



**T.C.
AKSARAY ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**GALVANİZ KAPLI ÇELİK SAÇLARIN KESİM
BÖLGELERİNDE AZALAN KOROZYON DİRENCİNE
KOMPOZİT KAPLAMALARIN ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Emre KABAOĞLU

DANIŞMAN

Doç. Dr. Fazliye KARABÖRK

AKSARAY, 2021

Aksaray Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü'nünnumaralı Yüksek Lisans öğrencisi Emre KABAOĞLU tarafından hazırlanan “**GALVANİZ KAPLI ÇELİK SACLARIN KESİM BÖLGELERİNDE AZALAN KOROZYON DİRENCİNE KOMPOZİT KAPLAMALARIN ETKİSİNİN İNCELENMESİ**” adlı tez çalışması aşağıdaki jüritarafından OY BİRLİĞİ ile Makine Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir

Danışman: Doç. Dr. Fazliye KARABÖRK
Aksaray Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Üye: Dr. Öğr. Üyesi Şakir YAZMAN
Selçuk Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Üye: Dr. Öğr. Üyesi İsmail SARAÇ
Aksaray Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Tez SavunmaTarihi:/...../2021

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....

Doç. Dr Mehmet Ali HINIS
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

DOĞRULUK BEYANI

Yüksek lisans tezi olarak sunduğum bu çalışmayı, akademik kurallara ve bilimsel etik, ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yol ve yardıma başvurmaksızın yazdığımı, yararlandığım eserlerin kaynakçada gösterilenlerden oluştuğunu, çalışmamda kullandığım verilerin orijinalliğini ve her türlü intihalden uzak olduğunu beyan ederim.

Enstitü tarafından belli bir zamana bağlı olmaksızın, tezimle ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçlara katlanacağımı bildiririm.

İmza

Emre KABAOĞLU

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, metalik yüzeylerin kaplanmasında kullanılan epoksi malzeme içerisine katılan partiküllerin kaplama özelliklerine etkilerinin incelenmesine yönelik deneysel bir araştırmadır.

Yüksek lisans eğitimim boyunca her zaman yol gösterici, yardımcı, destekleyici ve yüreklendirici biri olarak, karşıma çıktığı için kendimi çok şanslı olarak hissettiren çok kıymetli danışman hocam Doç. Dr. Fazliye KARABÖRK'e gönülden teşekkürler.

Bu çalışmanın gerçekleşmesinde bilgi ve tecrübesinden her zaman faydalandığım Prof. Dr. Ahmet AKDEMİR'e, laboratuvar çalışmalarım esnasında yardımını hiç esirgemeyen Doç.Dr. Didem BALUN KAYAN'a teşekkürlerimi sunuyorum.

Tezimin gerçekleşmesinde 2020-012 numaralı proje ile maddi destek sağlayan Aksaray Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi'ne teşekkür ederim.

Tezimin imalat ve test aşamalarındaki desteklerinden dolayı MYSİLO Tahıl Depolama Sistemleri A.Ş.'ye teşekkür ederim.

Emre KABAOĞLU

AKSARAY, 2021

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT	v
ŞEKİLLER DİZİNİ	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR	x
1. GİRİŞ.....	1
2. TEORİK ARAŞTIRMALAR.....	3
2.1. Metallerde Korozyon	3
2.1.1. Korozyon mekanizması.....	3
2.1.2. Korozyon türleri.....	4
2.1.3. Metallerin korozyondan korunması	4
2.2. Galvanizli Saclar.....	6
2.2.1. Çelik sacların galvanizlenmesi.....	9
2.3. Galvanizli Sacların Korozyonu.....	11
2.3.1. Galvanizli saclarda korozyon direncine etki eden faktörler.....	13
2.3.2. Galvanizli sacların korozyondan korunması.....	15
2.3.3. Kesme kenarı korozyonu	17
2.4. Kompozit Kaplamalar ve Korozyondan Koruma Etkisi.....	19
2.5. Literatür Özeti.....	24
2.5.1. Galvanizli sacların korozyondan korunması ile ilgili yapılan çalışmalar	24
2.5.2. Bu çalışmanın literatürdeki yeri	27
3. DENEYSEL ÇALIŞMA.....	31
3.1. Kullanılan Malzemeler	31
3.2. Kaplama Öncesinde Yüzey Hazırlığı	36
3.3. Kompozit Kaplamanın Hazırlanması ve Uygulanması	36
3.4. Karakterizasyon Testleri	40
3.4.1. Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (FTIR) analizi	40
3.4.2. Termogravimetrik analiz (TGA).....	40
3.4.3. Kaplama kalınlığı ölçümü.....	40
3.4.4. Kafes çizgi testi.....	41
3.4.5. Konik bükme testi	43
3.4.6. Nanosertlik ve mikroçizik testleri	44
3.4.7. Tuz testi (Tuzlu Su Sisi Testi).....	47
3.4.8. Temas açısı tayini.....	48
3.4.9. Elektrokimyasal impedans spektroskopisi testi	48
3.4.10. Taramalı elektron mikroskopu (SEM) analizi	51
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	52

4.1. FTIR Analizi Sonuçları.....	52
4.2. Termogravimetrik Analiz (TGA) Sonuçları	52
4.3. Kafes Çizgi Testi Sonuçları	54
4.4. Konik Bükme Testi Sonuçları	54
4.5. Nanosertlik Testi Sonuçları	55
4.6. Mikroçizik Testi Sonuçları	56
4.7. Temas Açısı Tayini Sonuçları	58
4.8. Tuz Testi Sonuçları.....	59
4.9. Elektrokimyasal İmpedans Spektroskopisi Testi Sonuçları	61
4.10. SEM Analizi Sonuçları	70
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	74
5.1 Sonuçlar	74
5.2 Öneriler.....	76
KAYNAKLAR	77
ÖZGEÇMİŞ.....	84

YÜKSEK LİSANS TEZİ

GALVANİZLİ ÇELİK SACLARIN KESME KENARINDAKİ KOROZYON DİRENCİNE KOMPOZİT KAPLAMALARIN ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Emre KABAOĞLU

**Aksaray Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı**

Danışman: Doç. Dr. Fazlıye KARABÖRK

ÖZET

Bu çalışmada, galvaniz kaplı çelik sacların kesim bölgelerinde azalan korozyon direncine kompozit kaplamaların etkisinin incelenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla, %3 oranında nano, mikro ve hibrit (nano+mikro) ZnO partiküller epoksi matrise katılarak kompozit kaplamalar hazırlanmış ve galvanizli çelik alt tabaka üzerine uygulanmıştır. Kompozit kaplamaların fiziksel, mekanik ve korozyon performansları çeşitli analizlerle değerlendirilmiştir.

Fiziksel ve mekanik özelliklerin belirlenmesi amacıyla kaplamaya; Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi analizi (FTIR), termogravimetrik analiz (TGA), kafes çizgi testi (cross-cut), konik bükme, nanosertlik ve mikroçizik testleri uygulanmıştır. Kaplamanın yüzeyde ve kesme kenarındaki korozyon direncinin belirlenmesi amacıyla elektrokimyasal impedans spektroskopisi (EİS) teknikleri ve tuz testi (tuzlu su sisi testi) uygulanmıştır. Ayrıca kaplama içindeki partikül dağılımını görmek ve sonuçları yorumlamak amacıyla taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri alınıp incelenmiştir. Sonuçlar kaplamaya katılan mikro ve nano partiküllerin kaplamanın mekanik ve korozyon performansını hem yüzeyde hem de kesme kenarında geliştirdiğini göstermiştir.

Anahtar kelimeler: Kompozit Kaplama, ZnO, Hibrit, Kesme Kenarı, Korozyon

Haziran, 2021; 84 sayfa

M.Sc. THESIS

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF COMPOSITE COATINGS ON CUT EDGE CORROSION RESISTANCE OF GALVANIZED STEEL SHEET

Emre KABAOĞLU

**Aksaray University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering**

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Fazliye KARABÖRK

ABSTRACT

In this thesis, it is aimed to investigate the effect of composite coatings on the reduced corrosion resistance in the cutting areas of galvanized steel sheets. For this purpose, composite coatings were prepared by adding 3% nano, micro and hybrid (nano + micro) ZnO particles to the epoxy matrix and it was applied on the galvanized steel's substrate. The physical, mechanical and corrosive performances of composite coatings were evaluated by various analyzes.

In order to determine the physical and mechanical properties, then Fourier transform infrared spectroscopy analysis (FTIR), the thermogravimetric analysis (TGA), lattice line test (cross-cut), conical bending, nanohardness and microscratch tests were applied to the coating. Electrochemical impedance spectroscopy (EIS) techniques and salt test (salt water mist test) were applied to determine the corrosion resistance of the coating on the surface and on the cutting edge. In addition, scanning electron microscope (SEM) images were taken and analyzed in order to see the particle distribution in the coating and to interpret the results. The results show that the micro and nano particles added to the coating, improved the mechanical and corrosive performance of the coating both on the surface and at the cutting edge.

Keywords: Composite Coatings, ZnO, Hybrid, Cut Edge, Corrosion

June, 2021; 84 pages

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Korozyon türleri.....	4
Şekil 2.2. Metallerin korozyondan korunması için kullanılan yöntemler	5
Şekil 2.3. Bariyer ve katodik koruma mekanizmaları	7
Şekil 2.4. Çinko patinası oluşumu	8
Şekil 2.5. Galvaniz kaplama katmanları	9
Şekil 2.6. Sıcak daldırma galvaniz prosesi.	10
Şekil 2.7. Galvanizli çelik korozyonunun aşamaları	12
Şekil 2.8. Kesme kenarında oluşan kaplama kalınlığındaki azalma	15
Şekil 2.9. Kesme kenarı korozyonu	17
Şekil 2.10. Kesme kenarında oluşan korozyon mekanizması	18
Şekil 2.11. Kesme kenarında alan etkisi	18
Şekil 2.12. Nanopartikül katılmış reçinenin kimyasal yapısının şematik gösterimi..	19
Şekil 2.13. Yüzey modifikasyonunun kaplamanın bariyer performansı üzerine etkisini gösteren şematik gösterim	22
Şekil 2.14. PU kaplamanın korozyon koruma performansı üzerine grafen ilavesinin etkisinin şematik diyagramı	23
Şekil 2.15. Polidopamin (PDA/CNT) kaplamanın korozyon direncine etkisinin şematik diyagramı	23
Şekil 2.16. Termal kesim işlemi sonrasında sacdaki galvaniz kaplamanın etkilenmesi.	28
Şekil 2.17. Kesim bölgelerinden ilerleyen korozyon.	28
Şekil 3.1. Galvanizli sacların lazer ile kesilmesi.	32
Şekil 3.2. Kaplama için hazırlanan test plakaları ve ölçüleri.....	33
Şekil 3.3. Mekanik karıştırıcı.....	38
Şekil 3.4. Aplikatör ile kaplama uygulaması.	38
Şekil 3.5. Çeşitli test ve analizler için farklı ölçülerde hazırlanmış numune örnekleri.	39
Şekil 3.6. Numune hazırlama adımları.	39
Şekil 3.7. FTIR analiz cihazı.	40
Şekil 3.8. Kaplama kalınlığı ölçümü.....	41
Şekil 3.9. Kafes çizgi testi uygulanmış numuneler; (a) Saf epoksi, (b) Nano ZnO katılan, (c) Mikro ZnO katılan ve (d) Hibritpartikül katılan.....	42
Şekil 3.10. Konik bükme testi uygulanmış numuneler; (a) saf epoksi, (b) Nano ZnO katılan, (c) Mikro ZnO katılan ve (d) Hibritpartikül katılan.....	43
Şekil 3.11. Nanoindentasyon test cihazı.	44
Şekil 3.12. Mikrosertlik ve mikroçizik uygulaması için hazırlanan numuneler.	44
Şekil 3.13. Kaplama numunelerinin örnek Yük - Derinlik eğrileri: (a) nanopartikül, (b) hibritpartikül katılan numune.	45
Şekil 3.14. Mikroçizik testi sonucunda elde edilen, artan yükleme değerine karşı penetrasyon derinliği ve kalan derinlik değişimi grafiği örnekleri; (a) saf epoksi, (b) hibritpartikül katılan numune.	46
Şekil 3.15. Tuz testi kabini.	47
Şekil 3.16. Tuz testi için kabin içine yerleştirilen test plakaları.	48

Şekil 3.17. EİS testi için hazırlanan ve kabin içine yerleştirilen numuneler.	48
Şekil 3.18. EİS testi için hazırlanan numuneler.	50
Şekil 3.19. EİS ölçümleri için kullanılan test düzeneği.	50
Şekil 3.20. Tarama elektron mikroskobu.	51
Şekil 4.1. Kaplamalara ait FTIR spektrumları.	52
Şekil 4.2. Kaplamalara ait TGA eğrileri.	53
Şekil 4.3. Mikro ZnO partikül katılan numunede bükme testi sonrası oluşan çok küçük ayrılma görüntüsü.	55
Şekil 4.4. Mikroçizik testi sonrasında numune yüzey görüntüleri a) SE, b) NE, c) ME, d) HE.	58
Şekil 4.5. Kaplanmış yüzeylerdeki su damlasının temas açısı görüntüleri, a) SE, b) NE, c) ME, d) hibrit	58
Şekil 4.6. Farklı sürelerle tuz testi uygulanmış numuneler.	60
Şekil 4.7. Tuz testi uygulanan numuneler; a)SE, b)NE, c)ME, d)HE.	60
Şekil 4.8. SE, NE, ME ve HE yüzey numunelerinin bir gün tuz çözeltisinde bekletildikten sonra %3.5'luk NaCl çözeltisi içerisinde kaydedilen Nyquist diyagramları.	61
Şekil 4.9. Elektronik devre modeli	62
Şekil 4.10. SE, NE, ME ve HE yüzey numunelerinin yedi gün tuz çözeltisinde bekletildikten sonra %3.5'luk NaCl çözeltisi içerisinde kaydedilen Nyquist diyagramları.	63
Şekil 4.11. SE, NE, ME ve HE yüzey numunelerinin yirmibir gün tuz çözeltisinde bekletildikten sonra %3.5'luk NaCl çözeltisi içerisinde kaydedilen Nyquist diyagramları.	64
Şekil 4.12. SE, NE, ME ve HE kesme kenarı numunelerinin bir gün tuz çözeltisinde bekletildikten sonra %3.5'luk NaCl çözeltisi içerisinde kaydedilen Nyquist diyagramları.	65
Şekil 4.13. SE, NE, ME ve HE kesme kenarı numunelerinin yedi gün tuz çözeltisinde bekletildikten sonra %3.5'luk NaCl çözeltisi içerisinde kaydedilen Nyquist diyagramları.	66
Şekil 4.14. SE, NE, ME ve HE kesme kenarı kesit numunelerinin yirmi bir gün tuz çözeltisinde bekletildikten sonra %3.5'luk NaCl çözeltisi içerisinde kaydedilen Nyquist diyagramları.	67
Şekil 4.15. ME numunelerinin yüzey ve kesme kenarı bölgelerinin yirmi bir gün tuz çözeltisinde bekletildikten sonra %3.5'luk NaCl çözeltisi içerisinde kaydedilen Nyquist diyagramları.	68
Şekil 4.16. Lazer ile kesme sonrasında kesilen kenarda oluşan çinko kaybı ve tahribat.	71
Şekil 4.17. Galvanizli sac (epoksi kaplama uygulanmamış) kesme kenarı görüntüleri; a)tuz çözeltisinde bekletmeden önce, b)tuz çözeltisinde beklettikten sonra.	71
Şekil 4.18. SE numunelerinin yüzey ve kesme kenarı görüntüleri; a) tuz çözeltisinde bekletmeden önce, b) tuz çözeltisinde beklettikten sonra.	72
Şekil 4.19. NE numunelerinin, yüzey ve kesme kenarı görüntüleri; a) tuz çözeltisinde bekletmeden önce, b) tuz çözeltisinde beklettikten sonra.	72

Şekil 4.20. ME numunelerinin, yüzey ve kesme kenarı görüntüleri; a) tuz çözeltisinde bekletmeden önce, b) tuz çözeltisinde beklettikten sonra... 73



ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Çinko kaplama yöntemleri ve kaplama kalınlıkları	10
Çizelge 3.1. Kaplama yapılan sac malzemenin kimyasal kompozisyonu (ağ. %).	31
Çizelge 3.2. Lazer ile kesme parametreleri.....	32
Çizelge 3.3. Epoksi reçinenin özellikleri.	34
Çizelge 3.4. Sertleştiricinin özellikleri.....	35
Çizelge 3.5. Kullanılan nano ve mikropartiküllerin fiziksel özellikleri.....	36
Çizelge 3.6. Kompozit kaplama formülasyonu (ağ. %).	37
Çizelge 3.7. Kafes çizgi testi değerlendirme tablosu	42
Çizelge 4.1. Kaplama numelerinin TGA sonuçları.....	54
Çizelge 4.2. Kaplamanın fiziksel özellikleri.....	55
Çizelge 4.3. Kaplamaların sertlik ve modül değerleri.	56
Çizelge 4.4. Mikroçizik testi sonrası penetrasyon ve kalıntı derinlik değerleri	57
Çizelge 4.5. Numunelere ait tuz testi sonuçları.	59
Çizelge 4. 6. SE, NE, ME ve HE yüzey numunelerinin impedans diyagramlarından hesaplanan elektrokimyasal parametreleri.	64
Çizelge 4. 7. SE, NE, ME ve HE kesme kenarı numunelerinin impedans diyagramlarından hesaplanan elektrokimyasal parametreleri.	67

SİMGELER VE KISALTMALAR

Al	Alüminyum
Al₂O₃	Alüminyum Oksit
ASTM	Amerikan Standartları Birliği
CeO₂	Seryum Oksit
CNT	Karbonnanotüp
CO₂	Karbondioksit
DSC	Diferansiyel Taramalı Kalorimetre
EDS	Enerji Dağılım Spektroskopisi
EIS	Elektrokimyasal İmpedans Spektroskopisi
Fe	Demir
Fe(OH)₂	Demir Dihidroksil
FTIR	Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi
GO	Grafenoksit
Mm	Milimetre
MMA	Metilmetakrilat
NaCl	Sodyum Klorür
O₂	Oksijen
OH	Hidroksil
Pa	Paskal
PDA	Polidomanin
PU	Poliüretan
SDG	Sıcak Daldırma Galvanizleme
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
SiO₂	Silisyum Oksit
SKP	Taramalı Kelvin Prob Mikroskobu
SWEAT	Klorür Konstrasyonu Ölçme Testi
TEOS	Tetraetoksisilan
TGA	Termogravimetrik Analiz
TiO₂	Titanyum Oksit
W	Watt
XPS	X-Ray fotoelektron Spektroskopisi
Zn	Çinko
Zn(OH)₂	Çinko Hidroksil
ZnCl₂	Çinko Klorid
ZnCO₃	Çinko Karbonat
ZnO	Çinko Oksit
ZnSO₄	Çinko Sülfat
µm	Nanometre

1. GİRİŞ

Bu tez çalışmasının temel amacı, galvaniz kaplı çelik sacların ürüne dönüştürülmesi amacıyla kullanılan kesme, bükme vb. işlemler esnasında, çelik sacı korozyona karşı koruyan çinkonun işlem bölgelerini terk etmesi nedeniyle oluşan zayıflama bölgelerinde, nano ve mikropartikül katılmış polimer kaplamaların sacın azalan korozyon direnci üzerindeki etkilerinin araştırılmasıdır.

Sacların lazer veya plazma kesim işlemlerinde oluşan yüksek sıcaklık nedeniyle, çinko kaplama kesilen bölgelerden buharlaşarak uzaklaşmaktadır. Ürünün yeniden çinko banyosuna daldırılması hem proses hem de maliyet açısından mümkün olamamaktadır. Bu nedenle bu bölgelere, montaj öncesinde çelik sac ve mevcut galvanizli kaplama ile uyum sağlayabilecek bir kaplama uygulamasının azalan veya kaybolan korozyon direncini arttıracığı öngörülmektedir.

Bunun yanında, ana amaca ek olarak; günümüzde pek çok çeşidi geliştirilen ve kullanım alanı yaygınlaşan nanomalzemelerin kullanım alanlarına yenilerinin eklenmesi, nanokompozit kaplama yapılan saclarda ömür tayini amacıyla mevcut test ve analizlerin yanında farklı karakterizasyon testlerinin uygulanması da çalışmanın amaçları arasındadır.

Bu konunun tez konusu olarak belirlenmesinde, Aksaray'da galvanizli sac kullanarak silo imalatı yapan çok sayıda firmanın bulunması etkili olmuştur. Bu tez çalışması kapsamında yapılabilecek işbirlikleri ile hem akademik hem de sektörel bilgi birikimine katkı sağlanması amaçlanmaktadır.

Bu çalışmada, galvaniz kaplı çelik sacların kesme, bükme vb. işlemler esnasında, çelik sacı korozyona karşı koruyan çinkonun kesme kenarını terk etmesi nedeniyle oluşan zayıflama bölgelerinde, nano ve mikropartikül katılmış polimer kaplamaların sacın azalan korozyon direnci üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Tez çalışmasının bölümleri oluşturulurken ilk bölüm olan Giriş bölümünde çalışmanın amacı ve içeriği açıklanmıştır. Giriş bölümünden sonra Teorik Araştırmalar bölümü yer almaktadır. Bu bölümde, metallarda korozyon mekanizmaları ve korozyondan korunma konusunda yapılan uygulamalar ele alınmıştır. Ayrıca bu bölümde; galvanizli

saclar, polimerik kaplamalar ve kompozit kaplamalar hakkında bilgi verilmiş ve bu tez çalışmasının literatürdeki yeri açıklanmıştır. Deneysel Çalışmalar bölümünde kullanılan malzemeler ve yöntemler açıklanmış ve uygulanan test ve analizler detaylı olarak açıklanmıştır. Bulgular ve Tartışma bölümünde deneysel çalışmalardan elde edilen bulgular analiz edilmiştir. Sonuçlar ve Öneriler bölümünde bu çalışmadan elde edilen sonuçlar özetlenmiştir. Bu bölümde ayrıca daha sonra yapılabilecek benzer çalışmalar için önerilere yer verilmiştir.



2. TEORİK ARAŞTIRMALAR

2.1. Metallerde Korozyon

Genel olarak korozyon, maddelerin özellikle metal ve alaşımlarının çevre koşulları altında kimyasal ya da fiziksel olarak değişime uğraması, çözünmesi, bozulmasıdır. Metal korozyonu TS 5731 EN ISO 8044’de; “Bir metalle çevresi arasında oluşan ve metalin özelliklerinde değişikliklere neden olarak metalin, çevresinin ya da bunların bir parçası olduğu teknik sistemin işlevlerinde ciddi bozulmalara yol açan elektrokimyasal etkileşim” olarak tanımlanmaktadır (Paksoy, 2008). Korozyon metallerin kullanım ömürlerini sınırlandıran en önemli faktörlerden birisidir. Büyük ekonomik kayıplara neden olmaktadır, sadece 2013 yılında dünyadaki toplam korozyon kaybının maliyeti 5 trilyon dolar civarındadır bu nedenle korozyonun, denetlenmesi ve önlenmesi son derece önemlidir (Akman, 2015).

2.1.1. Korozyon mekanizması

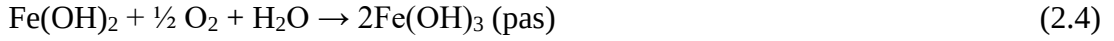
Elektrokimyasal korozyon reaksiyonları, metal yüzeyine temas eden bir elektrolit ve metal yüzeyinin çeşitli bölgelerindeki potansiyel farklılıklarının bir araya gelmesiyle oluşur. Standart elektrot potansiyeli düşük olan element anot, yüksek olan element de katot olur. Aşağıda da görüldüğü gibi, demir oksijene göre daha düşük seviyede potansiyele sahip olduğu için oksitlenip anot olur, oksijen ise demire göre daha yüksek potansiyele sahip olduğu için redüklenip katot olur (Paksoy, 2008). Sonuç olarak oluşan reaksiyonlar aşağıdaki gibidir.



Bu iki adımın aynı anda yürümesi ve ortamda oksijenin varlığı şarttır.

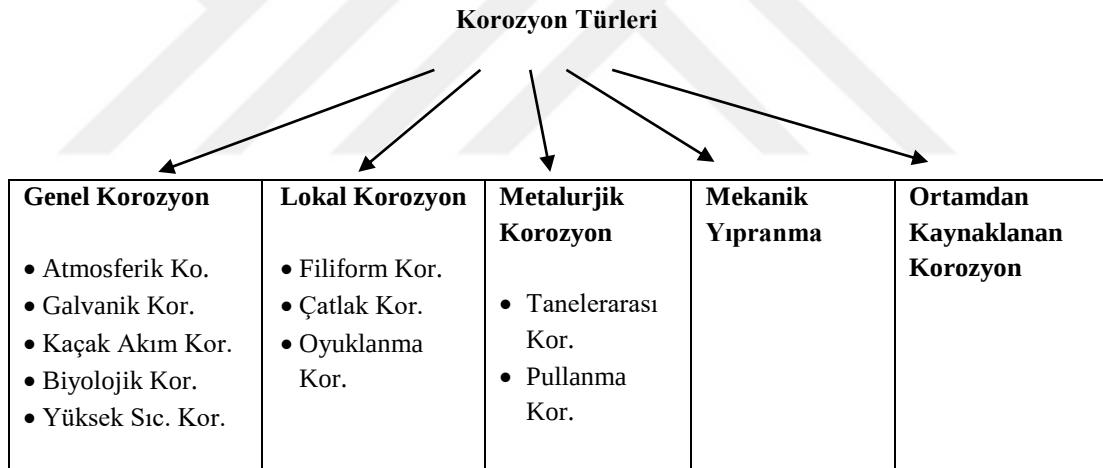


Daha sonra Fe^{2+} ve OH^- diffüze olurlar ve $\text{Fe}(\text{OH})_2$ oluşur. $\text{Fe}(\text{OH})_2$ ’nin tekrar oksijenle reaksiyona girmesi sonucunda da pas oluşur:



2.1.2. Korozyon türleri

Korozyon türleri aşağıdaki şemada (Şekil 2.1) gösterilmiştir. Koroziif atak sonucunda maddenin yüzeyinde homojen bir incelmenin meydana geldiği korozyon türü genel korozyondur. Bu atak sonucunda tahribat yüzeyin belli bir bölümünde görülürse lokal korozyon olarak adlandırılır. Metalin metalurjik yapısındaki heterojenliğin neden olduğu korozyon türü metalurjik korozyondur. Sürtünme, hidrodinamik etkiler gibi mekanik etkilerden kaynaklanan ve genellikle yorulma kırılmasıyla sonuçlanan korozyon türü mekanik yıpranma korozyonudur. Ortamdan kaynaklanan korozyon ise metallerin doğal koşullara maruz kalmaları sonucu çatlamları ile ilgilidir. Bu tip korozyonun sonucu ya yavaş oluşan çatlaklardır, ya da çoğunlukla karşılaşılan şekliyle, önceden kestirilemeyen ve ağır sonuçlara yol açabilecek türde kırılmalardır (ASM Handbook, 1992; Paksoy, 2008).



Şekil 2.1. Korozyon türleri (ASTM Handbook, 1992).

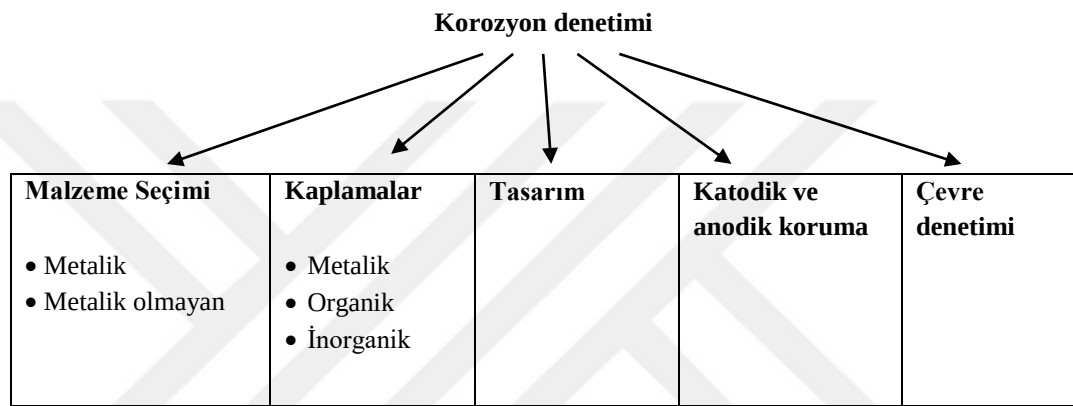
2.1.3. Metallerin korozyondan korunması

Metallerin korozyondan korunması konusu, oluşturduğu etkiler ve sonuçları nedeniyle, üzerinde yoğun olarak çalışılan konulardan birisidir. Bu çalışmalarda, metalik yapıların kullanım ömrünü arttırmak ve bunu uygun maliyetlerle yapmak amaçlanmaktadır.

Korozyon doğal olarak gelişen ve önüne geçilmesi çok zor olan bir mekanizmadır. Fakat korozyon hızını yavaşlatmak ve korozyonu kontrol altına almak mümkündür.

Korozyon, metalin içinde bulunduğu ortamın ile metalin ara yüzeyinde gerçekleşen bir olaydır. Bu nedenle korozyonla mücadelede; ortama daha dayanıklı malzeme üretmek, ortamı malzemeye daha az zarar verecek hale getirmek, malzemenin dış yüzeyinin ortama daha dayanıklı hale gelmesini sağlamak gibi önlemler alınıp bu önlemlerin birbirlerini destekleyecek şekilde tasarlanması en etkin strateji olacaktır (URL-1).

Metallerin korozyondan korunması için yaygın olarak kullanılan yöntemler Şekil 2.2’de verilmiş ve her bir yöntem aşağıda kısaca açıklanmıştır (Smith, 2001):



Şekil 2.2. Metallerin korozyondan korunması için kullanılan yöntemler (Smith, 2001).

Malzeme Seçimi: Korozyondan korunma için yapılacak en etkili uygulamaların başında, kullanılacağı ortamın koroziv etkisine dirençli malzeme seçimi gelmektedir. Mühendislik uygulamaları için malzeme seçimi yaparken aşağıdaki genel kurallara uymak korozyonu önlemede olumlu sonuçlar vermektedir:

- Oksitleyici olmayan indirgeyici koşullar altında nikel ve bakır alaşımları kullanmak.
- Oksitleyici koşullar altında krom içeren alaşımlar kullanmak.
- Çok şiddetli oksitleyici koşullar altında titanyum alaşımları kullanmak.

Kaplamalar: Korozyonu önlemek veya azaltmak amacıyla metaller metalik, inorganik ve organik kaplamalarla kaplanır. Metalik kaplamalar korudukları metalden farklıdır ve ince bir tabaka halinde metali çevrenin korozyon etkisinden korur. Galvanizli çelikte çeliğin üzerindeki çinko gibi bazen metal kaplamalar “kurban anot” olarak iş görür ve alttaki metali korozyondan korur. Bazı uygulamalarda düzgün ve dayanıklı bir yüzey elde etmek için çeliğin yüzeyi seramik bir malzeme ile kaplanır. Bu amaçla

elik yüzeyine iyi yapışma sağlayan ve çelikle aynı genleşme katsayısına sahip seramik malzemeler elik yüzeyine ince bir tabaka olarak uygulanır. Boyalar gibi çeşitli organik polimer malzemeler de metalleri korozyondan korumak için kullanılır. Organik kaplamalar metalleri korozyondan korumak için diğer yöntemlerin hepsinden ağırlıkça daha fazla kullanılırlar.

Tasarım: Korozyona direnç açısından, bir ürünün mühendislik tasarımının uygunluğu, doğru malzeme seçmek kadar önemlidir. Tasarım konusunda birkaç örnek şöyle sıralanabilir: Kullanılacak metalin kalınlığı belirlenirken, sadece mekanik etkiler değil, korozyonun metale vereceği hasar da hesaba katılmalıdır. Mümkün olduğu kadar bütün yapı galvanik olarak benzer malzemelerden seçilmelidir. Depolama tankları gibi yapılar içinde sıvı kalmaması için tam boşaltılabilecek şekilde tasarlanmalıdır.

Katodik ve Anodik Koruma: Katodik korumada korunacak metale elektron sağlanır, bu sayede metalin galvanik olarak nmesi bastırılacaktır. Katodik korumanın en yaygın uygulamalarından birisi, korunacak metal yerine korozyona uğrayacak mağnezium anotların kullanılmasıdır. Anodik koruma ise dıştan verilen bir anodik akımın etkisiyle metal veya alaşımın yüzeyinde koruyucu, dıngin bir film oluşturma esasına dayanır.

evre Denetimi: Korozyonun şiddetini belirlemede evre koşulları önemli olabilir. Korozyonu azaltmak için uygulanabilecek evre koşullarını değiştirme yöntemlerinden bazıları şunlardır; sıcaklığı düşürmek, sıvının hızını düşürmek, sıvıdan oksijeni uzaklaştırmak, iyon derişimini azaltmak, elektrolite nleyiciler katmak.

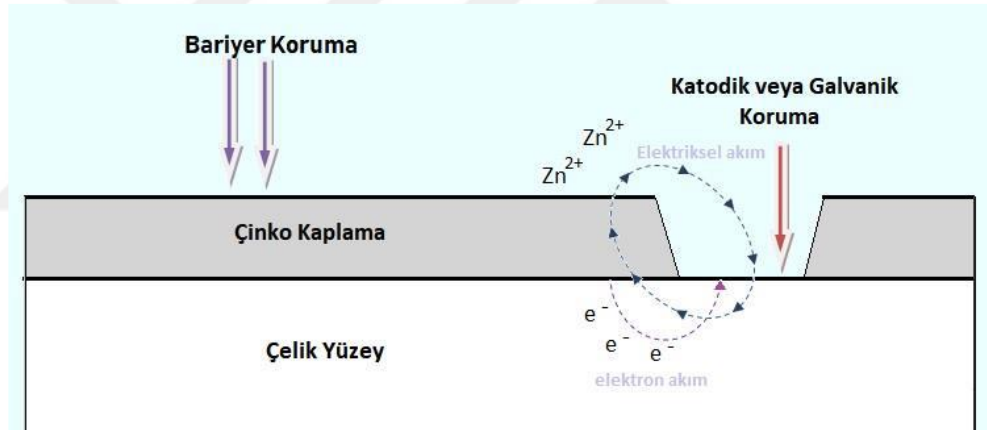
2.2. Galvanizli Saclar

Galvanizleme, metallerin korozyondan korunması amacıyla geliştirilen ve yoğun olarak kullanılan yöntemlerden birisidir. Çeliğin inko ile kaplanmasına galvanizleme adı verilir. Galvanizli elik saclar günümüzde birçok sektörde binlerce çeşit alanda kullanılmaktadır. Otomotiv, inşaat, beyaz eşya vb. sektörlerde çok geniş alanlarda kullanılan galvanizli saclar aynı zamanda gıda ürünlerinin depolanmasında da

kullanılır. Günümüzde ülkemizde yıllık olarak yaklaşık 1.5 milyon ton galvaniz sac işlenmektedir (URL-1).

Galvaniz kaplamaların iki önemli özelliği onları diğer endüstriyel boya ve kaplamalardan ayırır (Dıraz, 2018):

1. Galvanizli saclar, diğer boya ve kaplamalarda olan bariyer koruma (sınır koruma) mekanizmasının yanında, yapısındaki çinko sayesinde katodik koruma mekanizmasına da sahiptir. Diğer tüm boya ve kaplamalar bariyer koruması sayesinde çelik yüzeyleri fiziksel bir film ile dış etkilere izole ederken, galvanizli kaplamalar buna ek olarak katodik koruma mekanizması ile çelik yüzeylerin korozyona uğramaması için yapılarındaki çinkoyu elektrokimyasal olarak feda ederler (kurban anot), bu koruma mekanizmasına literatürde galvanik koruma da denir (Şekil 2.3).



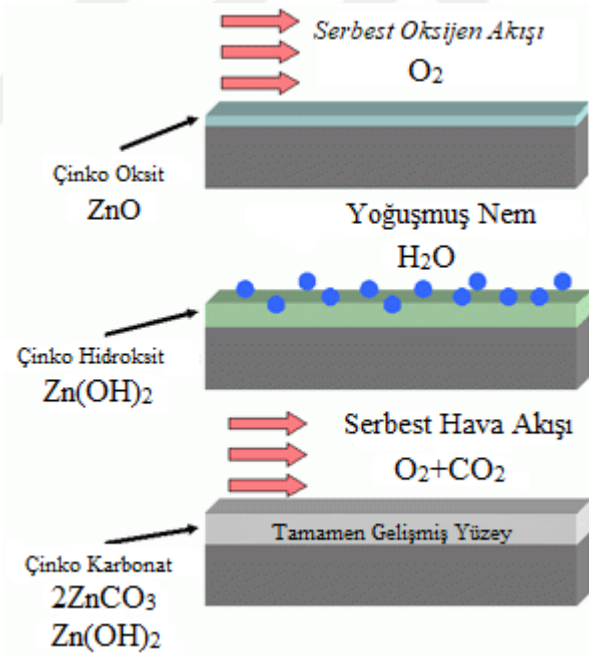
Şekil 2.3. Bariyer ve katodik koruma mekanizmaları (Dıraz, 2018).

2. Katodik koruma mekanizmasına ilave olarak, galvanizli metaller korozyon sırasında yapısındaki çinkonun havadaki nem ve oksijen ile tepkimeye girmesiyle, çinko patinası adı verilen korozyona ve dış etkilere karşı koruyucu bir tabaka geliştirirler (Şekil 2.4). Bu tabaka, atmosferik koşullar ve sıcaklık gibi dış etkenlerden kolay kolay etkilenmeyecek kadar sağlamdır ve bu yüzden uzun süre alttaki çinko katmanları korur. Bu sayede, bariyer ve katodik korumanın yanında çinko patinası da galvanizli metalin ömrünü uzatan bir mekanizmadır. Katodik olarak korunan çeliğin yüzeyindeki yüksek pH, çözülmüş çinkonun hidroksit ve ilgili bileşikler formunda birikmesini teşvik eder (Amuridin vd.,

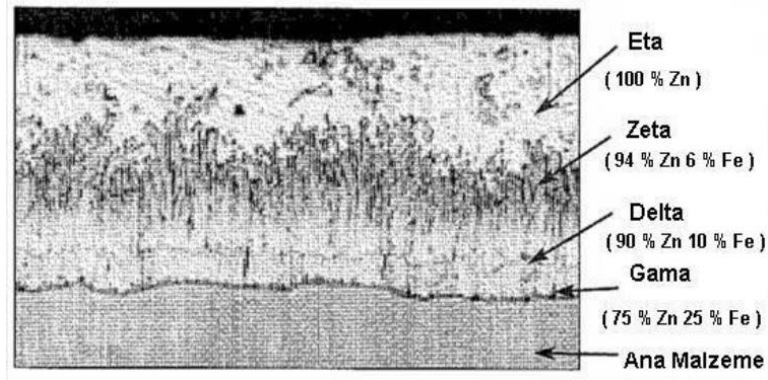
1996). Buna, galvanizlemenin üçlü koruyucu yapısı da denmektedir (bariyer+katodik+çinko patinası).

Çinko kaplamanın koruyucu özelliği, metal yüzeyine iyi yapışma sağlamasından, atmosferik korozyona karşı gösterdiği yüksek dayanımdan ve çeşitli atmosferik şartlarda oluşan $ZnSO_4$ dışındaki $Zn(OH)_2$, $ZnCO_3$ ve $ZnCl_2$ gibi korozyon ürünlerinin yüzeye sıkı tutunmasından kaynaklanmaktadır (Gülçelik, 2019). Galvaniz kaplama, çinkonun yüzeyden çok yavaş bir şekilde çözünmesi sayesinde çeliği uzun yıllar, yaklaşık 50-80 yıl arasında, korur (Yaluk, 2009).

Galvanizleme esnasında sıvı çinkonun çelik yüzeyi ile reaksiyona girerek oluşturduğu çeşitli çinko/demir katmanları ve içerdikleri demir miktarları Şekil 2.5’de gösterilmiştir (Pektaş 2018).



Şekil 2.4. Çinko patinası oluşumu (Dıraz, 2018).



Şekil 2.5. Galvaniz kaplama katmanları (Pektaş, 2018).

Yapışma mukavemetinin iyileştirilmesi için öncelikli olarak dikkat edilmesi gereken konu, kaplama öncesi mutlaka optimum bir yüzey hazırlığının yapılmasıdır (Gülçelik, 2019).

Galvaniz kaplamanın ömrü kaplama kalınlığı ile artmasına rağmen, daha kalın kaplamaların mekanik zorlamalar karşısında bozulma eğilimi daha yüksektir. Bu durum da göz önüne alınarak, kaplama kalınlığının kullanım yerine göre 5-50 μm , eğer parça dış atmosfere maruz kalacak ise minimum 12 μm olması gerekmektedir. Kaplama sonrası malzemenin kullanım amacının engellenmemesi, esnek, ucuz ve kaplama yöntemlerinin kolay olması, çelik yüzeyle iyi bütünleşmesi gibi sebepler de çinkonun kaplama malzemesi olarak tercih edilmesine nedeni olmuştur (Gülçelik, 2019).

Galvaniz kaplamanın dayanıklılığı; kuruma zamanı, sıcaklık, atmosferdeki klorür ve sülfat seviyeleri, diğer kimyasallarla temas, farklı metallerle temas gibi çevresel faktöre bağlıdır.

2.2.1. Çelik sacların galvanizlenmesi

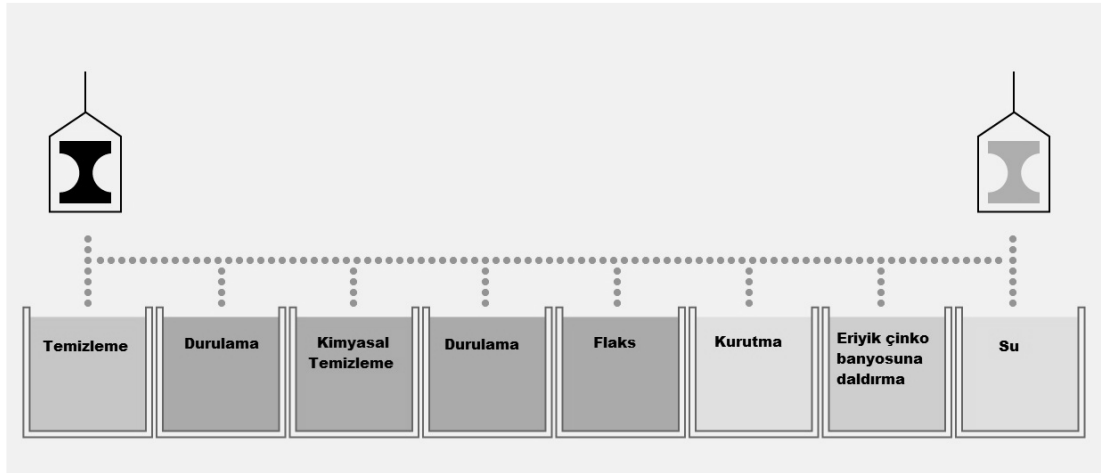
Çelik sacların yüzeyi, boyama, sıcak daldırma gibi çeşitli yöntemler uygulanarak çinko ile kaplanabilir. Maruz kalınacak olan korozyon ortamı dikkate alınarak doğru yöntem seçildiği takdirde başarılı koruma sağlanabilir. Genel olarak bir çinko kaplamanın ömrünün uzun ya da kısa olması kaplama kalınlığı ile orantılıdır. Çelik yüzeylerin çinko ile kaplanmasında kullanılan başlıca yöntemler ve bu yöntemlerle elde edilen kaplama kalınlıkları Çizelge 2.1.'de verilmiştir (Yaluk, 2009):

Çizelge 2.1. Çinko kaplama yöntemleri ve kaplama kalınlıkları (Yaluk, 2009).

Yöntem	İşlem	Kaplama Kalınlığı
Elektro galvanizleme	Elektroliz	7.11 μm
Çinko Kaplama	Elektroliz	5.1-25.4 μm
Mekaniksel Kaplama	Dövme	5.08-109.2 μm
Çinko Püskürtme (Metal Kaplama)	Sıcak Çinko Püskürtme	83.8-210.8 μm
Sürekli Sac Kaplama	Sıcak Daldırma	101.6 μm
Sıcak Daldırma Galvanizleme	Sıcak Daldırma	35.6-99.1 μm
Çinko Boyama	Fırça	15.2-127 μm

Çelik yüzeylerin galvanizlenmesinde en çok kullanılan yöntem sıcak daldırma galvanizleme (SDG) olduğu için ve bu tez çalışmasında deneysel uygulamalarda bu yöntemle kaplanmış çelik plakalar kullanılacağından dolayı burada sıcak daldırma yöntemi kısaca ele alınmıştır.

İmalatı tamamlanan ve yüzey temizleme işlemi yapılan çelik ürünler ergimiş çinko banyosuna daldırılır (Şekil 2.6). Malzemenin tüm yüzeylerini yaklaşık 450 °C'deki eriyik çinko ile eşit olarak kaplanır ve çinko ile çelik arasında metalürjik bir bağ oluşur (Akman, 2015).



Şekil 2.6. Sıcak daldırma galvaniz prosesi (Akman, 2015).

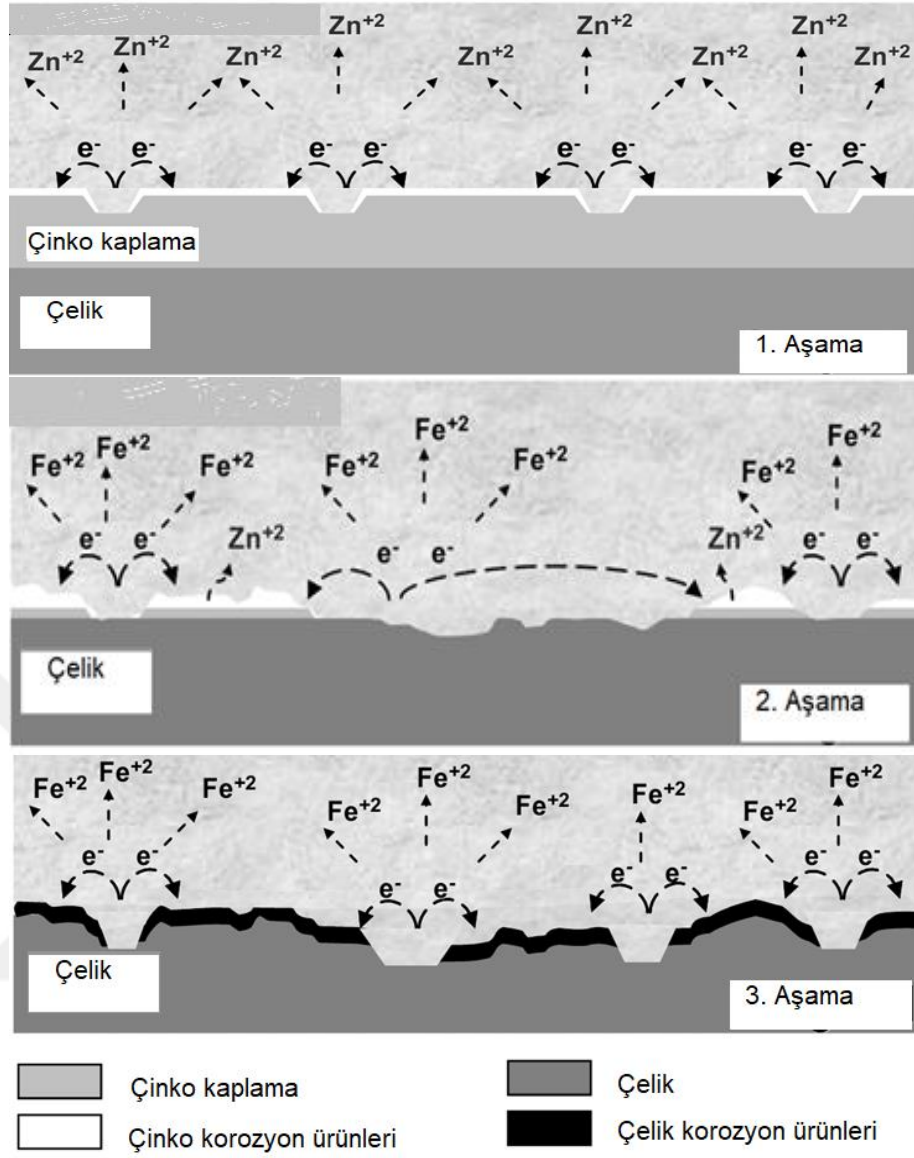
Sıcak daldırma galvaniz kaplama uygulanan çelik malzemeler; ulaşım, enerji, inşaat, otomotiv, denizcilik ve tarım gibi pek çok sektörde tercih edilmektedir. Ulaşım ve enerji sektörü başı çekmekte ve toplam üretimin %52'si bu sektörlerde

kullanılmaktadır. Sıcak daldırma galvaniz kaplama uygulamasının birçok avantajları vardır. Bu avantajlardan en dikkat çeken birkaç tanesi aşağıda sıralanmıştır:

- *Ekonomiktir:* Genel kanının aksine sıcak daldırma galvaniz kaplama alternatif yöntemler arasında oldukça ekonomiktir.
- *Uzun Ömürlüdür:* Sıcak daldırma galvaniz kaplama bulunduğu ortam koşullarına ve kaplamanın kalınlığına bağlı olarak çelik ürünlerini uzun süre korur.
- *Doğaya Dosttur:* SDG prosesinde kullanılan malzemeler (asit, vb.) çeşitli işlemlerden geçirilerek tekrar kullanılabilir. Çinko %100 geri dönüşümlüdür. Her yıl dünyada kullanılan çinkonun %30'u geri dönüşümden kazanılmaktadır. Ayrıca, SDG kaplama kullanım ömrü sonunda doğada kalıntı bırakmadan tamamen yok olur. Çelik ürünlerin kullanım ömrünü uzatarak da doğal kaynakların korunmasını sağlar.
- *Bütünsel Kaplama:* Malzemenin kapalı hacimleri dahil tüm yüzeyi kaplanarak, ürünün tamamen korunması sağlanır.
- *Zamandan Tasarruf:* İmalatta zaman çok önemlidir. Bu nedenle endüstriyel bir uygulama olan SDG kaplama hava vb. koşullardan bağımsız olarak yapılabilir ve uygulama işlemi sonrası kaplama kullanıma hazırdır.

2.3. Galvanizli Sacların Korozyonu

Genel olarak kaplamalar, alttaki metalik malzemeyi üstünü örterek yani atmosferle temasını keserek bariyer etkisi ile korur. Oysa çinko kaplamaların bariyer etkisinin yanında esas fonksiyonu katodik olarak koruma sağlamasıdır. Diğer bir deyişle çinko demire göre daha reaktif olduğu için demirden önce oksitlenir. Galvanizli çelikte oluşan korozyonunun tüm aşamaları Şekil 2.7'de görülmektedir.



Şekil 2.7. Galvanizli çelik korozyonunun aşamaları (Perez, 2014).

Çinko tabakasında meydana gelen ilk koroziv reaksiyonlar aşağıdaki şekilde oluşur (Şekil 2.7, 1. ve 2. Aşama) (Perez, 2014; Karlsson, 2011):



Çinko tabakasında meydana gelen ikinci korozyon mekanizması, metal yüzeyine yakın Zn(OH)_4^{2-} iyonlarının doygunluğuna bağlı olarak poröz yapılı bir çinko oksitin çökeldiği mekanizmadır (Baugh ve Higginson, 1985). Baugh ve Higginson tarafından önerilen mekanizma aşağıdaki gibidir:



Bunlara ilaveten çinko tabakasında meydana gelen üçüncü korozyon mekanizması olarak, maruz kalma koşullarına bağlı olarak, ZnO/Zn(OH)_2 daha karmaşık korozyon ürünleri oluşturmak üzere reaksiyona girdiği mekanizmalar da önerilmiştir. En yaygın olarak rapor edilen korozyon ürünlerinin ikisi simonkolit $\text{Zn}_5(\text{OH})_8\text{Cl}_2$ ve hidrozinisit $\text{Zn}_5(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_6$ olmuştur (Perez, 2014).

Çinko kaplamaların korozyon mukavemeti belirtilirken beyaz pas ve kırmızı pas direnci ayrı ayrı rapor edilir. Çinko kaplı bir metalik malzeme oksitlenmeye başlayınca önce beyaz bir tabakayla kaplanır. Yukarıda beyaz pas oluşumu için önerilen mekanizmalar ve reaksiyonlar verilmiştir (1. ve 2. Aşama reaksiyonları). Çinko oksit beyaz olduğu için böyle ifade edilir.

Çinkonun tamamı oksitlenip tükendikten sonra kurban anot olarak koruma sağlayamaz (katodik koruma), bu durumda demir oksitlenmeye başlar (Şekil 2.7, 3. Aşama) ve rengi kırmızıdır. Kırmızı pas reaksiyonu denklem 3.8, 3.9 ve 3.10'da verilmiştir (Perez, 2014).

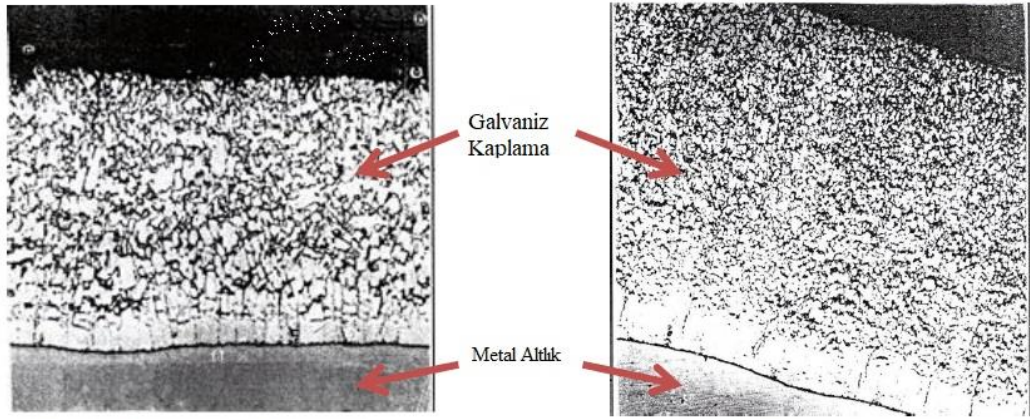


2.3.1. Galvanizli saclarda korozyon direncine etki eden faktörler

Galvanizlemeyle sac yüzeyinde oluşturulan çinko tabakası, atmosferik etkilerin önünde bariyer oluşturarak ve katodik olarak çelik malzemeyi korur. Fakat malzeme, uygulama veya çevresel şartlardan kaynaklanan çeşitli faktörler bu koruyucu

tabakanın korozyon direnci performansını etkiler. Bu faktörlerin başlıcaları aşağıda sıralanmıştır (Karakaş vd, 2012):

- a) *Galvaniz kaplanan çelik sacın kimyasal kompozisyonu:* Galvanizli sac üretiminde kullanım alanları ve özellikler farklı olan çelikler kullanılabilir. Galvaniz kaplamadan başlayarak çelik alt tabakaya doğru ilerleyen korozyona karşı, farklı kimyasal kompozisyonlara sahip çelik kalitelerinin dirençleri de farklı olmaktadır. Yapılan çalışmalar çelik kompozisyonundaki Ni, Nb, Cr, Mo, ve Cu'nun çeliğin korozyon direncini geliştirdiğini göstermiştir.
- b) *Atmosferik koşullar:* Doğal atmosferik koşullarda kullanılan galvanizli saclarda, üretimlerinden hemen sonra oluşmaya başlayan ve yavaşlayarak ilerleyen ince bir pasif çinko karbonat tabakası oluşur. Aslında kendisi de bir korozyon ürünü olan bu tabaka, daha sonradan oluşabilecek ağır korozyonlara karşı sacı kısmen korur, ancak bu doğal bariyer birçok korozif ortam şartları için yetersizdir. Diğer metallerde olduğu gibi, galvanizli sacların kullanıldığı alanlardaki yağış, gece/gündüz ve mevsimsel sıcaklık farkları, nem miktarı gibi doğal koşulların yanı sıra, denize yakınlığa bağlı tuzluluk ve endüstriyel ortam şartları da galvanizli sacın korozyon direncine etki etmektedir.
- c) *Yüzey kusurları:* Galvanizleme işlemi sırasında veya sonrasında; sacın taşınması, şekillendirilmesi, montajı aşamalarında oluşan yüzey kusurları, galvanizli sacın korozyona direncini düşürebilmektedir. Bu kusurların başlıcaları; pin-hole, çizik, düşük çinko kaplama kalınlığı, kaplamanın oluşmaması, kaplama öncesi tufal, kaplamada çinko banyosu yüzey tufali, montaj çapağı olarak sıralanabilir. Genellikle, kaplamadaki kusurlu bölgede korozyon daha kısa sürede başlamakta ve kusursuz yüzeylere doğru hızla ilerlemektedir. Yapılan bir çalışmada, çelik saca yapılan galvanizleme işleminde elde edilen kaplama kalınlığının, sacın kesilen kenarındaki yüzey sertliği ve içyapı özelliklerinde meydana gelen değişimler nedeniyle, istenilen seviyede elde edilemediğini göstermiştir. Şekil 2.8'de sacın kenardan 10 mm uzak bölgesindeki galvaniz kaplama kalınlığı 100 µm iken kesme kenarında oluşan kalınlık 60 µm olarak ölçülmüştür (GAA, 2011).



Kesme kenarına uygulanan kaplama

Kesim yapılmamış bölgedeki kaplama

Şekil 2.8. Kesme kenarında oluşan kaplama kalınlığındaki azalma (GGA, 2011).

- d) *Yüzey prüzlendirme (Skin-Pass)*: Galvanizli sac boyanmak üzere tasarlanmış ise, boya tabakasının yüzeye tutunmasını arttırmak amacıyla yüzey 0.6 ila 1.3 μm kadar prüzlendirilmektedir. Prüzlendirme işlemi, sac galvaniz kaplandıktan sonra, yüzeyleri prüzlendirilmiş iki adet merdanenin arasından geçirilerek yapılmaktadır. Çinko havuzundaki sıvı çinkoya daldırılan sac, havuzdan çıktıktan hemen sonra, sac yüzeyindeki sıvı fazdaki çinkonun fazlası basınçlı hava yardımı ile tekrar havuza sıyrılır ve sac belirli bir hızda soğutulur. Bu işlemle sac yüzeyinde, homojen özelliklere sahip sürekli bir katı çinko tabakası oluşur. Pürüzlendirme merdanesi bu tabakanın yüzeyindeki sürekliliği bozarak yüzey alanını artırır ve kaplamanın korozyon direncini düşürür.
- e) *Çinko havuzunun ve çinko kaplamanın kimyasal kompozisyonu*: Galvanizleme işlemi ile sac yüzeyinde oluşturulan galvaniz tabakasının kimyasal kompozisyonu, önemli ölçüde, sacın daldırıldığı çinko havuzundaki sıvı çinkonun kimyasal kompozisyonuna bağlıdır.

2.3.2. Galvanizli sacların korozyondan korunması

Üretilen galvanizli sacların büyük bir kısmında, korozyon direnci krom esaslı pasivasyon ajanları ile sağlanmaktadır. Bunun yanında koruyucu yağ kullanımı ve boyama da korozyon direncini arttırmak için yapılan uygulamalar arasındadır (Karakaş vd., 2012).

- a) *Pasivasyon ajanlarının kullanımı*: Galvaniz kaplamanın korozyon direncini arttırmak amacıyla yapılan kromat kaplama işlemi pasivasyon olarak tanımlanır.

Kromat, galvanizli çelikte çinko yüzeylerin reaktivitesini azaltmak amacıyla kullanılır (Longhi vd., 2015). Pasivasyon sonrasında galvanizli sacların korozyon dirençleri; kullanılan pasivasyon ajanının türüne, miktarına, uygulama süresine, sıcaklığa bağlı olarak değişmektedir. Galvanizli saclarda kullanılan pasivasyon türleri genel olarak Cr^{6+} , Cr^{3+} , Cr-Free (Titanyum ve Zirkonyum bazlı) ve organik olarak sıralanabilir. Çinko kromat tabakası, çinkonun anodik çözünmesi ve ardından çinko ve kromat iyonlarının reaksiyonu ile oluşur. Korozyon koruması, oksijenin anyon okside dönüşerek elektrokimyasal reaksiyonların engellenmesi ile sağlanır. Oksijenin anyon okside dönüşmesi aynı zamanda çinkonun iyonizasyonu ile açığa çıkan elektronları harcamaktadır (Gülçelik, 2019). Her ne kadar Cr^{6+} 'nın insan ve çevre sağlığına olumsuz etkilerinden dolayı, Japonya ve Avrupa Birliği Ülkeleri'nde kullanımı kısıtlanmış ya da kaldırılmış olsa da, dünyada özellikle yapı sektöründe kullanılan galvanizli sacların pasivasyonunda, uygun maliyet ve sağladığı yüksek korozyon direnci nedeniyle hala kullanılmaktadır.

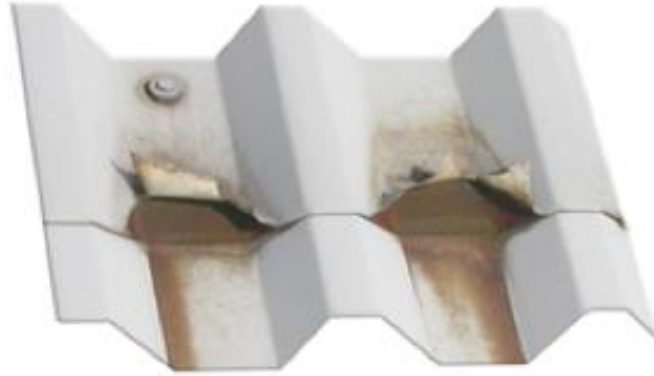
- b) *Koruyucu yağ kullanımı:* Galvanizli sacların korozyondan korunması amacıyla, çinko ile uygun şekilde bağ oluşturabilen hidrofobik özelliğe sahip yağlar kullanılmaktadır. Yüzeyde sürekli bir ince film tabakası oluşturan yağ, çinko tabakası ile oksitleyiciler arasında bariyer görevi görür. Bu özel tasarımlı yağlar korozyon inhibitörleri de içermekte ve galvanizli sacın boyama gibi başka bir işleme tabi tutulması durumlarda alkali temizleme ünitelerinde kolaylıkla temizlenebilmelerinden dolayı tercih edilmektedirler.
- c) *Boyama:* Galvanizli çeliklerin yüzeyinin atmosferik korozyondan korunması amacıyla yapılan çalışmalar, kromatlamanın insan sağlığına olan olumsuz etkilerinden dolayı son yıllarda alternatif uygulamalara yönelmiştir (Longi vd., 2015). Dupleks sistem olarak adlandırılan galvaniz kaplamanın üzerine organik kaplama uygulamaları da bunlardan birisidir. Organik kaplamanın korozyon direnci; bariyer etkisine ve metalik altlığa yapışma durumuna bağlıdır. Bu uygulamalar klasik boyalar ile yapılabileceği gibi fonksiyonel silanlarla veya hibrit kaplama sistemleriyle de yapılabilmektedir (Longhi vd., 2015). Galvaniz yüzeyler genelde pürüzsüz, parlak yüzeylerdir. Estetik görünüş ve korozyona karşı direncin artırılması gibi nedenlerden dolayı galvaniz yüzeylerin boyanması gerekebilir. Boyanın yüzeye tutunması ve kullanım esnasında boyanın yüzeyden kalkması, soyulması gibi problemlerle karşılaşmamak için

galvanizli çeliklerin yüzeyi boyama öncesinde temizlenmeli ve uygun bir boya/kaplama sistemi ile boyanmalıdır.

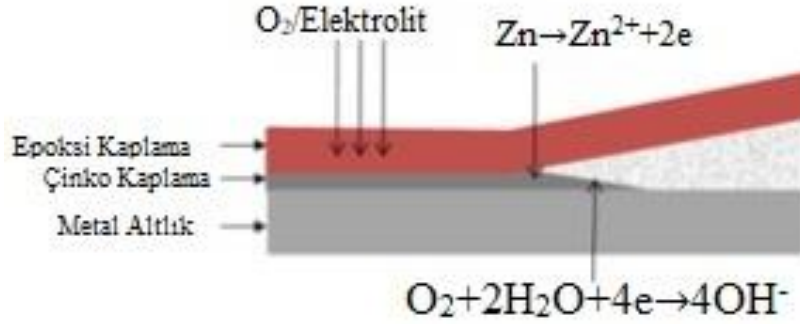
2.3.3. Kesme kenarı korozyonu

Kesme kenarı korozyonu kaynaklarda tanımlanan standart korozyon türleri içinde yer alan bir korozyon türü değildir. Korozyona karşı korunması amacıyla metalik malzemelere kaplama veya boyama yapılabilir, ancak uygulama sırasında bu ürünlerin kesilmesi, şekillendirilmesi gerekebilir. Bu durumda kesme kenarı, dış ortamdan gelen korozyon saldırısına maruz kalan metal üzerindeki savunmasız bölgedir. Kesilen kenarda açıkta kalan yüzeyde oluşan korozyon kesme kenarı korozyonu olarak adlandırılır (şekil 2.9).

Galvanizli çelikte çinko çeliğe göre daha anodik olduğu için çeliği elektrokimyasal korozyona karşı korur. Galvaniz kaplama atmosfere maruz çeliğe iyi bir korozyon koruması sağlamasına rağmen, elik sacın kesilen kenar bölgelerinde katodik reaksiyon, elik yüzeyinde çinko kaplamanın anodik çözünmesine yol açan bir galvanik hücrenin oluşmasına neden olarak kesme kenar korozyonunu oluşturur (şekil 2.10) (Nazarov vd., 2012).



şekil 2.9. Kesme kenarı korozyonu (URL-2).



Şekil 2.10. Kesme kenarında oluşan korozyon mekanizması (URL-2)

Galvanizli saclar ticari olarak, sacın kullanım ömrünü arttırmak amacıyla, kaplanmış veya boyanmış halde olabilir. Ancak Şekil 2.11’de görüldüğü gibi kesilen bölgede istenmeyen bir anot-katot alanı oranı (1/100) oluşur. Kesilen bölgede oluşarak, çinkonun çözünmesini hızlandıran, küçük anot-büyük katot alanı bu bölgede boya filminin kabarmasına ve delaminasyonuna neden olarak korozyonu hızlandırır (Yasakau vd., 2016).



Şekil 2.11. Kesme kenarında alan etkisi (Lezzi, 2011).

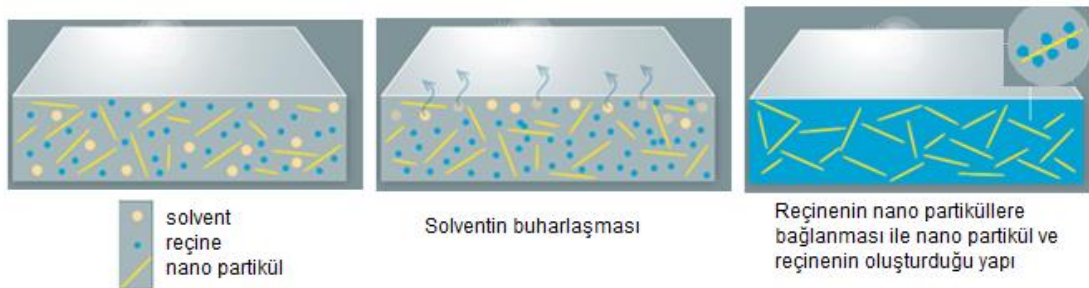
Bu bölgede çeşitli reaksiyonlarla korozyon önleme/yavaşlatma mekanizmasının oluşumunu sağlamak ve geliştirmek amacıyla çok sayıda çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalar çoğunlukla çinko kaplamanın bileşimini modifiye etmek esasına dayanmaktadır. Çinko kaplama bileşimine özellikle Al ve Mg ilave etmenin kesme kenarındaki korozyon direncini arttırdığına yönelik çalışmalar bulunmaktadır (Thebault vd., 2015). Örneğin yapılan çalışmalarda, %4.5 Al + %95 Zn alaşımına az miktarda Mg (%0.05'e kadar) ilave edilmesi, %5 NaCl çözeltisinde galvanizli çelik kesme kenarlarında korozyon oranını arttırdığı görülmüştür. Mg ilavesi, aktif korozyon bölgeleri olarak işlev gören primer çinko dendritlerin oranını artırır. Ancak, daha yüksek Mg içeriğine sahip çinko alaşımlarının kullanımı, kesme kenarında geleneksel galvanizli çeliğe kıyasla daha düşük korozyon oluşmasına neden olmuştur. Bununla birlikte, çinko alaşımlarının performansı; korozif çözeltinin konsantrasyonu,

çözelti bileşimi, maruz kalma süresi vb. gibi test koşullarına büyük ölçüde bağlıdır (Yasakau vd., 2016).

2.4. Kompozit Kaplamalar ve Korozyondan Koruma Etkisi

Kompozit kaplamalar, matris olarak kullanılan polimer içerisine partiküllerin katılması ile elde edilen polimerik kaplamalardır. Katılan partiküller mikro veya nano boyutta olabilir. Özellikle nanopartiküllerin katılmasıyla elde edilen nanokompozit kaplamalar konusunda son yıllarda yoğun bir şekilde akademik çalışmalar yapılmaktadır (Behzadnasab vd., 2011; Zhang vd., 2015; Tabkhpaz vd., 2018; Shi vd., 2009). Bu çalışmalarda; korozyon direncinin geliştirilmesi, mekanik (çizilme direnci, darbe direnci, aşınma direnci vb.) ve termal özelliklerin iyileştirilmesi gibi konular ele alınmaktadır.

Kaplamaların performansı, polimer matrise katılan ikinci bir fazın, korozyona neden olan elektrolitlerin difüzyon yolunu uzatması (zikzaklama) ve poroziteyi azaltmasıyla arttırılabilir. Bu sayede matrise katılan partikül, kabarcıklanma veya delaminasyonu azaltarak korozyon direncini arttırır (Shi vd., 2009). Partikül, matris içinde dağıldığında boşlukları doldurabilir, çatlak sapması ve çatlak köprüsüne neden olarak kaplamanın mekanik özelliklerini iyileştirir. Partiküller ayrıca, kürleşme sırasında reçinenin ayrışmasını önleyerek kaplamanın daha homojen olmasını sağlarlar. Partiküller, polimer molekülleri arasında bağlantı köprüsü gibi hareket ederler ve reçinenin kürleşmesi sırasında bölgesel büzölmelerle oluşan küçük kusurları kapatırlar. Şekil 2.12’de polimer matrisin nanopartikül katıldıktan sonraki kimyasal yapısı şematik olarak verilmiştir.



Şekil 2.12. Nanopartikül katılmış polimer matrisin kimyasal yapısının şematik gösterimi (Wassink, 2007).

Kompozit kaplamalarda en çok kullanılan polimer matris malzemeleri; epoksi, polyester ve akrilik polimerlerdir. Epoksi reçineler kaplama malzemesi olarak endüstriyel uygulamalarda en çok kullanılan malzemelerden birisidir (Ghasemi-Kahrizsangi vd., 2015). Ancak, yüksek çaprazbağı yapılarından kaynaklanan düşük çekme dayanımları ve gevrek yapıları bazı uygulamalarda kullanımlarını sınırlandırmaktadır (Haeri vd., 2017, Conradi vd., 2015). Araştırmacılar bu olumsuz özellikleri iyileştirerek daha yüksek tokluk ve dayanıma sahip epoksi kaplamalar geliştirebilmek amacıyla epoksiye çeşitli partiküller katarak epoksi reçineyi modifiye etme yoluna gitmişlerdir. Katılan partikülün türü, miktarı, boyutu ve partikülün polimer matrisle uyumu gibi çeşitli faktörler kaplamaların özelliklerini etkilenmektedir (Perera 2004; Kotnarowska vd., 2014). Özellikle nano boyutta partiküllerin katıldığı epoksi kaplama sistemine nispeten düşük oranlarda katılan partiküller, kaplamanın yüzeye tutunmasından, mekanik özellikleri ve termal kararlılığına kadar pek çok özelliğinde dikkate değer gelişmeler sağlamıştır (Ng vd., 1999; Zhang vd., 2002; Naganuma ve Kagawa, 2002; Wetzel vd., 2003). Ramezanzadeh ve Attar (2011b) çalışmalarında, partikülün polimer matris içinde iyi dağılımı için nanopartikül miktarının düşük olması gerektiğini, yüksek olması halinde aglomerasyona yol açtığını ifade etmişlerdir (Ramezanzadeh ve Attar 2011a). Yapılan bazı çalışmalarda da benzer sonuçlar ortaya konulmuş ve matris içindeki nanopartikül konsantrasyonunun artmasının (ağırlıkça % 5'in üstü) özellikleri olumsuz etkilediği gösterilmiştir (Maitra vd., 2009).

Yapılan literatür araştırmalarında, polimerik kompozit kaplamalarla ilgili çalışmalarda en yaygın kullanılan mikro ve nanopartiküller arasında; ZnO, ZrO₂, TiO₂, Fe₂O₃, SiO₂, Al₂O₃ ve çeşitli nanokarbon formları (karbon nanotüp, grafen gibi) yer almaktadır (Ramezanzadeh ve Attar 2011a; Parimalam vd., 2019; Ghanbari ve Attar, 2015).

Polimer kaplamaya katılan partiküllerin kaplamanın korozyon direncinin arttığı literatürde yapılan çalışmalarla ortaya konulmuştur. Partiküller öncelikle “bariyer etkisi” ile kaplamanın korozyon direncini artırır. Partiküllerin özelliğine bağlı olarak “katodik koruma” ile de korozyondan koruma sağlanabilir. Nanopartiküller sayesinde elde edilen korozyon direncindeki artışın nedenleri ve mekanizmaları aşağıda özetlenmiştir:

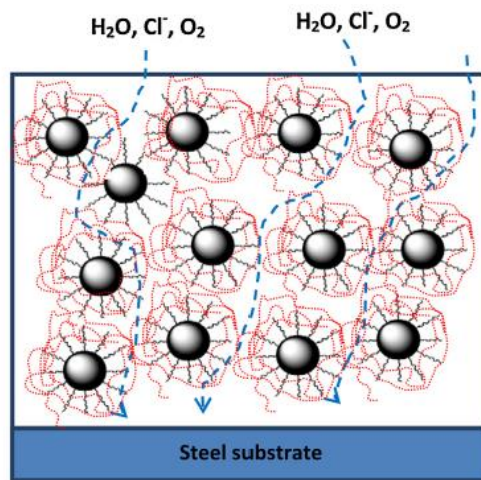
- Partiküller bariyer etkisi ile korozif elektrolitlerin polimerik kaplamadan geçmesini engeller; difüzyon yolunu kısıtlar, zigzaglar yaparak geçmesine neden olur (Dhoke vd., 2013). Böylece kaplamanın korozyon direncini artırır. Az miktarda ve iyi dağılmış partiküller bu konuda daha etkilidir. Partikül boyutu küçük olduğu için artan yüzey alanı sayesinde daha fazla reçineyle temas ederek ve polimerik reçinede daha fazla çaprazbağ oluşumu sağlayarak (Wang vd., 2015), kaplama yoğunluğunu artırır, bu da elektrolitin kaplamaya difüzyonunu zorlaştırır (Dhoke vd., 2013). Özellikle, kullanılan partikül nano boyutta ise partikül kümelenmesi (aglomerasyon) oluşabilmekte ve yüksek yüzey aktivasyonları nedeniyle kusurlu bölgeler (çatlak benzeri) oluşturmakta ve bu da kaplamanın kırılabilirliğini arttırmaktadır. Ayrıca bu kusurlar kaplamanın korozif performansını olumsuz etkileyen elektrokimyasal reaksiyon bölgeleri olarak işlev görmektedir (Dhoke vd., 2013). Kümelenme nedeniyle matrisle nanopartikül arasındaki arayüzey en aza inmekte bu ise nanopartikül miktarının kritik değerin altına düşmesine neden olmaktadır (Ghanbari vd., 2015).
- Polimer matrise eklenen partiküller, kütleme sırasında matriste oluşan mikro gözenekleri ve çatlakları etkin bir şekilde doldurarak, kaplamaların korozif elektrolitlere karşı zayıf bölgelerini oluşturan matristeki bu kusurları azaltırlar. (Abakah ve ark 2021):
- Ayrıca, partiküllerin yüksek yüzey enerjileri sayesinde yüzey hidrofobikliği yüksek kaplamalar elde edilir. (Abakah ve ark 2021):
- Partiküller kaplama/metal arayüzeyinde yapışma özelliklerini iyileştirir. Zayıf yapışma, korozyona yol açan agresif iyonların kaplama/metal ara yüzeyinde birikmesine yol açar (Abakah ve ark 2021):
- Bu tez çalışmasında olduğu gibi polimer matrise çinko gibi çeliğe göre daha anodik olan partiküller katılarak üretilen kompozit kaplamalarda ayrıca katodik koruma etkisi yani anodik malzemenin kurban anot olarak davranarak metal altlığı korozyondan koruması sağlanabilir.

Partiküllerin polimerik kaplamanın korozyon direncini arttırmasında etkili olan başka faktörler de vardır. Organik kaplama malzemesinin polaritesi kaplamanın korozyon direncini etkileyen faktörlerden birisidir. Ghanbari ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, nanosilika kattıktan sonra epoksi kaplamanın kapasitansında önemli bir düşüş olduğunu göstermişlerdir. Bu durumu, organik kaplama türlerinin çoğunun, özellikle

epoksi kaplamaların yüksek oranda polar olması ve bu nedenle suyu emme konusunda dikkate değer bir eğilime sahip olmaları ile açıklamışlardır. Polarite, organik kaplamaların, kaplama ve metal alt tabaka arasında elektrostatik bağ sağlayan temel bir özelliğidir. Bu arada, kaplamanın polaritesi, daha sonra iyonlar için yollar oluşturan kaplamanın içine emilecek ve birikecek suyu çeker. Su alımı ne kadar yüksek olursa, yollar o kadar büyük olur. Su molekülü kaplamaya emildiğinde, “osmoz” mekanizması ile kümeler üretme ve daha fazla su emme eğilimindedir. Burada, reaksiyona girmeyen fonksiyonel gruplar ve gevşek ağ, su birikimi için olası bir alan sağlayarak bu duruma katkı sağlar. İyi dağılmış nanopartiküller, kaplamaların boş alanını azaltabilir ve toplam kapasitansın azalmasına neden olabilir (Ghanbari vd., 2015).

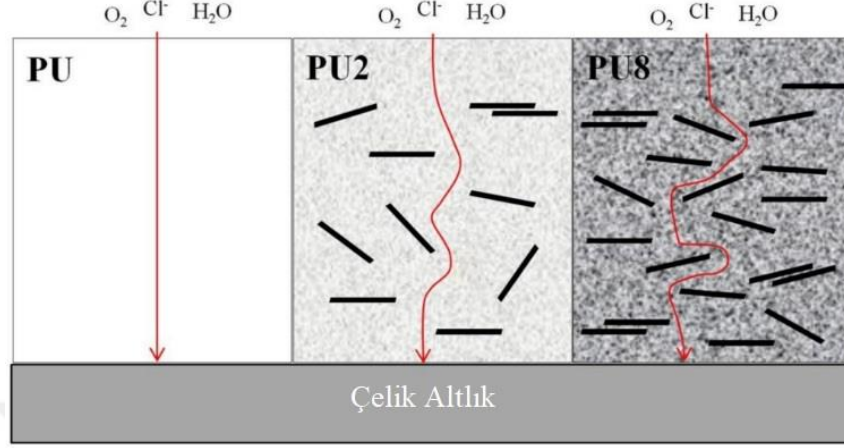
Katılan partikülün geometrisinin kaplamanın bariyer performansı üzerine etkileri literatürde yer alan ve aşağıda verilen üç çalışmada özetlenmiştir. Çalışmalarda üç farklı partikül (küre, plaka ve tüp) geometrisinin kullanıldığı görülmektedir.

İlk çalışmada polimer matrise küresel SiO_2 partiküller katarak çelik yüzeyine kaplama uygulamışlar ve kaplamanın bariyer performansına etkisini araştırmışlardır. Sonuçta, Şekil 2.13’de görüldüğü gibi elektrolitlerin metal altlığa iletim yolunu arttırarak, kaplamanın bariyer etkisini arttırdığı tespit edilmiştir. Bu çalışmada ayrıca SiO_2 nanopartiküllere yüzey modifikasyonu da uygulanmıştır, bunun da ayrıca bariyer performansını arttırdığı rapor edilmiştir (Matin vd., 2015).



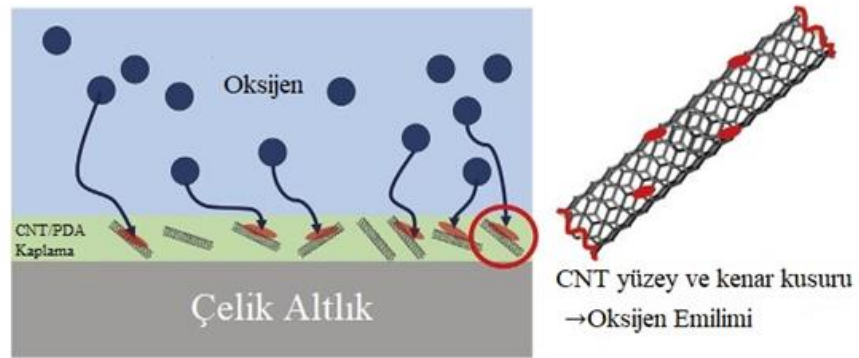
Şekil 2.13. Yüzey modifikasyonunun kaplamanın bariyer performansı üzerine etkisini gösteren şematik gösterim (Matin vd., 2015).

İkinci çalışmada poliüretan (PU) matrise plaka formundaki grafenoksit (GO) katılmış ve Şekil 2.14 'de görüldüğü gibi grafen iki boyutlu yapısı sayesinde elektrolitlerin iletim yolunu zorlaştırarak kaplamanın korozyon direncini arttırmıştır (Tsai vd., 2018).



Şekil 2.14. PU kaplamanın korozyon koruma performansı üzerine grafen ilavesinin etkisinin şematik diyagramı (Tsai vd., 2018).

Üçüncü çalışma karbonnanotüp (CNT) katılarak yapılan bir kaplama uygulamasıdır. Çalışmada korozyon direncinin önemli ölçüde arttığı gösterilmiştir. Bu artışta CNT'ün geometrisinin yanında, CNT'lerin kusur bölgelerinde oksijen adsorpsiyonu nedeniyle katodik reaksiyonu yavaşlatmasının da rolü olduğu ifade edilmiştir (Şekil 2.15) (Hong vd., 2020).



Şekil 2.15. Polidopamin (PDA/CNT) kaplamanın korozyon direncine etkisinin şematik diyagramı (Hong vd., 2020).

2.5. Literatür Özeti

2.5.1. Galvanizli sacların korozyondan korunması ile ilgili yapılan çalışmalar

Genel amaçlı olarak polimerik bir matrise partikül katılarak kompozit malzeme üretilmesi veya polimerik kaplama uygulamalarında mikro-nanopartiküllerin kullanılması ve yaptıkları katkılar konusunda yapılan literatür çalışmaları Teorik Araştırmalar Bölümün’de farklı başlıklar altında detaylı olarak verilmiştir. Bu bölümde sadece galvanizli sacların korozyondan korunması ile ilgili yapılan çalışmalar özetlenmiştir.

Fedel vd. (2012) CeO_2 ve SiO_2 partiküllerini mekanik olarak parçalayarak, 80-400 nm boyutlarında tek tek ve hibrit olarak polyester/epoksi karışımına katıp, spre y yöntemiyle galvanizli sac (10 cm x 30 cm) yüzeyine 18-22 μm kalınlığında uygulamışlardır. Yapılan kaplamanın korozif özelliklerini belirlemek amacıyla EİS ve tuz püskürtme testi yapmışlardır. Bu testleri; 1/500/1250 ve 2000 saat maruz kalma süreleri için yapmışlardır. Ayrıca partikül katmadan ve yüzeyi kromatla pasifleştirerek de elde edilen sonuçları karşılaştırmışlardır. Sonuçta, yeterli adezyonun sağlanması durumunda partikül katkısının, bariyer etkisi oluşturarak yüzeyi korozyondan koruduğunu ifade etmişlerdir. Ayrıca, çinko yüzeyi üzerinde çinko hidroksitler ve çinko silikatlardan oluşan koruyucu bir tabakanın oluştuğunu ve bunun da korozyona karşı koruma mekanizması sağladığını önermişlerdir. Ayrıca, seryum oksit partiküllerinin, anodik bölgelere karşılık olarak çinko iyonları ile reaksiyona giren ve böylece kararlı korozyon ürünlerinin oluşumuna yol açan kompleks bir ajan olarak hareket ettiğini ifade etmişler ve partiküllerin karışım olarak kullanılması durumunda sinerjetik bir etki oluşarak korozyon direncini arttırdığını ifade etmişlerdir.

Lewis vd. (2012) galvanizli sac yüzeyine (100mm x 200 mm) 5-10 nm boyutunda TiO_2 nanopartikül katarak (ağ. %0.1/1/3/5) akrilik kaplama yapmışlar ve korozif özelliklerini EİS ve tuz püskürtme testi ile analiz etmişlerdir. Kaplama kalınlığı 60-70 μm ’dir. Testler; 24/48/168/336 saat uygulanmıştır. Testler sonucunda nanopartikül katılmasının SDG sacın korozyon direncini iyileştirdiği gösterilmiştir. Nanopartikülün korozyon artışıdaki rolü şu şekilde açıklanmıştır: Kaplamanın geçirgenliği içine katılan nanopartiküller sayesinde azalmakta, bariyer etkisinin artması ve nüfuz eden nemin partikül matris arayüzeyinde birikmesi bu azalmada rol oynamaktadır. En iyi

sonuçların %3 partikül katıldığı durumda ortaya çıktığı rapor edilmiştir. Nanopartikül miktarı arttıkça aglomerasyonun arttığı gözlenmiştir. Düşük yüklemelerde korozyon direncini artırma yeteneği, partiküllerin boyutuna ve yüksek spesifik yüzey alanlarına atfedilebileceği ifade edilmiştir.

Longhi vd. (2015) 4 cm x 2 cm galvanizli çelik yüzeyine tetraetoksisilan (TEOS, inorganik faz) ve metilmetakrilat (MMA, organik faz) içeren hibrit organik kaplama uygulamışlardır. Kaplamanın özelliklerini ve korozyon direncini belirlemek için; FTIR, SEM, EİS, temas açısı ölçümü testleri yapmışlar. Sonuçta en fazla TEOS içeren ve en kalın olan kaplamada mekanik ve korozif özelliklerin daha yüksek olduğu ifade edilmiştir. Bu durumun kaplamada yeterli çaprazbağ oluşması ve kaplamanın yüzeyde ince ancak koruyucu bir film tabakası oluşturması ile ve hibrit yapının sinerjetik etkisi nedeniyle olduğu kaydedilmiştir. Araştırmacılar, SDG sacların yüzeylerinin korozyondan korunması amacıyla silanlı kaplamaların kromat uygulamasına bir alternatif olabileceğini önermişlerdir.

Nazarov vd. (2012) SDG çelik altlık üzerine elektro kaplama uygulaması ile 20 µm epoksi kaplama yapmışlar, kaplamayı 25 dk 175 °C derecede kürlemişlerdir. Kaplamada meydana gelen kusura (kaplamadaki hatalar veya kesme kenarı vb.) bağlı olarak korozyon davranışını Taramalı Kelvin Prob (SKP), FTIR ve tuz testi ile incelemişler. Kusurlu bölge ile çelik yüzey arasında oluşan galvanî çiftinin kaplamada delaminasyona neden olacağı ifade edilmiştir.

Amo vd. (2004) çalışmalarında, 15 cm x 8 cm x 0.2 cm SDG sac üzerine akrilik/alkid/epoksi ve vinil pirimer katlar ve alkid son kat uygulayarak ortalama 120 µm kalınlığında organik kaplama yapmışlardır. Kaplamaya antikoroziyon pigment olarak TiO₂, BaSO₃, talk ve mika katmışlar ve uygulamayı fırça ile yapmışlardır. Plakaları kesme kenarlarını mum esaslı malzemeye kapatarak 13 gün tuz testine koymuşlar. Sonrasında numunelere EİS testi (çözeltiler; 0.5 M NaCl, 0.5 M Na₂SO₄ ve 0.25 M NaCl + 0.25 M Na₂SO₄) ve kafes çizgi testi yapmışlar. Tuz testi öncesinde kafes çizgi testi sonuçları çok iyi iken tuz testi sonrasında numune merkezinde ve kenarlarında adezyonun çok zayıfladığı gözlenmiştir. Bu zayıflamanın yüzey hazırlığı aşamasında oluşan etkileşimler nedeniyle tuz testinde olumsuz sonuçlar oluşturması nedeniyledir. Ayrıca 97 gün tuz püskürtme kabini içinde tutuktan sonra, bilister ve paslanma ölçümü yapılmış, sonuçta akrilik kaplamada antikoroziyon performansın diğerlerinden daha kötü

olduğu, bunun da çinko koruyucu tabakanın çözünmesiyle oluştuğu ifade edilmiştir. Kafes çizgi testinde adhezyon kaybı gözlenmiş, bunun da boya/metal arayüzeyine elektrolit difüzyonundan dolayı olduğu rapor edilmiştir.

Zhang vd. (2019) yaptıkları çalışmada yüksek mukavemetli SDG sacların korozyon davranışını incelemişler. Yüzeydeki galvaniz miktarı 140 g/m^2 olan $150 \text{ mm} \times 70 \text{ mm} \times 1.6 \text{ mm}$ kalınlıkta çelik levhalar kullanılmıştır. Korozyon direncini belirlemek için tuz testi ve EİS testi yapmışlar. Tuz testini %3.5 NaCl içinde, $35 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ de 0/6/24/30/48/72/96/120 saat yapmışlar. Sonuç olarak; başlangıçta, flokülen korozyon ürünlerinin baskın olduğunu ve esas olarak Zn(OH)_2 ve ZnO 'dan oluştuğunu, daha sonra, korozyon ürünlerinin kompakt hale geldiğini ve bu dönemde korozyon oranının daha düşük bir seviyede olduğunu, bunun da kompakt ürünlerin reaktif iyonların difüzyonunu önleyerek matris için koruyucu olduğunu ifade etmişlerdir. Çeliğin korozyonunun ise uzun süre uygulanan tuz püskürtme periyodundan sonra, klorun çinko oksitlerle birleşip koruyucu ürünlerin çözünmesini hızlandırmasıyla ZnCl_2 ve $\text{Zn}_5(\text{OH})_8\text{Cl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ana korozyon ürünlerinin oluşumuyla geliştiği ifade edilmiştir. Sonunda, kompakt korozyon ürünlerinin azalmasıyla matrisin açığa çıktığı ve korozyona uğradığı görülmüştür.

Ramezanzadeh ve Attar (2011b) yaptıkları çalışmada galvanizli sac yüzeyini ağı. %2/3.5/5 ve 6.5 oranlarında mikro ve nano ZnO partiküller katılan epoksi ile yaklaşık $90 \text{ } \mu\text{m}$ kalınlığında kaplayarak, kaplamanın korozif özelliklerini incelemişlerdir. Korozyon testlerini 7, 14, 30, 60 ve 120 gün süreyle kaplanmış numuneleri tuz çözeltisinde (%3.5) bekleterek yapmışlardır. Kısa süreli (7 ve 14 gün) tuz çözeltisinde bekletilen hem mikro hem de nanopartikül katılan tüm numunelerde korozyon direncinin yüksek olduğunu ancak uzun süreli maruz kalma durumunda her iki grup numunede de direncin düştüğünü ifade etmişlerdir. Ayrıca katılma oranlarına göre de düşük miktarlarda partikül katılması durumunda her iki grup numunede de giderek artan bir korozyon direnci gözlenirken, katılma oranları arttıkça partikül topaklanmasından dolayı korozyon direncinin azaldığını rapor etmişlerdir. Çalışmada genel olarak nanopartikül katılan kaplamaların korozyon direncinin mikropartikül katılan kaplamalardan daha iyi olduğu bildirilmiştir.

Yıldız ve Dehri (2015), $20 \text{ } \mu\text{m}$ kalınlığında SDG kaplı çelik sac üzerine önce $10 \text{ } \mu\text{m}$ polivinil bütirel astar kat ve üzerine $35\text{-}40 \text{ } \mu\text{m}$ kalınlığında epoksi, poliüretan ve

polyester kaplamalar yapmışlar. 120 ve 180 gün asit yağmuru altında tuz sisi testine tabi tutmuşlar. Kaplamalar sayesinde kesme kenarında korozyon oluşumunun azaldığı ancak asit yağmuruna maruz kalma süresinin korozyonu arttırdığı ifade edilmiştir.

Custodio vd. (2010) zayıf bir organik asit olan benzotriazolün galvanizli çeliklerin kesme kenarı korozyonunun önlenmesine etkilerini incelemişlerdir. Bu amaçla EİS, SWET, XPS testleri yapmışlar. Yapılan işlemin, çelik altlık ve çinko tabakanın her ikisindeki elektrokimyasal aktiviteyi yavaşlattığını ve yüzeyde oluşturduğu film tabakasıyla korozyon hızını kontrol altına aldığını göstermişlerdir.

Thebault vd. (2015) yaptıkları çalışmada galvanizli çeliğin kesme kenarındaki korozyon direncinin kaplamaya Mg (ağ. %5/6/15) katılması ile nasıl etkilendiğini araştırmışlar. Mg'un kesme kenarında OH/O₂ esaslı koruyucu bir film oluşturarak korozyon hızını azalttığını ve özellikle nemli ortamlarda Mg ilavesinin kuru ortamlara göre daha etkili olduğunu ifade etmişlerdir.

Hoffmann ve Petry (2007) yaptıkları çalışmada, çinko kaplı çelik sacın zımba ile kesilmesi durumunda, kesme kenarında kaplama oluşturarak korozyon direncini arttırmak için bir uygulama ve tasarım önermişlerdir. Çalışmaları, kesme operasyonu esnasında zımbanın kesmeyi gerçekleştirmesinin hemen ardından kesilen yüzeyin UV ile kürlenene bir reçine ile kaplanması şeklindedir. Kaplanan yüzeye yapılan korozyon testlerinde başarılı sonuçlar alınmıştır.

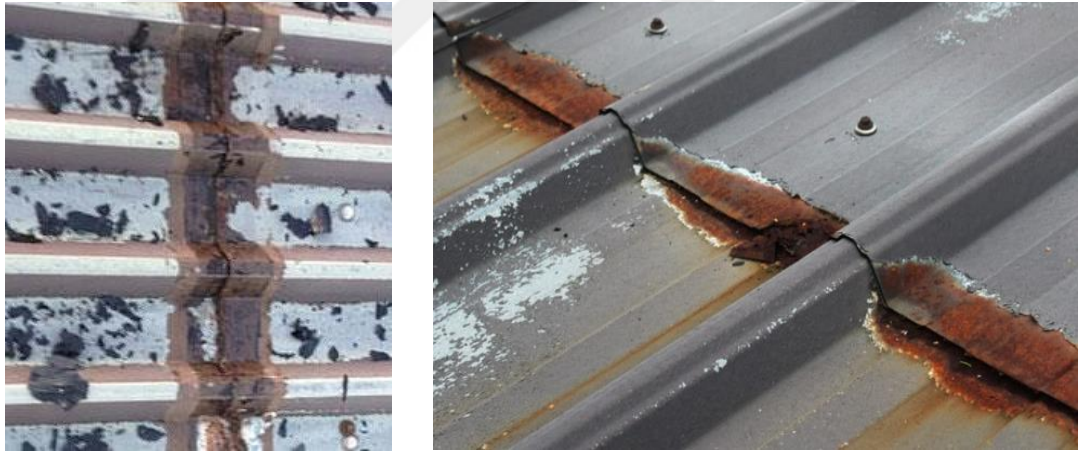
2.5.2. Bu çalışmanın literatürdeki yeri

Galvanizleme ile korozyona karşı dirençli hale getirilen saclar, levha veya rulolar halinde üreticilere sevk edilmektedir. Üretici, mevcut levhalar üzerinde çeşitli üretim proseslerini gerçekleştirerek yarı mamul olarak adlandırılan montaj elemanı ya da nihai parçayı üretir. Ancak sacın ürüne dönüştürülme aşamasında uygulanan çeşitli işlemler esnasında çinko tabakanın bölgesel olarak uzaklaşması söz konusu olabilmektedir. Örneğin, sacların lazer veya plazma kesim işlemlerinde oluşan yüksek sıcaklık nedeniyle, çinko kaplama kesilen bölgelerden buharlaşarak uzaklaşmaktadır. Bu tür termal kesme uygulamalarında kesim bölgelerinde anlık sıcaklıklar 1400 °C'yi bulabilmektedir (URL-3). Kaplamalarda kullanılan çinkonun kaynama noktası ise 907 °C'dir. Dolayısıyla saclar üzerinde kesim işlemi yapılırken kesim arkının oluşturduğu

ısı bu bölgelerdeki çinko yoğunluğunun azalmasına ve bölgesel olarak korozyon direncinin düşmesine neden olmaktadır. Şekil 2.16’de görülen sac parçalar kesme işlemi yapılmış montaja hazırlanan ve müşteriye teslim edilecek ürüne aittir. Ürünün kullanımı sırasında korozyon direnci kaybolan kesim bölgelerinden korozyonun nasıl ilerlediğini gösteren örnekler Şekil 2.17’de görülmektedir.



Şekil 2.16. Termal kesim işlemi sonrasında sacdaki galvaniz kaplamanın etkilenmesi.



Şekil 2.17. Kesim bölgelerinden ilerleyen korozyon.

Kaybolan korozyon direncinin yeniden sağlanması için tekrar galvanizleme işlemi yapılması hem maddi açıdan bir yük hem de üretim proseslerinde zorluklar getirmektedir. Tekrar sıcak daldırma havuzuna bırakılan üründe iç gerilmeler ve kesilen bölgelerde bozulmalar görülebilmektedir. Bu bölgelerde meydana gelen sertlik ve içyapı değişiklikleri galvaniz tabakasının tutunmasını zorlaştırmaktadır (Geiplova vd., 2018).

Bu nedenle, ürünlerinde galvanizli sac kullanan birçok firma ara işlem prosesi olarak bu işlemi uygulamadan ürünü montaj birimine ya da direk kullanıcıya sevk etmektedir. Ancak, bu durumda ürünün beklenen kullanım ömrü (servis ömrü) düşürülmüş ve oksitlenme süresi daha öne alınmış olmaktadır. Bu tür imalatlar yapan sanayi kuruluşlarıyla yapılan görüşmelerde bu problemin çözümüne yönelik bir uygulamalarının olmadığı; imalat sürecini etkilemeyecek, maliyeti yüksek olmayan, kolay uygulanabilecek çözümler geliştirmeye çalıştıklarını ifade etmişlerdir. Bu nedenle tez kapsamında yapılacak çalışma doğrudan bir problemin çözümüne yönelik olması nedeniyle özgün bir çalışmadır.

Bu tez çalışmasında, tahıl depolama silolarının imalatında kullanılan galvanizli sacların korozyon direncinin iyileştirilmesine yönelik çalışmalar ele alınmıştır. Bu konunun tez konusu olarak belirlenmesinde, Aksaray'da galvanizli sac kullanarak silo imalatı yapan çok sayıda firmanın bulunması etkili olmuştur. Bu ürünler açısından bakıldığında; nemli ve tuzlu bölgelerde sacların kesim bölgelerinden oksitlenmenin başlayacağı açıktır, bu nedenle ürün belirlenen servis ömrünü tamamlamadan kullanım dışı kalabilmektedir. Bu durumda silolarda depolanan tahıllar oksit ile temas edecek ve insan sağlığı için doğrudan risk oluşabilecektir. Sağlıklı saklama koşullarına uyulmadığından dolayı oksitli bölgelere temas eden tahılda erken bozulmalar ve çürümeler gözlemlenebilmektedir.

Ayrıca, yapılan literatür taramasında, kompozit kaplamaların yapıldığı malzemelerin çoğunlukla yüzeyinde bir uygulama bulunmayan çelik saclar olduğu (Ghanbari ve Attar, 2015; Chen vd., 2017; Pourhashem vd., 2017; Ma vd., 2016), birkaç tane çalışmanın paslanmaz çelik ve alüminyum ile ilgili olduğu görülmüştür (Conradi vd., 2015; Monetta vd; 2015). Ancak yapılan araştırmalarda, galvanizli sacların korozif özelliklerini polimerik kompozit kaplamayla iyileştirmeye yönelik çalışmaların, özellikle de bu tezin konusu olan ve galvanizli sacların kesim bölgelerinde korozyon direncinin iyileştirilmesine yönelik çalışmaların son derece sınırlı olduğu görülmüştür (Ramazanzadeh ve Attar, 2011b; Ramazanzadeh vd., 2010; Kartsonakis vd., 2012). Yapılacak çalışma ile hem akademik olarak elde edilen sonuçlar ortaya konulacak hem de üretimde karşılaşılan bir problemin çözümüne doğrudan katkı sağlanacaktır. Tezden elde edilecek sonuçların metallerin korozyondan korunması konusunda başka uygulamalarda da kullanılabileceği öngörülmektedir.

Yukarıda açıklanan ve detayları verilen bu sorunun giderilmesine yönelik olarak yapılan bu çalışmada; partikül katılarak elde edilen polimer esaslı kaplama malzemesi, kesim bölgelerinde korozyon direnci zayıflamış olan numuneler üzerine uygulanarak, korozyon direncindeki iyileşmenin deneysel çalışmalarla incelenmesi amaçlanmış ve elde edilen sonuçlar tezin ilerleyen bölümlerinde sunulmuştur.



3. DENEYSEL ÇALIŞMA

Bu tez çalışmasında, galvaniz kaplı çelik sacların ürüne dönüştürülmesi amacıyla yapılan kesme işlemleri sırasında, çelik sacı korozyona karşı koruyan çinkonun kesme bölgesinden uzaklaşması nedeniyle oluşan zayıflama bölgelerine, nano ve mikropartiküller katarak hazırlanan kompozit polimer kaplama uygulanarak, kaplamanın sacın azalan korozyon direnci üzerindeki etkilerinin araştırılması amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda yapılan deneysel çalışmalarda kullanılan malzemeler, yapılan test ve analizler aşağıda detaylı olarak açıklanmıştır.

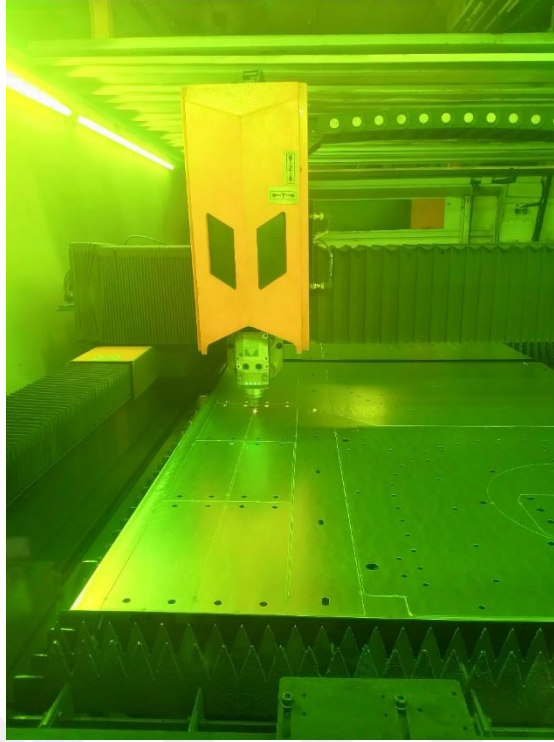
3.1. Kullanılan Malzemeler

Kaplama uygulaması için kullanılan galvanizli sac malzemeler Aksaray’da bulunan ve silo imalatı yapan Mysilo Tahıl Depolama Sistemleri A.Ş Firmasından temin edilmiştir. Kullanılan sac TS EN 10346 standardına uygun, “Sıcak Daldırmayla Sürekli Olarak Kaplanmış Çelik Yassı Mamuller” sınıfında yer alan galvanizli sac malzemedir. Deneysel çalışmalarda kullanılan çelik sac malzemenin kimyasal bileşimi çizelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Kaplama yapılan sac malzemenin kimyasal kompozisyonu (ağ. %).

Fe	C	Mn	Si	P	S	Ti
Kalan	0.2	1.7	0.6	0.1	0.045	0.001

Silo imalatında kullanılan sac malzeme Firmaya 27-115 µm kalınlıklarda sıcak daldırma galvanizli sac olarak gelmektedir. Firmada galvanizli saclar şekillendirme ve montaj için uygun ölçülerde kesilmekte ve çeşitli imalat işlemleri uygulanmaktadır. Kesme işlemi sacın kalınlığına göre lazer veya plazma kesim işlemi ile yapılmaktadır (Şekil 3.1).

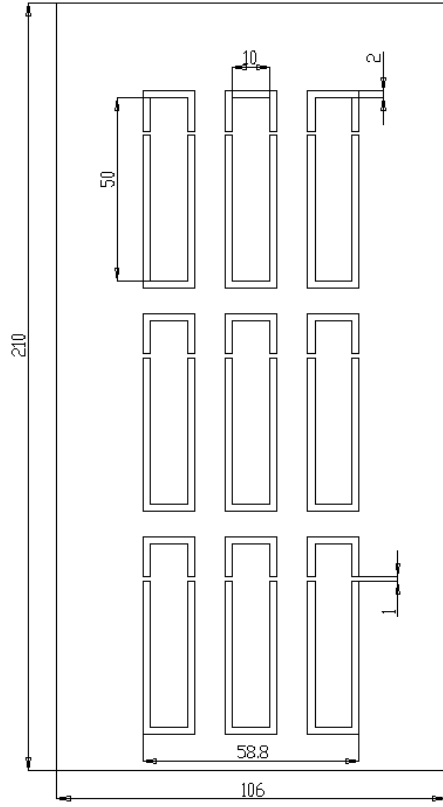


Şekil 3.1. Galvanizli sacların lazer ile kesilmesi.

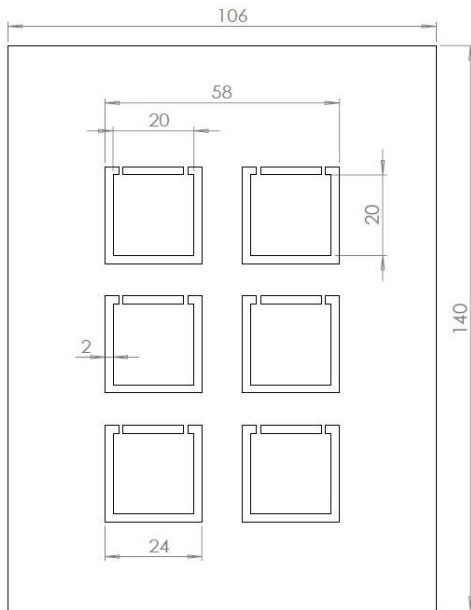
Deneyisel çalışmalarda kullanılmak amacıyla kaplama yapılacak galvanizli çelik plakalar lazer ile kesilerek hazırlanmış ve kesme işleminde Firmadaki imalatlarda kullanılan ve Çizelge 3.2’de verilen parametreler uygulanmıştır. Faklı test ve analizler için kullanılacak olan Şekil 3.2’de görülen test plakaları 20 mm x 20 mm x 3 mm, 10 mm x 5 mm x 2 mm ve 100 mm x 150 mm x 2 mm ölçülerinde hazırlanmıştır.

Çizelge 3.2. Lazer ile kesme parametreleri.

Sac kalınlığı (mm)	Galvaniz kalınlığı (µm)	Kesme parametreleri				
		Güç (W)	Hız (mm/dk)	Yükseklik (mm)	Basınç (Pa)	Gaz
3 mm	30 (350 g/m ²)	4000	5500	1.3	13	Nitrojen
2 mm	28 (350 g/m ²)	4000	6000	1.5	13	Nitrojen



(a)



(b)

Şekil 3.2. Kaplama için hazırlanan test plakaları ve ölçüleri.



Şekil 3.2 (devam). Kaplama için hazırlanan test plakaları ve ölçüleri.

Nanokompozit kaplama uygulamasında kullanılmak üzere matris malzemesi olarak POLİKEM Polires 188 markalı epoksi reçine belirlenmiştir. Kürleştirici olarak ise Cadolite NC-562 markalı epoksi sertleştiricisi kullanılmıştır. Reçinenin ve sertleştiricinin özellikleri Çizelge 3.3 ve Çizelge 3.4’de verilmiştir. Reçineye katılan kürleştirici oranı ağırlıkça 1:1 olarak uygulanmıştır.

Çizelge 3.3. Epoksi reçinenin özellikleri.

Epoksi Eşdeğeri Başına Ağırlık (WPE)	182-192
Viskosite, Brookfield, cps, 25 °C	11000 - 15000
Renk (APHA)	<30
Özgül Ağırlığı (gr/cm ³)	1.15 – 1.18
Uçuşmama Yüzdesi	99.7
Hidrolize Edilebilir Klor (ppm)	<1000

Çizelge 3.4. Sertleştiricinin özellikleri.

Renk	<16
Viskozite 25 °C	300-2300
Yoğunluk 25 °C (kg/L)	0.96 – 0.98
Teorik Aktif Hidrojen Eşdeğeri (AHEW)	174
Karışım Viskozitesi 25 °C	1.55
Kurutma / Sertleşme Süresi 5 °C (Saat)	5/12
Kurutma / Sertleşme Süresi 0 °C (Saat)	11/14

Kompozit kaplama uygulaması için epoksi matrise katılacak nano ve mikropartikül türünü ve miktarını belirlemek amacıyla literatür çalışması yapılmış, ayrıca endüstriyel uygulamalar detaylı olarak incelenmiştir. Bu tez kapsamında yapılan kompozit kaplama uygulaması endüstriyel olarak uygulanmamakla birlikte galvanizli saclarda tamir amacıyla bazı uygulamaların yapıldığı görülmüştür (Dıraz, 2018). Çok yüksek oranlarda çinko içeren boyaların (kuru filmde kalan çinko oranı ağırlıkça %90'dan fazla) kullanımı, erimiş çinkonun tamir edilecek bölgeye sprej vb. yöntemlerle uygulanması veya çinko çubuklar kullanılarak bu bölgeye lehim yapılması bu amaçla kullanılan uygulamalardır.

Kullanılacak partiküllerin türü, boyutu ve miktarı belirlenirken; polimer matris ile uyumu ve matris içinde yeterli dağılım göstermesi, çelik yüzeyinde galvanik korumaya katkı sağlaması, aynı zamanda bariyer etkisi oluşturarak korozyon direncini geliştirmesi hedeflenmiştir.

Yapılan literatür taramasında, nanokil, Fe₂O₃, Al, CNT, Zn, grafen, grafenoksit, Zr, TiO₂, ZnO, SiO₂ nanopartiküllerin metallerin korozyondan korunması amacıyla nanokompozit kaplamalarda kullanıldığı görülmüştür (Shirehjini vd., 2016; Shabani vd., 2015; Jalili vd., 2015; Khun vd., 2014; Olad vd., 2012; Ramezanzadeh vd., 2017; Zhou vd., 2019; Ramanathan vd., 2016; Mobin vd., 2017; Matin vd., 2015). Galvanizli sacların korozyon direncini arttırmak amacıyla yapılan sınırlı sayıdaki çalışmada, TiO₂, ZnO, grafenoksit nanopartiküller katılarak polimerik kaplama uygulamalarının olduğu rapor edilmiştir (Lewis vd., 2012; Ramazanzadeh ve Attar, 2011b; Liu vd., 2019).

Takviye malzemeleri olarak küresel nano ZnO ve mikro ZnO partiküller belirlenmiştir. Bu partiküller hem galvanik hem de bariyer koruması sağlanabilmesi amacıyla seçilmiştir. Nanografi (Türkiye) firmasından temin edilen partiküllerin fiziksel özellikleri Çizelge 3.5’de verilmiştir.

Çizelge 3.5. Kullanılan nano ve mikropartiküllerin fiziksel özellikleri.

Özellik	Nano ZnO	Mikro ZnO
Safılık, %	99.99	99.9
Özgül Yüzey Alanı, m ² /g	20.0-65.0	-
Partikül Boyutu	18 -25 nm	20 µm
Görünüm Rengi	Beyaz	-
Yoğunluk, g/cm ³	5.5	-

3.2. Kaplama Öncesinde Yüzey Hazırlığı

Numunelerin kesme kenarları kompozit kaplama yapılmadan önce kaplama uygulaması için hazırlanmıştır. Yüzey hazırlığının ilk aşamasında, kenarlarda oluşan yanma artıkları, çinko birikintileri gibi kaplamanın adezyonunu zayıflatabilecek olan düzensizlikler giderilmiş ve yüzeyde oluşan kabalık homojen hale getirilmiştir. İkinci aşamada yüzeyin temizlenmesi sağlanmıştır. Bunun için aseton kullanılarak yüzey kimyasal olarak temizlenmiştir. Temizlenen numuneler saf suyla yıkanmış ve hava akımı altında kurutulmuştur.

Yapılan tüm bu yüzey hazırlığı ile termal kesme işlemi ile zarar gören galvanizli bölge ile yeni yapılacak kaplama uygulamasının uyumunun sağlanması, kaplamanın çelik altlığa adezyonunun artırılması ve bu bölgelerde zamanla oluşması beklenen korozyonun geciktirilmesi amaçlanmıştır.

3.3. Kompozit Kaplamanın Hazırlanması ve Uygulanması

Nano ve mikro ZnO partiküller epoksi matris içine Çizelge 3.6’de verilen oranlarda katılmıştır. Ramazanzadeh ve arkadaşları galvanizli sac üzerine çeşitli oranlarda nano ZnO katarak yaptıkları epoksi kaplama çalışmasında, %3.5 ZnO eklemenin epoksinin

korozyon direncini arttırdığını göstermişlerdir (Ramazanzadeh vd., 2011a). Çalışmada ayrıca nano ve mikro ZnO partiküller hibrit olarak epoksi matrise katılmış ve kaplamanın performansı incelenmiştir.

Çizelge 3.6. Kompozit kaplama formülasyonu (ağ. %).

Numune kodu	ZnO (nano)	ZnO (mikro)	Hibrit
SE (saf epoksi)	-	-	-
NE	3	-	-
ME	-	3	-
HE	-	-	1.5+1.5

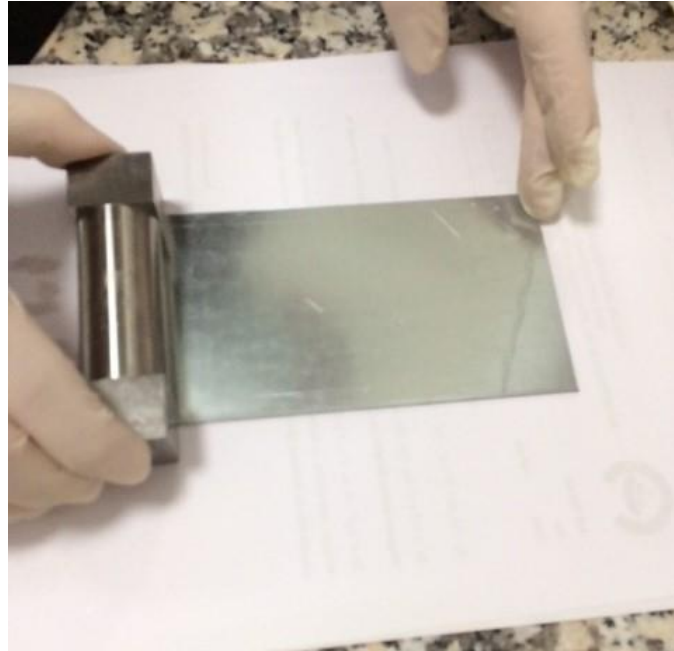
Nanopartikül katılan epoksi kompozit uygulamalarında nanokompozit hazırlanırken, katılan partikülün epoksi matriste homojen dağılımının sağlanabilmesi amacıyla matrisin ısıtılması veya bir solvent kullanımı söz konusudur. Isıtma durumunda nanopartiküllerin aglomerasyonu nedeniyle zayıf bir dağılım elde edilirken solvent kullanımı ile nanopartiküller homojen olarak dağıtılabilir (Shi vd., 2009). Bu çalışmada hem nano hem de mikro ZnO ilavesinde solvent kullanılarak kaplama karışımı hazırlanmış ve solvent olarak, kimyasal bir değişikliğe neden olmadığı için aseton kullanılmıştır (Shi vd., 2009).

İlk olarak nanopartikül, aseton ve epoksi homojen dağılımın sağlanması amacıyla 10 dk mekanik olarak (1000 dev/dk) karıştırılmıştır (Şekil 3.3). Ardından epoksi miktarı ile aynı oranda sertleştirici katılarak 5 dk daha karıştırıldıktan sonra kaplama karışımı uygulama için hazır hale getirilmiştir. Mikro ZnO ve hibritpartikül ile yapılan karışımlar da aynı şekilde hazırlanmıştır.



Şekil 3.3. Mekanik karıştırıcı.

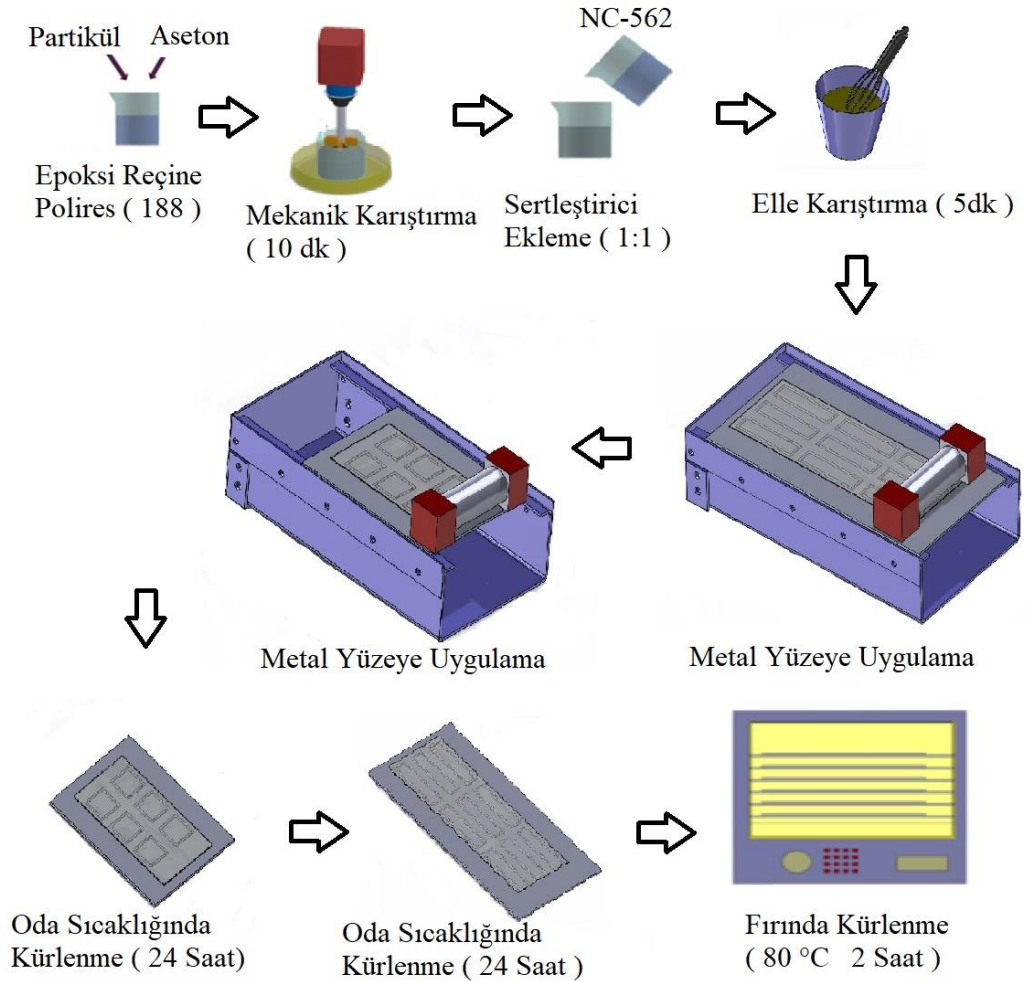
Hazırlanan epoksi kompozit karışımlar, test ve analizlerde kullanılmak için hazırlanan farklı boyutlardaki galvanizli çelik numunelere, Şekil 3.4’de görülen film aplikatörü kullanılarak uygulanmıştır. Kaplanarak hazırlanan numuneler Şekil 3.5’te görülmektedir. Kaplanan numuneler 24 saat oda sıcaklığında bekletilmiş, ardından 2 saat 80 °C sıcaklıkta fırında kürlenmiştir. Numunelerin hazırlanması aşamaları Şekil 3.6’de şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.4. Aplikatör kullanılarak yapılan kaplama uygulaması.



Şekil 3.5. Çeşitli test ve analizler için farklı ölçülerde hazırlanmış numune örnekleri.



Şekil 3.6. Numune hazırlama adımları.

3.4. Karakterizasyon Testleri

Hazırlanan kompozit kaplama malzemesinin ve uygulanan kaplamanın özelliklerini belirlemek amacıyla aşağıda açıklanan analizler ve testler yapılmıştır.

3.4.1. Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (FTIR) analizi

Epoksi reçine ile katılan partiküller arasındaki etkileşimi ve yeni kimyasal grupların oluşup oluşmadığını belirlemek amacıyla Fourier dönüşümlü kızılötesi (FTIR) spektroskopisi analizi yapılmıştır. Analiz, Orta Doğu Teknik Üniversitesi (ODTÜ) Merkez Laboratuvarı'nda Şekil 3.7'de görülen Perkin Elmer 400 markalı cihazda, $500 - 4000 \text{ cm}^{-1}$ aralığında 4 cm^{-1} çözünürlükte infrared spektrumlar alınarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.7. FTIR analiz cihazı.

3.4.2. Termogravimetrik analiz (TGA)

Termogravimetrik analiz (TGA) kompozit kaplamanın termal kararlılığını belirlemek amacıyla Aksaray Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı'nda (ASÜBTAM) $800 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 'ye kadar $10 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{dk}$ ısıtma hızında yapılmıştır.

3.4.3. Kaplama kalınlığı ölçümü

Film aplikatörü kullanılarak galvanizli sac test plakaları yüzeyine yapılan kaplama $90 \text{ }\mu\text{m}$ olarak uygulanmıştır. Ancak kürlenme sonrasında Mysilo Firmasında bulunan Time TT-260 marka kaplama kalınlığı ölçüm cihazı kullanılarak yapılan ölçümlerde

kuru film kalınlıkları 80 ± 10 μm olarak belirlenmiştir. Kaplama kalınlığı değeri her numune üzerinden üçer ölçüm yapıp ortalamaları alınarak elde edilmiştir (Şekil 3.8).

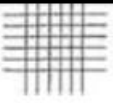
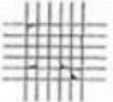
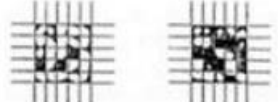
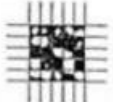


Şekil 3.8. Kaplama kalınlığının ölçümü.

3.4.4. Kafes çizgi testi

Çelik altlık üzerine kompozit kaplamanın yapışma kabiliyetini belirlemek amacıyla, kafes çizgi testi (Bant testi, Cross-cut testi) (Standard Test Methods for Measuring Adhesion by Tape Test) Firmada bulunan altı bıçaklı bir kesici aparat kullanılarak ASTM D 3359 standardına uygun olarak yapılmıştır. Test öncesinde kaplamaların kalınlıkları ölçülmüş ve kalınlıklar 80 ± 10 μm olarak belirlenmiştir. Kesici aparat kullanılarak kaplanmış yüzeyde 2 mm aralıklı çizgiler çizilmiş, sonra bu çizgilere 90° açı oluşturacak şekilde ikinci grup çizgiler çizilmiştir. Sonuçların etkilenmemesi amacıyla çizme işleminin kaplama tabakasının orta kısmına yakın bölgelerinde yapılmasına dikkat edilmiş ve her kaplama türü için ikişer adet yapılmıştır. Çizilen yüzey üzerine bant yapıştırılıp ardından tek seferde bant hızla kaldırılarak, yüzeyden kalkan boya miktarı standartlarda verilen miktarlarla karşılaştırılıp, kaplamanın çelik altlık üzerine yapışma durumu incelenmiştir. Bu amaçla Çizelge 3.7’de verilen kafes çizgi testi değerlendirme tablosu kullanılmıştır. Test uygulanan numune yüzeyleri Şekil 3.9’da görülmektedir.

Çizelge 3.7. Kafes çizgi testi değerlendirme tablosu (ASTM D 3359, 2009)

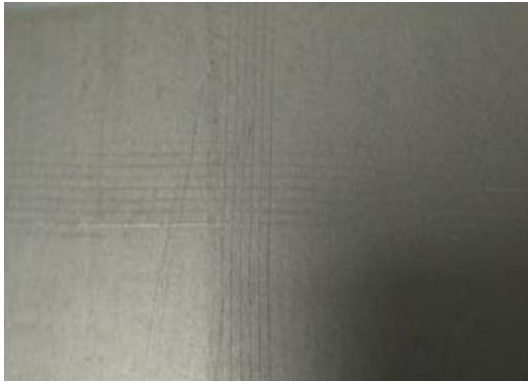
Sınıf	Boya Dökülmüş Alan (%)	Kopmanın Gerçekleştiği Boya Dökülmüş Yüzey Alanı
5 B	0	
4 B	5'ten az	
3 B	5 – 15	
2 B	15 – 35	
1 B	35 – 65	
0 B	65'ten büyük	



(a)



(b)



(c)

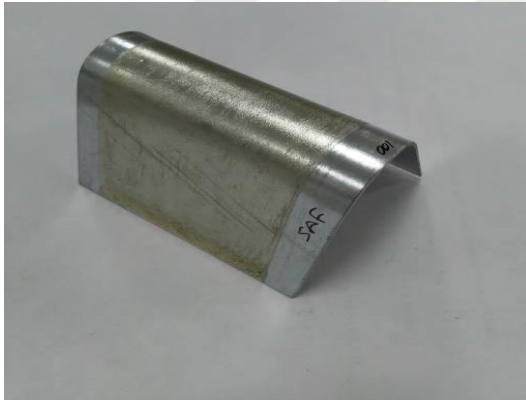


(d)

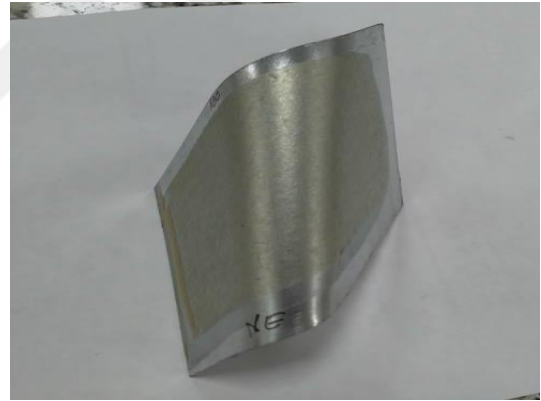
Şekil 3.9. Kafes çizgi testi uygulanmış numuneler; (a) Saf epoksi, (b) Nano ZnO katılan, (c) Mikro ZnO katılan ve (d) Hibritpartikül katılan.

3.4.5. Konik bükme testi

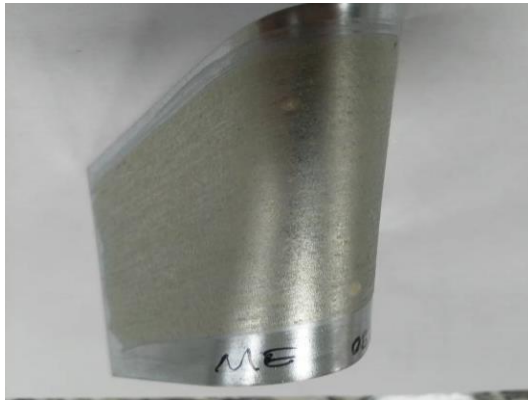
Kaplamanın esneklik özelliğini belirlemek amacıyla, ASTM D 522 standardına uygun olarak, kaplanmış test plakalarına konik bükme testi (Mandrel Bend Test of Attached Organic Coatings) yapılmıştır. Her formülasyon için üçer adet konik bükme testi yapılmıştır, testten önce kaplama kalınlıkları ölçülmüş ve kalınlıklar 80 ± 5 μm olarak belirlenmiştir. Konik bükme testi, kaplanmış yüzeyin hızlı ve büyük deformasyonlarla karşılaşması durumunda kaplamanın esneklik özelliğini belirlemek amacıyla yapılmaktadır. Testin konik bir mandrel üzerinde yapılması, mandrel çapındaki değişime bağlı olarak, kaplamanın farklı deformasyon oranlarındaki davranışını ve oluşabilecek yırtılmanın mandrelin dar kısmından başlayıp ne kadar ilerleyebileceğini görmeyi de sağlamaktadır. Testin uygulanması, kaplanmış test plakalarının bükme kolu kullanılarak konik mandrel etrafında 180° bükülmesi şeklindedir. Kaplama filminde bir çatlağın oluşup oluşmamasına göre sonuçlar değerlendirilmiştir. Şekil 3.10'da konik bükme testi uygulanmış numuneler görülmektedir.



(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 3.10. Konik bükme testi uygulanmış numuneler; (a) saf epoksi, (b) Nano ZnO katılan, (c) Mikro ZnO katılan ve (d) Hibritpartikül katılan.

3.4.6. Nanosertlik ve mikroçizik testleri

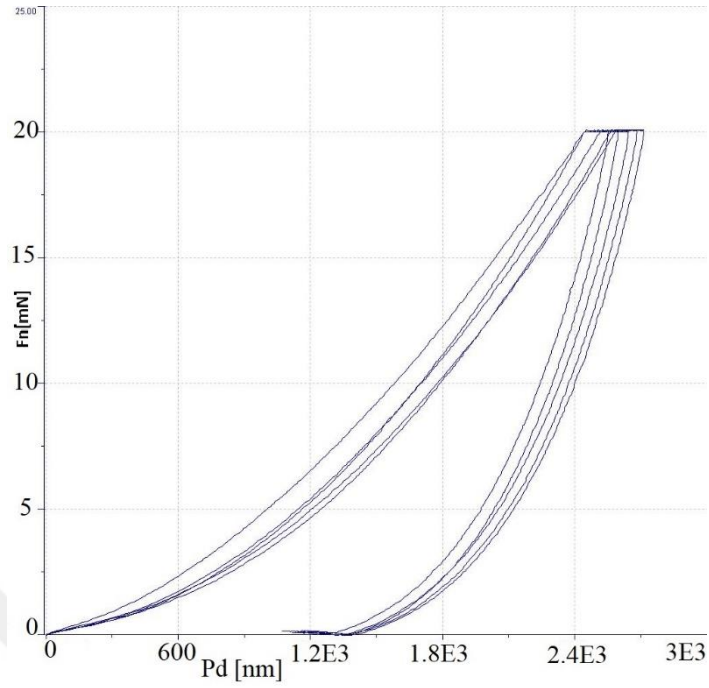
Kaplamaların sertliğini ve çizilme direncini belirlemek amacıyla, Orta Doğu Teknik Üniversitesi (ODTÜ) Merkez Laboratuvarında (Nano-Indination Tester, CSM Instruments, Şekil 3.11) nanosertlik ve mikroçizik testleri yapılmıştır. 20 x 20 x 3 mm ölçülerinde hazırlanan ve kaplanan plakalarda test uygulanmadan önce kaplama kalınlıkları ölçülmüş ve ortalama kalınlık değeri $80 \pm 5 \mu\text{m}$ olarak bulunmuştur (Şekil 3.12). Her formülasyon için beşer adet test yapılmıştır. Kaplanan numunelerin nanoosertliği, Berkovich nanoindentasyon testi ile belirlenmiştir. Test, batıcı uç kullanılarak numune yüzeyine dik olacak şekilde belirlenen 20 mN maksimum değere kadar yük uygulanması ve maksimum değere ulaşıldıktan sonra tekrar dereceli olarak geri yükleme yapılmasıyla gerçekleştirilmiştir. Yükleme ve geri yükleme ile elde edilen Yük (mN) – Derinlik (nm) eğrilerine Şekil 3.13’de örnekler verilmiştir. Bu eğrilerin analiz edilmesiyle kaplamanın sertliği ve elastisite modülü değerleri tespit edilmiştir.



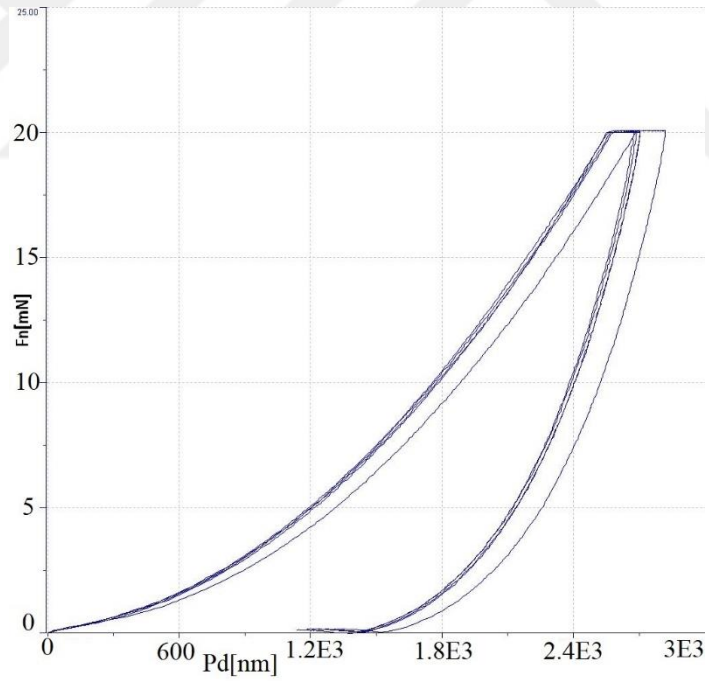
Şekil 3.11. Nanoindentasyon test cihazı.



Şekil 3.12. Nanosertlik ve mikroçizik uygulaması için hazırlanan numuneler.



(a)

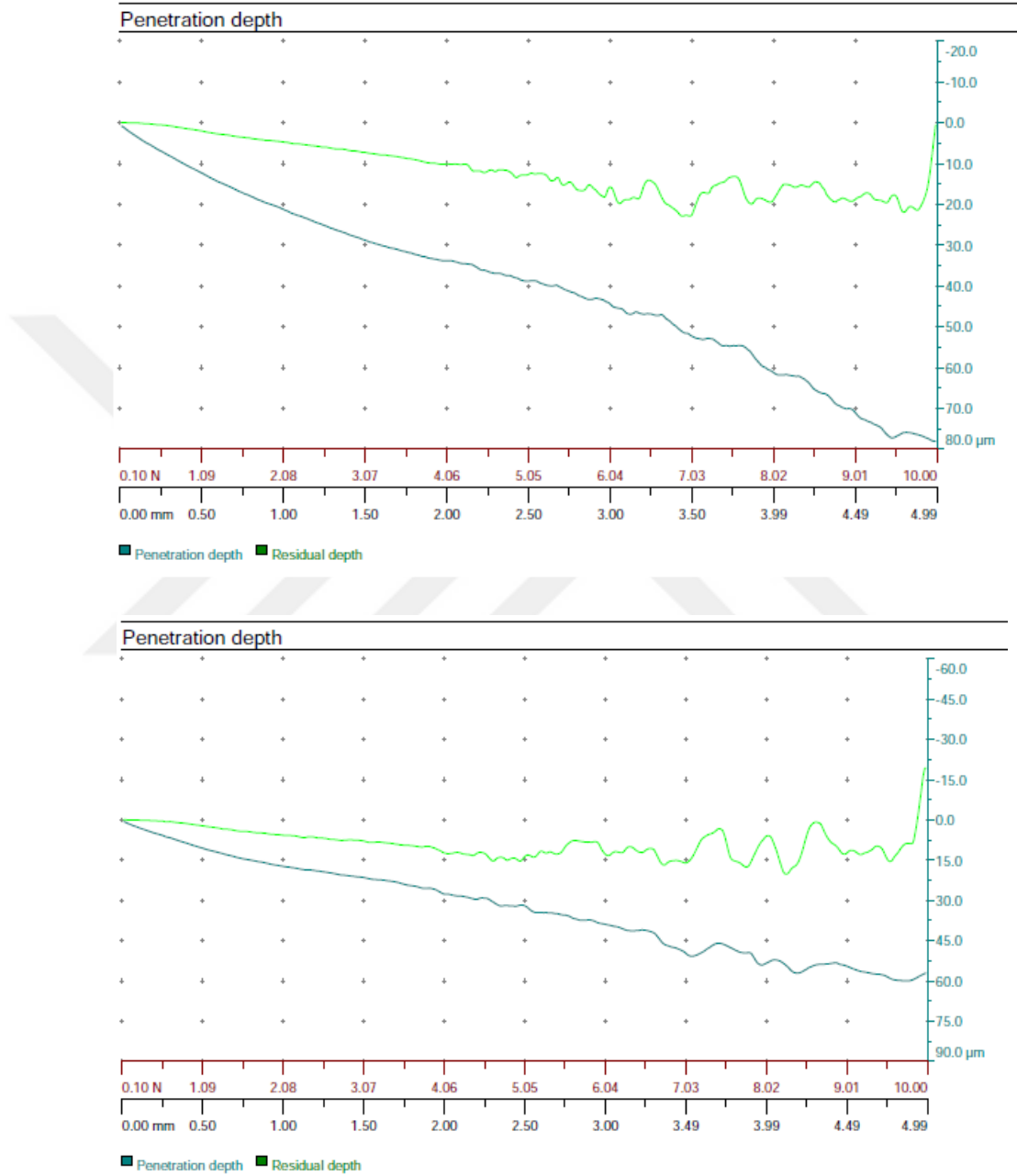


(b)

Şekil 3.13. Kaplamaların örnek Yük - Derinlik eğrileri: (a) nanopartikül, (b) hibritpartikül katılan numuneler.

Mikroçizik testi, 100 μm yarıçapa sahip elmas Rockwell uç kullanılarak 0.05 ila 5 N arasında değişen yükler altında, 4 mm/dk hızda gerçekleştirilmiştir. Yük altında

numunelerde oluşan penetrasyon derinliği ve kalıntı derinlik miktarları ölçülmüştür. Şekil 3.14'te saf epoksi ve hibrit nanopartikül katılan kaplama numunelerinin, test sonucunda elde edilen, artan yükleme değerine karşı penetrasyon derinliği ve kalıntı derinlik değişimi grafikleri verilmiştir.



Şekil 3.14. Artan yükleme değerine karşı penetrasyon derinliği ve kalıntı derinlik değişimi grafiği örnekleri; (a)saf epoksi, (b)hibritpartikül katılan numune.

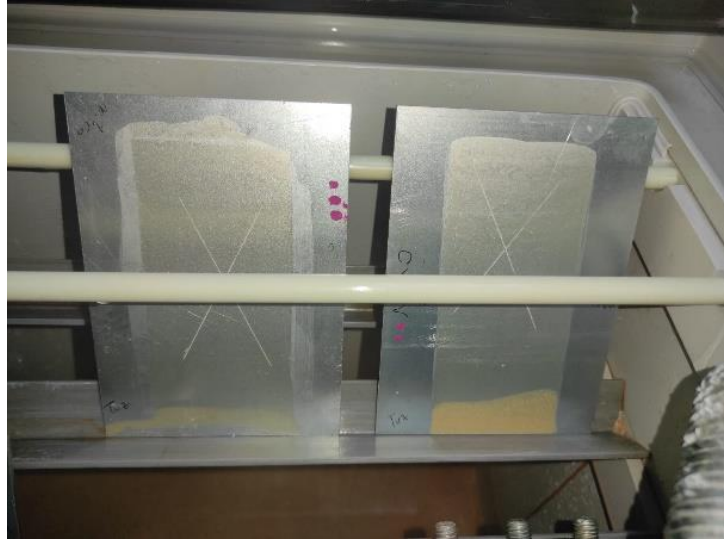
3.4.7. Tuz testi (Tuzlu Su Sisi Testi)

Tuzlu su sisi testleri ASTM B117 standardına uygun olarak Mysilo Firması Laboratuvarı'nda bulunan ASLI M300 marka kabin kullanılarak yapılmıştır (Şekil 3.15). Tuz testinde kullanılan plakalar kabin içerisindeki özel askıya dikeyle 15-30° açı yapacak şekilde yerleştirilmiştir (Şekil 3.16). Deneyde kullanılan tuzlu su çözeltisi, çözücü saf su kullanılarak ağırlıkça %5'lik saf sodyum klorür ile hazırlanmıştır. Püskürtme 0.9-1 bar basınçta suyla doymuş hava ile yapılır. Yoğuşan çözelti $35\pm 2^{\circ}\text{C}$ sıcaklığında ve 6.5-7.2 aralığında pH değerine sahiptir. Numuneler kabine asılmadan önce kaplamalar çapraz olarak kesilmiştir. Kabindeki numuneler 504 saat (21 gün) süresince 24 saat aralıklarla gözlenmiştir.

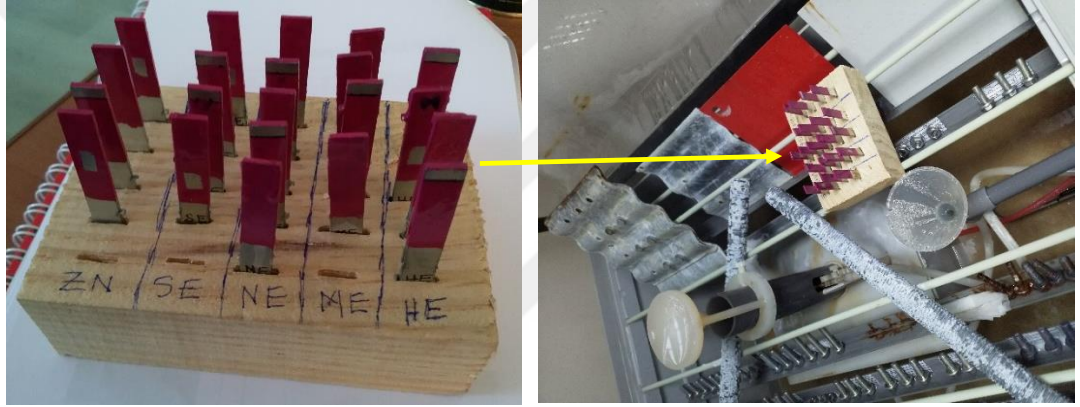
Ayrıca, kaplamaların korozyon davranışının analiz edilmesi amacıyla uygulanan Elektrokimyasal İmpedans Spektroskopi (EİS) Testi numuneleri de belirli sürelerle bu kabinde bekletilmiştir (Şekil 3.17).



Şekil 3.15. Tuz testi kabini.



Şekil 3.16. Tuz testi için kabin içine yerleştirilen test plakaları.



Şekil 3.17. EİS testi için hazırlanan ve kabin içine yerleştirilen numuneler.

3.4.8. Temas açısı tayini

Kaplamaların temas açısı tayini Orta Doğu Teknik Üniversitesi (ODTÜ) Merkez Laboratuvarında Attension Theta marka temas açısı goniometresi kullanılarak oda sıcaklığında yapılmıştır. Kaplanmış numunelerde temas açısı ölçümü, numune yüzeyine damlatılan su damlalarının şekli dijital kamera kullanılarak kaydedilmiştir.

3.4.9. Elektrokimyasal impedans spektroskopisi testi

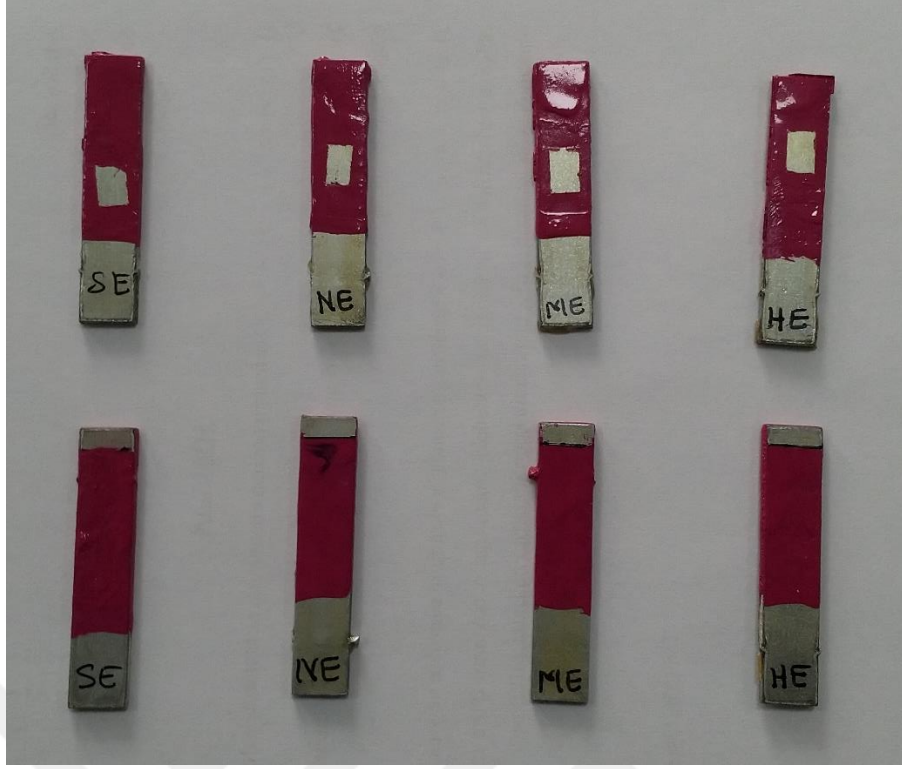
Numunelerin korozyon direnci, elektrokimyasal impedans spektroskopisi tekniği kullanılarak incelenmiştir. Elektrokimyasal impedans spektroskopisi (EİS) metallerin korozyon davranışını karakterize etmek için etkili bir tekniktir. EİS kaplama uygulamalarında da yaygın olarak kullanılmaktadır. Anlık korozyon hızı ölçümleriyle korozyondaki ilerlemenin sürekli izlenmesi sayesinde, elektrokimyasal bozulma

reaksiyonları ve mekanizmaları hakkında önemli bilgiler elde etmeyi sağlayan bir tekniktir.

En yaygın olarak Nyquist diyagramı şeklinde değerlendirilmektedir. Nyquist diyagramlarında x-ekseni gerçek (reel) direnci, y-ekseni sanal (imaginer) direnci göstermektedir. Nyquist diyagramında yarım dairenin varlığı korozyonun varlığını gösterir. Aynı zamanda yarım dairenin x-ekseni ile kesişmesiyle grafiksel olarak polarizasyon direnci R_p belirlenir. Yarım daire çapında büyümeler olduğunda yüzey tabakasının iletkenliğinin azalarak korozyona karşı daha dirençli olduğu anlaşılmaktadır. Kaplamanın kapasitansı (C) ve polarizasyon direnci değerleri, korozif ortam içindeki kaplamanın performansını karakterize etmektedir.

Saf epoksi ile ve farklı boyutlarda ZnO partikülleri içeren epoksi ile kaplanmış numuneler, farklı sürelerde tuz çözeltisinde bekletilerek EİS ölçümleri alınmıştır. Ölçümler, Gamry Instruments Interface 1000 Potansiyostat/Galvanostat/ZRA Elektrokimyasal Çalışma Ünitesi kullanılarak, %3.5'luk NaCl çözeltisinde standart cam hücre içinde gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.19).

Elektrokimyasal testler klasik üç elektrotlu sistem ile oda sıcaklığında yapılmıştır. Referans elektrot olarak Schott marka 3420B model $Ag/AgCl/Cl^-$ elektrot, karşı elektrot olarak platin levha elektrot kullanılmıştır. EİS hücresinde anot olarak kullanılan numunelerin yüzeyleri 0.4 cm^2 açıkta kalacak şekilde hazırlanmıştır (Şekil 3.18). Öncelikle her bir numunenin açık devre potansiyeli ölçülmüş, EİS diyagramları, bu potansiyel değerlerinde, 0.1 ile 100.000 Hz frekans aralığında, kaydedilmiştir. EİS testi tüm numuneler için, farklı sürelerle tuz testine maruz bırakıldıktan sonra (24 saat / 7 gün / 21 gün) yapılmıştır.



Şekil 3.18. EİS testi için hazırlanan numuneler.



Şekil 3.19. EİS ölçümleri için kullanılan test düzeneği.

3.4.10. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizi

Taramalı elektron mikroskobu (SEM), galvanizli saclarda termal kesme işlemi sonrasında oluşan yüzeyin analizi amacıyla ayrıca hem kesme kenarında hem de yüzeyde kaplamanın korozyon davranışının incelenmesi amacıyla kullanılmıştır. Ayrıca SEM analizi sonuçları, diğer test sonuçlarının yorumlanması amacıyla kullanılmıştır.

Numune yüzeyleri SEM incelemelerinden önce altın tozu kullanılarak kaplanmıştır. Analizler Şekil 3.20’de görülen Fei Quanta 250 FEG marka SEM cihazı kullanılarak, Aksaray Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı’nda (ASÜBTAM) yapılmıştır.

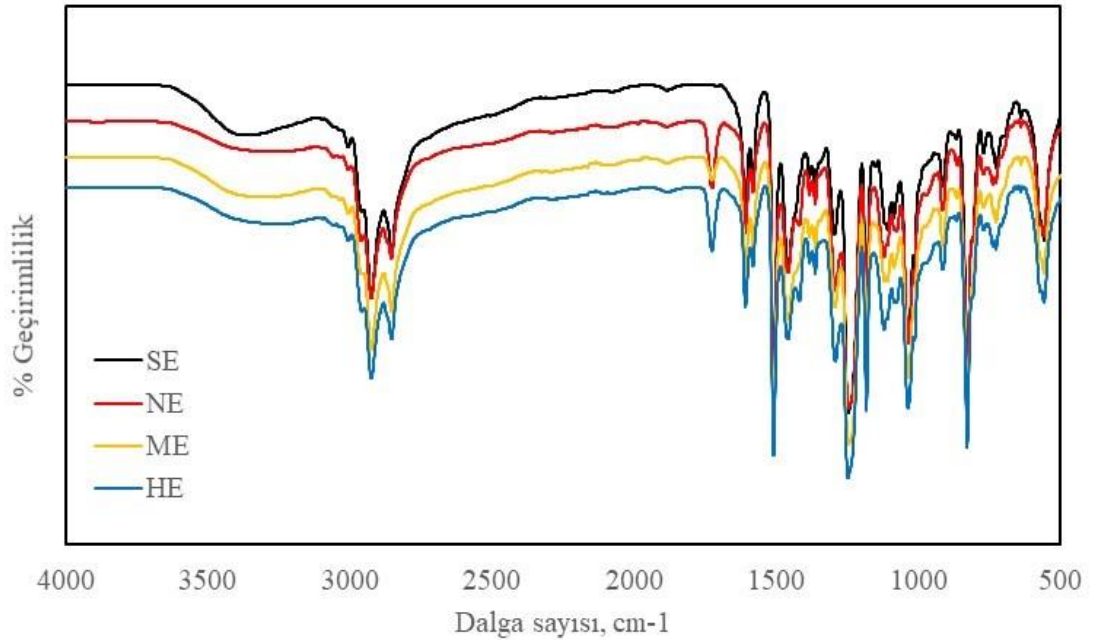


Şekil 3.20. Taramalı elektron mikroskobu.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. FTIR Analizi Sonuçları

Kompozit kaplama bileşiminde matris ve katılan partiküller arasındaki etkileşimi belirlemek için yapılan FTIR analizinden elde edilen sonuçlar Şekil 4.1’de verilmiştir. Piklerde küçük kaymalar görülmektedir ancak yeni belirgin pikler oluşmamıştır. Piklerdeki kaymalar epoksi ile mikro ve nanopartiküller arasında etkileşimin varlığını göstermektedir ancak yeni piklerin oluşmaması etkileşimin kimyasal bir etkileşimden çok fiziksel bir etkileşim olduğunu göstermektedir (Dhoke vd., 2009; Barletta vd., 2016).



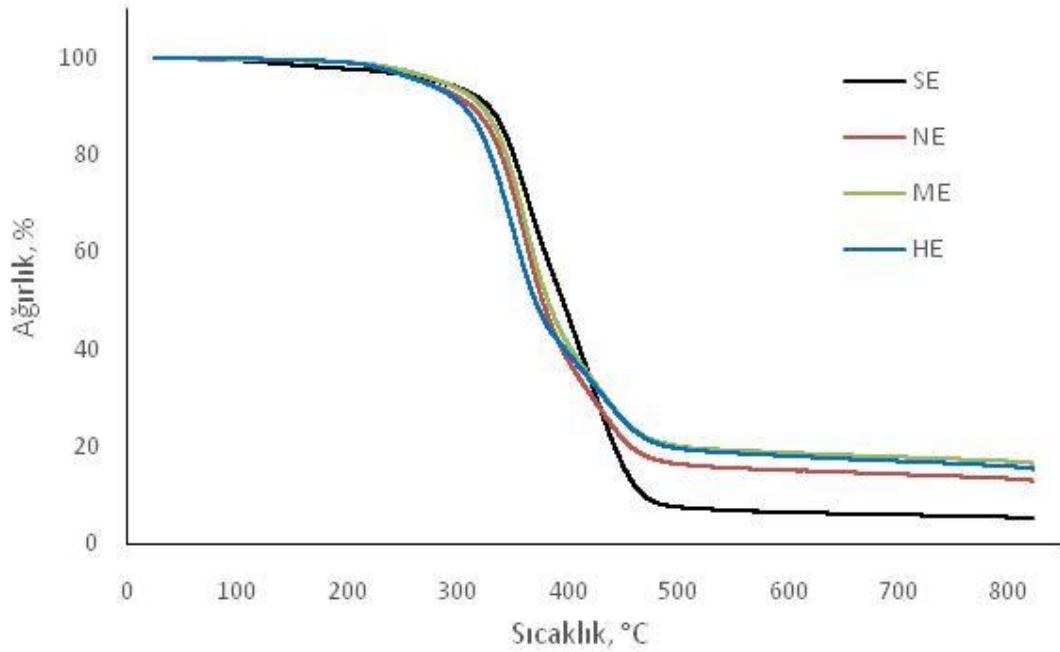
Şekil 4.1. Kaplamalara ait FTIR spektrumları.

4.2. Termogravimetrik Analiz (TGA) Sonuçları

Termogravimetrik analiz kompozit kaplama malzemesinin sıcaklığa bağlı olarak fiziksel ve kimyasal özelliklerinde meydana gelen değişiklikleri belirlemek amacıyla yapılmıştır ve elde edilen sonuçlar Şekil 4.2 ve Çizelge 4.1’de verilmiştir. %50 ağırlık kaybının olduğu sıcaklık değerlerinde bir miktar azalma olmasına rağmen değerlerin birbirine oldukça yakın olduğu gözlenmiştir. 800 °C’de kalan malzeme miktarları; saf epoksida %5.51, nanoçinkooksit katılan numunede %13.45, mikroçinkooksit katılan numunede %17.01 ve hibrit numunede %15.93 olarak elde edilmiştir.

Kalan malzeme miktarları nano ve mikropartikül katılan tüm numunelerde saf epoksiden daha yüksektir, bu da katılan partiküllerin termal kararlılığı büyük ölçüde artırabileceğini göstermektedir. Bunun nedeni, epoksi matrise eklenen partiküllerin, termal ayrışma sürecinde fiziksel bariyer görevi görerek kompozitlerden buharlaşarak ayrılan ürünlerin taşınma hızını düşürmesidir (Chen vd., 2018).

Genellikle, sürtünme ve aşınmaya maruz kalınması durumunda, sürtünme ısı polimer malzemeleri yumuşatır, bu da malzemelerin sürtünmesini ve aşınmasını artırabilir. Bu nedenle, malzemelerin yüksek termal kararlılığı, yüksek tribolojik özelliklere sahip olmaları bakımından avantajlı bir durumdur (Chen vd., 2018). Ayrıca yapılan çalışmalarda, kalan malzeme miktarının kaplamanın alev direncinin bir göstergesi olduğu da ifade edilmiştir (Kahraman vd., 2006).



Şekil 4.2. Kaplamalara ait TGA eğrileri.

Çizelge 4.1. Kaplama numelerinin TGA sonuçları.

Numune kodu	%50 (°C)	800 °C’de kalan malzeme miktarı (%)
SE	385	5.51
NE	376	13.46
ME	381	17.01
HE	370	15.93

4.3. Kafes Çizgi Testi Sonuçları

Kompozit kaplamanın galvanizli sac yüzeyine yapışma kabiliyetini belirlemek amacıyla kafes çizgi testi yapılmıştır. Tüm numuneler üzerinde oluşan izler Çizelge 3.7’de verilen kafes çizgi testi değerlendirme tablosuna göre 5B sınıfında değerlendirilmiştir. 5B sınıfı, test sonrası kaplamalarda bir dökülmenin olmadığı anlamına gelmektedir. Bu sonuç, kaplamanın yüzeye yeterince tutunduğunu göstermiştir. Epoksi matrise katılan mikro, nano ve hiprit ZnO partiküllerin kaplamanın yüzeye yapışma davranışını olumsuz etkilemediği görülmüştür.

4.4. Konik Bükme Testi Sonuçları

Kaplama filminin esnekliğini belirlemek için konik bükme testi uygulanmıştır. Esneklik, kaplamanın herhangi bir çatlama, yırtılma göstermeden bükülebilmesinin göstergesidir. Sonuçlar incelendiğinde farklı kaplamalara sahip test plakalarının hiç birinde yırtılma gözlenmemiştir. Kafes çizgi ve konik bükme testlerinin sonuçları Çizelge 4.2’de verilmiştir. Sadece Şekil 4.3 ‘de görülen mikro ZnO partikül katılan numunede test sonrasında bükme bölgesinde çok küçük bir ayrılma gözlenmiş ancak bir yırtılma oluşumu gözlenmemiştir. Şekilde görülen bu küçük ayrılmanın partikülün boyut etkisinden kaynaklanabileceği düşünülmektedir. Test sonrası elde edilen

sonuçlar tüm kaplamaların yeterli elastikiyete sahip olduğunu, partikül ilavesinin kaplamanın elastikiyetini olumsuz etkilemediğini göstermiştir.



Şekil 4.3. Mikro ZnO partikül katılan numunede bükme testi sonrası oluşan çok küçük ayrılma görüntüsü.

Çizelge 4.2. Kaplamanın fiziksel özellikleri.

Numune kodu	Kafes çizgi testi	Konik bükme testi
SE	5B	Çatlama oluşmadı
NE	5B	Çatlama oluşmadı
ME	5B	Çatlama oluşmadı
HE	5B	Çatlama oluşmadı

4.5. Nanosertlik Testi Sonuçları

Bu çalışmada kaplamanın sertliği, nanosertlik testi ile belirlenmiş ve elde edilen sonuçlar Çizelge 4.3’da verilmiştir. Nanosertlik testinde kaplama yüzeyine artan bir normal kuvvet uygulanmakta ve penetrasyon derinliğine bağlı olarak sertlik ve modül değerleri belirlenmektedir (Spirkova vd., 2006). Epoksi matrise katılan mikro ve nanopartiküllerin kaplamanın mekanik özelliklerini arttırdığı görülmektedir. Bu artışın ilk nedeni; katılan inorganik partiküllerin yüksek sertlik ve modül değerlerine sahip olmaları nedeniyle epoksi matrisin ve partiküllerin karıştırma etkisi ile kompozit kaplamanın mekanik özelliklerinin gelişmesidir (Zha vd., 2018). İkinci olarak,

nanopartiküllerin dahil edilmesi, yük taşıma kapasitesini arttırmakta ve güçlü partikül-matris etkileşimi sayesinde mikro çatlakların oluşumunu önleyerek mekanik özellikleri geliştirmektedir (Zha vd., 2018).

Katılan tüm partiküllerin epoksi kaplamanın sertliğinde belirgin bir artışa neden olduğu görülmektedir. Sertlikte oluşan artış epoksi matriste dağılmış partiküller tarafından molekül zincir hareketlerinin sınırlandırılmasından kaynaklanmaktadır (Martin-Gallego vd., 2011). Bunun sonucunda, malzeme uygulanan yükün neden olduğu deformasyona karşı daha fazla direnç göstermektedir (Shokrieh vd., 2013).

Partikül ilavesinin etkisi epoksi kaplamaların elastisite modülü değerlerinde de gözlenmiştir (Çizelge 4.3). Nanopartikül eklenen kaplamaların modül değerlerindeki artış; kaplamadaki boşlukların nanopartiküller tarafından doldurulması, matris molekül zincirleri arasında nanopartiküllerin köprü görevi görmesi, epoksinin çaprazbağ yoğunluğunun artması ve toplam boş hacmin azalması nedeniyle gerçekleşmiştir (Becker vd., 2002; Shi vd., 2009). Hibrit ve mikropartikül katılan kaplamalardaki artışa ise partikül boyutundan dolayı zincir hareketlerinin kısıtlanması neden olmuştur (Ajaj vd., 2013).

Çizelge 4.3. Kaplamaların sertlik ve modül değerleri.

Numune kodu	Nanosertlik (GPa)	Modül (GPa)
SE	0.27	4.49
NE	0.41	7.32
ME	0.37	6.11
HE	0.42	6.95

4.6. Mikroçizik Testi Sonuçları

Mikroçizik testi sonrası penetrasyon derinliğinin nano ve hibritpartikül katılan numunelerde azaldığı, en büyük azalmanın % 9.25 oranı ile hibritpartikül katılan numunede olduğu görülmektedir. Mikropartikül katılan kaplamalarda, boyutsal etkilerin neden olduğu heterojen mekanik özellikler yüksek enerji dağılımına yol açmakta ve nanopartikül katılan kaplamalara göre daha düşük olan partikül matris

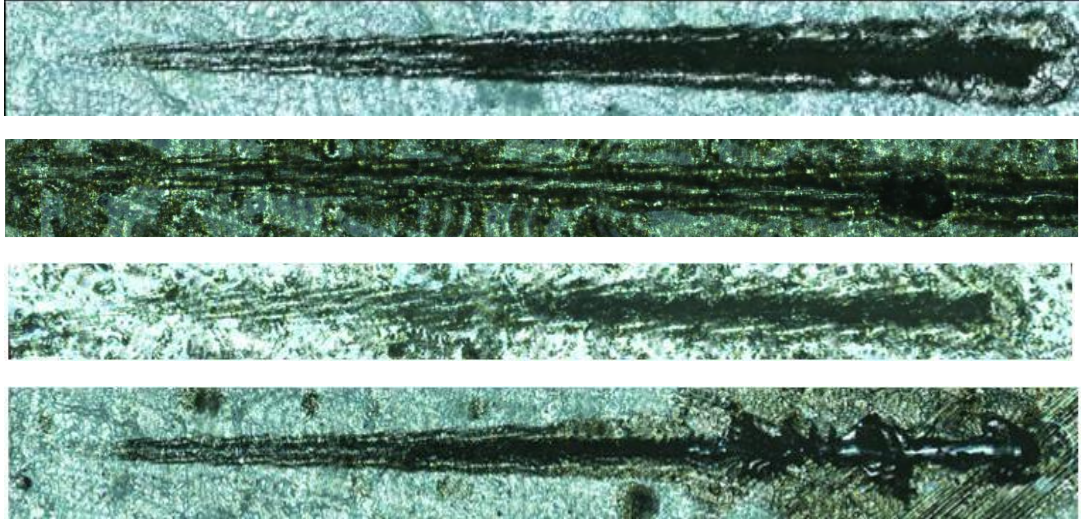
etkileşiminin sonucu olan zayıf ara yüzey bağına sahip büyük parçacıklar nedeniyle, kayma yüzeyinde kusura neden olan büyük kraterler oluşmaktadır (Şekil 4.4/d). Çizik testinde temas sırasında bu kraterlerin de varlığı nedeniyle partikül uzaklaşması meydana gelmektedir (Devoprakas ve ark 2008). Bu nedenle bu numunelerde penetrasyon derinliği diğer kaplamalara göre daha yüksek elde edilmiştir.

Kalıntı derinlik miktarının nanopartikül katılan kaplamalarda azaldığı görülmüştür (Çizelge 4.4). Bu sonuç özellikle nano ZnO partiküllerin varlığının, epoksi reçinenin elastik alanda deforme olmasını sağladığını gösterir yani deformasyonun çoğunun yükün uygulanmasıyla meydana geldiği ve yükün kalkmasıyla düzeldiği anlamına gelir.

Test sonunda elde edilen düşük penetrasyon derinliği değerleri, malzemenin çizilme direncindeki artışın bir göstergesidir ve Çizelge 4.3'te görülen sertlik artışı bu sonucu desteklemektedir. Bu sonuçlar epoksi matrise katılan partiküllerin dış yüklere karşı direnç gösterdiği, epoksi ile partiküller arasında yüksek bir etkileşimin olduğu ve oluşan arayüzeyin gerilme dağıtıcı bir görev yaptığı anlamına gelmektedir (Barletta vd., 2016, Yang vd., 2011, Jiang vd., 2013).

Çizelge 4.4. Mikroçizik testi sonrası penetrasyon ve kalıntı derinlik değerleri (5 N yük altındaki değerler verilmiştir).

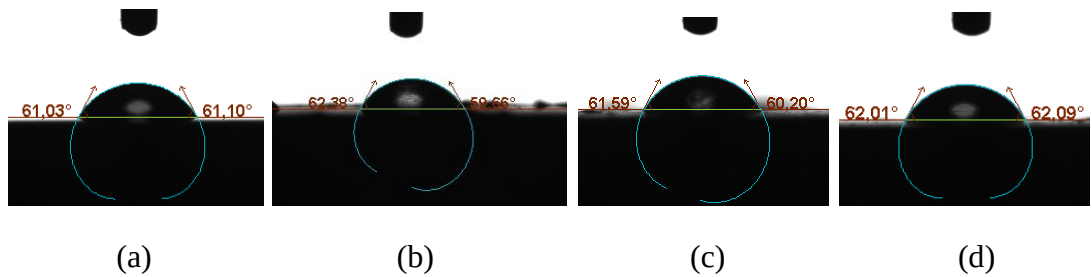
Numune kodu	Penetrasyon derinliği (µm)	Kalıntı derinlik (µm)
SE	38.9	12.6
NE	37.5	10.1
ME	40.7	11.6
HE	35.3	13.7



Şekil 4.4. Mikroçizik testi sonrasında numune yüzey görüntüleri a) SE, b) NE, c) ME, d) HE.

4.7. Temas Açısı Tayini Sonuçları

Kaplamaya katılan nano, mikro ve hibritpartiküllerin kaplamaların ıslatma davranışına etkisini incelemek için temas açısı ölçümü yapılmıştır. Sonuçlar Şekil 4.5’de verilmiştir. Partikül katılan kaplamalardan elde edilen temas açılarında epoksi kaplamaya göre önemli bir değişiklik olmadığı görülmektedir. Bununla birlikte tüm kaplamalarda saf epoksiye göre sınırlı da olsa bir artış gözlenmiş, en yüksek temas açısı değeri hibritpartikül katılan kaplamada elde edilmiştir. Kaplama sistemlerinin ıslanma kabiliyeti üzerinde yüzeyin kimyasal bileşimi ve/veya yüzey pürüzlülüğü etkili faktörlerdir (Bouibed vd., 2019). Sonuçlar, yüzeyin kimyasal bileşiminin ve pürüzlülüğünün az da olsa değiştiğini ve suyun yüzeye kılcal penetrasyonunun etkilendiğini göstermektedir. Bu durum, epoksi matrise katılan partiküllerin bariyer etkisi ile hidrofilikliğin düşük olması ile açıklanabilir, bu da korozyon elektrolitlerin kaplanmış yüzeye nüfuziyetinin azalmasına ve kaplamanın korozyona karşı koruma kabiliyetinin gelişmesine neden olmaktadır (Bouibed vd., 2019).



Şekil 4.5. Kaplanmış yüzeylerdeki su damlasının temas açısı görüntüleri, a) SE, b) NE, c) ME, d) hibrit

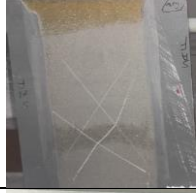
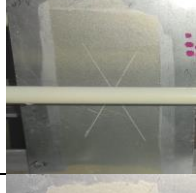
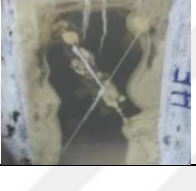
4.8. Tuz Testi Sonuçları

Numunelere uygulanan tuz testinden elde edilen sonuçlar Çizelge 4.5’de ve Şekil 4.6’da verilmiştir. Saf epoksi kaplı numunede 144 saat sonra beyaz pas oluşumu gözlenirken partikül katılarak kaplanan numunelerde en kısa süre 192 saat ile mikro ZnO katılarak kaplanan numunede gerçekleştiği görülmektedir. Diğer numunelerde ise çok az bir saat farkıyla beyaz pas oluşumunun başladığı gözlenmiştir. 504 saatin sonunda numunelere ait kaplanmış alanlarının hiçbirinde kırmızı pas oluşumu (bazal paslanma) gözlenmezken kaplama dışında kalan alanlarda aşırı yayılmış korozyon görülmektedir.

Çizelge 4.5. Numunelere ait tuz testi sonuçları.

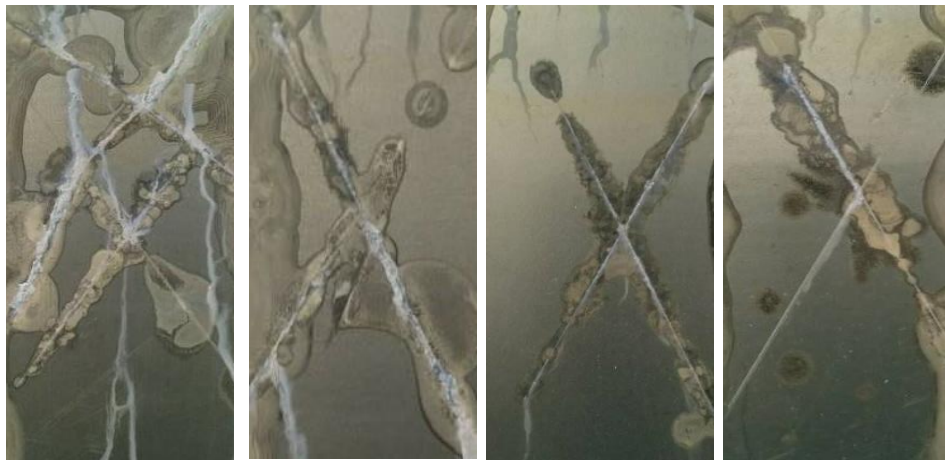
Numune kodu	Saat	24	48	72	96	120	144	168	192	216	336	360	504
		A: baz metal korozyon yok			B: beyaz pas görünümü			C: yüzeyin %5 den fazlası üzerinde beyaz pas			D: baz metal korozyonu (kırmızı pas)		
SE		A	A	A	A	A	B	B	B	B	C	C	C
NE		A	A	A	A	A	A	A	A	B	C	C	C
ME		A	A	A	A	A	A	A	B	B	C	C	C
HE		A	A	A	A	A	A	A	A	B	C	C	C

Tuz testinden elde edilen sonuçlar, yüzeyde beyaz pas ve kırmızı pas oluşumu ile karakterize edilen korozyon ilerlemesinin kaplama uygulanan tüm numunelerde yavaşladığını göstermiştir. Bu sonuç, galvanizli sac yüzeyine yapılan kaplamanın ve kaplama içine katılan partiküllerin bariyer etkisinden kaynaklanmaktadır (Devanny ve Riastuti, 2019). Kaplamalara uygulanan kafes çizgi testi ile tespit edilen yeterli adezyonun varlığı da bariyer etkisini güçlendirmiştir. Katılan partiküller korozif iyonların çelik alt tabakaya ulaşmasını iletim yolunu uzatarak zorlaştırmaktadır, bu nedenle partikül katılan numunelerde korozyon direnci saf epoksi ile kaplanan numunelere kıyasla daha yüksek elde edilmiştir (Matin vd., 2015; Tsai vd., 2018). Tuz testi kabini 216 saat bekletilen numunelerde kaplama altında korozyon ilerleme davranışı incelenmiştir. Bu inceleme teste başlamadan önce numune yüzeylerinde oluşturulan çizik bölgelerinde yapılmıştır.

Adlandırma	72 Saat	144 Saat	216 Saat	504 Saat
SE				
NE				
ME				
HE				

Şekil 4.6. Farklı sürelerle tuz testi uygulanmış numuneler.

Kaplama altından ilerlemenin saf epoksi ve nanopartikül katılarak kaplanan numunelerde daha fazla olduğu gözlenmiştir. Mikro ZnO ve hibritpartikül katılarak kaplanan numunelerde kaplama altı ilerlemenin yaklaşık %60 daha az olduğu gözlenmiştir. Mikro boyut etkisinin buna yol açtığı düşünülmektedir. (Şekil 4.7).



(a)

(b)

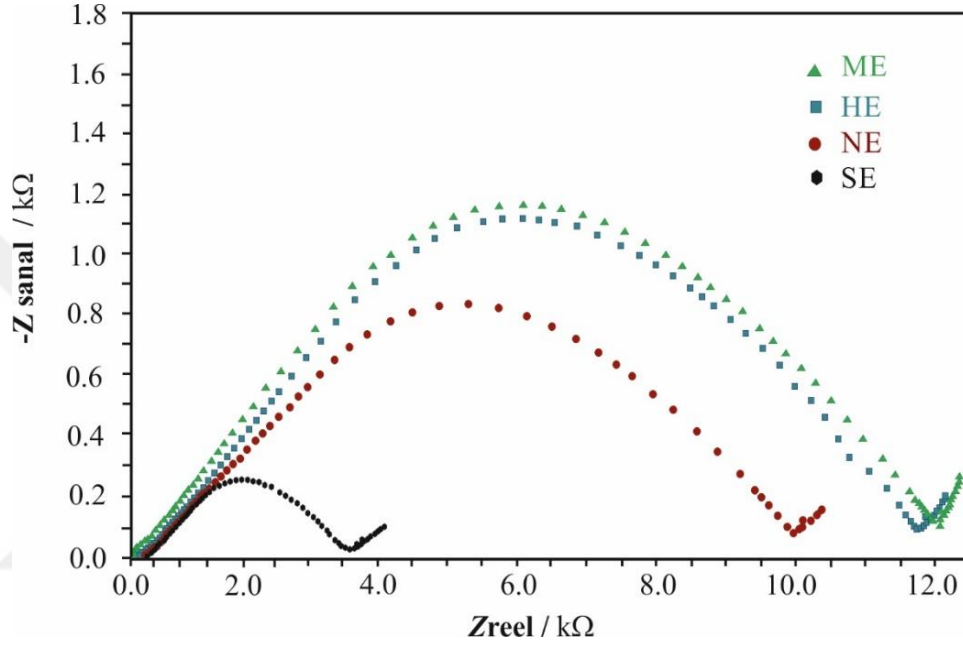
(c)

(d)

Şekil 4.7. Tuz testi uygulanan numuneler; a)SE, b)NE, c)ME, d)HE.

4.9. Elektrokimyasal İmpedans Spektroskopisi Testi Sonuçları

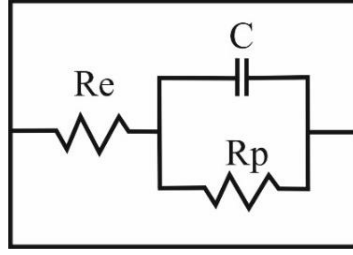
Elektrokimyasal impedans spektroskopisi tekniği kullanılarak, tüm numuneler 24 saat, 7 gün ve 21 gün sürelerle tuz testine maruz bırakıldıktan sonra korozyon davranışları incelenmiştir. İlk olarak, bir gün boyunca tuz çözeltisinde bekletilen numunelerin impedans ölçümleri alınmıştır. Elde edilen Nyquist diyagramları, Şekil 4.8’de görülmektedir.



Şekil 4.8. SE, NE, ME ve HE yüzey numunelerinin bir gün tuz çözeltisinde bekletildikten sonra %3.5’luk NaCl çözeltisi içerisinde kaydedilen Nyquist diyagramları.

Nyquist diyagramlarından elde edilen yarım dairelerin çapları, korozyon tepkimesinde elektron aktarımına karşı gösterilen direnç olarak yorumlanmaktadır. Sistemin korozyona karşı gösterdiği direnç arttıkça, elde edilen yarım dairenin çapı da artmaktadır. Her bir numune için impedans ölçümlerinden elde edilen yarım daireler, tipik Randles devre modeliyle simule edilmiştir (Şekil 4.9).

Deneyssel olarak elde edilen verilerin eşdeğer devre modeline uygunluğu Zview Software programı kullanılarak belirlenmiştir.



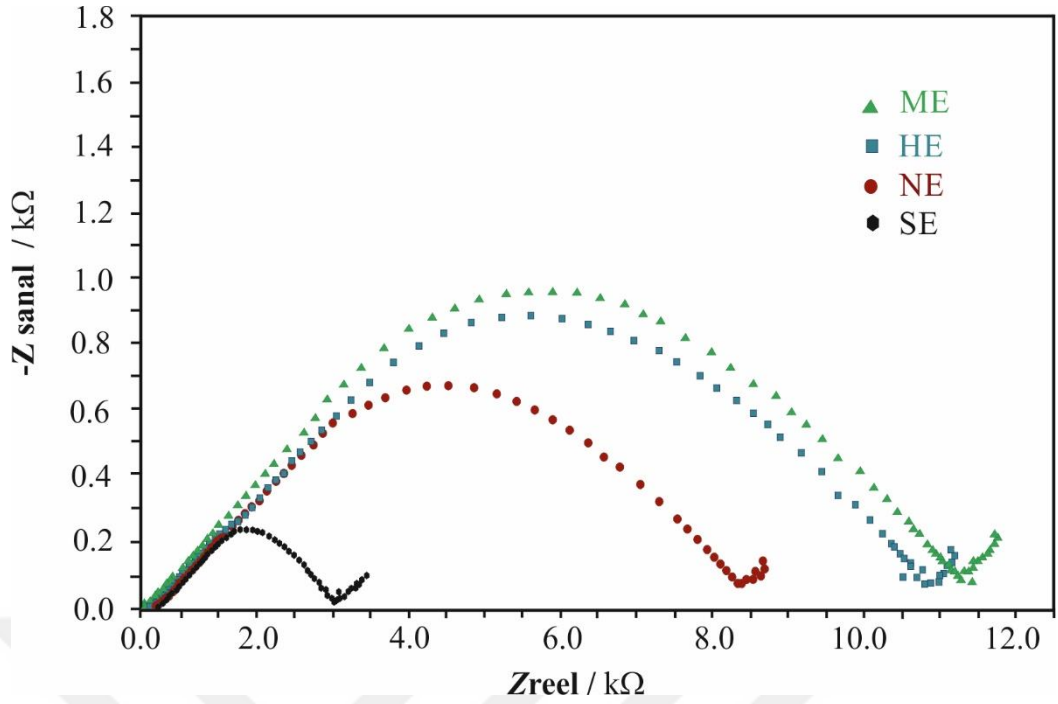
Şekil 4.9. Elektronik devre modeli

Şekil 4.9’de gösterilen devre modelinde, R_e ; elektrolit direncini, R_p ; kaplama direnci (R_c) ve yük transfer direncinin (R_{ct}) toplamı olarak ifade edilen polarizasyon direncini ($R_p=R_c+R_{ct}$) ve C ; kaplanma kapasitansı (C_c) ve çift tabaka kapasitansının (C_{dl}) toplamını ifade etmektedir ($C=C_c+C_{dl}$).

Şekil 4.8 incelendiğinde, saf epoksi ile kaplanan numunenin korozyon direnci yaklaşık $3.7 \text{ k}\Omega$ iken, yapıya nano boyutta ZnO eklendiğinde direnç, $10 \text{ k}\Omega$ ’a yükselmektedir. Epoksi karışıma ZnO partikülleri, mikro boyutta ilave edildiğinde yaklaşık $12 \text{ k}\Omega$ değeriyle maksimum korozyon direnci gözlenmiştir.

Bu durum, diğerlerine göre daha büyük partikül boyutuna sahip olduğundan, epoksi içine dağılmış mikro yapıdaki ZnO partiküller varlığında, matris içindeki boşlukların nispeten daha az olduğu, ayrıca mikro boyuttaki partiküllerin matris içine daha iyi dağıldığı, dolayısıyla numuneyi korozyona karşı daha iyi koruduğu şeklinde yorumlanmıştır. Hibrit (HE) yapıdaki numune ise, NE numunesinden daha yüksek, ME numunesinden daha düşük direnç göstermiştir.

Bir günlük tuz çözeltisinde bekletildikten sonra alınan impedans ölçümlerinin ardından numuneler, tuz çözeltisinde altı gün daha bekletilmiş, böylelikle yedi günlük ölçümler yine aynı şartlarda tekrarlanmıştır. Elde edilen ölçümler, Nyquist diyagramları olarak Şekil 4.10’da görülmektedir.

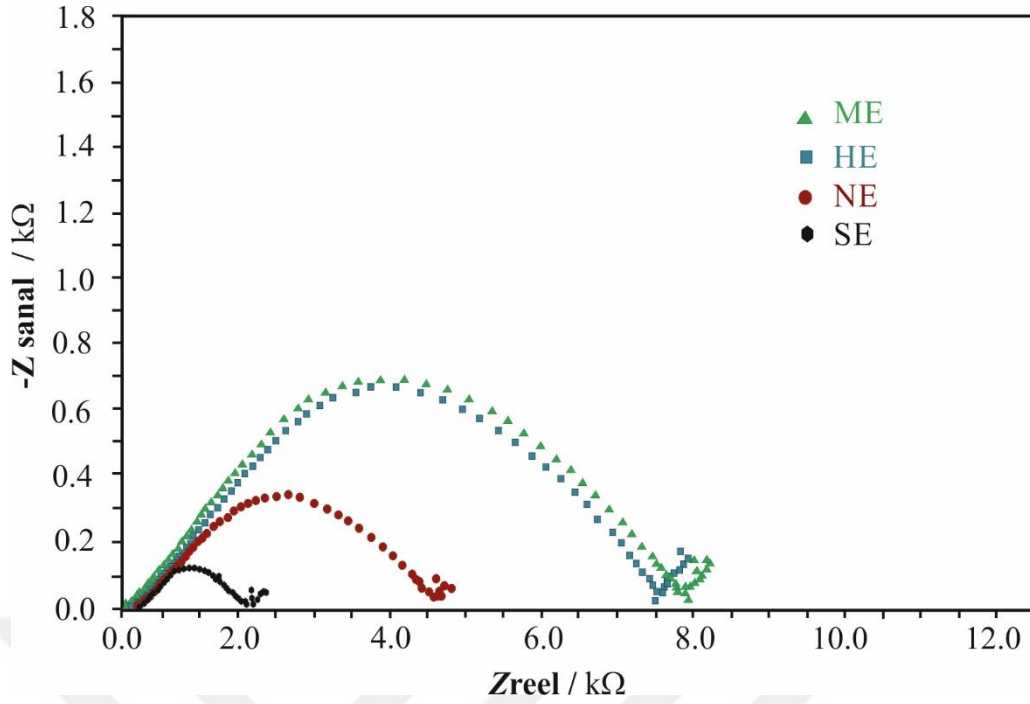


Şekil 4.10. SE, NE, ME ve HE yüzey numunelerinin yedi gün tuz çözeltisinde bekletildikten sonra %3.5'luk NaCl çözeltisi içerisinde kaydedilen Nyquist diyagramları.

Şekil 4.10 incelendiğinde her bir numune için elde edilen yarım dairelerin çaplarının bir günlük sonuçlarla uyumlu olarak yedinci gün sonunda küçüldüğü, dolayısıyla korozyon dirençlerinin azaldığı görülmektedir. Saf epoksi kaplanan numunede kaydedilen direnç $3 \text{ k}\Omega$ 'a düşerken, NE, HE ve ME numuneleri için sırasıyla $8.3 \text{ k}\Omega$, $10.7 \text{ k}\Omega$ ve $11.1 \text{ k}\Omega$ 'a düşmektedir.

Yedi günlük ölçümlerin ardından, 21 gün boyunca tuz çözeltisinde bekletilen numunelerin aynı şartlarda impedans verileri değerlendirilmiş, Şekil 4.11'da gösterilen veriler elde edilmiştir.

Yirmi bir gün tuz çözeltisinde bekletilen numunelerin korozyon dirençleri beklenildiği gibi, zamana bağlı olarak azalma göstermişlerdir (Şekil 4.11). En düşük direnci yine saf epoksi kaplı numune gösterirken ($2.1 \text{ k}\Omega$), NE kaplı numune için bu değer, $4.6 \text{ k}\Omega$, HE kaplanmış numune için $7.5 \text{ k}\Omega$ ve ME kaplanmış numune için $8 \text{ k}\Omega$ olarak kaydedilmiştir.



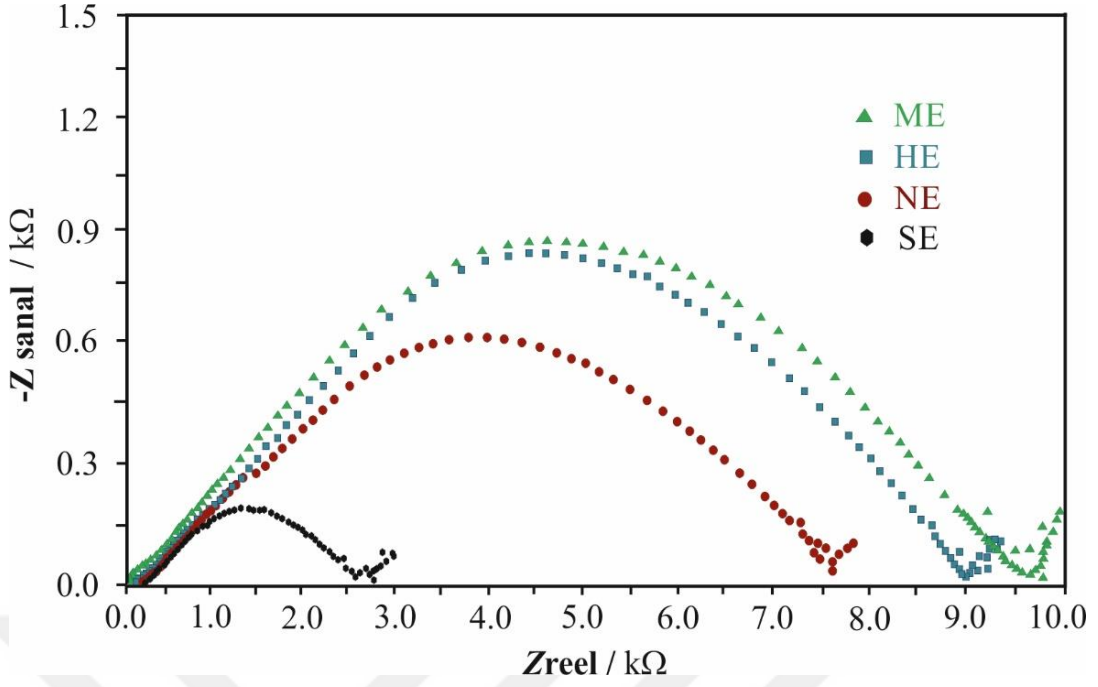
Şekil 4.11. SE, NE, ME ve HE yüzey numunelerinin yirmibir gün tuz çözeltisinde bekletildikten sonra %3.5'luk NaCl çözeltisi içerisinde kaydedilen Nyquist diyagramları.

Ayrıca, her bir numunenin elektrokimyasal impedans ölçümlerinden elde edilen veriler Çizelge 4.6'da özetlenmiştir.

Çizelge 4. 6. SE, NE, ME ve HE yüzey numunelerinin impedans diyagramlarından hesaplanan elektrokimyasal parametreleri.

Gün	Numune							
	SE		NE		ME		HE	
	Rp (kΩ.cm ²)	C (F.cm ⁻²)	Rp (kΩ.cm ²)	C (F.cm ⁻²)	Rp (kΩ.cm ²)	C (F.cm ⁻²)	Rp (kΩ.cm ²)	C (F.cm ⁻²)
1	3.7	7.6x10 ⁻⁵	10.0	1.5x10 ⁻⁵	12.0	1.1x10 ⁻⁵	11.8	1.3x10 ⁻⁵
7	3.0	8.1x10 ⁻⁵	8.3	2.1x10 ⁻⁵	11.1	1.4x10 ⁻⁵	10.7	1.6x10 ⁻⁵
21	2.1	8.8x10 ⁻⁴	4.6	7.1x10 ⁻⁵	8.0	2.2x10 ⁻⁵	7.5	2.1x10 ⁻⁵

Hazırlanan numunelerin yüzeylerinden alınan ölçümlerinden sonra, kesme kenarlarındaki korozyon davranışını da inceleyip karşılaştırmak amacıyla kesme kenarı kısımları açık bırakılarak tuz çözeltisinde bekletilen kesme kenarı numunelerinin impedans diyagramları aynı şartlar altında kaydedilmiştir. İlk 24 saatlik tuz çözeltisinde bekletilen numunelerin Nyquist diyagramları Şekil 4.12'de görülmektedir.



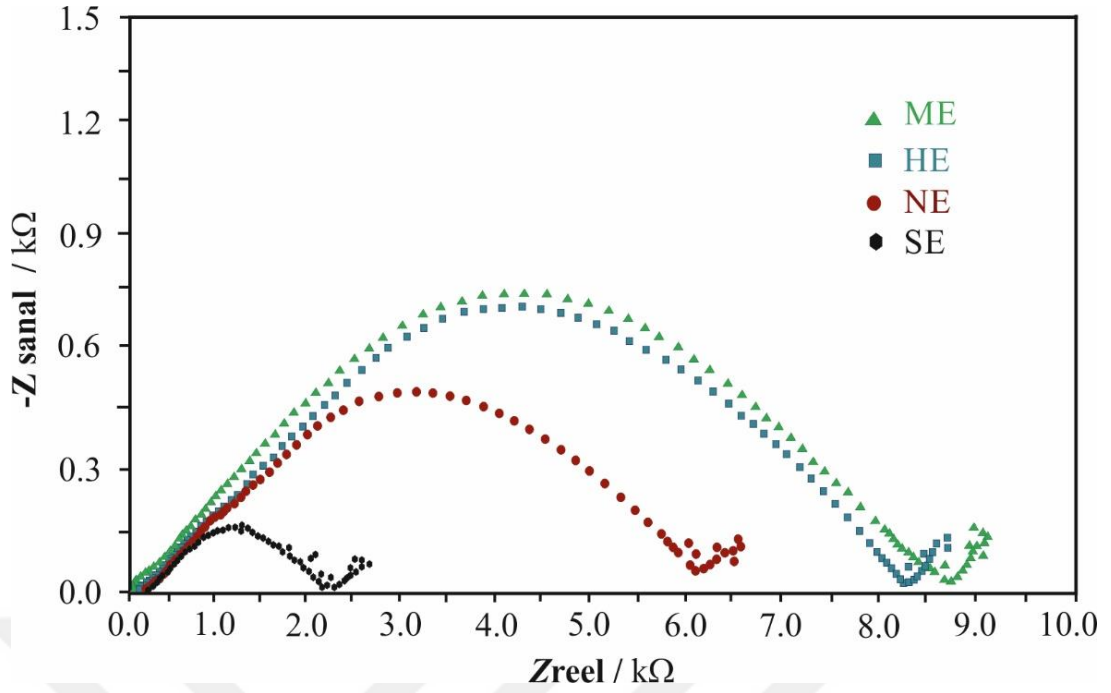
Şekil 4.12. SE, NE, ME ve HE kesme kenarı numunelerinin bir gün tuz çözeltisinde bekletildikten sonra %3.5'luk NaCl çözeltisi içerisinde kaydedilen Nyquist diyagramları.

Aynı numunenin yüzey ölçümlerine göre kesme kenarlarında elde edilen korozyon dirençlerinin daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Bu da bu bölgenin, kesmeden dolayı korozyona karşı daha savunmasız olduğunu göstermektedir.

Bir gün tuz çözeltisinde bekletildikten sonra alınan ölçümlerde, epoksi matris yapısına mikro boyutta ZnO partikülleri ilave edilen numunede kaydedilen direnç 9.6 kΩ, nano boyutta eklenen numunede 7.6 kΩ ve hibrit yapıda yaklaşık 9.0 kΩ olarak hesaplanmıştır.

Elde edilen değerler, yüzeyi açık bırakılan numunelerin sonuçlarıyla karşılaştırıldığında, her bir numunede korozyon direncinin azaldığı sonucuna varılmıştır.

Aynı şekilde, yedi gün tuz çözeltisinde bekletilen numunelerin impedans davranışları Şekil 4.13'de gösterilmektedir.

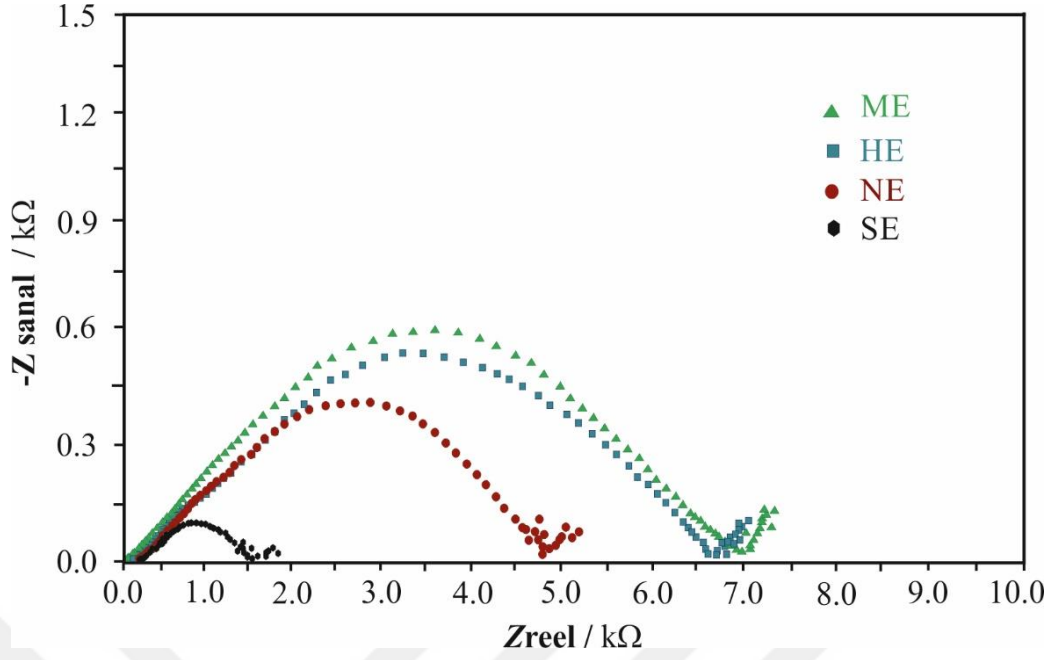


Şekil 4.13. SE, NE, ME ve HE kesme kenarı numunelerinin yedi gün tuz çözeltisinde bekletildikten sonra %3.5'luk NaCl çözeltisi içerisinde kaydedilen Nyquist diyagramları.

Yedi gün tuz çözeltisinde bekletildikten sonra alınan impedans ölçümlerinde, her bir numune için elde edilen yarım dairelerin çaplarının küçüldüğü, dolayısıyla korozyon dirençlerinin azaldığı tespit edilmiştir.

Saf epoksi kaplanan numunede kaydedilen polarizasyon direnci $2.2 \text{ k}\Omega$ 'a düşerken, NE, HE ve ME numuneleri için dirençler sırasıyla $6.1 \text{ k}\Omega$, $8.2 \text{ k}\Omega$ ve $8.8 \text{ k}\Omega$ olarak hesaplanmıştır.

Yedi günlük ölçümlerin ardından, 21 gün boyunca tuz çözeltisinde bekletilen numunelerin aynı şartlarda impedans verileri değerlendirilmiş, Şekil 4.14'te verilen Nyquist diyagramları elde edilmiştir.



Şekil 4.14. SE, NE, ME ve HE kesme kenarı kesit numunelerinin yirmi bir gün tuz çözeltisinde bekletildikten sonra %3.5'luk NaCl çözeltisi içerisinde kaydedilen Nyquist diyagramları.

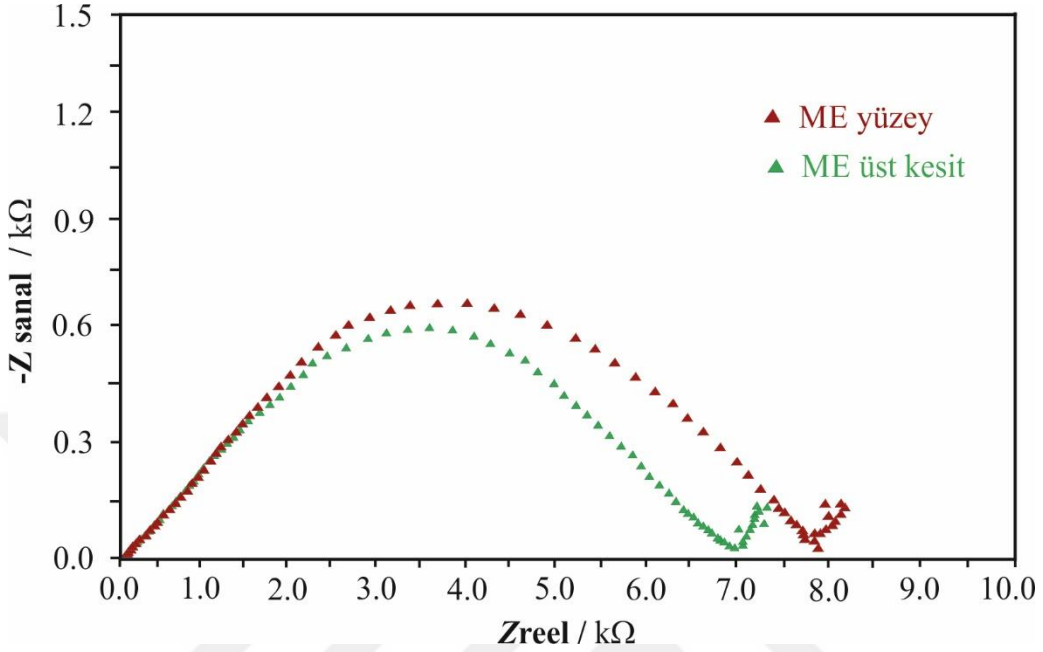
Yirmi bir gün tuz çözeltisinde bekletilen numunelerin korozyon dirençleri zamana bağlı olarak azalma göstermişlerdir (Şekil 4.14). En düşük polarizasyon direnci, saf epoksi kaplı numunede, $1.5 \text{ k}\Omega$ olarak hesaplanmıştır. NE kaplı numune için bu değer, $4.8 \text{ k}\Omega$, HE kaplanmış numune için $6.6 \text{ k}\Omega$ ve ME kaplanmış numune için $7.1 \text{ k}\Omega$ olarak kaydedilmiştir.

Ayrıca, her bir numunenin elektrokimyasal impedans ölçümlerinden elde edilen veriler Çizelge 4.7'de özetlenmiştir.

Çizelge 4. 7. SE, NE, ME ve HE kesme kenarı numunelerinin impedans diyagramlarından hesaplanan elektrokimyasal parametreleri.

Gün	Numune							
	SE		NE		ME		HE	
	Rp ($\text{k}\Omega.\text{cm}^2$)	C (F.cm^{-2})	Rp ($\text{k}\Omega.\text{cm}^2$)	C (F.cm^{-2})	Rp ($\text{k}\Omega.\text{cm}^2$)	C (F.cm^{-2})	Rp ($\text{k}\Omega.\text{cm}^2$)	C (F.cm^{-2})
1	2.6	7.7×10^{-5}	7.6	3.6×10^{-5}	9.6	2.1×10^{-5}	9.0	3.2×10^{-5}
7	2.2	8.3×10^{-5}	6.1	4.8×10^{-5}	8.8	2.9×10^{-5}	8.2	1.9×10^{-5}
21	1.5	9.7×10^{-4}	4.8	5.9×10^{-5}	6.6	2.4×10^{-5}	7.1	2.8×10^{-5}

Ayrıca, tüm korozyon testlerinde en yüksek polarizasyon direncini gösteren mikro boyutta ZnO partikülleri içeren epoksi kaplı numunenin 21 gün tuz çözeltisinde bekletilen yüzey ve kesme kenarı alanından alınan impedans verileri karşılaştırılmıştır.



Şekil 4.15. ME numunelerinin yüzey ve kesme kenarı bölgelerinin yirmi bir gün tuz çözeltisinde bekletildikten sonra %3.5'luk NaCl çözeltisi içerisinde kaydedilen Nyquist diyagramları.

Kaplanmış numunelerin yirmi bir gün tuz testinde bekletildikten sonra yüzey ve kesme kenarındaki korozyon direncini mukayese etmek amacıyla çizilen Şekil 4.15 incelendiğinde yüzeydeki korozyon direncinin kesme kenarındakinden biraz daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu beklenen bir durumdur, çünkü yüzeyde çelik altlık ve epoksi kaplama arasında galvaniz tabakası bulunurken, kesme kenarında bu tabaka termal kesme işleminin etkisiyle kaybolmuş ve koruyuculuğu azalmıştır. Bununla birlikte, partikül katılarak kaplanan numunelerde kesme kenarında elde edilen korozyon direnci galvaniz tabakasının olmamasına rağmen oldukça yüksektir. Kaplamaya katılan partiküllerin kesme kenarında verimli bir bariyer koruması sağladığı açıkça görülmektedir. Saf epoksiyle mukayese edildiğinde mikro ve hibritpartiküllerin katıldığı kaplamalarda kesme kenarında da yüzeyde olduğu gibi daha yüksek korozyon koruması elde edilmiştir.

EIS testi sonuçları ayrıca tuz çözeltisinde bekletme sürelerinde kaplamaların korozyon direnci bakımından etkinliklerindeki azalmanın değişimi yönünden analiz edilmiştir. 21 gün tuz çözeltisinde bekletilen numunelerin yüzeylerinden yapılan ölçümlerde, 1. güne göre korozyon direncinde en büyük azalma %54 ile nanopartikül katılan kaplamada gözlenirken, saf epoksi kaplamada %43.2, hibritpartikül katılan kaplamada %36.4 ve mikropartikül katılan kaplamada %33.3 oranlarında azalma gözlenmiştir. Aynı süreler için kesme kenarından yapılan ölçümlerde ise korozyon dirençlerindeki azalma oranları sırasıyla, %42.3 ile saf epoksi kaplamada, ardından %36.8 ile nanopartikül katılan kaplamada, %31.3 ile mikropartikül katılan kaplamada ve % 21.1 ile hibritpartikül katılan kaplamada gözlenmiştir. Bu sonuçlar, galvanizli çelik yüzeyinde mikropartikül katılan epoksi kaplamanın etkinliğini süreye bağlı olarak daha fazla koruduğunu, nanopartikül katılan kaplamada dikkate değer bir azalmanın olduğunu, kesme kenarında ise partikül katılan tüm kaplamalarda kaplamanın etkinliğindeki azalmanın daha düşük oranlarda olduğunu göstermiştir.

Korozyon direnci bakımından elde edilen tüm sonuçlar incelendiğinde, hem kesme kenarında hem de yüzeyde en yüksek korozyon direnci mikro ZnO partikül katılan kaplamada elde edilmiştir. Buna en yakın sonuç hibritpartikül katılan numunede ardından nanopartikül katılan numunede gözlenmiştir. Partikül katılan kaplamaların tümü saf epoksi kaplamaya göre önemli oranda artan korozyon direnci göstermiştir. Mikro ZnO partikül katılan kaplamada yirmi bir gün tuz çözeltisinde bekletildikten sonra yüzeyden yapılan EİS ölçümlerinde, saf epoksiye göre %280 oranında korozyon direnci artarken, hibrit ve nano ZnO partikül katılan kaplamalarda sırasıyla; %257 ve %200 oranlarında artış sağlanmıştır. Kenardan yapılan EİS ölçümlerinde ise hibrit ZnO partikül katılan kaplamada saf epoksiye göre %373 oranında korozyon direnci artarken, mikro ve nano ZnO partikül katılan kaplamalarda sırasıyla; %340 ve %220 oranlarında artış sağlanmıştır. Elde edilen sonuçlar katılan partiküllerin hepsinin epoksi matrisle oluşturduğu fiziksel etkileşim sayesinde bariyer etkisi göstererek korozyon direncini arttırdığını ortaya koymuştur. Bariyer etkisinin verimli şekilde gerçekleşebilmesi için kaplama ile metal altlık arasındaki adezyon çok önemlidir ve yapılan kafes çizgi testinde tüm numunelerde bu adezyonun çok iyi olduğu gösterilmiştir. Ayrıca bariyer korumasının sağlanabilmesinde önemli olan diğer bir faktör, partiküllerin matris içinde homojen bir şekilde dağılmış olmalarıdır. EIS testi sonuçları incelendiğinde nanopartikül katılan kaplamanın korozyon direncinin hibrit

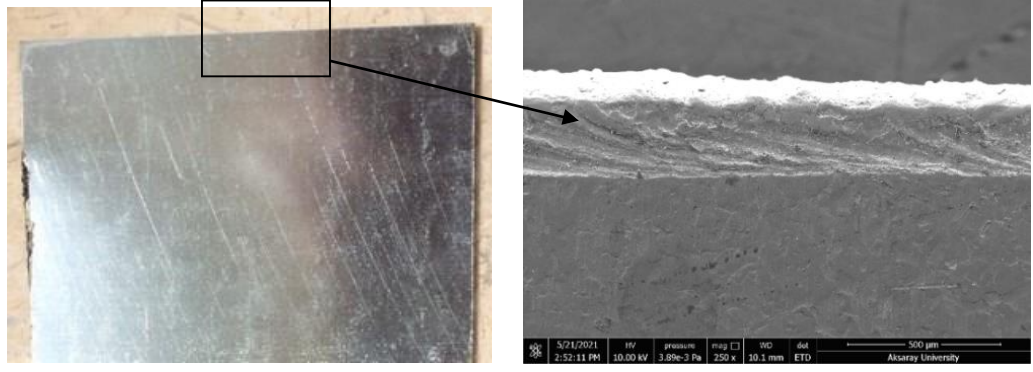
ve mikropartikül katılan kaplamanın gerisinde kalmasının nedeninin boyutsal davranışı gereği kısmen topaklanma eğilimi göstermiş olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Katılan nanopartikül miktarının da matris içinde homojen dağılmayı zorlaştırdığı ve topaklanma eğilimini teşvik ettiği düşünülmektedir. Dhoke ve arkadaşlarının yaptıkları bir çalışmada %0.1 oranında Al_2O_3 nanopartikül katılması durumunda dağılımın iyi sağlandığı ancak oranın %1'e çıkarılması durumunda topaklanmanın arttığını ifade etmişlerdir. Çalışmada, oluşan topaklanmaların kusur bölgeleri gibi davrandığı ve nanokompozit kaplamada kırılabilirliği arttırdığı, ayrıca kaplama performansını etkileyen elektrokimyasal reaksiyonların hızlanmasına neden olduğu rapor edilmiştir (Dhoke ve ark 2013).

Kullanılan partikülün ZnO olması nedeniyle korozyon önleme mekanizması sadece bariyer etkisi ile sağlanmamış, aynı zamanda katodik koruma da etkili olmuştur. Katodik korumanın aktif ve etkili olabilmesi ve alt tabakanın korozyondan korunması için ZnO partiküllerin birbirleriyle ve çelik alt tabaka ile temas halinde olması gerekir (Hussain ve ark 2021). Elde edilen sonuçlar incelendiğinde partiküllerdeki topaklanma etkisinin nano ZnO katılan kaplamalarda katodik korumanın da yeterince sağlanamadığını ortaya koymaktadır.

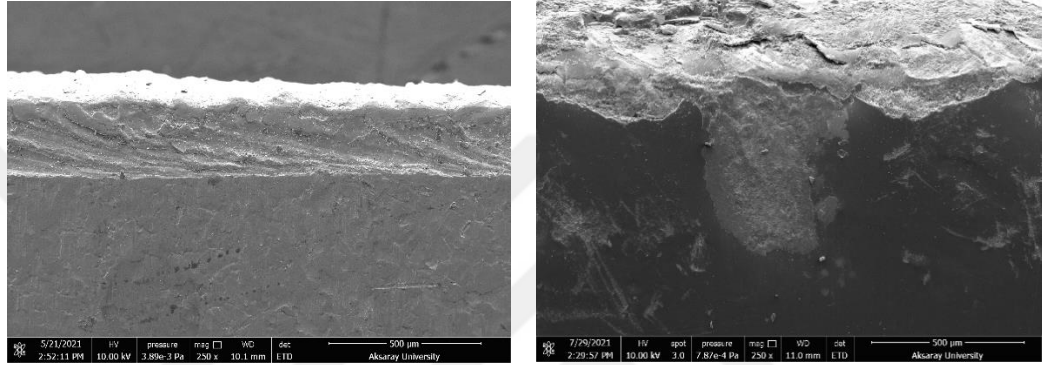
4.10. SEM Analizi Sonuçları

Lazer ile kesilen numunelerin kesme kenarları SEM ile incelenmiştir. Şekil 4.16'da kaplama uygulanmamış galvanizli sacın lazerle yapılan kesme işleminden sonra kesilen kenarında çinko kaplamanın uzaklaşması ve oluşan tahribat açık şekilde görülmektedir.

Aynı numunenin yirmi bir gün tuz çözeltisinde bekletildikten sonraki görüntüsü şekil 4.17'de verilmiştir. Korozyonun kesme kenarında ilerlemesi ve oluşturduğu tahribat açıkça görülmektedir.



Şekil 4.16. Lazer ile kesme sonrasında kesilen kenarda oluşan çinko kaybı ve tahribat.

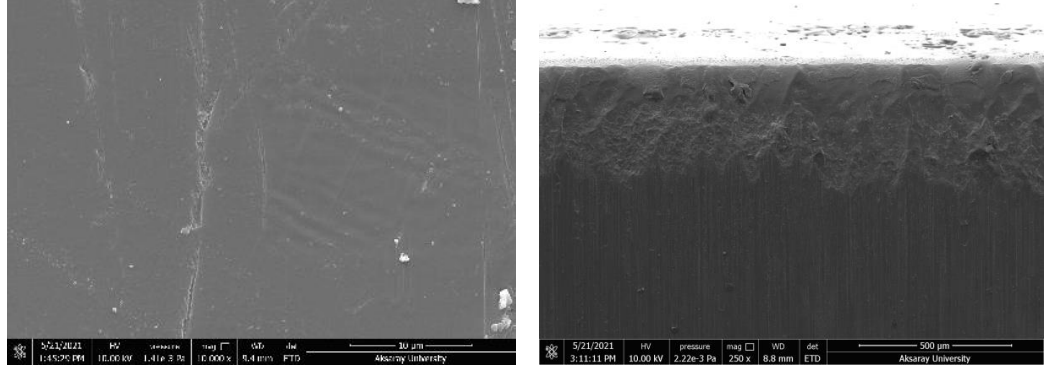


Şekil 4.17. Galvanizli sac (epoksi kaplama uygulanmamış) kesme kenarı görüntüleri; a)tuz çözeltisinde bekletmeden önce, b)tuz çözeltisinde beklettikten sonra.

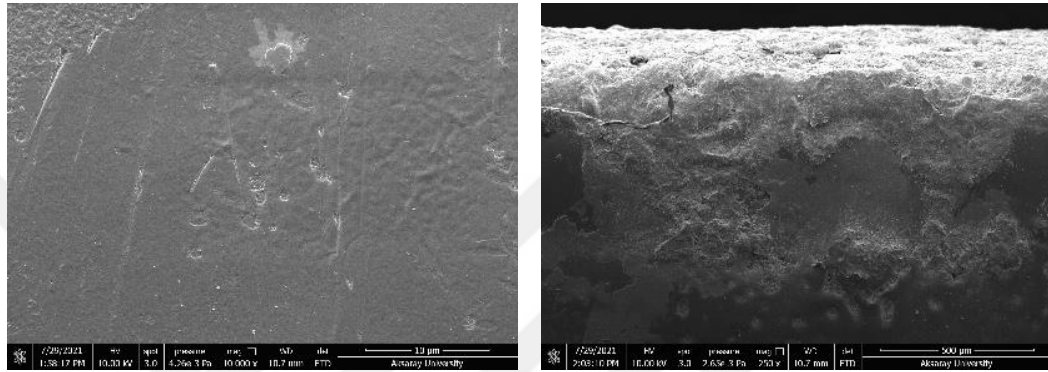
Şekil 4.18, 4.19 ve 4.20 de sırasıyla saf epoksi ile kaplanan, nano ZnO partikül eklenerek kaplanan ve mikro ZnO partikül eklenerek kaplanan numunelerin, yirmi bir gün tuz çözeltisinde bekletmeden önce ve beklettikten sonra, yüzey ve kesme kenarlarının SEM görüntüleri verilmiştir.

Tuz çözeltisinde beklettikten sonra saf epoksi kaplama numunesinin kesme kenarında tüm bölgeyi kaplayan geniş ve yaygın bir korozyon oluşumu gözlenmiştir. Nano ZnO partikül katılan numunede korozyon oluşumu kabarcıklanma ve bölgesel gözenek oluşumları şeklinde oluşmuştur.

Mikro ZnO katılan numunde ise saf epoksi ile kaplanan numuneye göre daha iyi bir yüzey elde edilirken, nano ZnO katılan numuneye göre de gözenek oluşumunun daha az olduğu gözlenmiştir.

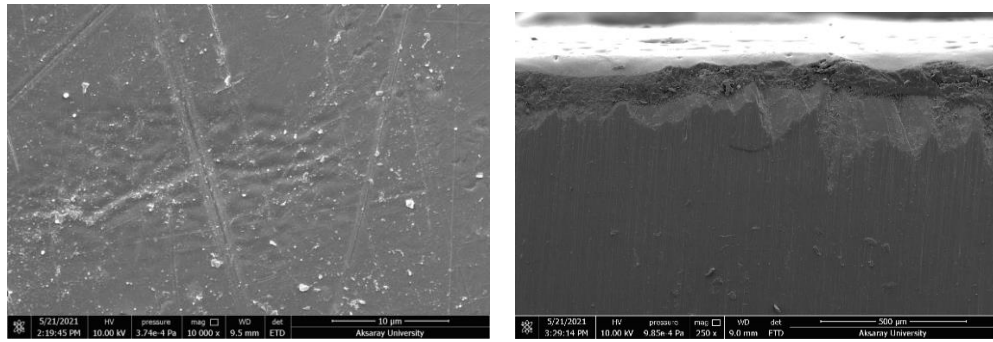


(a)

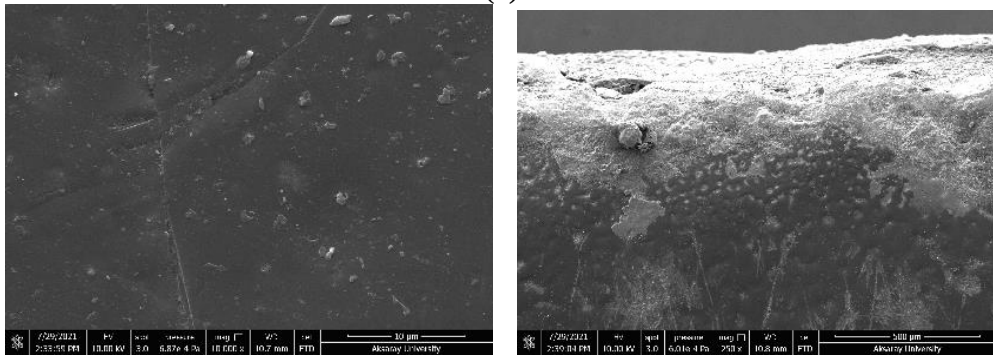


(b)

Şekil 4.18. SE numunelerinin yüzey ve kesme kenarı görüntüleri; a) tuz çözeltisinde bekletmeden önce, b) tuz çözeltisinde beklettikten sonra.

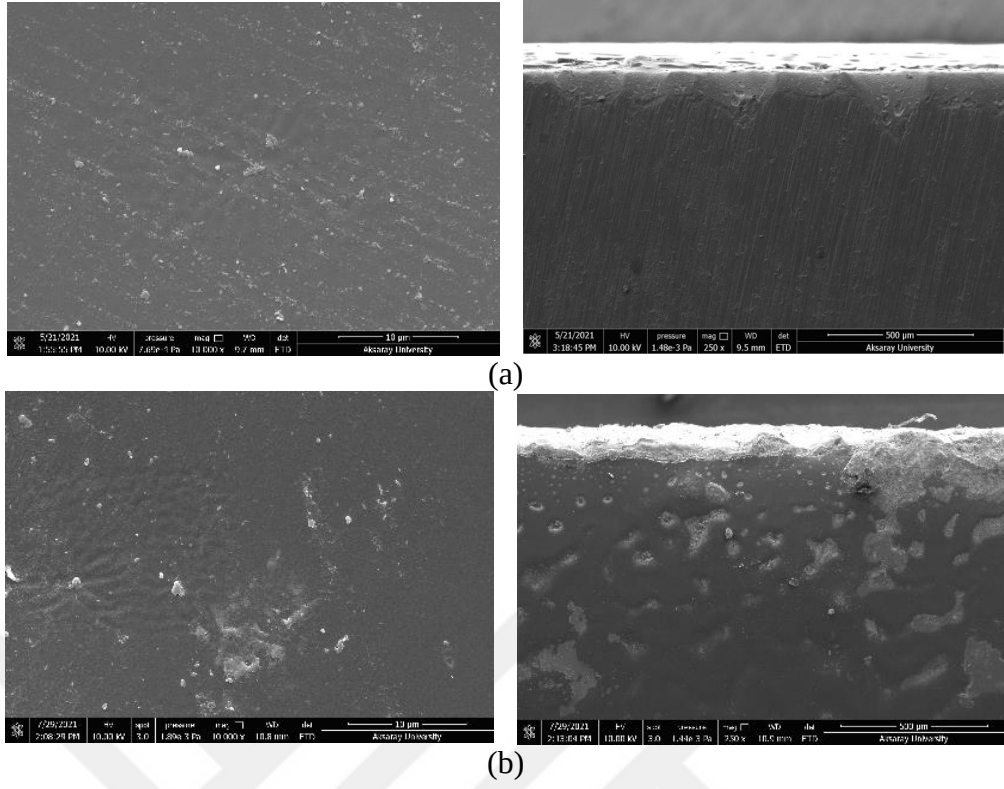


(a)



(b)

Şekil 4.19. NE numunelerinin, yüzey ve kesme kenarı görüntüleri; a) tuz çözeltisinde bekletmeden önce, b) tuz çözeltisinde beklettikten sonra.



Şekil 4.20. ME numunelerinin, yüzey ve kesme kenarı görüntüleri; a) tuz çözeltisinde bekletmeden önce, b) tuz çözeltisinde beklettikten sonra.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1 Sonuçlar

Bu tez çalışmasında epoksi matrise, nano (ağ. %3), mikro (ağ. %3) ve hibrit ZnO (ağ. %1.5 nano + 1.5 mikro) partiküller katarak elde edilen kompozit malzemeler galvanizli çelik üzerine kaplama olarak uygulanmıştır. Kaplamalara çeşitli test ve analizler uygulanarak katılan partiküllerin, kaplamaların özelliklerini nasıl etkilediği incelenmiştir. Yapılan deneysel çalışmalarla elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmıştır:

- Kaplamanın yüzeye yapışma durumunu belirlemek amacıyla yapılan kafes çizgi testi sonucunda, kaplamaların tümünde yüzeyden herhangi bir kalkmanın olmadığı, altlıkla yeterli adezyonun sağlandığı gözlenmiştir.
- Kaplama filminin esnekliğini belirlemek için yapılan konik bükme testi sonucunda bükme bölgesinde hiçbir numunede bir yırtılma gözlenmemiştir. Katılan partiküllerin kaplamanın elastikiyetini olumsuz etkilemediği görülmüştür.
- Yapılan nanosertlik testi sonucunda, sertlikteki en yüksek artış sırasıyla; %55.56 ve %51.85 ile hibrit ve nanopartikül katılan numunelerde elde edilmekle birlikte, partikül katılan tüm numunelerde epoksi kaplamanın sertliğinde dikkate değer bir artış olduğu görülmüştür. Sertlikte oluşan artışın epoksi matriste dağılmış partiküller tarafından moleküler zincir hareketlerinin sınırlandırılmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.
- Partikül ilavesi epoksi kaplamaların elastisite modülü değerlerinde artışa neden olmuştur. Elastisite modülü değerindeki en yüksek artış sırasıyla; %63 ve %54.78 ile nano ve hibritpartikül katılan numunelerde elde edilmiştir. Bu artışa, kaplamadaki boşlukların nanopartiküller tarafından doldurulması, matris molekül zincirleri arasında nanopartiküllerin köprü görevi görmesi, epoksinin çaprazbağ yoğunluğunun artması ve toplam boş hacmin azalması neden olmuştur. Hibrit ve mikropartikül katılan kaplamalardaki artışa ise partikül boyutundan dolayı zincir hareketlerinin kısıtlanması neden olmuştur.
- Yapılan mikroçizik testi sonrası penetrasyon derinliğinin nano ve hibritpartikül katılan numunelerde azaldığı, penetrasyon derinliği değerindeki en büyük

azalmanın % 9.25 oranı ile hibritpartikül katılan numunede olduğu görülmektedir. Mikropartikül katılan kaplamalarda, boyutsal etkilerin neden olduğu heterojen mekanik özellikler yüksek enerji dağılımına yol açtığı için penetrasyon derinliği diğer kaplamalara göre daha yüksek elde edilmiştir.

- FTIR analizi sonucunda yeni kimyasal gurupların oluşmadığı, sadece piklerde epoksi ile partiküllerin fiziksel etkileşimi sonucunda küçük kaymaların olduğu gözlenmiştir. Epoksi matrise partiküllerin katılmasıyla termal özelliklerde önemli bir değişiklik gözlenmemiştir.
- Kaplamanın koroziyon özelliklerini incelemek amacıyla yapılan tüm test ve analizler (tuz testi, temas açısı ölçümü ve EİS testi) partikül ilavesinin epoksi kaplamaların korozyon direncini arttırdığını ortaya koymuştur. EİS testi sonucunda en yüksek korozyon direnci hem kesme kenarında hem de yüzeyde mikropartikül ve hibritpartikül katılan kaplamalarda elde edilmiştir. Nanopartikül katılan kaplamada mikro ve hibrit partikül katılan kaplamalara göre biraz daha düşük korozyon direnci gözlenirken saf epoksi kaplamaya göre oldukça yüksek direnç elde edilmiştir.
- EİS testi sonucunda yüzey ve kesme kenarındaki korozyon direnci mukayese edildiğinde yüzeydeki korozyon direncinin kesme kenarındakinden biraz daha yüksek olduğu görülmüştür. Partikül katılarak kaplanan numunelerde kesme kenarında elde edilen korozyon direnci, galvaniz tabakasının bu bölgede olmamasına rağmen, oldukça yüksektir. Kaplamaya katılan partiküllerin kesme kenarında verimli bir bariyer koruması sağladığı açıkça görülmüştür.
- SEM incelemelerinde kesme kenarında kaplama olmayan numunede derin oyuklaşma ve tahribat gözlenmesine rağmen kaplama olan numunelerde oluşan korozyon hasarının azaldığı görülmüştür. Saf epoksi kaplamada partikül katılan kaplamalara göre daha belirgin korozyon gözlenirken, özellikle mikropartikül katılan numunede kesme kenarında korozyon oluşumunun sınırlı olduğu gözlenmiştir. Elde edilen sonuçlar EİS testinden elde edilen sonuçları desteklemektedir.
- Yapılan çalışmada, epoksi reçineye partikül eklenmesinin, epoksi kaplamaların özelliklerini geliştirmek amacıyla kullanılabilecek bir yöntem olabileceği gösterilmiştir. Nano ZnO ile güçlendirilmiş epoksi kaplamaların daha yüksek mekanik özelliklere sahip olduğu, mikro ve hibritpartiküller ile güçlendirilmiş

epoksi kaplamaların daha yüksek korozyon direncine sahip olduğu ortaya çıkmıştır. Katılan partiküllerin ZnO olması nedeniyle korozyona karşı korumada bariyer etkisinin yanında katodik koruma davranışı etkili olmuştur.

- Sonuç olarak, bu çalışmanın temel amacı olan galvanizli sacların kesme kenarında oluşan azalan korozyon direncinin iyileştirilmesinde nano ve mikro ZnO partiküllerin katıldığı kaplamaların etkili olduğu gösterilmiştir. Ancak özellikle mikro ZnO partiküllerin katıldığı kaplamaların daha etkili olması maliyet açısından nanopartikül kullanmaya göre daha avantajlı olacaktır ve galvanizli sac kullanan işletmelerde kurulabilecek basit sistemlerle kesme kenarına uygulanabileceği düşünülmektedir. Bunun yanında ZnO partiküllerle güçlendirilen epoksi kaplamaların mekanik zorlamalara ve korozif ortamlara maruz kalan farklı uygulamalarda da kullanılabileceği öngörülmektedir.

5.1. 5.2 Öneriler

Yapılan tez çalışması sonucunda konu ile ilgili yapılacak çalışmalar için sunulan öneriler aşağıda sıralanmıştır:

- ZnO partiküllerin mekanik ve korozif özellikleri iyileştirdiği görülmüştür ancak bu çalışmada tek bir oranda partikül kullanılmıştır, özellikleri iyileştiren optimum partikül miktarının belirlenmesi amacıyla farklı oranlar için çalışmalar yapılabilir.
- Bu çalışmada kaplama özellikleri tek bir kalınlık üzerinden incelenmiştir, farklı kaplama kalınlıkları uygulanarak, kaplama kalınlığının mekanik ve korozif özelliklerin iyileştirilmesindeki etkisi araştırılabilir. Kaplama kalınlığı ile katılan partiküllerin boyutu ve miktarı arasındaki ilişki ele alınabilir.
- Kesme kenarında kaplamanın uygulama türü değiştirilerek, örneğin daldırma veya sprey kaplama uygulanarak korozif özelliklere etkisi incelenebilir.
- Kesme kenarında ZnO yanında farklı nano ve mikropartiküller ayrı ayrı veya hibrit olarak kullanılarak bölgenin korozif özellikleri araştırılabilir.

KAYNAKLAR

- Abakah R. R., Huang F., Hu Q., Wang Y., Liu J., 2021. Comparative study of corrosion properties of diferent graphene nanoplate/epoxy composite coatings for enhanced surface barrier protection, *Coating* 2021, 11, 3, 285.
- Akman B., 2013. Korozyon ekonomisi ve demir elik ürünlerinin korozyonu. *Galvaniz Dünyası Dergisi*, 12, 10-12.
- Akman B., 2015. Sıcak daldırma galvanizle sürdürülebilir korozyon koruması, 6. elik Yapılar Sempozyumu, Samsun.
- Al-Ajaj A. ., Abd M. M., Jaffer I. H., 2013, Mechanical properties of micro and nano TiO₂/epoxy composites, *İnternational journal of mining, metallurgy/mechanical engineering*, 1, 2, 2320-4060.
- Amirudin A. ve Thierry D., 1996. Corrosion mechanisms of phosphated zinc layers on steel as substrates for automotive coatings, *Progress in Organic Coatings* 28, 1, 59-75.
- Amo B., Veleva L. ve Di Sarli A. R., 2004. Performance of coated steel systems exposed to different media Part I. Painted galvanized steel, *Progress in Organic Coatings*, 50, 1, 179-192 .
- ASM Handbook, 1992. Volume 13B Corrosion: Materials. Russel Township, ABD.
- ASTM D3359-09e2, 2009. Standard Test Methods for Measuring Adhesion by Tape Test, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- Barletta M., Vesco S., Puopolo M. ve Tagliaferri V., 2016. graphene reinforced uv-curable epoxy resins: design, manufacture and material performance, *Progress in Organic Coatings* 90, 414-424.
- Baugh, L.M. ve Higginson, A. 1985. Passivation of zinc in concentrated alkaline solution-I. Characteristics of active dissolution prior to passivation, *Electrochimica Acta*, 30, 9, 1163-1172.
- Becker O., Simon G. P. ve Dusek K., 2002. Epoxy Layered Silicate Nanocomposites, *Advances in Polymer Science* 47, 3, 329-347.
- Behzadnasab M. ve Mirabedini S.M., 2011. Corrosion performance of epoxy coatings containing silane treated ZrO₂ nanoparticles on mild steel in 3.5% NaCl solution, *Corrosion Sience*, 53, 89-98.
- Bouibeda, A. ve Doufnounea, R., 2019. Synthesis and characterization of hybrid materials based on graphene oxide and silica nanoparticles and their effect on the corrosion protection properties of epoxy resin coatings, *Journal of Adhesion Science and Technology*, DOI:10.1080/01694243.2019.1571660.

- Chen H., Zhang J., Yang J., Ye F., 2018, Experimental investigation into corrosion effect on mechanical properties of high strength steel bars under dynamic loadings, *International journal of corrosion*, 4, 1-12.
- Chen, C., Qiu, S., Cui, M., Qin, S., Yan, G., Zhao, H., Wang, L, ve Xue, Q., 2017. Achieving high performance corrosion and wear resistant epoxy coatings via incorporation of noncovalent functionalized graphene, *Carbon*, 114, 356–366.
- Conradi, M., Intihar G. ve Zorko M., 2015. Mechanical and wetting properties of nanosilica/epoxy-coated stainless steel, *MTAEC*, 49, 613.
- Custodio J. V., Agostinho S. M. L. ve Simoes A. M. P., 2010. Electrochemistry and surface analysis of the effect of benzotriazole on the cut edge corrosion of galvanized steel, *Electrochimica Acta*, 55, 20, 5523-5531.
- Devanny S. ve Riastuti R., 2019. Corrosion resistance of epoxy primer, polyurethane, and silyl acrylate anti-fouling on carbon steel, *Materials Science and Engineering*, 541, doi:10.1088/1757-899X/541/1/012052.
- Devaprakasam D., Hatton P. V., Möbus G., Inkson B. J., 2008. Effect of microstructure of nano- and micro-particle filled polymer composites on their tribo-mechanical performance, *Journal of Physics, Conference Series*, 126 012057.
- Dhoke S. K., Rajgopalan N. ve Khanna A. S., 2013. effect of nanoalumina on the electrochemical and mechanical properties of waterborne polyurethane composite coatings, *Journal of Nanoparticles*, 13, Article Id:527432.
- Dhoke S.K., Khanna A.S. ve Sinha T.J.M., 2009. Effect of nano-ZnO particles on the corrosion behavior of alkyd-based waterborne coatings, *Progress in Organic Coatings*, 64, 4, 371-382.
- Dıraz T., 2018. Sıcak daldırma galvaniz tamiri. *Galvaniz Dünyası Dergisi*, 27, 26-28.
- Fedel M., Deflorian F. ve Rossi S., 2012. Study of the effect of mechanically treated CeO₂ and SiO₂ pigments on the corrosion protection of painted galvanized steel, *Progress in Organic Coatings*, 74, 36-42.
- GAA (Galvanizers Association Of Australia), July 2011. Influence of thermal cutting processes, Melbourne, Australia.
- Geiplova H., Schwarzer A. ve Bartak Z., 2018. The effect of cut edges on HDG coating quality, *The European Corrosion Congress*, Prague.
- Ghanbari, A. ve Attar, M.M., 2015. A study on the anticorrosion performance of epoxy nanocomposite coatings containing epoxy-silane treated nano-silica on mild steel substrate, *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 23, 145–153.
- Ghasemi-Kahrizsangi, A., Neshati, J., Shariatpanahi, H. ve Akbarinezhad, E., 2015. Improving the UV degradation resistance of epoxy coatings using modified carbon black nanoparticles, *Prog. Org. Coat.* 85, 199–207.

- Gülçelik A. G., 2019. Elektrolitik çinko kaplamalı plakalarda hızlandırılmış korozyon testi uygulaması, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Haeri, S.Z., Ramezanzadeh, B. ve Asghari, M., 2017. A novel fabrication of a high performance SiO₂-grapheneoxide (GO) nanohybrids: Characterization of thermal properties of epoxy nanocomposites filled with SiO₂-GO nanohybrids, *Journal of Colloid and Interface Science*, 493, 111-122.
- Hoffmann H. ve Petry R., 2007. Improved corrosion protection of the cut edge of coil coated sheet, *Production Engineering*, 1, 337-342.
- Hong M.S., Park Y. ve Kim T., 2020. Polydopamine/carbon nanotube nanocomposite coating for corrosion resistance. *Journal of Materiomics*, 6, 1, 158-166.
- International Zinc Association, 2017, Galvanic/bimetallic (including cut edge) corrosion of galvanized sheet, *Galvinfonote*, 3, 6. ABD.
- Jalili M., Rostami M. ve Ramezanzadeh B., 2015. An investigation of the electrochemical action of the epoxy zinc-rich coatings containing surface modified aluminum nanoparticle, *Applied Surface Science* 328, 95-108.
- Jiang, T., Kuila, Y., Kim, N.H., Ku, B.C. ve Lee, J.H., 2013. Enhanced mechanical properties of silanized silica nanoparticle attached graphene oxide/epoxy composites, *Composites Science Technology*, 79, 115-125.
- Kahraman, M.V., Kuğu, M., Menciloglu, Y., Kayaman-Apohan, N. ve Gungor, A., 2006. The novel use of organo alkoxy silane for the synthesis of organic-inorganic hybrid coatings, *Journal of Non-Crystalline Solids*, 352, 21-22, 2143-2151.
- Karakaş Ö., Kanca E. ve Aydın Z., 2012. Galvanizli sac üretiminde, pasivasyon ajanları ve koruyucu yağ kullanımının, korozyon oluşumuna etkilerinin incelenmesi, *International Iron & Steel Symposium* da sunuldu, Karabük.
- Karlasson J., 2011. Corrosion mechanisms under organic coatings a study in relation to next generation's pretreatments, Master of Science Thesis in the International Master's program Chemical Engineering, Chalmers University Of Technology, Göteborg, Sweden.
- Kartsonakis, I.A., Balaskas, A.C., Koumoulos, E.P., Charitidis, C.A. ve Kordas, G.C., 2012. Incorporation of ceramic nanocontainers into epoxy coatings for the corrosion protection of hot dip galvanized steel, *Corrosion Science*, 57, 30-41.
- Khun, N.W., Rincon Troconis, B.C. ve Frankel, G.S, 2014. Effects of carbon nanotube content on adhesion strength and wear and corrosion resistance of epoxy composite coatings on AA2024- T3, *Progress in Organic Coatings* 77, 72-80.

- Kotnarowska, D., Przerwa, M., ve Szumiata, T., 2014. Resistance to erosive wear of epoxy-polyurethane coating modified with nanofillers, *Journal of Materials Science Research*, 3, 2.
- Lewis O. D., Critchlow G. W. ve Wilcox G. D., 2012. A study of the corrosion resistance of a waterborne acrylic coating modified with nano-sized titanium dioxide, *Progress in Organic Coatings*, 73, 1, 88-94.
- Lezzi R.A., 2011. Corrosion mechanisms of painted metal, presented at U.S. Department of Defense Corrosion Conference, Washington, USA.
- Liu T., Li J., Li X., Qiu S., Ye Y. ve Yang F., 2019. Effect of self-assembled tetraaniline nanofiber on the anticorrosion performance of waterborne epoxy coating, *Progress in Organic Coatings* 128, 137-147.
- Longhi M., Kunst S., Beltrami L. V. R., Kerstner E.K., Filho C. I. S., Sarmiento V. H. V. ve Malfatti C. 2015. Effect of tetraethoxy-silane (teos) amounts on the corrosion prevention properties of siloxane-pmma hybrid coatings on galvanized steel substrates, *Material Search*, 18, 6, 3-6.
- Ma, Y., Di, H., Yu, Z., Liang, L., Lv, L., Pan, Y., Zhang, Y. ve Yin, D., 2016. Fabrication of silica-decorated graphene oxide nanohybrids and the properties of composite epoxy coatings research, *Applied Surface Science*, 360, 936–945.
- Maitra, U., Prasad, K. E., Ramamurty, U. ve Rao, C. N. RÇ., 2009. Mechanical Properties of Nanodiamond-Reinforced Polymer-Matrix Composites, *Solid State Communications*, 149, 1693–1697.
- Martin-Gallego M., Verdejo R. ve Khayet M., 2011. Thermal conductivity of carbon nanotubes and graphene in epoxy nanofluids and nanocomposites, *Nanoscale Research Letters* 6, 1, 610-614.
- Matin E., Attar M. M. ve Ramezanzadeh B., 2015. Investigation of corrosion protection properties of an epoxy nanocomposite loaded with polysiloxane surface modified nanosilica particles on the steel substrate, *Progress in Organic Coatings* 78, 395-403.
- Matin, E., Attar M. M. ve Ramezanzadeh, B., 2015. investigation of corrosion protection properties of an epoxy nanocomposite loaded with polysiloxane surface modified nanosilica particles on the steel substrate, *Progress in Organic Coatings*, 78, 395–403.
- Mobin, M., Aslam, J. ve Alam, R., 2017. Corrosion protection of poly(aniline-co-N-ethylaniline)/ZnO nanocomposite coating on mild steel, *Arabian Journal for Science and Engineering*, 42, 209-224.
- Monetta T., Curioni M. ve Scenini F., 2015. Correlation between electrochemical impedance measurements and corrosion rate of magnesium investigated by real-time hydrogen measurement and optical imaging, *Electrochimica Acta* 166, 372-384.

- Naganuma T. ve Kagawa Y., 2002. Effect of particle size on the optically transparent nano meter-order glass particle-dispersed epoxy matrix composites. *Composites Science and Technology*, 62, 9, 1187-1189.
- Nazarov A., Olivier M. G. ve Thierry D., 2012. SKP and FT-IR microscopy study of the paint corrosion de-adhesion from the surface of galvanized steel, *Progress in Organic Coatings*, 74, 2, 356-364.
- Ng, C.B., Schadler, L.S. ve Siegel, R.W., 1999. Synthesis and mechanical properties of TiO₂-epoxy nanocomposites, *Nanostructured Materials*, 12, 507–510.
- Olad, A., Barati, M. ve Behboudi, S., 2012. Preparation of PANI/epoxy/Zn nanocomposite using Zn nanoparticles and epoxy resin as additives and investigation of its corrosion protection behavior on iron, *Progress in Organic Coatings* 74, 1, 221-227.
- Paksoy A.K., 2008. Çelik yapıların, atmosferik korozyona karşı korunmasında epoksi bazlı boya ve kaplamaların kullanımı ve performansı, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Parimalam, M., Islam M. R. ve Yunus, R. M., 2019. Effects of nano- and micro-sized inorganic fillers on the performance of epoxy hybrid nanocoatings, *Polymers and Polymer Composites*, 27, 2, 82–91.
- Pektaş İ., 2018. Galvanizcinin el kitabı, Ankara, 9-11.
- Perera, D.Y., 2004. Effect of pigmentation on organic coating characteristics. Review. *Progress in Organic Coatings*, 50, 247–262.
- Perez V., 2014. Soil corrosion behavior of hot-dipped galvanized steel in infrastructure applications, Master of Science Thesis in the International Master's program Material Engineering, University of British Columbia, Vancouver, Canada.
- Pourhashem, S., Vaezi, M.R., Rashidi, A. ve Bagherzadeh, M.R., 2017. Exploring corrosion protection properties of solvent based epoxy-graphene oxide nanocomposite coatings on mild steel, *Corrosion Science*, 115, 78–92.
- Ramanathan E., Balasubramanian S., 2016. Comparative study on polyester epoxy powder coat and amide cured epoxy liquid paint over nano-zirconia treated mild steel, *Progress in Organic Coatings* 93, 68-76.
- Ramazanzadeh B. ve Attar M. M., 2011b. Studying the effects of micro and nano sized ZnO particles on the corrosion resistance and deterioration behavior of an epoxy-polyamide coating on hot-dip galvanized steel. *Progress in Organic Coatings*, 71, 3, 314-328.
- Ramezanzadeh, B. ve Attar, M. M. 2011a. Characterization of the fracture behavior and viscoelastic properties of epoxy polyamide coating reinforced with nanometer and micrometer sized ZnO particles. *Prog. Org. Coat.* **71**, 242–249 (2011)

- Ramezanzadeh, B., Attar, M. M. ve Farzam, M., 2010. Corrosion performance of a hot-dip galvanized steel treated by different kinds of conversion coatings, *Surface & Coatings Technology* 205, 874–884.
- Ramezanzadeh, B., Mohamadzadeh Moghadam, M.H., Shohani, N. ve Mahdavian, M., 2017. Effects of highly crystalline and conductive polyaniline/graphene oxide composites on the corrosion protection performance of a zinc-rich epoxy coating, *Chemical Engineering Journal*, 320, 363–375.
- Shabani M., Allahyary E. ve Jafari Y., 2015. Enhanced Anti-corrosive Properties of Electrosynthesized Polyaniline/zeolite Nanocomposite Coatings on Steel, *Journal of Nanostructures* 8, 2, 131-143.
- Shi, X., Nguyen, T.A., Suo, Z., Liu, Y. ve Avci, R., 2009. Effect of nanoparticles on the anticorrosion and mechanical properties of epoxy coating, *Surface & Coatings Technology*, 204, 237–245.
- Shirehjini, F.T., Danaee, I., Eskandari, H. ve Zarei, D., 2016. Effect of nano clay on corrosion protection of zinc-rich epoxy coatings on Steel 37, *Journal of Materials Science & Technology*, 32, 1152-1160.
- Shokrieh M., Daneshvar A. ve Akbari S., 2013. The use of carbon nanofibers for thermal residual stress reduction in carbon fiber/epoxy laminated composites, *Carbon* 59, 255-263.
- Smith W. F., 2001. Malzeme bilimi ve mühendisliği, Çev. Kınıkoğlu N. G., Literatür Yayınları, İstanbul.
- Spirkova M., Slouf M., Blahova O., Farkacova T. ve Benesova J., 2006. Submicrometer characterization of surfaces of epoxy-based organic–inorganic nanocomposite coatings, A comparison of AFM study with currently used testing techniques, *Journal of Applied Polymer Science* 102, 5763-5774.
- Tabkhpaz M., Hugo R. ve Lee P. C., 2018. Development of nanocomposite coatings with improved mechanical, thermal, and corrosion protection properties, *Journal of Composite Materials*, 52, 8, 5-8.
- Thebault F., Vuillemin B. ve Oltra R., 2015. Influence of magnesium content on the corrosion resistance of the cut-edges of Zn–Mg-coated steel, *Corrosion Science*, 97, 100-106.
- Tsai P. Y., Chen T. ve Lee Y., 2018. development and characterization of anticorrosion and antifriction properties for high performance polyurethane/graphene composite coatings, *Coatings*, 8, 7, 250.
- Wang M. Z., Zhang J., Han X., Li F. Q., Wang L. Z., Wei R., 2014. Corrosion and salt scale resistance of multilayered diamond-like carbon film in CO₂ saturated solutions, *Corrosion science*, 86, 9, 261-267.
- Wassink, J., 2007. No more scratching, *Delft Outlook*, 7, 4, 16-19.

- Wetzel, B., Hauptert, F. ve Zhang, M.Q., 2003. Epoxy nanocomposites with high mechanical and tribological performance, *Composites Science and Technology*, 63, 2055-2067.
- Yaluk D., 2009. Çelik sistemlerin yüzey özelliklerinin sıcak daldırma galvaniz kaplamalara etkisi, Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- Yang, S. Y., Lin, W. N. ve Huang, Y. L., 2011. Synergetic effects of graphene platelets and carbon nanotubes on the mechanical and thermal properties of epoxy composites, *Carbon*, 793–803.
- Yasakau K. A., Kallip S. ve Lisenkov A., 2016. Initial stages of localized corrosion at cut-edges of adhesively bonded Zn and Zn-Al-Mg galvanized steel, *Electrochimica Acta* 211, 126-141.
- Yıldız R. ve Dehri İ., 2015. Investigation of the cut-edge corrosion of organically-coated galvanized steel after accelerated atmospheric corrosion test. *Arabian Journal of Chemistry*, 8, 6, 821-827.
- Zha C., Hu J., Li A. ve Huang S., 2018. Nanoindentation Study on Mechanical Properties of Nano-SiO₂/Dental Resin Composites. *Journal of Materials Science and Chemical Engineering* 06, 4, 57-64.
- Zhang D., Gao Z. ve Hou L., 2019. Understanding of the corrosion protection by V(IV) conversion coatings from a sol-gel perspective, *Corrosion Science*, 161 Article Id:108196.
- Zhang Shu, Y., Ding, Y. ve Lee, S., 2002. Effect of polymeric structure on the corrosion protection of epoxy coatings. *Corrosion Science*, 44, 4, 861-869.
- Zhang, Z., Zhang, W., Li, D., Sun, Y., Wang, Z., Hou, C., Chen, L., Cao, Y. ve Liu, Y., 2015. Mechanical and anticorrosive properties of graphene/epoxy resin composites coating prepared by in-situ method, *International Journal of Molecular Sciences*, 16, 2239-2251.
- Zhou S., Wu Y. ve Zhao W., 2019. Designing reduced graphene oxide/zinc rich epoxy composite coatings for improving the anticorrosion performance of carbon steel substrate, *Materials & Design* 169,107694.
- URL-1 <[http://makinatek.com.tr/uncategorized/celidin - korozyondan – galvanizle - korunmasi](http://makinatek.com.tr/uncategorized/celidin-korozyondan-galvanizle-korunmasi)>, Erişim Tarihi: 22.06.2021.
- URL-2< <https://www.surfgroup.be/research-projects/ct-investigation>>, Erişim Tarihi: 25.07.2021.
- URL-3 <<http://www.degemak.com.tr>>, Erişim tarihi: 23.07.2021.

ÖZGEÇMİŞ

Adı ve Soyadı : Emre KABAOĞLU

EĞİTİM BİLGİLERİ (Kurum ve Yıl)

Lisans : Selçuk Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 2008-2013

Yüksek Lisans : Aksaray Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, 2017-

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLERİ

1. İmaş Makina (Konya) / 2013 - 2013
2. Dolunay Yapı Denetim (Aksaray) / 2013 - 2014
3. Mysilo Tahıl Depolama Sistemleri (Aksaray)/ 2014 -

TEZDEN ÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER

Kongrelerde Sunulan Bildiriler

1. Kabaoğlu E., ve Karabörk, F., 2021. Galvanizli Çelik Yüzeyine Uygulanan Epoksi Kaplamaya Katılan Partiküllerin Kaplama Özelliklerine Etkilerinin İncelenmesi. 6. Uluslararası Bilimsel Çalışmalar Kongresi (UBCAK 2021), Temmuz 26-28, 2021, Online Sözlü Sunum, Bildiriler kitabı: 498-505.
2. Kabaoğlu, E., Karabörk, F., Kayan, D. B., ve Akdemir A., 2021. Galvanizli Çelik Sacların Korozyon Direncine Kompozit Kaplamaların Etkisinin İncelenmesi. Material Science and Technology in Cappadocia (İMSTEC 2021), Kasım 26-28, 2021, Bildiriler kitabı: 98-102.