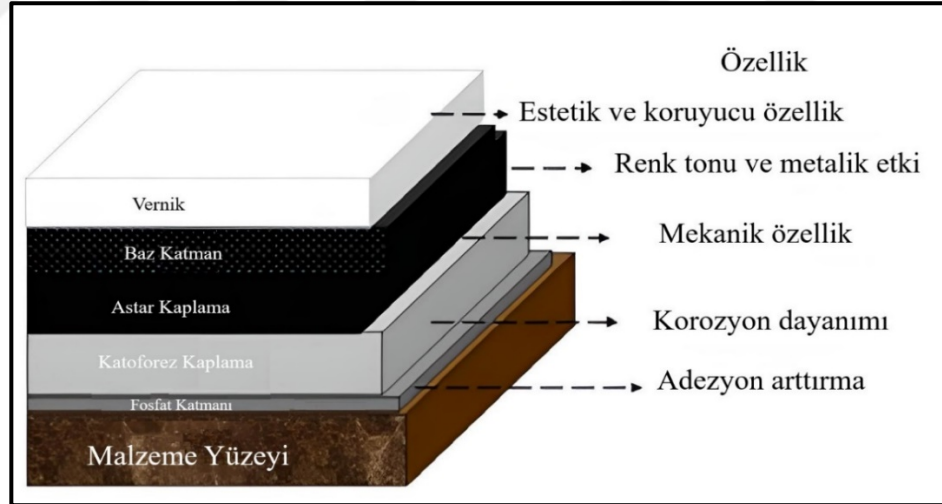


Şekli 1.3: İndirgenmiş grafen oksidin oluşum şeması.

## 1.2. Yüzey Kaplamaları

Yaygın metotlar ile üretimi gerçekleştirilen malzemelerin saf özellikleri her uygulama/kullanım alanı için yeterli değildir. Genel manada bir malzemenin kullanım ömrü yüzey özelliklerine dayanır (aynı zamanda bir malzemenin kullanım ömrü o malzemenin yüzey özelliklerine bağlıdır). Malzemenin yüzeyinde gerçekleştirilen herhangi bir uygulama o malzemenin performansına büyük ölçüde etki etmektedir [29]. Malzemeler çevre ile temas halindedir. Bu temaslar neticesinde fiziksel veya kimyasal hasarlara maruz kalabilirler. Bu hasarı minimuma indirmek ve malzemelerin faydalı ömrünü arttırmak için malzeme yüzeylerinde işlemler yapılır [30]. En yaygın olan uygulamalardan biri de yüzey kaplamalarıdır.

Gerçekleştirilen yüzey kaplamaları için kabuk benzetmesi yapılabilir. Yüzeylerde bulunan bu kabuklar malzemelerin iç yapılarını değiştirmeden malzemelerin çevre ile olan temasları neticesinde uğradıkları fiziksel ve kimyasal hasarları minimuma indirmeyi amaçlarlar [31]. Şekil 1.4'te farklı özelliklere sahip kaplama katmanlarının bir arada bulunduğu bir sistem görülmektedir [99].



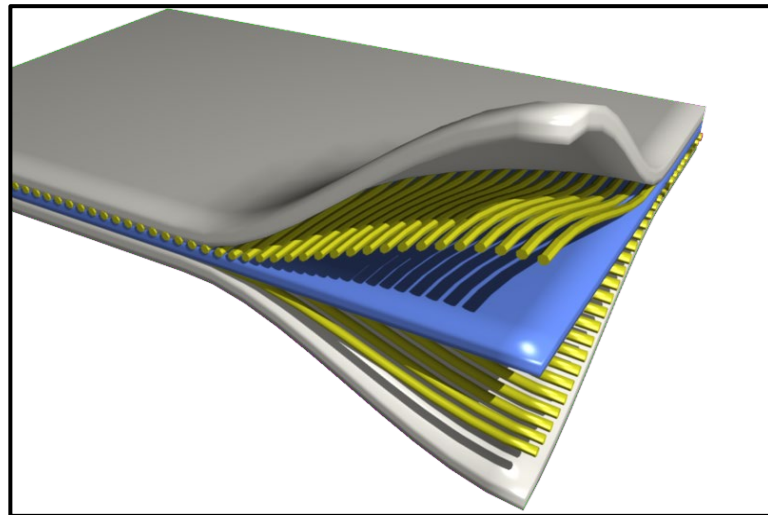
Şekil 1.4: Çok katmanlı kaplama sistemi.

Yüzey kaplamaları, gelişen teknoloji ve değişen ihtiyaçlar doğrultusunda birçok farklı sebeple beraber, malzemelerin organik veya inorganik bir madde ile görsel, fiziksel ve kimyasal performanslarını ve özelliklerini değiştiren kaplama malzemesine, kaplanacak yüzeye ve kullanım alanına göre değişiklik gösteren yüzey mühendisliği uygulamasıdır [32]-[34].

Yüzey kaplama uygulamaları, korozyon dayanımını arttırmak, mekanik ve elektriksel özellikleri geliştirmek veya görsel amaçlı olarak havacılık, otomotiv, nükleer, denizcilik, optik ve genel birçok mühendislik alanında kullanılmaktadır [35]-[37]. Bu uygulamalar zaman içerisinde gerekli duyulan ortama veya malzemeye göre gelişim göstermiştir. Günümüzde yaygın bir şekilde tercih edilen kaplamalar, kaplandıkları yüzeye önceki halinde sağlayamadığı özellikleri sağlamaktadır. Gelişen uygulama metotları sayesinde de oldukça ekonomik bir yolla günlük hayatımızda kullandığımız birçok üründe uygulanmaktadır [38].

### 1.3. Kompozit Malzemeler

İnsanoğlu eski zamanlardan beri farklı malzemeleri birleştirerek kendi hayatını kolaylaştıracak araç gereçler üretmiştir. Tarihte çok açıktır ki bu malzemelerin değişimi uygarlıkların gelişmesiyle paraleldir. Her çağda popülerliği değişen kullandığımız bu araç gereçlerden çağımızın gözdesi olan kompozitler, özellik ve ihtiyaç olarak yeterli olmayan malzemelerin özellik ve becerileri göz önünde bulundurularak birleştirilmesi sonucu farklı yetenekler kazandırılan malzemelerdir. Şekil 1.5'te de görüldüğü üzere kompozit malzeme anlam olarak iki veya daha fazla malzemenin bir ara yüzeyde birleşmesi sonucunda oluşur [41]. Bu tanım aynı zamanda fiberle güçlendirilmiş plastikler, laminantlar, seramik malzemeler, kauçuk katkılı plastikler gibi birçok farklı malzemeyi kapsamaktadır [39]. Ancak kompoziti oluşturan malzemeler genel olarak saf özelliklerini korurlar [40].



Şekil 1.5: Kompozit malzeme örneği.

Tıpkı saman ve kil den oluşan tuğlalar gibi, birçok malzeme kompozitlerin temellerini oluşturmaktadır [42]. Günümüzde kullandığımız birçok araç gereç askeri ihtiyaçlar doğrultusunda geliştirilmiş ve sivil kullanıma sunulmuştur. Özellikle İkinci Dünya Savaşı'nda polimer matrisli kompozitlerin kullanılması çağımızın gözdelelerinin temellerini sağlam bir şekilde oluşturmaktadır [43]. Otomotiv, uzay, havacılık, inşaat ve denizcilik gibi son yıllarda çok hızlı gelişen ve dönüşen sektörlerde farklı ihtiyaçlar doğmuştur. Bu ihtiyaçlarda tercih edilen kompozitlerin avantajlarının başında yüksek mukavemet ve özgül dayanımı gelmektedir. Bu sayede geleneksel olarak adlandırılacak malzemelere göre ciddi miktarda mukavemet artışı ve hafiflik avantajı sağlanmaktadır [44]. Ağırlığın azalması havacılık ve otomotiv sektörlerinde doğrudan üretim maliyetlerine ve yakıt verimliliğine etki etmektedir. Sağladıkları özellik ve yetiler sayesinde kompozitler havacılık, otomotiv, denizcilik, spor, inşaat, sağlık, askeri ve teknoloji gibi birçok farklı alanda tercih edilmektedir.

#### **1.4. Literatür Taraması**

Korozyon, evrende bulunan metallerin ve alaşımlarının atmosferde bulunan oksitleyici maddeler ile gerçekleştirdikleri temaslar neticesinde meydana gelen kimyasal veya elektrokimyasal reaksiyonlar sonucunda fiziksel, kimyasal ve mekanik özelliklerinin değişmesidir. Korozyon reaksiyonları metallerin kararlı yapıya dönme eğilimlerinden dolayı sürekli devam etmektedir [45]. Bu doğrultuda gerçekleştirilen çalışmalar korozyon reaksiyonlarının geciktirilmesini amaçlamaktadır.

Grafen, giriş bölümünde aktarıldığı üzere, çok farklı özelliklere sahip bir malzemedir. Literatürde, kaplama yüzeyi olarak nikel, bakır ve çelik gibi malzemeler kullanılarak grafen ve türevlerinin katkılındırıldığı birçok korozyon önleyici kaplama çalışması bulunmaktadır. Mazumder 2020'de yaptığı bir çalışmada, korozyonun dünya ekonomisini yılda, yaklaşık 2.5-3 trilyon dolarlık bir zarara uğrattığını savunmaktadır [46]. Etkisinin bu denli büyük olduğu bir problem olan korozyonu yavaşlatmayı amaçlayan birçok çalışma araştırmacılar, kurum veya kuruluşlar tarafından geçmişten günümüze devam etmektedir. Bu çalışmalardan bazıları şunlardır;

Anisur ve arkadaşlarının, hazırladıkları grafen filmler ile nikel bir yüzeyi kapladılar ve gerçekleştirdikleri testler neticesinde korozyon dayanımında 1 katlık

artış elde ettiklerini paylaştılar [47]. Benzer bir yöntemle gerçekleştirilen başka bir çalışmada ise Pu ve arkadaşları grafen filmler ile kapladıkları metal yüzeyde gerçekleştirdikleri testler neticesinde korozyon dayanımında 5 katlık artış elde edildiği paylaşılmıştır [48]. Benzer yöntemlerle gerçekleştirilen çalışmalar her zaman aynı sonuçları vermeyebilir. Bu durumun birinci sebebi katkı malzemesi olan grafen veya türevlerinin kalitesi olabilir, ikincisi ise katkı malzemesinin hazırlanan karışım içerisine dağıtılma kabiliyetidir. Grafen ve türevleri tek başlarına kullanıldıkları gibi farklı malzemeler içerisine katkılanarak da korozyon önleyici etki gösterebilmektedir. Bu çalışmalardan bazıları da grafen ve türevlerinin epoksi reçine içerisine katkılanması ile uygulanan korozyon önleyici kaplamalardır. Bu çalışmalardan birinde grafen oksit ve indirgenmiş grafen oksit ile hazırlanmış epoksi reçineli kaplamalar birbirleri ile kıyaslanmıştır. Gerçekleştirilen potansiyon dinamik testler 24 saat devam etmiş ve her iki katkılandırma da korozyon dayanımında artış sağlarken grafen oksit ile hazırlanan epoksi reçine, indirgenmiş grafen oksit ile hazırlanan kaplamadan neredeyse 6 kat daha yavaş korozyona uğradığı paylaşılmıştır [49]. Bir başka çalışmada ise çelik yüzeye gerçekleştirilen grafen oksit katkılı epoksi kaplamanın, korozyon dayanımına katkı sağladığı aktarılmaktadır [50]. Başka bir çalışmada ise Zhou ve arkadaşları hazırladıkları kaplamalar üzerinde bir dizi testler gerçekleştirdiler ve en iyi sonucu veren epoksi kaplamanın korozyon dayanımını 2 katına çıkardığını paylaştılar [51]. Bir diğer epoksi reçine, içerisine katkılanılan grafen ile gerçekleştirilen kaplama ise 2017 yılında Ding ve arkadaşlarının çalışmasıdır. Bu çalışmada katkılanılmış epoksi reçine çelik bir yüzeyin kaplamasında kullanılmıştır ve bu yüzeyde gerçekleştirilen testler neticesinde katkılanılmış kaplamanın saf epoksi kaplamaya göre 10 kattan fazla korozyon dayanımında artış sağlandığı aktarılmıştır [52].

Bir diğer çalışmada grafen oksit ve indirgenmiş grafen oksit katkılı epoksi nano kompozit kaplama metal yüzeye uygulanmış ve korozyon dayanımına katkı sağladığı aktarılmıştır [53]. Başka bir çalışmada ise daha önce aktarıldığı üzere grafen ve türevlerinin katkılanıldığı kaplamalarda altlık olarak tercih edilebilen yüzeylerden olan bakır tercih edilmiş ve hazırlanan numuneler üzerinde yapılan testler neticesinde kaplamanın hem anodik hem de katodik korozyonun yüzeyde yavaşladığı paylaşılmıştır [54]. Gerçekleştirilen bazı çalışmalarda, farklı oranlarda katkılanılarak hazırlanan kaplamaların performansları birbirleriyle kıyaslanmıştır. Bu doğrultuda literatürde bulunan bir çalışmada çelik yüzeyler %0.5 ve %1

oranlarında grafen katkılandırılarak hazırlanan reçine ile kaplanmış ve hazırlanan numuneler üzerinde yapılan testler neticesinde saf epoksi kaplamaya göre her iki katkılandırma işleminin de korozyon dayanımını arttırdığı ancak %0.5 oranında hazırlanan kaplamanın daha iyi sonuç verdiği aktarılmıştır [55]. Başka bir çalışma da ise benzer şekilde katkılandırma oranlarını incelemek için % olarak (0.05, 0.1, 0.3, 0.5) olarak toplamda dört farklı oranda hazırlanan kaplamalar numune yüzeylerine uygulanmış ve üzerlerinde gerçekleştirilen testler neticesinde en iyi sonucu %0.1 grafen oksit ile katkılandırılan kaplamayı verdiği paylaşılmıştır [56].

Grafen ve türevleri daha önce de aktarıldığı üzere katkılandırıldığı malzeme ile birlikte farklı özelliklere aynı anda etki edebilmektedir. Shihui ve arkadaşları hazırladıkları grafen katkılı epoksi kaplama ile kapladıkları metal yüzeylerde gerçekleştirdikleri elektrokimyasal testler neticesinde 10 günün sonunda %90, 80 günün sonunda %70 gibi bir korozyon dayanımında artış sağlarken aynı zamanda katkılandırılarak hazırlanan kaplamaların saf epoksi kaplamadan neredeyse %70 daha düşük aşınma oranı sergilediğini aktarmaktadır [57]. Bir başka çalışma da benzer şekilde epoksi içerisine katkılandırılan grafenin aynı anda hem korozyon dayanımına katkı sağladığı hem de kuru ortamda aşınma dayanımına katkı sağladığı aktarılmaktadır [58]. Diğer bir çalışmada da grafen katkılandırma işlemi anilin trimer ile gerçekleştirilmiş ve bu doğrultuda yapılan testlerin korozyon dayanımına sağladığı katkının kaplamanın kendi kendini iyileştirme özelliğinden kaynaklandığını paylaşmaktadır [59].

2012 yılında Prasai ve arkadaşları çalışmalarında bakır ve nikel yüzeyleri grafen ile kaplamışlar, grafenin yüzeyi koruma kabiliyetini ve katman sayısının etkisi incelendiği bu çalışmada hazırladıkları numuneler üzerinde yaptıkları testler neticesinde grafen kaplamanın korozyon dayanımını bakır yüzeyde 7 kat arttırdığı, nikel yüzeyde ise 20 kat arttırdığı sonucunu aktarmaktadır [60]. Aynı zamanda bu çalışmada katman sayısının etkisi incelemek için nikel yüzey 2 ve 4 katmanlı gerçekleştirilen kaplama sayesinde, kaplama katman sayısının artması ile doğru orantılı bir şekilde korozyon dayanımının arttığı paylaşılmaktadır [60]. Bir önceki çalışma ile benzer şekilde gerçekleştirilen başka bir yüzey kaplama çalışmasında ise korozyon dayanımı çelik yüzeyde 10 kat, nikel yüzeyde 14 kat arttığı sonucundan bahsedilmektedir [61]. Bir diğer çalışmada grafen, polimer türevi olan poliimid içerisine katkılandırılmış ve çelik yüzeye gerçekleştirilen kaplamanın korozyon dayanımına katkı sağladığı aktarılmaktadır [62].

Grafen ve türevlerinin korozyon dayanımına katkı sağladığıyla ilgili literatürde pek çok çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmalardan bazıları çok katmanlı kaplama sistemleridir. Bu çalışmalarda gözlemlenen ilk kriter katman sayısının korozyon dayanımına ne yönde katkı sağladığını araştırmaktır. Çünkü katman sayısının artması kaplamada sisteminde oluşturabilecek hataları azaltmaktadır. Bu doğrultuda incelenen bazı çalışmalar aşağıda paylaşılmaktadır. 2017 yılında Tiwari ve arkadaşları bakır yüzeyi CVD yöntemi ile kapladı ve numuneler üzerinde yaptıkları testler neticesinde kaplama katman sayısının artmasının korozyon dayanımını arttırdığı savunulmaktadır [63]. Diğer bir çalışmada ise Sanjid ve arkadaşları nikel-bakır alaşımından üretilmiş yüzeye CVD yöntemi ile bir kaplama gerçekleştirdi ve hazırlanan numuneler üzerinde yaptıkları testlerde çok katmanlı kaplama sisteminin korozyon dayanımına olumlu yönde katkı sağladığını aktardılar [64]. Başka bir çalışmada ise bakır yüzey toplamda 1, 2, 4, 6 ve 8 katmadan oluşan grafen katkılı kaplama ile kaplanmıştır. Hazırlanan numuneler üzerinde yapılan testler neticesinde 1 ve 8 katmanlı kaplama dışında diğer tüm kaplamaların korozyon dayanımına katkı sağladığı paylaşılmaktadır [65]. Literatür taramaları sırasında karşılaşılan bazı çalışmalar olumlu sonuçlanırken bazı çalışmalarda olumsuz sonuçlanmıştır. Bu çalışmalardan bir tanesi de 2014 yılında Dong ve arkadaşlarının yaptığı çalışmadır. Hazırladıkları 3 numuneye gerçekleştirdikleri elektro kimyasal testlerde ilk 5 gün güzel sonuçlar alırken 5 günden sonra grafen katkılı kaplamanın bulunduğu yüzeyin kaplamasız yüzeyden daha fazla korozyona uğradığı aktarılmaktadır [66].

Temas açısı, malzemenin yüzeylerinde bulunabilecek sıvılara karşı gösterdikleri davranışı açıklamaya yarayan sıvı ile yüzey arasındaki durumdur. Kaplamalar uygulandıkları yüzeylerin hidrofobik özelliklerine de katkı sağlamaktadır. Artan temas açısı sayesinde malzemelerin yüzeylerinde bir bariyer etkisi oluşmakta ve korozyon dayanımları artmaktadır. Bu doğrultuda literatürde bulunan grafen ve türevleri ile hazırlanan, temas açısını arttıran veya azaltan kaplama çalışmalarından bazıları şunlardır;

Wang ve arkadaşları grafit ve grafen türevlerinden hazırladıkları filmler üzerinde yaptıkları birtakım testler sonucunda grafit film üzerinde  $98,3^\circ$ , grafen oksit yüzeyde  $67,4^\circ$  olarak ölçülürken indirgenmiş grafen oksit yüzeyde ise  $127^\circ$  elde ettiklerini paylaştılar [67]. Korozyon önleyici kaplamalarda olduğu gibi temas açısı çalışmalarında da birçok grafen ve türevlerinin katkılılandırıldığı epoksi kaplama çalışması bulunmaktadır. Bunlardan bir tanesi petrol ve gaz boru hatlarında

gerçekleştirilen grafen katkılı epoksi kaplamadır. Bu çalışma da yapılan testler neticesinde aşınma direncine %20 katkı sağlayan kaplamanın temas açısında ise neredeyse %40'lık bir artış sağladığı aktarılmıştır [68]. Chang ve arkadaşları oda sıcaklığında kürledikleri grafen katkılı epoksi kaplama ile temas açısını 82°'den 127°'ye çıkardıklarını paylaştılar [69]. Bir diğer çalışmada bakır yüzey CVD yöntemi ile kaplanmış ve kaplama sonrası geçen sürede yüzey enerjisinin değişiminin temas açısına etkisi incelenmiştir. Kaplandıktan hemen sonra 50° olarak ölçülen temas açısı aradan 24 saat geçtikten sonra gerçekleştirilen testlerde %50 den fazla bir artış ile 77°'ye kadar çıktığı bu çalışmada paylaşılmaktadır [70]. Bu çalışma temas açısının değişimini paylaşırken, kaplama sonrası geçen zamanın yüzey enerjisini azalttığını da savunmaktadır. Başka bir çalışmada da epoksi kaplamalar içerisine katkılanan grafenin olumlu sonucundan bahsedilmektedir. Bu çalışmada kaplamasız bakır yüzeyde ölçülen açı 45° iken kaplama sonra 81,59°'ye kadar arttırıldığı paylaşılmaktadır [54]. Bir diğer çalışmada Shin ve arkadaşları SiC yüzeyde tek ve çok katmanlı kaplama sistemi sayesinde temas açısının 69°'den 92°'ye yükseldiğini bildirdiler [71]. Başka bir çalışmada 3 farklı malzeme yüzey olarak tercih edilmiş, CVD yöntemi ile kaplanmış ve hazırlanan numuneler üzerinde yapılan testler neticesinde 1 kat grafen kaplamanın ciddi miktarda arttırdığı temas açısı ikinci katmanda da devam ettiği aktarılmaktadır [72]. Katman sayısının artması bazı yüzeylerde olumlu sonuçlar verirken bazı yüzeylerde ciddi miktarda etki göstermemektedir. Rafiee ve arkadaşları yaptıkları çalışmada bakır bir yüzeyin kaplanmadan önce 85,9° bir kat kaplamanın 86,2°, 4-6 katmanın ise 88,3° olduğunu aktarıırken aynı çalışmada cam yüzeye gerçekleştirdikleri kaplamada ise kaplamasız yüzeyin 20,2° ölçülen temas açısı 6-9 katman kaplama sonrası 94,2° olarak ölçüldüğünü bildirdiler [73]. Katman sayısının etkisini inceleyen bir diğer çalışmada ise kaplanmadan önce 22,3° olan temas açısı kaplama katman sayısının artmasıyla beraber altıncı katmanda 79,6° olarak ölçüldüğü paylaşılmaktadır [74]. Başka bir çalışmada bakır yüzeyde CVD yöntemi ile gerçekleştirilen kaplanmanın, ilerleyen ve azalan temas açılarına etkisi incelenmiştir. Grafen kaplama işlemi ilerleyen temas açısında önemli bir etki göstermezken azalan temas açısında neredeyse 2 katlık bir artış elde edildiği paylaşılmıştır [75]. Başka bir çalışmada ise süper hidrofobik ve süper hidrofilik yüzeylerde grafenin etkisi incelenmiş ve hidrofilik yüzeylerde temas açısını arttırdığı aktarılmıştır [76]. Bir diğer çalışmada ise grafen katkılı kaplamanın su altı hidrofobikliğini incelemek için kumaş yüzey grafen oksit ve indirgenmiş grafen oksit

ile kaplanarak yüzeylerin davranışları incelenmektedir. Grafen oksit ile kaplanan yüzeye damlatılan su hemen yüzeye nüfus etmekte ve ardından yüzeyine damlatılan tüm yağlarda 150°'den fazla bir temas açısı sağladığı aktarılmaktadır [77].

Yüksek temas açısına sahip yüzeylerin, korozyon önleyici, aşınmaya karşı dayanıklılık ve yüzeyin kendi kendini temizleyebilmesi gibi çeşitli özellikleri bulunmaktadır. Yüksek temas açısı sağlayan bir çalışmada çeşitli yüzeylere yöntem olarak basit sprej metodu kullanılarak gerçekleştirilen kaplamada 173° gibi bir temas açısı ile süper hidrofobik bir yüzey elde edildiği aktarılmaktadır [78]. Bu durum ile ilgili bir diğer çalışmada CVD yöntemi ile grafen katkılı köpük elde edilmiş ve üzerinde gerçekleştirilen testler neticesinde 163° olarak ölçülen temas açısı ile yüzeyinin süper hidrofobik olduğu aktarılmaktadır [79]. Literatürde bulunan birçok çalışmada yapılan kaplamaların yüzeye sağladıkları temas açılarının ortamdaki hava ile teması sonucu değiştiği belirtilmektedir. Bu çalışmalardan birinde CVD yöntem ile kaplanan yüzey üzerinde 10 saniye sonra yapılan teste 44° olduğu belirtilen temas açısının aradan geçen 20 dakikada 60° 1 gün sonra ise 80° olarak ölçüldüğü aktarılmaktadır [80].

Bu tez çalışmasında gerçekleştirilmesi amaçlanan çok katmanlı kaplama sisteminin temellerini 2021 yılında gerçekleştirilen bir tez çalışması oluşturmaktadır. Bu çalışmada Aktürk numune hazırlık süreçlerinin optimizasyonunu gerçekleştirmiştir ve hazırladığı numunelerin mikro yapı ve korozyon dayanımlarını incelemiştir [81]. Bir katkılandırma oranında astar ve son katmanda indirgenmiş grafen oksit katkılandırılarak hazırlanan numuneler üzerinde yapılan potansiyometrik dinamik testlerde korozyon dayanımının 10 kat belirtilmiştir [81]. İlgili yazarın diğer bir yayınında ise benzer proses adımları sonucunda 15 kat daha iyi korozyon direnci elde edildiği belirtilmiştir [100].

## **1.5. Tezin amacı**

Bu çalışma özellikle otomotiv sektöründe yaygın olarak kullanılan çok katmanlı bir kaplama sisteminin grafenle katkılandırılmasının kaplamanın fiziksel ve kimyasal performansına etkisini incelemeyi temel almaktadır. Aktürk'ün çalışmasında tek bir oranda hazırlanan numuneler üzerinde gerçekleştirilen testler ve literatürde farklı katkılandırma oranlarının kaplamaların performanslarına etkisinin incelenmediği

görülmüştür [81]. Bu amaçla, düşük karbonlu bir çelik ticari bir reçetedeki gibi kaplanmış, kaplama sisteminin farklı katmanları grafen ile katkılandırılmıştır. Bu katkılandırma oranı astar katmanında sabit tutulurken, son katmanda dört farklı katkılandırma oranı tercih edilmiştir. Bu sayede farklı katkılandırma oranlarının kaplamanın özelliklerine ne yönde etki ettiği gözlemlenecektir. Üretilen numuneler sertlik değerlerindeki değişim için Shore testine, korozyon dayanımlarındaki değişim için potansiyon-dinamik polarizasyon testine, suya karşı gösterdikleri davranışları incelemek için temas açısı testlerine tabi tutulmuşlardır. Testler neticesinde elde edilen sonuçlar birbirleriyle kıyaslanmış ve katkılandırma işleminin hangi katman veya katmanlarda ve hangi oranlarda olumlu sonuçlar verdiği incelenmiştir.

## **1.6. Tezin Organizasyonu**

Bu tez çalışmasının birinci bölümünde grafen ve türevlerinden, yüzey kaplamalarından, kompozit malzemelerden, literatür taramasından, tezin amacından ve organizasyonundan bahsedilmiştir. İkinci bölümünde ise numune üretim aşamaları detaylı bir şekilde anlatılmıştır. Üçüncü bölümünde gerçekleştirilecek testlerden ve test ekipmanlarından bahsedilirken dördüncü bölümde bu test sonuçlarından bahsedilmiştir. Beşinci ve son bölümde ise sonuçlardan ve gelecekte gerçekleştirilmesi amaçlanan çalışmalar bahsedilmiştir.

## 2. NUMUNE ÜRETİM AŞAMALARI



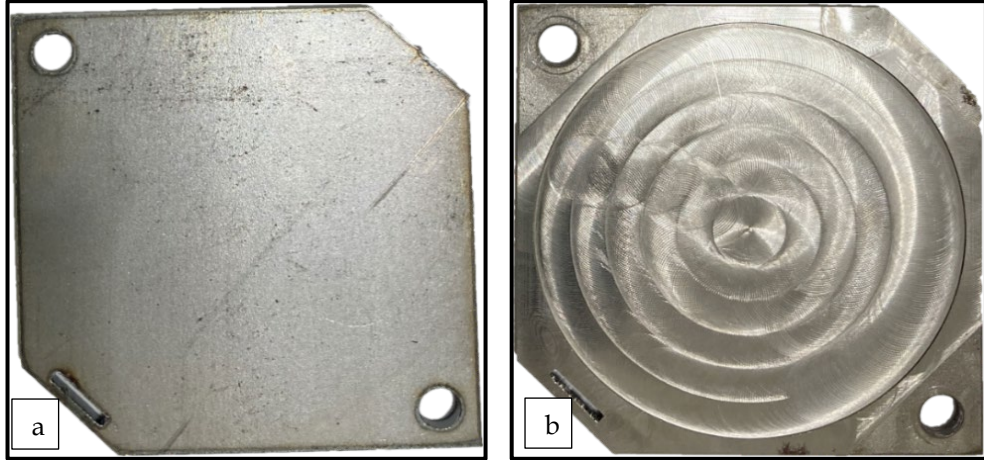
Şekil 2.1: Numune üretim aşamaları.

Numune üretim aşamaları Aktürk'ün 2021 yılında gerçekleştirdiği çalışma baz alınarak aşağıda detaylı bir şekilde paylaşılmaktadır [81]. Aktürk'ün çalışmasında astar katmanında ve son katmanda sadece %0,5 oranında hazırlanan kaplamalar ile numuneler üretilmiştir. Ancak o çalışmaya ek olarak farklı katkılandırma oranlarının etkisini incelemek amacıyla %0,25, %0,5, %0,75 ve %1 olmak üzere dört farklı oranda grafen katkılandırılarak hazırlanan PA12 dispersiyonları ile numuneler hazırlanacaktır. Şekil 2.1 çalışmada kullanılan kaplama sisteminin elde edilmesi için gerekli adımları göstermektedir.

İlk olarak düşük karbonlu çelik plakalar hazırlanmış ve galvaniz ile kaplanmıştır. Sonrasında metalden polimere geçişte uyumu arttırmak amacıyla kimyasal dönüşüm kaplaması, ardında primer astar ve PA12 katmanları ile numuneler hazırlanmıştır. Çalışmanın merkezini oluşturan grafen etkisini görmek için son iki tabaka hedef olarak seçilmiş, astar ve PA12 katmanlarının grafen ile katkılandırılmış ve katkılandırılmamış halleri karşılaştırılmalı olarak incelenmiştir.

### 2.1. Altlık/Altaş Hazırlama Süreci

Bu çalışmada gerçekleştirilen kaplamalar için altlık olarak gerçekleştirilecek tüm numune test süreçleri gözetilerek 70\*70 mm ebadında(kare) ve 3 mm kalınlığında düşük karbonlu çelik tercih edilmiştir. Kare plakaların karşı köşegenlerinde kaplama metodu olarak tercih edilen daldırma ve döndürme kaplama metodunda faydalanılacak bağlantı aparatları için delikler açılmıştır ve Şekil 2.2(a)' da gösterilmiştir. Şekil 2.2(b)' de gösterildiği üzere numune yüzeylerine uygulanacak kaplama katmanlarının daha iyi tutunmalarını sağlayacağı düşünülerek freze yardımıyla 200 µm lik bir girinti oluşturulmuştur.



Şekil 2.2: (a) İşlenmemiş numune yüzeyi, (b) Yüzey işlemleri tamamlanmış numune yüzeyi.

## 2.2. Kaplama Uygulama Aşamaları

### 2.2.1. Galvaniz Kaplama İşlemi

Yüzeyleri işlenen ve test cihazları düşünülerek üretimi gerçekleştirilen plakalar ilk olarak kaplama işlemleri için yüzey temizleme aşamalarına maruz bırakılırlar. Yapılan çalışmalar ve testlerden alınan güzel sonuçlardan dolayı çelik malzemelere uygulanması kolay ve maliyet açısından avantaj sağlayan çelik malzemelerin korozyon dayanımını arttıran galvanizleme metotlarından elektro galvaniz kaplama yapılmıştır.

Şekil 2.3'te galvaniz kaplanmış numuneler görülmektedir. Gerçekleştirilecek kaplamaların yüzeye daha iyi yapışmasına yardım ettiği için havacılık, otomotiv, askeri, teknolojik aletler ve inşaat gibi birçok alanda tercih edilmektedir [82]-[85]. Galvaniz işleminde tercih edilen çinko çok reaktif bir maddedir. Bu sebeple çinko kaplamanın korozyon dayanımını arttırmak için yüzeyinde korozyon dayanımı yüksek bir pasif katman oluşturmak hem korozyon dayanımına hem de sonraki aşamalarda tercih edilecek kaplamaların yüzeye daha iyi tutunmasını sağlamaktadır [86],[87]. Bu sebeple galvanizleme işleminin ardından Cr<sup>+3</sup> pasivizasyon işlemi gerçekleştirilmiştir [88],[89].



Şekil 2.3: Galvaniz kaplanmış numune örnekleri.

### 2.2.2. Kimyasal Dönüşüm Kaplaması

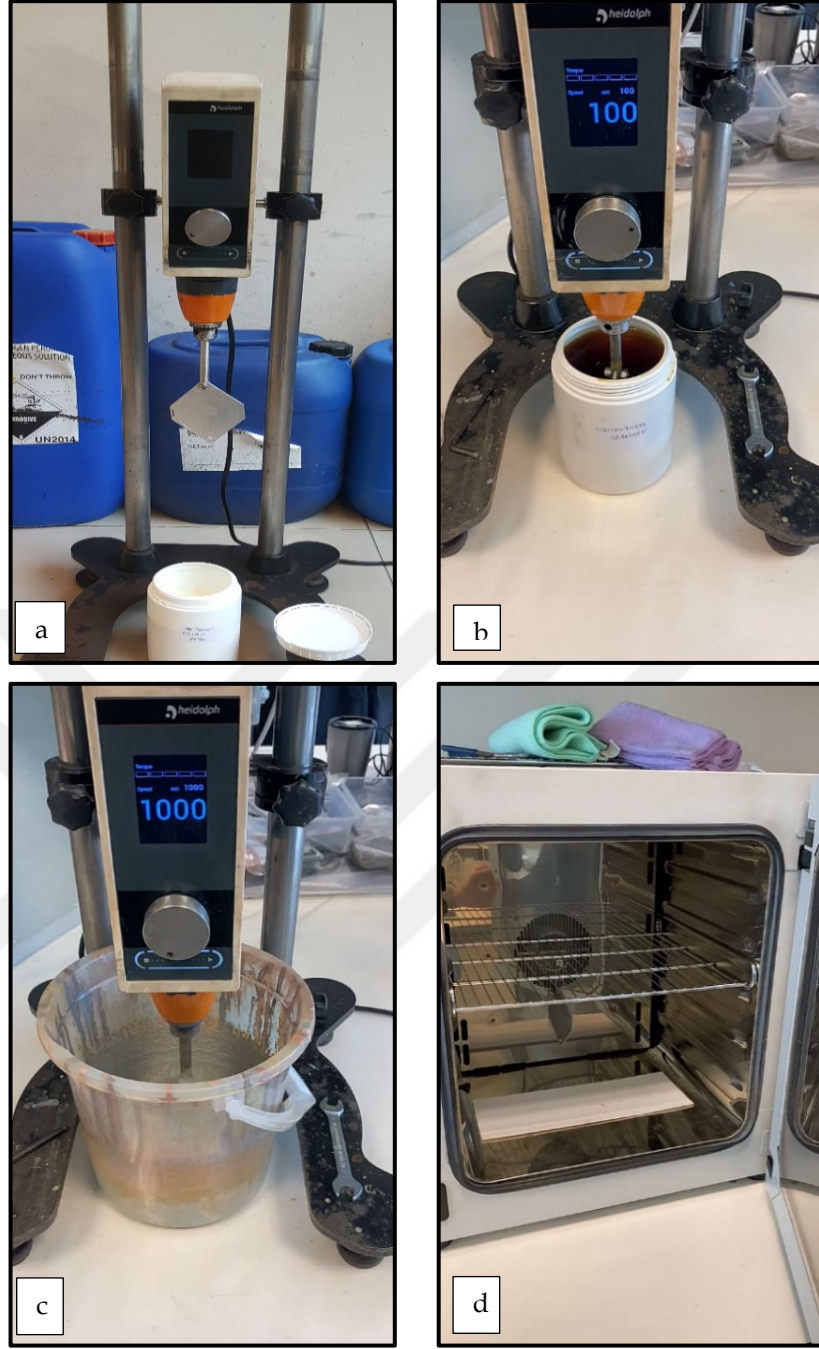
Kimyasal dönüşüm kaplamaları çelik gibi malzemelerin yüzeyi ile kaplamalar arasındaki geçiş katmanlarıdır. Bu katmanların amacı kaplamaların yüzeye daha rahat ve efektif şekilde yapışmalarına katkı sağlamaları, yüzeylerin korozyon ve aşınma direnci gibi özelliklerini geliştirmelerinden dolayı son yıllarda çokça tercih edilmektedir [90]-[94].

Bu çalışmada da çelik yüzey ile primer astar arasında daha iyi bir tutunma ve korozyon direncine katkı sağlaması amacıyla ticari bir kimyasal dönüşüm kaplaması (KDK) tercih edilmiştir (Henkel, Granodine) [95]. Gerçekleştirilen tüm kaplama uygulamaların da olduğu gibi bu çalışmada da numuneler kaplama öncesi üzerlerinde var olabilecek veya kirlenmelerine sebep olabilecek yağ toz kir gibi herhangi bir maddeden arındırılmak için etanol yardımı ile temizlenmişti ve kurutulmuştur. Gerçekleştirilen numune seçim sırasında yapılan uygulamalar ve galvanizleme işlemleri sırasında numune altlıklarının yüzeyleri pürüzsüz değildir. Bu sebeple her kaplama öncesi en düzgün yüzeye sahip altlık seçilerek kimyasal dönüşüm kaplaması gerçekleştirilmiştir.

Kimyasal dönüşüm kaplaması için en uygun uygulama şartları deneme yanılma yoluyla elde edilmiştir. Bu süreçte kaplanacak malzemelerin kimyasal dönüşüm kaplaması içerisinde dönme hızı ve süresi sabit tutulan parametrelerken kimyasal dönüşüm kaplamasının tiner ile seyreltilmesi ve uygulanan metodun tekrar sayısı değişmektedir. Seyreltme oranının %75 lik oranda ve tekrar sayısının 2 iken

kaplamanın en ideal sonucu verdiği saptanmış ve tüm numuneler bu bilgiler doğrultusunda kaplanmıştır.

Bu çalışmada kaplama yöntemi olarak; döndürme (spin) ve daldırma (dip) kaplama metotlarının bir arada uygulandığı sistem tasarlanmış ve kullanılmıştır. Kaplamayı gerçekleştirmek için devri kontrol edilebilir bir karıştırıcı tercih edilmiştir. Numuneler önceki kısımda aktarılan numune hazırlama koşullarından geçtikten sonra Şekil 2.4(a)'da gösterildiği gibi tasarlanmış olan çubuk ve cıvata yardımıyla karıştırıcıya sabitlenmiştir. Bu noktada dikkat edilmesi gereken iki husus bulunmaktadır. Birincisi sabitleme işleminin doğru yapılması ve bir kazaya sebebiyet vermemesi, ikincisi ise numune stabil bir dönme işlemi gerçekleştirmeli ki kaplama yüzeye en düzgün şekilde tutunabilsin. Ardından dikkatli bir şekilde numuneler kimyasal dönüşüm kaplaması ile dolu kaba yüzeyin tamamı kabın içinde olacak şekilde daldırılır.



Şekil 2.4: (a) Karıştırıcıya sabitlenmiş numune , (b) Kimyasal dönüşüm kaplaması yapılan numune, (c) Fazla kimyasal dönüşüm kaplamasının yüzeyden arındırılması, (d) Kaplanmış numunenin fırında kurutulması.

Daldırma işlemi tamamlandıktan sonra karıştırıcı 100 rpm olarak ayarlanır. Bu işlem Şekil 2.4(b)'de gösterildiği gibi bir dakika boyunca kabın içinde devam eder. Sonraki aşamada ise dikkatli bir şekilde karıştırıcıya bağlı olan numune dikkatli bir şekilde karıştırıcı ile beraber daldırma kabından çıkartılır ve altına boş bir kap konularak 1000 rpm devirde Şekil 2.4(c)'de görüldüğü gibi 1 dakika boyunca

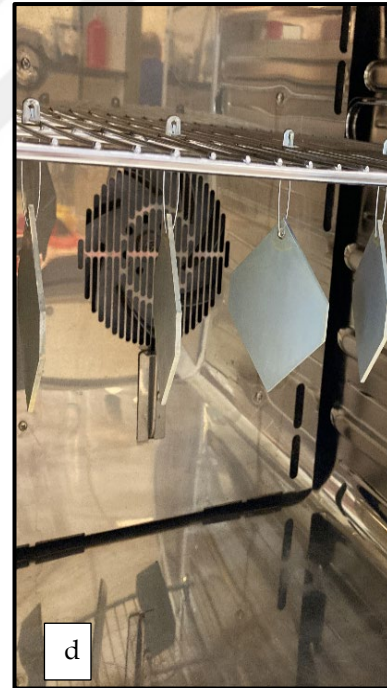
döndürülür. Bu uygulamanın amacı yüzeyde fazla bulunan kimyasal dönüşüm kaplamasının yüzeyden eşit bir şekilde arındırılması ve yüzeye yayılmasının sağlamaktır. Yukarıda bahsedildiği üzere bu kaplama ve sıyırma işlemi her numunede toplamda iki sefer uygulanmaktadır. Tüm kaplama işlemleri tamamlandıktan sonra tercih edilmiş olunan kaplama malzemesinin kullanım talimatları doğrultusunda 60 °C de 15 dakika boyunca Şekil 2.4 (d)'de görüldüğü gibi kurumaya bırakılır. Bu fırınlama işlemi sayesinde kaplamanın yüzeye daha iyi tutunduğu saptanmış ve tüm numunelerde bu işlem uygulanmıştır.

### **2.2.3. Katkılı ve Katkısız Primer Kaplama**

Kaplamaların yüzeye ve birbirlerine yapışma kabiliyetleri yüzeyin yapısına, tercih edilen kaplamaların birbirlerine olan uyumuna ve altlık olarak tercih edilen malzemeye bağlıdır. Primer astarlar kimyasal dönüşüm kaplamaları gibi sonraki katmanda tercih edilecek olan malzemenin yüzeye tutunma kabiliyetini arttırmayı amaçlamaktadır. Astarlar genel olarak düşük yoğunluğa sahip olmalarından dolayı altlık malzemenin yüzeyine kolay bir şekilde nüfus edebilirler. Bu tür kaplamaları uygularken dikkat edilmesi gereken önemli hususlardan bir tanesi kaplamanın kalınlığı olmalıdır [96]. Dikkat edilmediği takdirde çok katmanlı sistem içerisinde katmanların birbirine tutunma kabiliyetine zarar verebilir veya bu sorunun kaynağı olabilir.

Her kaplama öncesi olduğu gibi bu çalışmada da astar kaplama işleminden önce kimyasal dönüşüm kaplaması ile kaplanmış malzemenin üzerinde oluşabilecek kirler temizlenmiştir. Malzeme bir önceki aşamada kimyasal dönüşüm kaplaması ile kaplandığından dolayı yüzeyde oluşabilecek kirleri temizlemek için etanol gibi çözücü kimyasallar yerine saf su tercih edilmiştir. Saf su ile temizlenen malzeme basınçlı hava yardımıyla yüzeyde kalabilecek su damlacıklarından arındırılır ve kaplama için hazır duruma getirilmiştir.

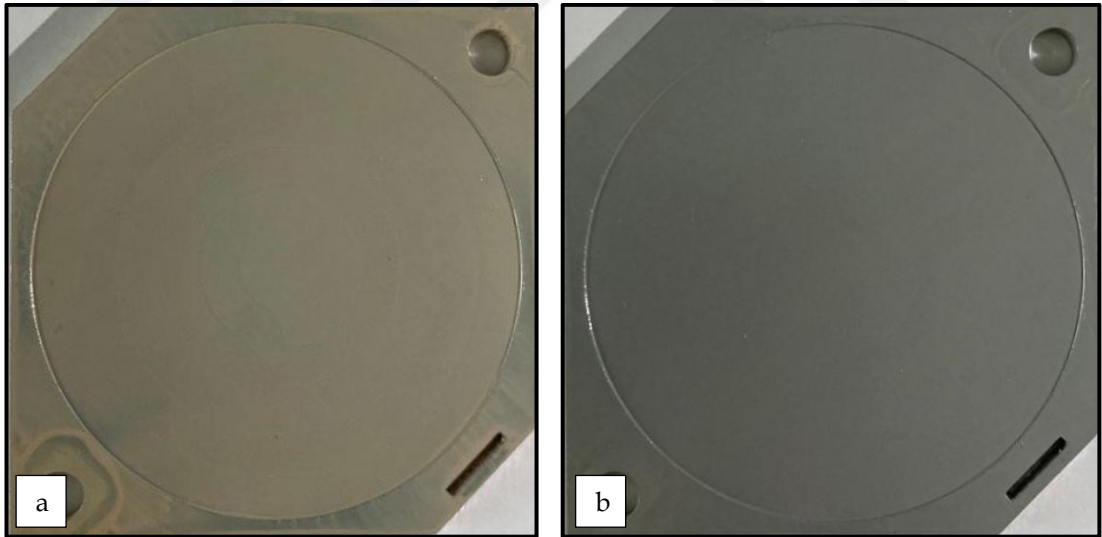
Primer astar kaplamada tercih edilen yöntem kimyasal dönüşüm kaplamasında tercih edilen yöntem ile aynıdır. Ancak çalışmanın bu kısmından sonra numune yüzeyleri grafen katkılı ve katkısız olarak ikiye ayrılacaktır. Katkılandırma işlemi devir ayarlı karıştırıcı ile gerçekleştirilmiştir. İki farklı üreticiden temin edilen indirgenmiş grafen oksitler %0,5 oranında primer astarların içerisine katkılandırılarak Şekil 2.5(a)'da görüldüğü gibi 250 rpm devir ile 24 saat karıştırıcı yardımıyla homojen bir şekilde dağıtılmıştır.



Şekil 2.5: (a) Grafenin astar içerisinde karıştırıcı yardımı ile dağıtılması, (b) Astar kaplama işlemi, (c) Fazla astarın yüzeyden arındırılması, (d) Kaplanan numunelerin fırında kurutulması.

İlerleyen aşamalarda astar kaplamalarda Grafen-1 olarak adlandırılan kaplama Hazerfen firmasından temin edilen indirgenmiş grafen oksit ile hazırlanırken, Grafen-2 olarak adlandırılan kaplama ise Nanografi firmasından temin edilen indirgenmiş grafen oksit kullanılarak hazırlanmıştır [101],[102]. Sonraki aşamada numuneler bağlantı noktalarından çubuğa dikkatli ve daha önce kimyasal dönüşüm kaplaması kısmında aktarıldığı gibi devri kontrol edilebilir karıştırıcıya bağlanır. Malzeme derin bir kap içerisinde bulunan primer astar kaplamasının içerisine daldırıldı ve 100 rpm devirde 1 dakika boyunca Şekil 2.5(b)'de görüldüğü gibi kaplandı.

1 dakika dolduktan sonra malzeme dikkatli bir şekilde kaptan çıkarılarak içi boş bir kabın içerisine konularak 1000 rpm devirde 1 dakika boyunca Şekil 2.5(c)'de görüldüğü gibi döndürülür. Bu sayede kaplamanın malzemenin yüzeyine düzgün yayılması ve fazla kaplamadan kurtulması sağlanır. Bu işlem toplamda her numune için 2 kere tekrar edilmiştir. Kimyasal dönüşüm kaplaması aşamasında olduğu gibi kaplanan numuneler 60 °C de 15 dakika boyunca Şekil 2.5 (d)'de görüldüğü gibi kurumaya bırakılır. Kaplanmış numuneler Şekil 2.6(a) ve 2.6(b)'de görülmektedir.



Şekil 2.6: (a) Grafensiz astar ile kaplanmış numune, (b) Grafen katkılı astar ile kaplanmış numune.

## 2.2.4. Katkılı ve Katkısız PA12 Kaplama

Bu aşamaya kadar gerçekleştirilen işlemleri kısaca özetlemek gerekirse; Plakalar ilk olarak gerçekleştirilecek testler ve kaplama yöntemleri göz edilerek hazırlanmıştır. Ardından elektro galvanizleme metodu ile çinko kaplanmıştır ve krom pasivizasyon işlemine tabi tutulmuştur. Sonraki adımda gerekli temizleme işlemlerine tabi tutulan numuneler daldırma döndürme yöntemi ile önce kimyasal dönüşüm kaplaması ile sonra grafenli ve grafensiz olmak üzere astar ile kaplanmıştır. Bu sayede tüm numuneler çok katmanlı bir şekilde gerçekleştireceğimiz kaplamamızın son aşaması olan PA12 katmanı için hazırlanmıştır.

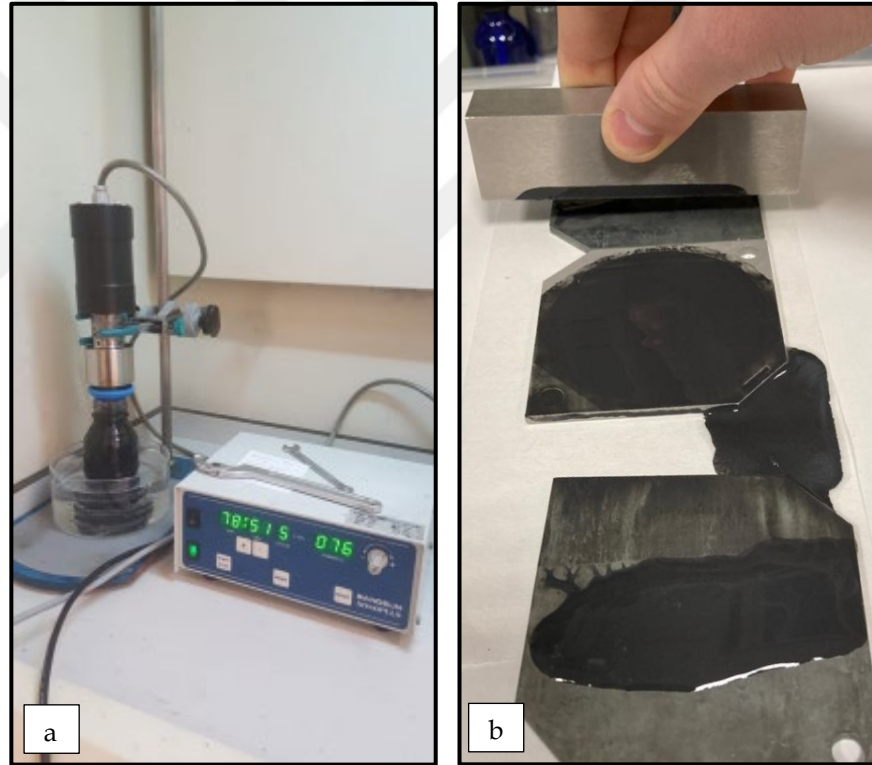
Son katman kaplamaları grafenli ve grafensiz naylon olarak farklı dispersiyon oranlarında hazırlandı. Aynı zamanda dispersiyonlar hazırlanırken saf su, naylon ve katkılandırma malzemesi olan indirgenmiş grafen oksit kullanıldı. Dispersiyon oranları katkılandırılmamış PA12 da %0,5 olarak tercih edilmiştir.

Tüm dispersiyonlar PA12/saf su oranı %20 olarak hazırlanmıştır. Ancak çalışmanın amacı doğrultusunda grafenin farklı katkılandırma oranlarının kaplama performansına nasıl etki edeceğini incelemek için %0,25, %0,5, %0,75 ve %1 olmak üzere 4 farklı oranda Şekil 2.7'de görülen dispersiyonlar hazırlanmıştır.



Şekil 2.7: Grafen katkı PA12 dispersiyonları.

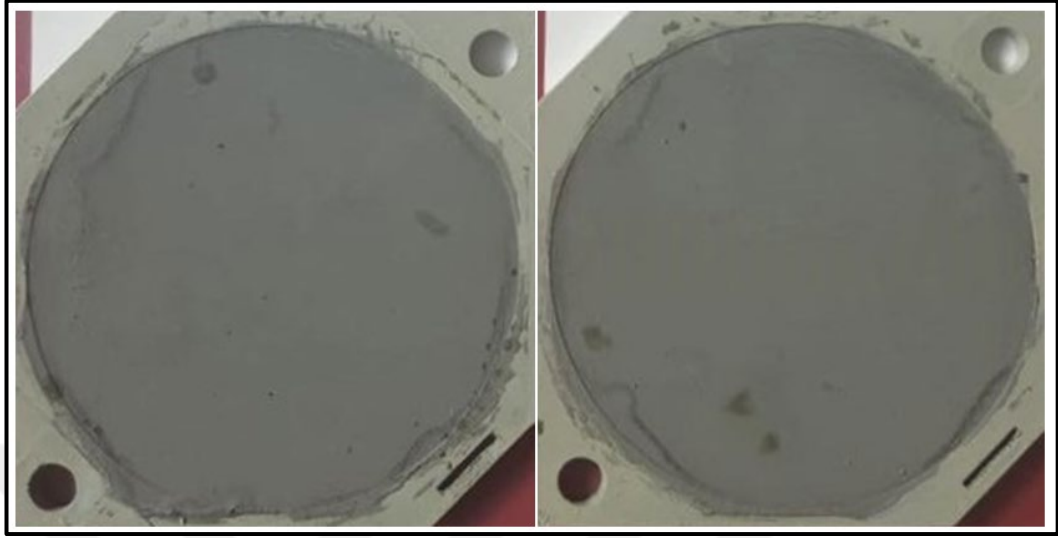
Hazırlanan katkılı ve katkısız tüm dispersiyonlar önce 24 saat Şekilde 2.8(a)'da görülen ultrasonik tip yardımı ile karıştırılmış ve kaplama işleminden önce 6 saat ultrasonik banyoda muamele edilmiştir. Tüm hazırlık sürecini tamamlayan numuneler yüksekliği ayarlanabilir düz tezgah üzerine konularak kaplama işlemine başlanır. Kaplama işlemi hazırlanan dispersiyonların numunelerin yüzeyinde bulunan girintiye Pastör pipeti yardımı ile damlatılması ile gerçekleştirilir. 3 saat geçtikten sonra çelik bir master yardımı ile fazla olan dispersiyon Şekil 2.8(b)'de görüldüğü gibi dikkatli bir şekilde yüzeyden alınır. Bu işlemin amacı dispersiyon içerisinde bulunan PA12 ve indirgenmiş grafen oksidin numune yüzeyine çökmesidir. Sonraki adım fazlası alınan kaplama dispersiyonunun oda sıcaklığında içerisindeki saf sudan arındırılmasıdır. Bu buharlaşma süresi ortalama 2 ila 3 saat arasında sürmektedir.



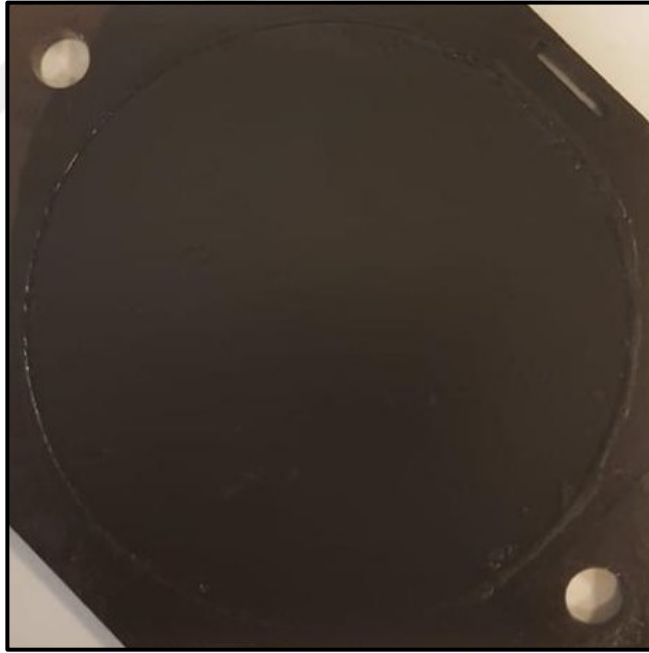
Şekil 2.8: (a) Ultrasonik tip ile dispersiyonların muamele edilmesi, (b) Master yardımı ile fazla dispersiyonun yüzeyden arındırılması.

Şekil 2.9'de görülen ve buharlaşma sürecini tamamlamış numuneler dakikada 1°C artış ile 20°C'den 250°C'ye 300 dakika(5 saat) sürecek şekilde fırınlanmıştır. Katkılı ve katkısız PA12 kaplaması kimyasal dönüşüm ve primer astar kaplama süreçlerinde olduğu gibi 2 kere uygulanmıştır. 2 kere uygulanmasının amacı ise 1.kat uygulamada oluşabilecek yüzey kusurlarının 2.kat uygulaması ile ortadan kaldırılması

ve daha dűzgűn bir yűzey elde etme arzusudur. Tűm kaplama aűamalarını tamamlamıű numune rneęi Őekil 2.10’da grűlmektedir.



Şekil 2.9: PA12 kaplama işlemi yapılmış ve kurutulmuş numune rnekleri.



Şekil 2.10: Son katman kaplama işlemi yapılmış numune rneği.

## 3. GERÇEKLEŞTİRİLEN ANALİZ VE TESTLER

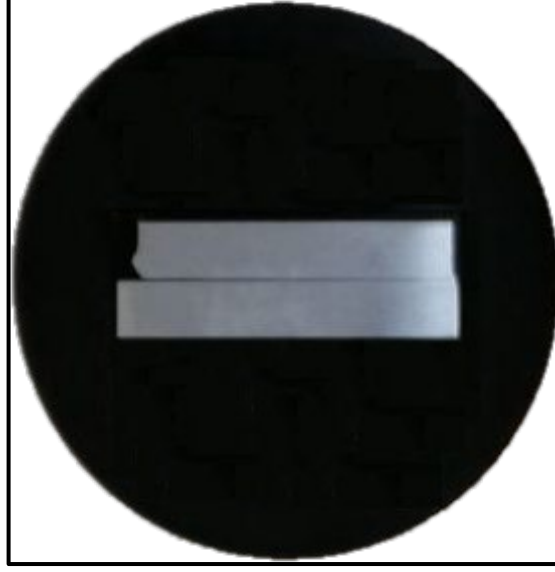
### 3.1. Mikro Yapı Analizi

Üretim aşamalarının tamamını başarılı bir şekilde tamamlamış çok katmanlı kompozit kaplamanın katman kalınlıkları ve yüzeyin yapısını incelemek için Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) analizine başvurulmuştur. SEM analizleri Philips XL 30 SFEG ile gerçekleştirilmiştir. Hazırlanan numunelerin çok katmanlı kaplama sistemi Şekil 3.1’de görölmektedir.



Şekil 3.1: Numune kaplama katmanları.

SEM analizleri sayesinde numunelerin hazırlanmasında tercih edilen kaplama metotları ile birlikte katmanların yüzey kalınlıklarının kontrol edilebilirliği ve iç yapıları gözlemlenecektir. Numuneler SEM analizine hazırlanmak için ilk olarak hassas kesici ile kesilmektedir. Kesilen numuneler 180 °C’de 6 dakika ısıtma 6 dakika soğutmayla numune hazırlama makinesinde (Struers Labopress3) bakalit reçineye gömülmüştür. Bakalite gömülen numuneler 80-1200 kum zımpara ile ıslak ortamda zımparalanmıştır. SEM numunesi parlatılmak için alüminyum oksit ile parlatma çuhası kullanılarak Şekil 3.2’ de görölen son haline getirilmiştir.

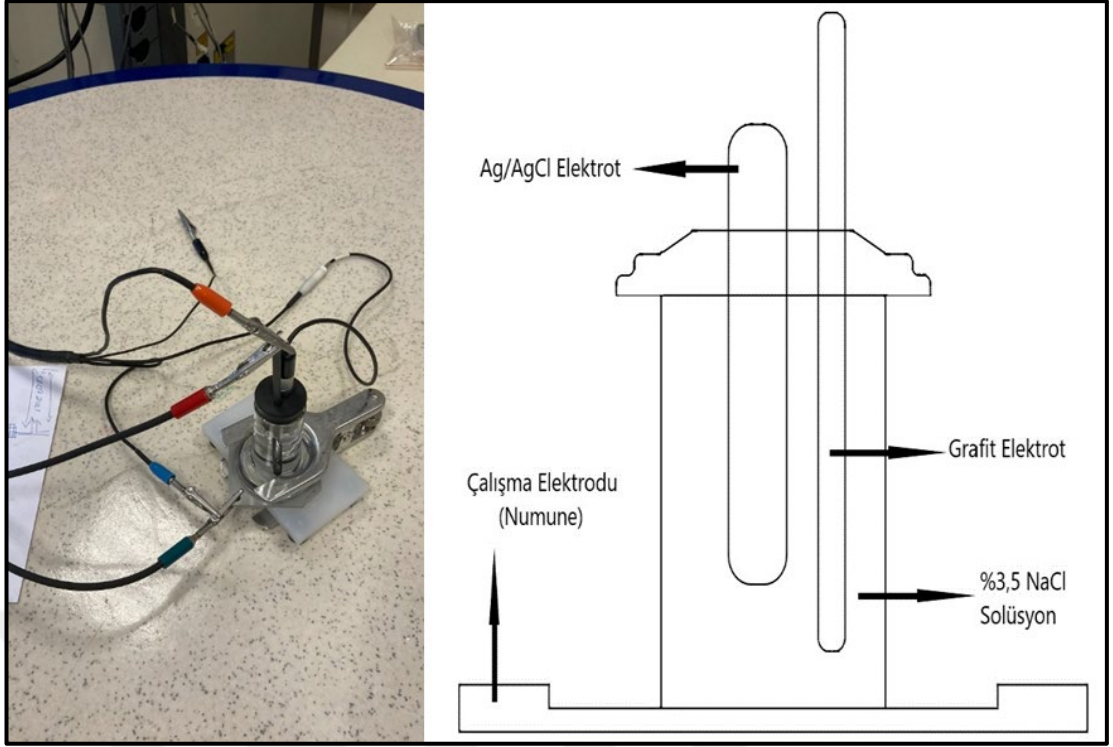


Şekil 3.2: SEM numunesi örneği.

### 3.2. Korozyon Testi

Korozyon hızını ölçebilmek için potansiyodinamik polarizasyon yöntemi tercih edildi (Gamry Interface 5000 E). Şekil 3.3'te görülen üç bölmeli bir hücrede içerisinde %3.5 NaCl bulunan, karşı elektrot olarak grafit çubuk, referans elektrotu olarak Ag/AgCl çubuk ve çalışma elektrotu olarak da tüm üretim aşamalarını tamamlamış düşük karbonlu çelik numuneler tercih edilmiştir. Potansiyodinamik testler sadece astar katmanında gerçekleştirilmiştir. Astar katmanında grafen katkısız ve 5/1000 oranında olmak üzere 2 farklı üreticiden temin edilen grafenler ile hazırlanan astar kullanılmıştır.

Toplamda her karışımdan 2 tane olmak üzere 6 numunenin testi gerçekleştirilmiş. Elde edilen sonuçlar katkısız ve katkılı olarak ayrı ayrı ölçülmüş olup kendi içlerinde ve birbirileriyle kıyaslanmıştır. Tüm korozyon testleri aynı ortam sıcaklığında ve her numune için önce açık devre potansiyeli tespit edilmiş olup ardından potansiyodinamik testi gerçekleştirilmiştir. Bu durum test edilmiş ve sonuçlarda sapmalar olduğu tespit edilmiştir.

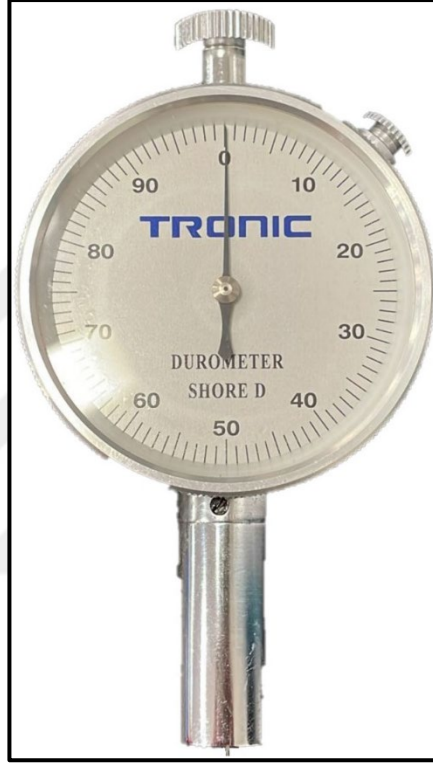


Şekil 3.3: Korozyon testi hücresi.

Elektrokimyasal yöntemler ağırlık kaybı ile korozyon hızı ölçme yöntemlerine göre daha uygulanabilir olmasından dolayı bu çalışmada açık devre potansiyeli ve tafel ekstrapolasyonu tercih edilmiştir. Açık devre potansiyeli, korozyon sistemine herhangi bir akım uygulanmadan sistemin kendi dengesini bulmasıdır [97]. Her numune için ayrı ayrı ölçülen açık devre potansiyelinin ardından katodik ve anodik potansiyodinamik eğri için cihaz  $\pm 250$  mV tarama aralığında 0.1 mV/s tarama hızına ayarlanılarak ölçümler gerçekleştirilmiştir. Testler sonucunda elde edilen eğriler üzerinde tafel ekstrapolasyonu yöntemi kullanılarak sistemin korozyon potansiyeli ve korozyon akımı elde edilir. Ardından korozyon hızı Gamry Echem Analyst programı ile korozyon potansiyeli ve korozyon akımı kullanılarak hesaplanmıştır.

### 3.3. Sertlik Testi (Shore D)

Literatürde karşılaşılan çalışmalardan sonra Şekil 3.4’te görülen Shore D metre ile üretim aşamalarını tamamlamış numunelerin sertlik ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Diğer adı ile Durometre sertlik testi, polimer, elastomer veya benzer yapıdaki malzemelerin sertlik değerlerini ölçmede kullanılmaktadır [98].

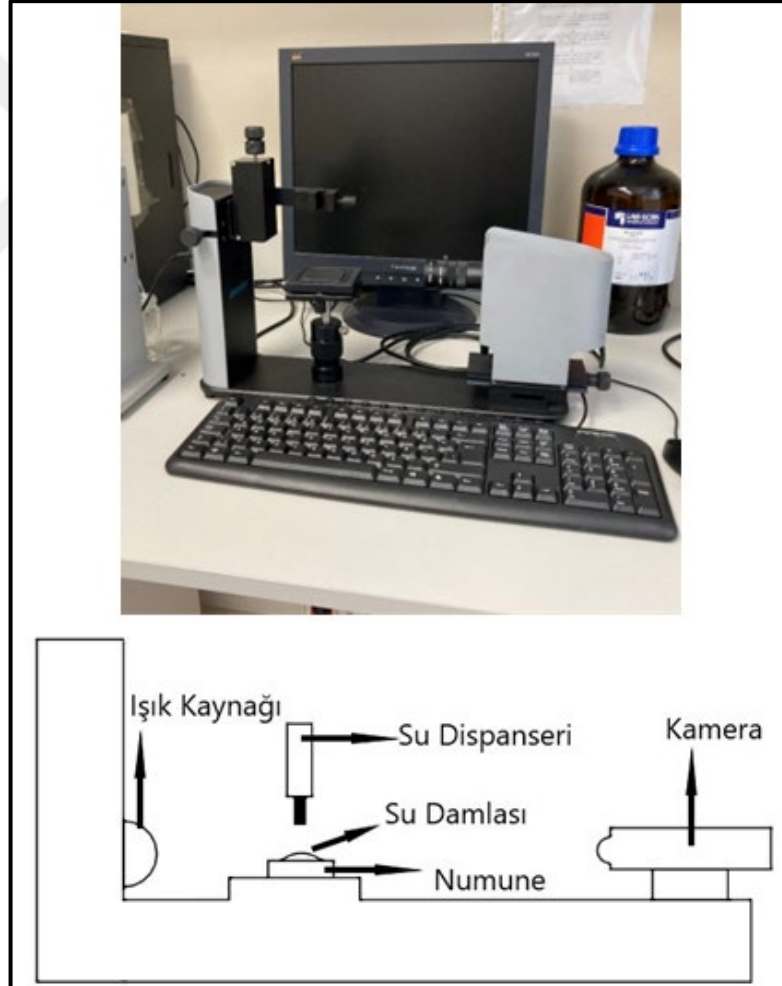


Şekil 3.4: Shoremetre (Durometre) sertlik ölçüm cihazı.

Bu çalışmada gerçekleştirilen çok katmanlı kaplama sisteminin son 2 katmanı PA12’den oluşmaktadır. Numune yüzeyleri sertlik testleri sırasında elastik bir davranış sergilemiştir. Bu sebeple testler Shore D cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Test sırasında cihazın yüzeyde oluşturduğu izin çapı ve derinliği test için tercih edilen analog veya dijital Shore metrenin göstergesinden okunur ve ölçümü gerçekleştirilen malzemenin sertlik değeri saptanmış olur. Gerçekleştirilen tüm testlerin sonuçları kendi içlerinde ve birbirleriyle kıyaslanmıştır.

### 3.4. Temas Açısı Testi

Katı malzemenin yüzeyine temas eden sıvı ile bu yüzey arasında temas açısı adı verilen bir açı oluşmaktadır. Bu açı test sırasında tercih edilen sıvının kohezyon kuvvetine ve yüzey ile sıvı arasındaki adezyon kuvvetine bağlıdır. Bu ölçülen açının değerine göre malzeme yüzeyinin hidrofobik veya hidrofilik olup olmadığı ile ilgili sonuca varılmaktadır. Yukarıda bahsedilen adezyon ve kohezyon kuvvetlerinin büyüklükleri bu malzemenin suya karşı gösterdiği davranışı açıklamaktadır. Eğer adezyon kuvveti kohezyon kuvvetinden büyük olursa yüzey ıslanır. Aksi olursa yani kohezyon kuvveti adezyon kuvvetinden büyük olursa tercih edilen sıvı dağılmadan yüzeyde durur.



Şekil 3.5: Temas açısı ölçüm cihazı.

Bu çalışmada temas açısı testleri Şekil 3.5'te görülen cihaz kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Üretim aşamalarının hepsini tamamlamış numunelerin temas açılarının ölçümü için tüm numuneler hassas kesici yardımı ile kesilmiştir. Bu işlemin amacı tercih edilen altlık malzemenin yüzeyinde bulunan son katman olan PA12 dispersiyonlarının yüzeye rahat kaplana bilmesi için gerçekleştirilen oyuğun temas açısı testine engel olacak olmasıdır. Kesim işlemleri tamamlanmış numunelerden doğru bir sonuç elde etmek için her numuneden rastgele 3 farklı nokta tercih edilerek bu ölçülen değerlerin ortalaması o numunenin temas açısı olarak kabul edilmiştir. Tüm sonuçlar, numuneleri kendi içlerinde ve birbirileriyle kıyaslamakta kullanılmıştır.

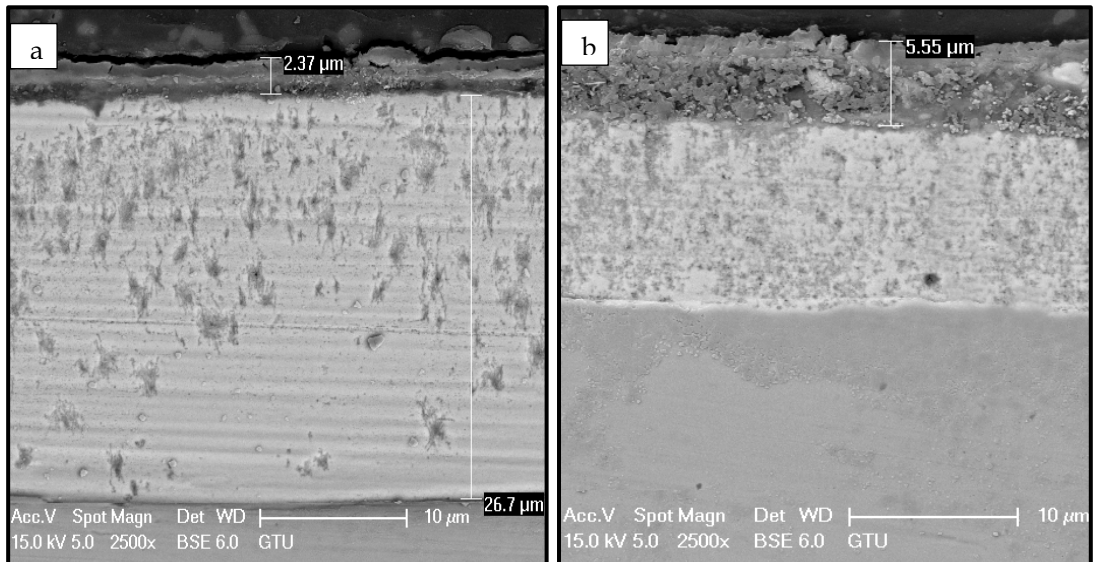


## 4. ANALİZ VE TEST SONUÇLARI

### 4.1. Mikro Yapı Analiz Sonuçları

Çalışma kapsamında gerçekleştirilen çok katmanlı kaplama sisteminin başlıca hedeflerinden bir tanesi de katman kalınlıklarının kontrol edilebilir olup malzemenin fiziksel ve kimyasal özelliklerine katkı sağlamasıdır. Bu doğrultuda uygulanan yöntemlerle birlikte galvaniz kaplama, krom pasivizasyon katmanı, kimyasal dönüşüm katmanı, primer astar katmanı ve PA12 katmanı çelik alt yüzeye katman kalınlıkları kontrol edilebilir bir şekilde uygulanmıştır.

Gerçekleştirilen kaplamaların deney ve analiz sonuçları aşağıdaki gibidir. Galvaniz kaplama sonrası sırası ile gerçekleştirilen kimyasal dönüşüm kaplaması ve primer astar katmanları arasında yapılan SEM analizleri neticesinde difüzyon gerçekleştiği saptanmıştır. Gerçekleştirilen astar kaplaması numune üretim aşamasında aktarıldığı üzere 2 kere uygulanmıştır ve Grafen-1 katkılı astar tabakasının ortalama kaplama kalınlığı  $\pm 2,2 \mu\text{m}$  hesaplanmıştır. Grafen-2 katkılı hazırlanan primer astar ile gerçekleştirilen kaplamanın ortalama kalınlığı ise  $\pm 5,1 \mu\text{m}$  olarak ölçülmüştür. Ölçümler şekil 4.1(a) ve 4.1(b)'de paylaşılmaktadır.



Şekil 4.1: (a) Grafen-1 ile gerçekleştirilen kaplamanın SEM analizi,  
(b) Grafen-2 ile gerçekleştirilen kaplamanın SEM analizi.

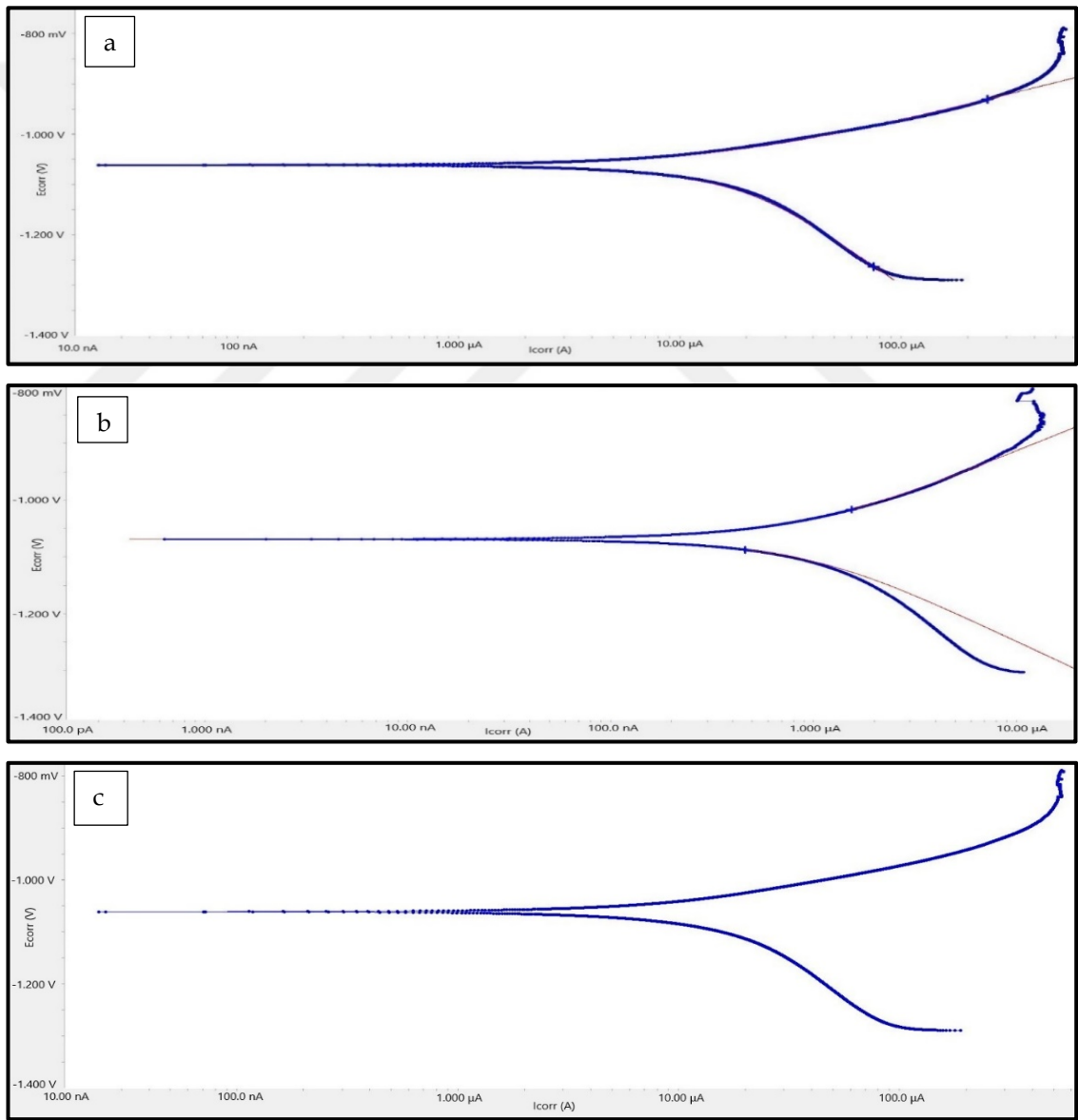
Çok katmanlı gerçekleştirilen kaplamanın son katmanı olan PA12 katmanı da numune üretim aşamalarında aktarıldığı üzere hazırlanan dispersiyon pastör pipeti yardımı ile malzemenin üzerinde bulunan girintiye damlatılmıştır. Bu işlem daha önce aktarıldığı üzere 2 kere gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen SEM analizleri neticesinde ortalama son katman kalınlığının 87 µm olduğu ölçülmüştür [81]. Bu analizler sonucunda ikinci katmanın ortalama kalınlığı ise 30,4 µm olarak ölçülmüş ve 4 farklı numunede gerçekleştirilen analizler neticesinde ikinci katman kalınlığı ise  $\pm 2$  µm olarak ölçülmüştür. Bu sonuçlardan yola çıkarak tercih edilen kaplama metodları sayesinde hazırlanan kaplamanın katman kalınlıklarının oldukça kontrol edilebilir bir şekilde uygulandığı söylenebilmektedir.

## 4.2. Korozyon Testi Sonuçları

Bu çalışmada gerçekleştirilen çok katmanlı kaplama sisteminin başlıca amaçlarında biri de katman kalınlıklarının kontrol altında tutulabilmesidir. Bu doğrultuda gerçekleştirilen numune üretim aşamalarında bu amaç başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın bir diğer amacı ise çok katmanlı sistemde farklı katmanlara katılan indirgenmiş grafen oksidin bu katmanlarda nasıl etkiler gösterdiğini incelemektir. Aktürk gerçekleştirdiği çalışmada grafen katkılı ve katkısız astar kaplamaları birbiriyle kıyaslamıştır [81]. Gerçekleştirilen o çalışmaya ek olarak numuneler hem farklı bir üreticiden temin edilen grafen katkılı hazırlanan astar ile hem de son katmanda 4 farklı dispersiyon oranında hazırlanan kaplamalar ile kaplanmıştır. Grafenin primer astar katmanında ve son katman olan PA12 katmanında katkılanması başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Potansiyodinamik testler astar katmanında başarılı bir şekilde uygulanmıştır. Yapılan testler neticesinde astar katmanında gerçekleştirilen indirgenmiş grafen oksit katkılanmasının ciddi seviyede korozyon dayanımına katkı sağladığı gözlemlenmiştir.

Numunelerin korozyon dayanımları korozyon testi kısmında aktarıldığı gibi Gamry Interface 5000 E cihazı ile gerçekleştirilmiş ve potansiyodinamik testlerde tafel metodu kullanılmıştır. Şekil 4.2’de görülen eğrilerde Ecorr ve Icorr değerleri bulunmaktadır. Bu iki değer sırasıyla korozyon potansiyeli ve korozyon akımı anlamına gelmektedir. Şekil 4.2’de görülen eğriler sırasıyla Grafensiz astarın, Grafen-1’li astarın ve Grafen-2’li astarın Tafel eğrileridir. Bu eğriler gerçekleştirilen testlerden elde edilen sonuçların genel olarak yorumlanması için kullanılmaktadır.

Eğrilerden anlaşıldığı üzere grafen katkılandırılmış astar kaplama eğrisinde  $I_{corr}$  azalırken  $E_{corr}$  artmaktadır. Yani grafen katkılandırılmış astar kaplamanın korozyon potansiyeli katkılandırılmamış astardan daha yüksektir. Bu sonuçlardan yola çıkarak astar katmanında grafen katkılandırma işleminin bu kaplama sisteminde tercih edilen altlık olan çelik yüzeyin korozyon dayanımına ciddi miktarda katkı sağladığı görülmüştür. Tablo 4.1’de gerçekleştirilen testlerin korozyon dayanımları paylaşılmaktadır. Grafen-1 ile hazırlanan astar grafensiz halinden 15 kat daha iyi bir korozyon dayanımı sağlarken, Grafen-2 ile hazırlanan astardan ise 1.5 kat daha iyi bir korozyon dayanımı sağlamaktadır.



Şekil 4.2: (a) Grafensiz astar tafel eğrisi, (b) Grafen-1 katkılı astar tafel eğrisi, (c) Grafen-2 katkılı astar tafel eğrisi.

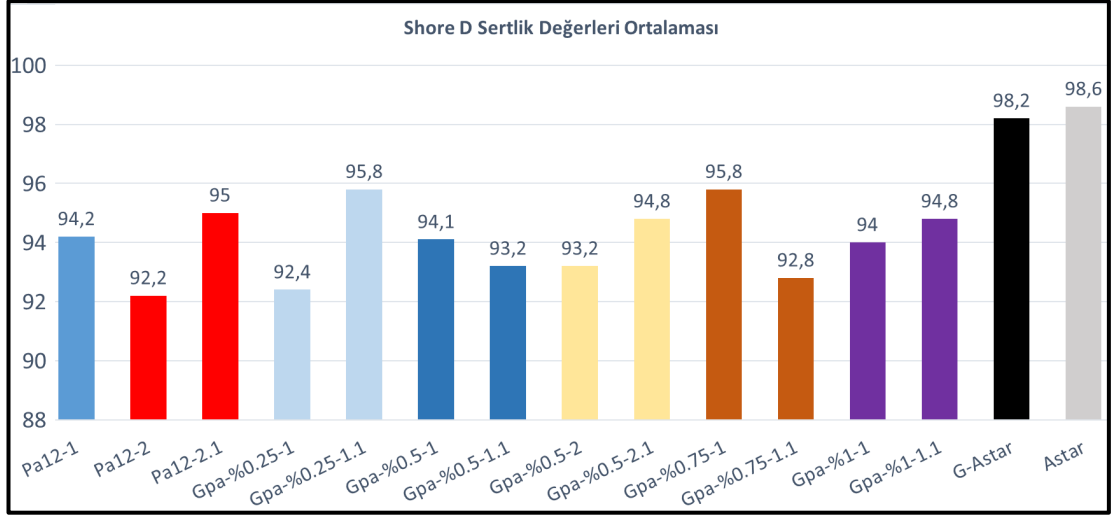
Tablo 4.1: Numunelerin ortalama korozyon değerleri.

Numune Adı	Ortalama Yıllık Korozyon Değeri
Grafensiz Astar Kaplama	$12,590 \times 10^{-3}$ mm/yıl
Grafenli Astar Kaplama (Grafen-1)	$819,60 \times 10^{-6}$ mm/yıl
Grafenli Astar Kaplama (Grafen-2)	$1,3500 \times 10^{-3}$ mm/yıl
Grafenli Astar Kaplama	$1,6608 \times 10^{-3}$ mm/yıl

Aynı zamanda Aktürk'ün çalışmasını aktardığı sonuçlar ile bu çalışmada elde edilen sonuçlar, tercih edilen kaplama sisteminin tutarlı sonuçlar verdiğini göstermektedir ve Aktürk'ün sonuçları Tablo 4.1'de Grafenli Astar Kaplama olarak gösterilmektedir [81].

### 4.3. Sertlik Testi Sonuçları

Gerçekleştirilen çok katmanlı kaplama sisteminin daha önce aktarıldığı üzere son katmanı bir polimer türevi olan PA12'den oluşmaktadır. Bu katmanda numune üretim aşamalarında aktarıldığı üzere grafen katkılandırma oranı %0.25, %0.5, %0.75, %1 ve grafen katkılandırılmamış numuneler için ise sadece %0.5 olmak üzere kaplama dispersiyonları hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler üzerinde grafenin katkılandırılması ve katkılandırma oranının fiziksel özellik olan yüzey sertliğine etkisinin nasıl olduğunu incelemek için Shore-D sertlik testi uygulanmıştır. Şekil 4.3'te görüldüğü gibi PA12 katmanı astar katmanından sonra yüzeyin sertlik değerini kendisinin bir polimer türevi olmasından dolayı azaltmıştır. En yüksek sertlik değeri 95.8 ile Gpa %0.25 ve Gpa %0.75 oranında grafen katkılanan dispersiyon ile kaplanan numunelerde elde edilirken en düşük sertlik değeri ise grafen katkılandırılmadan hazırlanan dispersiyon ile kaplanmış olan numunede 92.2 olarak ölçülmüştür. Sertlik testleri sonunda elde edilen değerler göz önünde bulundurulduğu takdirde numuneler üzerine uygulanan çok katmanlı kaplama sisteminin sertlik değerlerinin, kaplamanın karşılaşılabileceği dış etkenlere (taş ve çakıl çarpması, çamur sıçraması vb.) karşı yeterli bir koruma sağlayacağı yönündedir.



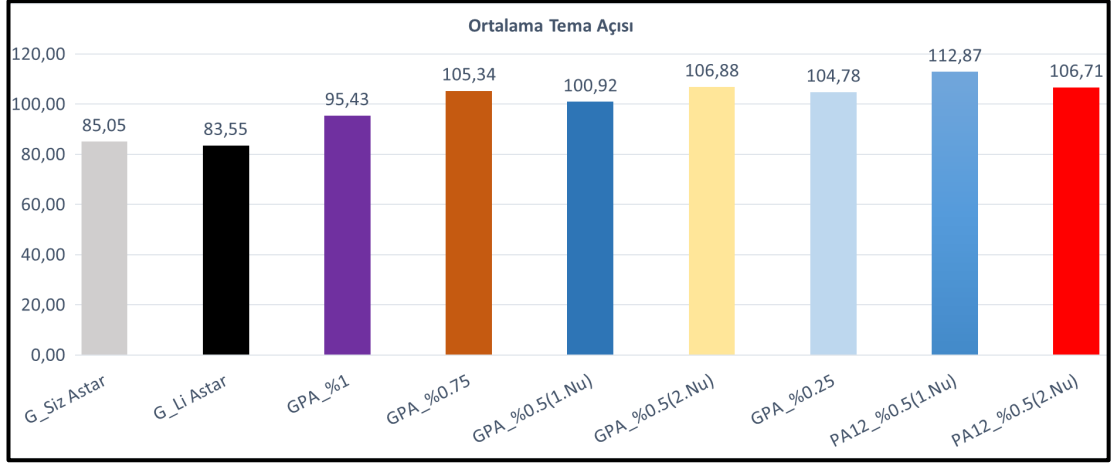
Şekil 4.3: Shore D sertlik değerleri ortalaması.

Aynı zamanda Şekil 4.3'te bulunan aynı renkte gösterilen bazı numunelerde iki farklı ölçüm değeri bulunmaktadır. Bu durumun sebebi temas açısı testleri için kesilen numunelerin iki parçaya ayrılması ve bu numunelerin kodlanarak üzerlerinde yapılan testlerin sonuçlarını tanımlamaktadır. Bu numuneler örneğin sarı renkli numunelerde görüldüğü üzere Gpa %0.5-2 ve Gpa %0.5-2.1 olarak tanımlanmaktadır.

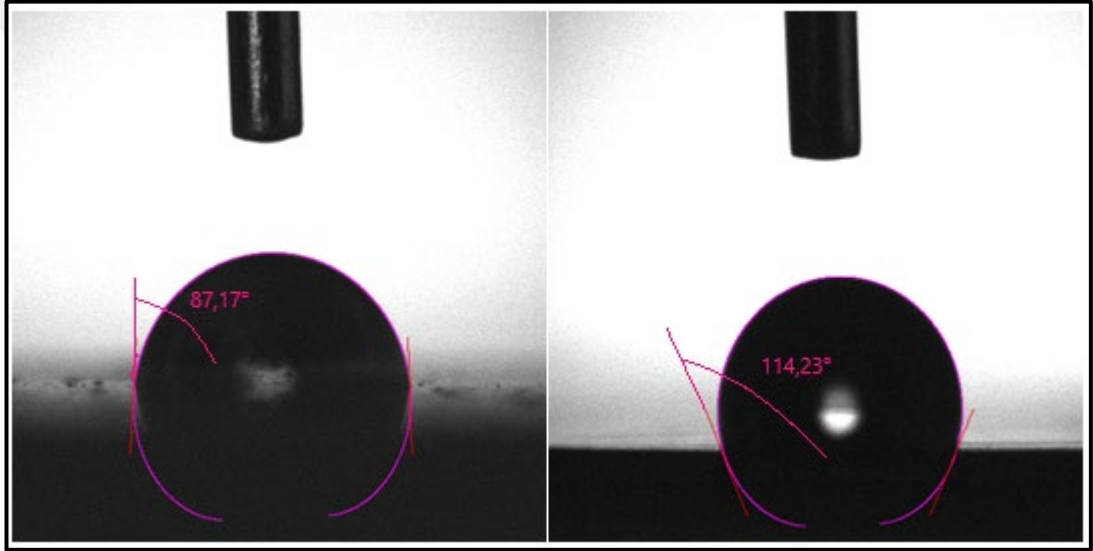
#### 4.4. Temas Açısı Testi Sonuçları

Üretim aşamalarını başarılı bir şekilde tamamlamış numunelerin nem ve suya karşı davranışlarını incelemek için temas açısı testleri gerçekleştirilmiştir. Bu doğrultuda %0,25, %0,5, %0,75 ve %1 oranında grafen katkılandırılmış PA12 son katman kaplaması ve katkılandırılmamış PA12 kaplamalı numuneler hazırlanmıştır. Grafen katkılandırma işleminin ve katkılandırma oranının sonuçları nasıl etkilediği gözlemlenmiştir.

Aşağıda verilen Şekil 4.4'te numunelerin temas açılarının ortalaması bulunmaktadır. Gerçekleştirilen testlerin neticesinde en düşük temas açısı grafen katkılı astar katmanında  $86,3^\circ$  açı iken en yüksek açı ise PA12 ile kaplanmış numunede  $112,8^\circ$  açı olarak ölçülmüştür. Aynı zamanda farklı katkılandırma oranlarının etkisi de incelendiği takdirde en yüksek sonucu %0.5 grafen katkılanarak hazırlanan numune  $106,88^\circ$  ölçülürken ona en yakın sonuç ise %0.75 oranında katkılandırılarak hazırlanan numunede  $105,34^\circ$  olarak ölçülmüştür. Bu ölçümler Şekil 4.5'te gösterilmektedir.



Şekil 4.4: Ortalama temas açısı değerleri.



Şekil 4.5: Temas açısı ölçümleri.

## 5. SONUÇLAR VE GELECEK ÇALIŞMALAR

Bu tez çalışmasında çelik yüzey üzerinde daldırma ve döndürme yöntemlerinin bir uyum içerisinde kullanılması ile düzgün bir şekilde çok katmanlı kompozit kaplama gerçekleştirilmiştir. Geliştirilen yöntemin kolay uygulanabilir olması ve kaplamayı katman kalınlıklarının kontrol edilebilmesine imkan sağlamasından dolayı gelecekte birçok çalışmada bu yöntemin kullanılabilirliğini doğrulamaktadır. Yapılan çalışmada aşağıdaki temel sonuçlar elde edilmiştir:

Hazırlanan numuneler üzerinde gerçekleştirilen elektrokimyasal testler astar katmanının %3,5'lük NaCl çözeltisi içerisinde gerçekleştirilmiş olup korozyon dayanımını 15 kata kadar arttırdığı tespit edilmiştir. Numuneler üzerinde gerçekleştirilen Shore D testleri neticesinde numune yüzeylerinin sertliklerinin önemli derecede değişmediği tespit edilmiştir. Son test olan temas açısı testlerinde katkılandırma işlemi astar katmanına göre %27 arttırırken, naylon katmanları kendi arasında kıyaslandığı zaman en iyi sonucu %0,5 oranında katkılandırılan kaplamada ortalama 106,88° ölçülmüş ancak tüm kaplamalar kıyaslandığı takdirde katkılandırma işleminin maksimum %18 oranında temas açısını azalttığı görülmüştür.

Grafen türevi olan indirgenmiş grafen oksit katkılandırılarak gerçekleştirilen kompozit kaplama çalışmamızın astar katmanında korozyon dayanımına katkı sağladığı, sertlik değerine ciddi miktarda olumlu veya olumsuz etki etmediği ve temas açısını ise düşürdüğü gözlemlenmiştir.

Elde edilen sonuçlar doğrultusunda indirgenmiş grafen oksit katkısının astar katmanında eklenmesinin son katman olan PA12 katmanından daha olumlu olacağı anlaşılmaktadır. Gelecekte aşağıdaki çalışmaların yapılmasının çok katmanlı kaplama sistemlerinde grafen ve türevlerinin katkılandırılmasının rolünün doğru bir şekilde yorumlanmasına faydalı olacaktır:

- İncelenen katkılandırma katmanının dışında kalan diğer katmanlarda grafen katkılandırmanın etkilerinin incelenmesi,
- Farklı katkılandırma oranlarının performans haritalarının çıkartılması,
- Grafen katkılandırmanın çok katmanlı kaplama sisteminde katmanlar arası tutunma kabiliyetine etkisinin belirlenmesi,

- Grafen katkılı kaplamaların değişken yükler altında kaplamanın yorulma davranışlarına etkisinin belirlenmesi,
- Grafen katkısının kaplamanın yaşlanma performansına etkisinin araştırılması.



## KAYNAKLAR

- [1] Novoselov K. S., Fal'ko V. I., Colombo L., Gellert P. R., Schwab M. G., Kim K., (2012), "A roadmap for graphene", *Nature*, 490(7419), 192–200.
- [2] Li D., Kaner R. B., (2008), *Materials science: "Graphene-based materials"*, *Science*, 320(5880), 1170–1171.
- [3] Geim A. K., (2009), "Graphene: Status and Prospects", 324(5934), 1530–1534.
- [4] Potts J. R., Dreyer D. R., Bielawski C. W., Ruoff R. S., (2011), "Graphene-based polymer nanocomposites", *Polymer* 52(1), 5–25.
- [5] Wang J., Xu C., Hu H., Wan L., Chen R., Zheng H., Liu F., Zhang M., Shang X., Wang X., (2011), "Synthesis, mechanical, and barrier properties of LDPE/graphene nanocomposites using vinyl triethoxysilane as a coupling agent", *Journal of Nanoparticle Research*, 13(2), 869–878.
- [6] Verdejo R., Bernal M. M., Romasanta L. J., Lopez-Manchado M. A., (2011), "Graphene filled polymer nanocomposites", *Journal of Materials Chemistry*, 21(10), 3301–3310.
- [7] Balandin A. A., Ghosh S., Bao W., Calizo I., Teweldebrhan D., Miao F., Lau C. N., (2008), "Superior thermal conductivity of single-layer graphene", *Nano Letters*, 8(3), 902–907.
- [8] Lee C., Wei X., Kysar J. W., Hone J., (2008), "Measurement of the elastic properties and intrinsic strength of monolayer graphene", *Science*, 321(5887), 385–388.
- [9] Papageorgiou D. G., Kinloch I. A., Young R. J., (2017), "Mechanical properties of graphene and graphene-based nanocomposites", *Progress in Materials Science*, 90, 75-127.
- [10] Kuilla T., Bhadra S., Yao D., Kim N. H., Bose S., Lee J. H., (2010), "Recent advances in graphene based polymer composites", *Progress in Polymer Science*, 35(11), 1350-1375.
- [11] Abergel D. S. L., Apalkov V., Berashevich J., Ziegler K., Chakraborty T., (2010), "Properties of graphene: A theoretical perspective", *Advances in Physics*, 59(4), 261–482.
- [12] Randviir E. P., Brownson D. A. C., Banks C. E., (2014), "A decade of graphene research: Production, applications and outlook", *Materials Today*, 17(9), 426-432.
- [13] Nair R. R., Blake P., Grigorenko A. N., Novoselov K. S., Booth T. J., Stauber T., Geim A. K., (2008), "Fine structure constant defines visual transparency of graphene", *Science*, 320(5881), 1308.

- [14] Bolotin K. I., Sikes K. J., Jiang Z., Klima M., Fudenberg G., Hone J., Stormer H. L., (2008), "Ultrahigh electron mobility in suspended graphene", *Solid State Communications*, 146(9), 351–355.
- [15] Banerjee A. N., (2018), "Graphene and its derivatives as biomedical materials: Future prospects and challenges", *Interface Focus*, 8(3), 20170056.
- [16] Choi W., Lahiri I., Seelaboyina R., Kang Y. S., (2010), "Synthesis of graphene and its applications: A review", *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, 35(1), 52–71.
- [17] Tan Y., Zhang H., Peng S., (2016), "Electrically conductive graphene nanoplatelet/boron carbide composites with high hardness and toughness", *Scripta Materialia*, 114, 98–102.
- [18] Pei S., Cheng H. M., (2012), "The reduction of graphene oxide", *Carbon*, 50(9), 3210–3228.
- [19] Nanda S. S., Papaefthymiou G. C., Yi D. K., (2015), "Functionalization of Graphene Oxide and its Biomedical Applications", *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*. 40(5), 291–315.
- [20] Konios D., Stylianakis M. M., Stratakis E., Kymakis E., (2014), "Dispersion behaviour of graphene oxide and reduced graphene oxide", *Journal of Colloid and Interface Science*, 430, 108–112.
- [21] Chung C., Kim Y. K., Shin D., Ryoo S. R., Hong B. H., Min D. H., (2013), "Biomedical applications of graphene and graphene oxide", *Accounts of Chemical Research*, 46(10), 2211–2224.
- [22] Dreyer D. R., Park S., Bielawski C. W., Ruoff R. S., (2010), "The chemistry of graphene oxide", *Chemical Society Reviews*, 39(1), 228–240.
- [23] Smith A. T., LaChance A. M., Zeng S., Liu B., Sun L., (2019), "Synthesis, properties, and applications of graphene oxide/reduced graphene oxide and their nanocomposites", *Nano Materials Science*, 1(1), 31–47.
- [24] Perrozzi F., Prezioso S., Ottaviano L., (2014), "Graphene oxide: from fundamentals to applications", *Journal of Physics: Condensed Matter*, 27(1), 013002.
- [25] Kurian M., (2021), "Recent progress in the chemical reduction of graphene oxide by green reductants—A Mini review", *Carbon Trends*, 5, 100120.
- [26] Robinson J. T., Perkins F. K., Snow E. S., Wei Z., Sheehan P. E., (2008), "Reduced graphene oxide molecular sensors", *Nano Letters*, 8(10), 3137–3140.
- [27] Compton O. C., Nguyen S. T., (2010), "Graphene oxide, highly reduced graphene oxide, and graphene: Versatile building blocks for carbon-based materials", *Small*, 6(6), 711–723.

- [28] Tarcan R., Todor-Boer O., Petrovai I., Leordean C., Astilean S., Botiz I., (2020), "Reduced graphene oxide today", Journal of Materials Chemistry C, 8(4), 1198-1224.
- [29] De F., Mazuco S., (2021), "Adhesion improvement of thick DLC coatings produced by cathodic arc evaporation over stainless steel using carbon bombardment step", UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO-ESCOLA POLITÉCNICA DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA.
- [30] Poza P., Garrido-Maneiro M. Á., (2022), "Cold-sprayed coatings: Microstructure, mechanical properties, and wear behaviour", Progress in Materials Science, 123, 100839.
- [31] Hutchings I., Shipway P., (2017), "Surface engineering", Tribology, 7th Edition, 237–281.
- [32] Rickerby D. S., (1988), "A Review of the Methods for the Measurement of Coating-Substrate Adhesion", Surface and Coatings Technology, 36, 541-557.
- [33] Kumar C. M. P., Chandrashekarappa M. P. G., Kulkarni R. M., Pimenov D. Y., Giasin K., (2021), "The effect of zn and zn-wo<sub>3</sub> composites nano-coatings deposition on hardness and corrosion resistance in steel substrate", Materials, 14(9).
- [34] Joseph R. D., (2001), "Introduction to Surface Engineering for Corrosion and Wear Resistance", Surface Engineering for Corrosion and Wear Resistance, 1-10, ASM International.
- [35] Alsaran A., Çelik A., Karakan M., Yetim F., (2003), "Yüzey Mühendisliğinde Yeni Bir Yaklaşım; Dupleks Yüzey İşlemi", Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 9 (1), 1-7.
- [36] Caruso R. A., Antonietti M., (2001), "Sol-gel nanocoating: An approach to the preparation of structured materials", Chemistry of Materials, 13(10), 3272-3282.
- [37] Dearnley P. A., (2017), "Background to the Subject. Introduction to Surface Engineering", 1–3. Cambridge University Press.
- [38] Solak N., (2002), "Nitrür Esaslı sert Seramik İnce Film Kaplamaların Oksidasyon Davranışları", Yüksek Lisans Tezi, İTÜ.
- [39] Strong A. Brent., (2008), "Fundamentals of composites manufacturing : materials, methods and applications", 1, 1-18, Society of Manufacturing Engineers.
- [40] Balasubramanian M., (2014), "Composite Materials And Processing", 1, 1-29, CRC Press.
- [41] Kompozit – Wikipedia.(2022) 11 Haziran 2022 tarihinde [https://tr.wikipedia.org/wiki/Kompozit\\_Malzemeler](https://tr.wikipedia.org/wiki/Kompozit_Malzemeler) adresinden alındı.

- [42] Ngo T.-D., (2020), "Introduction to Composite Materials", Composite and Nanocomposite Materials.
- [43] Oyekoya O. O., (2008), "Structural Integrity of Engineering Components made of Functionally Graded Materials", Cranfield University.
- [44] Campbell F.C., (2010), "Introduction to Composite Material", Structural Composite Materials, 1, 1-29.
- [45] Schweitzer P.A., (2009), "Fundamentals of Corrosion: Mechanisms, Causes, and Preventative Methods", First Edition, CRC Press.
- [46] Jafar Mazumder M. A., (2020), "Global Impact of Corrosion: Occurrence, Cost and Mitigation", Global Journal of Engineering Sciences, 5(4).
- [47] Anisur M. R., Chakraborty Banerjee P., Easton C. D., Singh Raman R. K., (2018), "Controlling hydrogen environment and cooling during CVD graphene growth on nickel for improved corrosion resistance", Carbon, 127, 131–140.
- [48] Pu N. W., Shi G. N., Liu Y. M., Sun X., Chang J. K., Sun C. L., Lawes S., (2015), "Graphene grown on stainless steel as a high-performance and ecofriendly anti-corrosion coating for polymer electrolyte membrane fuel cell bipolar plates", Journal of Power Sources, 282, 248–256.
- [49] Ghauri F. A., Raza M. A., Baig M. S., Ibrahim S., (2017), "Corrosion study of the graphene oxide and reduced graphene oxide-based epoxy coatings", Materials Research Express, 4(12).
- [50] Ramezanzadeh B., Niroumandrad S., Ahmadi A., Mahdavian M., Mohamadzadeh Moghadam M. H., (2016), "Enhancement of barrier and corrosion protection performance of an epoxy coating through wet transfer of amino functionalized graphene oxide", Corrosion Science, 103, 283–304.
- [51] Zhou S., Wu Y., Zhao W., Yu J., Jiang F., Ma L., (2018), "Comparative corrosion resistance of graphene sheets with different structures in waterborne epoxy coatings", Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 556, 273–283.
- [52] Ding J., Rahman O. ur., Peng W., Dou H., Yu H., (2018), "A novel hydroxyl epoxy phosphate monomer enhancing the anticorrosive performance of waterborne Graphene/Epoxy coatings", Applied Surface Science, 427, 981–991.
- [53] Sun W., Wu T., Wang L., Yang Z., Zhu T., Dong C., Liu G., (2019), "The role of graphene loading on the corrosion-promotion activity of graphene/epoxy nanocomposite coatings", Composites Part B: Engineering, 173.
- [54] Ziat Y., Hammi M., Zahrri Z., Laghlimi C., (2020), "Epoxy coating modified with graphene: A promising composite against corrosion behavior of copper surface in marine media", Journal of Alloys and Compounds, 820.

- [55] Liu S., Gu L., Zhao H., Chen J., Yu H., (2016), "Corrosion Resistance of Graphene-Reinforced Waterborne Epoxy Coatings", *Journal of Materials Science and Technology*, 32(5), 425–431.
- [56] Pourhashem S., Vaezi M. R., Rashidi A., Bagherzadeh M. R., (2017), "Exploring corrosion protection properties of solvent based epoxy-graphene oxide nanocomposite coatings on mild steel", *Corrosion Science*, 115, 78–92.
- [57] Qiu S., Liu G., Li W., Zhao H., Wang L., (2018), "Noncovalent exfoliation of graphene and its multifunctional composite coating with enhanced anticorrosion and tribological performance", *Journal of Alloys and Compounds*, 747, 60–70.
- [58] Chen C., Qiu S., Cui M., Qin S., Yan G., Zhao H., Xue Q., (2017), "Achieving high performance corrosion and wear resistant epoxy coatings via incorporation of noncovalent functionalized graphene", *Carbon*, 114, 356–366.
- [59] Ye Y., Zhang D., Liu T., Liu Z., Pu J., Liu W., Wang L., (2019), "Superior corrosion resistance and self-healable epoxy coating pigmented with silanized trianiline-intercalated graphene", *Carbon*, 142, 164–176.
- [60] Prasai D., Tuberquia J. C., Harl R. R., Jennings G. K., Bolotin K. I., (2012), "Graphene: Corrosion-inhibiting coating", *ACS Nano*, 6(2), 1102–1108.
- [61] Zhu M., Du Z., Yin Z., Zhou W., Liu Z., Tsang S. H., Teo E. H. T., (2016), "Low-Temperature in Situ Growth of Graphene on Metallic Substrates and Its Application in Anticorrosion", *ACS Applied Materials and Interfaces*, 8(1), 502–510.
- [62] Chang K. C., Hsu C. H., Lu H. I., Ji W. F., Chang C. H., Li W. Y., Tsai M. H., (2014), "Advanced anticorrosive coatings prepared from electroactive polyimide/graphene nanocomposites with synergistic effects of redox catalytic capability and gas barrier properties", *Express Polymer Letters*, 8(4), 243–255.
- [63] Tiwari A., Singh Raman R. K., (2017), "Durable corrosion resistance of copper due to multi-layer graphene", *Materials*, 10(10).
- [64] Sanjid A., Banerjee P. C., Raman R. K. S., (2019), "Multi-layer graphene coating for corrosion resistance of Monel 400 alloy in chloride environment", *Surface and Coatings Technology*, 370, 227–234.
- [65] Wu Y., Zhu X., Zhao W., Wang Y., Wang C., Xue Q., (2019), "Corrosion mechanism of graphene coating with different defect levels", *Journal of Alloys and Compounds*, 777, 135–144.
- [66] Dong Y., Liu Q., Zhou Q., (2014), "Corrosion behavior of Cu during graphene growth by CVD", *Corrosion Science*, 89, 214–219.
- [67] Wang S., Zhang Y., Abidi N., Cabrales L., (2009), "Wettability and surface free energy of graphene films", *Langmuir*, 25(18), 11078–11081.

- [68] Wang X., Qi X., Lin Z., Battocchi D., (2018), “Graphene reinforced composites as protective coatings for oil and gas pipelines”, *Nanomaterials*, 8(12).
- [69] Chang K. C., Hsu M. H., Lu H. I., Lai M. C., Liu P. J., Hsu C. H., Liu W. R., (2014), “Room-temperature cured hydrophobic epoxy/graphene composites as corrosion inhibitor for cold-rolled steel”, *Carbon*, 66, 144–153.
- [70] Kozbial A., Li Z., Conaway C., McGinley R., Dhingra S., Vahdat V., Li L., (2014). “Study on the surface energy of graphene by contact angle measurements”, *Langmuir*, 30(28), 8598–8606.
- [71] Shin Y. J., Wang Y., Huang H., Kalon G., Wee A. T. S., Shen Z., Yang H., (2010), “Surface-energy engineering of graphene”, *Langmuir*, 26(6), 3798–3802.
- [72] Raj R., Maroo S. C., Wang E. N., (2013), “Wettability of graphene”, *Nano Letters*, 13(4), 1509–1515.
- [73] Rafiee J., Mi X., Gullapalli H., Thomas A. v., Yavari F., Shi Y., Koratkar N. A., (2012), “Wetting transparency of graphene”, *Nature Materials*, 11(3), 217–222.
- [74] Kim D., Kim E., Park S., Kim S., Min B. K., Yoon H. J., Cho M., (2021), “Wettability of graphene and interfacial water structure”, *Chem*, 7(6), 1602–1614.
- [75] Kochkin D. Y., Arkhipov V. E., Zaitsev D. V., Frolov L. B., Kabov O. A., (2021), “Wettability of graphene-coated copper substrates”, *AIP Conference Proceedings*, 2337(1), 020008.
- [76] Shih C. J., Wang Q. H., Lin S., Park K. C., Jin Z., Strano M. S., Blankschtein D., (2012), “Breakdown in the wetting transparency of graphene”, *Physical Review Letters*, 109(17).
- [77] Yang S., Sha S., Lu H., Wu J., Ma J., Wang D., Sheng Z., (2021), “Graphene oxide and reduced graphene oxide coated cotton fabrics with opposite wettability for continuous oil/water separation”, *Separation and Purification Technology*, 259.
- [78] Bharathidasan T., Narayanan T. N., Sathyanaryanan S., Sreejakumari S. S., (2015), “Above 170° water contact angle and oleophobicity of fluorinated graphene oxide based transparent polymeric films”, *Carbon*, 84(1), 207–213.
- [79] Singh E., Chen Z., Houshmand F., Ren W., Peles Y., Cheng H. M., Koratkar N., (2013), “Superhydrophobic graphene foams”, *Small*, 9(1), 75–80.
- [80] Li Z., Wang Y., Kozbial A., Shenoy G., Zhou F., McGinley R., Liu H., (2013), “Effect of airborne contaminants on the wettability of supported graphene and graphite”, *Nature Materials*, 12(10), 925–931.
- [81] Aktürk S. B. (2021). “Graduate School Of Natural And Applied Sciences Increasing The Corrosion Resistance Of Galvanized Low Carbon Steels With Graphene Reinforced Polymer Coatings”, *Yüksek Lisans Tezi*, GTÜ.

- [82] Maeda S., (1996), "Surface chemistry of galvanized steel sheets relevant to adhesion performance", *Progress in Organic Coatings*, 28(4), 227–238.
- [83] Marder A. R., (2000), "The metallurgy of zinc-coated steel", *Progress in Materials Science*, 45(3), 191–271.
- [84] Katundi D., Tosun-Bayraktar A., Bayraktar E., Toueix D., (2010), "Corrosion behavior of the welded steel sheets used in automotive industry", *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 38.
- [85] Cheng F. L., Aichbhaumik D., (1986), "The effect of hot-dipped galvanized coating on the edge and plane strain formabilities of high strength steels", *Journal of Applied Metalworking*, 4(2), 176–182.
- [86] Hosseini M., Ashassi-Sorkhabi H., Ghiasvand, H. A. Y., (2007), "Corrosion Protection of Electro-Galvanized Steel by Green Conversion Coatings", *Journal of Rare Earths*, 25(5), 537–543.
- [87] Ramezanzadeh B., Attar M. M., Farzam M., (2010), "Corrosion performance of a hot-dip galvanized steel treated by different kinds of conversion coatings", *Surface and Coatings Technology*, 205(3), 874–884.
- [88] Zeng Z., Zhang J., (2008), "Electrodeposition and tribological behavior of amorphous chromium-alumina composite coatings", *Surface and Coatings Technology*, 202(12), 2725–2730.
- [89] Sarraf S. H., Soltanieh M., Aghajani H., (2016), "Repairing the cracks network of hard chromium electroplated layers using plasma nitriding technique", *Vacuum*, 127, 1–9.
- [90] Critchlow G. W., Webb P. W., Tremlett C. J., Brown K., (2000), "Chemical conversion coatings for structural adhesive bonding of plain carbon steels", *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 20(2), 113–122.
- [91] Zhu W., Li W., Mu S., Yang Y., Zuo X., (2016), "The adhesion performance of epoxy coating on AA6063 treated in Ti/Zr/V based solution", *Applied Surface Science*, 384, 333–340.
- [92] Vakili H., Ramezanzadeh B., Amini R., (2015), "The corrosion performance and adhesion properties of the epoxy coating applied on the steel substrates treated by cerium-based conversion coatings", *Corrosion Science*, 94, 466–475.
- [93] Sharifi Golru S., Attar M. M., Ramezanzadeh B., (2015), "Effects of surface treatment of aluminium alloy 1050 on the adhesion and anticorrosion properties of the epoxy coating", *Applied Surface Science*, 345, 360–368.
- [94] Milošev I., Frankel G. S., (2018), "Review—Conversion Coatings Based on Zirconium and/or Titanium", *Journal of The Electrochemical Society*, 165(3), C127–C144.

- [95] Web 1, [https://www.henkel-adhesives.com/fr/en/product/surface-post-treatments/bonderite\\_m-nt\\_1455t.html](https://www.henkel-adhesives.com/fr/en/product/surface-post-treatments/bonderite_m-nt_1455t.html), (Erişim Tarihi: 27/06/2022).
- [96] Hamdi M., Saleh M. N., Poulis J. A., (2020), “Improving the adhesion strength of polymers: effect of surface treatments”, *Journal of Adhesion Science and Technology*, 34(17), 1853–1870.
- [97] Popov B. N., (2015), “Electrochemical Kinetics of Corrosion”, *Corrosion Engineering*, Elsevier, 93–142.
- [98] Ando M., Kalácska G., Czigány T., (2009), “SHORE D HARDNESS OF CAST PA6 BASED COMPOSITES”, *Scientific Bulletin Series C, Fascicle Mechanics, Tribology, Machine Manufacturing Technology*, 23, 15.
- [99] Mohseni M., Ramezanzadeh B., Yari H., (2011), “Effects of Environmental Conditions on Degradation of Automotive Coatings”, *New Trends and Developments in Automotive Industry*.
- [100] Oktem A. S., Akturk S. B., Topac E., Ozdemir E., Önler R., Saban O. B., (2020), “Enhancing Corrosion Resistance of Steel Substrates with Reduced Graphene Oxide Reinforced Polymer Composite Coatings”, *Materials Science & Technology MST2020*.
- [101] Web 2, <https://www.hazerfen.com.tr/hazerfen-functionalised-reduced-grapheneoxide-nanopowder-cr-fonksiyonel-kimyasal-indirgenmis-grafen-oksit-nanotoz-1g>, (Erişim Tarihi: 01/08/2022).
- [102] Web 3, <https://shop.nanografi.com.tr/grafen-nanoplatelet-safl-k-99-9-boyut-5-nm-y-a-135-m2-g-cap-7-m/>, (Erişim Tarihi: 01/08/2022).

## ÖZGEÇMİŞ

Taha AKBULAT 2015 yılında başladığı Namık Kemal Üniversitesi Makine Mühendisliğinden lisans derecesini 2020 yılında başarıyla tamamlamıştır. Lisans eğitimi süresince Erasmus+ öğrenci değişim programıyla Portekiz Coimbra ISEC Üniversitesinde bir dönem eğitimine devam etmiştir. 2020 yılında yüksek lisans eğitimine Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda başladı.



## EKLER

### **Ek A: Tez Çalışması Kapsamında Yapılan Yayınlar**

Akbulat T., (2022), “Grafen Takviyeli Kompozitlerin Fiziksel ve Kimyasal Özelliklerinin İncelenmesi”, 6. GTÜ Lisansüstü Araştırmalar Sempozyumu.

