

T.C.
NEVŞEHİR HACI BEKTAŞ VELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

S235JR ÇELİĞİNDE GALVANİZ KAPLAMANIN
KOROZYON DİRENCİNE ETKİSİ

Tezi Hazırlayan
Ahmet SARI

Tez Danışmanı
Prof. Dr. Cemal ÇARBOĞA

Metalurji ve Malzeme Müh. Anabilim Dalı
Yüksek Lisans Tezi

MAYIS 2025
NEVŞEHİR

**T.C.
NEVŞEHİR HACI BEKTAŞ VELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**S235JR ÇELİĞİNDE GALVANİZ KAPLAMANIN
KOROZYON DİRENCİNE ETKİSİ**

**Tezi Hazırlayan
Ahmet SARI**

**Tez Danışmanı
Prof. Dr. Cemal ÇARBOĞA**

**Metalurji ve Malzeme Müh. Anabilim Dalı
Yüksek Lisans Tezi**

MAYIS 2025

Prof. Dr. Cemal ÇARBOĞA danışmanlığında Ahmet SARI tarafından hazırlanan "**S235JR Çeliğinde Galvaniz Kaplamanın Korozyon Direncine Etkisi**" başlıklı bu çalışma, jürimiz tarafından Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalında **Yüksek Lisans Tezi** olarak kabul edilmiştir.

.../.../20..

JÜRİ

Başkan : Prof. Dr. Murat ESKİL

Üye : Prof. Dr. Cemal ÇARBOĞA

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Serkan DAL

ONAY:

Bu tezin kabulü Enstitü Yönetim Kurulunun.....tarih ve..... sayılı kararı ile onaylanmıştır.

.../.../20..

Prof. Dr. Cemal ÇARBOĞA
Enstitü Müdürü

TEZ BİLDİRİM SAYFASI

Tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada yer alan bütün bilgilerin bilimsel ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu ve bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Ahmet SARI



TEŞEKKÜR

Yüksek lisans öğrenimim ve tez çalışmam boyunca bana vermiş olduğu katkılarından ve her türlü desteğinden dolayı tez danışman hocam Prof. Dr. Cemal ÇARBOĞA'ya, Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği bölümü Öğretim Üyesi Dr. Serkan DAL'a ve Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Metalurji Mühendisliği Bölümü Öğretim Üyesi Doç. Dr. Kürşad Oğuz OSKAY'a teşekkürü bir borç bilirim.

Meslek hayatıma başladığım günden itibaren beni her koşulda destekleyen, hayata ve mesleğime dair edindiğim bilgi ve tecrübelerin çoğunu öğrenmemi sağlayan, yapılan çalışmalarımda yardımcı olan NEVSAC METAL ailesine ve tesis müdürü Sn. Arif ÖBEKLİ'ye;

Hayatım boyunca maddi manevi destekleriyle her zaman yanımda olan çok değerli babaannem Ayşe SARI, annem Reyhan SARI, babam Halil SARI, kardeşlerim Mustafa SARI ve Mahmut SARI, nişanlım Sevcan EKENEK'e, içtenlikle teşekkür ediyorum ve bu yüksek lisans tezini çok kıymetli aileme ithaf ediyorum.

S235JR ÇELİĞİNDE GALVANİZ KAPLAMANIN KOROZYON DİRENCİNE ETKİSİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Ahmet SARI

**NEVŞEHİR HACI BEKTAŞ VELİ ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ
ENSTİTÜSÜ**

MAYIS 2025

ÖZET

S235JR çeliğinin, sıcak daldırma galvaniz yöntemiyle kaplanıp, korozyona karşı mukavemeti ve kaplamanın korozyon ortamında malzemeye etkisi araştırılmıştır. Galvaniz kaplama işlemi 445-465 °C yapılmıştır. Kaplanan numunelerin metalografik olarak hazırlanması sonrasında kaplama tabakası kesiti optik mikroyapı ve mikrosertlik analiz yöntemleri kullanılarak karakterize edilmiştir. Optik mikroskop analizine göre kaplama tabakası kalınlığı, işlem sıcaklığı ve süreye bağlı olarak artış göstermiştir. Mikrosertlik analizleri sonucunda ise kaplama tabakası yüzey sertliği maksimum 458 HV olarak tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlar neticesinde yapılan kaplama işleminin sıcaklık ve süre parametrelerine bağlı olarak malzeme yüzey özelliklerini iyileştirdiği sertlik değerlerinin arttığı görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: S235JR Çeliği, Galvaniz, Korozyon, Kaplama

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Cemal ÇARBOĞA

Sayfa Adedi: 54

**EFFECT OF GALVANIZED COATING ON CORROSION
RESISTANCE OF S235 STEEL**

(Master Thesis)

Ahmet SARI

NEVSEHIR HACI BEKTAŞ VELİ UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCES

MAY 2025

ABSTRACT

S235JR steel was coated with hot dip galvanization method and its resistance to corrosion and the effect of the coating on the material in the corrosion environment were investigated. Galvanizing process was carried out at 445-465 °C. After metallographic preparation of the coated samples, the coating layer cross-section was characterized using optical microstructure and microhardness analysis methods. According to optical microscope analysis, the coating layer thickness increased depending on the process temperature and time. As a result of microhardness analysis, the surface hardness of the coating layer was determined as maximum 458 HV. As a result of the obtained results, it was observed that the coating process improved the material surface properties and increased the hardness values depending on the temperature and time parameters.

Keywords: S235JR Steel, Galvanized, Corrosion, Coating

Thesis Advisor: Prof. Dr. Cemal ÇARBOĞA

Number of Pages: 54

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY SAYFASI.....	i
TEZ BİLDİRİM SAYFASI.....	ii
TEŞEKKÜR	iii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
TABLolar LİSTESİ	viii
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	xi
1. BÖLÜM	
GİRİŞ.....	1
1.1. Çalışmanın Amacı	1
2. BÖLÜM	
LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	3
2.1. Çelikler.....	3
2.2. Çeliklerin Sınıflandırılması.....	3
2.2.1. Yapı Çelikleri	4
2.2.2. İmalat Çelikleri.....	4
2.2.3. İslah Çelikleri	5
2.2.4. Transmisyon Çelikleri	5
2.2.5. Paslanmaz Çelik	6
2.2.6. Takım Çelikleri	6
2.2.7. S23JR Çeliği.....	7

2.3. Çeliklerde Galvanizleme İşlemi	10
2.4. Korozyon.....	11
2.5. Galvanizlemenin Tarihçesi.....	23
2.6. Sıcak Daldırma Galvanizleme.....	24
2.6.1. Sıcak Daldırma Galvanizleme Bağlantıları.....	24
2.6.2. Sıcak Daldırma Galvanizleme Prosesi	26
3. BÖLÜM	
MATERYAL VE METODLAR	28
3.1. Malzemeler	28
3.1.1.Çinko	28
3.2.Numune Hazırlama.....	31
4. BÖLÜM	
DENEYSEL SONUÇLAR	36
4.1 Optik Mikro Yapı Sonuçları.....	36
4.2. Mikro Sertlik Analiz Sonuçları	42
4.3. Tafel Ekstrapolasyonu Analizi ve Sonuçları.....	44
5. BÖLÜM	
TARTIŞMA SONUÇ ve ÖNERİLER.....	49
KAYNAKÇA	50

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 2.1. S235JR Çeliğinin Kimyasal Bileşimi	7
Tablo 2.2. S235JR'nin EN 10025-2 Standardına Göre Mekanik Özellikleri	8
Tablo 3.1. Çinko Elementinin Temel Özellikleri	29
Tablo 3.2. Çinko Elementinin Fiziksel Özellikleri	30
Tablo 3.3. Çinko Elementinin Atom Özellikleri	30
Tablo 3.4. Çinko Elementinin Mekanik Özellikleri	30
Tablo 4.1. HDG Esnasından Oluşan Fazların Sertlik Değeri	44
Tablo 4.2. Numunenin Tafel Eğrisinde Icorr ve Ecorr Değeri	45

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 3.1.Hassas kesme cihazı.....	32
Şekil 3.2.Bakalite alma cihazı.....	33
Şekil 3.3.Zımparalama cihazı.....	33
Şekil 3.4.Zımparalama ve parlatma cihazı.....	34
Şekil 3.5.Bakalite alınan numuneler	34
Şekil 3.6.Optik mikroskop	35
Şekil 4.1.Sıcak daldırma galvanizleme ile kaplanmış S235JR numunesinin mikro yapı görüntüsü.....	36
Şekil 4.2.Sıcak daldırma galvanizleme ile kaplanmış S235JR numunesinin mikro yapı görüntüsü.....	37
Şekil 4.3.Galvaniz kaplanmış S235JR numunesinin kaplama kalınlığının mikro yapı görüntüsü.....	37
Şekil 4.4.Galvaniz kaplanmış S235JR numunesinin kaplama kalınlığının mikro yapı görüntüsü.....	38
Şekil 4.5.S235JR numunesinin kaplama kalınlığının mikron değerleri ile birlikte mikro yapı görüntüsü.....	38
Şekil 4.6.S235JR numunesinin kaplama kalınlığının mikron değerleri ile birlikte mikro yapı görüntüsü.....	39
Şekil 4.7.S235JR numunesinin kaplama kalınlığının mikron değerleri ile birlikte mikro yapı görüntüsü.....	39

Şekil 4.8. Galvaniz kaplanmış S235JR numunesinin sertlik ölçümlerinin mikro yapı görüntüsü.....	43
Şekil 4.9. Tafel ekstrapolasyon yöntemi ile kıyaslanan kaplamalı ve kaplamasız çeliklerin tafel ekstrapolasyon eğrisi.....	46



SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

ASTM	: Amerikan Test ve Malzeme Derneği
A	: Yüzey Alanı (cm ²)
Co	: Kobalt
CVD	: Chemical Vapor Deposition (Kimyasal Buhar Biriktirme)
CR	: Korozyon Hızı (mm/yıl)
Cr	: Krom
cm²	: Santimetrekare (Alan Ölçü Birimi)
EIS	: Empedans Spektroskopisi
Ecorr	: Korozyon Potansiyeli
Fe-C	: Demir-Karbon
g/m²	: Gram / Metrekare
g/cm³	: Gram / Santimetre Küp (Yoğunluk Birimi)
HDG	: Hot Deep Galvanized
HSLA	: Yüksek Mukavemetli Düşük Alaşımlı
H₂S	: Hidrojen Sülfür
Icorr	: Korozyon Akımı
JR	: Çentik Darbe Testinin +20°C'de Uygulanması
Mpa	: Megapascal
mg	: Miligram (Ağırlık/Kütle Birimi)
MIG	: Metal İnert Gaz
MAG	: Metal Aktif Gaz
Mo	: Molibden
Mn	: Mangan
Ni	: Nikel
N	: Azot
NACE	: Nomenclature of Economic Activities (Ekonomik Faaliyetlerin İsimlendirilmesi)
Nb	: Niyobyum
P	: Fosfor
pH	: Hidrojen Gücü
PVD	: Physical Vapor Deposition (Fiziksel Buhar Biriktirme)
S235JR	: Düşük Karbonlu Yapısal Çelik

St37-2	: Düşük Karbonlu Yapısal Çelik (S235JR Diğer Adı)
St44-2	: Yüksek Mukavemetli Alaşımsız Yapısal Çelik
St52-3	: Yüksek Mukavemetli Yapısal Çelik
S	: Kükürt
Si	: Silisyum
SRB	: Sulfate Reducing Bacteria (Sülfat İndirgen Bakteriler)
Ti	: Titanyum
T	: Süre (Saat)
TIG	: Tungsten İnert Gaz
V	: Vanadyum
Zn	: Çinko
W	: Wolfram (Tungsten)
°C	: Santigrat Derece
°F	: Fahrenheit Derece
Δm	: Kütle Kaybı (mg)
ρ	: Malzeme Yoğunluğu (g/cm ³)
ΔG	: Gibbs Serbest Enerji Değişimi

1.BÖLÜM

GİRİŞ

1.1.Çalışmanın Amacı

Galvanizli çelik, etkili korozyon direnci ve dayanıklılığı sayesinde çeşitli endüstrilerde vazgeçilmez bir malzeme haline gelmiştir. Çeliğin gücünü çinko kaplamanın koruyucu özellikleriyle birleştirerek uzun ömür ve dayanıklılık gerektiren uygulamalar için idealdir. Galvanizli çeliğin özelliklerini, üretim yöntemlerini, uygulamalarını, avantajlarını, dezavantajlarını ve gelecekteki eğilimlerini inceleyerek modern inşaat ve imalattaki önemi oldukça yüksektir [1]. Galvanizli çeliğin performans ve uygulama alanlarının doğru değerlendirilebilmesi için, öncelikle çeliğin kendine özgü yapısal ve mekanik özelliklerinin anlaşılması gerekmektedir. Çelik, esas olarak demir ve karbondan oluşan, karbon içeriği tipik olarak ağırlıkça %0,2 ila %2,1 arasında olan bir alaşımdır. Diğer elementlerin eklenmesiyle birlikte karbon içeriğindeki değişiklikler, her biri özel uygulamalara uygun olan farklı tür ve derecelerde çeliklerin ortaya çıkmasına neden olur. Galvanizli çelik, korozyona karşı korumak için çinko tabakasıyla kaplanmış çeliktir. Çinko, çelik ile çevre arasında bir bariyer görevi görerek nem ve oksijenin alttaki metale ulaşmasını engeller. Bu koruyucu kaplama, çelik ürünlerin ömrünü önemli ölçüde artırarak onları dış mekan ve endüstriyel uygulamalara uygun hale getirir. Galvanizleme işlemi, çeliğin yüzeyine çeşitli yöntemlerle bir çinko tabakasının uygulanmasını içerir. En yaygın galvanizleme yöntemleri; sıcak daldırma galvanizleme, elektrogalvanizleme, çinko spreylendirme ve galvanizli kaplama yöntemleridir. Sıcak daldırma galvanizleme; çelik, 450 ile 460 °C (842 ile 860 °F) arasındaki sıcaklıklarda erimiş çinko banyosuna daldırılır. Isı, çinkonun çelik ile birleşmesine neden olarak kalın ve dayanıklı bir kaplama oluşturur. Sıcak daldırma galvanizleme, sağlam koruyucu özellikleriyle bilinir ve büyük yapısal bileşenlerde yaygın olarak kullanılır. Elektro galvanizleme ise; elektrokaplama işlemi yoluyla çinko kaplamanın uygulanmasını içerir. Bu işlemde çelik, çinko tuzları içeren bir çözeltiye daldırılır ve çözeltiden elektrik akımı geçirilerek çinkonun çelik yüzey üzerinde birikmesi sağlanır. Elektro-galvanizleme yoluyla üretilen çinko kaplama, sıcak daldırma galvanizlemeye göre elde edilenden daha ince ve daha düzgün olma eğilimindedir [2]. Çinko spreylendirme yöntemi; erimiş çinkonun çelik yüzeye püskürtme tekniği kullanılarak uygulanmasını içerir.

Çinko spreyci kaplama genellikle tamir ve bakım uygulamalarında kullanılır ve orijinal galvaniz kaplamanın aşınmış olabileceği koruyucu bir katman sağlar. Galvanizli kaplamada; çelik önce sıcak daldırma galvanize edilir ve daha sonra kontrollü bir atmosferde ısıtılarak çinkonun bir kısmının çelik yüzeyindeki demir ile reaksiyona girmesi sağlanır. Bu, mükemmel boya yapışması ve korozyon direnci sağlayan bir kaplama ile sonuçlanır. Tüm bu bilgilerin ışığında biz ise çalışmamızda sıcak daldırma galvaniz işlemi ile ilerleyerek istediğimiz sonuçları elde ettik.

Farklı galvanizli çelik türleri, metrekare başına gram (g/m^2) cinsinden ölçülen çinko kaplamanın kalınlığı ile karakterize edilir. Yaygın türleri vardır. Bunlarda G30 kalitesi, yaklaşık 30 g/m^2 çinko kaplamaya sahiptir ve genellikle neme maruz kalmanın sınırlı olduğu iç mekan uygulamalarında kullanılır. Bizim kullandığımız kalite olan G60, yaklaşık 60 g/m^2 çinko kaplamaya sahiptir. Orta derecede dış mekan maruziyetine uygundur ve genellikle çatı kaplama panelleri ve dış cephe kaplamalarında kullanılır. G90 kalitesi, yaklaşık 90 g/m^2 'lik bir kaplamaya sahiptir ve bu da onu daha zorlu ortamlar ve çitler, direkler ve yapısal kirişler gibi uygulamalar için uygun hale getirir. çinko-alüminyum kaplama, bazı galvanizli çelikler çinko ve alüminyum karışımı ile kaplanarak korozyon direnci ve ısı yansıtma özelliği artırılır [3]. Modern mühendislik uygulamalarında kullanılan metalik malzemelerin dayanıklılığı ve uzun ömürlü olması, hem ekonomik hem de çevresel sürdürülebilirlik açısından büyük önem taşımaktadır. Özellikle yapısal çelikler, inşaat, otomotiv, enerji ve altyapı sektörlerinde yoğun şekilde kullanıldığından dolayı korozyon gibi çevresel etkilere karşı korunmaları kaçınılmazdır. Bu bağlamda galvanizleme işlemi, çeliğin ömrünü artırmak amacıyla en yaygın başvuru yüzey koruma yöntemlerinden biridir. Galvanizleme işlemi, çelik yüzeyine çinko gibi anodik özellik gösteren bir metal kaplayarak hem fiziksel hem de elektro-kimyasal koruma sağlamaktadır [4].

Bu çalışmada, düşük karbonlu bir yapı çeliği olan S235JR'nin sıcak daldırma galvaniz yöntemiyle kaplanması sonucu elde edilen korozyon direnci değerlendirilmektedir. Galvanizlemenin bu çelik türü üzerindeki etkisi, mikro yapısal değişimlerle birlikte kaplama kalınlığı ve sertlik değerleri açısından analiz edilmiştir. Bununla birlikte, galvanizlemenin elektrokimyasal performansına dair tafel eğrileri kullanılarak elde edilen veriler yorumlanmış ve sonuçlar literatürle karşılaştırılmıştır.

2.BÖLÜM

LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

2.1. Çelikler

Çelikler, genellikle içinde % 2 civarında karbon olan Fe-C alaşımı olarak tanımlanmaktadır. Çeliğe alaşım elementi olarak ilave edilen karbon sertlik, çekme direnci, akma direnci, süneklik vb. birçok mekanik özellik üzerinde etkilidir. Çelik, dünyada çok yaygın şekilde kullanılmaktadır, bu durum çeliklere çok fazla gereksinim hissedildiğini ortaya koymaktadır. Yapılarda, altyapıların üretilmesinde, gemiler, otomobiller, makine ve savunma sanayide çelik temel malzemedir. Çeliğin önemli bir bölümü ısıtılma işlemlerine dayanabilmektedir. İstenen fiziki ve mekanik özellikler, sertliklerle pek çok özellik ısıtılma işlemi uygulanmak suretiyle elde edilmektedir. Çelikler belli bir sıcaklığa vardığında şekillenebilmektedir. Kaynak işlemlerine, farklı malzemelerle kaplanmaya uygun bir maddedir.

2.2. Çeliklerin Sınıflandırılması

Çelikler özelliklerine veya kullanıldıkları alanlara göre farklı türlerde sınıflandırılmaktadırlar. Bunlar; kompozisyon, üretim tekniği, şekil, kalite ve kullanım alanlarına göre olmak üzere altı sınıfta incelenebilir.

1. Yapı çelikleri
2. İmalat çelikleri
3. İslah çelikleri
4. Transmisyon çelikleri
5. Paslanmaz çelikler
6. Takım çelikleri

Çelikler alaşım elementleriyle desteklenerek farklı performans gereksinimlerine göre özelleştirilebilir. Örneğin; Mn, Si, Cr, Ni, Mo gibi elementler çeliğe farklı özellikler kazandırır. Çelikler genel olarak kimyasal bileşime göre sınıflandırılır. Bunlar alaşımsız, düşük alaşımlı, yüksek alaşımlı çeliklerdir [5]. Kullanım amacına göre sınıflandırdığımızda ise yapı çelikleri, takım çelikleri ve paslanmaz çelikler olarak tanımlanır. İmalat yöntemine göre ise sürekli döküm, dövme, haddeleme olarak açıklanır. Mekanik özelliklerine göre de yüksek mukavemetli düşük alaşımlı (HSLA), temperlenmiş çelikler olarak tanımlanır [6].

2.2.1. Yapı Çelikleri

Çağımızda birbirinden farklı türlerde çelik kalitesi vardır. Genel yapılarda kullanılan çelikler birinci, ikinci ve üçüncü kalite olarak 3 grupta toplanmaktadır. Söz konusu çeliklerin içindeki karbonun artması ile çekme direnci ile sertliği artmaktadır, sıcak ve soğuk şekillendirme, kaynak yapabilme ve talaşlı işleme gibi özellikler de azalır. Yapılarda kullanılan çelikler alaşımsızdır, sac levha, çubuk ve farklı boş ve dolu profiller şeklinde imal edilebilirler [7].

Ayrıca yapı çeliklerinin kimyevi içeriklerine katılmış olan değişik bileşenlerle yüksek dayanım ve kaynaklanabilme özelliğine sahip olabilmektedir. Çeliklerin sertleşmesine yardımcı olan başka bir maddeyse manganezdır. Yapı çeliklerinin sertlik oranı malzeme mukavemetiyle ilişkilendirilmektedir ancak bu, kaynaklanabilme niteliğini de belirleyen bir unsurdur. Dayanımı yüksek olan çelikler üretebilmek üzere değişik metotlar vardır. Kimi çeliklerin tavlama ve temperleme teknikleriyle dayanımı artırılabilir. Temperleme metodu çelikte sünekliği arttırmaktadır, ayrıca bu metot kullanılırsa çekme dayanımında azalma olmaktadır. Söz konusu tekniğin uygulanmasına yönelik olarak kullanılan sıcaklık ile süresi dikkatli bir biçimde ayarlanmalıdır [8].

2.2.2 İmalat Çelikleri

Bu tür çelikler genellikle %0,65'e kadar karbon içerir. Seçilen duruma dayalı olarak karbon oranı düşük tutulabilir, yüksek miktarda alaşım elementlerine de sahip olabilir. Bu çelikler genellikle sementasyon çelikleriyle ve nitrürleme yöntemiyle yüzeyi sertleştirilebilen çelikler şeklinde ayrılmaktadır. Sementasyon çelikleri kimyasalının içinde karbon miktarının %0,29'dan daha az oranda olmasına karşın sementasyon yöntemiyle söz konusu karbon miktarı %1'e kadar artırılmaktadır ve yüzeye su verilerek suretiyle yüzeyin sertliği artırılmaktadır. Yüzey aşınmasına uğrayan ancak iç toklukları fazla olan parçaların üretilmesine yönelik olarak kullanılabildikleri görülmektedir [2].

Sementasyon metodunda genel olarak parça, kısmi olarak da nihai durumuna getirilmesinin ardından uygulandığından parçaların işlenmesi oldukça kolay bir işlemdir. Bu sertleştirme işleminin ardından malzemenin içi yumuşak olacağından, darbeler karşısında çok daha dayanıklı hale gelecektir. Sementasyon çelikleri öteki

takım çeliklerine nazaran ucuzdur. Ucuzluğunun dışında doğru çeliği tercih etmek ve sementasyonu doğru yapabilmek de oldukça önemlidir. Başka bir yüzey sertleştirme tekniğiyse nitrrlemedir. Azotun çok olduğu bir atmosferde malzeme 600°C’de uzun bekletilip malzemenin yüzey kısmında azot miktarı artırılarak, su vermeden malzemenin yüzeyi sertleştirilmektedir. Yüksek aşınmayla yorulma mukavemetine sahip olması istenilen parçalar için söz konusu metot tercih edilmektedir.

2.2.3. Islah elikleri

Islah elikler yüksek oranda karbon içerir. Söz konusu miktar %0,2-%0,3’ten daha çoktur. Karbonun miktarı çok olduğundan daha rahat sertleştirilebilir. Islah uygulamasının ardından tokluğu daha yüksek çelikler üretilir. Islah uygulamasında istenen neticenin en iyisini elde etmek üzere tercih edilecek olan çeliğin iç yapısının temiz olması lazımdır. Buna yönelik olarak sıvı çeliğin bünyesinde ergimiş haldeki gazların çelikten uzaklaştırılmalıdır; oksitten, sülfürden inklüzyonlardan arındırılmalıdır. Islah eliklerinin içindeki karbonun miktarı çok olduğundan kaynaklanabilmesi güçtür. Bu bölgelerde martenzit yapı oluşmaktadır. Islah elikleri farklı makinelerin ve motorların parçasında, cıvata somun, krank milleri, piston kolları vb. parçaların imalatında kullanılmaktadır ve çok geniş bir kullanım sahasına sahiptir.

2.2.4. Transmisyon elikleri

Transmisyon elikleri, genellikle kimyasal bileşimlerinden ziyade kopma ve çekme mukavemeti gibi mekanik özelliklerine göre sınıflandırılmakta ve adlandırılmaktadır. Bu tür çeliklerden yapılan malzemeler St37-2, St44-2, St52-3 vb. Çekme mukavemetinden sağlanan değerleri sembolize edecek biçimde isimlendirilmektedir. Transmisyon eliklerindeki karbonun miktarı düşük olduğundan mukavemeti artırmak üzere Mn ile yükseltilmektedir. Transmisyon eliklerindeki karbonun düşük olmasından kaynaklı olarak kaynaklanabilmesi çok yüksek ihtimaldir. Kaynak yeteneğinin fazla olmasından dolayı uygulanan işlemlerin ardından ya da montajlamada kaynak yapılması istenilen makinelerin ve otomobillerin parçalarında, millerle üretim farklı pek çok parçasında söz konusu çeliklerin kullanılmasını kolaylaştırmaktadır, bu da transmisyon çeliklerinin daha fazla kullanılmasını temin etmektedir. Transmisyon elikleri talaşlı uygulamalarda sert olmadıklarından daha kolay işlenebilir. Fakat otomat çeliklerinde

olduğu gibi talaş kaldırılmadığından işlemin müddeti artmaktadır [9]. Bilhassa seçilme nedeni otomat çeliklerine göre oldukça düşük maliyetli olmalarıdır.

2.2.5. Paslanmaz Çelik

Paslanmaz çelikler, içinde minimum %10,5 krom maksimum %1,2 civarında karbon olan, kromla birlikte yapılarda elde edilmek istenilen özelliklere dayalı olarak östenit, ferrit, martenzit fazlarıyla çökelti oluşturabilen alaşım elementlerine sahiptir. Paslanmaz çeliklerdeki paslanmazlık, çeliğin yüzey kısmında meydana gelen krom bakımından zengin oksit tabakasıyla oluşmaktadır [10]. Paslanmaz çelikler, yalnızca yüksek korozyon direnci göstermeleriyle değil; aynı zamanda farklı mekanik özelliklere sahip birçok çeşidinin bulunması, düşük ve yüksek sıcaklıklarda kullanılabilmesi, kolay şekillendirilebilmesi ve estetik görünümü gibi çeşitli avantajları nedeniyle yaygın olarak tercih edilmektedir. Bu tip üstün özelliklere sahip olması paslanmaz çeliklerin sektörde geniş bir biçimde kullanılmalarını sağlamaktadır. Paslanmaz çeliklerden içerikleri farklı çelikler üretmek üzere kimyevi bileşenler değiştirilmektedir, böylece farklı alaşımlar üretilebilmektedir. Paslanmaz çelikler genellikle kesme işlemlerinde kullanılabilme, kaynaklanabilme, biçimlendirilebilme ve talaşlı işlemlerle kolayca şekillendirilebilme özellikleriyle tercih edilmektedir. Soğuk biçimlendirme yöntemiyle pekleştirilmiş olan paslanmaz çeliklerin artan dayanımıyla kullanıldıkları yerlerde parçaların kalınlığı azaltılmaktadır ve ağırlıkları daha azaltılarak imal edilen parçanın ağırlığıyla fiyatında ciddi düşüşler elde edilmektedir. Kimi paslanmaz çeliklerde de değişik ısı işlemleri uygulanmak suretiyle malzemelerde yüksek bir mukavemet elde edilmektedir [11].

2.2.6. Takım Çelikleri

Geçmişten bugüne dek hızlı bir şekilde gelişen teknolojiyle endüstri alanında yaygın şekilde kullanılan takım çeliklerinin kimyasallarındaki alaşım elementleriyle bunlara uygulanmış olan farklı ısı işlemlerinin neticesinde takım çeliklerinin yüksek dayanımlı, aşınma dirençli ve ısı kararlılıkları yüksek oldukları için tercih edilmektedir [12]. Takım çelikleri farklı miktarda karbona sahip olmasına karşın kullanılma amacı ve yerine dayalı olarak farklı çeliklere oranla yüksek miktarlarda Cr, Mo, W, Ti, V, Ni, Co vb. alaşımlar içermektedir, uygulanmış olan sertleştirmeyle ve temperlemeyle ısı

işlemlere mukavemeti çok yükselmiştir, böylece tok ve aşınma direnci olan malzemeler üretilabilmektedir. Takım çelikleri, söz konusu özelliklerinden dolayı sıcak ve soğuk biçimlendirme kalıp matrisiyle zımbaların, enjeksiyon kalıplarıyla sac metal kesme/delme kalıplarının imalatında çok geniş bir biçimde kullanılmaktadır [13].

2.2.7. S235JR Çeliği

S235JR çeliği, düşük karbonlu bir yapı çeliği olup Avrupa standartlarında (EN 10025-2) tanımlanmış bir malzemedir. İnşaat ve makine sektörlerinde yaygın olarak kullanılan bu çelik türü, özellikle iyi kaynaklanabilirliği, yeterli mukavemeti ve ekonomikliği nedeniyle tercih edilmektedir. "S" harfi "structural steel" (yapı çeliği) anlamına gelirken, "235" değeri minimum akma dayanımını (MPa cinsinden) temsil eder. "JR" ibaresi ise çarpma dayanımı testi sıcaklığını ve test yöntemini belirtir. S235JR, Avrupa normlarına göre yapı çeliği olarak sınıflandırılır. Genel olarak karbon-manganez bazlı, alaşımsız bir çeliktir. Tablo 2.1.'de verilen bu kimyasal bileşim, malzemenin kaynaklanabilirliğini artırır ve dayanım özelliklerini dengeler.

Tablo 2.1. S235JR Çeliğinin Kimyasal Bileşimi [21]

Element	Maksimum (wt %)
Karbon (C)	0,17 – 0,20
Manganez (Mn)	1,40 max
Fosfor (P)	0,035 max
Kükürt (S)	0,035 max
Azot (N)	0,012 max

Bu değerler, çeliğin yapısal uygulamalarda güvenilir bir şekilde kullanılabilceğini göstermektedir. S235JR çeliği genellikle ferrit ve perlit fazlarından oluşur. Bu mikro yapı, düşük karbon miktarı sayesinde iyi şekillendirilebilirlik ve kaynaklanabilirlik sağlar. Tablo 2.2.'de verilen S235JR çeliğinin mekanik özellikleri de; yaş, yön, kesit kalınlığı gibi parametrelere göre değişebilmekle birlikte, aşağıdaki gibidir [14].

Tablo 2.2. S235JR'nin EN 10025-2 Standardına Göre Mekanik Özellikleri [14]

Akma dayanımı (Re)	min. 235 MPa
Çekme dayanımı (Rm)	360-510 MPa
Uzama (%)	min. 26
Yoğunluk	7,85 g/cm ³

Yüzey ve taneler arası boşluklar oldukça düşüktür, bu da çeliğin yorulma dayanımını artırır. S235JR çeliği, Avrupa standardı EN 10025-2 kapsamında tanımlanan, düşük karbonlu, alaşımsız bir yapı çeliğidir. Bu çelik türü, özellikle inşaat ve genel mühendislik uygulamaları için ideal bir malzeme olarak kabul edilir. Bu tür çelikler; mukavemet, şekillendirilebilirlik, kaynaklanabilirlik ve uygun maliyet gibi özellikleri sayesinde pek çok endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır. Kimyasal bileşim açısından S235JR çeliği, karbon, manganez, fosfor ve kükürt gibi elementleri sınırlı miktarda içerir. Tipik bir kimyasal analizde karbon oranı %0,17-0,20 civarındadır. Manganez en fazla %1,40 oranında bulunabilirken, fosfor ve kükürt oranı %0,035'i geçmemelidir. Bu düşük alaşım oranları, çeliğin kolay işlenebilirliğini ve kaynaklanabilirliğini artırır. Çekme dayanımı 360-510 MPa aralığındadır. Kopma anındaki uzama oranı genellikle %20-26 arasında değişir. Ayrıca bu çelik türü +20°C'de 27 J değerinde çentik darbe dayanımı göstermektedir. Bu özellikleri sayesinde S235JR çeliği çeşitli yükler altında güvenilir bir performans sunar. Mikroyapının düzgün ve homojen olması, çeliğin mekanik davranışlarında kararlılığı artırır. Üretim süreci genellikle oksijen konvertörlerinde gerçekleştirilir. Üretilen sıvı çelik, sürekli döküm yöntemiyle slab hâline getirilir. Daha sonra sıcak haddeleme ile istenilen profilde malzeme elde edilir. Soğutma işlemleri kontrollü bir şekilde yapılarak iç gerilmeler minimize edilir. Isıl işlem açısından S235JR çeliği genellikle tavlama, normalizasyon ve gerilim giderme işlemlerine tabi tutulur. Tavlama işlemi ile çelik yumuşatılır, kaynak sonrası gerilimler azaltılır. Normalizasyon işlemi sayesinde homojen bir mikroyapı elde edilirken, gerilim giderme tavlaması, özellikle kaynak sonrası oluşan iç gerilmeleri azaltmak için yapılır. Kaynaklanabilirlik özelliği, S235JR'nin tercih edilme nedenlerinin başında gelir. Bu çelik türü, ön ısıtma gerektirmeden kaynaklanabilir. MIG, MAG, TIG ve Ark kaynağı gibi yöntemlerle başarılı bir kaynak performansı gösterir. Düşük karbon içeriği sayesinde sertleşme eğilimi düşük olup, kaynak bölgesinde çatlak riski azdır. Şekillendirilebilirlik yönüyle incelendiğinde S235JR çeliği, soğuk şekillendirme

işlemlerine uygundur. Bükme, çekme, delme, kesme ve haddeme gibi işlemlerle yüksek doğrulukta sonuçlar alınabilir. Sac, profil, boru ve yapı elemanları bu malzemeye kolaylıkla üretilir. Yüzey işlemleri bakımından genellikle yüzeyin paslanmaya karşı korunması için boyama, yağlama, fosfatlama ya da galvaniz kaplama yöntemleri kullanılır. Özellikle galvaniz kaplama, korozyon direncini büyük ölçüde artırır ve açık hava koşullarında kullanım ömrünü uzatır. Korozyon davranışı açısından S235JR çeliği, çıplak hâliyle atmosferik koşullarda zamanla oksitlenmeye karşı hassastır. Bu nedenle, uzun ömürlü kullanım amaçlanıyorsa yüzey kaplama yapılması önerilir. Galvanizleme, çinko kaplama, elektrostatik toz boyama veya epoksi kaplama gibi işlemler korozyona karşı etkili koruma sağlar. S235JR çeliği, galvaniz kaplama ile birlikte kullanıldığında çok daha dayanıklı hâle gelir. Sıcak daldırma galvanizleme, çeliğin yüzeyine erimiş çinko bağlanarak koruyucu bir tabaka oluşmasını sağlar. Bu tabaka hem fiziksel bir bariyer oluşturur hem de çeliğin elektrokimyasal olarak korunmasını sağlar. Bu kombinasyon, köprüler, bina iskeletleri, enerji iletim hatları ve otoyol korkulukları gibi uygulamalarda çok sık tercih edilir. Kullanım alanları oldukça geniştir. S235JR çeliği; bina taşıyıcı sistemleri, köprüler, makine parçaları, otomotiv parçaları, borular, vinç kolları, platformlar, kuleler ve çelik konstrüksiyon sistemlerinde yaygın olarak kullanılır. Özellikle Avrupa’da inşaat çeliği olarak standart hâline gelmiştir. Bu çeliğin avantajları arasında uygun maliyet, yüksek işlenebilirlik, yeterli mukavemet, iyi kaynaklanabilirlik ve Avrupa standartlarına uygunluk yer alır. Ancak, yüksek dayanım gerektiren uygulamalarda daha güçlü çelik kalitelerinin tercih edilmesi gerekir. S235JR çeliği, S275JR veya S355JR gibi diğer yapı çelikleri ile karşılaştırıldığında daha düşük mukavemet sunar, ancak ekonomikliği ve işlenebilirliği ile öne çıkar. Daha yüksek mekanik özelliklere ihtiyaç duyulan projelerde S355JR gibi alternatifler tercih edilebilir. Geri dönüşüm açısından da S235JR çeliği çevre dostudur. Çelik, defalarca geri dönüştürülebilen bir malzemedir ve geri dönüşüm sürecinde özelliklerini büyük ölçüde korur. Bu özelliği ile sürdürülebilir üretim hedeflerine katkı sağlar. Uygulama örneklerine bakıldığında, S235JR çeliği kullanılarak çok katlı bina iskeletleri, sanayi tesisleri, köprü sistemleri ve taşıyıcı çerçeveler başarıyla inşa edilmiştir. Ayrıca konteyner yapımı, rüzgar türbin kuleleri ve çeşitli makine elemanlarında da yaygın biçimde kullanılır. Gelecekteki araştırma alanlarında bu çelik türünün nano kaplamalarla daha yüksek korozyon dayanımı kazanması, hibrit malzemelerle birlikte kullanılması ve çevreye daha az etkili üretim tekniklerinin

geliştirilmesi hedeflenmektedir. Sonuç olarak, S235JR çeliği mühendislik uygulamalarında çok yönlü kullanımı, uygun maliyeti, işlenebilirliği ve kaynaklanabilirliği sayesinde önemli bir yapı malzemesi olmaya devam etmektedir. Gerek akademik araştırmalarda gerekse sanayi uygulamalarında bu çelik türü, hem başlangıç seviyesinde hem de ileri mühendislik tasarımlarında tercih edilen malzemeler arasında yer almaktadır. Avrupa normlarına uygun olarak yapı çeliği sınıfındadır. Kaynaklanabilirlik özelliği iyidir [14].

2.3. Çeliklerde Galvanizleme İşlemi

Galvaniz, 450-455°C'ye sahip erimiş çinkoya daldırılmış olan çelik kaplanmasıdır. Çinko, demir ile güçlü bağlar kurarak üçlü bir faz tabakası oluşturmaktadır [15]. Bilhassa paslanmaması için yapılmış olan söz konusu uygulama dış ortamda, açık hava altında tüm hava koşullarında çalışacak metallerin ömrünün uzatılmasına yönelik olarak gerçekleştirilmektedir. Galvaniz olmuş metale kromat kaplanır ise ömrü artmaktadır [15]. Galvanizleme işleminin ardından galvaniz mikron kalınlığı, malzemeye yapışma uygunluğu, deliklerdeki çapaklar, uç kısımlardaki galvaniz birikintileri, birbirine yapışan malzemeler, dros yapışması, kaplanmamış bölgeler, kül yapışması ve beyaz pas oluşumu gibi hususlara dikkat edilmelidir. Demir malzeme galvanizlenmeye elverişli olarak üretim evresinde tasarlanmak durumundadır [16]. Çinko giriş delikleriyle basınç çıkış delikleri bilhassa içi boş malzemeler için önem arz eder. Galvaniz süreci ise sırasıyla; yağ alma, durulama, asitle dağlama, fluxlama, kurutma ve daldırma olarak tanımlanabilir. Galvanizlenen kimi küçük parçalar da bulunmaktadır. Zincir galvanizi, ankraj galvanizi, profil galvanizi, sac galvanizi, saplama galvanizi vb. pek çok malzeme galvanizlenebilmektedir [17]. Galvaniz topraklama kazık ve galvaniz topraklama şeritler de topraklama hatlarında tercih edilmektedir. Genellikle galvanizlenen malzemelerin kimyevi bileşimi şöyledir; %0,25'ten az C, %0,05'ten az Fosfor, %1,35'ten az Mn ve %0,05'ten az Si. Yüksek Si ile P değerleri çoğu defa sandelin denen mat ve kalın kaplamaya yol açabilmektedir [18].

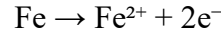
2.4. Korozyon

Korozyon, metallerin işlenmeden önce sahip oldukları doğal oksitlenmiş hâllerine geri dönüş sürecidir. Bu süreç genellikle çevrede bulunan oksitleyici ajanların, özellikle de oksijenin etkisiyle başlar ve indirgenme-yükseltgenme (redoks) tepkimeleri şeklinde gelişir. Kimi durumlarda bu olay kendiliğinden meydana gelirken, bazı durumlarda ise elektrokimyasal faktörler tarafından tetiklenebilir. Temel olarak korozyon, metalin işlevsel ve kararlı yapısını kaybederek bir anot gibi davranmaya başlaması ve bu süreçte voltaik ya da galvanik hücrelerin oluşumuna zemin hazırlaması şeklinde tanımlanabilir [19]. Korozyon, metalin çevresiyle kimyasal veya elektrokimyasal etkileşime girerek zamanla oksitlenmesi ve bu durumun sonucunda mekanik bütünlüğünü ve dayanım özelliklerini kaybetmesi olarak da ifade edilebilir. Korozyon, farklı şekillerde meydana gelebilir. Başlıca korozyon türleri; üniform, galvanik, çukurcuk ve arayüzey korozyonudur. Üniform korozyon, yüzeyin her noktasında aynı hızla ilerleyen korozyon türüdür. Galvanik korozyon, farklı metallerin elektriksel temas hâlinde olmasıyla oluşur. Çukurcuk korozyonu, yüzeyde lokal derin oyukların oluşmasıdır. Arayüzey korozyonu, kapalı alanlarda oksijen azlığıyla gelişen türdür. Korozyonu önlemek veya yavaşlatmak amacıyla geliştirilen çeşitli koruma stratejileri bulunmaktadır. Bu yöntemler katodik ve anodik koruma, metal, organik ve inorganik kaplamalardır. Katodik koruma, metal yüzeyin anot olmasını engelleyerek, daha aktif bir metal kullanımıyla redoks tepkimesi baskılanır. Anodik koruma, pasif bir tabaka oluşumunu teşvik ederek, metalin çözünmesini durdurmayı amaçlayan bir tekniktir. Metal kaplamalar yüzeyin çinko, krom, nikel gibi metallerle kaplanması, hem fiziksel bir bariyer oluşturur hem de galvanik koruma sağlar. Organik ve inorganik kaplamalar ise boyalar, epoksi reçineler, seramik esaslı kaplamalar gibi materyaller ile yüzeyin çevresel etkilere karşı korunması sağlanır. Tasarım önlemleri olarak da, su birikintilerinin oluşmasını engelleyecek geometrik düzenlemeler, havalandırmanın artırılması ve birleşim noktalarının dikkatli seçimi gibi mühendislik çözümleri de korozyonu azaltmada etkilidir. Korozyon, mühendislik malzemelerinin çevresel faktörlerle zaman içerisinde kimyasal ya da elektrokimyasal reaksiyonlara girerek bozunması sonucu, malzemenin işlevini yitirmesi sürecidir. Bu olgu çoğunlukla metalik malzemelerle ilişkilendirilmekle birlikte, seramik ve polimer gibi diğer malzeme türlerinde de benzer bozunma mekanizmaları gözlemlenebilir. En yaygın korozyon türü, demirin oksijen ve suyla etkileşerek demir

oksit (pas) oluşturmasıdır. Söz konusu süreç, yalnızca malzemenin yapısal bütünlüğünü zayıflatmakla kalmaz, aynı zamanda ciddi ekonomik kayıplara ve can güvenliği açısından riskli durumlara da neden olabilir. Özellikle altyapı sistemleri, enerji iletim hatları, ulaşım araçları ve savunma sanayisi gibi alanlarda meydana gelen korozyon vakaları, büyük çaplı arızalara ve hatta ölümcül kazalara yol açabilmektedir. Korozyonun önemi, etkilediğı sistemlerin ekonomik değeri ve güvenlik üzerindeki sonuçları ile doğrudan ilişkilidir. Yapılan uluslararası araştırmalara göre, dünya genelinde korozyon kaynaklı zararlar, ülkelerin gayrisafi millî hasıllarının yaklaşık %3 ila %5'i kadar ekonomik kayba yol açmaktadır. Bu kayıplar; sadece malzemenin yenilenmesiyle sınırlı kalmamakta, aynı zamanda bakım-onarım giderleri, üretim kesintileri, iş gücü kaybı ve güvenlik önlemleri gibi dolaylı maliyetleri de kapsamaktadır. Korozyonun etkileri; inşaat, ulaşım, enerji, sağık, denizcilik ve savunma sanayii başta olmak üzere pek çok sektörde görölmektedir. Örneğın, bir köprüde yer alan taşıyıcı çelik halatların zamanla korozyona uğraması, yapının taşıma kapasitesinin azalmasına ve nihayetinde yapısal çökme riskinin artmasına neden olabilir. Bu nedenle, korozyonun temel nedenlerinin anlaşılması, türlerinin sınıflandırılması, test yöntemlerinin incelenmesi ve etkili önleme stratejilerinin geliştirilmesi; hem malzeme biliminin hem de mühendislik uygulamalarının temel çalışma alanlarından birini oluşturmaktadır. Bu çalışmada, korozyon olgusunun bilimsel temelleriyle birlikte, çeşitli sektörlerde karşılaşılan uygulamalı örnekler de ele alınarak kapsamlı bir değerlendirme yapılması hedeflenmektedir. Böylece okuyucuya, hem teorik altyapı hem de pratik bilgiler doğrultusunda bütüncül bir perspektif sunulması amaçlanmaktadır. Benzer şekilde, petrol ve doğalgaz boru hatlarında meydana gelen iç veya dış korozyonlar, çevreye zararlı sızıntılara ve büyük kazalara yol açabilir. Korozyonun anlaşılması ve önlenmesi, yalnızca ekonomik kayıpların azaltılması açısından değil; aynı zamanda çevresel sürdürülebilirliğin sağılanması ve insan hayatının korunması bakımından da son derece önemlidir. Bu doğrultuda etkili bir korozyon yönetimi, malzeme seçimi aşamasından başlayarak tasarım, üretim, montaj ve bakım süreçlerine kadar tüm mühendislik aşamalarını kapsayan bütüncül bir yaklaşımı gerektirir. Korozyon olayları çoğunlukla elektrokimyasal nitelikte olup, elektrot potansiyelleri arasındaki farktan kaynaklanmaktadır. Bu süreçte, metal yüzeyinde anot ve katot bölgeleri meydana gelir. Anot bölgesinde metal atomları elektronlarını kaybederek iyonik hâle geçer ve ortamdan çözünerek uzaklaşır. Katot bölgesinde ise

indirgenme reaksiyonları gerçekleşir. Böylece sistemde bir elektrokimyasal hücre yapısı oluşur ve bu yapı, korozyon mekanizmasının temelini teşkil eder. Termodinamik açıdan değerlendirildiğinde, korozyon olayları Gibbs serbest enerji değişimi (ΔG) negatif olan reaksiyonlar kapsamında ele alınır; yani bu reaksiyonlar kendiliğinden gerçekleşme eğilimindedir. Örneğin demirin oksijenli ortamda paslanması süreci aşağıdaki yarı hücre reaksiyonları ile açıklanabilir [5];

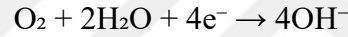
Anot reaksiyonu:



Katot reaksiyonu (asidik ortamda):



Katot reaksiyonu (nötr veya bazik ortamda):



Bu yarı reaksiyonların birleşmesiyle ortaya çıkan tam hücre reaksiyonu, sistemdeki potansiyel fark nedeniyle spontan olarak meydana gelir ve metal yüzeyinin zamanla çözünmesine neden olur. Elektrot potansiyelleri; metalin kimyasal yapısına, çevre ortamının pH düzeyine, iyon konsantrasyonuna ve sıcaklık gibi çevresel faktörlere bağlı olarak değişiklik gösterebilir. Korozyonun elektrokimyasal temellerinin derinlemesine anlaşılması; korozyon hızı tahmini, uygun inhibitörlerin seçimi, katodik koruma sistemlerinin tasarımı gibi uygulamalarda büyük rol oynamaktadır. Bu kapsamda, tafel analizleri, potansiyodinamik polarizasyon eğrileri ve elektro kimyasal empedans spektroskopisi gibi elektrokimyasal ölçüm yöntemleri, korozyon davranışının daha doğru ve hassas bir şekilde analiz edilmesini sağlamaktadır. Korozyon, malzemenin yapısal özelliklerine, bulunduğu ortamın kimyasal bileşimine ve maruz kaldığı fiziksel koşullara göre farklı türlerde ortaya çıkabilir. Bu nedenle, korozyon çeşitli kategorilere ayrılmış olup; her bir tür, kendine özgü oluşum mekanizmasına, görsel belirtilerine ve etkilerine sahiptir. Bu çeşitlilik, korozyonla mücadelede kullanılan yöntemlerin de farklılaşmasını zorunlu kılmaktadır. Korozyonun farklı türleri, meydana geliş şekilleri ve etkileri açısından çeşitlilik göstermektedir. Bu bölümde, mühendislik uygulamalarında en sık karşılaşılan korozyon türleri ayrıntılı biçimde ele alınmaktadır. Üniform (tekdüze) korozyon, bir

metal yüzeyinin tamamında veya geniş bir bölümünde eşit hızda meydana gelen ve genellikle homojen ortamlarda gözlenen bir korozyon türüdür. Bu korozyon tipi, atmosferik koşullara uzun süre maruz kalan çelik yüzeylerde sıkça görülür ve yüzeyin genelinde belirgin bir paslanma ile kendini gösterir. Üniform korozyonun öne çıkan avantajı, tahmin edilebilir olmasıdır; bu sayede malzeme kaybı belirli aralıklarla izlenebilir, bakım-onarım planlaması zamanında yapılabilir ve yapısal bütünlük korunabilir. Genellikle boyama, yüzey kaplama ya da çevresel faktörlerin kontrol altına alınması yoluyla kolaylıkla önlenir. Galvanik korozyon, elektrokimyasal potansiyelleri farklı iki metalin doğrudan temas etmesi ve bu temasın iletken bir elektrolit ortamda gerçekleşmesi sonucunda ortaya çıkar. Bu durumda, elektro kimyasal açıdan daha aktif olan metal anot görevi görerek çözünürken, daha soylu olan metal katot olarak kalır ve korozyondan korunur. Örneğin, nemli bir ortamda birbiriyle temas hâlindeki çelik ve alüminyum, galvanik korozyon riski taşır. Alüminyum, çeliğe göre daha aktif bir metal olduğundan anot olarak davranır ve korozyona uğrayan taraf olur. Bu tür korozyon; denizcilik, havacılık ve otomotiv gibi çok sayıda sektörde ciddi yapısal problemlere yol açabilmektedir. Galvanik korozyonu önlemek amacıyla çeşitli stratejiler geliştirilmektedir. Bunlar arasında, elektrokimyasal olarak benzer potansiyele sahip metallerin birlikte kullanılması, farklı metallerin birbirinden yalıtılması amacıyla araya yalıtkan malzemelerin yerleştirilmesi, ya da sistemde galvanik anot olarak davranacak bir fedakâr metalin bilinçli biçimde kullanılması yer almaktadır. Bir diğer yaygın korozyon türü olan çukurcuk (pitting) korozyonu, metal yüzeyinde yerel olarak gelişen küçük, ancak derin oyuklarla karakterizedir. Bu tür korozyon, genellikle paslanmaz çelikler ve alüminyum alaşımlarında gözlenir. Oluşumu, metal yüzeyinde koruyucu pasif tabakanın belirli bölgelerde lokal olarak bozulmasıyla başlar. Özellikle klorür iyonları gibi agresif iyonlar, bu pasif tabakanın bütünlüğünü zayıflatarak çukurcuk oluşumuna neden olabilir. Görsel olarak fark edilmesi güç olan bu oyuklar, zamanla malzemenin iç kısmında ciddi boşluklar oluşturabilir. Bu nedenle, çukurcuk korozyonu genellikle geç fark edilir ve malzeme aniden kırılarak beklenmedik yapısal hasarlara yol açabilir. Bu özelliği nedeniyle, mühendislik sistemleri için büyük bir tehdit oluşturur. İlgili korozyon türlerinin tanımlanması, oluşum mekanizmalarının anlaşılması ve uygun önlemlerin belirlenmesi, mühendislik tasarımlarında güvenlik ve dayanıklılık açısından büyük önem taşımaktadır. Korozyon, çeşitli fiziksel ve kimyasal etkenlerin

bir araya gelmesiyle farklı türlerde ortaya çıkabilmektedir. Bu bölümde, mühendislik uygulamalarında sıkça karşılaşılan bazı yerel (lokalize) korozyon türleri ayrıntılı olarak incelenmektedir. Aralık korozyonu, metal yüzeylerinin dar ve kapalı bölgelerinde, örneğin cıvata bağlantılarında, conta altlarında ya da metal-metal temas noktalarında gelişen lokalize bir korozyon biçimidir. Bu tür bölgelerde, ortamla tam temasın sağlanamaması nedeniyle oksijen difüzyonu sınırlanır. Oksijenin tükenmesi, elektrokimyasal hücre yapısında lokal potansiyel farklarının oluşmasına neden olur ve bu da korozyon sürecini başlatır. Özellikle klorür iyonlarının bu alanlarda birikmesi, aralık korozyonunun şiddetini artırmaktadır. Görünür bir belirti vermeden ilerleyen bu korozyon türü, genellikle içten içe malzeme kaybına yol açar ve yapısal bütünlüğü tehdit edebilir. Aralık korozyonunu önlemek amacıyla, tasarım sürecinde dar boşlukların minimize edilmesi, bağlantı bölgelerinin düzenli olarak temizlenmesi, conta ve sızdırmazlık elemanlarının uygun şekilde yerleştirilmesi ile yüzeylerin koruyucu kaplamalarla güçlendirilmesi önerilmektedir. Taneler arası korozyon (intergranular corrosion), metallerin tane sınırlarında meydana gelen, özellikle paslanmaz çeliklerde sıkça karşılaşılan bir bozulma türüdür. Bu tür korozyonun temel nedeni, yüksek sıcaklık etkisiyle karbon atomlarının krom ile birleşerek krom karbür (Cr_{23}C_6) oluşturmalarıdır. Bu birleşme, tane sınırlarında krom konsantrasyonunun azalmasına ve dolayısıyla o bölgelerde pasif film oluşumunun engellenmesine yol açar. Sonuç olarak, tane sınırları korozyona karşı savunmasız hale gelir. Özellikle kaynak işlemlerinin uygulandığı bölgelerde bu tür korozyonun oluşma riski artar ve yapıların mekanik dayanımı ciddi şekilde zayıflayabilir. Taneler arası korozyonun önlenmesi amacıyla, düşük karbon içerikli paslanmaz çeliklerin tercih edilmesi, stabilizasyon işlemleri ile Ti veya Nb elementlerinin alaşıma ilave edilmesi ve uygun ısıtım işlemlerinin uygulanması önerilmektedir. Gerilim korozyonu çatlaması, bir metal malzemenin aynı anda hem çekme gerilmesine maruz kalması hem de korozyona neden olabilecek bir kimyasal ortamda bulunması sonucu ortaya çıkan çatlama türüdür. Bu tür korozyon, malzeme yüzeyinde başlangıçta mikroskobik boyutlarda oluşan çatlakların zamanla ilerlemesiyle, çoğu zaman gözle fark edilemeden, ani ve kırılğan kırılmalara neden olabilir. Gerilim korozyonu özellikle nükleer santrallerde kullanılan reaktör ekipmanları, uçak gövdeleri, yüksek basınçlı boru sistemleri ve kimyasal proses tankları gibi yapısal güvenliğin kritik olduğu sistemlerde ciddi riskler taşır. Bu tür korozyona karşı alınabilecek önlemler arasında, uygun malzeme seçimi,

gerilme azaltıcı ısıtma işlemlerinin uygulanması, kimyasal ortamdaki agresif türlerin sınırlandırılması ve koruyucu kaplamaların kullanılması yer almaktadır. Bu korozyon türlerinin doğru şekilde tanımlanması ve mekanizmalarının anlaşılması, hem önleyici mühendislik uygulamaları hem de yapı güvenliği açısından büyük önem taşımaktadır. Gerilim korozyonu çatlamasının oluşumunda etkili olan temel faktörler arasında; metalin mikro yapısal özellikleri, uygulanan çekme geriliminin büyüklüğü, ortamın kimyasal bileşimi sıcaklık ve pH gibi çevresel değişkenler yer almaktadır [5]. Bu tür korozyonu önlemek için, tasarım aşamasında gerilim birikimlerinin azaltılması, uygun ısıtma işlemleri ile artık gerilimlerin giderilmesi ve malzemenin yalnızca uygun kimyasal ortamlarda kullanılması büyük önem taşımaktadır. Mikrobiyal korozyon, metalik yüzeylerde çeşitli mikroorganizmaların doğrudan ya da dolaylı etkisiyle gelişen bir bozulma türüdür. Bu mikroorganizmalar arasında bakteriler, algler ve mantarlar yer alabilmektedir. Özellikle sülfat indirgen bakteriler (SRB - sulfate reducing bacteria), mikrobiyal korozyonun en yaygın sebeplerindendir. Bu bakteriler, metal yüzeylerinde biyofilm adı verilen ince mikrobiyal tabakalar oluşturarak burada çeşitli biyokimyasal reaksiyonlar gerçekleştirirler. Bu süreçte açığa çıkan hidrojen sülfür gibi agresif bileşikler, özellikle karbon çeliklerde lokal korozyonun oluşmasına neden olur. Ayrıca biyofilmler, oksijenin yüzeye ulaşmasını engelleyerek diferansiyel aerasyon hücrelerinin gelişmesine ve buna bağlı olarak yerel korozyon hücrelerinin oluşmasına zemin hazırlar. Mikrobiyal korozyonu önlemek amacıyla; boru hatları ve tank gibi sistem bileşenlerinin düzenli olarak temizlenmesi, biyositlerin kullanımı, ortam pH'nın ve sıcaklığının kontrol altında tutulması ve biyolojik etkilenmeye dirençli alaşımların tercih edilmesi gerekmektedir. Korozyonun anlaşılması ve önlenmesi için öncelikli adım, bu sürecin hızının doğru ve güvenilir biçimde ölçülmesidir. Korozyon hızı, genellikle metalin kaybettiği kütle miktarı, yüzey alanı ve korozyona maruz kaldığı süre dikkate alınarak hesaplanır. Korozyon hızının hesabı şu şekildedir [5]:

$$CR=87.6 \times \Delta m / \rho \times A \times t \quad (2.1)$$

Denklem (2.1)'de; "CR" korozyon hızını, "Δm" kütle kaybını, "ρ" yoğunluğu, "A" yüzey alanı, t ise süreyi ifade etmiştir. Bununla birlikte, günümüzde daha hassas sonuçlar sağlayan elektrokimyasal ölçüm yöntemleri yaygın biçimde kullanılmaktadır. Tafel ekstrapolasyon yönteminde anot ve katot bölgelerine ait logaritmik akım-gerilim

(potansiyel) eğrilerinin analiz edilmesiyle korozyon potansiyeli (Ecorr) ve korozyon akımı (Icorr) değerlerinin belirlenmesini sağlar. Bu parametreler, korozyon hızının kantitatif olarak hesaplanmasında temel alınır. Elektrokimyasal empedans spektroskopisi tekniği, farklı frekans aralıklarında sistemin empedans değerlerini ölçerek, korozyon mekanizmalarının anlaşılmasına katkı sağlar. Özellikle ince kaplama sistemlerinin korozyon direncini değerlendirmede tercih edilmektedir. Tuz püskürtme testi, ASTM B117 standardına göre uygulanan bu testte, malzeme ya da kaplama numuneleri tuzlu ortama maruz bırakılır. Böylece, özellikle boya ve galvaniz kaplamaların korozyon dayanımları görsel ve kantitatif olarak değerlendirilebilir. Aşındırma testleri, numunenin korozyona uğramadan önce ve sonra ağırlığı ölçülerek malzeme kaybı hesaplanır. Üniorm korozyonun belirlenmesinde oldukça etkili bir yöntemdir. Bu test yöntemleri, farklı çevresel koşullarda ve çeşitli malzeme türlerinde korozyon davranışının daha doğru analiz edilmesine olanak tanımaktadır. Özellikle endüstriyel uygulamalarda, tasarım ve malzeme seçim aşamalarından önce bu testlerin yapılması, sistem performansının ve güvenliğinin artırılması açısından son derece önemlidir. Korozyon, metalik malzemelerin mekanik, fiziksel ve kimyasal özellikleri üzerinde doğrudan etkili olan bir bozulma sürecidir. Bu etkiler, yalnızca malzemenin dayanımını değil, aynı zamanda kullanım ömrünü ve sistemin genel güvenliğini de önemli ölçüde azaltır. Mukavemetin azalmasında korozyon malzemenin kesit alanını zamanla azaltarak taşıma kapasitesinin düşmesine yol açar. Özellikle çukurcuk korozyonu ve aralık korozyonu gibi lokalize korozyon türlerinde bu durum, çatlakların hızla ilerlemesiyle birlikte ani kırılmalarla sonuçlanabilir. Bu tür hasarlar, yapısal bütünlüğün beklenmedik şekilde kaybına neden olabilir. Toklukta düşüş, Korozyon nedeniyle oluşan çatlaklar ve bu çatlakların ilerlemesi, malzemenin darbe dayanımını olumsuz yönde etkiler. Tokluktaki bu azalma, özellikle düşük sıcaklıkta çalışan sistemlerde ciddi güvenlik sorunları doğurabilir. Yüzey bozulmaları, korozyon ürünleri genellikle gözenekli, gevşek yapılı ve mekanik olarak zayıf bileşiklerden oluşur. Bu bileşikler, malzeme yüzeyinde hem estetik hem de işlevsel bozulmalara neden olur. Özellikle yüzey pürüzsüzlüğünün kritik olduğu hassas uygulamalarda, bu bozulmalar işlev kaybına yol açabilir. Elektriksel iletkenliğin azalması, alüminyum ve bakır gibi yüksek iletkenliğe sahip metallerde meydana gelen oksit tabakaları, yüzeyin elektriksel iletim kabiliyetini azaltır. Bu durum, özellikle elektronik ve enerji iletim sistemlerinde ciddi performans kayıplarına neden olabilir. Korozyonun endüstriyel

sektörlerdeki etkilerine değinmek gerekirse, uçak, gemi, tren ve kara taşıtlarında kullanılan metal yapılar; atmosferik, denizel ve endüstriyel ortamlara sürekli olarak maruz kalmaktadır. Bu ortamlarda meydana gelen korozyon, taşıma güvenliğini, yakıt verimliliğini ve taşıtın ekonomik ömrünü doğrudan etkiler. Özellikle uçak gövdelerinde ortaya çıkan gerilim korozyonu, yapısal bütünlüğü tehlikeye atarak uçuş güvenliği açısından büyük risk oluşturmaktadır. Enerji sektörü, türbinler, boru hatları, ısı değıştirciler ve nükleer reaktör bileşenleri gibi enerji üretiminde kullanılan sistemler, yüksek sıcaklık, basınç ve korozyif kimyasal ortamlarda çalışmaktadır. Bu ortamlarda oluşan korozyon; ekipman arızalarına, üretim duruşlarına ve enerji verimliliğinde kayıplara neden olabilir. Özellikle petrokimya ve rafineri tesislerinde boru hatlarında meydana gelen mikrobiyal korozyon, yalnızca ekonomik zararlar değil, aynı zamanda çevresel felaketler de doğurabilmektedir. İnşaat ve altyapı sektörü, betonarme yapıların içinde yer alan donatı çeliklerinde gelişen korozyon, yapıların hizmet ömrünü önemli ölçüde kısaltmakta ve deprem gibi dış yükler karşısında dayanımın düşmesine neden olmaktadır. Ayrıca köprü, viyadük, tünel gibi altyapı sistemlerinde oluşan korozyon, hem yüksek onarım maliyetlerine hem de can ve mal kayıplarına yol açabilecek yapısal çöküşleri beraberinde getirebilir. Yer altı boru sistemlerinde görülen korozyon ise, içme suyu kalitesinin bozulmasına neden olarak halk sağlığını tehdit edebilir. NACE International tarafından yayımlanan analizlere göre, sistematik ve etkin şekilde uygulanan korozyon yönetim programları, toplam korozyon kaynaklı ekonomik kayıpların yaklaşık %20 ila %30 oranında azaltılmasını mümkün kılmaktadır. Bu bulgu, yalnızca teknik tedbirlerin değil; aynı zamanda yönetimsel planlama, organizasyonel yapılandırma ve personel eğitimi gibi yönetsel unsurların da bu süreçte kritik rol oynadığını açıkça ortaya koymaktadır. Her ne kadar korozyon doğada kendiliğinden gelişen ve tamamen önlenmesi mümkün olmayan bir süreç olsa da, etkileri çeşitli yöntemlerle büyük ölçüde sınırlandırılabilir. Günümüzde hem mühendislik uygulamalarında hem de endüstriyel sistem tasarımlarında, malzeme ömrünü uzatmak, işletme güvenliğini artırmak ve bakım maliyetlerini azaltmak amacıyla çok çeşitli koruma stratejileri uygulanmaktadır. Bu stratejiler, çalışma ortamının düzenlenmesinden başlayarak yüzey kaplama yöntemlerine, katodik koruma uygulamalarından uygun alaşım seçimine kadar oldukça geniş bir teknik ve operasyonel alanı kapsamaktadır. Korozyona karşı alınabilecek en etkili önleyici adımlardan biri, sistem tasarımı aşamasında doğru

malzeme seçiminin yapılmasıdır. Özellikle yüksek nem, sıcaklık, asidite veya tuzluluk gibi agresif çevre koşullarında çalışacak sistem bileşenlerinde, bu koşullara uygun yüksek dayanımlı malzemelerin kullanılması önem taşır. Örneğin, paslanmaz çelikler içerdiği en az %10,5 oranında krom elementi sayesinde yüzeyinde kendiliğinden oluşan pasif bir oksit film tabakası ile korozyona karşı yüksek direnç gösterir. Bu pasif film, metal yüzeyini koruyarak birçok ortamda uzun süreli dayanıklılık sağlar. Asidik ortamlarda veya yüksek sıcaklıklarda çalışan sistemlerde ise nikel ve titanyum bazlı alaşımlar tercih edilmekte olup, bu malzemeler söz konusu koşullarda olağanüstü korozyon direnci sergilerler. Bazı uygulamalarda, metalik malzemelere alternatif olarak plastik ve kompozit malzemeler de kullanılabilir. Özellikle kimyasal madde depolama tanklarında, boru hatlarında ve sıvı taşıma sistemlerinde bu tür malzemeler, hafiflikleri ve kimyasal kararlılıkları nedeniyle tercih edilmektedir. Bunun yanı sıra, düşük karbon içeriğine sahip çeliklerin uygun alaşım elementleriyle zenginleştirilmesi yoluyla, özellikle taneler arası korozyon gibi özel bozulma mekanizmalarına karşı da etkin bir koruma sağlanabilir. Örneğin, Ti veya Nb gibi stabilizan elementlerin ilavesiyle krom karbür çökmesinin önüne geçilerek tane sınırlarındaki krom eksikliği engellenebilir. Böylece, kaynak bölgeleri gibi ısı etkil alanlarda oluşabilecek korozyon riski minimuma indirilmiş olur. Korozyon, büyük ölçüde ortam koşullarına bağlı bir süreç olduğundan, çevresel etmenlerin fiziksel ve kimyasal özelliklerinin denetim altına alınması, korozyona karşı etkili bir koruma yöntemi olarak değerlendirilmektedir. Bu kapsamda uygulanan başlıca stratejiler vardır. Bunlar öncelikle, ortamın nem düzeyinin kontrolü büyük önem taşır. Özellikle atmosferik koşullarda gerçekleşen korozyonun önlenmesi için depolama ve kullanım alanlarında nem seviyesinin düşürülmesi gerekmektedir. Bu tür uygulamalar, metal yüzeylerde nemin yoğunlaşmasını engelleyerek oksijenle olan etkileşimi azaltır. Bunun yanı sıra, ortamın asitlik ya da bazlık derecesini belirleyen pH düzeyinin düzenlenmesi de yaygın bir koruma yöntemidir. Asidik koşullarda metalin daha hızlı çözünmediği göz önünde bulundurularak, sistemde pH'ın artırılması ya da tamponlanması yoluyla korozyon hızı düşürülebilir. Ayrıca, ortamdaki çözünmüş oksijen miktarının azaltılması da oksijen kaynaklı korozyon mekanizmalarının engellenmesi açısından etkilidir. Bu amaçla, gaz giderici kimyasallar kullanılarak sistemdeki çözünmüş oksijen uzaklaştırılır ve böylece metallerin oksijenle tepkimeye girmesi önlenmiş olur. Bir diğer yaygın yöntem, korozyon inhibitörlerinin

kullanımıdır. Bu kimyasal maddeler, metal yüzeylere adsorplanarak ince bir koruyucu tabaka oluşturur ve yüzeyin çevresel ajanlarla doğrudan temasını engeller. Özellikle kapalı çevrimli soğutma sistemlerinde inhibitörler yaygın biçimde kullanılmaktadır. Katodik koruma ise metal yapıların korozyona karşı korunmasında sık başvurulan elektro-kimyasal bir yöntemdir. Bu yöntemde, korunacak yapı dışarıdan verilen bir doğru akım yardımıyla ya da galvanik anot kullanılarak katot haline getirilir. Galvanik anot tekniğinde, daha aktif (anodik) özellik gösteren bir metal, korunacak yapıya bağlanır. Bu durumda, anot metal zamanla çözünürken, esas metal pasif durumda kalarak korozyona karşı korunur. Genellikle çinko, magnezyum ve alüminyum gibi metaller galvanik anot olarak tercih edilmektedir [5]. Dış akım katodik koruma yönteminde, yapıya harici bir doğru akım kaynağı bağlanarak yapı katot haline getirilir ve bu sayede korozyon süreci engellenir. Bu yöntem, özellikle büyük çaplı boru hatları, deniz yapıları ve yer altı tankları gibi geniş yüzey alanına sahip sistemlerde yaygın olarak uygulanmaktadır. Anodik koruma ise belirli metal alaşımlarında, yüzeyin kontrollü bir şekilde pasif hale getirilmesi amacıyla tercih edilir. Bu yöntem, genellikle dar kapsamlı ve özel mühendislik uygulamalarında kullanılmaktadır. Metal yüzeylerin çevresel etkenlerle temasını kesmek, en yaygın ve ekonomik korozyon önleme stratejileri arasında yer almaktadır. Bu amaç doğrultusunda başvurulan yöntemler temel olarak iki ana grupta toplanabilir [5]. Organik kaplamalar; boya, vernik ve epoksi esaslı malzemeler ile metal yüzeyde fiziksel bir bariyer oluşturularak, nem, oksijen ve iyonların yüzeye ulaşması engellenir. Böylece metalin çevreyle doğrudan etkileşimi sınırlandırılmış olur. İnorganik kaplamalar ise fosfatlama, kromatlama ve seramik esaslı uygulamalar gibi yüzeyi kimyasal olarak stabilize eden işlemleri kapsar [5]. Bu tür kaplamalar, yüzeyin korozyona karşı direncini artırmak amacıyla tercih edilmektedir. Metal kaplama yöntemleri arasında yer alan galvanizleme, demir ve çelik yüzeylerin çinko ile kaplanması işlemidir. Bu yöntem, hem fiziksel bir koruyucu tabaka oluşturarak çevresel etkilere karşı yüzeyi izole eder hem de galvanik anot etkisiyle çinkonun önce çözünmesini sağlayarak katodun korunmasına yardımcı olur. Elektro kaplama (elektro galvaniz) yöntemi ise, metal yüzeylerin elektroliz yoluyla başka bir metal ile kaplanmasını ifade eder. Fiziksel ve kimyasal buhar biriktirme yöntemleri (PVD/CVD) ise yüksek performans gerektiren uygulamalarda tercih edilen kaplama tekniklerindendir. Korozyonun önlenmesinde sadece malzeme seçimi ve kaplama yöntemleri değil, aynı zamanda uygun tasarım

prensipleri de önemli rol oynamaktadır. Sıvı birikimini önlemek amacıyla parçaların eğimli olarak tasarlanması, sıvıların yüzeyde tutunmadan akmasına olanak sağlar. Boşluklardan kaçınılması, özellikle conta, cıvata ve kaynak altı bölgelerde oluşabilecek aralık korozyonunu engellemek açısından gereklidir. Tasarımın bakım ve denetim işlemlerine olanak verecek şekilde yapılması, uzun vadeli koruma açısından önem taşımaktadır. Farklı metallerin bir arada kullanıldığı sistemlerde, galvanik korozyon riskini azaltmak amacıyla uygun yalıtım malzemeleriyle izolasyon sağlanmalıdır. Korozyon kontrolünde teknik yöntemlerin yanı sıra, personel eğitimi ve düzenli bakım programlarının uygulanması da büyük önem arz etmektedir. Bakım personelinin korozyon türlerini tanıması, erken teşhis koyabilmesi ve uygun müdahalelerde bulunabilmesi, sistemlerin hizmet ömrünü uzatmada etkili bir faktördür. Dijital korozyon izleme sistemleri ve sensör teknolojileri sayesinde, büyük ölçekli altyapı projelerinde anlık veri toplanabilmekte ve hızlı karar alma süreçleri desteklenmektedir. Geleneksel koruma yöntemlerine ek olarak, ileri malzeme bilimi, yapay zekâ, sensör sistemleri ve nanoteknoloji gibi alanlardaki gelişmeler sayesinde daha etkili, uzun ömürlü ve çevre dostu çözümler geliştirilmektedir [20]. Bu kapsamda geliştirilen “akıllı kaplamalar”, yalnızca fiziksel bir koruma sağlamanın ötesinde, çevresel değişimleri algılayarak tepkisel özellikler gösterebilmektedir. Bu kaplamalar, kendi kendini iyileştiren yapılara, mikro kapsüller içinde yer alan inhibitörlerin hasar durumunda salınmasına veya pH ve iyon değişimlerine duyarlılıkla koruyucu maddelerin serbest bırakılmasına olanak tanır. Ayrıca, bazı akıllı kaplamalar korozyon başladığında renk değiştirerek görsel uyarı sağlayabilir. Söz konusu teknolojiler; ulaşım, savunma sanayi ve nükleer enerji gibi güvenliğin kritik olduğu sektörlerde önemli potansiyele sahiptir. Özellikle nanomalzemeler, yüksek yüzey alanı ve atomik düzeyde etkileşim özellikleri sayesinde korozyon korumasında yenilikçi çözümler sunmaktadır. Nano teknolojilere dayalı malzemeler, korozyona karşı yüksek performanslı çözümler sunmaktadır [20]. Nano kaplamalar, yüzeye uygulanan ince nanokompozit filmler aracılığıyla gözeneksiz ve yüksek aderanslı bir koruma sağlar. Grafen, karbon nanotüp ve silika gibi nano katkılarla geliştirilen boyalar, bariyer özelliklerini önemli ölçüde artırır. Fonksiyonel yüzey modifikasyonları ile yüzeyler atomik düzeyde yeniden yapılandırılarak su tutmayan, kir itici ve düşük iletkenliğe sahip özellikler kazandırılabilir. Yapay zekâ uygulamaları ise, özellikle büyük veri gerektiren korozyon testleri ve ömür tahminlerinde önemli rol oynamaktadır.

Geliştirilen makine öğrenimi modelleri; korozyonun başlangıç zamanı, ilerleme hızı, uygun malzeme ve kaplama seçimi gibi konularda analiz ve erken uyarı imkânı sağlar. Bu sayede bakım süreçleri optimize edilir. Doğadan ilham alınarak geliştirilen yüzey teknolojileri de yeni nesil çözümler arasında yer almaktadır. Örneğin, lotus etkisi olarak bilinen, su ve kir tutmayan yaprak yüzeylerinden esinlenen kaplamalar, nemin uzaklaştırılmasına katkı sağlar. İstiridye ve deniz kestanesi gibi deniz canlılarının dayanıklı kabuk yapıları da korozyon dirençli sistemlerin geliştirilmesinde model alınmaktadır. Geleneksel kaplama ve inhibitörlerin çevreye zarar verme potansiyeli, sürdürülebilir çözümlerin önemini artırmıştır. Bu kapsamda, biyo-bazlı kaplamalar, bitki özü katkılı boyalar, yeşil inhibitörler ve geri dönüştürülebilir kaplama malzemeleri ön plana çıkmaktadır. Bu tür çevre dostu sistemler, karbon ayak izinin azaltılmasına da katkı sağlamaktadır. Gelişmiş sensör teknolojileriyle donatılmış sistemler; boru hatları, tanklar ve gemi gövdelerinde nem, sıcaklık, pH ve iyon yoğunluğu gibi parametreleri izleyerek gerçek zamanlı korozyon takibi yapılmasına imkân tanır. Potansiyel farklarını analiz eden bu sistemler, olası riskleri önceden belirleyip uyarı sinyali göndererek plansız duruşların önüne geçer ve operasyonel sürekliliği destekler. Korozyon, metallerde zamanla ilerleyen bir bozunma süreci olup teknik, ekonomik ve çevresel açıdan ciddi sonuçlara yol açmaktadır. Çelik, alüminyum, nikel alaşımları ve bakır gibi birçok malzeme; atmosferik, denizel, kimyasal ya da biyolojik ortamlarda çeşitli korozyon türlerine maruz kalarak işlevselliğini yitirebilmektedir. Bu nedenle, korozyonun nedenleri, mekanizmaları ve etkilerinin anlaşılması; sürdürülebilir mühendislik çözümleri için büyük önem taşımaktadır [20]. Bu çalışmada; korozyonun tanımı, sınıflandırılması, oluşum mekanizmaları, etkileyen faktörleri ile malzemeler ve endüstriyel sistemler üzerindeki etkileri detaylı biçimde ele alınmıştır. Ayrıca, geleneksel koruma yöntemlerinin yanı sıra, gelecekte önem kazanması beklenen ileri teknolojiler de kapsamlı olarak incelenmiştir. Korozyon tamamen önlenemese de uygun malzeme seçimi, yüzey kaplama teknikleri, ortam kontrolü ve doğru tasarım yaklaşımları ile süreci yavaşlatmak ve kontrol altına almak mümkündür. Endüstriyel sistemlerin uzun ömürlü ve güvenli çalışabilmesi için düzenli bakım, izleme ve koruma stratejileri büyük önem taşımaktadır. Özellikle enerji, ulaştırma ve altyapı sektörlerinde korozyon izleme sistemlerinin entegrasyonu, operasyonel güvenliği artırmaktadır. Gelişen teknolojiler, korozyon mühendisliğinde yeni bir dönemi başlatmakta; akıllı kaplamalar,

nanomalzemeler, yapay zekâ tabanlı sistemler ve çevre dostu çözümler, geleceğin koruma stratejilerinin temelini oluşturmaktadır. Bu bağlamda akademi, sanayi ve mühendislik camiası arasında koordineli bir iletişim kurulmalıdır. Ancak bu sayede mevcut yapılar korunabilir, gelecekte ise daha dayanıklı ve sürdürülebilir sistemler inşa edilebilir. Atmosferdeki yükseltgeyici gazlar varlığını sürdürdükçe korozyon, metal yüzeyler için kaçınılmaz bir sonuç olmaya devam edecektir. Metal ya da kaplama yapılabilen tüm malzemeler genellikle iki temel amaca hizmet eder: İlki; renk, parlaklık ve desen gibi estetik kaygılar taşıyan dekoratif kaplamalardır ve sınırlı korozyon dayanımına sahiptir. İkincisi ise, fonksiyonel kaplamalardır ve korozyonla mücadelede temel savunma görevini üstlenir. Galvanizleme, krom kaplama ve fosfatlama gibi yüzey işlemleri, uzun süre dayanım sağlayabilecek sistemlerin geliştirilmesine olanak tanımaktadır [20].

2.5. Galvanizlemenin Tarihçesi

Galvanizleme yöntemine dair ilk kayıtlar 18. yüzyıla dayanmaktadır. 1742 yılında Fransız kimyager P.J. Malouin, Fransız Kraliyet Akademisi'ne sunduğu çalışmada demir yüzeylerin erimiş çinko ile kaplanmasını içeren bir yöntemden söz etmiştir. Yaklaşık 30 yıl sonra, Luigi Galvani metaller arasındaki elektrokimyasal reaksiyonları inceleyerek galvanik süreçlere dair önemli bulgular elde etmiş ve bu süreç, daha sonra “galvanizleme” adını almıştır. 1829'da Michael Faraday, tuzlu su içinde yer alan demir çivilerin yanına çinko yerleştirildiğinde çinkonun çözünüp demirin korunmasını sağladığını gözlemlemiş ve bu durumun çinkonun galvanik anot görevi görmesiyle açıklanabileceğini ortaya koymuştur. 1836 yılında ise Fransız mühendis Stanislas Sorel, sıcak daldırma galvaniz sürecini geliştirerek bu tekniğin endüstriyel uygulanabilirliğini artırmıştır. 1850'lere gelindiğinde, İngiltere'de galvanizleme sanayisi yıllık 10.000 ton çinko kullanarak çeliği koruma amacıyla yaygınlaşmıştır. 1870 yılında Amerika Birleşik Devletleri'nde ilk galvanizleme tesisi kurulmuş ve bu yöntem, demir ve çeliğin kullanıldığı tüm sanayi alanlarında koruyucu bir çözüm olarak benimsenmiştir. Galvanizleme yöntemi, yüksek korozyon direnci sayesinde özellikle atmosferik koşullarda uzun ömürlü bir koruma sağlar. Çinko, çeliğe göre daha anodiktir ve bu nedenle önce kendisi korozyona uğrayarak çeliği korur (katodik koruma). Zn-Fe alaşımlı kaplamalar, mekanik aşınmaya karşı dayanıklıdır [20]. Ayrıca galvanizleme,

özel alaşımlı çeliklerin kullanımına göre daha ekonomik bir alternatiftir. Bu yöntem, düşük ilk yatırım maliyeti ve uzun vadede sağladığı tasarruflarla işletmeler açısından büyük avantajlar sunar. Uzun servis ömrü sayesinde yapı ve ekipmanların bakım aralıkları uzar, bu da hem bakım maliyetlerini azaltır hem de iş gücü kayıplarını en aza indirir. Aynı zamanda, daha az bakım ihtiyacı doğal kaynak kullanımını düşürerek çevresel etkilerin azaltılmasına da katkı sağlar. Sıcak daldırma galvaniz yöntemi, bugün inşaat, enerji, ulaşım ve tarım gibi birçok sektörde yaygın olarak kullanılmakta ve yüksek dayanım performansı ile tercih edilmektedir. Genişleyen uygulama alanları ve pratik uygulanabilirliği sayesinde, sıcak daldırma galvanizleme teknolojisi önemini her geçen gün artırarak sürdürmektedir.

2.6. Sıcak Daldırma Galvanizleme

Galvanizleme, demir ve çeliği çinko kaplama uygulayarak paslanmaz hale getirmeyi amaçlayan bir prosestir. Demir ve çeliği çinko kaplamada en yaygın olarak kullanılan prosesler; sıcak daldırma galvanizleme, elektro galvanizleme ve sprey olarak çinko kaplama uygulamalarıdır. Bu üçü arasında en popüler olanı sıcak daldırma galvanizleme işlemidir. 870 °F derecedeki erimiş haldeki çinkoya kaplanacak olan malzemeler batırılır ve malzeme metalürjik olarak çinko ya da çinko demir alaşımı olarak kaplanır [21]. Galvanizleme işlemi, 450–455 °C sıcaklıktaki erimiş çinko banyosuna daldırma ile gerçekleştirilmiştir. Numuneler, çinko banyosuna 60, 90 ve 120 saniye sürelerle batırılarak farklı kaplama kalınlıkları elde edilmiştir. İşlem sonrası numuneler hava ortamında soğutulmuştur. Kaplama işlemi süresince; çinko banyosu %98 saflıkta çinko içermektedir. Banyo sıcaklığı sürekli olarak termokupl ile kontrol edilmiştir. Numuneler galvanizleme sonrası yüzeydeki çinko artıklarının giderilmesi için süzöldükten sonra askıda soğutulmuştur.

2.6.1. Sıcak Daldırma Galvanizleme Bağlantı Elemanları

Bağlantı elemanlarının üretiminde en önemli tasarım kararlarından biri, bu parçaların nasıl korunacağına yönelik tercihtir. Çünkü bu elemanlarda meydana gelen korozyon, tüm yapının güvenliğini riske atabilir. Sıcak daldırma galvaniz yöntemi, bağlantı elemanlarını korozyona karşı uzun süre koruyan, dayanıklı ve bakım gerektirmeyen bir

özüm sunarak sıklıkla tercih edilmektedir. Bu işlemle kaplanmış elemanlar, ister açık hava koşullarında ister deniz ortamında olsun, yüksek direnç göstererek üstün korozyon koruması sağlar. Eğer demir ya da elik yüzeyler herhangi bir pasivasyon işlemine tabi tutulmadan bırakılırsa zamanla korozyon baş gösterir; bu süreç önce siyah lekelerle, ardından beyaz pasla ve son olarak da kırmızı pasla kendini belli eder. İnce inko kaplamalar, yüzeyde koruyucu bir tabaka oluşturarak etkili ve ekonomik bir korozyon önleme yöntemi sunar. Sıcak daldırma galvanizleme ile elde edilen çinko katmanı, hem fiziksel hem de katodik bir bariyer işlevi görerek altındaki çeliği korur. Galvaniz işlemi esas olarak demir ve elik yüzeylerde uygulanır. Saf inko; otomotiv parçaları, elektrikli ekipmanlar ve çeşitli makine bileşenlerinde değerlendirilirken, çinko klorür ise kaynak işlemleri, halı üretimi, piller, petrol arıtımı, dolgu maddeleri ve kozmetik ürünlerinde yer almaktadır. Galvanizleme gibi yüksek sıcaklıklı işlemlerde çinko oksit buharları ve tozları ortaya çıkabilir. Bu maddelere maruz kalan çalışanlarda “metal dumanı ateş” olarak bilinen, ateş, baş ağrısı, öksürük ve halsizlik gibi geçici rahatsızlıklar oluşabilir. Ayrıca, inko klorüre yoğun maruz kalma; cilt ve gözlerde yanıklara, solunum sisteminde ise ciddi hasarlara yol açabilir. Kurşun, kolay şekillendirilebilen ve yoğun yapıya sahip bir metaldir. Akü, pil, boya, lastik, cam ve seramik sektörlerinde yaygın olarak kullanılmakta olup, galvaniz banyolarında kaplama akışkanlığını artırmak ve tortu oluşumunu azaltmak amacıyla düşük oranlarda ilave edilir. Ancak kurşun ve bileşikleri, solunum ya da sindirim yoluyla vücuda alındığında, sinir sistemi, böbrek fonksiyonları, kan üretimi ve üreme sağlığı üzerinde zararlı etkilere yol açabilir. Alüminyum; açık renkli, dövülebilir ve esnek özellikte bir metaldir. Metal üretimi, kaynak uygulamaları, aşındırıcılar ve piroteknik maddelerde yaygın kullanımı vardır. Galvanizleme işlemlerinde ise parlaklık artırıcı katkı maddesi olarak düşük oranlarda kullanılır. Bu metale maruz kalmak, özellikle solunum sistemi üzerinde olumsuz etkilere neden olabilir ve bazı çalışmalar, alüminyumun akciğer veya mesane kanseriyle ilişkili olabileceğini öne sürmektedir. Sülfürik asit; güçlü oksitleyici özelliğe sahip olup yanıcı maddelerle tepkimeye girdiğinde toksik gazlar açığa çıkarabilir. Metallerle reaksiyona girerek hidrojen gazı üretir ve cilt, göz ve solunum yollarında şiddetli tahriş neden olabilir. Uzun süreli maruziyet durumlarında dış minesinde aşınma, sindirim ve solunum rahatsızlıkları, hatta bazı kanser türleriyle bağlantılı etkiler görülebilir. Hidroklorik asit, suda çözündüğünde kuvvetli bir asidik çözelti oluşturur ve metallerle temasında hidrojen gazı üretir. Havayla etkileşime geçtiğinde ise korozif buharlar

yayabilir. Bu buharlara maruz kalmak; ciltte tahriş, solunum problemleri ve dış yapısında bozulmalara neden olabilir. Nitrik asit; güçlü bir oksitleyici olup, organik ve yanıcı maddelerle reaksiyona girdiğinde yangın ve patlama riski taşır. Solunum yoluyla vücuda alındığında ciddi sağlık sorunları ortaya çıkarabilir; bunlar arasında solunum güçlüğü, bilinç kaybı ve cilt yanıkları yer alır. Hidrojen siyanür; keskin badem kokusuna sahip, düşük sıcaklıklarda sıvılaşabilen, yanıcı ve patlayıcı bir gazdır. Özellikle plastik ve sentetik lif üretiminde kullanılır. Solunum enzimlerini bloke ederek ölümcül solunum yetmezliğine yol açabilir. Sodyum, potasyum ve kalsiyum siyanür tuzları da endüstride yaygın olarak kullanılır ve asitlerle tepkimeye girdiklerinde toksik hidrojen siyanür gazı açığa çıkarılır. Bu gaz, solunum ya da cilt yoluyla vücuda alındığında baş dönmesi, mide bulantısı, bilinç kaybı ve ölümlerle sonuçlanabilecek zehirlenmelere neden olabilir. Pasivasyon işlemlerinde ise çinko kaplamaların üzerine uygulanan krom içeren kimyasallar, yüzeyin parlaklığını ve korozyon direncini artırır. Mavi pasivasyonda altı değerlikli krom (Cr^{6+}), sarı pasivasyonda ise üç değerlikli krom (Cr^{3+}) tercih edilir. Bu maddelere maruz kalmak, cilt, göz ve solunum yollarında tahrişe veya yanıklara sebep olabilir. Galvanizleme öncesinde yüzey hazırlığı amacıyla kullanılan flaks çözeltileri, genellikle amonyum klorür içerir. Bu kimyasal, çinkonun metale daha iyi tutunmasını sağlarken, göz ve deri ile teması halinde tahriş riski taşır.

2.6.2. Sıcak Daldırma Galvanizleme Prosesi

Her türlü kaplama işleminde olduğu gibi bu yöntemde de kaplama öncesinde yüzeyin uygun şekilde hazırlanması temel bir adımdır. Uzun ömürlü ve dayanıklı bir kaplama elde edebilmek için yüzeyin kaplamaya uygun hale getirilmesi büyük önem taşır. Çelik yüzey tam olarak temizlenmediği sürece, çinko ile çelik arasında gerekli metalürjik reaksiyon gerçekleşmez ve kaplama yüzeye tutunamaz. Bu nedenle, kaliteli bir kaplama elde etmek amacıyla malzeme öncesinde çeşitli temizlik işlemlerine tabi tutulur. Hazırlık aşamaları genellikle bir dizi sıvı çözeltiye daldırma işlemini içerir. İlk adımda uygulanan alkali temizleme; sıcak bir alkali çözelti kullanılarak yüzeydeki yağ, kir ve boya kalıntısı gibi organik kirleticilerin giderilmesini amaçlar. Yüzeyde bulunan epoksi, vinil kaplama kalıntıları, asfalt, kaynak cürufu ve çapak gibi maddeler ise galvanizleme öncesinde kumlama ya da mekanik yöntemlerle temizlenmelidir. Bu tür temizlik işlemleri genellikle üretici firmanın sorumluluğundadır. Bir sonraki adımda, yüzeydeki

pas ve çapakların giderilmesi için asit temizliği uygulanır. Bu işlem, genellikle hidroklorik asit içeren bir çözelti ile oda sıcaklığında gerçekleştirilir. Bu aşamada, çeliğin yüzeyindeki istenmeyen tabakalar kimyasal olarak çözündürülerek uzaklaştırılır. Flakslama ise yüzey hazırlığının son aşamasını oluşturur. Bu işlem, yüzeyde kalan oksitleri giderir ve yeniden oksit oluşumunu engelleyerek, çinkonun metal yüzeye daha iyi bağlanmasına olanak sağlar [22]. Kuru galvanizlemede, flakslama aşamasından sonra malzeme çinko amonyum klorür içeren bir çözeltiye daldırılır ve ardından kurutulur. Kurutulan malzeme daha sonra erimiş çinko banyosuna alınarak kaplanır. Bu aşamadan sonra kalite kontrol süreci başlatılır ve ürün kullanıma hazır hale getirilir. Sıcak daldırma galvaniz yönteminde ise çelik veya demir parçalar, delikli metal sepetler içinde yaklaşık %98 saf çinko içeren erimiş metal banyosuna tamamen daldırılır. Bu işlemin kimyasal içeriği, Amerikan Test ve Malzeme Derneği'nin (ASTM) A 123 standardına göre belirlenmiştir. Banyo sıcaklığı ortalama 870 °F yani 466 °C 'de tutulur. Malzemeler bu sıcaklığa ulaşana kadar banyoda bekletilir. Sonrasında yavaşça çıkarılarak fazla çinko süzülür. Bu noktada çinko ile çelik arasında başlayan kimyasal reaksiyonlar, malzeme banyodan çıktıktan sonra da bir süre devam eder. Kaplama işlemi tamamlanan malzemeler hava ile soğutularak proses sonlandırılır [23]. Elektrokimyasal olarak daha aktif bir metal ya da alaşım, korunması istenilen daha kıymetli metal eşyayla bir korozyon devresi oluşturacak şekilde temas ettirilir. Böyle olduğunda, aktif metal anot konumuna geçmektedir, belirli bir sürat ile korozyona uğrayıp zaman içinde tükenmektedir. Bu arada öteki metalin korozyonla karşılaşması da bu sayede engellenmektedir. Devreye bağlanarak anot konumuna geçen malzemelere “galvanik anot” denmektedir [24].

3. BÖLÜM

MATERYAL VE YÖNTEMLER

3.1. Malzemeler

Bu tez çalışmasında düşük karbonlu yapı çeliği olan S235JR numuneleri kullanılmıştır. Numuneler, piyasada standart boyutlarda temin edilen 2 mm kalınlığında sac formunda tedarik edilmiştir. Bu çelik türü, Avrupa normlarına uygun olarak üretilmekte olup, iyi kaynaklanabilirlik ve şekillendirilebilirlik özellikleri ile tanınmaktadır. Malzemenin düşük karbon içeriği sayesinde galvanizleme öncesi yüzey hazırlığı kolaylıkla yapılabilmektedir. Çinko ise kaplama malzemesi olarak tercih edilmiştir. Çinko, periyodik tablonun 12. grubunda yer alan, anot özelliği yüksek, düşük erime noktasına sahip bir elementtir. Elektrokimyasal özellikleri sayesinde galvanik anot görevi görebilir ve çeliği korozyona karşı hem fiziksel hem de elektro-kimyasal olarak koruyabilir [25]. Bu çalışmada %98 saflıktaki ticari çinko kullanılmıştır. Alan yazın araştırmasında çelikte oluşan aşınma, sürtünme, korozyon vb. negatif tesirleri önlemek için çeliklere farklı kaplama uygulamaları yapılabilmektedir. Kaplanmış olan çeliğin yanında kaplamada kullanılan malzeme de oldukça önemlidir. Bu tezde S235JR Çeliği üstüne galvaniz kaplama gerçekleştirilmiştir. Sıcak Daldırma Galvaniz (HDG) metodu uygulanmış olan kaplama işlemi yapılmıştır.

3.1.1. Çinko

Çinko (Zn), 419,5 °C erime sıcaklığına ve 907 °C kaynama noktasına sahiptir. Çinko, Fe-Zn alaşımı oluşturma yeteneği ile galvanizleme işleminde ideal bir metal olarak kabul edilir. Çeliğin sıcak çinko banyosuna daldırılması sırasında çinkonun çelik yüzeyine difüzyon yoluyla bağlanmasıyla Zn-Fe fazları meydana gelir. Bu fazların oluşumu, yüzeyde mekanik dayanımı yüksek ve homojen kaplama kalınlığı sağlayan yapılar elde edilmesini sağlar [26]. Çinko; sembolü Zn, atom numarası 30 olan kimyasal bir elementtir. Oda sıcaklığında hafif kırılğan bir metaldir ve oksidasyon giderildiğinde parlak gri bir görünüme kavuşur. Periyodik tablonun 12. (IIB) grubunun ilk elementidir. Bazı açılardan çinko kimyasal olarak magnezyuma benzer; her iki element de yalnızca bir normal oksidasyon durumu (+2) gösterir ve Zn^{2+} ve Mg^{2+} iyonları benzer boyuttadır [27]. Çinko, Dünya kabuğundaki en bol bulunan 24. element olup beş kararlı

izotopu vardır. En yaygın çinko cevheri, bir çinko sülfür minerali olan sfalerittir. Çinko cevherinin en büyük işletilebilir damarları, Avustralya, Asya ve ABD'dedir. Çinko, cevherin köpük flotasyonu, kalsinasyon ve elektrik kullanılarak nihai ekstraksiyon (elektrokazanın) yoluyla rafine edilir. Elektrokimyasal potansiyel dizisinde demirden daha negatif değerdedir ve bu sonuçla birlikte çinko, anot olarak katodik korozyon korumada önemli bir kullanım alanına sahiptir. Galvanizleme bu tür uygulamalardan biridir. Elektrik pilleri; küçük yapısal olmayan, yüksek mekanik dayanıma ihtiyaç duyulmayan dökümler ve pirinç gibi alaşımlar, diğer uygulama alanları arasındadır.

Elementlerin periyodik tablosunda geçiş elementleri grubundadır. Düşük kaynama sıcaklığı dikkat çekicidir. Bu değer özellikle pirometalurjik metal üretiminde çok belirleyici bir etmendir. Çinko dökülmüş halde sert ve kırılmandır, 120 °C'de şekillendirilebilir [28]. Tablo 3.1.'de çinkonun temel özelliklerinden bahsedilmiştir. Atom numarası, kütle numarası, element serisi elektron dizilimi vb. bilgilere değinilmiştir. Tablo 3.2.'de çinkonun fiziksel özelliklerinin sayısal verileri kendi birimleriyle açıklanmıştır. Tablo 3.3.'te çinkonun atom özellikleri verilmiştir. Tablo 3.4.'te ise elektrik direnci, ısı iletkenlik ve ısı ıl genleşme gibi parametrelere yer verilmiştir.

Tablo 3.1. Çinkonun Temel Özellikleri [45]

TEMEL ÖZELLİKLERİ	
Atom Numarası	30
Element Serisi	Geçiş Metalleri
Grup, Periyot, Blok	12, 4, d
Görünüş	Mavimsi Açık Gri
Kütle Numarası	65,409(4) g/mol
Elektron Dizilimi	[Ar]3d ¹⁰ 4s ²
Enerji Seviyesi Başına Elektronlar	2, 8, 18, 2
CAS Kayıt Numarası	7440-66-6

Tablo 3.2. Çinkonun Fiziksel Özellikleri [45]

FİZİKSEL ÖZELLİKLERİ	
Maddenin Hali	Katı
Yoğunluk	7,14 g/cm ³
Sıvı Haldeki Yoğunluğu	6,57 g/cm ³
Ergime Noktası	692°K- 419°C
Kaynama Noktası	1180°K - 907°C
Ergime Isısı	7,32 kJ/mol
Buharlaşma Isısı	123,6 kJ/mol
Isı Kapasitesi	25,390 J/K

Tablo 3.3. Çinkonun Atom Özellikleri [45]

ATOM ÖZELLİKLERİ	
Kristal Yapısı	Hegzagonal
Yükseltgenme Seviyesi	(2+) Amfoter Oksit
Elektronegatifliği	1,65 Pauling Ölçeği
İyonlaşma Enerjisi	906,4 kJ/mol
Atom Yarıçapı	135 pm
Aton Yarıçapı (hes.)	142 pm
Kovalent Yarıçapı	131 pm
Van der Waals Yarıçapı	139 pm

Tablo 3.4. Çinkonun Diğer Özellikler [45]

DİĞER ÖZELLİKLER	
Elektrik Direnci	59,0 nΩ (20°C'de)
Isıl İletkenlik	116 W/K
Isıl Genleşme	1,65 Pauling Ölçeği
Ses Hızı	906,4 kJ/mol
Mohs Sertliği	135 pm
Brinell Sertliği	412 MPa

3.2. Numune Hazırlama

Numunelerin hazırlanma süreci, metalografik analizlere ve kaplama kalitesine doğrudan etki ettiğinden son derece titizlikle gerçekleştirilmiştir. Kesme işlemi, bu aşamadaki ilk işlemdir. 2 mm kalınlığındaki S235JR saclar, hassas numune kesme cihazı kullanılarak 20x20 mm boyutlarında parçalara kesilmiştir. Kesme işlemi sırasında aşırı ısınmayı önlemek amacıyla sürekli su soğutmalı sistem tercih edilmiştir. Temizleme ve yağ alma işleminde ise kesilen numuneler, öncelikle ultrasonik banyo ile temizlenmiş; ardından sıcak alkali çözelti (NaOH bazlı) ile yağdan arındırılmıştır. Bu işlem, çinko kaplamanın çelik yüzeye homojen bir şekilde tutunabilmesi açısından büyük önem taşımaktadır.

Ardından asitle dağlama işlemi yapılır. Bu işlemde numuneler, %10'luk hidroklorik asit (HCl) çözeltisinde 5 dakika bekletilerek yüzeydeki pas, oksit ve kirler tamamen uzaklaştırılmıştır. Sonrasında flakslama işlemi yapılır. Bu işlemde asitleme sonrasında yüzey yeniden oksitlenmeden korunmak için çinko amonyum klorür ($ZnCl_2 + NH_4Cl$) çözeltisine batırılmıştır. Flakslama işlemi, çinkonun demir yüzeye bağlanmasını kolaylaştırır. Kaplama sonrası, mikroyapısal analizler yapılabilmesi için öncelikle bakalit kalıplama işlemi yapılır. Bakalit kalıplamada; numuneler bakalit presi ile kalıplanmıştır. Ardından Şekil 3.3.'teki zımparalama ve parlatma işleminde 120–1200 mesh zımpara kâğıtları ve elmas pasta ile parlatılmıştır. Dağlamada ise %3'lük nital çözeltisi ($HNO_3 + etanol$) ile mikroyapıların ortaya çıkması sağlanmıştır. Optik mikroskopi; kaplama kalınlıkları ve yapıları mikroskop ile incelenmiştir. Mikrosertlik ölçümü, vickers sertlik yöntemi ile kaplama ve taban malzeme arasındaki sertlik farkları belirlenmiştir. Kaplama deneylerinde kullanılan S235JR çeliği 2 mm kalınlığında plaka halinde piyasadan temin edilmiştir. S235JR plaka numune ölçülerine, Şekil 3.1.'deki hassas kesme cihazı kullanılarak kesilmiştir.



Şekil 3.1. Hassas kesme cihazı

Numuneler Şekil 3.2.'de görülen bakalite alma cihazı kullanılarak kalıplanmıştır. Bu cihazın temel amacı metalografik incelemelerde kullanılmak üzere numuneyi bakalit denilen termoset plastik reçine ile kalıplayarak elde tutulması kolay ve taşınabilir hale getirmektir. Bu işlem düzensiz şekil veya küçük metal parçaların yüzeylerinin metalografik analizlerde bozulmadan incelenmesini sağlar.

Bakalite alma işleminden sonra, Şekil 3.3.'te gösterilen zımparalama cihazı ile zımparalama işlemi gerçekleştirilmiştir. Bunun için sırasıyla 120, 400, 800 ve 1200 mesh zımpara kağıtları kullanılmıştır.

Ardından Şekil 3.4.'te görülen zımparalama ve parlatma cihazında parlatma işlemi gerçekleştirilmiştir. Parlatma işlemi için elmas süspansiyon ve çuha kullanılmıştır. Şekil 3.5.'te görülen numuneler; kesme, bakalite alma, zımparalama ve parlatma işlemlerinden geçirilerek, optik mikroskopta inceleme öncesindeki son hâlini almıştır. Zımparalama ve parlatma işleminden sonra kaplama yüzeyinin incelenebilmesi için numune yüzeyleri %3 'lük nital dağlayıcı kullanılarak dağlanmıştır. Dağlama işleminden sonra mikro yapı görüntüleri ve kaplama kalınlıkları Şekil 3.6.'da gösterilen optik mikroskop cihazı ile incelenmiştir.



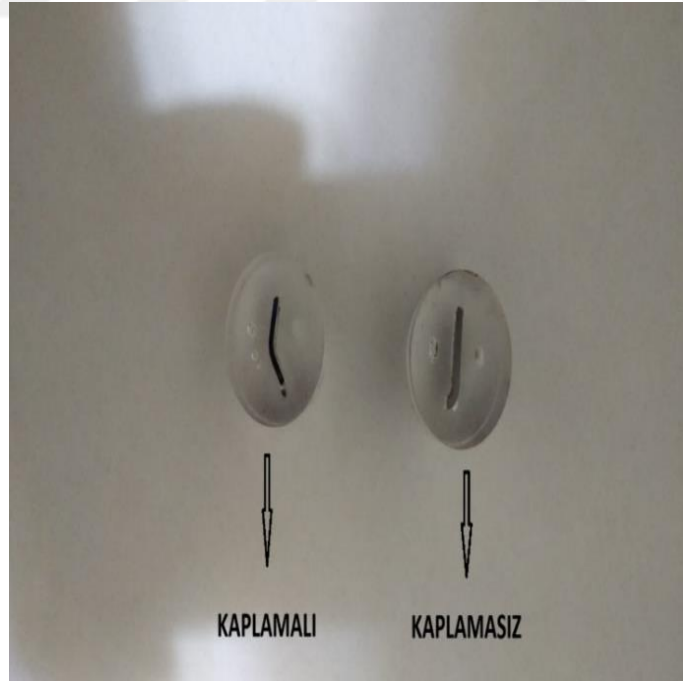
Şekil 3.2. Bakalite alma cihazı



Şekil 3.3. Zımparalama cihazı



Şekil 3.4. Zımparalama ve parlatma cihazı



Şekil 3.5. Bakalite alınan numuneler



Şekil 3.6. Optik mikroskop

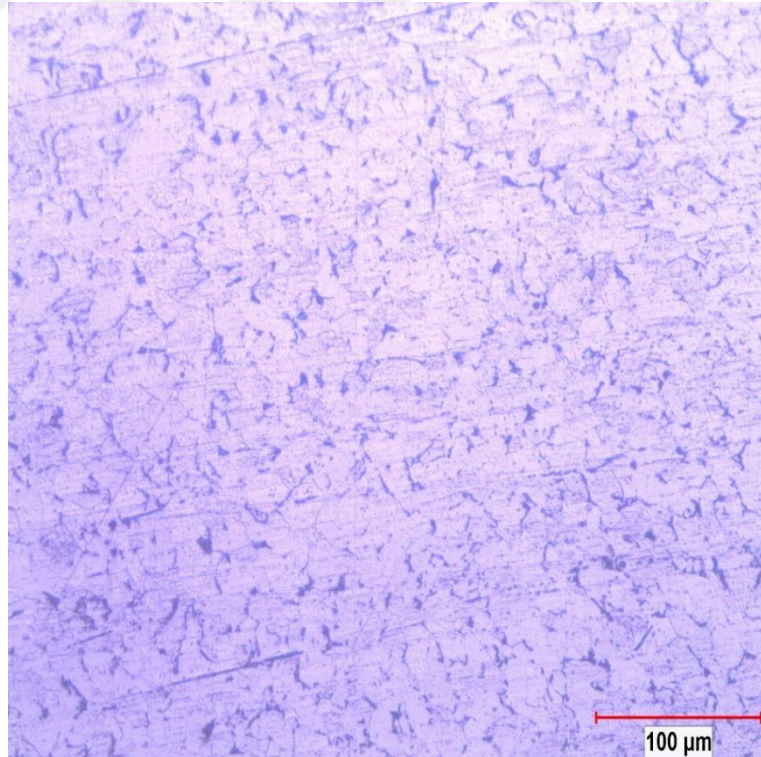
4. BÖLÜM

DENEYSEL SONUÇLAR

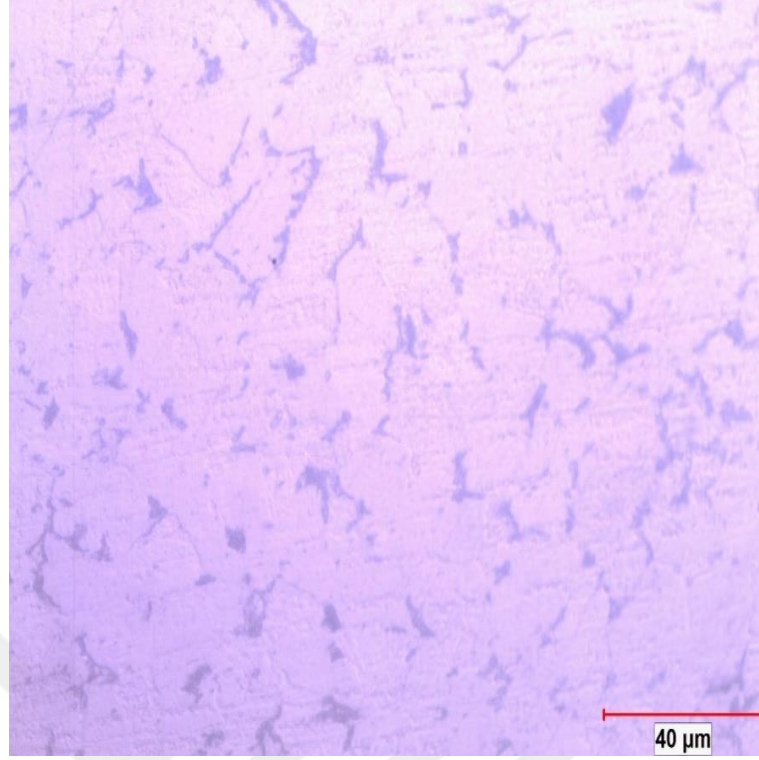
Bu çalışmada S235JR çeliğinin galvaniz kaplandıktan sonra korozyona etkisi araştırılmıştır. Kaplama işlemi 455°C’de sıcak daldırma galvaniz işlemi ile kaplanarak kaplama gerçekleştirilmiştir. Kaplanan ve kaplamasız numuneler optik mikroyapı, korozyon testi ve mikro sertlik analiz yöntemleri kullanılarak incelenmiştir.

4.1. Optik Mikroyapı Sonuçları

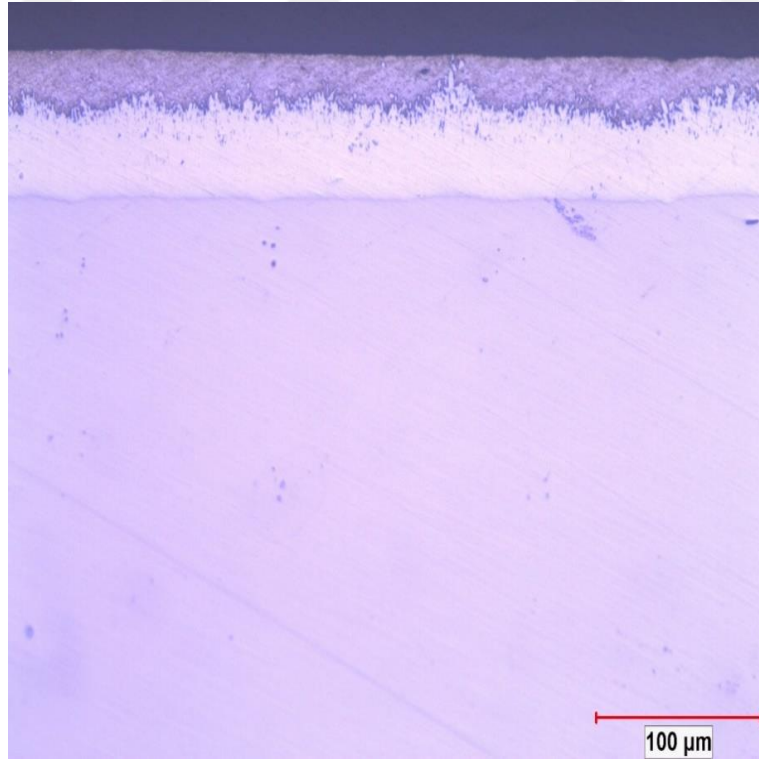
S235JR çeliğinin korozyon testine tabi tutulup kaplanan mazlemenin yüzey yapısı optik mikroskopla incelenmiştir. Kaplama yapılan numunenin optik mikroyapı fotoğrafları Şekil 4.1. Şekil 4.2. Şekil 4.3. ve Şekil 4.4.’te görülmektedir. Kaplama kalınlıkları ise Şekil 4.5. Şekil 4.6. ve Şekil 4.7.’de görülmektedir.



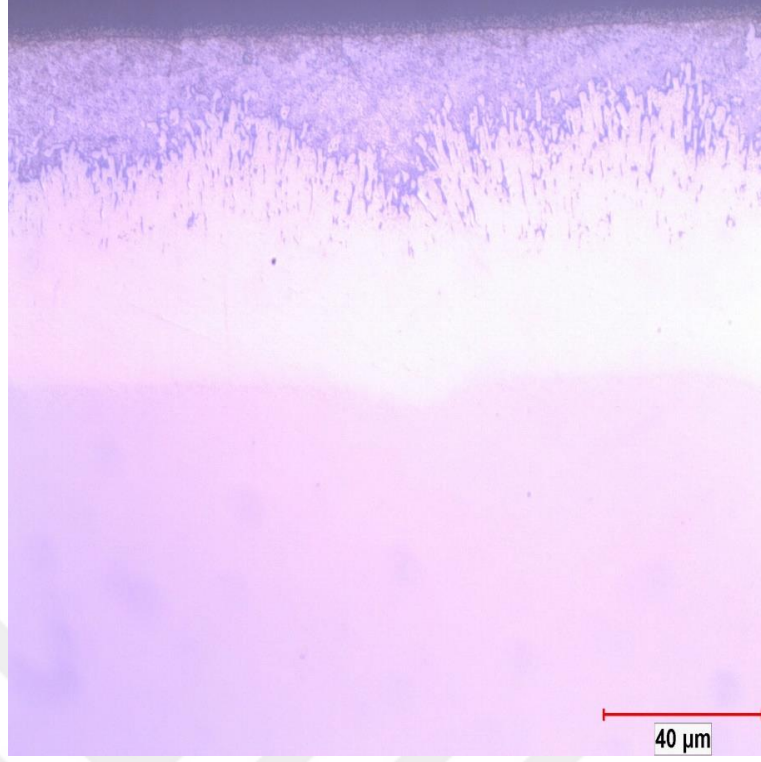
Şekil 4.1. Sıcak daldırma galvanizleme ile kaplanmış S235JR numunesinin mikro yapı görüntüsü



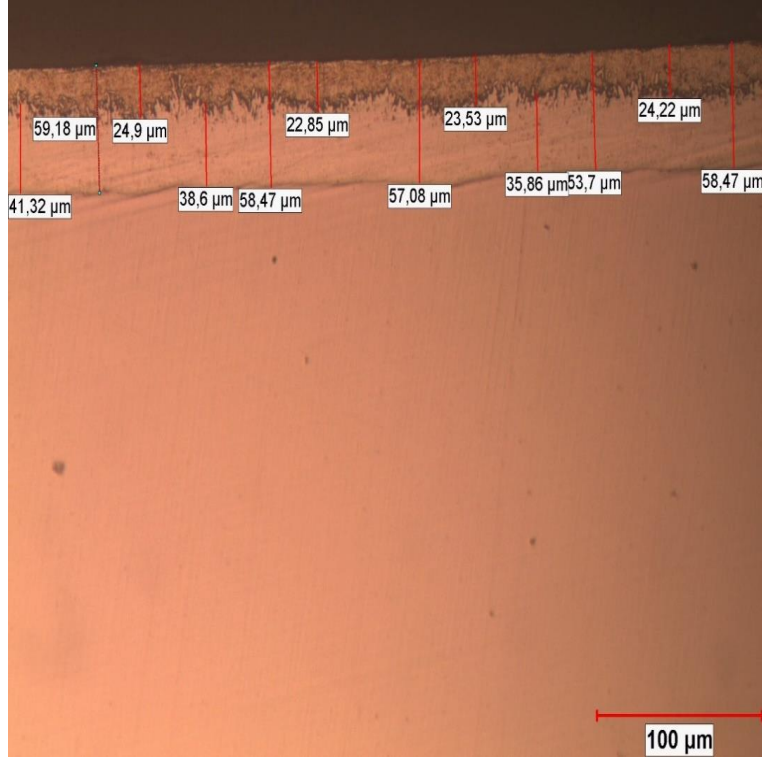
Şekil 4.2. Sıcak daldırma galvanizleme ile kaplanmış S235JR numunesinin mikro yapı görüntüsü



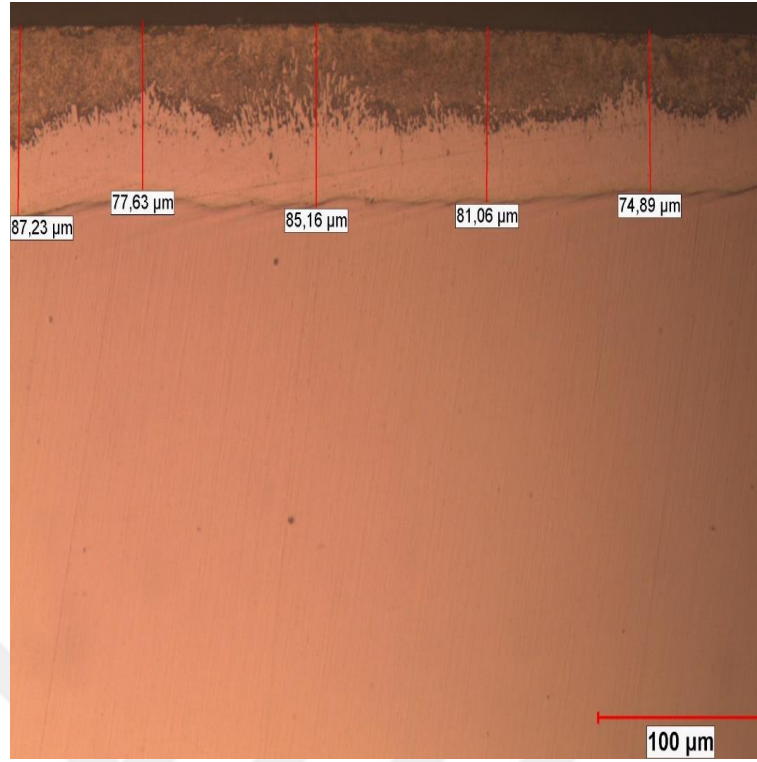
Şekil 4.3. Galvaniz kaplanmış S235JR numunesinin kaplama kalınlığının mikro yapı görüntüsü



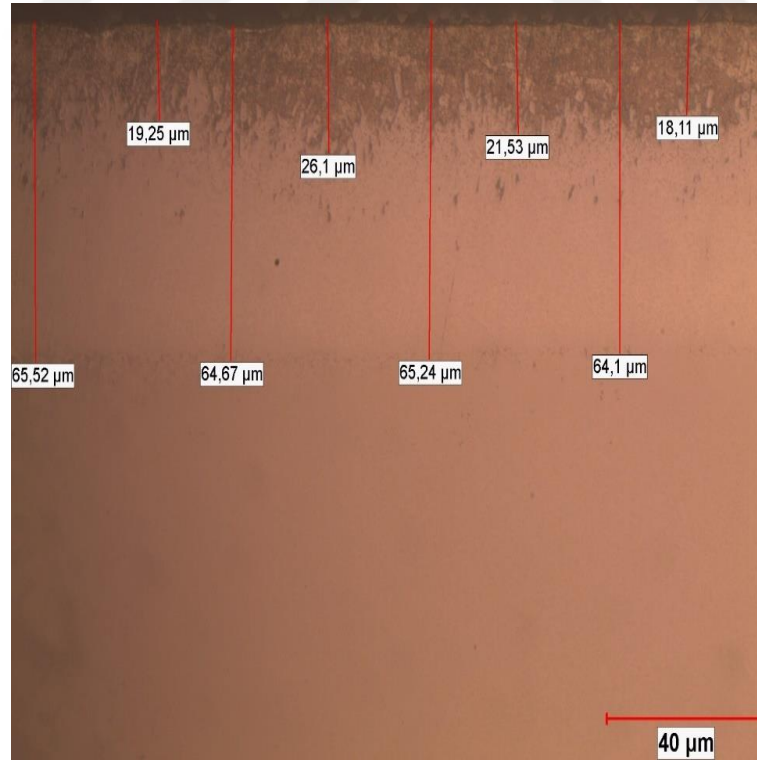
Şekil 4.4. Galvaniz kaplanmış S235JR numunesinin kaplama kalınlığının mikro yapı görüntüsü



Şekil 4.5. S235JR numunesinin kaplama kalınlığının mikron değerleri ile birlikte mikro yapı görüntüsü



Şekil 4.6. S235JR numunesinin kaplama kalınlığının mikron değerleri ile birlikte mikro yapı görüntüsü



Şekil 4.7. S235JR numunesinin kaplama kalınlığının mikron değerleri ile birlikte mikro yapı görüntüsü

Şekil 4.1.'de sıcak daldırma galvanizleme işlemi uygulanmış S235JR yapısal çeliğin optik mikroskop altında elde edilen mikro yapısı görülmektedir. Görselde, çeliğin ferrit-perlit matris yapısı belirgin bir şekilde izlenebilmektedir. Bu yapı, S235JR gibi düşük karbonlu yumuşak çeliklerde yaygın olarak gözlemlenen tipik bir mikro yapı olup, galvanizleme öncesinde de bu morfolojiyi taşımaktadır. Ferrit fazı açık renkli bölgelerle, perlit ise daha koyu ve ince tabakalı lameller şeklinde kendini göstermektedir. Galvanizleme işlemi sırasında çelik yüzeyi ile çinko arasında difüzyon yoluyla oluşan intermetalik fazlar genellikle yüzey bölgesinde yer alırken, bu mikroyapı görüntüsünde esas olarak ana malzemeye ait çelik mikroyapısının gözlemlendiği değerlendirilmektedir. Eğer numune çapraz kesit (transversal) olarak alınmışsa, çinko kaplamanın içeriye difüzyon yaptığı bölgelerde çinko demir alaşımları (örneğin δ (delta), ζ (zeta) fazları) görülebilir [34]. Ancak bu görüntüde daha çok alt tabaka mikro yapısı (çelik fazlar) belirgin olduğundan dolayı galvaniz sonrası çelik yapının bütünlüğünü koruduğu anlaşılmaktadır. Kaya ve arkadaşları, sıcak daldırma galvanizleme işleminin, çeliğin yüzey mikroyapısını değiştirdiği ve yüzeyde Zn-Fe intermetalik fazların oluştuğu belirtilmiştir [29]. Gutierrez ve arkadaşları da elde edilen mikroyapı görüntüsünün paralelinde, bu intermetalik fazların yapısı ve kalınlığı, galvaniz banyosundaki çinko sıcaklığına, daldırma süresine ve çeliğin kimyasal bileşimine bağlı olarak değişkenlik gösterdiğini açıklamıştır. [30]. Sarıkaya ve arkadaşlarının çalışmasında da belirtildiği üzere, çinko kaplama sonrasında çeliğin korozyon direncinde önemli bir artış gözlemlendiği, çinko tabakasının koruyucu bir bariyer görevi gördüğü tespit edilmiştir. Ancak mikro yapı seviyesinde, galvanizleme işleminin çeliğin iç yapısında önemli bir değişime neden olmadığı, daha çok yüzeyde faz oluşumları ile sınırlı kaldığı bilinmektedir [31]. Bu bağlamda, Şekil 4.1'de yer alan mikro yapı görüntüsü, galvanizleme sonrası çelik yüzeyinde yapının bütünlüğünü koruduğunu ve ferrit-perlit faz dağılımının seçilebilir olduğunu göstermektedir. Görüntüde ölçek çubuğu 100 μm olarak belirtilmiş olup, bu da yapının mikro düzeyde incelendiğini ortaya koymaktadır.

Şekil 4.2'de, sıcak daldırma galvanizleme işlemi uygulanmış S235JR çelik numunesine ait mikroyapı görüntüsü yer almaktadır. Numune yüzeyinde görülen koyu renkli alanlar çinko kaplamanın mikro yapıdaki dağılımını yansıtmakta olup, bu bölgeler çinko ile demir arasında meydana gelen intermetalik fazları işaret etmektedir.

Kaya ve arkadaşları, intermetalik fazlar çinko ile demirin reaksiyonu sonucu korozyon direncini etkilediği sonucuna ulaşmışlardır. Görseldeki mor tonlu yapı matrisin ferrit fazı olduğunu düşündürmektedir. Bu tür intermetalik fazlar, çinko ile demirin yaklaşık 450 °C sıcaklıkta reaksiyona girmesi sonucu oluşur. Oluşan bu fazların, kaplama katmanının mekanik ve korozyon direnci üzerinde doğrudan etkili olduğu belirlenmiştir. Elde edilen bulgular, Kaya ve arkadaşlarının literatürdeki çalışmalarıyla da örtüşmektedir [32]. Ayrıca Singh ve arkadaşlarının çalışmasına istinaden yorumlama yapılacak olursa görüntüdeki 40 µm ölçeği dikkate alındığında, kaplama kalınlığı oldukça homojen bir dağılım sergilemekte olup, galvanizleme işleminin kontrollü bir şekilde gerçekleştirildiği anlaşılmaktadır. Bu tür yapıların varlığı, kaplamanın çelik yüzeyine iyi bir şekilde tutunduğunu ve korozyon direncinin artırıldığını göstermektedir [33].

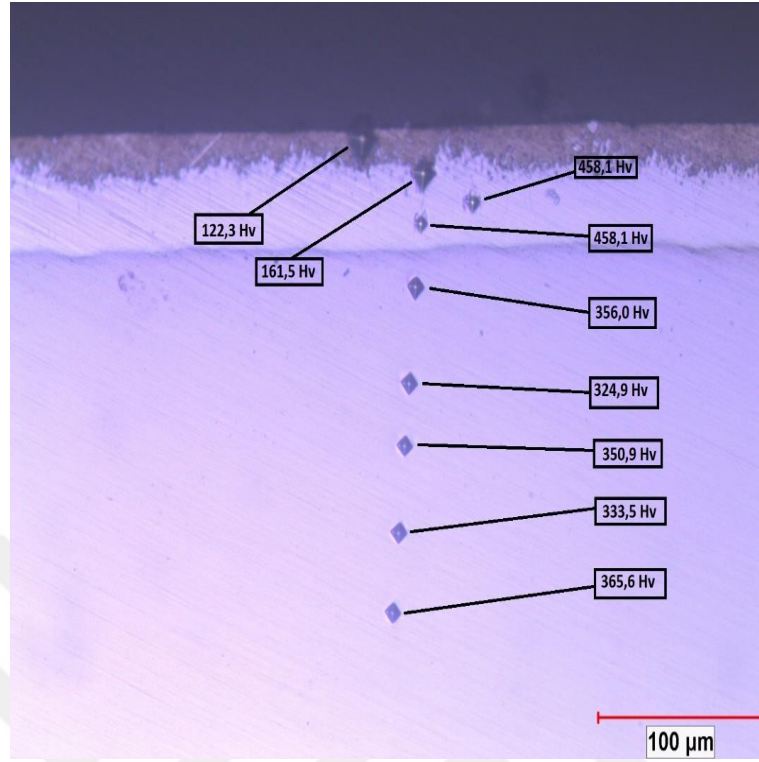
Şekil 4.3. ve Şekil 4.4.' teki bu mikroyapı görüntüsü de sıcak daldırma galvaniz yöntemiyle kaplanmış bir S235JR çeliği numunesine aittir. Görüntüde, üst kısımda yer alan koyu tonlu bölge çinko (Zn) kaplamayı, onun altındaki daha açık tonlu ve homojen yapı ise çelik (S235JR) altlığı temsil etmektedir. Görüntünün sağ alt köşesindeki ölçek çubuğu (100 µm) referans alınarak kaplama kalınlığının mikrometre mertebesinde olduğu gözlemlenmektedir. Sıcak daldırma galvaniz işlemi, çeliğin eritilmiş çinko banyosuna daldırılması ile yüzeyde Zn-Fe alaşımlarından oluşan çok katmanlı bir kaplama tabakası oluşmasını sağlar. Mikroyapı görüntüsünde bu tabakalar tipik olarak sırasıyla Gamma (Γ), Delta (δ), Zeta (ζ) ve en dışta saf çinko (η) tabakası olarak tanımlanır. Bu yapılar, demir ile çinko arasında difüzyonla oluşan intermetalik fazları temsil eder [34]. Bu görüntüde gözlemlenen kaplama kalınlığı yaklaşık 40–60 µm civarındadır ve bu değer, TS EN ISO 1461 standardında belirtilen minimum kaplama kalınlık değerlerini karşılamaktadır. Ayrıca, mikroyapıdaki düzgün ve sürekli kaplama, işlemin kontrollü şartlarda gerçekleştirildiğini ve yüzeyin etkin bir şekilde korunduğunu göstermektedir [35]. Sıcak daldırma galvanizle oluşan bu çok katmanlı yapı, özellikle dış ortam koşullarında korozyon direncini büyük ölçüde artırır. Koleva ve arkadaşlarının literatürdeki çalışmasında belirttiği üzere, çalışmamızla paralel doğrultuda çinko tabakası ortamda çözünerek önce kendisi korozyona uğrar ve böylece altındaki çeliği katodik koruma mekanizması ile korur [36].

Şekil 4.5. ve Şekil 4.7.'deki mikro yapı görüntüsünde sıcak daldırma galvaniz ile kaplanmış S235JR çeliğinin kaplama kalınlıkları ölçülmüştür. Değerler yaklaşık 22,85 μm ile 59,18 μm arasında değişmektedir. Bu, sıcak daldırma galvanizlemede literatürde sıkça bildirilen tipik değer aralığıyla uyumludur. Çitak ve arkadaşlarının çalışmasında sıcak daldırma galvaniz kaplamalarda ortalama kalınlık genellikle 40–80 μm arasında değişmektedir. Bu görüntüde de elde edilen mikron değerleri bu aralığın alt ve orta sınırlarına denk gelmekte olup, kaplamanın yeterli ve standartlara uygun olduğunu göstermektedir [37].

Şekil 4.6'da verilen mikroyapı görüntüsünde, S235JR numunesinde ana malzeme ile kaplama tabakası arasındaki kalınlığın 74,89 μm ile 87,23 μm arasında değiştiği tespit edilmiştir. Galvaniz kaplama değerleri, ortalama olarak yaklaşık 40–80 μm aralığında bir kaplama kalınlığına işaret etmektedir. Ancak bu tür mikroskobik analizlerde, özellikle numunenin hazırlık aşamasında kullanılan bakalit kalıplama ve numune kenarındaki yerel pürüzlülükler, ölçüm sonuçlarını kısmen etkileyebilmektedir. Bu nedenle elde edilen değerlerin yaklaşık sonuçlar olduğu ve küçük sapmalar içerebileceği göz önünde bulundurulmalıdır. Kaya, H. ve Altuncu da sıcak daldırma galvaniz kaplama kalınlıklarının genellikle 60–80 μm aralığında olduğu ve ölçümlerde yüzey hazırlığının etkili olabileceği vurgulanmıştır. Bu bağlamda, elde edilen veriler literatürle uyumlu olup, kaplama kalınlıklarının teknik toleranslar dahilinde olduğu söylenebilir [38].

4.2. Mikrosertlik Analiz Sonuçları

Şekil 4.8.'deki mikroyapı görüntüsü, sıcak daldırma galvanizle kaplanmış bir S235JR çeliği numunesinin farklı bölgelerinde yapılan mikro sertlik (Vickers - HV) ölçümlerini göstermektedir. Görüntüde sertlik değerlerinin yüzeyden iç yapıya doğru kademeli olarak değiştiği açıkça görülmektedir.



Şekil 4.8. Galvaniz kaplanmış S235JR numunesinin sertlik ölçümlerinin mikro yapı görüntüsü

Bu mikro yapı görüntüsü, galvaniz kaplama sonrası oluşan katmanların ve alt tabaka çelikle olan etkileşiminin mekanik özellikler üzerindeki etkisini ortaya koymaktadır. Sertlik ölçümleri, galvaniz kaplamanın dış yüzeyinden çelik gövdeye kadar olan geçiş boyunca alınmıştır. Özellikle çinko kaplamanın çeşitli intermetalik fazları, farklı sertlik değerleriyle ayırt edilebilmektedir. Kaplama yüzeyine en yakın bölgede yer alan ölçüm noktalarında (örneğin 458,1 HV), sertlik değerleri oldukça yüksektir. Bu durum, çinko ile demir arasında oluşan Fe-Zn intermetalik fazlarının, özellikle δ (FeZn_7) ve Γ ($\text{Fe}_3\text{Zn}_{10}$) gibi fazların varlığını işaret eder. Burada belirtilen fazlar, çinko ile demir arasındaki reaksiyon sonucunda sıcak daldırma galvanizleme sırasında oluşan intermetalik fazlardır. Bu fazlar, galvaniz kaplama tabakasının farklı bölgelerinde yer alır ve kaplamanın mekanik ve korozyon özelliklerini etkiler. Kaya ve arkadaşlarının çalışmasında belirttiği gibi, bu intermetalik bileşikler çelik altlığına göre çok daha yüksek sertliğe sahiptir [39].

Kaplamanın iç kısımlarına doğru inildikçe (örneğin 365,6 HV'den 324,9 HV'ye doğru), sertlik azalmaya başlar ve alt tabaka çelik ile geçiş bölgesine yaklaştıkça daha düşük değerlere (örneğin 161,5 HV ve 122,3 HV) ulaşır. Bu değerler, Gervasi'nin çalışmasında belirttiği gibi çeliğin ferrit-perlit matrisinin karakteristik mikro sertlik aralığını temsil eder [40]. Tablo 4.1.'de görülen, sıcak daldırma galvaniz kaplamasında oluşan kaplama tabakası sırasıyla şunlardan oluşur; η fazı (Saf çinko), en dış katman, genellikle düşük sertliktedir (~50–70 HV).

Tablo 4.1. HDG Esnasından Oluşan Fazların Sertlik Aralıkları

ζ fazı (FeZn13)	130–180 HV
δ fazı (FeZn7)	250–350 HV
Γ fazı (Fe ₃ Zn ₁₀)	350–450 HV
Baz metal (S235JR çeliği)	120–180 HV

Bu fazlar, Sedeiks'in 1996 yılında yaptığı çalışmayla aynı tabanda seyretnmiş olup galvaniz banyosundaki sıcaklık, bekleme süresi ve çeliğin kimyasal bileşimi gibi parametrelerden etkilenecek farklı kalınlıkların da oluştuğu gözlemlenmiştir [41]. Şekil 4.8'da görülen mikro sertlik dağılımı, kaplama kalınlığı boyunca oluşan farklı Fe-Zn intermetalik fazların varlığını desteklemekte ve galvaniz kaplamanın yapısal bütünlüğünü göstermektedir. Sertlik değerlerindeki bu değişim, kaplamanın aşınma ve korozyon direncine olan katkısının mikroskobik düzeyde analizine imkân verir. Bu sonuçlar, galvaniz kaplamanın sadece korozyon koruması değil, aynı zamanda yüzey sertliği açısından da çeliğe önemli bir katkı sunduğunu göstermektedir. Elde edilen sertlik analizlerine bakıldığında ana malzeme sertliği ortalaması 327,6 HV'dir. 450°C'de galvaniz kaplama yapılan malzemenin mikrosertlik değerleri artmış olup maksimum sertlik değeri 458,1 HV olarak elde edilmiştir. Bu sonuçlar neticesinde galvaniz kaplamanın, malzemenin yüzeyindeki sertlik değerini %40 oranında arttırdığı gözlemlenmiştir.

4.3. Tafel Ekstrapolasyonu Analizi ve Sonuçları

Tafel ekstrapolasyon yöntemiyle galvanizli ve galvanizsiz numunelerin korozyon potansiyeli (E_{corr}) ve korozyon akım yoğunluğu (I_{corr}) değerleri Tablo 4.2.'de

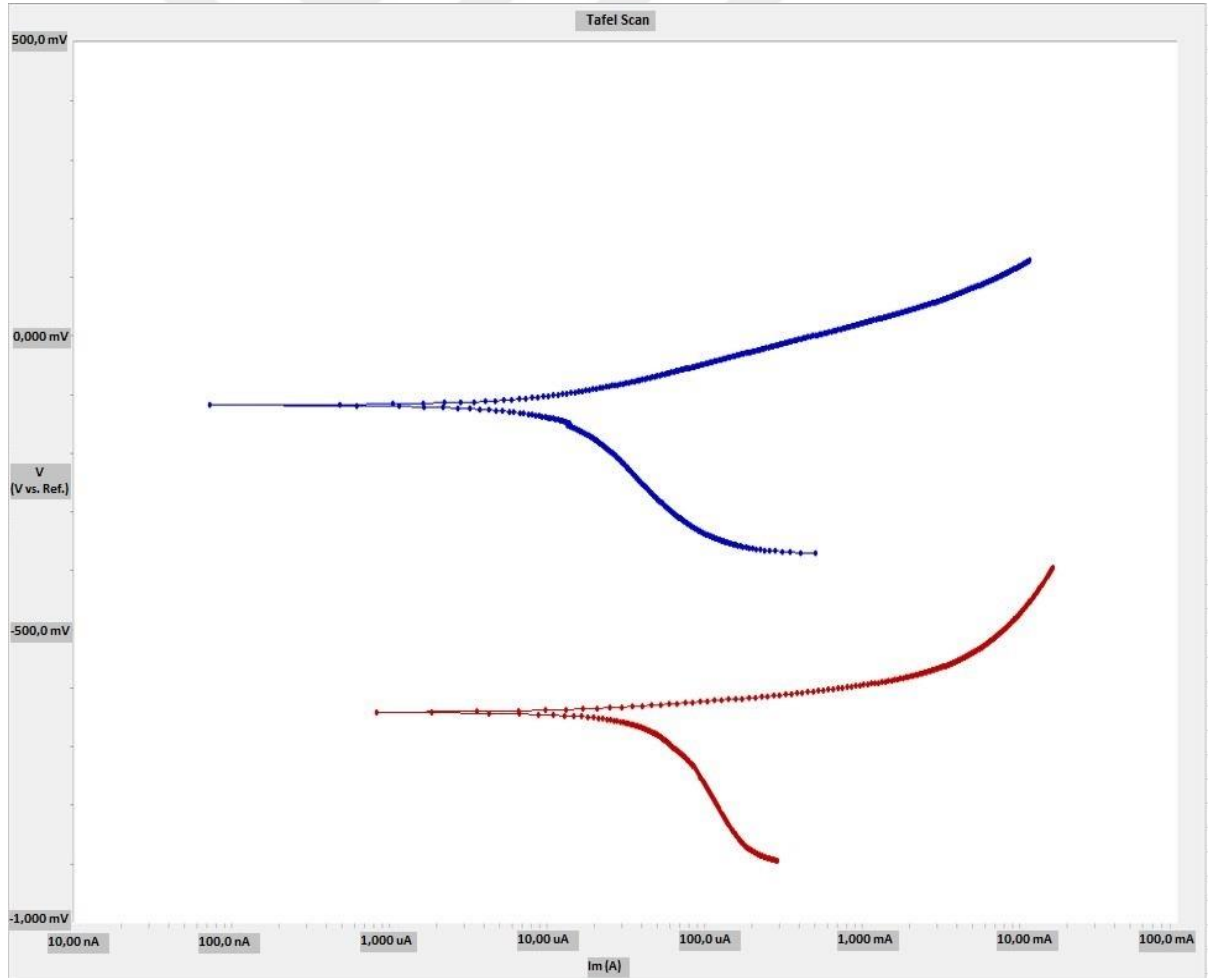
görüldüğü üzere belirlenmiştir. Testler 3,5% NaCl çözeltisinde gerçekleştirilmiş, her numune için üç tekrar alınarak ortalama değerler hesaplanmıştır.

Tablo 4.2. Numunenin Tafel Eğrisinde I_{corr} ve E_{corr} Değeri [42]

Numune	E_{corr} (mV)	I_{corr} ($\mu A/cm^2$)
Galvanizli (60 sn)	-395	0.79
Galvanizli (90 sn)	-360	0.63
Galvanizli (120 sn)	-340	0.41
Galvanizsiz	-645	3.35

Şekil 4.9.'da görüldüğü üzere, tafel eğrileri üzerinden yapılan değerlendirmelerde galvanizli numunelerin daha negatif E_{corr} değerlerine sahip olduğu ve I_{corr} değerlerinin anlamlı şekilde azaldığı görülmektedir. Bu, çinkonun galvanik anot görevi üstlendiğini ve çeliği koruduğunu açık şekilde göstermektedir. Tafel sonuçlarına göre, 120 saniye galvanizlenmiş numunede korozyon hızı minimum seviyeye inmiştir. Bu bulgu, galvanizleme süresi arttıkça koruyuculuk etkisinin optimize edildiğini ve çinko tabakasının geçirimsizliğinin arttığını göstermektedir. Ekstrapolasyon, grafik üzerinde elde edilen mevcut veri eğiliminden yola çıkarak gözlemlenmemiş alanlara yönelik yapılan ileriye dönük tahmin işlemidir. Başka bir ifadeyle; elinizde yalnızca 1., 2. ve 3. noktalar mevcutsa ve bu noktalar doğrusal bir doğrultuda sıralanıyorsa, 4. veya 5. noktaya ilişkin herhangi bir veri olmaksızın, mevcut doğrultuyu referans alarak bu noktaların değerlerini tahmin etmeye yönelik yapılan işlem ekstrapolasyon olarak tanımlanır. Tafel ekstrapolasyon yönteminde eğri, potansiyel (E) ile logaritmik akım yoğunluğu ($\log i$) arasındaki ilişkiye göre belirlenir. Bu yöntemle, elektrokimyasal bir hücredeki anod ve katod reaksiyonlarının kinetiği analiz edilir. Tafel eğrisinde birinci basamak veri toplamadır. Numunenin elektrokimyasal davranışı, genellikle potansiyodinamik polarizasyon testi ile belirlenir. Bu testte elektrot potansiyeli belirli bir hızla değiştirilir ve karşılık gelen akım ölçülür. İkinci basamak grafik oluşturmaktır. Ölçülen değerlerle E (potansiyel) – $\log(i)$ (akım yoğunluğunun logaritması) grafiği çizilir. Üçüncü basamak doğrusal bölgelerin seçimidir. Anodik ve katodik tafel bölgeleri, eğrinin $\log(i)$ ile doğrusal davrandığı kısımlarıdır. Bu basamaklar genellikle

korozyon potansiyelinin (E_{corr}) biraz uzağında yer alır. Dördüncü basamak ise eğriye doğruyu oturtmadır. Jones ve arkadaşlarının da çalışmasında olduğu gibi “Tafel Ekstrapolasyonu” anodik ve katodik doğrusal bölgeler ayrı ayrı doğrusal regresyon ile analiz edilir [43]. Bu doğruların kesişim noktası korozyon potansiyeli (e_{corr}) ve bu noktadaki akım değeri korozyon akımı (i_{corr}) olarak alınır. Sonuç olarak; tafel eğrisi, potansiyelin logaritmik akım yoğunluğuna karşı grafiğe dökülmesiyle ve bu grafikte doğrusal bölgelerin belirlenip ekstrapolasyon yapılmasıyla elde edilir. Bu yöntem sayesinde malzemenin korozyon hızı hesaplanabilir. Tafel ekstrapolasyonu bağlamında; Grafikteki doğrusal anodik ve katodik tafel bölgelerini uzatarak (ekstrapole ederek), bu doğruların kesiştiği noktada korozyon potansiyeli ve akımı tahmini olarak bulunmuş olur. Çünkü bu değerler doğrudan ölçülmez, grafiksel olarak hesaplanır.



Şekil 4.9. Tafel ekstrapolasyon yöntemi ile kıyaslanan kaplamalı kaplamasız çeliklerin tafel ekstrapolasyon eğrisi

Tafel ekstrapolasyon eğrisinde Ekor ve İkor değerleri, bir metalin veya alaşımın korozyon davranışını anlamada temel parametrelerdir. Ekor (Korozyon Potansiyeli-Ecorr) tanım olarak, elektrokimyasal hücrede akımın sıfır olduğu (anodik ve katodik reaksiyonların dengede olduğu) potansiyeldir. Anlamı ise metalin çevresiyle elektrokimyasal etkileşime geçtiğinde doğal olarak ulaştığı potansiyeldir. Bu bilgiler ışığında şöyle bir yorumlama yapabiliriz; daha negatif bir Ecorr değeri, metalin korozyona daha yatkın olduğunu gösterebilir. Ancak tek başına yorum yapmak yanıltıcı olabilir; Icorr ile birlikte değerlendirilmelidir. İkor (Korozyon Akım Yoğunluğu – Icorr); korozyon tepkimesinin hızını temsil eden, birim yüzeyden geçen akım yoğunluğudur (genellikle A/cm² cinsinden verilir). Metalin korozyon hızının doğrudan ölçüsü anlamını taşır. Daha yüksek Icorr değeri, daha yüksek korozyon hızı demektir. Bu nedenle Icorr, metalin dayanıklılığı açısından kritik bir parametredir. Özetle; Ecorr bize "korozyon eğilimini", Icorr ise "korozyonun şiddetini/hızını" gösterir. Fontana ise 2005 yılında yaptığı çalışmada tafel ekstrapolasyonu yöntemini, metal yüzeyinde meydana gelen anod ve katod reaksiyonlarının potansiyel-akım yoğunluğu eğrisini inceleyerek korozyon potansiyelini ve korozyon akım yoğunluğunu belirler, diyerek açıklamıştır [44]. Bu parametreler, metalin korozyon hızını belirlemek için kullanılır. Biri metal yüzeyinde birim alan başına düşen elektron transfer miktarını ifade eder ve korozyon hızının önemli bir göstergesidir. Bir diğeri ise metalin elektrokimyasal dengesini temsil eder. Kaplamasız çelik (kırmızı eğri) şunları ifade eder: Kaplamasız S235JR çeliğinde daha yüksek değerler gözlenmiştir. Bu durum, çeliğin atmosferik koşullara maruz kaldığında hızlı bir şekilde korozyona uğrayacağını gösterir. Anot ve katot reaksiyonları çelik yüzeyinde serbestçe gerçekleşir ve galvanik koruma mekanizması olmadığı için korozyon hızı yüksektir. Galvaniz kaplı çelik (mavi eğri) ise şu sonucu vermiştir: Sıcak daldırma galvaniz ile kaplanmış çelikte değerler önemli ölçüde düşmüştür. Bu, çinko kaplamanın çeliği fiziksel olarak izole etmesinin yanı sıra, anodik koruma sağlamasıyla ilişkilidir. Çinko, çelikten önce oksitlenerek çelik yüzeyinde bir bariyer tabakası oluşturur. Ayrıca değerinin daha pozitif bir değere kayması, galvaniz kaplamanın çeliğin elektrokimyasal stabilitesini artırdığını göstermektedir. Tafel ekstrapolasyon yöntemiyle elde ettiğimiz iki eğri üzerinden korozyonla ilgili bazı önemli çıkarımlar yapılabilir. Tespit ettiğimiz değerleri yorumlarsak; korozyon potansiyeli mavi eğri -118 V, kırmızı eğri -641 V'dir. Korozyon potansiyeli daha negatif olan metal (kırmızı eğri)

daha anodik davranır, yani korozyona daha yatkındır. Bu durumda kırmızı eğriye ait örnek, mavi eğriye göre daha düşük bir korozyon direncine sahiptir. Korozyon akım yoğunluğu mavi eğride 1.05×10^{-4} A'dır; kırmızı eğride ise bu değer 3.3×10^{-4} A'dır. Korozyon akım yoğunluğu, korozyon hızının doğrudan bir göstergesidir. Daha yüksek bir değeri, daha hızlı bir korozyon sürecini ifade eder. Bu durumda kırmızı eğriye ait numune, maviye göre yaklaşık 3 kat daha hızlı korozyona uğramaktadır. Genel bağlamda mavi eğriye ait numune, kırmızıya göre daha pasif, yani daha korozyon dirençlidir. Kırmızı eğriye ait numune, hem daha negatif potansiyele hem de daha yüksek korozyon akımına sahip olduğu için daha düşük korozyon dayanımı gösterir.



5. BÖLÜM

TARTIŞMA, SONUÇ VE ÖNERİLER

Optik mikroyapı analizleri sonucunda, yüzey boyunca homojen bir dağılım gösteren ve maksimum 41,32 μm 'ye ulaşan bir kaplama kalınlığı belirlenmiştir. Artan sıcaklık ve süreyle birlikte kaplama tabakasının yüzey boyunca homojen dağılımı meydana gelirken kaplama tabaka kalınlığı da az da olsa artmıştır. Kaplama tabakası yüzeyinden alınan mikrosertlik analiz sonucunda kaplama yüzeyinde en düşük sertlik 324,9 HV en yüksek sertlik 458,1 HV elde edilmiştir. Yine süreyle birlikte kaplama tabakası yüzey mikrosertlik değeri artmıştır. Galvaniz kaplamanın, çeliğin korozyon direncini artırdığı açıkça görülmektedir. Bu artışın temel nedenleri şunlardır: Bariyer Koruma; çinko kaplama, çelik yüzeyine oksijen ve nem ulaşmasını fiziksel olarak engeller. Katodik Koruma; çinko, çelikten daha anodiktir. Çinko korozyona uğradığında çelik yüzeyini koruyan bir ürün (çinko oksit ve hidroksit) oluşturur. Uzun Vadeli Koruma; galvaniz kaplama, korozyon hücrelerinin oluşmasını önler ve çeliğin dayanıklılığını artırır. Kaplamasız çelik, dış ortam koşullarında hızla paslanarak yapısal bütünlüğünü kaybederken, galvaniz kaplı çelik uzun süre boyunca güvenli bir kullanım sağlar. Tafel ekstrapolasyonu yöntemiyle yapılan analizler, galvaniz kaplamanın S235JR çeliğinin korozyon direncini önemli ölçüde artırdığını göstermiştir. Bu, çeliğin dayanım süresini arttırmak ve bakım maliyetlerini azaltmak için sıcak daldırma galvanizin etkili bir yöntem olduğunu ortaya koymaktadır. Dolayısıyla, özellikle açık hava koşullarında kullanılan çeliklerin galvanizle kaplanması, endüstriyel uygulamalar için büyük avantaj sağlar. Tafel ekstrapolasyon sonuçları, galvaniz kaplanmış numunede korozyon akım yoğunluğu $1.05 \times 10^{-4} \text{ A/cm}^2$, galvaniz kaplanmamış numunede ise $3.3 \times 10^{-4} \text{ A/cm}^2$ olarak ölçülmüştür. Korozyon potansiyeli galvaniz kaplanmamış numunede daha pozitif değere kayarak -0,864 V'den, -0,745 V'ye yükselmiştir. Mavi eğriye ait numune, kırmızıya göre daha pasif, yani daha korozyon dirençlidir. Kırmızı eğriye ait numune, hem daha negatif potansiyele hem de daha yüksek korozyon akımına sahip olduğu için daha düşük korozyon dayanımı gösterir.

KAYNAKÇA

1. Güven, V., “Sıcak Daldırma Yöntemi İle Sürekli Çinko Kaplama”, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü. 1999.
2. Hatice Varol Özkavak – Teknik Elemanlar İçin Malzeme Bilgisi, Nobel Akademik Yayıncılık, 2023.
3. Nazife, Ö., “Yapı malzemelerinde korozyon ve korozyondan korunma yöntemleri”, Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 26 (3), 1159-1178, 2021.
4. Asgari, H., Toroghinejad, M. R., Golozar, M. A., “Effect of coating thickness on modifying the texture and corrosion performance of hot-dip galvanized coatings”, Current Applied Physics, 9 (1), 59–66, 2009.
5. Chiu, L. H., Yang, C. F., Hsieh, W. C., Cheng, A. S., “Effect of contact pressure on wear resistance of AISI H13 tool steels with chromium nitride and hard chromium coatings”, Surface and Coatings Technology, 154, 282–288, 2002.
6. Asan, N. Ö., “Sıcak iş takım çeliklerinde hasar oluşumu ve önlemleri”, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 2008.
7. Piroğlu, F., Uzg Piroğlu, F., Uzgider, E., Vural, M., Çağlayan, Ö. B., “Geçişten bugüne yapı çeliği ve önemli yapısal özellikleri”, Türkiye Mühendislik Haberleri, Sayı: 426, 2003.
8. Türkiye Standardları Enstitüsü, “Çeliklerin sınıflandırılması ve özellikleri”, TSE Yayını, Ankara, 2020.
9. Industrial Galvanizers Corporation Pty Ltd, “Delamination of Galvanized Coatings”, Industrial Galvanizers Corporation Report, No. 27, 2001.

10. Baycık, H., Koltuk, F., Müftüoğlu, F., “Galvanizli Çeliklerin Mikroyapısı”, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü, İmalat ve Konstrüksiyon ABD, 2003.
11. Elkoca, O., “Silisyum İçerikli Çeliklerde Mekanik Yüzey İşlemlerinin Sıcak Daldırma Kaplama Davranışına Etkisi”, Yıldız Teknik Üniversitesi Dergisi, 2 (Ayrı Baskı), 1996.
12. Galder, “Galvaniz Dünyası”, Galder, <https://www.galder.org.tr/wp-content/uploads/2022/04/galvaniz-dunyasi-31.pdf>, Erişim Tarihi 24 Nisan 2025.
13. Yılmaz, A., Demir, M., “Çeliklerde Mikrosertlik ve Mekanik Özelliklerin İncelenmesi”, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Dergisi, 12 (3), 150-160, 2020.
14. Kumar, S., Singh, R., “Effect of heat treatment on microstructure and mechanical properties of stainless steel”, Materials Science and Engineering A, 732, 112-120, 2018.
15. Sailender, M., Kumar, P., Singh, R., “Prediction and comparison of the dilution and heat affected zone in submerged arc welding of low carbon alloy steel joints”, Measurement, 141, 412-421, 2019.
16. Aksöz, S., Ada, H., Fındık, T., Çetinkaya, C., Bostan, B., Candan, İ., “The investigation of effect of welding process on the microstructure and mechanical properties of API 5L X65 steel welded with electric arc welding method”, El-Cezeri Journal of Science and Engineering, 4 (1), 2017.
17. Borusan Yayınları, Metallerin Korozyondan Korunması, İstanbul, s. 12-25, 1981.
18. İrizalp, S., “Çeliklerin Sınıflandırılması ve Standart Gösterimi”, Celal Bayar Üniversitesi, Ders Notu, s. 11, 2021.

19. Geduld, H. H., “Surface Cleaning, Finishing and Coating”, Metals Handbook, Ninth Edition, Vol. 5, Metals Park, Ohio, 1990.
20. Çelik Metal Sanayi ve Ticaret Ltd. Şti., “Çelik Malzemelere Genel Bakış”, Makine & Metal Teknolojileri, s. 100–101, İstanbul, 2006.
21. Kayalı, E. S., Toptan, F., “Galvaniz Kaplama Yöntemlerinin Mikro Yapı ve Mekanik Özellikler Üzerine Etkisi”, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji, 6 (3), 421–430, 2018.
22. Fukuda, Y., Yamamoto, K., Nishimura, T., “Growth Kinetics of Intermetallic Layers Formed During Hot-Dip Galvanizing”, Surface and Coatings Technology, 204 (12–13), 2050–2056, 2010.
23. Habib, M., Bhat, R. U., Wani, M. F., “Surface Morphology and Performance Analysis of Hot-Dip Galvanized Coatings”, Materials Today: Proceedings, 18, 1975–1980, 2019.
24. Kim, Y., Lee, S., Han, Y., “Effects of Immersion Time on Morphology and Thickness of Hot-Dip Galvanized Coatings”, Journal of Materials Processing Technology, 213 (4), 599–604, 2013.
25. Singh, R. K., Patel, V. R., Rao, A. G., “Electrochemical Behavior of Hot Dip Galvanized Steel in Marine Environment”, Materials Performance and Characterization, 7 (6), 1232–1243, 2018.
26. Zhou, Y., Li, J., “Mechanical and Corrosion Characteristics of Hot-Dip Galvanized Coatings”, Materials Chemistry and Physics, 191, 1–8, 2017.
27. Ziewiec, A., Gancarz, T., Tofil, S., “Characterization of Zinc Coatings Obtained by Hot-Dip Galvanizing”, Archives of Metallurgy&Materials, 60(4), 3031-3036, 2015.

28. T.C. Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı, “Galvan-1”, <https://www.csgeb.gov.tr/Media/nkfgeb4fr/galvan1.pdf>, Erişim Tarihi 18 Nisan 2025.
29. Davis, J. R., “Zinc and Zinc Alloys,” Surface Engineering for Corrosion and Wear Resistance, ASM International, Materials Park, Ohio, s. 321-350, 2001.
30. Kaya, H., Yılmaz, R., Uysal, M., “Sıcak Daldırma Galvanizleme ile Çinko Kaplanan Çeliklerin Mikro Yapısal ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi”, Journal of Materials Research, 29 (12), 1372-1380, 2014.
31. Gutiérrez, M., Ramos, L., Pérez, J., “Influence of Steel Composition on the Formation of Zinc Coatings by Hot-Dip Galvanizing”, Surface and Coatings Technology, 201 (8), 4829-4835, 2007.
32. Sarıkaya, M., “Galvaniz Kaplamaların Çelik Yüzeyindeki Etkileri ve Faz Oluşumu”, Metalurji Dergisi, 48 (1), 33-40, 2011.
33. Kaya, A., Yıldırım, M., “Galvaniz Kaplamaların Mikroyapı Özellikleri ve Korozyon Davranışı”, Metalurji Dergisi, 147 (4), 18-24, 2012.
34. Singh, D., Kumar, P., Rai, R., “Characterization of Hot-Dip Galvanized Coatings on Steel”, Surface and Coatings Technology, 276, 503-510, 2015.
35. Zhang, X., Hot-Dip Galvanizing of Steel Structures, Cilt 1, Woodhead Publishing, s. 1-250, 2011.
36. Türk Standartları Enstitüsü, *TS EN ISO 1461:2009 – Metallerin Sıcak Daldırma ile Galvaniz Kaplanması-Bitmiş Ürünler İçin Gereklilikler ve Deney Yöntemleri*, Cilt 3, s. 1-16, 2009.

37. Koleva, D. A., van Breugel, K., Koenders, E. A. B., “Corrosion behavior of steel in reinforced concrete structures with zinc coating: A review”, *Construction and Building Materials*, 24 (9), 1638–1645, 2010.
38. Çitak, S., Özkul, İ., “Sıcak daldırma galvaniz kaplamanın çelik yüzeyindeki davranışı”, *Metalurji Dergisi*, 51 (2), 33–40, 2016.
39. Kaya, H., Altuncu, E., “Sıcak daldırma galvaniz kaplamaların mikro yapısal ve korozyon özelliklerinin incelenmesi”, *Journal of Materials and Engineering Technologies*, 7 (2), 123–130, 2019.
40. Kaya, Y., Türkmen, M., Bayram, A., “Sıcak daldırma galvaniz kaplamalı çeliklerin sertlik ve yapı özelliklerinin incelenmesi”, *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 8 (1), 50–58, 2020.
41. Gervasi, C. A., et al., “Characterization of intermetallic layers in hot dip galvanized steels”, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 28 (3), 1502–1510, 2019.
42. Sedriks, A. J., *Corrosion of Stainless Steels*, John Wiley & Sons, s. 437, New York, 1996.
43. Jones, D. A., “Principles and Prevention of Corrosion”, Prentice Hall, s. 615, New Jersey, 1996.
44. Fontana, M. G., “Corrosion Engineering, McGraw-Hill Education, Cilt 1 s. 1-900, New York, 2005.
45. Shreir, L. L., Jarman, R., Burstein, G. T., “Corrosion: Metal/Environment Reactions”, 3rd ed., Elsevier Science, Oxford, s. 130-132, 1994.