



**KOROZYONA DAYANIKLI KOMPOZİT MALZEME
ÜRETİMİ VE PERFORMANSININ İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Kadir BALIBEY

Danışman
Prof. Dr. Atilla EVCİN

NANOBİLİM VE NANOTEKNOLOJİ
ANABİLİM DALI

AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

KOROZYONA DAYANIKLI KOMPOZİT MALZEME
ÜRETİMİ VE PERFORMANSININ İNCELENMESİ

Kadir BALİBEY

Danışman

Prof. Dr. Atilla EVCİN

NANO BİLİM VE NANOTEKNOLOJİ ANABİLİM DALI

Ocak 2025

TEZ ONAY SAYFASI

Kadir BALIBEY tarafından hazırlanan “Korozyona Dayanıklı Kompozit Malzeme Üretimi ve Performansının İncelenmesi” adlı tez çalışması lisansüstü eğitim ve öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca 30 / 01 / 2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından **oy birliği** ile Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Nanobilim ve Nanoteknoloji Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Prof. Dr. Atilla EVCİN

Başkan : Prof. Dr. İbrahim GÜNEŞ
Giresun Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi

Üye : Prof. Dr. Atilla EVCİN
Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi

Üye : Dr. Öğr. Üyesi İsmail YILDIZ
Afyon Kocatepe Üniversitesi, İncehisar M.Y.O

Afyon Kocatepe Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun
..... /..... /..... tarih ve
..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

.....

Prof. Dr. Bekir YALÇIN
Enstitü Müdürü

BİLİMSEL ETİK BİLDİRİM SAYFASI
Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- Atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

30 / 01 / 2025

Kadir BALIBEY

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

KOROZYONA DAYANIKLI KOMPOZİT MALZEME ÜRETİMİ VE PERFORMANSININ İNCELENMESİ

Kadir BALİBEY

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Nanobilim ve Nanoteknoloji Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Atilla EVCİN

Bu çalışmada, AISI 304 çelik yüzeyine uygulanan farklı kaplama içeriklerinin korozyon direncine etkisi incelenmiştir. Kaplamasız yüzey (R) ile Zn asetat (A), titanyum izopropoksit (B), seryum oksit (C) ve zirkonyum izopropoksit (D) içerikli kaplamalar karşılaştırılmıştır. Çalışmanın amacı, kaplamaların korozyona karşı etkinliklerini değerlendirmek ve en uygun kaplama kompozisyonunu belirlemektir. Deneylerde, açık devre potansiyeli (OCP), potansiyodinamik polarizasyon ve elektrokimyasal empedans spektroskopisi (EIS) yöntemleri kullanılarak kaplama performansları detaylı bir şekilde incelenmiştir. Ayrıca, temas açısı ölçümleri ve mikroskop görüntüleri ile yüzey morfolojisi ve kaplama homojenliği değerlendirilmiştir.

Sonuçlar, kaplamasız yüzeyin (R) en düşük korozyon direncine sahip olduğunu, A numunesinin ise zayıf performansı nedeniyle yeterli bir bariyer etkisi sunmadığını göstermiştir. Titanyum izopropoksit içerikli B numunesi, en düşük korozyon akım yoğunluğu, en yüksek empedans değerleri ve pozitif korozyon potansiyeli ile en iyi korozyon direncini sergilemiştir. Seryum oksit (C) ve zirkonyum izopropoksit (D) içerikli kaplamalar ise orta düzeyde performans göstererek kaplamasız yüzeye göre önemli bir iyileşme sağlamış ancak B numunesine göre daha düşük direnç sergilemiştir. Temas açısı ölçümleri, C numunesinin hidrofobik bir yüzey yapısına sahip olduğunu, D numunesinin ise hidrofilik karakter gösterdiğini ortaya koymuştur. Mikroskop görüntüleri ise B numunesinin homojen ve sağlam bir kaplama yapısına sahip olduğunu, A numunesinde ise kaplamanın yetersiz ve düzensiz olduğunu göstermiştir.

Bu alışma, AISI 304 elik yüzeylerinde korozyon direncini artırmak için kaplama içeriklerinin dikkatle seçilmesi gerektiğini ve özellikle titanyum izopropoksit içerikli kaplamaların yüksek koruma potansiyeline sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Çalışmanın sonuçları, endüstriyel uygulamalar için kaplama malzemesi seçiminde yol gösterici bir nitelik taşımaktadır.

2025, xi + 59 sayfa

Anahtar Kelimeler: Korozyon, AISI 304, Kaplama, Silan bileşikleri.



ABSTRACT

M.Sc. Thesis

INVESTIGATION OF PRODUCTION AND PERFORMANCE OF CORROSION RESISTANT COMPOSITE MATERIALS

Kadir BALIBEY

Afyon Kocatepe University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Nanoscience and Nanotechnology

Supervisor: Prof. Dr. Atilla EVCIN

In this research, In this study, the effect of different coating contents on the corrosion resistance of AISI 304 steel surface was investigated. Coatings containing Zn acetate (A), titanium isopropoxide (B), cerium oxide (C) and zirconium isopropoxide (D) were compared with uncoated surface (R). The aim of the study was to evaluate the effectiveness of the coatings against corrosion and to determine the most suitable coating composition. In the experiments, the coating performances were investigated in detail using open circuit potential (OCP), potentiodynamic polarization and electrochemical impedance spectroscopy (EIS) methods. In addition, surface morphology and coating homogeneity were evaluated by contact angle measurements and microscope images.

The results showed that the uncoated surface (R) had the lowest corrosion resistance, while sample A could not offer a sufficient barrier effect due to its poor performance. Sample B with titanium isopropoxide exhibited the best corrosion resistance with the lowest corrosion current density, highest impedance values and positive corrosion potential. Coatings containing zirconium isopropoxide (C) and cerium oxide (D) performed moderately, providing a significant improvement over the uncoated surface but exhibiting lower resistance than specimen B. Contact angle measurements revealed that sample C had a hydrophobic surface structure, while sample D showed a hydrophilic character. Microscope images showed that sample B had a homogeneous and robust coating structure, whereas the coating on sample A was inadequate and

uneven.

This study reveals that coating ingredients should be carefully selected to improve corrosion resistance on AISI 304 steel surfaces and that coatings containing titanium isopropoxide in particular have high protection potential. The results of the study provide guidance in the selection of coating materials for industrial applications.

2025, xi + 59 pages

Keywords: Corrosion, AISI 304, Coating, Silane compounds.



TEŞEKKÜR

Bu araştırmanın konusu, deneysel çalışmaların yönlendirilmesi, sonuçların değerlendirilmesi ve yazımı aşamasında yapmış olduğu büyük katkılarından dolayı tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Atilla EVCİN, korozyon testleri için sundukları destek ve imkânlar nedeniyle Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'nden Prof. Dr. Ayhan ÇELİK ve Dr. Öğr. Üyesi Yusuf Burak BOZKURT'a çalışmalarım süresince yardımlarını esirgemeyen her konuda öneri ve eleştirileriyle yardımlarını gördüğüm hocalarıma ve arkadaşlarıma, teşekkür ederim.

Bu araştırma boyunca maddi ve manevi desteklerinden dolayı aileme teşekkür ederim.

Kadir BALIBEY
Afyonkarahisar 2025

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	Sayfa
ÖZET	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	vi
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ.....	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	x
RESİMLER DİZİNİ	xi
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR BİLGİLERİ	2
2.1 Korozyon ve Korozyon Direnci.....	2
2.1.1 Korozyonun Tanımı ve Korozyon Mekanizmaları	2
2.1.2 Metal Yüzeylerde Korozyonun Etkileri	4
2.2 Korozyon Önleyici Kaplamalar	8
2.2.1 Silan Bileşiklerinin Korozyon Önleyici Kaplamalardaki Rolü	12
2.2.2 Metal İyon Katkılarının Korozyon Önleyici Kaplamalardaki Rolü	16
2.2.2.1 Titanyum İçerikli Katkılar	17
2.2.2.2 Çinko İçerikli Katkılar	18
2.2.2.3 Zirkonyum İçerikli Katkılar	19
2.2.2.4 Seryum İçerikli Katkılar	21
2.2.3 Metal Altıklar Üzerinde Kaplama Yöntemleri.....	22
2.4 AISI 304 Paslanmaz Çelik Özellikleri ve Kullanım Alanları	26
3. MATERYAL ve METOT	29
3.1 Deneysel Çalışmalar	29
3.1.1 Kaplama Çözeltisi Reçetelerinin Oluşturulması	29
3.1.2 Kaplama Çözeltilerinin Hazırlanması	32
3.1.3 Metal Altıkların Yüzey Aktivasyonu	32
3.1.4 Kaplama İşleminin Uygulanması	33
3.1.5 Isıl İşlem.....	33
3.2 Karakterizasyon	34
3.2.1 FT-IR Analizi	34
3.2.2 Temas Açısı.....	34

3.2.3 Mikroskop Görüntüsü	35
3.2.4 Korozyon Ölçümleri.....	36
4. BULGULAR	38
4.1 FT-IR Analiz Sonuçları	38
4.2 Temas Açısı Ölçüm Sonuçları	40
4.3 Mikroskop Görüntüleri	41
4.4 Korozyon Testi Sonuçları	42
4.4.1 Açık Devre Potansiyeli (OCP) Ölçüm Sonuçları	42
4.4.2 Potansiyodinamik Polarizasyon Ölçüm Sonuçları	43
4.4.3 Elektrodinamik Empedans Spektroskopisi Ölçüm Sonuçları	44
5. TARTIŞMA ve SONUÇ	47
6. KAYNAKLAR.....	49
ÖZGEÇMİŞ.....	59

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

dH ₂ O	Distile su
Ni	Nikel
Cu	Bakır
HCl	Hidroklorik asit
OH [•]	Hidroksil radikali
MoS ₂	Molibden disülfür
Co	Kobalt
Cr	Krom
Mm	Milimetre
TiO ₂	Titanyum dioksit
Nm	Nanometre
CuO	Bakır oksit
Zr	Zirkonyum
MPa	Megapaskal
N	Newton
Kg	Kilogram
m ³	Metreküp
%	Yüzde
ml	Mililitre
NaOH	Sodyum hidroksit
AgCl	Gümüş klorür
V	Volt
i _{corr}	Korozyon akım yoğunluğu
E _{corr}	Korozyon potansiyeli
Z	Empedans

Kısaltmalar

3-APTES	3-Aminopropiltrietoksisilan
CA	Temas açısı
EIS	Elektrokimyasal empedans spektroskopisi
EPD	Elektroforetik tortulama
FTIR	Fourier Transform Infrared
GPTMS	Glisidopropiltrimetoksisilan
HEA	Yüksek entropili alaşım
HVAF	Yüksek hızlı hava yakıt
HVOF	Yüksek hızlı oksijen yakıt
IPA	İzopropil Alkol
LDH	Katmanlı çift hidroksit
MCI	Geçici korozyon inhibitörü
OCP	Açık devre potansiyeli
PEG	Polietilenglikol
PTFE	Politetrafloroetilen
SCC	Gerilme korozyon çatlağı

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1 Korozyon türleri	5
Şekil 2.2 Korozyon süreçlerinde çevresel faktörlerin rolü	7
Şekil 2.3 Termal sprey kaplama	10
Şekil 2.4 Sol-Jel kaplama yöntemi	25
Şekil 3.1 Deney akış planı	29
Şekil 3.2 Kullanılan silanların kimyasal yapıları	30
Şekil 3.3 Asetil aseton kimyasal yapısı	30
Şekil 3.4 Hazırlanan kaplama çözeltileri	32
Şekil 3.5 Daldırma yöntemiyle kaplama	33
Şekil 3.6 Kaplanan numunelere ısıtıl işlem uygulanması	33
Şekil 4.1 A çözeltisi için FT-IR analiz sonucu	38
Şekil 4.2 B çözeltisi için FT-IR analiz sonucu	38
Şekil 4.3 C çözeltisi için FT-IR analiz sonucu	39
Şekil 4.4 A çözeltisi için FT-IR analiz sonucu	39
Şekil 4.5 Kaplamasız ve kaplamalı numunelerin mikroskop görüntüleri	41
Şekil 4.6 Açık devre potansiyeli (OCP) ölçüm sonuçları	42
Şekil 4.7 Potansiyodinamik Polarizasyon ölçüm sonuçları	43
Şekil 4.8 Elektrodinamik empedans spektroskopisi ölçüm sonuçları	44
Şekil 4.9 Normlaştırılmış Nyquist diyagramı	45

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 2.1 AISI 304 Çeliğin mekanik özellikleri	26
Çizelge 3.1 Hazırlanan reçeteler	32
Çizelge 4.1 Temas açısı ölçüm sonuçları	40



RESİMLER DİZİNİ

	Sayfa
Resim 3.1 FT-IR ölçüm cihazı	34
Resim 3.2 Temas açısı ölçüm cihazı	35
Resim 3.3 Dijital mikroskop	36
Resim 3.4 Gamry korozyon hücresi	36
Resim 3.5 Gamry potansiyostat	37



1. GİRİŞ

Korozyon, metallerin çevresel etkilerle bozunması sonucu maddi kayıplara ve sistemlerin işlevselliğinin azalmasına yol açan önemli bir sorundur. Endüstriyel uygulamalarda, özellikle enerji, otomotiv ve inşaat sektörlerinde kullanılan metal malzemelerin korozyona karşı korunması kritik bir öneme sahiptir. Bu nedenle, korozyon önleyici kaplamaların geliştirilmesi, hem ekonomik kayıpların azaltılması hem de malzemelerin ömrünün uzatılması açısından büyük bir gereklilik haline gelmiştir.

Son yıllarda, hibrit organik-inorganik kaplamalar, üstün korozyon dayanımları ve yüzeye güçlü yapışma özellikleri ile dikkat çekmektedir. Sol-jel yöntemi, bu tür kaplamaların hazırlanmasında yaygın olarak kullanılan bir teknik olup, düşük işlem maliyeti ve çevre dostu oluşuyla öne çıkmaktadır. Bu çalışmada, sol-jel yöntemiyle metal yüzeylerde korozyon direncini artırmak amacıyla yenilikçi kaplama sistemleri geliştirilmiştir.

Kaplama reçetelerinde, kimyasal bağlayıcılar olarak 3-APTES (3-Aminopropiltrietoksilan) ve GPTMS (Glisidilpropiltrimetoksilan) kullanılmıştır. Asetil aseton, çözücü ortamın homojenliğini artırırken, izopropil alkol ve su, kaplama çözeltisinin viskozitesini kontrol etmek ve reaksiyonların gerçekleşmesini sağlamak amacıyla dahil edilmiştir. Bu sabit bileşenlerin yanı sıra dört farklı metal oksit ve kompleks oluşturuju ajan test edilmiştir: titanyum izopropoksit, seryum oksit, çinko asetat ve zirkonyum izopropoksit. Her bir malzemenin kaplama performansına olan etkisi değerlendirilmiş ve korozyon dayanımındaki iyileştirme potansiyeli araştırılmıştır.

Bu tez çalışması kapsamında, kaplama sistemlerinin metal yüzeylerde korozyon direncini artırma mekanizmaları detaylı bir şekilde incelenmiştir. Geliştirilen kaplamaların yapısal, kimyasal ve mekanik özellikleri karakterize edilerek, kaplama formülasyonlarının etkinliği değerlendirilmiştir.

2. LİTERATÜR BİLGİLERİ

2.1 Korozyon ve Korozyon Direnci

Korozyon, malzemelerin, özellikle de metallerin çevreleriyle kimyasal veya elektrokimyasal reaksiyonlar yoluyla bozulmasına yol açan yaygın ve karmaşık bir olgudur. Bu bozulma tek tip korozyon, çukurlaşma, çatlak korozyonu ve gerilme korozyonu çatlaması gibi çeşitli şekillerde ortaya çıkabilir ve bunların her biri tespit, önleme ve iyileştirme açısından benzersiz zorluklar sunar. Korozyonun temel mekanizmaları malzeme özellikleri, çevresel koşullar ve elektrokimyasal süreçler arasındaki karmaşık etkileşimleri içerir.

2.1.1 Korozyonun Tanımı ve Korozyon Mekanizmaları

Korozyon, malzemelerin, özellikle de metallerin çevreleriyle kimyasal veya elektrokimyasal reaksiyonlar yoluyla bozulmasına yol açan yaygın ve karmaşık bir olgudur. Bu bozulma tek tip korozyon, çukurlaşma, çatlak korozyonu ve gerilme korozyonu çatlaması gibi çeşitli şekillerde ortaya çıkabilir ve bunların her biri tespit, önleme ve iyileştirme açısından benzersiz zorluklar sunar. Korozyonun temel mekanizmaları malzeme özellikleri, çevresel koşullar ve elektrokimyasal süreçler arasındaki karmaşık etkileşimleri içerir.

Korozyonun tanımı, metaller üzerindeki yıkıcı saldırıları kapsar ve bu saldırılar, çevreleyen ortamla hem kimyasal hem de elektrokimyasal reaksiyonlara atfedilebilir. Örneğin, korozyonun mekanik sistemlerde önemli arızalara yol açabileceği ve ciddi güvenlik riskleri oluşturabileceği tespit edilmiştir. Korozyonun altında yatan mekanizmalar çok yönlüdür ve malzemelerin korozif ortamlardaki davranışlarını yöneten termodinamik ve kinetik faktörleri içerir. Bu faktörler arasında aşındırıcı maddelerin doğası, koruyucu oksit filmlerin varlığı ve ilgili malzemelerin elektrokimyasal potansiyeli yer almaktadır (Scully 2019).

Yapısal uygulamalarda korozyon, özellikle çelik donatıların korozyonunun kritik bir

endişe kaynağı olduğu betonarme yapılarda malzemelerin bütünlüğünü ciddi şekilde tehlikeye atabilir. Bu donatıların bozunması yalnızca kesit alanlarını azaltmakla kalmaz, aynı zamanda çevredeki betonun çatlamasına ve dökülmesine neden olabilecek genişleyen korozyon ürünleri de üretir (Noh vd. 2018). Çelik ve beton arasındaki bu etkileşim, yapının bağlanma mukavemetini ve genel mekanik performansını etkilediği için çok önemlidir. Genellikle buz çözücü tuzlardan veya deniz suyundan kaynaklanan klorürlerin varlığı, betona nüfuz ederek ve çeliği koruyan pasif tabakayı bozarak bu süreci daha da kötüleştirebilir (Ghanooni-Bagha vd. 2018).

Korozif ortamlarda malzemelerin yorulma ömrü bir diğer önemli husustur. Araştırmalar, korozyonun özellikle döngüsel yükleme koşulları altında malzemelerin yorulma dayanımını önemli ölçüde azaltabileceğini göstermektedir. Örneğin, çalışmalar malzemelerin yorulma dayanımının korozif ortamlarda iki kat azalabileceğini göstermiş ve korozyon ile mekanik yükleme arasındaki etkileşimi anlamaya yönelik kritik ihtiyacı vurgulamıştır (Morgantini vd. 2018). Bu ilişki, özellikle malzemelerin bütünlüğünün güvenlik için çok önemli olduğu uçak yapıları gibi uygulamalarla ilgilidir (Sun vd. 2014).

Ayrıca, çukurlaşma ve çatlak korozyonu gibi lokalize korozyon mekanizmaları, ani ve yıkıcı arızalara neden olma eğilimleri nedeniyle özellikle ilgi çekicidir. Koruyucu oksit filmlerin parçalanması genellikle lokal korozyonu başlatan olaydır ve belirli çevresel koşullar altında hızla yayılabilen çukurların oluşmasına yol açar. Bu çukurların kararlılığı ve büyümelerini etkileyen faktörler, agresif ortamlarda metalik yapıların ömrünü tahmin etmek için kritik öneme sahip olduğundan, devam eden araştırmaların konusudur (Frankel vd. 2017).

Korozyonun mekanik ve yapısal etkilerine ek olarak, ekonomik etkisi de önemlidir. Korozyona bağlı arızalar ve bakım ile ilgili maliyetler önemli olabilir ve bu da etkili korozyon yönetimi stratejilerinin geliştirilmesini gerektirir. Bu stratejiler, korozyonun etkilerini azaltmayı ve yapıların hizmet ömrünü uzatmayı amaçlayan korozyon inhibitörlerinin, koruyucu kaplamaların ve katodik koruma sistemlerinin kullanımını içerebilir (Pereira vd. 2015, Paglia vd. 2021).

Gelişmiş malzemelerin ve kaplamaların korozyonu önlemedeki rolü de gelişmekte olan bir araştırma alanıdır. Hava koşullarına dayanıklı çeliklerin ve korozyona dayanıklı alaşımların geliştirilmesi gibi malzeme bilimindeki yenilikler, zorlu ortamlara maruz kalan yapıların dayanıklılığını artırma konusunda umut vaat etmektedir (Morcillo vd. 2014, Gao vd. 2023). Ayrıca, korozyon izleme ve yönetiminde veri analitiği ve yapay zekanın entegrasyonu, korozyon biliminde bir sınırı temsil etmekte ve bakım ve onarımla ilgili daha proaktif ve bilinçli karar vermeyi mümkün kılmaktadır (Scully 2019).

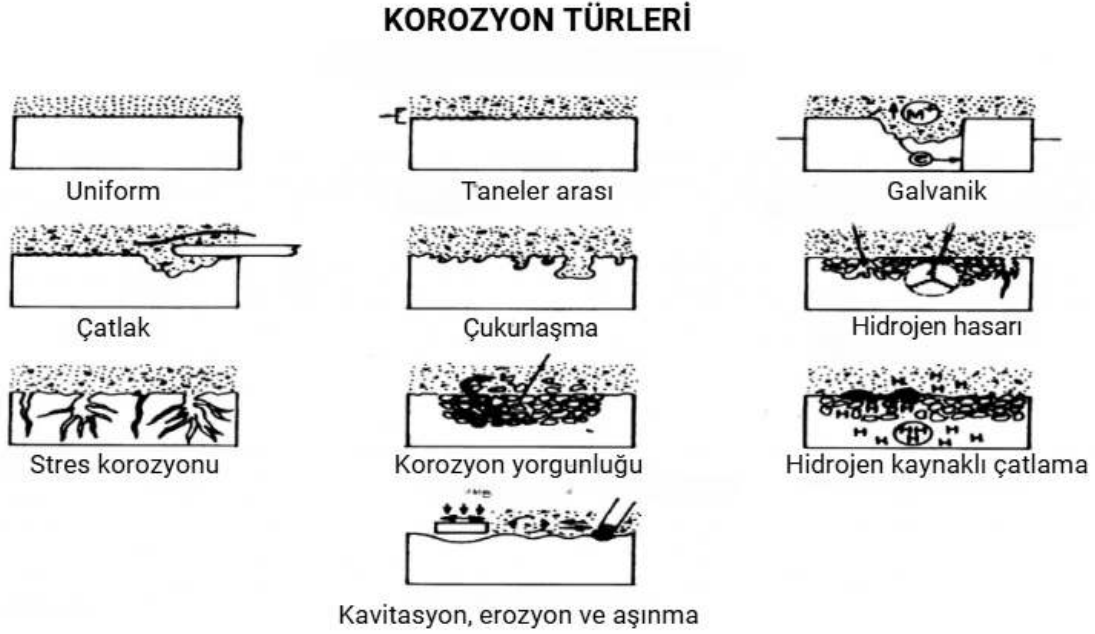
Özetle, korozyon, çeşitli uygulamalarda malzemelerin performansını ve güvenliğini önemli ölçüde etkileyebilen kimyasal, elektrokimyasal ve mekanik süreçlerin karmaşık bir etkileşimidir. Korozyon mekanizmalarını, malzeme özellikleri üzerindeki etkilerini ve azaltma stratejilerini anlamak, hem mühendisler hem de araştırmacılar için çok önemlidir. Malzeme bilimi ve korozyon yönetimi tekniklerinde devam eden ilerlemeler, bu yaygın fenomenin yarattığı zorlukların ele alınmasında kritik öneme sahip olacaktır.

2.1.2 Metal Yüzeylerde Korozyonun Etkileri

Korozyon, endüstriyel yapılardan deniz ortamlarına kadar çeşitli uygulamalarda metal yüzeylerin bütünlüğünü ve uzun ömürlülüğünü önemli ölçüde etkileyen yaygın bir sorundur. Korozyon mekanizmaları karmaşık ve çok yönlüdür, metal yüzeylerin bozulmasına yol açan elektrokimyasal reaksiyonları içerir. Bu yanıt, korozyonun metal yüzeyler üzerindeki etkilerine ilişkin mevcut araştırma bulgularını sentezlemekte, altta yatan mekanizmaları, mikroyapısal özelliklerin etkisini ve çeşitli koruyucu önlemlerin etkinliğini vurgulamaktadır.

Korozyon türleri (Şekil 2.1) genel olarak üniform korozyon, çukur korozyonu, galvanik korozyon ve gerilme korozyonu çatlaması gibi çeşitli türlerde sınıflandırılabilir. Her tür kendine özgü zorluklar ve mekanizmalar sunar. Örneğin galvanik korozyon, iki farklı metalin bir elektrolit varlığında elektriksel olarak bağlanmasıyla meydana gelir ve daha anodik olan metalin korozyonunun hızlanmasına yol açar. Whitman vd. (2017), galvanik kuplajın anodik akımı önemli ölçüde artırabileceğini ve böylece özellikle

elektrolitle temas eden yüzey alanının en üst düzeye çıktığı bağlantı elemanı başlıklarının altındaki bölgelerde alüminyum alaşımlarının korozyon oranını hızlandırabileceğini vurgulamaktadır. Bu olgu, kompozit yapılarda farklı metaller arasındaki elektrokimyasal etkileşimleri anlamının önemini vurgulamaktadır.



Şekil 2.1 Korozyon türleri (İnt.Kyn.1).

Metallerin mikroyapısal özellikleri korozyon dirençlerinde önemli bir rol oynamaktadır. Örneğin Wang vd. (2015), denizaltı boru hattı çeliğinin ferrit ve beynitten oluşan çift fazlı mikro yapısının, ana ve ana metal bölgelerinde korozyona duyarlılığı artıran galvanik etkiler yaratabileceğini tartışmaktadır. Benzer şekilde Li (2023), çelikte metalik olmayan inklüzyonların varlığının, özellikle mikroyapının ana metalinkinden önemli ölçüde farklı olduğu kaynaklı bağlantıların ısıdan etkilenen bölgelerinde (HAZ) lokal korozyona yol açabileceğini vurgulamaktadır. Bu bulgular, metallerin mikroyapısal bütünlüğünün korozyon davranışlarını belirlemede çok önemli olduğunu göstermektedir.

Yüzey işlemleri ve kaplamalar, metal yüzeylerin korozyon direncini artırmak için yaygın olarak kullanılmaktadır. Ghosh vd. (2006), elektrodepoze nanokristalin Ni-Cu alaşımlarının, daha iyi genel pasifliğe sahip olmalarına rağmen lokal saldırılardan

muzdarip olan polikristalin muadillerine kıyasla daha iyi çukur korozyon davranışı sergilediğini bulmuşlardır. Bu durum, kaplama malzemesi seçiminin ve mikroyapısal özelliklerinin korozyon performansını önemli ölçüde etkileyebileceğini göstermektedir. Ayrıca, Donatus vd. (2014) sıcaklık değişimlerinin çeliğin pasivasyonunu olumsuz etkileyebileceğini ve kaplanmış metallerin korozyon direncini daha da karmaşık hale getirebileceğini belirtmiştir.

Mikroyapısal ve yüzey işleme faktörlerine ek olarak, belirli alaşım elementlerinin varlığı da korozyon direncini etkileyebilir. Radojković vd. (2020), paslanmaz çelik kaynaklı bağlantılardaki δ -ferritin, özellikle faz sınırlarında korozyona daha duyarlı olan kromdan arındırılmış bölgelere yol açabileceğini gözlemlemiştir. Bu durum, alaşım bileşiminin, özellikle faz dağılımlarının düzensiz olabileceği kaynaklı yapılarda, metallerin korozyon davranışını belirlemedeki kritik rolünü vurgulamaktadır.

Taşlama gibi mekanik işlemler de metallerin korozyon direncini etkileyebilir. Reinemann vd. (2019), yüzey pürüzlülüğünün korozyon davranışını etkilemekle birlikte tek belirleyici olmadığını; tane tipi, boyutu ve soğutma yağlayıcılarının kullanımı gibi faktörlerin de önemli rol oynadığını göstermiştir. Bu durum, metal yüzeylerde korozyon direncini optimize etmek için mekanik işleme parametrelerinin kapsamlı bir şekilde anlaşılmasının gerekli olduğunu göstermektedir.

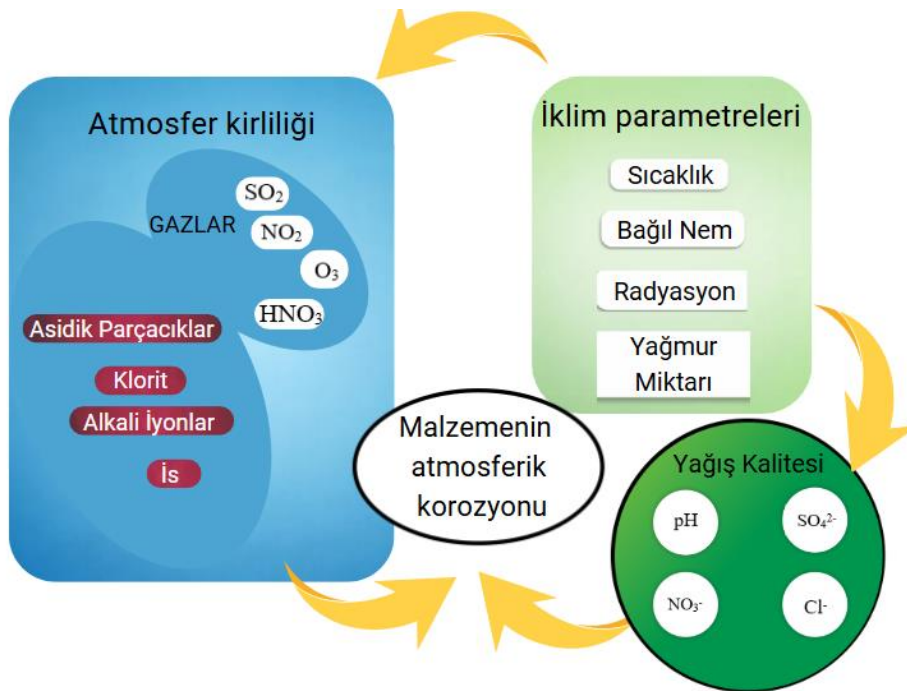
Ağız boşluğu gibi belirli ortamlardaki korozyon, korozi ajanların sürekli varlığı nedeniyle benzersiz zorluklar ortaya çıkarmaktadır. Vrânceanu vd. (2015), korozyonun sulu çözeltilerle elektrokimyasal bir reaksiyon olarak nasıl meydana geldiğini, metalin çözünmesine ve iyon salınımına yol açtığını tartışmıştır. Bu sürekli süreç, biyomedikal uygulamalar için özel olarak tasarlanmış korozyona dayanıklı malzemelerin geliştirilmesini gerektirmektedir.

Grafen bazlı kaplamalar gibi yenilikçi malzemelerin uygulanması, korozyon direncini artırmak için umut verici bir yaklaşım olarak ortaya çıkmıştır. Zade ve Patil (2022), benzersiz özellikleri nedeniyle korozyona karşı güçlü koruma sağlayan grafen kaplamaların potansiyelini gözden geçirmiştir. Bu gelişmiş malzemeler, metal yapıların

hizmet ömrünü uzatmak için bir yol sağlayarak korozyondan korunma teknolojisinde önemli bir ilerlemeyi temsil etmektedir.

Ayrıca, süperhidrofobik işlemler gibi yüzey modifikasyonlarının sinerjik etkileri korozyon direncini önemli ölçüde artırabilir. Trdan vd. (2017) tarafından yapılan araştırma, lazer dokulu paslanmaz çelik yüzeylerin süperhidrofilik durumdan süperhidrofobik duruma geçebileceğini ve bunun da yüzeyin ıslanabilirliğini azaltarak korozyon direncini artırabileceğini göstermektedir. Bu bulgu, yüzey mühendisliğinin agresif ortamlarda korozyonu azaltmak için etkili bir strateji olabileceğini göstermektedir.

Korozyon süreçlerinde çevresel faktörlerin (Şekil 2.2) rolü göz ardı edilemez. Örneğin, klorür iyonlarının varlığının metallerde, özellikle de paslanmaz çeliklerde çukur korozyonunu şiddetlendirdiği bilinmektedir. Astarita vd. (2014), dar yarıkların zamanla agresif koşullara yol açabileceği klorür çözeltilerine maruz kalan pasif sistemlerde çatlak korozyonunun önemli bir endişe kaynağı olduğunu belirtmiştir. Bu çevresel etkileşimleri anlamak, etkili korozyon önleme stratejileri geliştirmek için çok önemlidir.



Şekil 2.2 Korozyon süreçlerinde çevresel faktörlerin rolü (Astarita vd. 2014).

Özetle, korozyonun metal yüzeyler üzerindeki etkileri, mikroyapısal özellikler, alaşım bileşimi, yüzey işlemleri ve çevresel koşullar dahil olmak üzere çok sayıda faktörden etkilenir. Bu etkileşimlerin karmaşıklığı, malzeme bilimi, elektrokimya ve yüzey mühendisliğinden gelen bilgileri entegre ederek korozyon yönetimine kapsamlı bir yaklaşım gerektirmektedir. Gelecekteki araştırmalar, metallerin korozyon direncini artırmak ve çeşitli uygulamalarda uzun ömürlü ve güvenilir olmalarını sağlamak için yenilikçi malzemeler ve koruyucu stratejiler keşfetmeye devam etmelidir.

2.2 Korozyon Önleyici Kaplamalar

Korozyon önleyici kaplamalar, metal yüzeyleri nem, tuzlar ve kirleticiler gibi çevresel faktörlerden kaynaklanan bozulmalardan korumak için gereklidir. Bu kaplamalar bir bariyer görevi görerek koroziv maddelerin alt tabakaya ulaşmasını engeller ve böylece korudukları malzemelerin ömrünü uzatır. Her biri benzersiz özelliklere ve etki mekanizmalarına sahip çeşitli korozyon önleyici kaplama türleri geliştirilmiştir.

En yaygın korozyon önleyici kaplama türlerinden biri, mükemmel yapışma ve çeşitli koroziv ortamlara karşı dirençleri nedeniyle tercih edilen epoksi bazlı kaplamalardır. Epoksi kaplamalar, koroziv ajanların iletimini engelleyen bir “labirent” etkisi yaratan ve kaplamanın etkinliğini önemli ölçüde artıran bazalt pulları gibi katkı maddeleri ile geliştirilebilir. Ayrıca, grafen veya grafen oksit gibi nanomalzemelerin epoksi formülasyonlarına dahil edilmesinin, benzersiz bariyer özellikleri ve moleküler düzeyde korozyonu önleme yetenekleri nedeniyle mekanik özellikleri ve korozyon direncini artırdığı gösterilmiştir (Prasai vd. 2012).

Son gelişmeler, bakır alt tabakalara uygulandığında önemli korozyon önleyici özellikler gösteren bor nitrür kaplamalar gibi yenilikçi malzemeleri de ortaya çıkarmıştır. Bu kaplamaların homojen dağılımı, korozyon akımlarında önemli bir azalmaya neden olarak oksidasyon ve korozyona karşı korumadaki etkinliklerini göstermektedir (Jiang vd., 2019). Benzer şekilde, yüksek entropili alaşım (HEA) kaplamaların, yoğun mikro yapılarına ve yüksek krom içeriğine atfedilen geleneksel paslanmaz çeliğe kıyasla üstün korozyon önleme performansı sergilediği bildirilmiştir (Guo vd. 2018).

Ayrıca, ağır hizmet tipi korozyon önleyici kaplamalar, uzun süreli koruma sağladıkları deniz veya kimyasal ortamlar gibi aşırı ortamlar için tasarlanmıştır. Bu kaplamalar, kalın filmleri ve dayanıklılıkları ile karakterize edilir ve bu da onları geleneksel kaplamaların başarısız olabileceği uygulamalar için uygun hale getirir. Klorür erozyonuna maruz kalan betonarmenin korozyon direncini artırabildikleri için kaplamalarda geçici korozyon inhibitörlerinin (MCI'ler) kullanımı da araştırılmıştır, ancak etkinlikleri klorür iyonları ile rekabetçi adsorpsiyondan etkilenebilir (Sun vd. 2022).

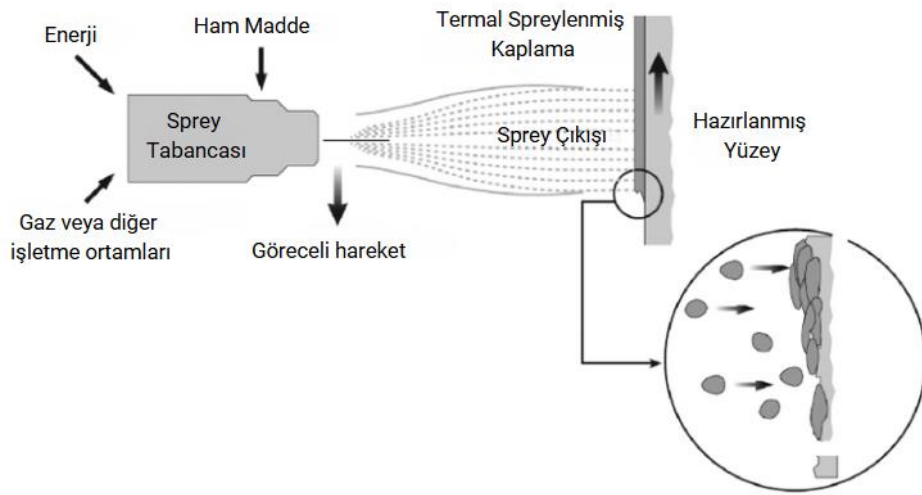
Kaplamalar, korozif maddelerin alttaki metal yüzeylere ulaşmasını önleyen bariyerler olarak korozyon korumasında çok önemli bir rol oynar. Bu kaplamaların etkinliği, bileşimleri, yapıları ve maruz kaldıkları belirli çevresel koşullar da dahil olmak üzere çeşitli faktörlerden etkilenir. Malzeme bilimindeki son gelişmeler, sadece pasif koruma sağlamakla kalmayıp aynı zamanda korozyon önleme ve kendi kendini iyileştirme yetenekleri için aktif mekanizmalar içeren yenilikçi kaplamaların geliştirilmesine yol açmıştır.

Korozyon korumasındaki önemli gelişmelerden biri, galvanizli çelik üzerindeki epoksi kaplamaların koruyucu özelliklerini geliştirdiği gösterilen katmanlı çift hidroksit (LDH) kaplamaların kullanılmasıdır. Amanian vd. (2022), LDH kaplamaların dielektrik özellikleri ve yük transfer direncini geliştirdiğini ve işlenmemiş yüzeylere kıyasla üstün korozyon koruması sağladığını göstermiştir. Çalışma, klorür iyonlarının LDH yapısı içinde hapsedilmesinin, özellikle korozif ortamlara uzun süre maruz kaldıktan sonra bu kaplamaların gelişmiş performansına katkıda bulunduğunu vurgulamıştır. Bu bulgu, malzeme seçiminin önemini ve optimum korozyon direnci elde etmek için farklı malzemelerin güçlü yanlarından yararlanan hibrit kaplama sistemlerinin potansiyelini vurgulamaktadır.

LDH kaplamalara ek olarak, nanomalzemelerin koruyucu kaplamalara dahil edilmesi, bariyer özelliklerini geliştirmek için umut verici bir strateji olarak ortaya çıkmıştır. Wang vd. (2021) kompozit kaplamalarda nano dolgu maddesi olarak çok katmanlı molibden disülfür (MoS_2) kullanımını araştırmış ve tuzlu ortamlarda pirinç alt

tabakaların korozyonunu önlemede dikkate değer bir etkinlik göstermiştir. Çalışma, daha yüksek MoS_2 konsantrasyonlarına sahip kaplamaların minimum korozyon ürünü oluşumu sergilediğini ve bunun da korozif ajanlara karşı etkili bariyerler olarak hareket etme kabiliyetlerini gösterdiğini ortaya koymuştur. Bu durum, zorlu ortamlarda metal bileşenlerin ömrünü önemli ölçüde uzatabilecek gelişmiş kaplamaların geliştirilmesinde nanoteknolojinin potansiyelini vurgulamaktadır.

Termal sprej kaplamalar (Şekil 2.3), özellikle de yüksek hızlı oksijen-yakıt (HVOF) ve yüksek hızlı hava-yakıt (HVOF) prosesleriyle üretilenler, korozyon dirençleri açısından da incelenmiştir. Liu (2017), bu yöntemlerle üretilen WC-Co-Cr kaplamaların aşınma ve korozyon davranışları üzerine karşılaştırmalı bir çalışma yürütmüş ve kaplama yüzeyinde kompakt bir krom oksit tabakası oluşumunun korozyon direncini önemli ölçüde artırdığını tespit etmiştir. Krom tarafından oluşturulan pasif oksit filmi, koruyucu bir bariyer görevi görerek korozyon süreçlerini etkili bir şekilde azaltmaktadır. Bu çalışma, kaplama mikroyapısının ve bileşiminin korozyon performansını belirlemedeki kritik rolünü göstermektedir.



Şekil 2.3 Termal sprej kaplama (Thandapani vd. 2018).

Rocha vd. (2004), termal sprej kaplamaların gözenekliliğinin, aşındırıcı maddelerin nüfuz etmesi için yollar oluşturabileceğini ve bunun da alt tabakanın iç korozyonuna yol açabileceğini belirtmiştir. Bununla birlikte, dubleks kaplamalar kullanılarak, iç katman korozif türlere karşı ek koruma sağlarken dış katman bir bariyer görevi

görebileceğinden, koruyucu yetenekler önemli ölçüde geliştirilebilir. Bu yaklaşım, kaplama etkileşimlerinin ve bunların korozyon direnci üzerindeki etkilerinin kapsamlı bir şekilde anlaşılması ihtiyacını vurgulamaktadır.

Korozyon inhibitörleri ile yüklü nanotaşıyıcıları kullanan aktif korozyon koruma sistemleri, kaplama alanında bir başka yenilikçi yaklaşımı temsil etmektedir. Castaldo vd. (2020), çevresel uyaranlara yanıt olarak iyi bilinen bir korozyon inhibitörü olan benzotriazol salabilen mezogözenekli silika nanopartiküllerinin geliştirilmesini tartışmıştır. Bu aktif salım mekanizması, özellikle korozyona eğilimli ortamlarda metal yüzeylerin sürekli olarak korunmasını sağlar.

Kaplamaların yapışma ve antikoroziv özellikleri de etkinliklerini etkileyen kritik faktörlerdir. Hırvatistan İnşaat Mühendisleri Birliği tarafından yapılan bir araştırma, astar kaplamaların son kat kaplamaların yapışmasını artırmadaki önemini vurgulamış ve bunun da kaplama sisteminin genel performansını doğrudan etkilediğini ortaya koymuştur. Çevre dostu su bazlı kaplamalar, çevresel etkiyi en aza indirirken etkili korozyon koruması sağlayan uygun bir alternatif olarak ortaya çıkmıştır. Nanoteknolojinin hızlı gelişimi, mikro çatlakları kendi kendine onarabilen kaplamaların oluşturulmasını kolaylaştırarak uzun ömürlülüklerini ve etkinliklerini daha da artırmıştır.

Epoksi kaplamalar, mükemmel bariyer özellikleri ve maliyet etkinliği nedeniyle korozyon koruması için popüler bir seçim olmaya devam etmektedir. Liu vd. (2022), epoksi kaplamalarda grafen oksit ve fonksiyonel mezogözenekli silika nanopartiküllerinin kullanımını araştırmış, bu da sadece korozyon direncini artırmakla kalmamış, aynı zamanda korozyon inhibitörlerinin kontrollü salınımına da izin vermiştir.

Süperhidrofobik kaplamaların kullanımı da korozyonu azaltma potansiyelleri açısından araştırılmıştır. Haji-Savameri vd. (2022), süperhidrofobik politetrafloroetilen (PTFE) ve nanosilika kaplamaların, su ve aşındırıcı maddelerin yüzeye yapışmasını önleyen düşük yüzey enerjileri nedeniyle mükemmel korozyon direnci sergilediğini bildirmiştir. Bu

yaklaşım, koruyucu kaplamaların etkinliğini belirlemede yüzey özelliklerinin önemini vurgulamaktadır.

Hasarı otonom olarak onarabilen kendi kendini iyileştiren kaplamalar, korozyon koruması için yeni bir çözüm olarak geliştirilmektedir. Zheludkevich vd. (2007) tarafından yapılan araştırma, korozyona karşı uzun vadeli koruma sağlamak için korozyon inhibitörleriyle dolu nanokapların kaplama sistemlerine dahil edilmesinin önemini vurgulamıştır.

Korozyonun ve buna bağlı koruyucu önlemlerin ekonomik etkileri göz ardı edilemez. Hou vd. (2017) tarafından yapılan bir araştırmaya göre, çeşitli endüstrilerdeki korozyon maliyetleri, mali kayıpları azaltmak için etkili koruyucu kaplamalara duyulan ihtiyacı vurgulamaktadır. Güvenilir ve uzun ömürlü koruma sağlayan gelişmiş kaplamaların geliştirilmesi, bu maliyetlerin azaltılması ve metal yapıların sürdürülebilirliğinin sağlanması için gereklidir.

Kaplamaların korozyondan korunmadaki rolü çok yönlüdür ve bariyer özelliklerini geliştiren, aktif koruma mekanizmaları içeren ve yenilikçi malzemeler kullanan çeşitli stratejileri kapsar. Nanoteknoloji, akıllı malzemeler ve kendi kendini iyileştirme özelliklerinin kaplama sistemlerine entegrasyonu, bu alanda önemli bir ilerlemeyi temsil etmekte ve çeşitli ortamlarda korozyonun azaltılması için umut verici çözümler sunmaktadır. Bu alanda devam eden araştırma ve geliştirmeler, korozyonun yarattığı zorlukların üstesinden gelmek ve metal yapıların uzun ömürlü ve güvenilir olmasını sağlamak için çok önemlidir.

2.2.1 Silan Bileşiklerinin Korozyon Önleyici Kaplamalardaki Rolü

Silan bileşiklerinin anti-korozyon kaplamalarındaki rolü, son yıllarda benzersiz özellikleri ve çeşitli alt tabakaların korozyonlu ortamlara karşı dayanıklılığını artırmadaki etkinliği nedeniyle önemli bir ilgi görmüştür. Silan bileşenleri, özellikle organosilanlar, metal yüzeyleriyle kovalent bağlar oluşturma yetenekleri sayesinde, önemli ölçüde korozyon oranlarını azaltan koruyucu bir bariyer oluşturmalarıyla tanınır.

Silan bileşenleri, düşük toksisite ve mükemmel yapışma özellikleri ile karakterizedir, bu da etkili korozyon koruması için çok önemlidir. Silan bazlı kaplamaların uygulanması sırasında, silane molekülleri ile alt tabaka arasında güçlü kovalent bağlar oluşur, bu da kaplamanın koruyucu özelliklerini artırır (Kucharczyk vd. 2021).

Silanizasyon süreci genellikle hidrolizi içerir; burada silan, suyla reaksiyona girerek substrat yüzeyine bağlanabilen silanol grupları oluşturur ve bu da yoğun bir siloksan ağı oluşumuna yol açar, bu da korozif maddelerin penetrasyonunu engeller (Zhou vd. 2012). Bu ağ yapısı, korozyona katkıda bulunan başlıca faktörler olan nem ve agresif iyonlara karşı bir bariyer sağlamada kritik öneme sahiptir. Silane kaplamalarının etkinliği, mekanik özellikleri ve korozyon direncini artıran nanopartiküller, metal iyonlar veya fonksiyonel grafen oksit gibi çeşitli katkı maddelerini entegre etme yetenekleri sayesinde daha da artırılmaktadır (Parhizkar vd. 2017). Örneğin, silanize grafen oksit nano tabakaların silan kaplamalarına eklenmesi, bariyer özelliklerini önemli ölçüde artırarak genel korozyon korumasını iyileştirdiği gösterilmiştir (Balan vd. 2013). Bu hibrit yaklaşım, kaplamayı güçlendirmekle kalmaz, aynı zamanda korozyon reaksiyonlarının engellenmesi için ek alanlar sağlar, silan bileşiklerinin gelişmiş korozyon önleyici çözümler formüle etmedeki çok yönlülüğünü sergiler. Belirli malzemeler bağlamında, silan kaplamaları alüminyum alaşımları, magnezyum alaşımları ve çelik alt tabakalarındaki uygulamaları için kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Alüminyum alaşımları için, silan işlemleri, korozif ortamlarda anodik çözünmeyi engelleyen koruyucu bir tabaka oluşturarak korozyon direncini artırdığını göstermiştir (Jiang vd. 2015). Benzer şekilde, magnezyum alaşımları için silan bazlı kaplamaların, özellikle anodizasyon veya elektrokimyasal işlemler gibi diğer koruyucu yöntemlerle birleştirildiğinde, korozyon direncini artırmada etkili olduğu kanıtlanmıştır (Liu 2024). Bu tedavilerin sinerjik etkileri, silan bileşiklerinin çeşitli metalurjik bağlamlardaki uyum yeteneğini vurgulamaktadır. Ayrıca, silan bileşiklerinin epoksi kaplamalara dahil edilmesi, alüminyum alaşımlarının dayanıklılığını ve korozyon direncini artırmada umut verici sonuçlar göstermiştir.

Çalışmalar, silan ile modifiye edilmiş epoksi sistemlerinin, su alımının azalması ve yapışma özelliklerinin iyileşmesi nedeniyle, korozyonlu koşullar altında kaplamanın

bütünlüğünü korumak için kritik olan üstün performans sergilediğini göstermektedir (Niknahad vd. 2016). Silanların polimer matrisini modifiye etme yeteneği, yalnızca bariyer özelliklerini artırmakla kalmaz, aynı zamanda kaplama sisteminin ömrüne de katkıda bulunur. Silane kaplamalarının elektrokimyasal davranışı, koruyucu mekanizmalarını anlamada odak noktası olmuştur. Elektrokimyasal empedans spektroskopisi (EIS) çalışmaları, silan kaplamalarının yüksek empedans değerleri sergilediğini, bu durumun iyonik taşınımı engelleme ve korozyon oranlarını azaltma konusundaki etkinliklerini gösterdiğini ortaya koymuştur (Calabrese vd. 2016). Empedans spektrumu analizi, silan filmlerinin kapasitif bariyerler olarak işlev gördüğü ve bu durumun agresif ortamlarda etkili korozyon koruması için gerekli olduğu fikrini daha da desteklemektedir. Koruyucu özelliklerinin yanı sıra, silan bileşikler de çevresel faydalar sunar çünkü geleneksel kromat dönüşüm kaplamalarına alternatif olarak hizmet edebilirler, bu kaplamalar toksisitesi ve çevresel tehlikeleri ile bilinir (Zaferani vd. 2012).

Silan bazlı kaplamaların çevre dostu alternatifler olarak geliştirilmesi, yalnızca düzenleyici endişeleri gidermekle kalmaz, aynı zamanda korozyon yönetiminde sürdürülebilir uygulamaları da teşvik eder. Son zamanlarda silan teknolojisindeki gelişmeler, silanların faydalarını zeolitler veya nadir toprak tuzları gibi diğer malzemelerle birleştiren hibrit silan kaplamalarının keşfine yol açmıştır ve bu kaplamalar korozyon direncini daha da artırmaktadır (Calabrese vd. 2018).

Silan bileşiklerinin, özellikle 3-aminopropiltrietoksisilan (APTES) ve glisidoksiopilttrimetoksisilanın (GPTMS) korozyon önleyici kaplamalardaki rolü, benzersiz kimyasal özellikleri ve işlevselleştirme yetenekleri nedeniyle son yıllarda büyük ilgi görmüştür.

3-APTES, metal yüzeyler üzerindeki kaplamaların yapışma özelliklerini geliştirme kabiliyeti ile yaygın olarak tanınmaktadır. Korozyon önleyici sistemlerin dayanıklılığı için çok önemli olan organik kaplamalar ve inorganik yüzeyler arasındaki bağlanmayı destekleyen bir bağlayıcı madde olarak işlev görür. Çalışmalar 3-APTES'in epoksi reçineler ve metal yüzeyler arasındaki arayüzey yapışmasını önemli ölçüde iyileştirerek

korozyon oranlarının düşmesine yol açtığını göstermiştir. Örneğin, 3-APTES'in epoksi kaplamalara dahil edilmesinin korozyon oranlarını 0,004 mm/yıl'a kadar düşürdüğü ve korozyon inhibitörü olarak etkinliğini gösterdiği gözlemlenmiştir (Ahmad 2023).

Ayrıca, yüzeylerin 3-APTES ile işlevselleştirilmesi, ek koruyucu katmanlar sağlayan kendi kendine monte edilmiş tek katmanların oluşmasına yol açabilir. 3-APTES'te bulunan amino grupları, grafen oksit gibi nanopartiküllerin bağlanmasını kolaylaştırarak kaplamaların korozyon direncini daha da artırabilir. Örneğin, 3-APTES ile modifiye edilmiş grafen oksit epoksi kaplamalara dahil edilmiş ve modifiye edilmiş grafenin yüksek yüzey alanı ve bariyer özelliklerine atfedilen korozyon akım yoğunluğunda önemli bir azalma ile sonuçlanmıştır (Krishnan vd. 2018). Bu sinerjik etki, 3-APTES'in gelişmiş korozyon önleyici kaplamaların geliştirilmesindeki önemini vurgulamaktadır.

Öte yandan GPTMS, çeşitli substratlarla reaksiyona girebilen ve kaplamaların mekanik özelliklerini geliştirebilen epoksi fonksiyonel grupları nedeniyle benzersiz özellikler sunar. GPTMS, kaplamaların hidrofobikliğini ve korozyon direncini artıran siloksan ağları oluşturmak için kullanılmıştır. GPTMS'nin kaplamalara dahil edilmesinin, nemli ortamlarda korozyonun önlenmesinde kritik öneme sahip olan dayanıklılıklarını ve neme karşı dirençlerini artırdığı gösterilmiştir. Bu durum özellikle GPTMS'nin korozyona karşı etkili koruma sağladığı kanıtlanan alüminyum alaşımları için geçerlidir (Lima vd. 2022).

GPTMS'nin hem silan hem de epoksi özelliklerini birleştiren ikili işlevselliği, gelişmiş mekanik ve kimyasal direnç sergileyen hibrit kaplamaların geliştirilmesine olanak tanır. Örneğin, GPTMS'nin diğer silanlarla birlikte kullanılmasının, korozif ajanlara karşı sağlam bir bariyer sağlayarak kaplamaların genel performansını artırdığı gösterilmiştir (Calabrese vd. 2016). Bu çok yönlülük, GPTMS'yi gelişmiş korozyon önleyici kaplamaların formülasyonunda değerli bir bileşen haline getirmektedir.

Ayrı ayrı katkılarına ek olarak, kaplamalarda 3-APTES ve GPTMS kombinasyonu sinerjik etkiler yoluyla gelişmiş performansa yol açabilir. 3-APTES'ten gelen amino gruplarının varlığı, GPTMS'den gelen epoksi gruplarıyla etkileşimi kolaylaştırarak daha

yapışkan ve dayanıklı bir kaplama yapısıyla sonuçlanabilir. Bu etkileşim kaplamanın genel yapışma ve mekanik özelliklerini iyileştirerek kaplamayı delaminasyon ve aşınmaya karşı daha dirençli hale getirebilir (Becchi vd. 2010). Ayrıca, her iki silanın da dahil edilmesi, zorlu ortamlardaki uygulamalar için gerekli olan kaplamaların termal stabilitesini artırabilir.

Silanla modifiye edilmiş kaplamaların elektrokimyasal özellikleri de kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Elektrokimyasal empedans spektroskopisi (EIS), silan kaplamaların korozyona karşı etkili bariyer özelliklerine işaret eden yüksek empedans değerleri sergileyebildiğini göstermiştir (Calabrese vd. 2015). Yoğun bir silan tabakasının oluşumu, korozyon türlerinin difüzyonunu önemli ölçüde azaltabilir ve böylece altta yatan alt tabakanın ömrünü uzatabilir. Bu, özellikle geleneksel kaplamaların başarısız olabileceği agresif ortamlara maruz kalan metaller için önemlidir (Zaferani vd. 2012).

Korozyon önleyici kaplamalarda silan bileşiklerinin kullanılmasının çevresel faydaları göz ardı edilemez. Endüstriler kromatlar gibi tehlikeli maddelerin yerini almaya çalıştıkça, silan filmler toksik olmayan yapıları ve etkili koruyucu özellikleri nedeniyle uygun bir alternatif olarak ortaya çıkmıştır (Zaferani vd. 2012).

Silan bileşikleri, özellikle 3-APTES ve GPTMS, korozyon önleyici kaplamaların performansını artırmada çok önemli bir rol oynamaktadır. Yapışmayı iyileştirme, koruyucu bariyerler oluşturma ve bir araya geldiklerinde sinerjik etkiler sağlama yetenekleri, onları korozyonla mücadelede çok değerli kılmaktadır. Uygulamaları ve modifikasyonları üzerine devam eden araştırmalar, çeşitli endüstriyel ortamlarda kaplamaların dayanıklılığını ve etkinliğini artırmak için yeni olasılıklar ortaya çıkarmaya devam etmektedir.

2.2.2 Metal İyon Katkılarının Korozyon Önleyici Kaplamalardaki Rolü

Metal iyon katkı maddeleri, bu kaplamaların koruyucu niteliklerini geliştiren çeşitli mekanizmalar sağlayarak korozyon önleyici kaplamaların performansını artırmada

önemli bir rol oynamaktadır. Metal iyonlarının katılımı, metal yüzeylerde koroziif maddelere karşı bariyer görevi gören koruyucu filmlerin oluşmasına yol açabilir. Örneğin, seryum iyonlarının kaplamaların dayanıklılığını artıran koruyucu filmlerin oluşumunu kolaylaştırdığı ve böylece korozyon önleyici özelliklerini geliştirdiği gösterilmiştir (Capri vd. 2015). Aşağıdaki başlıklarda bu tez çalışmasında kullanılan metal iyon, metal alkoksitler ve kullanıldıkları çalışmalardan örnekler verilmiştir.

2.2.2.1 Titanyum İçerikli Katkılar

Titanyum içeriğinin korozyon önleyici kaplamalardaki rolü, öncelikle titanyumun doğal özellikleri ve kolaylaştırdığı koruyucu mekanizmalar nedeniyle çok yönlüdür. Titanyum ve alaşımları, büyük ölçüde oksijen veya neme maruz kaldığında kararlı bir titanyum dioksit (TiO_2) tabakasının kendiliğinden oluşmasına atfedilen olağanüstü korozyon direnci ile tanınmaktadır. Kalınlığı tipik olarak 1,5 ila 10 nanometre arasında değişen bu oksit tabakası, deniz suyu ve klora maruz kalma gibi çukurlaşma ve çatlak korozyonuna eğilimli olanlar da dahil olmak üzere çeşitli ortamlarda titanyumun korozyon direncini önemli ölçüde artıran sağlam bir bariyer görevi görür (Ikeh 2024, Prando vd. 2017).

Özellikle plazma püskürtme gibi yöntemlerle titanyum kaplamaların uygulanması, korozyon koruması için yeni bir yaklaşım olarak ortaya çıkmıştır. Bu kaplamalar yalnızca titanyumun doğal korozyon direncinden yararlanmakla kalmıyor, aynı zamanda kaplamaların mikro yapısını ve gözenekliliğini optimize edebilen kontrollü biriktirme teknikleri yoluyla da geliştiriyor (Zhou ve Peng 2021, Zhou 2019). Örneğin, çalışmalar titanyum kaplamaların gözenekliliğinin korozyon performanslarını önemli ölçüde etkileyebileceğini ve daha düşük gözenekliliğin gelişmiş korozyon direnci ile ilişkili olduğunu göstermiştir (Hussain vd. 2010). Ayrıca, TiO_2 katkılı kaplamaların katkısız muadillerine kıyasla üstün anti-koroziif özellikler sergilediğini gösteren araştırmalarla kanıtlandığı üzere, titanyum dioksitin kompozit kaplamalara dahil edilmesinin korozyona karşı koruyucu özellikleri geliştirdiği gösterilmiştir (Burnat vd. 2020).

Titanyumun çeşitli katkı maddeleriyle uyumluluğu ve karmaşık kaplamalar oluşturma

kabiliyeti, anti-korozif özelliklerini daha da geliştirmektedir. Örneğin, kalsiyum ve gümüş iyonlarıyla çift katkılı titanyum dioksit kaplamaların mükemmel korozyon direnci sağladığı ve aynı zamanda biyouyumlu olduğu gösterilmiştir, bu da onları tıbbi uygulamalar için uygun hale getirmektedir (Burnat vd. 2020). Ayrıca, titanyumun niyobyum veya krom içerenler gibi çok bileşenli kaplamalara entegrasyonunun, özellikle zorlu ortamlarda korozyon direncini sinerjik olarak artırdığı bulunmuştur (Helleis vd. 2022, Mitoraj-Królikowska 2023).

Korozyon önleyici kaplamalardaki titanyum içeriği, koruyucu yeteneklerinin geliştirilmesinde kritik bir rol oynamaktadır. Kararlı bir TiO_2 tabakasının oluşumu, kaplama mikro yapılarının optimizasyonu ve diğer elementlerle doping potansiyeli, titanyum bazlı kaplamalarda gözlemlenen üstün korozyon direncine katkıda bulunur. Bu özellikler titanyumu çeşitli endüstrilerde, özellikle de korozyon direncinin çok önemli olduğu uygulamalarda paha biçilmez bir malzeme haline getirmektedir.

2.2.2.2 Çinko İçerikli Katkılar

Çinko, kurban edici özellikleri ve korozyon süreçlerini engelleyen koruyucu katmanlar oluşturma kabiliyeti nedeniyle korozyon önleyici kaplamalarda çok önemli bir rol oynar. Çinko bakımından zengin kaplamaların etkinliği, bileşimlerinden, özellikle de altta yatan çelik alt tabakaya sağlanan katodik koruma ile doğrudan ilişkili olan çinko içeriğinden önemli ölçüde etkilenir. Araştırmalar, katodik koruma mekanizmasını geliştirdikleri ve korozif ortamlarda kaplanmış metalin ömrünü uzattıkları için, ağırlıkça %60'ı aşan çinko içeriğine sahip kaplamaların önemli korozyon koruması elde etmek için en uygun olduğunu göstermektedir (Idora vd. 2014).

Çinkonun çeşitli ortamlardaki elektrokimyasal davranışı, koruyucu yeteneklerini daha da açıklığa kavuşturmaktadır. Örneğin, çinko kaplamadaki kusurları engelleyebilen korozyon ürünleri oluşturmak için tercihli olarak reaksiyona girer ve böylece kaplamanın bariyer özelliklerini geliştirir (Deyá 2013). Ayrıca, çinkonun magnezyum ve alüminyum gibi elementlerle alaşımının korozyon direncini artırdığı gösterilmiştir. Bu alaşım elementleri, korozyona yol açan elektrokimyasal reaksiyonları daha da

engelleyen daha az iletken korozyon ürünlerinin oluşumuna katkıda bulunur. Özellikle magnezyum, korozyon sırasında oluşan koruyucu tabakaların stabilitesini artırır; bu da lokal korozyonun meydana gelebileceği ortamlarda kritik öneme sahiptir (Thébault vd. 2015).

Ayrıca, kaplama uygulamasının türü çinko kaplamaların performansını önemli ölçüde etkilemektedir. Örneğin, çinko bakımından zengin boyaların kullanımı kapsamlı bir şekilde incelenmiş ve çinko pigmentinin hacim konsantrasyonunun kaplamanın koruyucu performansının önemli bir belirleyicisi olduğu ortaya çıkmıştır (Shon 2010). Çinkoyu CuO nanopartikülleri gibi diğer malzemelerle birleştiren hibrit kaplamaların uygulanması da araştırılmış ve gelişmiş korozyon direnci ve ek zehirli boya özellikleri gösterilmiştir (Boshkova vd. 2023). Bu hibrit yaklaşım sadece çinkonun kurban niteliğinden yararlanmakla kalmayıp aynı zamanda substratı hem korozyondan hem de biyolojik kirlenmeden daha fazla koruyabilen biyosidal etkiler de sunmaktadır.

Korozyon önleyici kaplamalarda çinkonun rolü çok yönlüdür; kurban niteliği, koruyucu korozyon ürünlerinin oluşumu ve diğer metallerle alışımdan elde edilen faydaları içerir. Çinko içeriğinin optimizasyonu ve hibrit kaplamaların geliştirilmesi, çeşitli çevresel koşullarda çelik yüzeylerin korozyon direncini arttırmak için temel stratejilerdir.

2.2.2.3 Zirkonyum İçerikli Katkılar

Korozyon önleyici kaplamalarda zirkonyum içeriğinin rolü çok yönlüdür ve kaplamaların yapısal bütünlüğünü, yapışma özelliklerini ve genel korozyon direncini önemli ölçüde etkiler. Zirkonyum bazlı kaplamaların, özellikle de zirkonyum oksitleri ve nitrürleri içerenlerin, alttaki alt tabakayı koroziif ortamlardan koruyan kararlı oksit tabakaları oluşturma yetenekleri nedeniyle yüksek korozyon direnci sergiledikleri gösterilmiştir (Xu vd. 2015). Bu kaplamaların etkinliği genellikle koroziif türlerin girişini engelleyen ve böylece kaplanmış malzemelerin uzun ömürlülüğünü artıran bariyer özelliklerine bağlanmaktadır.

Araştırmalar, zirkonyumun hibrit sol-jel kaplamalara dahil edilmesinin korozyon

direncini önemli ölçüde artırabileceğini göstermektedir. Örneğin, çalışmalar bir silikat sol-jel matrisi içindeki zirkonyum konsantrasyonunun değişmesinin yoğunlaşma sürecini ve dolayısıyla kaplamaların korozyon direncini etkilediğini göstermiştir (Bahrami vd. 2015). Özellikle, dengeli bir zirkonyum içeriği, kaplamanın mekanik özelliklerini ve alt tabakaya yapışmasını artıran, böylece delaminasyon ve müteakip korozyon olasılığını azaltan optimum ağ oluşumuna yol açar (Menu vd. 2018). Zirkonyumun varlığı sadece korozyona karşı fiziksel bariyere katkıda bulunmakla kalmaz, aynı zamanda kaplamaların kimyasal stabilitesini de artırarak onları otomotiv ve havacılık endüstrileri de dahil olmak üzere çeşitli uygulamalar için uygun hale getirir (Doerre vd. 2018).

Ayrıca, hibrit kaplamalarda zirkonyum ve diğer elementler arasındaki etkileşimin korozyon korumasını daha da artırdığı gösterilmiştir. Örneğin, sol-jel formülasyonlarında zirkonyumun alüminyum ve silikon öncülleri ile kombinasyonunun yapışmayı ve dayanıklılığı artırdığı ve bunun sonucunda zorlu çevre koşullarına dayanabilen kaplamalar elde edildiği bildirilmiştir (Menu vd. 2018). Bu elementlerin sinerjik etkisi, agresif koroziv ortamlara maruz kalan uygulamalar için çok önemli olan daha sağlam bir kaplama yapısına yol açmaktadır.

Hibrit kaplamalardaki rolünün yanı sıra zirkonyum, alüminyum ve çelik gibi metallerin korozyon direncini artırmak için uygulanan dönüşüm kaplamalarında da önemli bir rol oynamaktadır. Zirkonyum dönüşüm kaplamaları, geleneksel kromat kaplamalara kıyasla düşük toksisiteleri ve çevre dostu olmaları nedeniyle çeşitli endüstriyel uygulamalarda cazip bir alternatif olarak dikkat çekmektedir (Doerre vd. 2018). Bu kaplamaların etkinliği, genellikle korozyona karşı mükemmel koruma sağlarken aynı zamanda sonraki boya katmanları için daha iyi yapışmayı kolaylaştıran ince, yapışkan bir tabaka oluşturma yetenekleriyle artırılır (Cristaudo vd. 2021).

Zirkonyumun korozyon önleyici kaplamalara dahil edilmesi, koruyucu özelliklerinin geliştirilmesi için kritik öneme sahiptir. Optimum zirkonyum içeriği sadece kaplamaların yapısal bütünlüğünü ve yapışmasını iyileştirmekle kalmaz, aynı zamanda korozyon direncini de önemli ölçüde artırarak malzeme dayanıklılığının çok önemli

olduğu endüstrilerde çok çeşitli uygulamalar için uygun hale getirir.

2.2.2.4 Seryum İçerikli Katkılar

Seryumun korozyon önleyici kaplamalara dahil edilmesi, çeşitli alt tabakalarda korozyon direncini artırma üzerindeki yararlı etkileri nedeniyle büyük ilgi görmüştür. Nadir bir toprak elementi olan seryum, korozif ortamlara karşı koruyucu bariyer görevi gören kararlı oksitler ve hidroksitler oluşturma kabiliyetiyle tanınmaktadır. Bu özellik, toksisitesi ve çevresel tehlikeleri ile bilinen geleneksel kromat bazlı kaplamalara çevre dostu alternatiflerin geliştirilmesinde özellikle avantajlıdır (Cambon vd. 2012).

Araştırmalar, kaplamalardaki seryum konsantrasyonunun korozyon direncini belirlemede çok önemli bir rol oynadığını göstermektedir. Örneğin, çalışmalar artan seryum içeriğinin metal yüzeylerde koruyucu film oluşumunu artırabildiğini ve böylece kaplamaların dayanıklılığını ve kendi kendini onarma yeteneklerini geliştirdiğini göstermiştir (Capri vd. 2015, Miao vd. 2014). Özellikle seryum iyonları, anodik filmdeki mikro gözenekleri dolduran çökelti oluşturarak anodize alüminyum alaşımlarının korozyon direncini artıran bir seryum dönüşüm tabakasının oluşumuna katkıda bulunur (Queiroz vd. 2023, Wang 2024). Bu mekanizma sadece katodik reaksiyonu engellemekle kalmaz, aynı zamanda alt tabakanın genel korozyon oranını da azaltır (Curioni vd. 2011).

Elektrokimyasal empedans spektroskopisi (EIS) seryum içeren kaplamaların etkinliğini değerlendirmek için yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu teknik, korozyon süreçlerinin kinetiğinin ve çeşitli kaplama sistemlerinin koruyucu performansının değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır. Örneğin, seryum bazlı kaplamaların katkısız sistemlere kıyasla önemli ölçüde daha düşük empedans değerleri sergilediği ve bunun da üstün korozyon korumasına işaret ettiği gözlemlenmiştir (Sanjabi 2011). Ayrıca, kaplamaların bariyer özelliklerini daha da geliştirmek için seryumun silanlar veya zeolitler gibi diğer malzemelerle sinerjik etkileri araştırılmıştır (Capri vd. 2015).

Seryumun korozyon önleyici rolü kaplamalardaki varlığıyla sınırlı değildir; genel

performansı artırmak için kaplama matrisindeki diğer bileşenlerle de etkileşime girebilir. Örneğin, seryumun polietilen glikol (PEG) ile kombinasyonunun, yumuşak çeliğin klorür çözeltilerindeki korozyon inhibisyonunu arttırdığı gösterilmiştir. Benzer şekilde, seryumun nikel-fosfor kaplamalara dahil edilmesi, çeşitli kaplama uygulamalarında seryumun çok yönlülüğünü vurgulayarak gözeneklilik ve korozyon oranlarında bir azalma olduğunu göstermiştir (Chuan-qi vd. 2015).

Özetle, seryumun korozyon önleyici kaplamalardaki rolü çok yönlüdür; koruyucu katmanların oluşumunu, bariyer özelliklerinin geliştirilmesini ve genel korozyon direncini artırmak için diğer malzemelerle etkileşimi içerir. Çevre dostu profili, seryumu geleneksel korozyon inhibitörlerine umut verici bir alternatif olarak konumlandırmakta ve malzeme bilimi alanında devam eden araştırma ve geliştirmelerin odak noktası haline getirmektedir.

2.2.3 Metal Altlıklar Üzerinde Kaplama Yöntemleri

Metal alt tabakalar üzerindeki kaplama yöntemleri, havacılık, otomotiv ve biyomedikal alanlar da dahil olmak üzere çeşitli uygulamalarda kullanılan malzemelerin performans özelliklerinin geliştirilmesinde kritik öneme sahiptir. Kaplama tekniğinin seçimi, alt tabakanın aşınma direnci, korozyon direnci ve genel dayanıklılık gibi özelliklerini önemli ölçüde etkiler. Bu yanıt, metal alt tabakalara uygulanabilen farklı kaplama yöntemlerine, bunların mekanizmalarına ve sonuçta ortaya çıkan özelliklere kapsamlı bir genel bakış sağlamak için çeşitli çalışmaları sentezlemektedir.

En yaygın kullanılan kaplama yöntemlerinden biri, metal alt tabakaların tribolojik özelliklerini önemli ölçüde iyileştirdiği gösterilen Yüksek Hızlı Oksijen Yakıtı (HVOF) püskürtmedir. Örneğin, Cho vd. (2012) tungsten karbür (WC) metal tozunun manyetik yatak mili malzemeleri üzerine HVOF ile kaplanmasının sürtünme katsayısını oda sıcaklığında 0,52'den 0,36'ya ve 450°C'lik yüksek sıcaklıklarda 0,31'e düşürdüğünü göstererek kaplama işlemi sayesinde aşınma direncinde önemli bir artış olduğunu ortaya koymuştur. Benzer şekilde, Chun vd. (2015) Inconel 718 üzerindeki HVOF kaplamaların sadece aşınma direncini iyileştirmekle kalmadığını, aynı zamanda

özellikle lazer ısıtma işlemiyle birleştirildiğinde korozyon direncini de arttırdığını bildirmiştir. HVOF kaplama ve müteakip ısıtma işleminin sinerjik etkisi, aşırı koşullar altında yüksek performans gerektiren uygulamalar için çok önemlidir.

Elektro kaplama, metal alt tabakalarına kaplama uygulamak için yaygın bir yöntemdir, özellikle estetik özellikleri ve korozyon direncini artırmak için. Bu süreç, elektrokimyasal reaksiyonlar yoluyla bir alt tabakaya metal tabakası yerleştirilmesini içerir. Örneğin, Hyie (2023)'nin çalışması, elektro kaplama öncesinde yüzey ön işlemlerin önemini vurgular; bu, kaplamanın ıslaklığını ve yapışmasını önemli ölçüde artırarak daha homojen ve sağlam bir tabaka oluşmasını sağlar. Bu ön işlem genellikle, alt tabakayı optimal kaplama performansı için hazırlayan temizlik, parlatma ve aktivasyon süreçlerini içerir. Ayrıca, elektroform edilmiş metalik malzemelerin birikimini araştıran Hayashi vd. (2016) vurguladığı gibi, kaplamaların mekanik özellikleri elektro kaplama parametrelerinin dikkatli kontrolü ile artırılabilir. Ancak, mekanik özelliklerin iyileştirilmesiyle ilgili spesifik iddiaların, atıfta bulunulan çalışmadan daha fazla doğrulama gerektirdiği belirtilmelidir.

Ateşleme termal püskürtme, özellikle korozyon koruması için metalik kaplamaların uygulanmasında başka bir etkili tekniktir. Jang vd. (2020), bu yöntemle uygulanan çeşitli metalik kaplamaların elektromanyetik koruma performansını araştırdı ve kaplamalardaki gözeneklilik ve kusurların iletkenlikleri ve genel performansları üzerinde önemli bir etkisi olduğunu belirtti. Kaplamaların mikro yapısını işlem parametreleri aracılığıyla özelleştirme yeteneği, fonksiyonel özelliklerinin optimize edilmesini sağlar ve ark termal püskürtme işlemini çeşitli uygulamalar için çok yönlü bir seçenek haline getirir.

Geleneksel yöntemlere ek olarak, elektroforetik tortulama (EPD) gibi ileri teknikler, basitlikleri ve düzgün kaplamalar elde etme konusundaki etkinlikleri nedeniyle ilgi görmüştür. Charlena vd. (2017), EPD kullanarak titanyum alaşımlarında hidroksiapatit-kitosan kompozit kaplamalarının uygulanmasını gösterdiler ve bu kaplamalar mükemmel biyouyumluluk ve yapışma özellikleri sağladı. EPD süreci, kaplama kalınlığı ve homojenliği üzerinde hassas kontrol sağlar, bu da yüzey özelliklerinin en

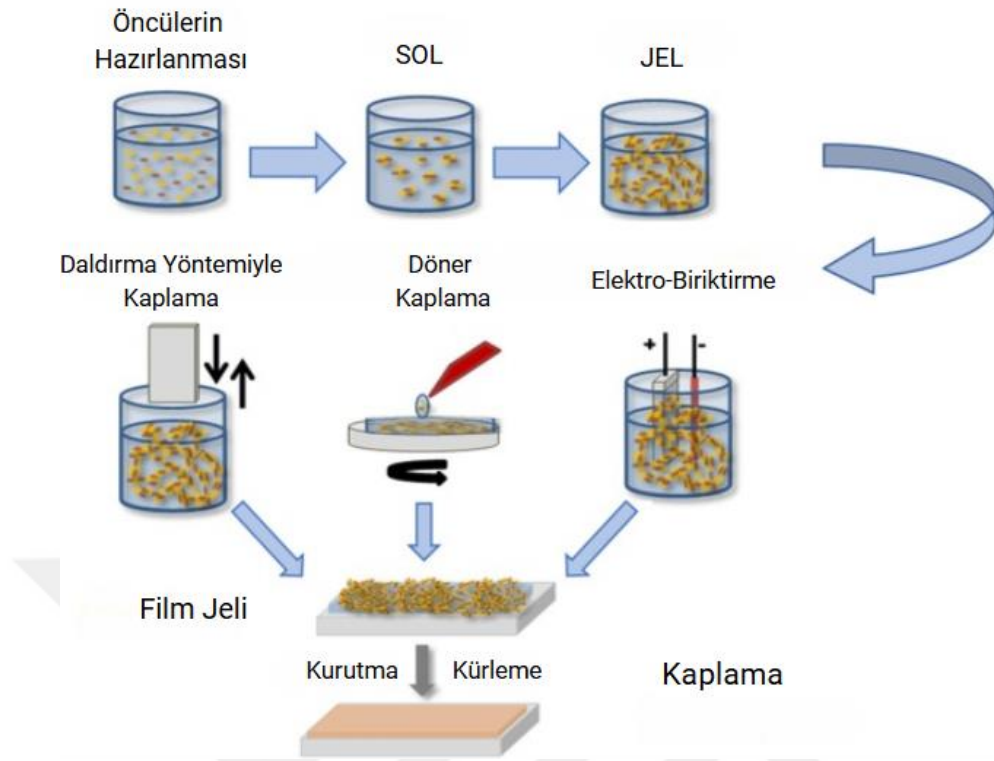
önemli olduğu biyomedikal uygulamalar için özellikle uygundur.

Nanoyapılı kaplamalar da, özellikle metal alt tabakalarının korozyon önleyici özelliklerini artırmada önemli bir araştırma alanı olarak ortaya çıkmıştır. Liu vd. (2022), sadece korozyon direnci sağlamakla kalmayıp aynı zamanda enerji toplama uygulamaları için triboelektrik özellikler sergileyen TiO₂ nanotüp kaplamalarının kullanımını tartıştılar. Nanoyapıların kaplamalara dahil edilmesi, mekanik özelliklerin ve fonksiyonel karakteristiklerin iyileşmesine yol açabilir, böylece kaplanmış metal alt tabakalarının potansiyel uygulamalarını genişletebilir.

Bir diğer yöntem, sol – jel yöntemi; metal alkoksit, su ve alkol içeren çözeltiler ile çalışan kimyasal bir yöntemdir. Sol jel yöntemi son yirmi yıldır üzerinde çalışılan bir seramik üretim yöntemi olup, kelime anlamıyla solüsyon-jelleşme (solution-gelation) kelimelerinin kısaltılışı olarak kullanılmaktadır. Bu yöntem seramik üretiminde kullanılan kimyasal bir prosestir. Bir solüsyonun veya süspansiyonun jelleşebildiği tüm sistemleri içermektedir. Jel, katı faz ile sıvı faz arasında ve ikisinin karışımı olan bir geçiş fazıdır (Evcin 2025).

Sol – jel prosesinin önemli bir yönü; kimyasal reaksiyonların kinetik kontrolü ile maddelerin alt yapısına etki etmesidir. Sol – jel prosesinin bu etkisi ile yeni maddeler üretmek; por morfolojisini, moleküler yapıyı değiştirmek; yüksek sıcaklık ve reaksiyonlarından kaçınmak mümkündür. Böylece maddelerin esas özellikleri değiştirilebilmektedir. Genelde yüksek performanslı polikristalin seramikler, çok iyi sinterleme, porsuz sık yapı, ince taneler, çok saf ve tane kompozisyonunda çok iyi tekdüzelik ile karakterize edildiğinde, mükemmel fonksiyonel özellikleri ortaya koyan yüksek mekanik güçlere sahiptirler (Evcin 2025).

Sol-jel süreci (Şekil 2.4), düşük sıcaklıklarda ve vakum koşullarına ihtiyaç duymadan kaplamalar oluşturma yeteneği sayesinde özellikle avantajlıdır, bu da onu alüminyum, magnezyum ve paslanmaz çelik gibi çeşitli alt tabakalar için uygun hale getirir (Hong vd. 2011).



Şekil 2.4 Sol-Jel kaplama yöntemi (Montazerian vd. 2023).

Sol-jel kaplamalarının birincil faydalarından biri, korozyon maddelerine karşı bir bariyer sağlama konusundaki etkinlikleridir. Örneğin, çalışmalar, sol-jel kaplamalarının genellikle yüksek reaktivite nedeniyle korozyona yatkın olan magnezyum alaşımlarının korozyon direncini önemli ölçüde artırabileceğini göstermiştir. Kaplamalar sadece fiziksel bir bariyer görevi görmekle kalmaz, aynı zamanda metal alt tabakasıyla kimyasal bağlanmayı da teşvik ederek yapışmayı ve genel dayanıklılığı artırır (Merino vd. 2022). Ayrıca, organik bileşiklerin ve inhibitörlerin sol-jel formülasyonlarına eklenmesi, kaplamaların koruyucu özelliklerini daha da artırabilir ve belirli uygulamalara bağlı olarak özelleştirilmiş çözümler sunabilir (González vd. 2019).

Ayrıca, sol-jel yöntemi çevresel faydalarıyla tanınır ve genellikle altı değerlikli krom gibi toksik maddeler içeren geleneksel kaplamalara daha güvenli bir alternatif sunar. Çevre dostu sol-jel kaplamalarının geliştirilmesi, malzeme bilimi alanındaki çağdaş sürdürülebilirlik hedefleriyle uyumlu olup, yüksek performanslı korozyon korumasını sürdürürken daha güvenli endüstriyel uygulamaları teşvik etmektedir. (Meiffren vd. 2011).

2.4 AISI 304 Paslanmaz Çelik Özellikleri ve Kullanım Alanları

AISI 304 paslanmaz çelik, östenitik krom-nikel alaşımı olarak, olağanüstü mekanik özellikleri ve korozyon direnci ile tanınır, bu da onu çeşitli endüstriyel uygulamalarda tercih edilen bir malzeme haline getirir. Bileşimi genellikle yaklaşık %18 krom ve %8 nikel içerir, bu da onun üstün şekil verilebilirliği ve dayanıklılığını, yüksek sıcaklıklarda bile sağlar (Anirudh 2023). AISI 304'ün benzersiz özellikleri, havacılık ve otomotiv üretimi gibi çeşitli sektörlerdeki uygulamalarında önemli bir faktör olan kaynaklanabilirliğine de uzanır (Tippayasam vd. 2020).

AISI 304 paslanmaz çeliğin mekanik özellikleri (Çizelge 2.1), yapısal uygulamalar için kritik öneme sahip olan yüksek çekme dayanımı ve akma dayanımı ile karakterizedir. Çalışmalar, AISI 304'ün yaklaşık 520 MPa çekme dayanımına ve yaklaşık 210 MPa akma dayanımına sahip olduğunu göstermiştir, bu da onu yük taşıyan uygulamalar için uygun hale getirmektedir (Anirudh 2023, Tippayasam vd. 2020).

Çizelge 2.1 AISI 304 çeliğin mekanik özellikleri (Lawrence vd. 2015).

Mekanik Özellik	Değer
Çekme Dayanımı (N/mm ²)	505
Akma Dayanımı (N/mm ²)	215
Uzama (%)	70
Elastisite Modülü (N/mm ²)	193000
Yoğunluk (kg/m ³)	8,03
Sertlik (HRC)	70

Ayrıca, malzemenin süneklik özelliği, karmaşık şekil ve formlar gerektiren uygulamalarda kritik olan, başarısızlıktan önce önemli deformasyonlar geçirmesine olanak tanır (Carrasco vd. 2019). Alaşımın yüksek sıcaklıklarda mekanik özelliklerini koruma yeteneği, özellikle termal stabilitenin çok önemli olduğu endüstrilerde, örneğin yüksek sıcaklık ortamları için bileşenlerin üretiminde faydalıdır (Yang 2023).

Korozyon direnci, AISI 304 paslanmaz çeliğin öne çıkan özelliklerinden biridir ve bu,

alttaki metali agresif ortamlardan koruyan pasif bir oksit tabakasının oluşumuna atfedilir. Bu özellik, tuzlu suya maruz kalmanın ciddi korozyona yol açabileceği deniz uygulamalarında özellikle hayati öneme sahiptir (Demirören 2021). Araştırmalar, AISI 304'ün klorür açısından zengin ortamlarda yaygın olan çukurlaşma ve yarık korozyonuna karşı mükemmel direnç gösterdiğini belirtmektedir. (Carrasco vd. 2019). Ancak, AISI 304 birçok aşındırıcı ortamda iyi performans gösterse de, klorür iyonlarına maruz kaldığında gerilme korozyon çatlağına (SCC) duyarlı olabileceği ve bu nedenle belirli uygulamalar için tasarım ve malzeme seçiminde dikkatli olunması gerektiği önemlidir (Demirören 2021).

Bu malzemenin çok yönlülüğü, otomotiv endüstrisine de uzanır; burada egzoz sistemleri ve dayanıklılık ile yüksek sıcaklıklara direnç gerektiren diğer bileşenlerde kullanılır. Ayrıca, AISI 304, çekici görünümü ve kararmaya karşı direnci nedeniyle mutfak aletleri ve çatal bıçak takımları gibi tüketim mallarının üretiminde giderek daha fazla kullanılmaktadır. (Anirudh 2023, Tippayasam vd. 2020, Al-Bakri vd. 2017).

AISI 304 paslanmaz çeliğin özellikleri ve uygulamaları üzerine devam eden araştırmalar, çeşitli koşullar altında performansına dair yeni bilgiler ortaya çıkarmaya devam ediyor. Örneğin, çalışmalar AISI 304'ün mikro yapısı ve mekanik özellikleri üzerindeki ısıtılma işlemin etkilerini incelemiş ve kontrollü ısıtılma işleminin dayanıklılığını ve şekil değiştirme yeteneğini artırabileceğini göstermiştir. Ayrıca, darbeli akım gaz tungsten ark kaynağı gibi kaynak teknolojilerindeki ilerlemeler, kaynaklı eklemlerin kalitesini artırmada ve kusurları azaltmada umut verici sonuçlar göstermiştir (Gauzzi vd. 2006). Bu gelişmeler, modern mühendislik uygulamalarında AISI 304 paslanmaz çeliğin potansiyelini en üst düzeye çıkarmada sürekli yeniliğin önemini vurgulamaktadır.

AISI 304 paslanmaz çeliğin üretimi ve yaşam döngüsünün çevresel etkisi, artan bir odak alanıdır. Alışımın geri dönüştürülebilirliği ve dayanıklılığı, sürdürülebilirlik profilini artırarak onu yeşil mühendislik uygulamaları bağlamında tercih edilen bir seçim haline getirir. Sanayiler karbon ayak izlerini azaltmaya çalışırken, uzun ömür ve geri dönüşüm imkanı sunan AISI 304 gibi malzemelerin kullanımı daha kritik hale geliyor (Hamidah

vd. 2018, Demirören 2021). Bu, atıkların azaltılması ve kaynak verimliliğinin maksimize edilmesine vurgu yapılan sürdürülebilir üretim ve döngüsel ekonomi yönündeki küresel eğilimlerle uyumludur.

Sonuç olarak, AISI 304 paslanmaz çelik, olağanüstü mekanik özellikleri, korozyon direnci ve imalattaki çok yönlülüğü sayesinde birçok endüstride tercih edilen bir malzeme olarak öne çıkmaktadır. Uygulamaları, zorlu ortamlardaki yapısal bileşenlerden estetik tüketici ürünlerine kadar uzanarak, çeşitli mühendislik zorluklarına olan uyumunu vurgular. Araştırmalar bu alایشım hakkındaki anlayışımızı geliştirmeye devam ettikçe, modern üretim ve mühendislikteki rolünün genişlemesi muhtemeldir, bu da yenilikçi uygulamalara ve mevcut kullanımlarda daha iyi performansa zemin hazırlayacaktır.

3. MATERYAL ve METOT

3.1 Deneysel Çalışmalar

Deney akış planı Şekil 3.1’de verilmiştir.



Şekil 3.1 Deney akış planı.

3.1.1 Kaplama Çözeltisi Reçetelerinin Oluşturulması

Korozyon dayanımını artırmak amacıyla hazırlanan kaplama reçetelerindeki bileşenler kullanım amaçları ile beraber aşağıda verilmiştir.

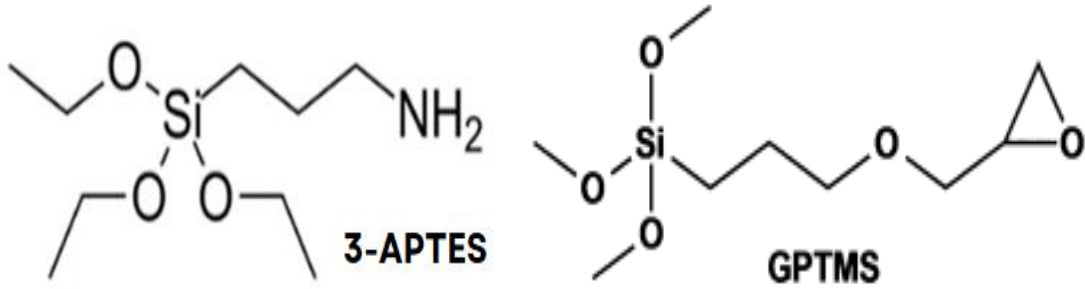
Sabit bileşenler:

3-Aminopropiltrietoksisilan (3-APTES) (Şekil 3.2):

- Silan bağlayıcı ajan olarak kullanılır.
- Kaplama ile metal yüzey arasında kimyasal bir bağ oluşturarak kaplamanın yüzeye daha iyi yapışmasını sağlar.
- Aynı zamanda organik ve inorganik malzemeler arasında bir köprü görevi görür.

3-Glisidoksipropiltrimetoksisilan (GPTMS) (Şekil 3.2):

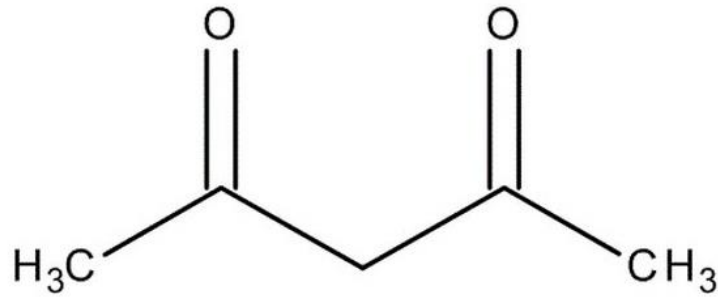
- Organik-inorganik hibrit kaplamaların hazırlanmasında kullanılan bir silan bağlayıcıdır.
- Epoksi fonksiyonel grubu sayesinde diğer bileşenlerle kimyasal reaksiyonlara girerek kaplamanın mekanik ve kimyasal dayanımını artırır.
- Kaplamanın korozyon direncine katkı sağlar.



Şekil 3.2 Kullanılan silanların kimyasal yapıları.

Asetil Aseton:

- Kompleks oluşturuca ajan olarak kullanılır.
- Metal iyonlarını stabilize ederek kaplama çözeltisindeki homojenliği artırır.
- Kaplamanın yapısında düzenlilik sağlar ve mekanik dayanımı iyileştirir.



Şekil 3.3 Asetil aseton kimyasal yapısı.

IPA (İzopropil Alkol):

- Çözücü olarak görev yapar.
- Malzemelerin homojen bir şekilde çözünmesini sağlar ve kaplama çözeltisinin viskozitesini kontrol eder.

Saf Su:

- Reçete hazırlanmasında pH dengesi ve hidroliz reaksiyonlarını kontrol etmek amacıyla kullanılır.
- Homojen bir kaplama filmi oluşumuna katkıda bulunur.

Değişken bileşenler:

Titanyum (IV) İzopropoksit ($Ti[OCH(CH_3)_2]$):

- İnorganik bir öncül olarak kullanılır ve kaplama matrisi içinde titanyum dioksit (TiO_2) oluşturur.
- Korozyon direncini artırır ve kaplamaya fotokatalitik özellik kazandırabilir.
- Sertlik ve mekanik dayanımı geliştirir.

Seryum Oksit (CeO):

- Korozyon inhibitörü olarak görev yapar.
- Seryum iyonlarının metal yüzeyde pasif bir tabaka oluşturarak korozyon sürecini yavaşlattığı bilinmektedir.
- Kaplamanın uzun süreli dayanımını artırır.

Çinko Asetat Dihidrat ($Zn(CH_3CO_2)_2 \cdot 2H_2O$):

- Kaplama içinde çinko bazlı koruyucu bir tabaka oluşumunu sağlar.
- Korozyon sırasında çinko iyonlarının çözünerek kurban anod etkisi göstermesi sayesinde metal yüzeyi korur.

Zirkonyum (IV) İzopropoksit:

- Kaplama içinde zirkonyum dioksit (ZrO_2) oluşumuna katkı sağlar.
- Kimyasal ve termal dayanımı artırır.
- Korozyona karşı bariyer özellikleri sağlar ve kaplamanın sertliğini artırır.

Çalışmada dört farklı reçete oluşturulmuştur. Oluşturulan reçeteler, kullanılan miktarlar ile beraber Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1 Hazırlanan reçeteler.

Reçete	IPA (ml)	GPTMS (ml)	3- APTES (ml)	Asetil Aseton (ml)	Zn Asetat (gr)	Titanyum İzopropoksit (gr)	Seryum Oksit (gr)	Zirkonyum İzopropoksit (gr)
A	15	0,5	0,5	0,75	0,25	-	-	-
B	15	0,5	0,5	0,75	-	0,25	-	-
C	15	0,5	0,5	0,75	-	-	0,25	-
D	15	0,5	0,5	0,75	-	-	-	0,25

3.1.2 Kaplama Çözeltilerinin Hazırlanması

Hazırlanan reçetelere göre öncelikle 0,25 gr GPTMS ve 0,25 gr 3-APTES, 15 ml IPA ile 6 saat boyunca 500 rpm hızda manyetik karıştırıcıda karıştırılmıştır. Sonrasında reçetelerdeki değişken bileşenler belirlenen miktarda eklenip 3 saat daha karışım işlemine devam edilmiştir. Son olarak çözeltilere belirlenen miktarlardaki Asetil Aseton eklenerek çözeltiler 3 saat daha karıştıktan sonra hazır hale gelmiştir (Şekil 3.4).



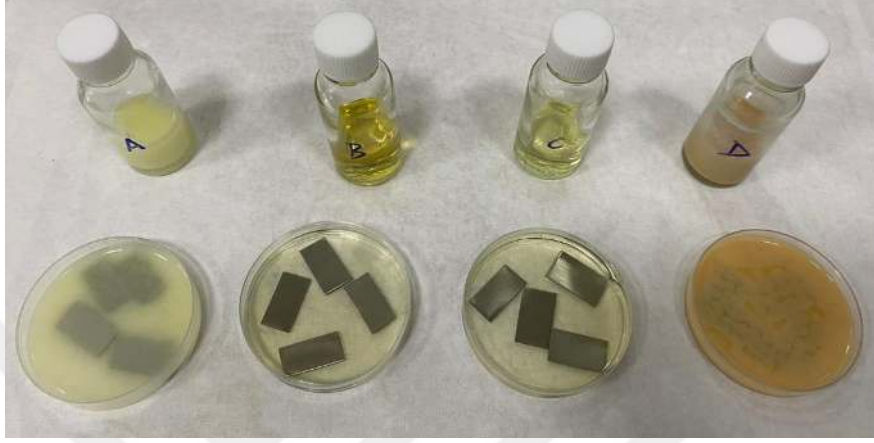
Şekil 3.4 Hazırlanan kaplama çözeltileri.

3.1.3 Metal Altlıkların Yüzey Aktivasyonu

Standart ölçülerde (5 cm x 5 cm) kesilmiş AISI 304 Çelik numuneler öncelikle 1 M'lık alkali çözeltisiyle (NaOH), sonrasında da 1 M'lık asidik çözeltiyle (HCl) ön muamele edilmiştir. Sonrasında numuneler su banyosunda bekletilerek ortam sıcaklığında kurutulmuştur.

3.1.4 Kaplama İşleminin Uygulanması

Yüzeyler aktive edilmiş numuneler hazırlanan çözeltilere daldırılarak kaplama işlemi gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.5).



Şekil 3.5 Daldırma yöntemiyle kaplama.

3.1.5 Isıl İşlem

Kaplanan AISI 304 numuneler 90° C’de 2 saat bekletilerek ısıtılarak ısıtılma işlemi tabii tutulmuştur (Şekil 3.6).



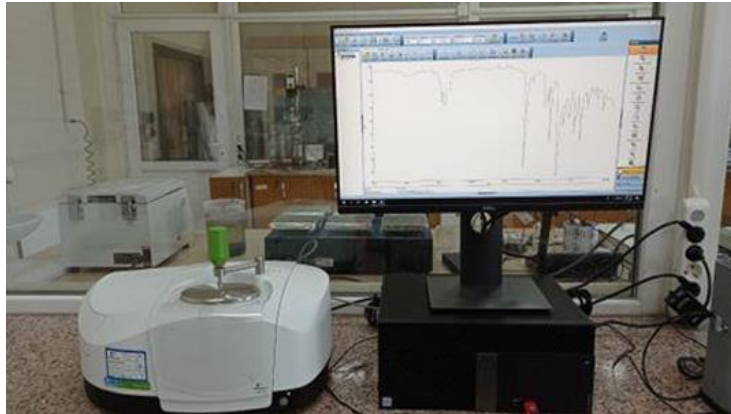
Şekil 3.6 Kaplanan numunelere ısıtılma işlemi uygulanması.

3.2 Karakterizasyon

A,B,C,D şeklinde kodlanmış çözeltilere ve bu çözeltilerle kaplanmış numunelere Mikroskop görüntüsü, FT-IR, Temas Açısı, Korozyon analizleri/ölçümleri yapılmıştır ve elde edilen sonuçlar kaplamasız referans (R) numuneye yapılan analiz/ölçüm sonuçları ile kıyaslanmıştır. Aşağıdaki başlıklarda yapılan karakterizasyon testleri detaylı şekilde anlatılmıştır.

3.2.1 FT-IR Analizi

Fourier Transform Infrared (FT-IR) analizi, çeşitli malzemelerin karakterizasyonu için kullanılan bir yöntemdir. Kızılötesi radyasyonun bir örnek tarafından soğurulmasının ölçümü prensibine bağlı olarak çalışır. Numune, geniş bir kızılötesi dalga boyu aralığına maruz bırakılır ve elde edilen spektrum, ölçülen sinyali Fourier'nin dönüştürmesiyle elde edilir. Bu spektrum, numunede bulunan fonksiyonel gruplar ve kimyasal bağlar hakkında bilgi sağlar (Prati vd. 2010). Çalışmalardaki analizler Perkin Elmer FT-IR cihazıyla yapılmıştır (Resim 3.1).

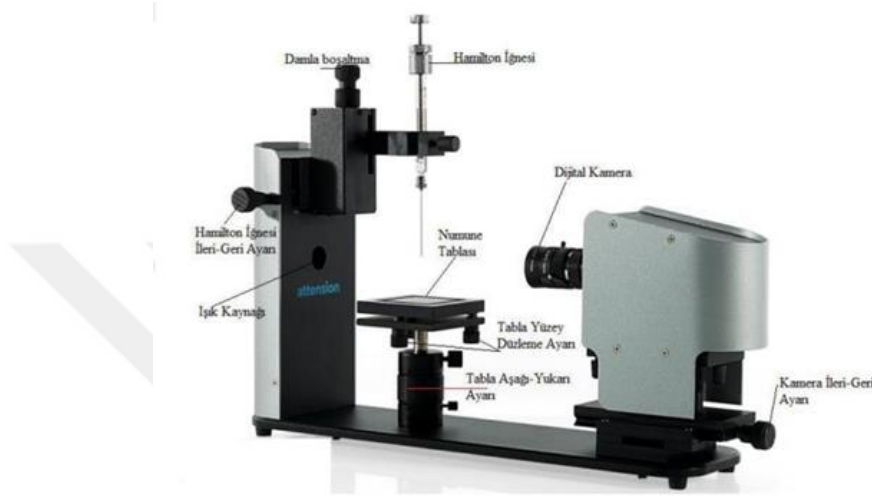


Resim 3.1 FT-IR ölçüm cihazı.

3.2.2 Temas Açısı

Temas açısı ölçümleri, kaplamasız ve etüvden çıkartılmış kaplamalı AISI 304 çelik numuneler üzerinde “KSV Attension” marka “ThetaLite TL 101 Optical Tensiometer” cihazıyla damla yayılımı (Sessile Drop) yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Bu cihaz,

yüzey gerilimi (veya enerjisi) belirli olan sıvının Hamilton mikro şırınga aracılığıyla katı numune yüzeyine damlatılarak bu damlanın katı yüzeyde oluşturduğu temas açısının optik kamera ile görüntüsünün alınması ve sonrasında bu görüntü üzerinde dijital gonyometre aracılığıyla temas açısının ölçülmesi prensibine dayanarak çalışmaktadır (Resim 3.2).

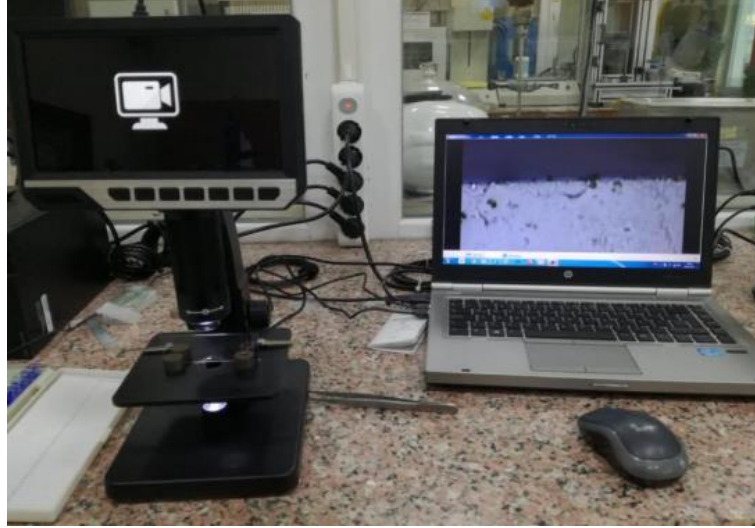


Resim 3.2 Temas açısı ölçüm cihazı.

Sıvı cam yüzeye damlatıldıktan hemen sonra (milisaniye aralıklarında) 10 farklı görüntüsü alınıp kaydedilir. Sonra alınan tüm görüntülerdeki su damlasının yüzeyle yaptığı temas açısı bulunur. Bu açı sıvı damlasının her iki yönde yaptığı açının ortalamasıdır. Sonrasında diğer görüntülerin de temas açıları ölçülerek bütün bu ölçümlerin aritmetik ortalaması alınır. Bu şekilde cam yüzeyinde farklı 3 noktadaki temas açısı bulunarak bu açıların tekrardan ortalaması alınır ve bu sayede o tablet numunesinin nihai temas açısı bulunur (Arsoy 2014).

3.2.3 Mikroskop Görüntüsü

Mikroskop görüntüleri için 7 Inch IPS High Definition Screen Industrial Digital Microscope marka dijital mikroskop kullanılmıştır. Deneyde kullanılan dijital mikroskop cihazı Resim 3.3'te verilmiştir. Dijital mikroskoplar cisimlerin, gözle görülmeyecek kadar küçük ayrıntılarının mercek altında büyütürken görüntünün incelenmesini sağlayan bir cihazlardır.



Resim 3.3 Dijital mikroskop.

3.2.4 Korozyon Ölçümleri

Kaplamaalı ve kaplamasız AISI 304 numunelerin korozyon testleri Atatürk Üniversitesi Doğu Anadolu Yüksek Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezinde “Gamry Series G750TM” cihazında yapılmıştır. Kullanılan korozyon hücresi Resim 3.4’te verilmiştir.



Resim 3.4 Gamry korozyon hücresi.

Yapılan test ağırlıkça %3.5 ve pH değeri 5.8 olan NaCl çözeltisi içerisinde 3 elektrot yöntemiyle gerçekleştirilmiştir. Düzenekte referans elektrot olarak Ag/AgCl ve

yardımcı elektrot olarak grafit çubuk tercih edilmiştir. Kaplamaların korozyon davranışları Gamry (Potentiodynamic polarizasyon) (Resim 3.5) ile incelenmiştir.

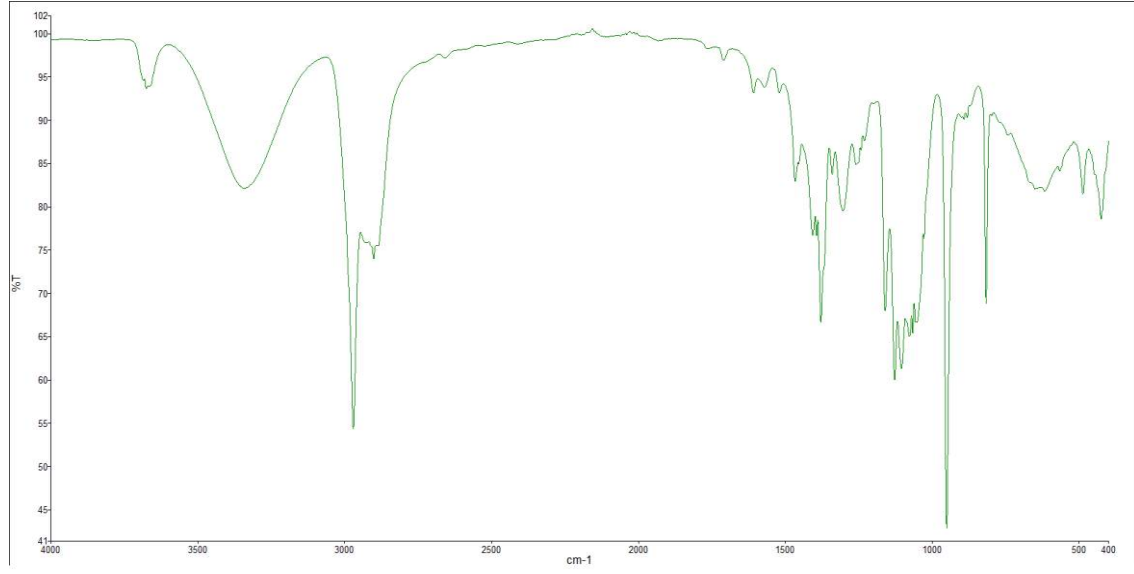


Resim 3.5 Gamry potansiyostat.

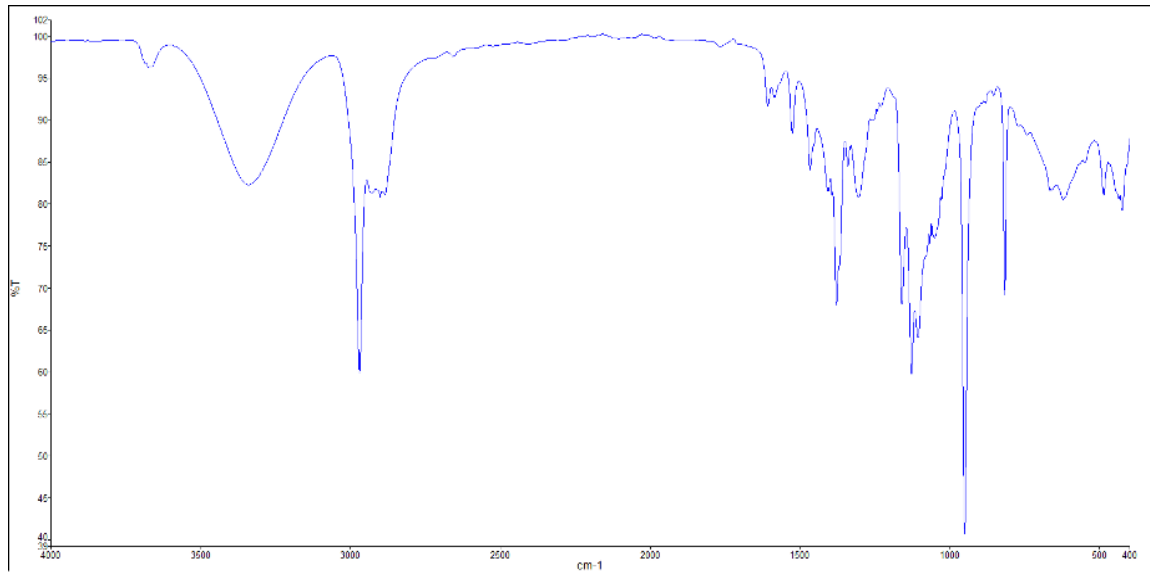
4. BULGULAR

4.1 FT-IR Analiz Sonuçları

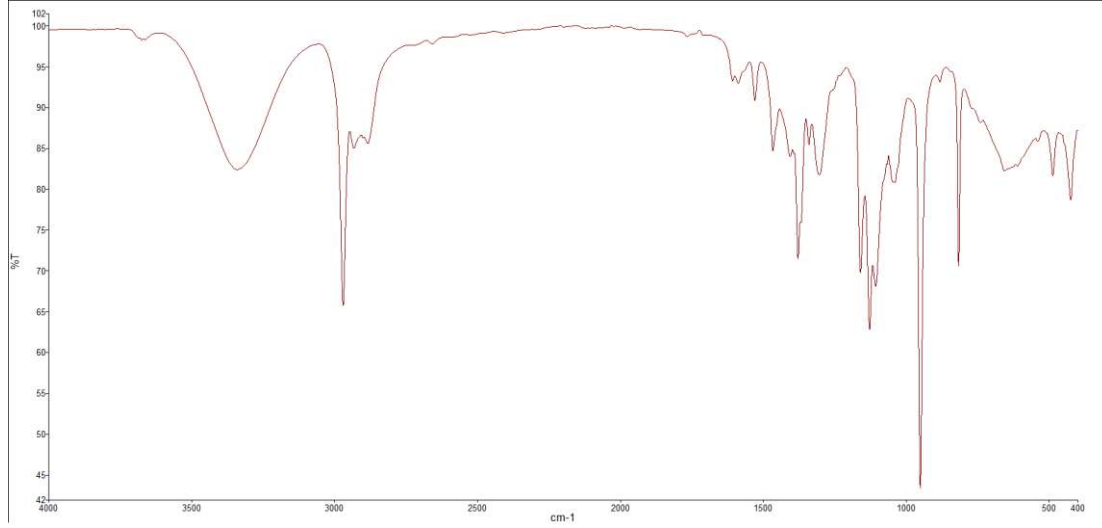
A, B, C ve D olmak üzere hazırlanan dört kaplama çözeltisine yapılan FTIR ölçüm sonuçları Şekil 4.1, Şekil 4.2, Şekil 4.3 ve Şekil 4.4'te verilmiştir.



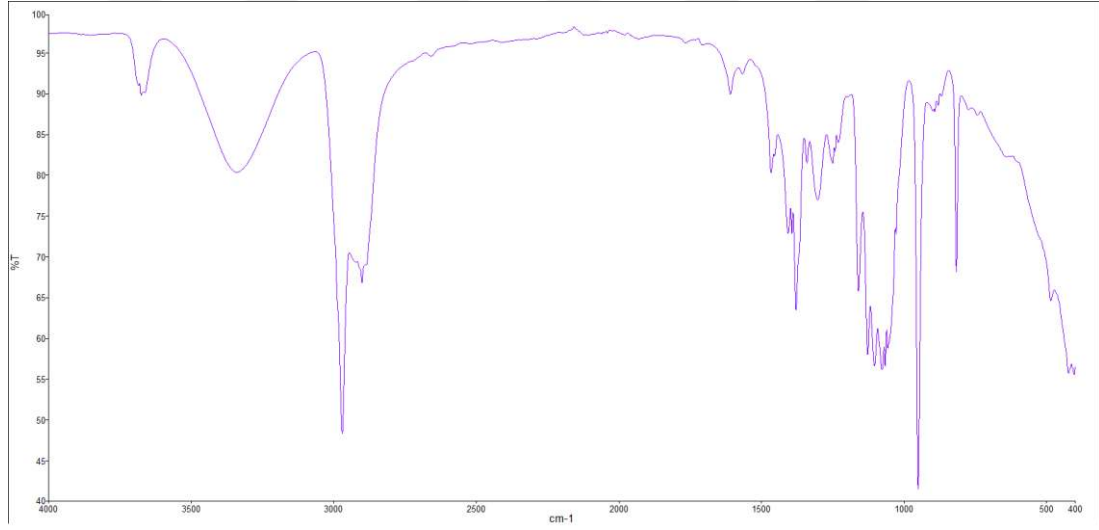
Şekil 4.1 A çözeltisi için FT-IR analiz sonucu.



Şekil 4.2 B çözeltisi için FT-IR analiz sonucu.



Şekil 4.3 C çözeltisi için FT-IR analiz sonucu.



Şekil 4.4 D Çözeltisi için FT-IR analiz sonucu.

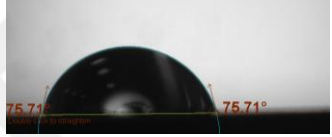
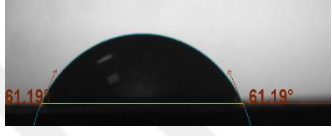
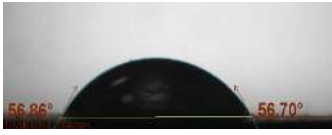
FT-IR spektrumları, kaplamalarda kullanılan bileşenlerin kimyasal yapılarını ve içeriklerini doğrulamak için kullanılmıştır. A çözeltisinde Zn asetatın karboksilat iyonlarına ait bantlar ($1600-1400\text{ cm}^{-1}$ civarı) ve GPTMS ile 3-APTES'ten kaynaklanan Si-O-Si bağlarının ($\sim 1000-1100\text{ cm}^{-1}$) yanı sıra IPA'nın -OH titreşim bantları ($\sim 3300-3500\text{ cm}^{-1}$) beklenmektedir. B çözeltisinde, titanyum izopropoksitten kaynaklanan Ti-O-C bağları ($\sim 700-900\text{ cm}^{-1}$) ve izopropoksit CH titreşimleri ($\sim 2900-3000\text{ cm}^{-1}$) öne çıkarken, C çözeltisinde seryum oksit için metal-oksit titreşimleri ($\sim 500-700\text{ cm}^{-1}$) dikkat çekmektedir. D çözeltisinde ise zirkonyum izopropoksitten kaynaklanan Zr-O ve Zr-O-C bağları ($\sim 600-800\text{ cm}^{-1}$) gözlenebilir. Tüm çözeltilerde ortak olarak GPTMS ve

3-APTES'ten gelen Si-O-Si ve Si-O-C bağlarına ait bantlar ($\sim 1000-1100\text{ cm}^{-1}$ ve $\sim 850-950\text{ cm}^{-1}$) tespit edilebilir. Bu sonuçlar, kaplamaların içeriklerindeki kimyasal farklılıkları ve kullanılan bileşenlerin varlığını doğrulamaktadır.

4.2 Temas Açısı Ölçüm Sonuçları

Kaplamasız ve kaplamalı numunelere yapılan temas açısı ölçüm sonuçları Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1 Temas açısı ölçüm sonuçları.

Numune	CA left [°]	CA (right) [°]	CA (mean) [°]	Görüntü
Kaplamasız (R)	75,71	75,71	75,71	
A	61,19	61,19	61,19	
B	70,17	70,13	70,15	
C	83,12	82,85	82,98	
D	56,86	56,70	56,78	

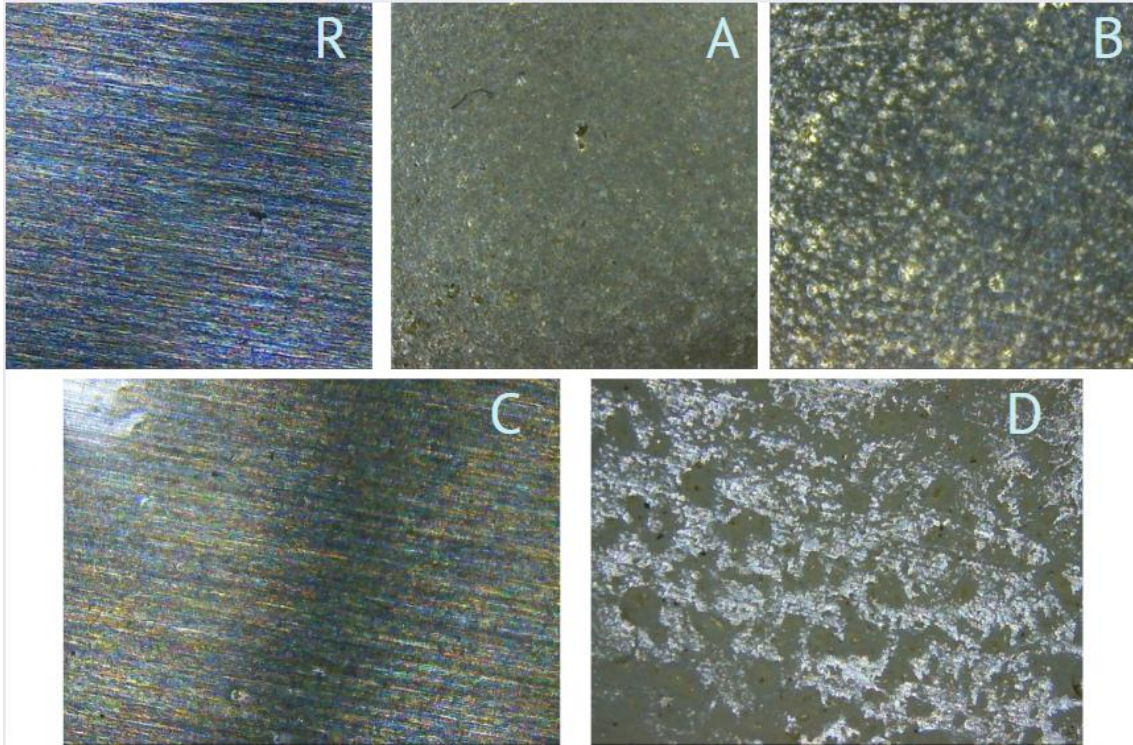
Temas açısı (Contact Angle - CA) ölçüm sonuçları, bir yüzeyin hidrofilik veya hidrofobik özelliklerini değerlendirmek için kullanılır. Yüksek temas açısı değerleri yüzeyin daha hidrofobik olduğunu, düşük değerler ise yüzeyin daha hidrofilik olduğunu gösterir.

Temas açısı ölçüm sonuçlarına göre, kaplamasız yüzey (R) $75,71^\circ$ ile orta düzeyde

hidrofobik özellik gösterirken, kaplamalar yüzey özelliklerini önemli ölçüde değiştirmiştir. A numunesi $61,19^\circ$ ile en hidrofilik yüzeylerden biri olurken, D numunesi $56,78^\circ$ ile en düşük temas açısına sahip ve en hidrofilik kaplama olarak öne çıkmıştır. B numunesi $70,15^\circ$ ile kaplamasız yüzeye yakın bir temas açısı göstererek orta düzeyde hidrofobiklik sağlamıştır. En yüksek temas açısına sahip olan C numunesi ($82,98^\circ$), yüzeyin en hidrofobik olduğu kaplama olarak dikkat çekmiştir. Bu durum, kaplamaların kimyasal içeriklerinin yüzey enerjisini değiştirerek su ile etkileşimini farklılaştırdığını göstermektedir ve uygulama alanlarına göre uygun kaplama seçimi için önemli bilgiler sunmaktadır.

4.3 Mikroskop Görüntüleri

Kaplamasız (R) ve kaplamalı numunelerin (A, B, C, D) mikroskop görüntüleri Şekil 4.5'te verilmiştir.



Şekil 4.5 Kaplamasız ve kaplamalı numunelerin mikroskop görüntüleri.

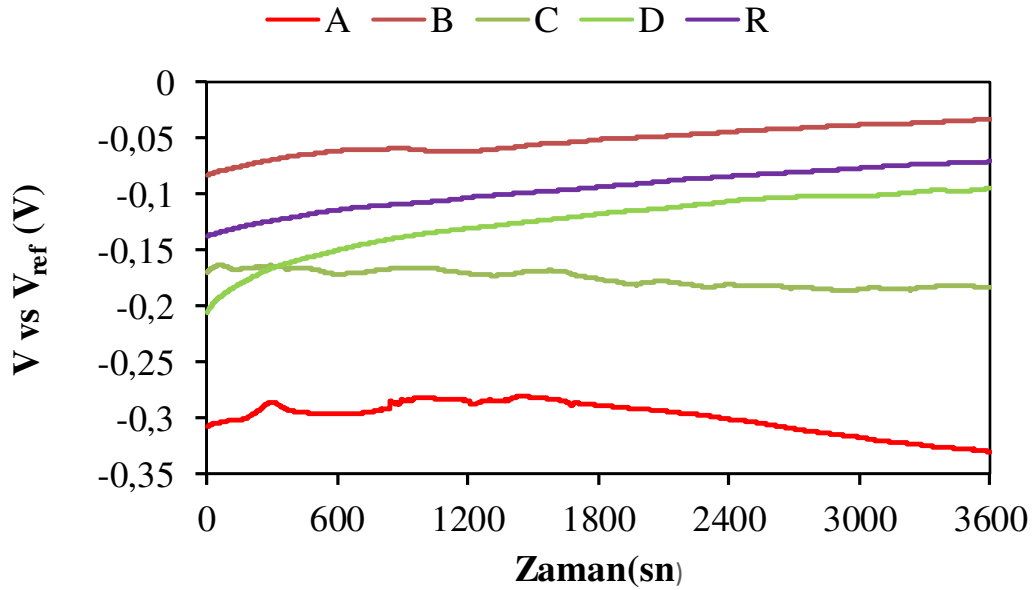
Mikroskop görüntüleri incelendiğinde R kodlu kaplamasız numune ile diğer kaplamalı numunelerin görüntülerini kıyasladığımızda kaplamalar yüzey dokusu ve renk olarak

kendisini belli etmektedir. A, B ve C çözeltileri ile kaplanmış numunelerdeki kaplamaların homojen bir şekilde yüzeyde film oluşturduğunu söyleyebiliriz. D çözeltisi ile kaplanmış numunede ise kaplamanın homojen olmadığı ve lekeli bir görüntü oluşturduğunu söyleyebiliriz.

4.4 Korozyon Testi Sonuçları

4.4.1 Açık Devre Potansiyeli (OCP) Ölçüm Sonuçları

Açık devre potansiyeli (OCP) ölçümüne ait grafik Şekil 4.6’da verilmiştir.



Şekil 4.6 Açık devre potansiyeli (OCP) ölçüm sonuçları.

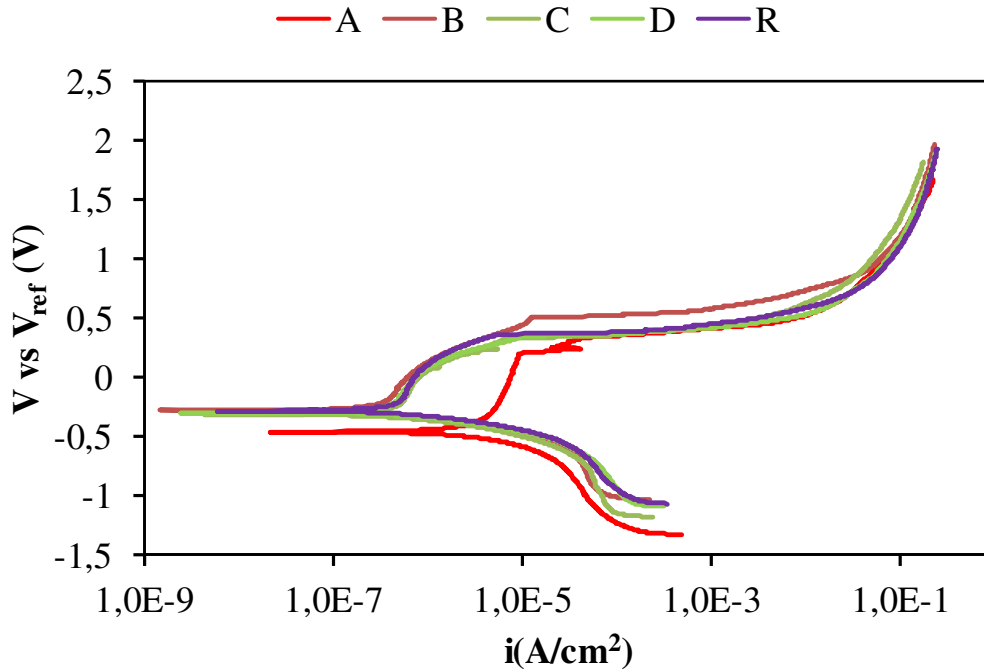
Bu grafik, açık devre potansiyeli (OCP) ölçümüne ait olup, kaplamasız (R) yüzey -0,15 V civarında stabil bir potansiyel sergilerken, kaplamalı yüzeyler arasında en iyi performansı B numunesi -0,05 V ile göstermekte ve zamanla daha pozitif bir eğilimle korozyon direncinin en yüksek olduğunu ortaya koymaktadır. C ve D numuneleri orta düzeyde korozyon direnci sağlarken, A numunesi -0,3 V ile en negatif potansiyele sahip olup zamanla daha da kararsız hale gelerek en zayıf korozyon direncini göstermektedir. Bu sonuçlar, B kaplamasının en etkili koruyucu tabakayı oluşturduğunu, A kaplamasının ise korozyona karşı yetersiz olduğunu ortaya koymaktadır.

Çeçil ve Şen (2003) çalışmalarında AISI D2 takım çeliğine nitrürleme ve TiN kaplama uygulayarak korozyon dayanımını arttırmaya çalışmışlardır. Çalışmada elektro kimyasal testler kullanılarak kaplamaların korozyon direncine etkisi değerlendirilmiştir. TiN kaplamanın çelik yüzeyde korozyon potansiyelini yaklaşık -0,2 V olarak bulmuşlardır. Bizde ise bu değer -0,15 ile -0,3 V arasında değişmektedir. Bu da bizim çalışmamızdaki bazı kaplamaların benzer, bazı kaplamaların ise daha iyi koruma sağladığını göstermektedir.

Hossein vd. (2021) çalışmalarında, düşük karbonlu çelik yüzeyi, Europium oksit bazı dönüşüm kaplaması ile kaplayarak korozyon direncini arttırmaya çalışmışlardır. Europium kaplamalı çelikte -0,47 V ila -0,71 V arasında bir korozyon potansiyeli elde etmişlerdir. Bizim çalışmamızdaki değerler daha pozitif çıkmıştır ve korozyon direncinin daha yüksek olduğu görülmektedir.

4.4.2 Potansiyodinamik Polarizasyon Ölçüm Sonuçları

Potansiyodinamik Polarizasyon (Tafel Eğrileri) ölçüm sonuçları Şekil 4.7’de verilmiştir.



Şekil 4.7 Potansiyodinamik Polarizasyon ölçüm sonuçları.

Bu grafik, potansiyodinamik polarizasyon testine ait olup korozyon potansiyeli (E_{corr})

ve korozyon akım yoğunluğu (i_{corr}) açısından kaplamaların korozyon direncini değerlendirmektedir. Kaplamasız yüzey (R), yüksek i_{corr} ve negatif E_{corr} ile düşük bir korozyon direnci sergilerken, A numunesi en düşük performansı göstermekte ve zayıf bir koruma sağlamaktadır. B numunesi, en düşük i_{corr} ve en pozitif E_{corr} değerleri ile en iyi korozyon direncini sunarken, C numunesi orta düzeyde bir direnç göstermektedir. D numunesi ise A'ya kıyasla daha iyi bir performans sergilese de, B ve C kadar etkili değildir. Bu sonuçlar, B numunesinin en etkili kaplama olduğunu, A numunesinin ise korozyona karşı yetersiz bir koruma sağladığını ortaya koymaktadır.

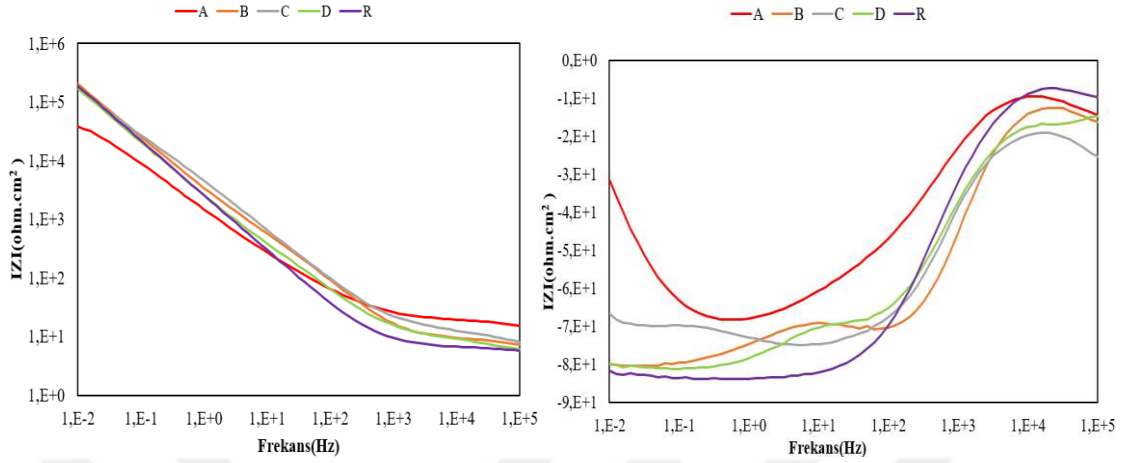
Çeçil ve Şen (2013) çalışmalarında TiN kaplamanın polarizasyon direncini $10^3 \Omega.cm^2$ civarında ölçmüşlerdir. Bizim çalışmamızda ise bu değerlerin $10^4 - 10^5 \Omega.cm^2$ aralığında olduğunu göz önüne alırsak bazı kaplamaların TiN kaplamaya göre çok daha iyi korozyon direnci gösterdiğini söyleyebiliriz.

Hossein vd. (2021) çalışmalarında polarizasyon direnci $10^3 \Omega.cm^2$ olarak ölçülmüştür. Bu orta seviyede bir koruma anlamına gelmektedir. Bizde ise kaplamalar $10^4 - 10^5 \Omega.cm^2$ seviyesinde olup, çok daha yüksek bir direnç sağlamıştır. Bu, yüzey kaplamalarımızın düşük karbonlu çelikte kullanılan Europium kaplamaya kıyasla daha iyi bariyer etkisi sunduğunu gösterir.

4.4.3 Elektrodinamik Empedans Spektroskopisi Ölçüm Sonuçları

Elektrodinamik empedans spektroskopisi ölçüm sonuçları Şekil 4.8'de verilmiştir. Bu grafikler, kaplama ve kaplamasız yüzeylerin korozyon direncini değerlendirmek için yapılan EIS testine ait olup, birinci grafikte $|Z|$ değerlerinin frekansa bağlı değişimi ve ikinci grafikte Nyquist diyagramı gösterilmektedir. Kaplamasız yüzey (R), hem düşük empedans değerleri hem de Nyquist diyagramında küçük yarıçapıyla en düşük korozyon direncine sahiptir. A numunesi, en düşük empedans ve küçük yarıçapıyla zayıf bir koruyucu tabaka sunduğunu gösterirken, B numunesi düşük frekanslarda en yüksek $|Z|$ ve Nyquist diyagramında en büyük yarıçapla en iyi korozyon direncini sunmaktadır. C ve D numuneleri, B'ye göre daha düşük performans sergileyerek orta seviyede koruma sağlamakta, ancak kaplamasız yüzeye kıyasla korozyon direncini önemli ölçüde artırmaktadır. Bu sonuçlar, kaplama içeriklerinin korozyon direncindeki etkisini açıkça

göstermektedir.

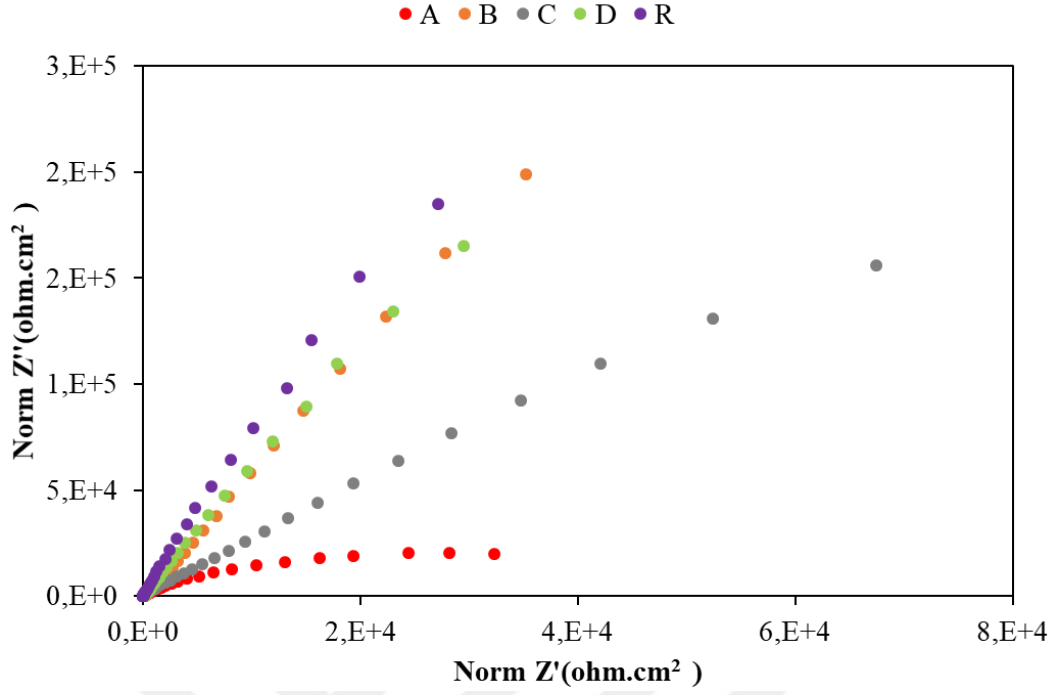


Şekil 4.8 Elektrodinamik empedans spektroskopisi ölçüm sonuçları

Normlaştırılmış empedans değerlerini içeren Nyquist diyagramı Şekil 4.9'da verilmiştir. Bu Nyquist diyagramı, normlaştırılmış empedans (Z' ve Z'') değerlerini içeriyor, yani empedans değerleri yüzey alanı ya da başka bir parametreye göre normalize edilmiştir. Bu tür bir grafik, farklı yüzey alanlarına, elektrot geometri farklılıklarına ya da kaplama kalınlıklarına sahip numunelerin empedanslarını daha adil bir şekilde karşılaştırmak için kullanılır. Normalizasyon, farklı boyut veya yüzey alanına sahip numunelerin sonuçlarını kıyaslamayı daha anlamlı hale getirir. İlk grafik, kaplama performansı ve yüzey morfolojisi gibi mutlak empedans değerlerini inceler. Bu grafik, yüzey alanından bağımsız olarak kaplama malzemelerinin karşılaştırmalı korozyon dirençlerini analiz etmeyi amaçlar.

Kaplamasız Yüzey (R): En düşük yarıçapa ve empedans değerine sahip olan kaplamasız yüzey, en zayıf korozyon direncini göstermektedir. Bu, yüzeyin elektro-kimyasal olarak korumasız olduğunu doğrular.

A Numunesi: A numunesi, R yüzeyine yakın bir dağılım sergileyerek zayıf bir korozyon direnci göstermektedir. Kaplamanın yüzeyi etkin bir şekilde koruyamadığı açıktır.



Şekil 4.9 Normlaştırılmış Nyquist diyagramı.

B Numunesi: Nyquist eğrisinde en büyük yarıçapa sahip olan B numunesi, en yüksek korozyon direncini sunmaktadır. Kaplama, yüzeyi korozyona karşı oldukça iyi bir şekilde korumaktadır.

C Numunesi: C numunesi, B'den daha küçük yarıçapıyla orta düzeyde bir korozyon direnci sağlamaktadır. Kaplama etkin, ancak B kadar güçlü değildir.

D Numunesi: D numunesi, C numunesine benzer bir performans sergilemekte, ancak biraz daha düşük yarıçapla orta dereceli bir koruma sağlamaktadır.

B numunesi, Nyquist diyagramında en büyük yarıçap ve empedans değerleri ile en iyi korozyon direncine sahip olduğunu gösterirken, A numunesi ve kaplamasız yüzey (R), en düşük direnç performansı ile korozyona karşı en savunmasız olanlar olarak öne çıkmaktadır. C ve D numuneleri ise B'ye kıyasla daha düşük, ancak kaplamasız yüzeye göre anlamlı bir koruma sağlamaktadır. Bu sonuçlar, kaplama türünün korozyon performansı üzerindeki kritik etkisini açıkça ortaya koymaktadır.

5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Bu çalışma, AISI 304 çelik yüzeyine uygulanan farklı kaplama içeriklerinin korozyon direncine etkisini incelemek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, kaplamasız yüzey ile dört farklı kaplama (A, B, C ve D) karşılaştırılmış ve bu kaplamaların korozyon direncini artırma potansiyeli elektrokimyasal yöntemlerle değerlendirilmiştir. Çalışmanın temel amacı, kaplama içeriklerinin (Zn asetat, titanyum izopropoksit, seryum oksit, zirkonyum izopropoksit gibi) korozyon performansını iyileştirme derecelerini belirlemek ve en etkili kaplama kompozisyonunu tespit etmektir.

Açık devre potansiyeli (OCP) ölçümleri ile kaplamaların başlangıçtaki kararlılığı ve zamanla korozyon potansiyelindeki değişimi incelenmiştir. Potansiyodinamik polarizasyon testleri, korozyon akım yoğunluğu (i_{corr}) ve korozyon potansiyelinin (E_{corr}) belirlenmesinde kullanılarak kaplama performanslarını karşılaştırmıştır. Elektrokimyasal empedans spektroskopisi (EIS) ölçümleri, kaplamaların yüzey direncini ve korozyona karşı bariyer etkilerini değerlendirmiştir. Ayrıca, mikroskop görüntüleri ve temas açısı ölçümleri, yüzey morfolojisi, kaplama homojenliği ve su iticilik/hidrofiliklik özelliklerini anlamaya yardımcı olmuştur.

Kaplamasız yüzey (R), korozyon potansiyeli ve akım yoğunluğu açısından en düşük performansı sergilemiş, empedans değerleri ve Nyquist diyagramında küçük yarıçapıyla korozyona karşı tamamen savunmasız olduğunu göstermiştir. A numunesi, kaplamalı yüzeyler arasında en düşük performansı göstermiştir. Zn asetat içerikli bu kaplamanın yüksek korozyon akım yoğunluğu, düşük empedans değerleri ve zayıf kararlılığı, korozyon direncinde etkili bir bariyer sağlayamadığını ortaya koymuştur. B numunesi ise tüm kaplama türleri arasında en iyi performansı sergilemiştir. Titanyum izopropoksit içerikli bu kaplama, en düşük korozyon akım yoğunluğu, en yüksek empedans değerleri ve pozitif korozyon potansiyeli ile korozyona karşı üstün bir bariyer etkisi sağlamıştır.

C ve D numuneleri, orta düzeyde bir korozyon direnci sağlamıştır. Seryum oksit (C) ve zirkonyum izopropoksit (D) içerikli kaplamalar, kaplamasız yüzeye kıyasla korozyon direncini artırmış ancak B numunesi kadar etkili olmamıştır. Temas açısı ölçümleri, C

numunesinin en hidrofobik yüzeye sahip olduğunu, bu özelliğin korozyon direncine kısmi katkı sağladığını göstermiştir. D numunesi ise en hidrofilik yüzey olarak dikkat çekmiştir. Mikroskop görüntüleri, B numunesinin homojen ve sağlam bir kaplama yapısına sahip olduğunu, A numunesinin ise yüzeyde yeterli kaplama oluşumu sağlayamadığını ortaya koymuştur.

Mikroskop görüntülerine göre ise A,B ve C çözeltileri ile kaplanmış numunelerin yüzeyde homojen, lekesiz bir kaplama oluşturduğu fakat D çözeltisi ile kaplanmış numunenin homojen olmayan lekeli bir kaplama oluşturduğu görülmektedir. Bunun da Seryum Oksitin (CeO) çözelti içerisinde yeterince çözünemediği için olduğu düşünülmektedir.

Çalışmanın sonuçları, kaplama içeriklerinin korozyon direncinde belirleyici bir role sahip olduğunu göstermektedir. Titanyum izopropoksit içerikli B numunesi, korozyona karşı en iyi performansı sağlayarak, bu tür kaplamaların AISI 304 çelik için koruyucu tabaka oluşturma potansiyelini kanıtlamıştır. A numunesi ise içerdiği Zn asetat nedeniyle zayıf bir bariyer etkisi sunmuş ve korozyon direncini artırmada yetersiz kalmıştır. C ve D kaplamaları orta düzeyde bir performans sergilemiş ve yüzey modifikasyonu açısından anlamlı bir iyileşme sağlamıştır. Bu bulgular, AISI 304 çelik yüzeylerde kaplama malzemesi seçiminin, uygulama gereksinimlerine göre dikkatle yapılması gerektiğini vurgulamaktadır.

6. KAYNAKLAR

- Ahmad Z, 2023, Epoxy primer coating filled microcrystalline cellulose treated with silane coupling agent on metal substrate, *Scientific Research Journal*, 20(1), 177-189.
- Al-Bakri A, Sajuri Z, Abdulrazzaq M, Ariffin A, Fafmin M, 2017, Fatigue properties of strained very thin 304 stainless steel sheets. *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*, 14(2), 4171-4182.
- Amanian S, Naderi R, Mahdavian M, 2022, The role of an in-situ grown zn-al layered double hydroxide conversion coating in the protective properties of epoxy coating on galvanized steel. *Journal of the Electrochemical Society*, 169(3), 031511.
- Anirudh D, 2023, Mechanical and metallurgical properties of dissimilar joining of 304 ass: a review. *E3s Web of Conferences*, 430, 01294.
- Astarita A, Curioni M, Squillace A, Zhou X, Bellucci F, Thompson G, Beamish K, 2014, Corrosion behaviour of stainless steel–titanium alloy linear friction welded joints: galvanic coupling, *Materials and Corrosion*, 66(2), 111-117.
- Bahrami M, Borhani G, Bakhshi S, Ghasemi A, 2015, Preparation and evaluation of corrosion behavior of gptms–teos hybrid coatings containing zr and ce on aluminum alloy 6061-t6, *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 76(3), 552-561.
- Becchi D, Luca M, Martinelli M, Mitidieri S, 2010, Organic–inorganic coatings based on epoxidised castor oil/aptes/teos, *Journal of the American Oil Chemists Society*, 88(1), 101-109. -5
- Boshkova N, Kamburova K, Radeva T, Simeonova S, Grozev N, Boshkov N, 2023, Hybrid zinc coatings with chitosan/alginate encapsulated cuo-nanoparticles for anticorrosion and antifouling protection of mild steel, *Coatings*, 13(5), 895.
- Burnat B, Olejarz P, Batory D, Cichomski M, Kamińska M, Bociaga D, 2020, Titanium dioxide coatings doubly-doped with ca and ag ions as corrosion resistant,

- biocompatible, and bioactive materials for medical applications, *Coatings*, 10(2), 169.
- Calabrese L, Bonaccorsi L, Borsellino C, Caprì A, Fabiano F, Proverbio E, 2015, Electrochemical impedance spectroscopy behaviour of ndfeb coated magnets in saliva solution for orthodontic applications, *Solid State Phenomena*, 227, 515-518.
- Calabrese L, Bonaccorsi L, Caprì A, Proverbio E, 2016, Enhancement of the hydrophobic and anti-corrosion properties of a composite zeolite coating on al6061 substrate by modification of silane matrix, *Corrosion Engineering Science and Technology the International Journal of Corrosion Processes and Corrosion Control*, 52(1), 61-72.
- Calabrese L, Caprì A, Proverbio E, 2018, Anti-corrosion performances of hybrid silane coatings on az31 alloy, *Anti-Corrosion Methods and Materials*, 65(3), 317-324.
- Cambon J, Ansart F, Bonino J, Turq V, 2012, Effect of cerium concentration on corrosion resistance and polymerization of hybrid sol–gel coating on martensitic stainless steel, *Progress in Organic Coatings*, 75(4), 486-493.
- Caprì A, Calabrese L, Bonaccorsi L, Proverbio E, 2015, Corrosion resistance of cerium based silane-zeolite coatings on aa6061 alloy, *Solid State Phenomena*, 227, 163-166.
- Carrasco F, Guillamón M, García L, Vicente F, Puig M, 2019, Pitting corrosion in aisi 304 rolled stainless steel welding at different deformation levels, *Applied Sciences*, 9(16), 3265.
- Castaldo R, Luna M, Siviello C, Gentile G, Lavorgna M, Amendola E, Cocca M, 2020, On the acid-responsive release of benzotriazole from engineered mesoporous silica nanoparticles for corrosion protection of metal surfaces, *Journal of Cultural Heritage*, 44, 317-324.
- Cho T, Joo Y, Yoon J, Chun H, Zhang S, 2012, Improving the properties of magnetic bearing shaft material by hvof coating of wc-metal powder and laser heat treatment, *Advanced Materials Research*, 560-561, 1052-1058.

- Chuan-qi F, Ye F, Wang S, Wang Z, Zhang Q, Luo X, 2015, Effect of rare element cerium on the morphology and corrosion resistance of electro-less ni-p coatings, *Matec Web of Conferences*, 35, 01008.
- Chun H, Cho T, Yoon J, Lee G, 2015, Improvement of surface properties of inconel718 by hvof coating with wc-metal powder and by laser heat treatment of the coating, *Advances in Materials Science and Engineering*, 1-7.
- Cristaudo V, Baert K, Laha P, Lim M, Brown-Tseng E, Terryn H, vd., 2021, A combined xps/tof-sims approach for the 3d compositional characterization of zr-based conversion of galvanized steel, *Applied Surface Science*, 562, 150166.
- Curioni M, Skeldon P, Ferguson J, Thompson G, 2011, Reducing the energy cost of protective anodizing, *Journal of Applied Electrochemistry*, 41(7), 773-785.
- Demirören H, 2021, An overview on corrosion behavior of steels in factory, *Eurasian Journal of Physics and Functional Materials*, 5(2), 102-115.
- Deyá C, 2013, Epoxysilane as adhesion promoter in duplex system. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 27(14), 1548-1562.
- Doerre M, Hibbitts L, Patrick G, Akafuah N, 2018, Advances in automotive conversion coatings during pretreatment of the body structure: a review, *Coatings*, 8(11), 405.
- Donatus U, Thompson G, Zhou X, 2014, Effect of near-ambient temperature changes on the galvanic corrosion of an aa2024-t3 and mild steel couple, *Journal of the Electrochemical Society*, 162(1), C42-C46.
- Evcin A, 2025, *Advances in Sol-Gel Chemistry: Materials, Methods, and Applications*, 20-24.
- Frankel G, Li T, Scully J, 2017, Perspective—localized corrosion: passive film breakdown vs pit growth stability, *Journal of the Electrochemical Society*, 164(4), C180-C181.
- Gao J, Wang N, Cheng H, Xu X, 2023, The influence of 1 wt.% cr on the corrosion resistance of low-alloy steel in marine environments. *Metals*, 13(6), 1050.

- Gauzzi F, Montanari R, Prìncipi G, Tata M, 2006, Aisi 304 steel: anomalous evolution of martensitic phase following heat treatments at 400°C, *Materials Science and Engineering A*, 438-440, 202-206.
- Ghanooni-Bagha M, Shayanfar M, Farnia M, 2018, Cracking effects on chloride diffusion and corrosion initiation in rc structures via finite element simulation, *Scientia Iranica*, 0(0), 0-0.
- Ghosh S, Dey G, Dusane R, Grover A, 2006, Improved pitting corrosion behaviour of electrodeposited nanocrystalline ni–cu alloys in 3.0wt.% nacl solution, *Journal of Alloys and Compounds*, 426(1-2), 235-243.
- González E, Vejar N, Solís R, Muñoz L, Encinas M, Páez M, 2019, Sol-gel films: corrosion protection coating for aluminium alloy.
- Guo Y, Liu Q, Zhou F, 2018, Microstructure and properties of fe5cr5siticonbmow coating by laser cladding, *Surface Engineering*, 34(4), 283-288.
- Haji-Savameri M, Irannejad A, Norouzi-Apourvari S, Schaffie M, Hemmati-Sarapardeh A, 2022, Evaluation of corrosion performance of superhydrophobic PTFE and nanosilica coatings, *Scientific Reports*, 12(1).
- Hamidah I, Wati R, Hamdani R, 2018, Analysis of aisi 304 tensile strength as an anchor chain of mooring system, *Iop Conference Series Materials Science and Engineering*, 367, 012058.
- Hayashi S, Sugiyama S, Shimura K, Tobayama G, Togashi T, 2016, A study of deposition coatings formed by electroformed metallic materials, *Plos One*, 11(6), e0154257.
- Helleis R, Maia G, Castro E, Berbel L, Costa I, Banczek E, 2022, Niobium- and titanium-based coating for the protection of carbon steel sae 1020 against corrosion, *Anti-Corrosion Methods and Materials*, 69(4), 426-433.
- Hong Y, Lin C, Xu Q, 2011, Anatase tio₂ films via a sol-gel and hydrothermal crystallization for enhanced corrosion resistance, *Advanced Materials Research*, 356-360, 2707-2710.

- Hou B, Li Y, Ma X, Du C, Zhang D, Meng Z, vd., 2017, The cost of corrosion in china, *NPJ Materials Degradation*, 1(1).
- Hussain T, McCartney D, Shipway P, Marrocco T, 2010, Corrosion behavior of cold sprayed titanium coatings and free standing deposits, *Journal of Thermal Spray Technology*, 20(1-2), 260-274.
- Hyie K, 2023, Comparison of different surface pre-treatment on mild steel for cobalt-nickel-iron electroplating, *Journal of Mechanical Engineering*, 20(3), 263-278.
- Idora M, Rahman M, Ismail M, Nik W, 2014, Effect of zinc coating thickness on corrosion performance of mild steel in atmospheric and seawater environment, *Applied Mechanics and Materials*, 554, 213-217.
- Ikeh O, 2024, Application of functional coating in delaying the corrosion of titanium alloys: a review.
- Jang J, Lee H, Singh J, 2020, Electromagnetic shielding performance of different metallic coatings deposited by arc thermal spray process, *Materials*, 13(24), 5776.
- Jiang H, Wang Z, Ma L, Yang Q, Tang Z, Song X, vd., 2019, Boron ink assisted in situ boron nitride coatings for anti-oxidation and anti-corrosion applications, *Nanotechnology*, 30(33), 335704.
- Jiang M, Wu L, Hu J, Zhang J, 2015, Silane-incorporated epoxy coatings on aluminum alloy (aa2024), part 1: improved corrosion performance, *Corrosion Science*, 92, 118-126.
- Krishnan M, Aneja K, Shaikh A, Böhm S, Sarkar K, Böhm H, vd., 2018, Graphene-based anticorrosive coatings for copper, *RSC Advances*, 8(1), 499-507.
- Kucharczyk A, Adamczyk L, Miecznikowski K, 2021, The influence of the type of electrolyte in the modifying solution on the protective properties of vinyltrimethoxysilane/ethanol-based coatings formed on stainless steel x20cr13, *Materials*, 14(20), 6209.

- Lawrence I D, Kumar J S, Kaviprakash G, 2015, Optimization of machining parameters in turning of AISI 304 steel using GRA and RSM, *International Journal of Applied Engineering Research*, 10(55), 4052-4057.
- Li M, 2023, Corrosion performance of welded joints for e40 marine steel, *Metals*, 13(9), 1528.
- Lima L, Conte G, Brandão L, Sábio R, Menezes A, Resende F, vd., 2022, Fabrication of noncytotoxic functional siloxane-coated bacterial cellulose nanocrystals, *Acs Applied Polymer Materials*, 4(4), 2306-2313.
- Liu J, 2024, Improving the corrosion resistance of micro-arc oxidization film on az91d mg alloy through silanization, *Metals*, 14(5), 569.
- Liu T, Zhang D, Ma L, Huang Y, Hao X, Terryn H, vd., 2022, Smart protective coatings with self-sensing and active corrosion protection dual functionality from ph-sensitive calcium carbonate microcontainers, *Corrosion Science*, 200, 110254.
- Liu Y, Liu W, Ma Y, Meng S, Liu C, Long L, vd., 2017, A comparative study on wear and corrosion behaviour of hvof- and hvaf-sprayed wc-10co-4cr coatings, *Surface Engineering*, 33(1), 63-71.
- Liu Z, Zhang B, Yu H, Zhang Z, Jiang W, Ma Z, 2022, A smart anticorrosive epoxy coating based on graphene oxide/functional mesoporous silica nanoparticles for controlled release of corrosion inhibitors, *Coatings*, 12(11), 1749.
- Meiffren V, Dumont K, Lenormand P, Ansart F, Manov S, 2011, Development of new processes to protect zinc against corrosion, suitable for on-site use, *Progress in Organic Coatings*, 71(4), 329-335.
- Menu M, Gavard O, Ansart F, Gressier M, Montpellaz R, 2018, Innovative formulation combining al, zr and si precursors to obtain anticorrosion hybrid sol-gel coating. *Molecules*, 23(5), 1135.
- Merino E, Durán A, Castro Y, 2022, The role of silane sol-gel coatings on the corrosion protection of magnesium alloys.

- Miao S, Han S, Hao L, 2014, Corrosion behavior of rare earth cerium based trivalent chromium conversion coating on zinc, *Advanced Materials Research*, 881-883, 1165-1170.
- Mitoraj-Królikowska M, 2023, Influence of silicon and chromium on the Na_2SO_4 -induced hot corrosion behavior of titanium alloys, *Crystals*, 13(6), 948.
- Montazerian M, Francesco B, Fiume E, Migneco C, Alaghmandfard A, Sedighi O, vd., 2023, *Glass-ceramics in dentistry: Fundamentals, Technologies, experimental techniques, applications, and open issues. Progress in Materials Science.*
- Morcillo M, Díaz I, Chico B, Cano H, Fuente D, 2014, Weathering steels: from empirical development to scientific design, *Corrosion Science*, 83, 6-31.
- Morgantini M, Mackenzie D, Gorash Y, Rijswick R, 2018, The effect of corrosive environment on fatigue life and on mean stress sensitivity factor, *Matec Web of Conferences*, 165, 03001.
- Niknahad M, Patel C, Mannari V, 2016, Corrosion protection of aluminum alloy by sol-gel derived organic-inorganic hybrid pretreatments based on epoxy resin modified silane precursor, *Journal of Coating Science and Technology*, 3(1), 29-40.
- Noh H, Idris N, Noor N, Sarpin N, Zainal R, Kasim N, 2018, Structural effects of reinforced concrete beam due to corrosion, *E3s Web of Conferences*, 34, 01024.
- Parhizkar N, Ramezanzadeh B, Shahrabi T, 2017, Enhancement of the corrosion protection properties of a hybrid sol-gel based silane film through impregnation of functionalized graphene oxide nanosheets, *Journal of the Electrochemical Society*, 164(14), C1044-C1058.
- Pereira R, Oliveira E, Lima M, Brasil S, 2015, Corrosion of galvanized steel under different soil moisture contents, *Materials Research*, 18(3), 563-568.
- Prando D, Brenna A, Diamanti M, Beretta S, Bolzoni F, Ormellese M, vd., 2017, Corrosion of titanium: part 1: aggressive environments and main forms of degradation, *Journal of Applied Biomaterials & Functional Materials*, 15(4), e291-e302.

- Prasai D, Tuberquia J, Harl R, Jennings G, Bolotin K, 2012, Graphene: corrosion-inhibiting coating, *Acs Nano*, 6(2), 1102-1108.
- Prati S, Joseph E, Sciutto G, Mazzeo R, 2010, New Advances In the Application Of Ftir Microscopy And Spectroscopy For The Characterization Of Artistic Materials, *Acc Chem Res*, 6(43), 792-801.
- Queiroz F, Bugarin A, Ayusso V, Terada M, Costa I, 2023, Investigation on the effect of a chromium-free sealing treatment for the corrosion resistance of aa2198-t851 after tartaric sulphuric anodizing (tsa), *Corrosion and Materials Degradation*, 4(2), 331-344.
- Radojković B, Kovačina J, Jegdić B, Bobić B, Alić B, Marunčić D, vd., 2020, Influence of inhibitors on the corrosion behavior of the x5crni18 10 stainless steel-welded joint, *Materials and Corrosion*, 72(4), 694-707.
- Reinemann S, Rosemann P, Babutzka M, Lehmann J, Bürkert A, 2019, Influence of grinding parameters on the corrosion behavior of austenitic stainless steel, *Materials and Corrosion*, 70(10), 1776-1787.
- Rocha A, Rizzo F, Zeng C, Paes M, 2004, Duplex al-based thermal spray coatings for corrosion protection in high temperature refinery applications, *Materials Research*, 7(1), 189-194.
- Sanjabi S, 2011, Corrosion behavior of organically modified silicates coatings, *Anti-Corrosion Methods and Materials*, 58(5), 245-249.
- Scully J, 2019, Future frontiers in corrosion science and engineering, part ii: managing the many stages of corrosion. *Corrosion*, 75(2), 123-125.
- Shon M, 2010, Effects of residual white rust of inorganic zinc silicate primer on corrosion protection of epoxy-coated carbon steel, *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 16(4), 523-530.
- Thandapani G, Radha E, Jayashri J, Florence J A K, Sudha P N, 2018, Bioactive metallic surfaces for bone tissue engineering, *Fundamental Biomaterials:Metals*. 79-110.

- Thébault F, Vuillemin B, Oltra R, Allély C, Ogle K, Heintz O, 2015, Influence of magnesium content on the corrosion resistance of the cut-edges of zn-mg-coated steel, *Corrosion Science*, 97, 100-106.
- Tippayasam C, Palomas J, Wiman P, Kaewvilai A, 2020, Welded stainless steel: surface oxidation, characterization, hardness and corrosion resistance, *Key Engineering Materials*, 856, 106-111.
- Trdan U, Hočevan M, Gregorčič P, 2017, Transition from superhydrophilic to superhydrophobic state of laser textured stainless steel surface and its effect on corrosion resistance, *Corrosion Science*, 123, 21-26.
- Vrânceanu D, Tarcolea M, Gherghilescu A, Miculescu F, Cotruț C, 2015, Corrosion behaviour of metallic dental materials. *Advanced Materials Research*, 1114, 258-265.
- Wang C, 2024, The corrosion resistance of tartaric-sulfuric acid anodic films on the 2024 al alloy sealed using different methods, *Coatings*, 14(6), 733.
- Wang J, Wang N, Zhao Q, Ge C, Hou B, Sun W, vd., 2021, Multi-layer mos2 : an effective barrier enhancer and a promising nanofiller for metal protection.
- Wang Y, Zuo X, Li J, 2015, Corrosion resistance of the welded joint of submarine pipeline steel with ferrite plus bainite dual-phase microstructure. *Steel Research International*, 86(11), 1260-1270.
- Whitman B, Li L, Swain G, 2017, Anti-corrosion properties of a tcp pretreatment conversion coating on aluminum alloy 2024-t3 during moist so2atmospheric testing: effects of galvanic coupling. *Journal of the Electrochemical Society*, 164(4), C135-C147.
- Xu J, Xu S, Munroe, P, Xie Z, 2015, A zrn nanocrystalline coating for polymer electrolyte membrane fuel cell metallic bipolar plates prepared by reactive sputter deposition, *RSC Advances*, 5(82), 67348-67356.
- Yang B, 2023, Electromagnetic property modulation of flaky ferromagnetic 304 stainless-steel powders for microwave absorption at elevated temperatures, *Magnetochemistry*, 9(9), 208.

- Zade G, Patil K, 2022, A state-of-the-art review of graphene-based corrosion resistant coatings for metal protection.
- Zaferani S, Peikari M, Zaarei D, Danaee I, Fakhraei J, Mohammadi M, 2012, Using silane films to produce an alternative for chromate conversion coatings, Corrosion, 69(4), 372-387.
- Zheludkevich M, Shchukin D, Yasakau K, Möhwald H, Ferreira M, 2007, Anticorrosion coatings with self-healing effect based on nanocontainers impregnated with corrosion inhibitor, Chemistry of Materials, 19(3), 402-411.
- Zhou H, 2019, Porosity and micro-hardness of shrouded plasma sprayed titanium coatings, Key Engineering Materials, 793, 73-77.
- Zhou H, Peng C, 2021, Effect of shroud in plasma spraying on chemical composition and thickness of titanium coatings, Coatings, 11(4), 446.
- Zhou Q, Sun G, Zhao P, Liu H, 2012, Corrosion resistance of kh-550 and kh-567 composite silane films on cast aluminum alloy, Advanced Materials Research, 460, 90-93.

İnternet Kaynakları

- 1- <https://blog.thepipingmart.com/other/common-types-of-corrosion/>, 10.01.2025