



**T.C.  
DÜZCE ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**GÖMÜLÜ ANKRAJ MALZEMELERİNİN KOROZYON  
MEKANİZMASININ İNCELENMESİ**

**VOLKAN AKMAZ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
İMALAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**DANIŞMAN  
DOÇ. DR. MENDERES KAM**

**DÜZCE, 2022**

**T.C.**  
**DÜZCE ÜNİVERSİTESİ**  
**LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**GÖMÜLÜ ANKRAJ MALZEMELERİNİN KOROZYON**  
**MEKANİZMASININ İNCELENMESİ**

Volkan AKMAZ tarafından hazırlanan tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından Düzce Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

**Tez Danışmanı**

Doç. Dr. Menderes KAM

Düzce Üniversitesi

**Jüri Üyeleri**

Doç. Dr. Menderes KAM

Düzce Üniversitesi

Prof. Dr. Hüsnü GERENGİ

Düzce Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Oğuz KOÇAR

Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi

Tez Savunma Tarihi: 30/06/2022

## BEYAN

Bu tez çalışmasının kendi çalışmam olduğunu, tezin planlanmasından yazımına kadar bütün aşamalarda etik dışı davranışımın olmadığını, bu tezdeki bütün bilgileri akademik ve etik kurallar içinde elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara kaynak gösterdiğimi ve bu kaynakları da kaynaklar listesine aldığımı, yine bu tezin çalışılması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını beyan ederim.

30 Haziran 2022

(İmza)

Volkan AKMAZ



## TEŞEKKÜR

Bu tezin oluşturulmasında vermiş olduğu destek ve yardımlardan dolayı sayın hocam Doç. Dr. Menderes Kam’a teşekkürlerimi sunarım.

Çalışma konusundan deneysel planlamaya kadar çalışmanın her aşamasında yol gösterici ve destekleyici olan Fibrobeton Yönetim Kurulu Üyesi Sn. Muhammed Maraşlı’ya sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Korozyon konusunda farkındalık yaratan Fibrobeton Ar-Ge Merkezi Danışman hocamız Prof. Dr. Hüsnü Gerengi’ye teşekkürlerimi sunarım. Çalışma süresince desteğini esirgemeyen Kader Dikmen’e ve tüm Fibrobeton Ar-Ge Merkezi çalışanlarına tek tek teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışma; Fibrobeton Yapı Elemanları San. ve İnşaat A.Ş. Ar-Ge Merkezi ile Düzce Üniversitesi arasında 08.02.2021 tarih ve E-11414540-903.07.02-12299 sayılı işbirliği sonucu ede edilmiştir.

En zor zamanlarımda hep yanımda olan sevgili eşim ve oğluma çok teşekkür ederim.

**30 Haziran 2022**

**Volkan AKMAZ**

# İÇİNDEKİLER

## Sayfa No

|                                                    |      |
|----------------------------------------------------|------|
| ŞEKİL LİSTESİ .....                                | ix   |
| ÇİZELGE LİSTESİ .....                              | xi   |
| KISALTMALAR.....                                   | xii  |
| SİMGELER .....                                     | xiii |
| ÖZET .....                                         | xiv  |
| ABSTRACT .....                                     | xv   |
| 1. GİRİŞ .....                                     | 1    |
| 2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI .....                     | 3    |
| 2.1. GÖMÜLÜ ANKRAJLAR .....                        | 3    |
| 2.1.1. Sertleşmiş Betona Yapılan Ankrajlar .....   | 4    |
| 2.1.2. Taze Betona Yapılan Ankrajlar .....         | 6    |
| 2.2. KOROZYON .....                                | 7    |
| 2.2.1. Korozyonun Tanımı .....                     | 7    |
| 2.2.2. Korozyonun Önemi .....                      | 7    |
| 2.2.3. Korozyon Oluşumu .....                      | 9    |
| 2.2.3.1. Elektro Kimyasal Korozyon Oluşumu .....   | 10   |
| 2.2.3.2. Kimyasal Korozyon Oluşumu .....           | 10   |
| 2.2.4. Korozyon Türleri .....                      | 11   |
| 2.2.4.1. Tek Düzey Üniform Korozyon .....          | 11   |
| 2.2.4.2. Oyuklanma Çukurcuk Korozyonu .....        | 11   |
| 2.2.4.3. Aralık Korozyonu .....                    | 13   |
| 2.2.4.4. Çatlak Korozyonu .....                    | 13   |
| 2.2.4.5. Galvanik Korozyon .....                   | 14   |
| 2.2.4.6. Taneler Arası Korozyon .....              | 15   |
| 2.2.4.7. Gerilmeli (Stres) Korozyon .....          | 16   |
| 2.2.4.8. Aşınmalı Korozyon .....                   | 17   |
| 2.2.4.9. Atmosferik Korozyon .....                 | 17   |
| 2.2.4.10. Bakteriyel Mikrobiyolojik Korozyon ..... | 20   |
| 2.2.4.11. Yüksek Sıcaklık Korozyonu .....          | 21   |
| 2.2.4.12. Erozyon Korozyonu .....                  | 21   |
| 2.2.4.13. Beton İçindeki Çeliğin Korozyonu .....   | 22   |
| 2.2.5. Korozyon Hızı Belirleme Yöntemleri .....    | 24   |
| 2.2.5.1. Kütle Kaybı Yöntemi .....                 | 25   |
| 2.2.5.2. Elektrokimyasal Yöntemler .....           | 25   |
| 2.2.6. Korozyon Tespit Yöntemleri .....            | 27   |
| 2.2.7. Korozyona Karşı Alınacak Önlemler .....     | 30   |
| 2.2.7.1. Malzeme Seçimi .....                      | 30   |
| 2.2.7.2. Tasarım .....                             | 30   |
| 2.2.7.3. Elektrokimyasal Yöntemler .....           | 31   |
| 2.2.7.4. Metalik Kaplama Yöntemleri .....          | 31   |
| 3. MALZEME ve METOT .....                          | 35   |
| 3.1. DENEYLERDE KULLANILAN MALZEME .....           | 35   |
| 3.2. TESTLER İÇİN KULLANILAN DENEY DÜZENEGİ .....  | 36   |

|                                                                                            |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.3. YÖNTEM .....                                                                          | 38 |
| 4. BULGULAR.....                                                                           | 40 |
| 4.1. ELEKTRO GALVANİZLİ VE GALVANİZSİZ ÇELİĞİN KOROZYON<br>MEKANİZMASININ İNCELENMESİ..... | 40 |
| 4.1.1. OCP Analizi .....                                                                   | 40 |
| 4.1.2. EIS Analizi .....                                                                   | 41 |
| 4.1.3. TP Analizi .....                                                                    | 43 |
| 4.1.4. Optik Görüntüleme Analizi.....                                                      | 45 |
| 4.2. ASİT YAĞMURLARININ OLUŞTURDUĞU KOROZYON<br>MEKANİZMASININ İNCELENMESİ.....            | 46 |
| 4.2.1. OCP Analizi .....                                                                   | 46 |
| 4.2.2. EIS Analizi .....                                                                   | 47 |
| 4.2.3. TP Analizi .....                                                                    | 49 |
| 4.2.4. Optik Görüntüleme Analizi.....                                                      | 50 |
| 4.3. SICAK DALDIRMA GALVANİZLİ ST37 ÇELİĞİNİN KOROZYON<br>MEKANİZMASININ İNCELENMESİ.....  | 51 |
| 4.3.1. EIS Analizi .....                                                                   | 51 |
| 4.3.2. SEM ve EDS Analizleri.....                                                          | 52 |
| 4.3.3. OP Analizi.....                                                                     | 55 |
| 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....                                                               | 58 |
| 6. KAYNAKLAR.....                                                                          | 60 |
| ÖZGEÇMİŞ .....                                                                             | 67 |

## ŞEKİL LİSTESİ

|                                                                                                                                                                         | <u>Sayfa No</u> |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|
| Şekil 2.1. Bağ tipi ankrajlar [21].....                                                                                                                                 | 4               |
| Şekil 2.2. Kimyasal ankraj [22] .....                                                                                                                                   | 5               |
| Şekil 2.3. Harç tipi ankraj [22] .....                                                                                                                                  | 6               |
| Şekil 2.4. Taze betona uygulanan ankraj tipleri [21].....                                                                                                               | 6               |
| Şekil 2.5. Betonda korozyon çatlakları [27] .....                                                                                                                       | 8               |
| Şekil 2.6. Korozyon mekanizması [29]. .....                                                                                                                             | 10              |
| Şekil 2.7. Uniform korozyon [29].....                                                                                                                                   | 11              |
| Şekil 2.8. Çukurcuk korozyonu [29].....                                                                                                                                 | 12              |
| Şekil 2.9. Çukurcuk korozyonu oluşum mekanizması [31].....                                                                                                              | 13              |
| Şekil 2.10. Aralık korozyonu mekanizması ve örneği [44]. .....                                                                                                          | 13              |
| Şekil 2.11. Çatlak korozyonu [29].....                                                                                                                                  | 14              |
| Şekil 2.12. Galvanik korozyon [35].....                                                                                                                                 | 15              |
| Şekil 2.13. Galvanik korozyon örnekleri [29] .....                                                                                                                      | 15              |
| Şekil 2.14. Taneler arası korozyon [36].....                                                                                                                            | 16              |
| Şekil 2.15. Gerilmeli (stres) korozyonu örneği [29] .....                                                                                                               | 17              |
| Şekil 2.16. Kazımalı korozyon nedeni ile aşınma [38].....                                                                                                               | 17              |
| Şekil 2.18. Atmosferik korozyon oluşumu [32]. .....                                                                                                                     | 19              |
| Şekil 2.19. Rüzgâr hızı ve yönünün etkisi [33].....                                                                                                                     | 20              |
| Şekil 2.20. Mikrobiyolojik korozyon mekanizması [47].....                                                                                                               | 21              |
| Şekil 2.21. Isı değiştiricilerde yüksek sıcaklık korozyonu [48].....                                                                                                    | 21              |
| Şekil 2.22. Erozyon korozyonu [29]. .....                                                                                                                               | 22              |
| Şekil 2.23. Beton içindeki çeliğinin korozyona uğraması [45].....                                                                                                       | 23              |
| Şekil 2.24. Korozyona uğrayan çelik sonrası betonda oluşan çatlak-kırılma [46]. .....                                                                                   | 24              |
| Şekil 2.25. Uzun süre korozyona uğrayan çeliğin ufalanması [46]. .....                                                                                                  | 24              |
| Şekil 2.26. Elektrokimyasal korozyon ölçme yöntemleri [53]. .....                                                                                                       | 25              |
| Şekil 2.27. Lineer polarizasyon yöntemiyle polarizasyon direncinin ( $R_p$ ) bulunması... ..                                                                            | 26              |
| Lineer Polarizasyonda hataların sebepleri .....                                                                                                                         | 27              |
| Şekil 2.28. Ultrasonik muayene [60] .....                                                                                                                               | 28              |
| Şekil 2.29. Manyetik parçacık testi [61] .....                                                                                                                          | 29              |
| Şekil 2.30. Penetrant testi [35].....                                                                                                                                   | 30              |
| Şekil 2.31. Püskürtme yöntemi [65] .....                                                                                                                                | 32              |
| Şekil 2.32. Elektrolit galvaniz havuzu ve anot görevi yapan çinko külçe [66]. .....                                                                                     | 33              |
| Şekil 2.33. Sıcak daldırma galvaniz kaplama prosesi [68]. .....                                                                                                         | 34              |
| Şekil 3.1. Testlerde kullanılan St37 çelik numunelerin ebatları [1, 2, 3]. .....                                                                                        | 36              |
| Şekil 3.2. Elektrokimyasal testler için kullanılan deney düzeneği [1, 2, 3].....                                                                                        | 37              |
| Şekil 3.3. Ters metalürji mikroskobu [1, 2, 3].....                                                                                                                     | 37              |
| Şekil 3.4. Elektrokimyasal deneylerin yapıldığı düzenek [1, 2, 3]. .....                                                                                                | 38              |
| Şekil 4.1. (a) Galvanizsiz ve (b) galvanizli çalışma elektrotların süreye bağlı olarak değişimi [1]. .....                                                              | 41              |
| Şekil 4.2. EIS ölçümleri sonucunda Galvanizsiz numuneden elde edilen Nyquist diyagramı [1]. .....                                                                       | 42              |
| Şekil 4.3. EIS ölçümleri sonucunda Galvanizli numuneden elde edilen Nyquist diyagramı [1]. .....                                                                        | 42              |
| Şekil 4.4. (a) Galvanizsiz ve (b) elektro galvanizli St37 kalite ankraj numunesinin %3,5 NaCl şartları altında korozyon mekanizmasının EIS yöntemi ile analizi [1]..... | 43              |

|                                                                                                                                                                                                                                                 |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 4.5. (a) St37 kalite Galvanizsiz ve (b) St37 kalite elektro galvaniz kaplı çelik numunelerinin %3,5 NaCl ortamında korozyon mekanizmasının TP yöntemi ile bulunan Tafel diyagramları, (c) Bulunan iki diyagram karşılaştırılması [1]..... | 44 |
| Şekil 4.6. Deneyden önce; (a) St37 kalite galvanizsiz çelik ve (b) St37 kalite elektro galvaniz kaplı çelik [1].....                                                                                                                            | 45 |
| Şekil 4.7. Deneyden sonra; (a) St37 kalite galvanizsiz çelik ve (b) St37 kalite elektro galvaniz kaplı çelik [1].....                                                                                                                           | 46 |
| Şekil 4.8. Galvanizsiz ve elektro galvanizli ankraj elemanlarının OCP ölçümleri [3]...                                                                                                                                                          | 46 |
| Şekil 4.9. (a) Galvanizsiz ve (b) elektro galvanizli ankraj elemanının yapay asit yağmurunda korozyonunun EIS yöntemiyle bulunan değerlerin analizi [3] .                                                                                       | 47 |
| Şekil 4.10. Galvanizsiz ve elektro galvanizli ankraj elemanlarının EIS-Nyquist diyagramları [3].....                                                                                                                                            | 48 |
| Şekil 4.11. Galvanizsiz ve elektro galvanizli ankraj elemanlarının TP diyagramları [3]. ....                                                                                                                                                    | 49 |
| Şekil 4.12. Deneyden önce; St37 kalite galvanizsiz çelik (a), St37 kalite elektro galvaniz kaplı çelik (b) [3]. ....                                                                                                                            | 51 |
| Şekil 4.13. Deneyden sonra; St37 kalite galvanizsiz çelik (a), St37 kalite elektro galvaniz kaplı çelik (b) [3]. ....                                                                                                                           | 51 |
| Şekil 4.14. Elektro-galvanizli ve HDG St37 çeliğinin %3,5 NaCl çözeltisi içinde OCP ölçümü [2]. ....                                                                                                                                            | 52 |
| Şekil 4.15. Sıcak daldırma galvanizli St37 çeliğinin nyquist diyagramı [2]. ....                                                                                                                                                                | 52 |
| Şekil 4.16. Sıcak daldırma galvanizli St37 çeliğinin SEM görüntüleri (EIS ölçümü öncesi) [2].....                                                                                                                                               | 53 |
| Şekil 4.17. Sıcak daldırma galvanizli St37 numunesinin genel EDS analizi (EIS ölçümünden önce) [2].....                                                                                                                                         | 53 |
| Şekil 4.18. Sıcak daldırma galvanizli St37 numunenin SEM görüntüleri (EIS ölçümünden sonra) [2]. ....                                                                                                                                           | 54 |
| Şekil 4.19. Sıcak daldırma galvanizli St37 numunesinin genel EDS analizi (EIS ölçümünden sonra) [2]. ....                                                                                                                                       | 54 |
| Şekil 4.20. Sıcak daldırma galvanizli St37 numunesinin OP analizi (EIS ölçümünden önce) [2]. ....                                                                                                                                               | 55 |
| Şekil 4.21. EIS ölçümü öncesi yüzey pürüzlülüğü değişimi [2].....                                                                                                                                                                               | 56 |
| Şekil 4.22. Sıcak daldırma galvanizli St37 numunesinin OP analizi (EIS ölçümünden sonra) [2]. ....                                                                                                                                              | 56 |
| Şekil 4.23. EIS ölçümünden sonra yüzey pürüzlülüğü değişimi [2]. ....                                                                                                                                                                           | 57 |

## ÇİZELGE LİSTESİ

### Sayfa No

|         |                                                                                                                                                |    |
|---------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Çizelge | 3.1. St37 metalinin kimyasal bileşimi. ....                                                                                                    | 52 |
| Çizelge | 4.1. Galvanizsiz St37 ankraj pad elemanının %3,5 NaCl ortamında korozyonunun EIS yöntemiyle elde edilen analiz sonuçları. ....                 | 59 |
| Çizelge | 4.2. Elektro galvanizli St37 ankraj pad elemanının %3,5 NaCl ortamında korozyonunun EIS yöntemiyle elde edilen analiz sonuçları. ....          | 59 |
| Çizelge | 4.3. Galvanizsiz ve elektro galvanizli ankraj pad elemanının %3,5 NaCl ortamında korozyonunun TP yöntemiyle elde edilen analiz sonuçları. .... | 60 |
| Çizelge | 4.4. Galvanizsiz ankraj pad elemanının yapay asit yağmuru ortamında korozyonunun EIS yöntemiyle elde edilen analiz sonuçları. ....             | 64 |
| Çizelge | 4.5. Elektro galvanizli ankraj pad elemanının yapay asit yağmuru ortamında korozyonunun EIS yöntemiyle elde edilen analiz sonuçları. ....      | 64 |
| Çizelge | 4.6. Elektro galvanizli ankraj pad elemanının yapay asit yağmuru ortamında korozyonunun EIS yöntemiyle elde edilen analiz sonuçları. ....      | 65 |

## KISALTMALAR

|      |                                                 |
|------|-------------------------------------------------|
| OCP  | Açık Devre Potansiyelleri                       |
| DEIS | Dinamik Elektrokimyasal Empedans Spektroskopisi |
| EDS  | Enerji Dağılım Spektroskopisi                   |
| EIS  | Elektrokimyasal Empedans Spektroskopisi         |
| GSMH | Gayri Safi Milli Hasıla                         |
| SCC  | Gerilmeli Korozyon                              |
| GRC  | Glassfibre Reinforced Concrete                  |
| HDG  | Hot Dip Galvanized                              |
| LP   | Lineer Polarizasyon                             |
| NBS  | National Buruea of Standart                     |
| TP   | Potansiyodinamik Polarizasyon                   |
| SEM  | Taramalı Elektron Mikroskobu                    |

## SİMGELER

|                        |                                   |
|------------------------|-----------------------------------|
| $\Delta I$             | Akım Değişikliği                  |
| AC                     | Alternatif Akım                   |
| Al                     | Aluminyum                         |
| $\beta_a$ ve $\beta_c$ | Anodik ve Katodik Tafel Sabitleri |
| N                      | Azot                              |
| Zn                     | Çinko                             |
| $Zn(OH)_2$             | Çinko Hidroksit                   |
| ZnO                    | Çinko Oksit                       |
| $R_s$                  | Çözelti Direnci                   |
| Rad                    | Daldırma Galvaniz Kaplama Direnci |
| Fe                     | Demir                             |
| DC                     | Doğrusal Akım                     |
| $R_p$                  | Eğim                              |
| P                      | Fosfor                            |
| Ag                     | Gümüş                             |
| AgCl                   | Gümüş Klorür                      |
| Hz                     | Hertz                             |
| $H_2S$                 | Hidrojen Sülfür                   |
| $OH^-$                 | Hidroksit                         |
| Rdl                    | Kaplama Direnci                   |
| C                      | Karbon                            |
| Cl                     | Klor                              |
| $I_{corr}$             | Korozyon Akım Yoğunluğu           |
| $E_{corr}$             | Korozyon Potansiyeli              |
| S                      | Kükürt                            |
| Mn                     | Mangan                            |
| MHz                    | Megahertz                         |
| m                      | Metre                             |
| $\mu$                  | Mikron                            |
| mV                     | Milivolt                          |
| $NO_3^-$               | Nitrat                            |
| $\Omega$               | Ohm                               |
| $\Delta E$             | Potansiyel Fark                   |
| Q                      | Sabit Faz Ögesi                   |
| sn                     | Saniye                            |
| cm                     | Santimetre                        |
| Si                     | Silisyum                          |
| NaCl                   | Sodyum Klorür                     |
| $SO_4^{2-}$            | Sülfat                            |
| $R_{ct}$               | Yük Transfer Mukavemeti           |
| n                      | Yüzey Pürüzlülüğü                 |
| %                      | Yüzde                             |

## ÖZET

### GÖMÜLÜ ANKRAJ MALZEMELERİNİN KOROZYON MEKANİZMASININ İNCELENMESİ

Volkan AKMAZ

Düzce Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Doç. Dr. Menderes KAM

Temmuz 2022, 81 sayfa

St37 kalite çelikler, otomotiv ve inşaat malzemesi olarak hemen hemen her türlü sektörde çok yaygın kullanım alanlarına sahiptir. Bunun başlıca nedeni olarak performans derecesi ve maliyeti gösterilebilir. Hazırlanan bu çalışma ile St37 çeliğinin üç aşamalı olarak farklı şartlar altında korozyon mekanizmasının incelenmesi amaçlanmıştır. Bu aşamalar sırasıyla; Elektro galvanizli veya galvanizsiz çeliğin korozyon mekanizması, asit yağmurları etkisinde korozyon mekanizması ve sıcak daldırma galvanizli St37 çeliğinin korozyon mekanizması olarak incelenmiştir. Üç aşamalı olarak yapılan deneysel çalışmada St37 çeliğinin korozyona karşı göstermiş olduğu davranışlar; Elektrokimyasal Empedans Spektroskopisi (EIS), Potansiyodinamik Polarizasyon (TP), Açık Devre Potansiyelleri (OCP), Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM), Enerji Dağılım Spektroskopisi (EDS) ve Optik Görüntüleme Analizi kullanılarak araştırılmıştır. Sonuç olarak, elde edilen bulgular ayrıntılı bir şekilde analiz edilmiş ve karşılaştırılmıştır. Buna göre, sıcak daldırma galvaniz ve elektro galvaniz işleminin korozyon direncini artırdığı ve daha etkili bir koruma sağladığı gözlenmiştir.

**Anahtar sözcükler:** Ankraj elemanı, Elektro galvaniz, Korozyon, Sıcak daldırma galvaniz, St37.

## **ABSTRACT**

### **INVESTIGATION OF THE CORROSION MECHANISM OF EMBEDDED ANCHOR MATERIALS**

Volkan AKMAZ

Düzce University

Graduate School of Natural and Applied Sciences, Manufacturing Engineering

Master's Thesis

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Menderes KAM

June 2022, 81 pages

St37 quality steels have very common usage areas in almost all kinds of sectors as automotive and construction materials. The main reason for this is the degree of performance and cost. In this study, it is aimed to examine the corrosion mechanism of St37 steel under different conditions in three stages. These stages are respectively; the corrosion mechanism of electro galvanized or non-galvanized steel, the corrosion mechanism under the influence of acid rain and the corrosion mechanism of hot-dip galvanized St37 steel were investigated. Behaviors of St37 steel against corrosion in the three-stage experimental study; Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS), Potentiodynamic Polarization (TP), Open Circuit Potentials (OCP), Scanning Electron Microscope (SEM), Energy Distribution Spectroscopy (EDS) and Optical Imaging Analysis were investigated using. As a result, the obtained findings were analyzed and compared in detail. Accordingly, it has been observed that hot-dip galvanization and electro-galvanization process increase corrosion resistance and provide more effective protection.

**Keywords:** Anchor element, Electro galvanized, Corrosion, Hot-dip galvanized, St37.

## 1. GİRİŞ

Günümüzde en çok kullanılan sanayi malzemelerinden biri olan St37 kalite çelikler, birçok alanda yapı malzemesi olarak kullanılır. St37 çeliği sıcak üretim ile imal edildikten sonra soğuk çekme yapılarak son haline ulaşır. Bu işlem malzemenin daha dayanıklı hale gelmesini sağlayarak ona yeni özellikler kazandırır. Birçok sektörde yaygın olarak kullanılmasının nedeni maliyet olarak daha ekonomik olmasıdır. Kullanım alanlarını; otomobil parçaları ve beyaz eşya endüstrisi gibi örneklendirebiliriz [1, 4, 5]. Bunların yanında, otomotiv parçaları, makine parçaları ve mil imalatlarında kullanılmaktadır. Yapı çelikleri arasında kaynak mukavemet ve kabiliyetlerinin yüksek olmasının nedeni düşük karbon değerine sahip olmalarıdır. Montaj sırasında ve montajdan sonra kaynak yapımına gereksinimi olan her türlü parça için bu özellikleri neticesinde tercih sebebidir [1].

Cephe panellerinde de kullanılan bu çeliklerin, bağlantı elemanlarının kullanılacağı yere ve görevine göre birçok artısı bulunur. Tüm bağlantılardaki yatay kuvvetleri iletirler. Katmanlar arası yük iletimini sağlayarak sistemi birbirine bağlar ve cephe paneline eğilme ve kayma imkânı sağlamak bu görevler arasında en önemlileridir. Bu tarz cephe panellerindeki bağlantıyı sağlayan elemanların malzeme seçimleri de birbirlerinden farklı olabilmektedir. Bağlantı elemanlarının seçiminde dikkat edilmesi gereken özellikler panelin boyutuna, ağırlığına ve sistemden beklenen güvenilirliğe göre olması gerekir [1, 6, 7, 8]. Panel bağlantı sistemleri, taşınacağı yüke göre farklı tipte olabilir. Panellerde genel olarak vidalı bağlantı, geçmeli bağlantı veya kelepçeli bağlantı ankraj sistemleri kullanılmaktadır [9].

Bu ankraj sistemleri zamanla korozyon etkisine maruz kalırlar. Açık atmosferde metal malzemelerin özelliklerini yitirip kullanılamaz hale gelmesi korozyon nedeniyledir. İnşaat sektöründe ise beton içindeki donatının korozyona uğrayarak dayanımını kaybetmesidir [10]. Betonarme yapılarda çok büyük bir sorun olan korozyon, yapının güvenliğini tehdit etmekte ve büyük zararlar vermektedir. Donatı üzerinde oluşan korozyon, betonda iç gerilmelere neden olmaktadır. Korozyon neticesinde beton da çatlaklar oluşmakta ve sonuç olarak parçalanmaya kadar gitmektedir. Bu durum bütün yapı için olumsuz bir sonuç oluşturmaktadır. Gömülü ankrajın korozyona uğramasında

betonun geçirimsizliği çok önemli bir görev üstlenmektedir. Betonun geçirimsiz olması neticesinde ortamda korozyona neden olacak su vb. zararlı maddeler beton içerisine giremez ve sistem zarar görmemiş olur [2, 11]. Beton ortamı korozyon için çok etkili bir faktördür. Hidroklorik asidin hemen hemen tüm sanayide ve özellikle gıda sektöründe çok yaygın kullanılması neticesinde ve de hava kirliliğinin artmasıyla yükseliş gösteren asit yağmurlarının [2, 12], beton ve donatı sistemlerini korozyona uğrattığını, sisteme zarar verdiğini bilinmektedir [2, 13] . Metal ve çelik alaşımlarından imal edilmiş yapılar, şehir atmosferindeki asit yağmurlarının etkisiyle zaman içerisinde bozulmaya başlamakta ve bu durum korozyonu oluşturmaktadır. Örnek olarak atmosferik korozyon incelendiğinde estetik görünüm olarak kayba ve ayrıca da kalıcı bozulmalara sebep olabilmektedir [2, 14]. Fosil yakıtların kullanımı neticesinde havaya karışan SO<sub>x</sub> ve NO<sub>x</sub> iyonlarının suyla tepkimeye girmesiyle oluşan asit yağmurları, atmosferik korozyonu tetiklemektedir. Bu asitlerin tahrip etkisinin artmasında duman ve toz benzeri kirleticilerinde etkisi büyüktür [2, 15, 16].

Çinko ve çinko alaşımlı kaplamaların kullanıldığı elektro galvaniz ve sıcak daldırma galvanizle işlemleri, çeliği aşındırıcı ortamlardan korumanın maliyet açısından en önemli ve en eski yöntemlerindendir. Sıcak daldırma galvanizleme, çeliği yaklaşık 450 °C sıcaklıkta erimiş bir çinko banyosundan geçirerek bir çinko tabakasıyla demir veya çeliğin kaplanması işlemidir. Sıcak daldırma galvaniz işleminden sonra metal yüzeyinde birden fazla katmandan oluşan çinko tabakası oluşur. Metal, bu tabakalar sayesinde bulunduğu ortamdaki korozyondan uzun süre korunmuş olur [3].

Bu çalışmada, elektro galvaniz kaplama yapılmış ve hiç kaplama yapılmamış St37 kalite ankraj parçalarının, %3,5 NaCl içeren ortamda gösterdikleri korozyon dirençleri araştırılmıştır. Bunun için Potansiyodinamik Polarizasyon (TP) ve Elektrokimyasal Empedans Spektroskopisi (EIS) yöntemleri kullanılmıştır. Yapay asit yağmurunun ankraj elemanlarına olan koroziv etkisi elektrokimyasal yöntemler kullanılarak araştırılmıştır. Bu çalışmada, EIS, SEM, EDS ve OP gibi yüzey görüntüleme yöntemlerini kullanarak %3,5 NaCl ortamında HDG St37 çeliğinin korozyon davranışını araştırmak amaçlanmıştır. Bu yöntemlerden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.

## 2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

### 2.1. GÖMÜLÜ ANKRAJLAR

Ankrajlar yapıdaki mevcut elemanlar ile yeni elemanlar arasında bağlantı sağlamak için kullanılırlar. Genellikle tasarım, uygulama kolaylığı ve maliyeti nedeniyle kimyasal ankrajlar tercih edilmektedir. Yapı ve inşaat sanayisinde imalatların düzgün şekilde olması için farklı tip materyaller bulunmaktadır. Bu materyallerin ve donatının birbirine yapışması ile beraber bir şekilde çalışması aderans olarak adlandırılır. Kimyasal ankrajlarda önemli olan aderanstır. Aderansın tanımını şu şekilde yapabiliriz. Farklı tipteki iki malzemenin birbirine kimyasallar yardımıyla bağlanması ve bir bütünlük gibi çalışmasıdır. Aderans, epoksi, beton ve donatı arasındaki sürtünmeyi karşılamaktadır. Yerleştirilme zamanı ve şekilleri açısından genel olarak “taze betona yapılan ankraj” ve “sertleşmiş betona yapılan ankraj” olarak iki tipte adlandırılmışlardır. Sertleşmiş betona yapılan ankrajların kullanım alanı olarak genelde eski yapıların tamir bakım ve güçlendirme işlemleri sayılabilir. Bu sistemin çalışma prensibi olarak eski taşıyıcı sisteme yeni betonlar eklenmesine fırsat verecek şekilde yapılmaktadır. İki tipi vardır. Birincisi mevcut betonarme yapıya açtığımız deliğe konulan ve ilerleyerek genişleyen, betona sürtünme kuvvetleri oluşturarak yükü aktaran tiptir. İkincisi ise betonarme yapıya açtığımız deliğe yerleştirildikten sonra aradaki boşluğun kimyasal bir madde ile doldurulduğu tiptir [17].

Kullanılan kimyasal maddeler olarak da bağlayıcı olarak polimer kullananlar ve çimento esaslı döküm harcı kullananlar olmak üzere farklı türlere ayrılabilir [18].

Epoksi ankraj elemanlarında en çok kullanılan bağlayıcı maddeler polimer polyester ve vinilesterdir. Fakat en yaygın kullanım polimerdir. Sistem uygulamasında belirli karışım oranlarında belirlenmiş sertleştirici polimer ile karıştırılarak açılmış olan deliğe doldurulur. Düzgün bir çalışma sağlanması adına iyi bir karışım ile ve de açılmış olan deliklerin düzgün ve eksiksiz doldurulmaları sağlanmalıdır. Bu sayede ankraj elemanlarının sisteme iyi bir şekilde sarılması gerçekleşir. Döküm harçlarının içindeki kumdan dolayı karıştırılmalıdır.

Sonradan yerleştirilen ankraj sistemlerinde beton dayanım ve aderans kapasitesi, taze betona yerleştirilen ankraj sistemlerinden %10 oranında daha azdır [19]. Kimyasal ankraj

sistemlerinin en çok tercih edilmesinin sebebi, maliyetlerinin diğerlerine göre uygun olması ve uygulama alanındaki kolaylığıdır [20]. Uygulamada ankrajlar üzerlerine gelen çekme kuvvetlerini montaj yapıldıkları betonarme yapıya bu ankraj'ın derinliğiyle ve boyuyla alakalı aderans sayesinde iletirler.

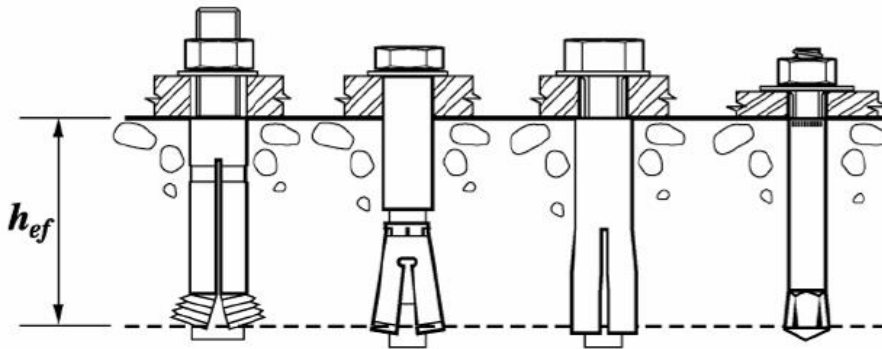
Ankraj yerleşiminde serbest kenar mesafesi ve iki ankraj arası mesafesine dikkat edilmesi gerekmektedir. Bu ankrajlar serbest kenara çok yakın olmamalıdır. Bu durum betonda çatlama ve göçme oluşturabilir. İki ankraj arası mesafe de yeterli olmadığı durumda, bir ankraj'ın göçmesi diğer ankrajı da etkileyebilmektedir.

Ankraj ve çelik bağlayıcılık yönünde birbiri ile yakından ilişkilidir. Eğer çelik dayanıklı değilse bu durum ankrajı da doğrudan etkiler. Çünkü ankraj sert ve dayanıklı yüzeylerde işlev kazanır. Çeliğin dayanıklı olması demek ankrajın her yüzeyde rahatlıkla kullanılma anlamını taşır. Bu da bağlayıcılık yönünden ankrajı olumlu etkiler. Ankraj bugün yapısal olan her alanda kullanılan bir malzemedir. Özellikle betondan gelen bağlayıcılıkla daha çok kullanım alanı bulur. İnşaat alanında önemli yapı malzemelerinden birini oluşturur. Dayanıklı ve sağlıklı yapılar için ön plana çıkan inşaat malzemelerinden birini oluşturur.

Gömülü ankrajları, sertleşmiş betona uygulanan ankrajlar ve beton tazeyken yapılan ankrajlar olmak üzere iki başlıkta ele alabiliriz.

### 2.1.1. Sertleşmiş Betona Yapılan Ankrajlar

Donmuş beton üzerine uygulanacak ankrajlar, betona sonradan açılmış deliklere kimyasal bağlayıcı kullanılarak çelik donatı ekilen ankrajlardır. Bağ tipi ankrajlar Şekil 2.1'de gösterilmiştir.



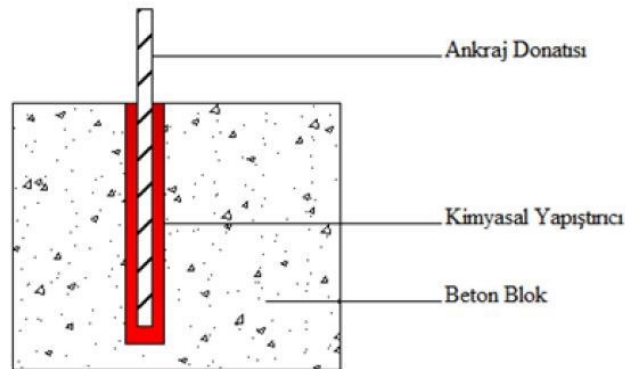
Şekil 2.1. Bağ tipi ankrajlar [21].

Kimyasal ankraj betonarme yapıların sürekliliklerini artırmak amacıyla gerçekleştirilen hafif, orta ve ağır yüklerin aktarılmasında kullanılırlar. Kimyasal ankraj harçları

polyester, epoksi akrilat, saf epoksi ve çimento esaslı olabilir. Kimyasal ankrajlar, Şekil 2.2’de gösterildiği üzere seçilmiş ankraj çubuğu, kimyevi bağlayıcı ve beton ögesinden oluşmaktadır. Kimyasal ankraj harçları arasında en çok kullanılanı epoksidir.

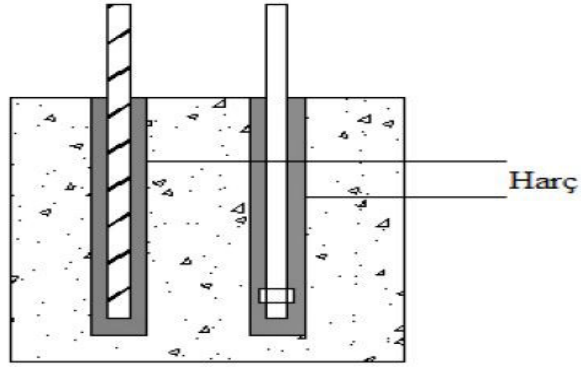
Uygulamada önceden hazırlanmış beton, yeni hazırlanan ile karıştırılmıştır. Bu yapı sayesinde öncekinden daha kuvvetli bir yapı oluşur. Farklı kimyevi malzemeler kullanılarak karmaşık bir işlem yapılır. Bu özelliği sayesinde kullanım kolaylık sağlamaktadır. Özellikle önceden yapılan ve artık eskimiş binaların bozulan kısımlarının tamiri amaçlanmaktadır. İçine katılan farklı tipteki malzemeler ile öncekinden güçlü hale gelir. Bu sebeplerden dolayı işin ehli insanlar tarafından ve dikkatli bir şekilde yapılmalıdır. Kimyasal ankraj işçiliği gerçekten özenilmesi ve ciddiye alınması gereken bir işlemdir [22].

Betona açılacak delikler uygulama yerine göre belirlenir. Açılan bu deliklere hazırlanan kimyasal maddeler konulur ve ankraj elemanı yerine yerleştirilir. Bu işlem sonrasında kimyasallar katılaşp donacağı için önceden yapılması gereken hesaplar doğru bir şekilde yapıp uygulamaya geçilmelidir. Bu kimyasal ankrajlar eski kolonlara yapılan takviye imalatlarında da yaygın olarak kullanılmaktadır. O sebepten hazırlanmaları ve karışımları çok kuvvetli olmalıdır. Uygulama alanında imalatçıya farklı seçenekler sunması yönü ile uygulama sahası oldukça geniştir. Uygulama sonuçları değerlendirildiğinde işin ehli insanlar tarafından yapılmaları kalite ve güveni artırır [22].



Şekil 2.2. Kimyasal ankraj [22].

Şekil 2.3’de görüldüğü üzere harçlı ankrajın farkı, kimyasal yapıştırıcı yerine harç kullanılmasıdır. Harç tipi ankrajlar her türlü sanayi, makine ve ekipmanın montaj uygulamalarında ve güçlendirme işlemlerinde kullanılabilir.

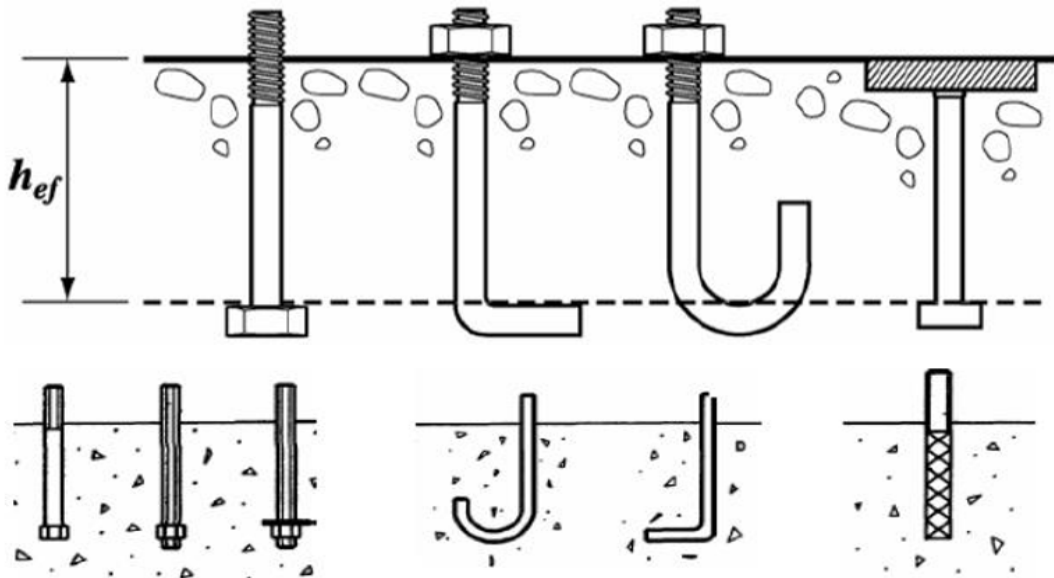


Şekil 2.3. Harç tipi ankraj [22].

Bu uygulamada kimyasal ankraj tipinden farklı olarak polimer bir yapıştırıcı yerine harç kullanılarak uygulanmasıdır. Harç tipi ankrajlar maliyet olarak kimyasal ankrajlara göre avantajlı olmalarına rağmen çekme dayanımları düşüktür. Basınca karşı dayanımları azdır ve bağlayıcı kuvvetleri de düşüktür. Bu sebeplerden ötürü avantajını kaybeder. Harç tipi ankraj uygulamasında açılan ankraj deliği kullanılan ankraj'ın çapından 4-5 mm daha büyük olacak şekilde açılmalıdır. Özel durumlar altında bu delik toleransı 2 mm'ye kadar düşebilir.

### 2.1.2. Taze Betona Yapılan Ankrajlar

Şekil 2.4'te taze betona yapılan farklı tip ankraj uygulamaları gösterilmektedir. Bu seçimi yaparken üretimde kolaylık ve uygulanacak ankraj'ın sayısı gibi durumlar etkili olmaktadır.



Şekil 2.4. Taze betona uygulanan ankraj tipleri [21].

Taze betona uygulanan ankraj tipine genellikle beton yapı ile çelik malzemenin birleştiği durumlarda rastlanılmaktadır. Bu tasarımda sistemden beklenen kırılma ve aşınmaya karşı dirençli olması sayesinde beton kırılmadan bu taze betona yapılan ankrajların akması beklenir [17].

## **2.2. KOROZYON**

### **2.2.1. Korozyonun Tanımı**

Korozyon metalin doğal haline dönüşmesidir. Metalin bu eğilimi neticesinde, ortamda bulunan farklı materyaller ile tepkimeye girerler. İlk olarak iyon haline daha sonra birleşik hale geçerler. Metal malzemelerin kendi ortamlarıyla çeşitli tepkimelere girerek metalik yapılarını kaybetmesi olayı korozyonun tanımıdır [23]. Metal ve metal alaşımları su ve oksijenin olduğu her yerde korozyona maruz kalır. Korozyonun hızı ortam şartlarına göre değişiklik gösterir. Korozyonun bir başka tanımı ise çelik ile ortam arasında gerçekleşen tepkimeler neticesinde malzemenin yüzeyinde görülen bozulmalar olarak tanımlanabilir. Platin, gümüş ve altın gibi soy metaller korozyondan etkilenmezler. Fakat bu soy metallerin haricindeki çelik ve çelik alaşımlarının tümü için korozyon olayı kaçınılmaz bir durumdur [24].

Korozyon, Latince “corrodere” kökünden türetilmiş bir terimdir. Platon korozyon tanımını (M.Ö. 427-347) ve metal yüzeyinde oluşan pası, metalden ayrılan ve toprağa benzeyen bir bileşen olarak yapmıştır. Bu tarif ettiği tanım ilk yazılı korozyon tanımını içerir. Platon’dan yaklaşık iki bin yıl sonra Georgius Agricola bu fikri desteklemiştir. Mineroloji isimli kitapta bu tarifi vermektedir. Buna göre pas, metal malzemenin ürettiği salgıdır. Daha sonra bu terim karşımıza 1667 tarihinde yazılmış bir Fransızca-Almanca çeviride görülmektedir. Sir Humphrey Davy tarafından 1836 tarihinde Fransızcadan yapmış olduğu çeviride metal malzemenin deniz suyu içerisinde katodik koruması anlatılmıştır. Buna yakın zamanlarda Michael Faraday ise kendisini ismiyle bilinen elektrokimyasal etki ile akım üretilmesi denklemlerini bulmuştur [25].

### **2.2.2. Korozyonun Önemi**

Şimdiki dönemler düşünüldüğünde korozyon, her türlü yapı ekipmanının servis ömürlerini olumsuz etkileyen en belirgin etmen olarak söylenebilir. Başka bir ifadeyle donatı malzemelerinde ve beton içinde birbirini takip eden elektrokimyasal tepkimeler

olarak korozyon ortaya çıkar. Betonarme içindeki çelik donatının korozyona yani paslanmaya karşı korunması, betonun pH değerinin 13 civarlarında olmasıdır. Bu yüksek bir alkali seviyesidir. Betonun içindeki donatının korozyona uğramaya başlaması için bu yüksek alkali seviyesinin düşmesi gerekir. Bu durumda beton çelik donatıyı koruyamaz hale gelir. Korozyona uğramış çelik donatının hacmi artar ve betonarme üzerinde içindeki çeliklere paralel yönde çatlaklara sebep olur. Köprü veya viyadük gibi yapılarda korozyon nedeniyle maddi zararlar ile birlikte insan hayatı da söz konusu olabilmektedir [26].



Şekil 2.5. Betonda korozyon çatlakları [27].

Ülkelerin en önemli israfı korozyon neticesinde olmaktadır. Korozyon sebebiyle her ülke maddi ve manevi birçok zarara uğramaktadır. Malzemenin ve paranın yanında emeğin ve bilginin kaybı yaşanmaktadır. Ortalama olarak ülkelerin gelirlerinin %6 kadarlık kısmı her yıl korozyon nedeniyle kaybolmaktadır [28].

Bu hesaplanan miktar korozyonun toplam kayıp miktarıdır. Toplam kayıp hesaplanırken dolaylı ve doğrudan kayıplar birbirine eşit kabul edilerek birlikte değerlendirilmektedir. Doğrudan kayıplar, işletme sahibinin uğradığı kayıplardır. Korozyon nedeniyle yapının ve sahibinin uğradığı her türlü maliyeti kapsamaktadır. Bunlar özetle imalat giderleri, tasarımsal giderler, inşaat ve yönetim giderleri olarak sınıflandırılabilir. Dolaylı kayıpların tanımını yapacak olursak, kısaca doğrudan kayıpların dışında kalan herkesi kapsamaktadır. Bu kaybın miktarı hepsinden fazla hesaplanabilir. Bu hesabı yapmak çok kolay olamayacağı için birbirine eşit sayılmıştır. Bu türde bir sorunla başa çıkmak için bazı önlemler almak gerekebilir. Yapılacak doğru ve yerinde uygulamalar neticesinde

korozyondan korunma yöntemleri doğru karşımıza çıkan kayıpları azaltacaktır. Bu oran %20 ile %40 oranlarında olabilir [28].

Farklı ülkelerde yapılan tahminlere göre korozyonun neden olduğu kayıplar sadece çelik alaşımları için bile çok fazladır. Bu hesaba göre milli gelirin %3,5 - 5'i arasında bir oran sadece bu alanda kaybolmaktadır. Bilinen en geniş çaplı araştırma olarak ilk başta Amerika Birleşik Devletlerinde NBS'nin 1978 tarihinde yayınlamış olduğu çalışma gösterilmektedir. Bu çalışma kapsamında ülke ekonomisi 130 farklı alana bölünmüştür [28]. Her bir alandaki dolaylı ve doğrudan olarak gerçekleşen korozyon kayıpları ile dolaylı ve doğrudan engellenebilir korozyon analizleri ile incelenmiştir. Sektörler için hesaplama yapılarak; endüstrideki katsayı oranları, dolar/korozyon oranı kayıpları ve engellenebilir korozyon kayıpları olarak bulunmuştur. Bu çalışma örnek alınarak ve bulunan katsayılar kullanılarak, 1991 senesine ait Türk ekonomisinin girdi-çıktı verileri hesaplanmıştır. Ülkemizdeki 15 sektöre ait toplam engellenebilir korozyon kayıp miktarları bulunmuştur. Türkiye'de bu 15 sektöre ait kayıplar gayri safi milli hasılanın (GSMH) %4,36'sını oluşturmaktadır. Engellenebilir korozyon kayıp miktarı ise %1,63 olarak bulunmuştur [28].

Korozyon maliyetini oluşturan başlıca unsurlar, korozyon oluşumuna dirençli malzeme seçimi, korozyonu önlemek amacıyla kullanılan yüzey malzemeleri, korozyon etkisine karşı kullanılan kimyasallar, korozyona uğramış elemanın yenisi ile değiştirilmesi ve korozyon hızı belirlenip buna göre çelik elemanda et kalınlığının artırılması olarak sıralanabilir. Korozyon neticesinde taşıma gücünde azalma olan metal parçaların sökülerek yenileriyle güçlendirilmeleri, delik oluşmuş metal tankların yenilenmesi, yıpranan su ve vb. sistem borularının yenilenmesi ve insan sağlığını olumsuz etkilemesi korozyonun önemli zararlarından [28].

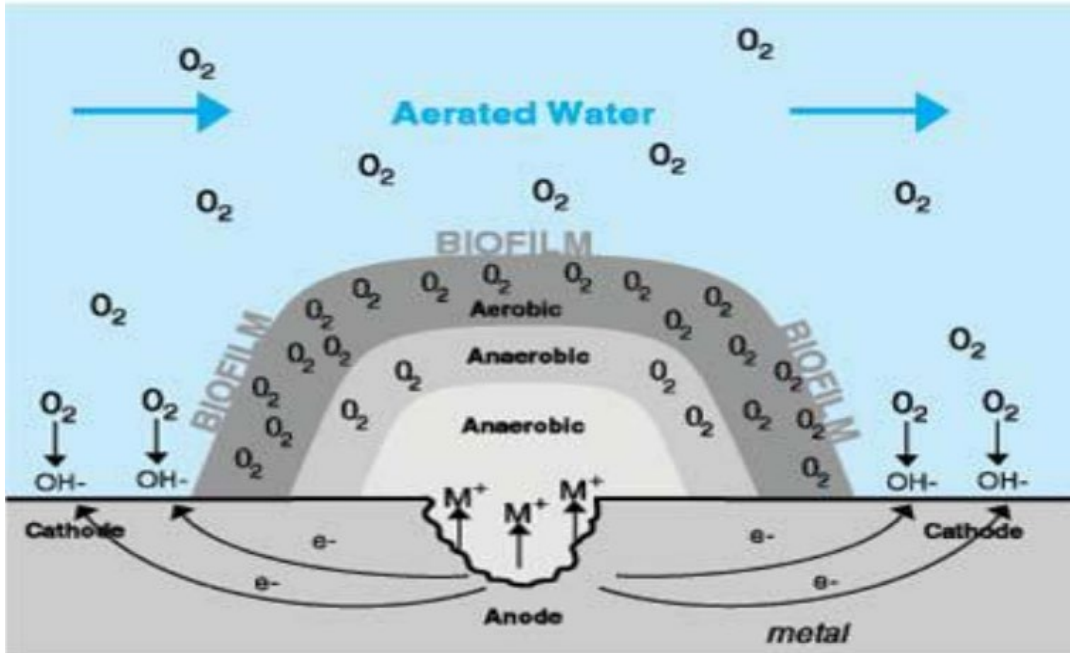
### **2.2.3. Korozyon Oluşumu**

Çelik ve çelik alaşımlarının yüzeylerinde her zaman farklı kalınlıklarda su veya su tabakası bulunur. Hava ve havanın içinde bulunan bir bileşen olarak oksijen atmosferle temas halinde olan her türlü sulu ortamda farklı miktarlarda çözünmektedir. Suyun içerisinde çözünerek ve oksijen gazı metal yüzeylerde “redüklenip” yani elektron alarak, iyon durumuna dönmeye çalışmaktadır. Eğer elektron alıp iyonik duruma dönmeye çalışması için gereken elektronlar metal üzerinden sağlanırsa, elektronları oksijene verip kimyasal değişime uğrarlar. Metallerin suyun olduğu ortamlarda yüzeylerinde kimyasal

şekil değiştirmesi olayı “korozyon” olarak isimlendirilir. Korozyon oluşumu kimyasal korozyon ve elektrokimyasal korozyon olarak iki başlıkta incelenebilir [28].

#### 2.2.3.1. Elektro Kimyasal Korozyon Oluşumu

Elektrokimyasal reaksiyonun tanımı sulu ortamdaki elektron alıp verme olayı sayesinde oluşan elektron alıp-verme reaksiyonlarıdır. Suyun içerisinde, havada ve toprağın altında gerçekleşen tüm korozyon olayları “elektrokimyasal” reaksiyonlardır. Korozyonu daha önceden tarifini ve detaylarını incelediğimiz galvanik hücreye yakın bulabiliriz. Galvanik yapılar, kimyasal enerjiyi elektrik enerjisine dönüştüren sistemlerdir. Bu hücre yapısı içinde oluşan reaksiyonlar neticesinde bir akım meydana gelir. Bu elektrik akımı sayesinde elektro-kimyasal korozyon halinde ise metalde bulunan farklı bölümler anodik ve katodik olarak çalışır. Bu durumu farklı bir şekilde izah edersek metalin bir bölümü anotken diğer bölüm katot olur. Bu farklı parçalar arasında oksidasyon reaksiyonları gerçekleşir. Yaşanan reaksiyon sonrasında metalin anot ve katot yapıları bozulmuş olur. Şekil 2.6’da korozyon mekanizması gösterilmiştir.



Şekil 2.6. Korozyon mekanizması [29].

#### 2.2.3.2. Kimyasal Korozyon Oluşumu

Kimyasal korozyon; metaller ve alaşımlarının gazlarla doğrudan reaksiyona girmesiyle oluşur. Kimyasal korozyonun en belirgin örneği oksitlenme olayıdır. Yüksek sıcaklıklarda daha etkili olan oksitlenme, yüksek sıcaklıkta çalışan makineler ve buna benzer elemanlarda kendini göstermektedir [28].

## 2.2.4. Korozyon Türleri

Endüstride karşılaşılan korozyon türleri aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir.

### 2.2.4.1. Tek Düzey Üiform Korozyon

Atmosferik etkilerin ve asitli ortamın neden olduğu ve malzeme yüzeyinde tüm noktalarda cidar kalınlığının eşit oranda azalmasıdır. Buna tekdüze korozyon denir. Tekdüze korozyon malzemenin bütün yüzeyine yayılmış mikro düzeydeki korozyon hücreleri sayesinde gerçekleşmektedir. Her tür metal malzeme için verilmiş penetrasyon değerleri bu tip korozyonun gerçekleştiği ilkesine dayanır. Bu durum mm/yıl olarak açıklanmaktadır. Enerji tesislerindeki dış yüzeylerde boyanın veya farklı bir tip kaplama elemanının paslanması görülebilir. Ayrıca depolarda bekletilmiş sac plakalar, boru ve her çeşit metal yüzeyinde en çok görülen bir korozyon türüdür [28]. Dış ortamda bulunan nemin, sıcaklığın ve ortam kirliliğinin etkisiyle büyürler. Hidrolik santraller, termik santraller ve nükleer santrallerde en yaygın olarak görülürler. Hatta yenilenebilir enerji santralleri için bile bu tehlike gerçekleşebilir. Atmosfer ortamında korumasız olarak bırakılmış metal malzemeler birinci yılda 12,5  $\mu$ , ikinci yılda 2  $\mu$  ve bu şekilde devam eden seneler de ise 1,5  $\mu$  kadar korozyon kaybına uğrarlar. 10 yıllık bir dönemde yer değiştirmemiş metal elemanlar için gerçekleşen korozyon miktarı 20  $\mu$  dolaylarındadır. Fakat tatlı su veya deniz suyu içerisinde ve hızla bağlantılı akış durumlarında korozyon kaybı kalınlığı yılda 15-250 mikron seviyelerini bulabilir [28]. Şekil 2.7’de uniform korozyon örnekleri gösterilmiştir.



Şekil 2.7. Uniform korozyon [29].

### 2.2.4.2. Oyuklanma Çukurcuk Korozyonu

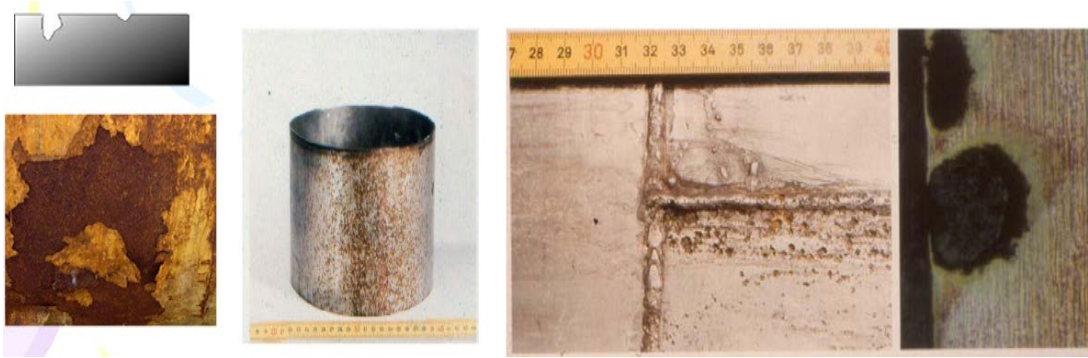
Malzeme yüzeyinin belli bölgelerinde çukurlaşma oluşması durumuna verilen addır. Bu korozyon türü çoğunlukla paslanmaz metal malzemelerde ve alüminyum malzemelerde karşımıza çıkar. Yüzeyde farklı formlarda ve büyük çukurcuklar şeklinde görülür. Çoğu

zaman oluşan çukurlar gözle görülemeyecek kadar küçüktür. Bu oyukları çıplak göz ile görmek pek mümkün olmaz. Oyukların derinliği ve çapları hemen hemen aynı olur [30].

Klorür iyonlarının olduğu ortamlarda çukurcuk korozyonunu görebiliriz. Metal üzerinde bulunan anot ve katot bölümleri net bir biçimde birbirlerinden ayrı durmaktadırlar. Katot bölgesi oyukların etrafında ve çok büyük bir alandadır. Anot bölgesi ise oyuğun içinde dar bir yere sıkışmıştır. Oluşan korozyon olayı neticesinde açılan oyuk kısa zaman içinde büyür ve malzemenin çukurlaşan kısmının delinmesine kadar gider. Bu sebeple tehlikeli korozyon türleri arasında gösterilmektedir. Bakıldığında malzeme kaybı çok azdır. Fakat malzeme kısa süre içinde kullanılamaz hale gelebilir [30].

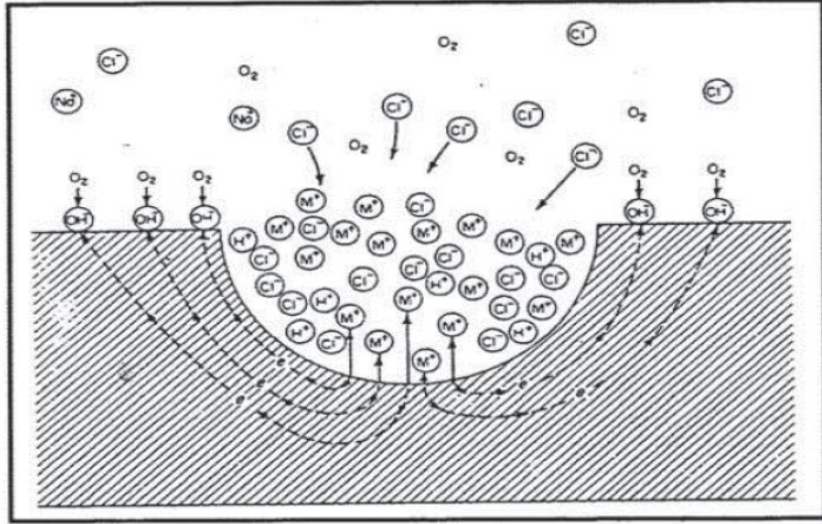
İlk olarak malzeme yüzeyinin herhangi bir yerinde anot tepkimeleri ile görülür. Ortam şartları ve malzeme yapısı müsait olduğunda bu anot tepkimeleri birbiri ardına devam eder ve malzeme yüzeyinde oyuk oluşturur. Çukur içinde gelişen korozyon olayı oluşan bu çukur içinde olayların başlamasına neticelenmesine neden olur [30]. şekil 2.8’de çukurcuk korozyonuna ait resimler verilmiştir.

Çukurcuk korozyonunu etkileyen önemli faktörler; alaşım bileşimi, evre koşulları, potansiyel ve sıcaklıktır [30].



şekil 2.8. Çukurcuk korozyonu [29].

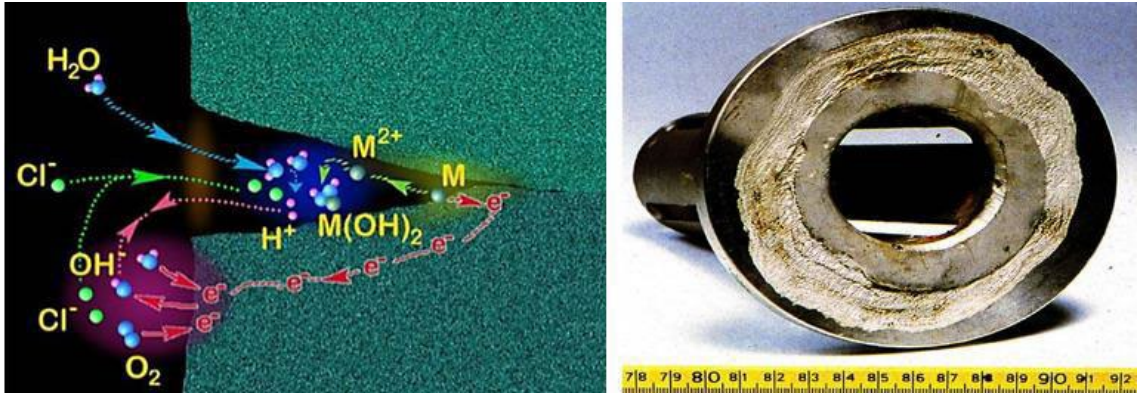
şekil 2.9’da sodyum klorür çözeltisi içindeki çukurcuk korozyonu oluşum mekanizması görülmektedir.



Şekil 2.9. Çukurcuk korozyonu oluşum mekanizması [31].

#### 2.2.4.3. Aralık Korozyonu

Malzeme üzerindeki herhangi bir çatlakta meydana gelen korozyon olayına aralık korozyonu denir. Metal yüzeyindeki çatlak ile ortamdaki oksijen oranlarının farklı olması nedeniyle bu korozyon tetiklenir. Malzemede bulunan çatlakların dış bölgeleri katot olarak davranacağı için buralarda korozyon olayı yoktur. Tasarım esnasında bu korozyon önlenabilir. Bölgesel farklılıklar ortadan kaldırıldığında korunma yöntemi sağlanmış olur. Cıvatalı birleşimlerin doğurduğu zafiyeti kaynaklı birleşimler kullanarak ortadan kaldıracabiliriz. Kaynak kalitesi ve sürekliliği sistemi bu anlamda desteklemektedir. [43]. Şekil 2.10'da aralık korozyonu mekanizması ve örneği verilmiştir.

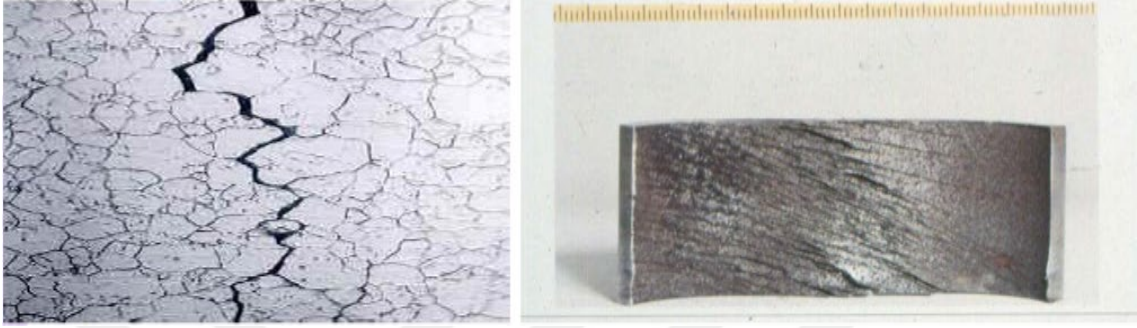


Şekil 2.10. Aralık korozyonu mekanizması ve örneği [44].

#### 2.2.4.4. Çatlak Korozyonu

Metal malzeme üzerindeki boşluklardan kaynaklanan ve çatlaklarda görülen aktiflik durumlarının farklı olması nedeniyle bu korozyon tipi meydana gelebilir. Bu durum

büyük olasılıkla oksijenin konsantrasyonu neticesinde oluşur. Çukur korozyonundan farklı olarak sıcaklığın az olduğu ortamlarda da görülebilir. Çukur korozyonunda olduğu gibi tasarım seçimi önleyici bir faktör olarak gösterilebilir. Tüm sulu çözeltiler içerisinde oluşabilir. Fakat klorürlü ortamlarda korozyon hızı çok yüksek olabilir. Cıvata ve cıvata deliği arasındaki boşlukta veya üzerlerindeki kaynaklı saclarda çatlak korozyonu olabilir [45]. Şekil 2.11’de çatlak korozyonu görülmektedir.



Şekil 2.11. Çatlak korozyonu [29].

#### 2.2.4.5. Galvanik Korozyon

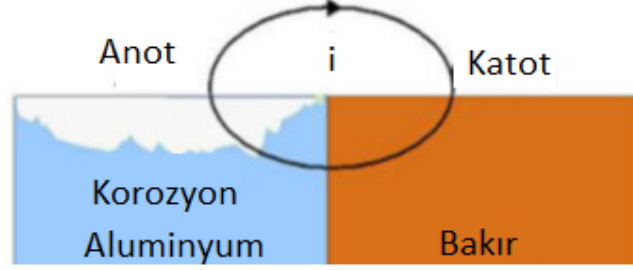
Farklı tiplerde olan iki metalik malzemenin birbirine temas etmesiyle veya aynı çözelti içinde beraber bulunmaları ile bu korozyon türü meydana gelir. Ortamda negatif potansiyel gösteren malzeme anot olarak çalışır. Galvanik korozyon mekanizmasının gerçekleşmesi için üç durumun aynı zamanda olması gereklidir. Birincisi farklı tiplerdeki iki metalin birbirine değmesi ile gerçekleşir. İkinci durum ortamda yani bağlantı noktasında iyon transferi için sulu bir çözeltinin olması gerekmektedir. Bunun olmadığı yerde bu olay gerçekleşmez. Üçüncüsü ise malzemelerin elektrik iletkenliğinin olmasıdır. Birbirine temas halinde olan malzemelerden aktif olan korozyona uğrayarak sistemi başlatmış olur [46].

Galvanik korozyonun önlenmesi için;

- Galvanik yapı olarak birbirine denk malzemeler kullanılmalıdır,
- Korozyona uğraması muhtemel olan malzemenin yüzeyi diğerinden büyük seçilmelidir,
- Bu iki malzemenin korozyona uğramasını engellemek için sisteme başka bir malzeme konulabilir,
- Ortam koşullarındaki korozyon hızı düşürülmelidir,

- İki malzeme arasına yalıtımı sağlayacak bir parça konulmalıdır [46].

Şekil 2.12’de galvanik korozyon oluşum yöntemi ve Şekil 2.13’de ise galvanik korozyon örnekleri verilmiştir.



Şekil 2.12. Galvanik korozyon [35].



Şekil 2.13. Galvanik korozyon örnekleri [29].

#### 2.2.4.6. Taneler Arası Korozyon

Kristalleşme olayı metalde sürekli bir denge halinde gerçekleşir. Çok sayıda çelik malzemeden oluşan alaşımlar içinde aynı durum geçerlidir. Metalden oluşan homojen yapıdaki alaşımlar da belli bir düzen içinde kristalleşir. Bu durum katı çözelti olarak adlandırılır. Çok sayıda katı haldeki malzemenin bir araya gelmesi olayı ise heterojen bir durumdur. Böyle bir durumda taneler arası korozyon denilen olay, malzemelerin sınır çizgilerinde görülür. Korozyon için uygun ortam sağlanmış olur. Bu korozyon tipine örnek olarak, paslanmaz çeliklerde uygulanan kaynak işlemi sonunda malzeme yavaş soğur ve karbür çökmesi gözlenirse ortam sağlanmış olur. Bu istenmeyen durumun çözümü için paslanmaz malzemeye, kullanımdan önce ısıtıl işlem uygulamak gerekmektedir [36]. Şekil 2.14’te taneler arası korozyon gösterilmiştir.



Şekil 2.14. Taneler arası korozyon [36].

#### 2.2.4.7. Gerilmeli (Stres) Korozyon

Gerilmeli korozyon; koroziv ortamlarda çalışan paslanmaz çelik boruların, tekrarlı veya sabit gerilimlere maruz kalmaları sonucunda, metal yüzeylerinde meydana gelen kılcal çatlamlar ve bu çatlakların ilerlemeleri sonucunda oluşan korozyon tipidir. Oyuklanma (pitting), aralık korozyonu, genel korozyon gibi korozyon türleri arasında en tehlikeli olan, en hızlı oluşan ve ilerleyen korozyon tipi olup, tamiri mümkün değildir. Gerilmeli korozyon, 300 serisi (316,316L,316Ti,317L vs.) östenitik paslanmaz çeliklerde ortam koşullarına bağlı olarak sıklıkla görülen korozyon tipidir. Tekrarlı gerilmelerin en fazla olduğu ekipman olan ısı eşanjörleri Gerilmeli Korozyonun (SCC) en sık görüldüğü ekipmanlardır. Eşanjör borularının üretim standardının farklı olması ve boruların mutlak tavlı olmasının genel sebeplerinden biri bu korozyon tipidir [29].

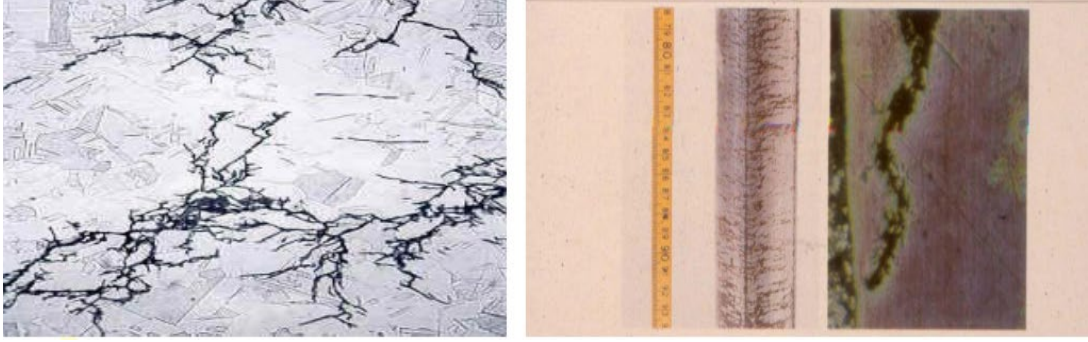
Gerilmeli korozyonun oluşumu, aşağıdaki faktörlerin aynı anda belirmesine bağlıdır:

- Spesifik koroziv konsantrasyonları ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{OH}^-$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ )
- $60^\circ\text{C}$ 'nin üzerindeki sıcaklıklar
- Çekme gerilmeler

Borular üzerindeki çekme gerilmeleri iki şekilde meydana gelmektedir:

- Dış Etmenler: Soğuk şekillendirme, Kaynak, Genişletme vs.
- Çalışma Esnasında: Isıl Döngüler, Sıcaklık Farklılıkları, Statik Yüklemeler, Basınç

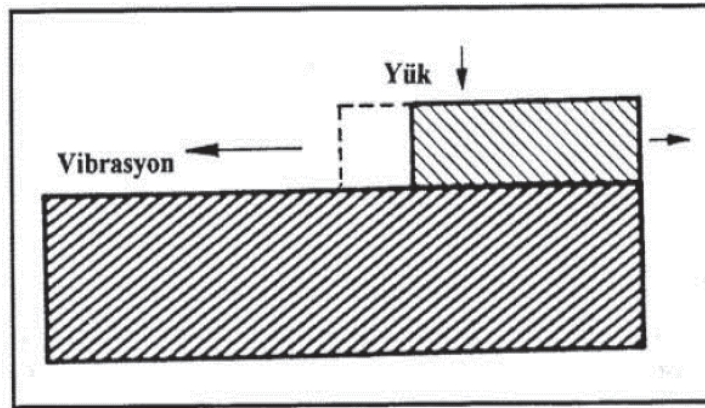
Şekil 2.15'te gerilmeli korozyon örneği gösterilmiştir.



Şekil 2.15. Gerilmeli (stres) korozyonu örneği [29].

#### 2.2.4.8. Aşınmalı Korozyon

Aşınmalı korozyon tanımı birbirinin üzerinde ve birbirlerine sürtünerek kayan iki yüzeyin aşınması ile birlikte ortaya çıkmaktadır. Bu korozyonun başlamasını, metal yüzeylerin birbirine mekanik olarak sürtmesinden kopan metal tozların oksitlenmesi oluşturur. Metal yüzeyinin oksijen ile temasından oluşan oksit film malzeme hareketliliği nedeniyle kazınmaktadır. Bu durumda koruyucu film tabakası gelişemez ve böylece korozyon mekanizması devam eder. Bu duruma en güzel örnek galvaniz kaplı saçların taşınması sırasında oluşan korozyondur. Buradaki oksitlenen bölge temas nedeniyle her seferinde sisteme girmekte ve malzemeler yerlerine taşınırken veya daha sonra ve depolama anında birbirine sürtün parçalar arasında korozyon oluşmaktadır. Enerji kuruluşlarında ve tesislerde kayan yataklı parçalar ile stok sahasında yapılan istiflerde görülür. Şekil 2.16’da kazımalı korozyon nedeni ile aşınma şekli verilmiştir.

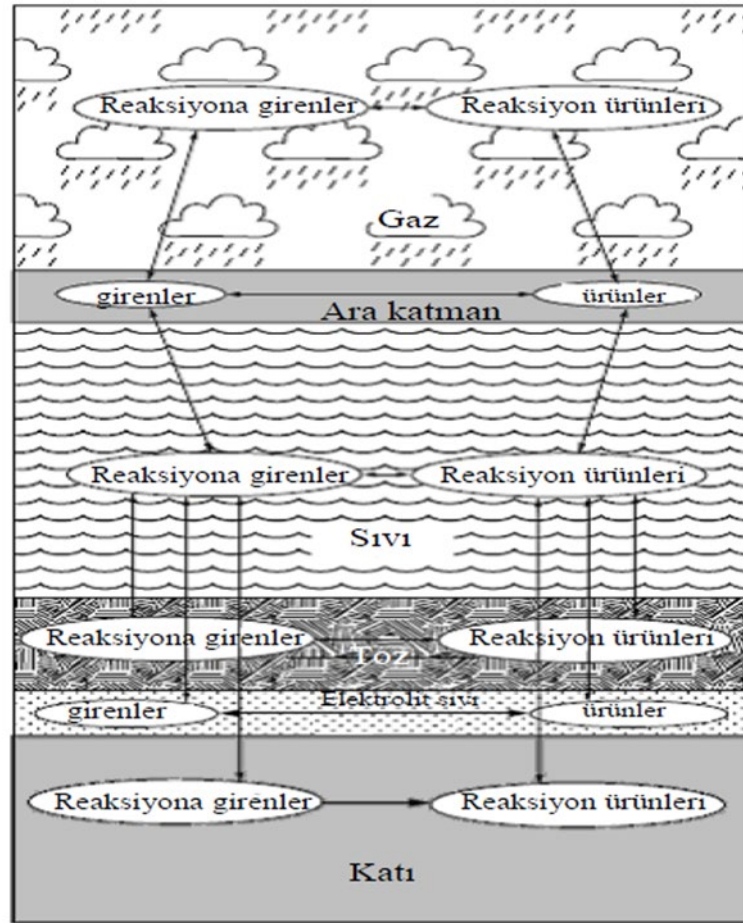


Şekil 2.16. Kazımalı korozyon nedeni ile aşınma [38].

#### 2.2.4.9. Atmosferik Korozyon

Günlük yaşamdaki olumsuz etkiler nedeniyle metaller üzerinde atmosferik korozyon meydana gelir. Metal yüzeylerde oluşan çığ damlacıkları, elektrolit olarak korozyonu

kolaylaştırır. Bu damlacıkların altındaki korozyon mekanizması, toplu elektrolit korozyonundan farklıdır [39]. Köprüler, demiryolları, endüstriyel çelik yapılar vb. yapılar sürekli olarak atmosfer etkisinde kaldığından bu en çok görülen korozyon türüdür. Atmosferik korozyona önlemek amacıyla çeliğe vanadyum elementi eklenmeye başlanmıştır [40]. Çöl ve kutup bölgelerine oranla endüstri bölgelerindeki atmosferik korozyon hızı 100 kat fazla olabilmektedir. Deniz kenarından 24 m uzaklıktaki levha ile 240 m uzaklıktaki levhanın korozyon hızı karşılaştırıldığında yakın olanının diğerinden 12 kat fazla olduğu belirlenmiştir. Metal malzemelerin deniz olan bölgelerde korozyon oluşumu sıcak ve kurak çöl iklimine göre 400-500 kat fazladır [41]. Atmosferik korozyona ait döngü Şekil 2.17’de gösterildiği gibidir.

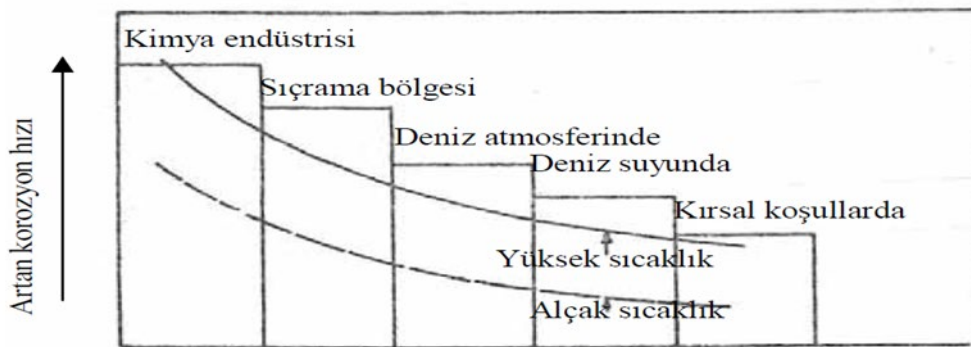


Şekil 2.17. Atmosferik korozyon oluşumu [42].

Atmosferik korozyon, etkileri bakımından büyük felaketlere neden olmazlar ama sonuçları bakım maliyetlerinin artmasına neden olurlar. Bu durum da malzeme ömürlerine etki etmektedir. Atmosferik korozyonun görülme hızı çevresel etkenlere de bağlıdır. Bu etkenler; havadaki rutubet oranı, hava kirliliği, senelik yağış miktarı, sıcaklık ve rüzgâr hızı olarak sayılabilir [41].

- **Hava rutubetinin etkisi;** Atmosfer içinde su buharı dışında korozyona neden olacak başka bir şey bulunmamaktadır. Havada ki su buharı her şartta paslanmaya sebep olur. Nemin %70'den fazla olması ve saatler arası ısı farklılıkları sebebiyle metalik yüzeylerde sıvı film tabakası oluşur. Bu duruma kritik bağıl rutubet denir [31].
- **Endüstriyel kirlenmenin etkisi;** Endüstriyel kirlenmenin en büyük olayı atmosferik korozyonu tetiklemesidir. İlk olarak yanma hadiseleri gelmektedir ve bu durum ile havaya çok fazla zararlı kimyasal parçacıklar karışmaktadır. Kükürt oksit havada bulunan en tehlikeli ve etkili kimyasal gazlardır. Bu kükürt oksitler havadaki su buharı ile birleşip asitleri meydana getirirler [32].
- **Sıcaklığın etkisi;** Atmosferik korozyon hızına sıcaklığın etkisi çok büyüktür. Sıcaklık az olduğu zaman çelik yüzeylerdeki sıvı film tabakasının kuruması daha geç olacak ve korozyon mekanizması kuruma gerçekleşene kadar sürecektir. Bu sebeple, atmosferik korozyon hızı, hava sıcaklığının az olduğu yerlerde, ılık yerlere göre daha çoktur. Hava sıcaklığın devamlı değişmesi, metalik yüzeylerdeki yoğunlaşmayı artırdığı için korozyonu artırıcı bir etmen oluşturmaktadır [32].

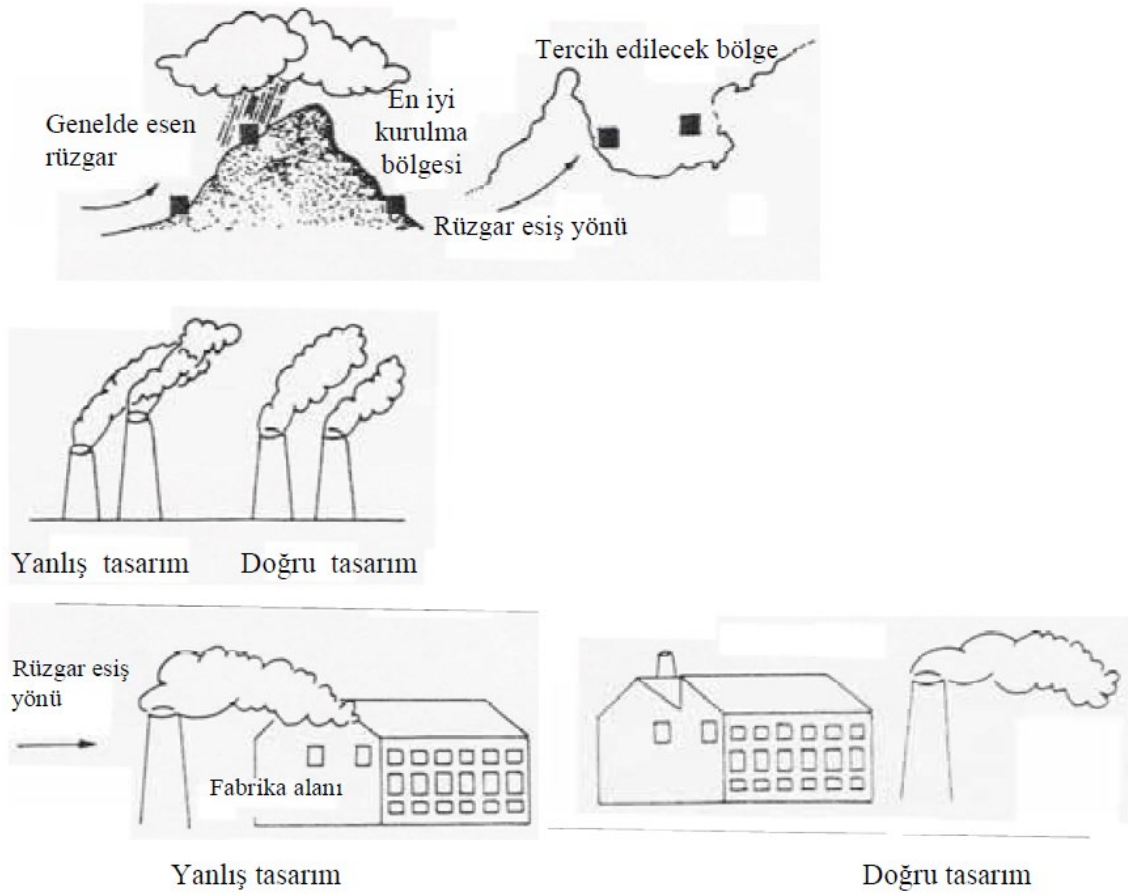
Şekil 2.18'de atmosferik korozyon oluşumu gösterilmiştir.



Şekil 2.18. Atmosferik korozyon oluşumu [32].

- **Yağış ve rüzgârın etkisi;** Bu sistemin devam etmesi sürmesi için bulunduğu ortamda kuşkusuz su gereklidir. Yıllık yağış miktarı, yağış aralığı ve kuruma zamanı ile korozyon hızı birbirine bağlantılıdır. Bulunduğu çevredeki rüzgârın hızı ve yönü de kurumayı hızlandırdığı, yüzeyde bulunan kir ve tozların rüzgârın etkisiyle uzaklaşmasına sebep olduğu için çok önemlidir.

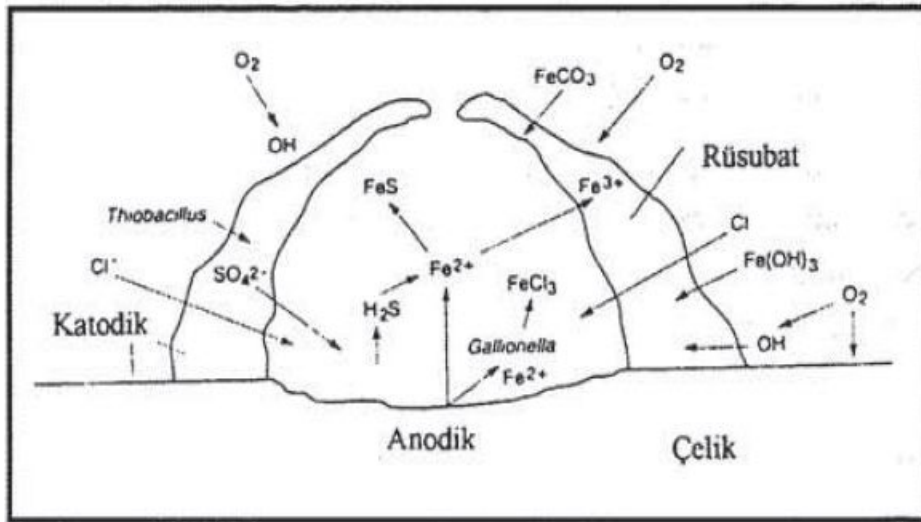
Şekil 2.19’da rüzgâr hızı ve yönünün etkisi şekil olarak verilmiştir.



Şekil 2.19. Rüzgâr hızı ve yönünün etkisi [33].

#### 2.2.4.10. Bakteriyel Mikrobiyolojik Korozyon

Sulu ortamlarda hayatlarına devam eden mikroorganizmalar, oksijenli bölgelerde ve oksijensiz bölgelerde her türlü sülfür bileşimini ve element halindeki kükürdü sülfat haline dönüştürür. Bu yüzden ortaya çıkan korozyon ürünleri içinde sülfür vardır. Bu canlılar, ortam temizlenirken, pH derecesi ve şoklama süresi değiştirilip ortamdan uzaklaştırılabilir. Ayrıca akışkan içerisine vanadyum konulup yok edilebilir. Mikrobiyolojik korozyona neden olan farklı mekanizmalar vardır. Mikroorganizmaların kendi metabolizmaları ile ürettikleri şeylerle ve de gerek duydukları enerjiyi bulundukları metal yüzeylerden elde ederek korozyonu hızlandırır [46]. Şekil 2.20’de mikrobiyolojik korozyon mekanizması verilmiştir.



Şekil 2.20. Mikrobiyolojik korozyon mekanizması [47].

#### 2.2.4.11. Yüksek Sıcaklık Korozyonu

Atmosfer sıcaklığında metallerin üzerinde korozyon etkisi çok az bulunan kimyasal maddelerin yüksek sıcaklıklarda fazlasıyla koroziv oldukları görülmüştür. Örnek olarak atmosfer sıcaklığında oksijenin metal malzemelere korozyon etkisi, nemin olmaması durumunda çok çok az olmasına rağmen yüksek sıcaklıklarda çok zarar verici olabilmektedir. Çelik yapıyı zayıf ve kırılgan hale dönüştürür [48]. Şekil 2.21’de yüksek sıcaklık korozyonuna örnek gösterilmiştir.



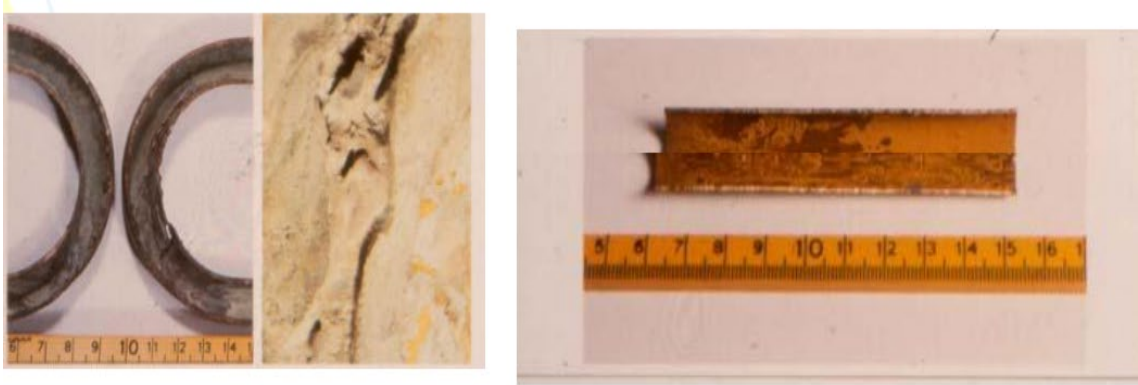
Şekil 2.21. Isı değiştiricilerde yüksek sıcaklık korozyonu [48].

#### 2.2.4.12. Erozyon Korozyonu

Korozyon olayına yatkın özelliğe sahip bir sıvı maddenin malzeme yüzeyinde akması ile

bu durum gerçekleşir. Akışın sürekli olması nedeniyle malzeme korozyona uğrama tehlikesi altındadır. Hem kimyasal bir tepkime hem de mekanik bir aşınmanın neden olduğu tipe erozyon korozyonu denilmektedir. Bu korozyona ait oluşum hızında akışkan malzemenin türü ve akma hızı etkilidir [49].

Sıvının asit ve baz gibi durumlarına bağlı olarak malzeme farklı tiplerde reaksiyonlar geçirerek korozyona uğramaktadır. Çelik bu tip sıvıların içindeki bazı korozyif maddelere temas etmesiyle aşınmaya uğramaktadır. Buna metalin erozyona uğraması denir. Belirtilen durumların bu malzemeye aynı anda etki etmesi ile erozyon korozyonu gerçekleşmiş olur [49]. Şekil 2.22’de erozyon korozyonu gösterilmiştir.



Şekil 2.22. Erozyon korozyonu [29].

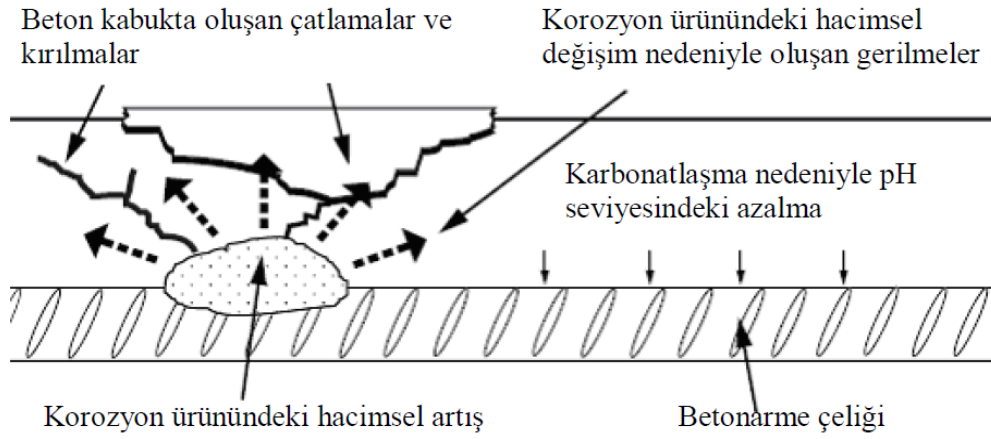
#### 2.2.4.13. Beton İçindeki Çeliğin Korozyonu

Beton üretimi sırasında içinde bulunan çelik ankrajların beton tarafından sarmalanarak donatıyı koruması çok önemli bir durumdur. Yıllar içerisinde beton üzerinde oluşmaya başlayan çatlaklar ve bozulmalar neticesince çelik donatı bu durumdan olumsuz etkilenmeye başlar. Oluşan çatlaklara nüfuz eden nem ve havada bulunan kimyasal maddeler korozyon mekanizmasının başlamasına neden olurlar. Beton içinde paslanmaya başlayan çelik donatı üzerinde oluşan gerilmeler ile çatlaklar iyice büyür ve donatı betondan dışarı çıkar. Denize yakın bölgelerde ve nemin çok olduğu yerlerde daha sık görülmektedir [46].

Korozyondan korunmak amacıyla içindeki çelik donatının seçimi ve yerleşim mesafeleri çok önemlidir. Çelik donatının paslanmasıyla oluşan çatlaklar için tam bir tamir yöntemi yoktur. Fakat bazı durumlarda şu yöntem kullanılabilir [46].

- Korozyon bölgesi iyice temizlenir.
- Çelik üzerinde oluşmuş korozyon tamamen temizlenir.
- Donatının çapı ölçülerek kesit kaybı araştırılır. Varsa eğer ilave donatı konulur.
- Temizlenen yüzey e önce astar daha sonra epoksi uygulaması yapılır.
- Epoksi üzerine polimer katkılı çimento sürülerek tamirat tamamlanır.

Şekil 2.23'te beton içindeki çeliğin korozyona uğraması gösterilmiştir.



Şekil 2.23. Beton içindeki çeliğinin korozyona uğraması [45].

Şekil 2.24'te oluşan çatlağın, betonunun içindeki çeliğin korozyona uğraması nedeniyle oluştuğu açık olarak görülmektedir. Bu durum betonarme yapı elemanı için hayati tehlike oluşturmaktadır. Şekil 2.25'te ise uzun süre korozyona uğrayan çeliğin ufalanması görülmektedir.



Şekil 2.24. Korozyona uğrayan çelik sonrası betonda oluşan çatlak-kırılma [46].



Şekil 2.25. Uzun süre korozyona uğrayan çeliğin ufalanması [46].

### 2.2.5. Korozyon Hızı Belirleme Yöntemleri

Korozyon hızı çelik malzemenin birim zamanda çözünme miktarıdır. Metal ve alaşımlarının korozyona karşı dayanıklılığının belirlenmesi için korozyon hızı çok

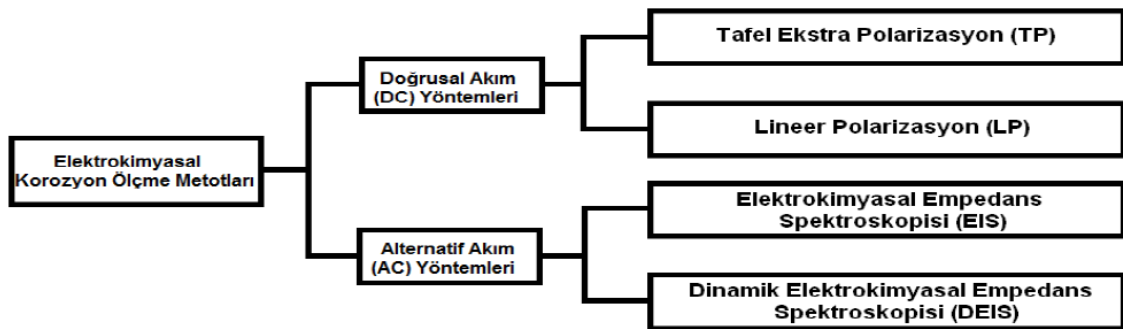
önemlidir. Korozyon hızı zamanla yavaşlayan eğilimdedir. Korozyon hızını tespit etmek için kullanılan yöntemlerin ana amacı korozyon sonucunda oluşan kütle kaybının hesaplanmasıdır. Korozyon hızı ise birim metal yüzeyden, birim zamanda geçen akım olarak ifade edilmektedir. Korozyon hızı belirleme yöntemleri; Kütle kaybı yöntemi ve Elektrokimyasal yöntemler olarak 2 başlıkta incelenmiştir [50].

#### 2.2.5.1. Kütle Kaybı Yöntemi

Bu yöntem korozyonun hızını belirlemede en çok kullanılan yöntemdir. Bazı araştırmacılar korozyon hızı belirlemede bu yöntemi “Altın Standart” olarak adlandırılmaktadır. Yüzeyi tozdan ve kirden arındırılmış metalin kütlesi ölçülür. Metal korozyona maruz bırakıldıktan sonra yüzeyi temizlenerek tekrar kütlesi ölçülür [51].

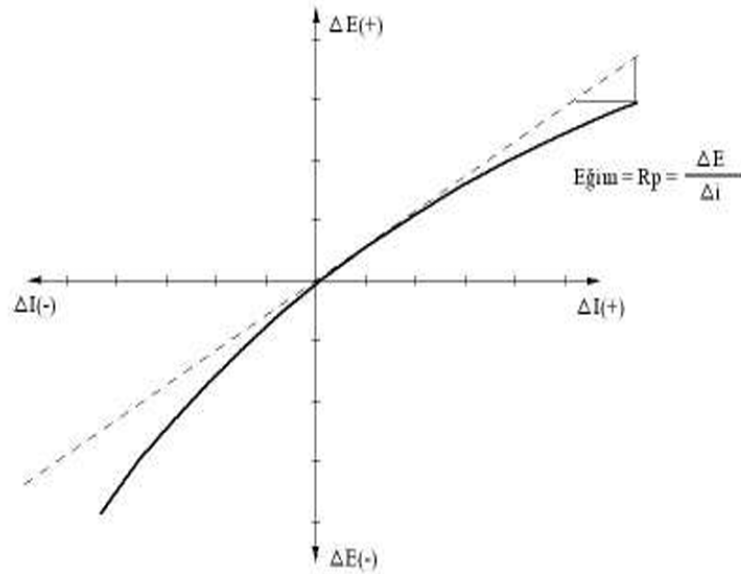
#### 2.2.5.2. Elektrokimyasal Yöntemler

Elektrokimyasal yöntemler sayesinde korozyon hızının daha kısa sürede ölçülmesi sağlanır. Korozyon hızı belirlemede birçok elektrokimyasal yöntem kullanılır. Korozyon mekanizmasının iyi bir şekilde analizi için uygulanan yöntem çok önemlidir [52]. Bu yöntemlerle korozyon hızının belirlenmesinde temel olan şey, korozyona maruz kalan metalin üstündeki anot ve katot yüzeylerdeki akımın ölçülmesidir. Burada galvano statik ve potansiyostatik teknikler kullanılmaktadır. Galvano statik tekniğinde elektroda aktif olmayan yardımcı elektrot ile sabit dış akım uygulanır. Belirli süre beklendikten sonra elektrot potansiyeli tekrar ölçülür. Potansiyostatik yöntemle incelenen elektronun potansiyeli bir potansiyostat ile sabit tutulur ve akım değeri ölçülür. Daha sonra başka bir potansiyelde ölçüm tekrar yapılır. Uygulanan dış akımın ayarlanması ve elektrot potansiyelinin ölçüm boyunca sabit tutulması potansiyostat sayesinde sağlanır. Şekil 2.26’da elektrokimyasal yöntemler gösterilmektedir.



Şekil 2.26. Elektrokimyasal korozyon ölçme yöntemleri [53].

- **Tafel Ekstrapolasyon Yöntemi;** Korozyona uğramış metalde anodik reaksiyonu ek olarak katodik reaksiyon da meydana gelmektedir. Elektrot yüzeyinde anodik ve katodik olmak üzere iki farklı tepkimenin dengesiyle korozyona ait potansiyel meydana gelir. Anot ve katot reaksiyonlar için akımla arasında polarizasyon eğrileri çizilir. Bunun neticesinde korozyon potansiyeli ( $E_{cor}$ ) ve bu potansiyele karşılık korozyon akımı ( $i_{cor}$ ) değerleri bulunur. Tafel bölgesi bu aşırı gerilmeyle oluşan dış akım logaritmasının lineer değiştiği bölgedir. Tafel bölgesinde doğrunun eğimi deneysel olarak elde edilerek korozyon hızının belirlenmesi sağlanır [54]. Korozyon akımı, polarizasyon eğrilerinin Tafel bölgelerinin korozyon potansiyeli ile ekstrapolasyonu ile bulunmaktadır. Anodik ve katodik Tafel bölgelerinin birlikte bulunmadığı durumlarda ise ekstrapolasyonla korozyon hızı bir tanenin korozyon potansiyeli ile oluşur. Akım veya potansiyellerden birinin kontrollü bir şekilde değiştirilmesiyle diğerinin aldığı değerler grafik üzerinde gösterilerek akım-potansiyel eğrileri elde edilir. Grafikte doğrular uzatılarak kesim noktalarında sistem için korozyon hızı belirlenir [55].
- **Lineer Polarizasyon yöntemi;** Şekil 2.27’de korozyon oluşum durumlarında akım değişikliğinin ( $\Delta I$ ) oluşturduğu potansiyel farkı ( $\Delta E$ ) arasındaki bağlantı gösterilmiştir [56].



Şekil 2.27. Lineer polarizasyon yöntemiyle polarizasyon direncinin ( $R_p$ ) bulunması [56].

Lineer Polarizasyonda hataların sebepleri;

- Sadece korozyona uğrayan malzemenin oksidasyonu,
- Korozyon potansiyelinin sürekli değişmesi,
- Tarama hızlarının veya bekleme sürelerinin az olması.
- **Elektrokimyasal Empedans Yöntemi;** Metal ile çözelti arasında oluşmuş ikili tabakanın alternatif akım uygulanması kullanılarak ölçülmesidir. İkili tabaka kapasitesi ve kullanılan metalin yüzeyiyle çözelti arasında oluşan dirençlerden bir elektronik eş değer devre oluşturulup polarizasyon direnci bulunmaya çalışılmaktadır. Elde edilen değer Stern - Geary denkleminde yazılarak korozyon hızı bulunmuş olur [58].

#### 2.2.6. Korozyon Tespit Yöntemleri

Korozyonun izlenmesi ve tüm ekipmanın emniyetli bir şekilde gözlenmesi endüstri açısından çok önemlidir. Bu anlamda korozyon kontrollerinden sorumlu personeller sayesinde denetleme yapılabilir. Belirlenen dönemlerde belirlenen yöntemlerle süreç ve sistem muayene edilmelidir.

Korozyon tespiti için kullanılan tahribatsız deneyler şu şekildedir.

- **Görsel Muayene;** Malzeme yüzeyinde oluşan süreksizliklerin ve yapısal bozuklukların optik bir yardımcı ile veya çıplak göz ile kontrol edilmesi yöntemidir. Basit bir yöntem olarak görünse de önemi çok büyüktür [60].
- **Radyografik Muayene;** İçyapıda tespit edilen boşlukların görüntülenmesi için kullanılır. Çok temel ve yaygın olarak kullanılmaktadır. En kolay tabirle malzeme üzerine bir kaynaktan gönderilen ışınların malzemenin içinden geçip arka tarafa konulan bir düzenek üzerine görüntüsünün yansıtılmasıdır. Malzeme içindeki boşluklar arka taraftaki düzenek üzerinde görünür [60].

Faydaları ve Özellikleri:

- Kalıcı kayıt elde edilerek bu kayıtlar ile zaman içinde karşılaştırma yapılabilir.
- Işın yapıldığı yerde ayar istemez.
- Malzeme içindeki boşlukları çok iyi tespit eder.
- Malzeme geometrisi önemli değildir.

- **Ultrasonik Muayene;** Malzeme içindeki boşlukları tespit etmek için yüksek frekansta ses dalgaları göndermektedir. Burada kullanılan Hertz (Hz) frekans birimidir. Değeri bir saniyedeki titreşim sayısına eşittir.

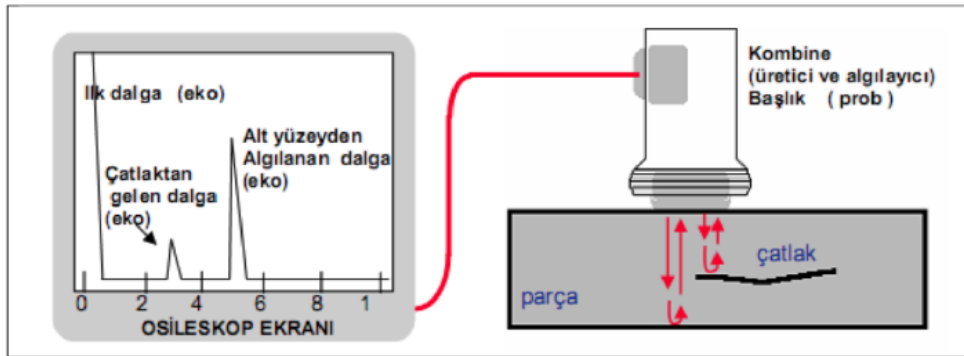
Faydaları:

- \* Malzemenin tek tarafından ölçüm yapabilir.
- \* Malzeme olarak kullanım alanı çok geniştir.
- \* Malzeme içi düzlemsel boşluklar için en iyi seçim.
- \* Taşınması çok kolaydır.
- \* Ölçüm hassasiyeti.
- \* Hızlı ölçüm sonuçlarına ulaşma.

#### Ultrasonik Muayene'nin Dezavantajları

- \* Tırtıklı yüzeyler için problemdir.
- \* Yüzeyin temiz ve pürüzsüz olması gereklidir.
- \* Kalibre edilmelidir.
- \* Bilirkişiler dışında kullanımı ve okunması zordur.

Şekil 2.28'de ultrasonik muayene verilmiştir.

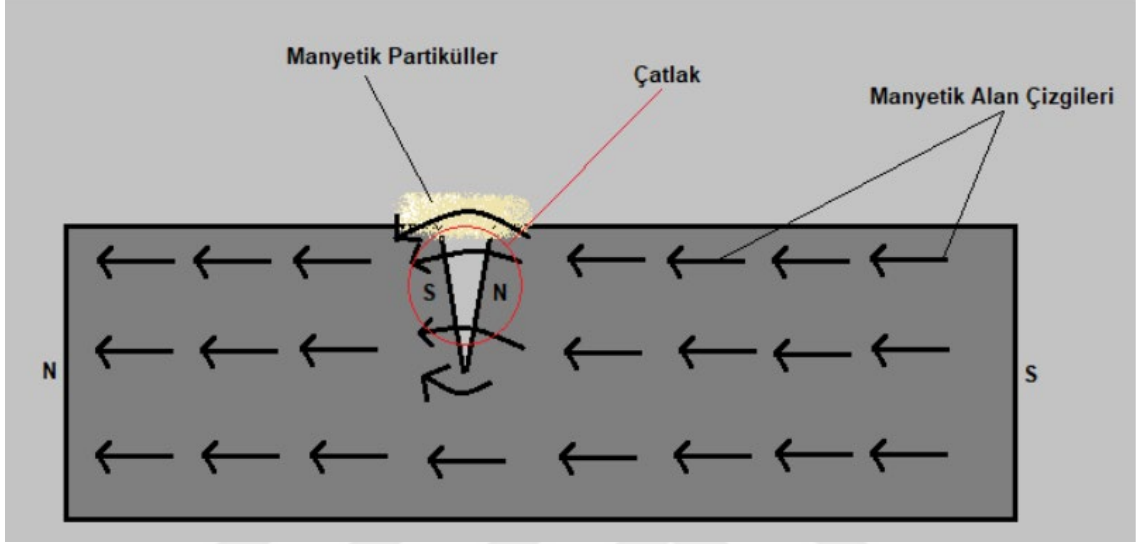


Şekil 2.28. Ultrasonik muayene [60].

- **Eddy Akımı Deneyi;** Tahribatsız malzeme muayene yöntemlerinden biridir ve temel olarak iletkenlerin incelenmesini esas alan elektro magnetizma ile ilişkilidir. Girdap akımları, elektro magnetik indüksiyon denilen yöntem ile bulunur. Malzeme içindeki çatlakların, boşlukların, iç kusurların veya hatalı kaynak birleştirmelerinin tespitinde kullanılır. Bu durum karşısında akısı istedikleri doğrultuda yapamazlar ve sistemde manyetik alan değişir.
- **Manyetik Parçacık Testi;** Yüzeyde görülen hataları belirlemek amacıyla

kullanılmaktadır. Malzeme yüzeyine gönderilen manyetik kuvvet neticesinde malzeme yüzeyindeki bozuklukların üzerinde kaçak kuvvetler oluşur. Malzeme yüzeyine toz serpilerek bu kaçak kuvvetlerin yerleri ve böylece de yüzeydeki bozukluklar tespit edilmiş olur.

Şekil 2.29’da manyetik parçacık testi gösterilmiştir.



Şekil 2.29. Manyetik parçacık testi [61].

- **Penetrant Testi;** Penetrant uygulaması yapılacak yüzeyler uygulamadan önce temizlenmeli ve yüzeyler hazırlanmalıdır. Sıvı maddenin malzemenin yüzeyinden girmesini engelleyecek yağ, kir ve diğer pisliklerden temizlenmelidir. Yüzeye yapılan zımpara uygulaması ve kumlama gibi durumlardan sonra yüzeyler iyice temizlenmelidir. Çünkü bu gibi işlemler yüzeydeki çatlakları kapatabilir. Yüzey temizlenip ve kurutulduktan sonra penetrant sıvısı uygulanabilir. Bu uygulama püskürtme fırçalama ya da daldırma gibi yöntemler kullanılarak yapılır [59]. Şekil 2.30’da Penetrant testi gösterilmiştir.



Şekil 2.30. Penetrant testi [35].

- **Termal Yöntemler;** malzemelerin ısıtılarak aralarındaki bağların kontrol edilmesidir. Malzeme yapısında değişiklik olduğunda ısı enerjisinin akışında kesintiler olur ve sıcaklık değişimi yüzeyden kontrol edilerek kesinti olan bölgeler belirlenir. Malzeme yüzeyine ısıya duyarlı kaplamalar yapılır. Bu kaplamanın sıcaklık etkisiyle erimesi ya da renk değiştirmesi ile süreksizliklerin tespit edilir. Sıcaklığın düşük olduğu bölgelerde çatlaklar ve kopukluklar olduğu anlaşılmış olur [59].

### 2.2.7. Korozyona Karşı Alınacak Önlemler

Metalin bulunduğu ortam içerisinde korozyonunu önlemek veya korozyon hızını azaltmak amacıyla önlemler alınır. Korozyondan korunma yöntemlerini tasarım, malzeme seçimi ve koruyucu kaplamalar olarak sıralayabiliriz [62].

#### 2.2.7.1. Malzeme Seçimi

En basit bir korozyon önleme işlemidir. Amaç korozyon direnci yüksek olan bir malzeme seçmektir. Alüminyum alaşımları ve paslanmaz kalite çelikler bunlar için en iyi örneklerdir. Malzeme seçiminde dikkat edilmesi gereken ilk şey güvenlik ve maliyettir. Güvenlik önlemleri alınarak malzemede azda olsa korozyon oluşmasına müsaade edilebilir. Demir madenine farklı elementler eklenerek veya çıkarılarak korozyon direnci artırılabilir. Yaklaşık %0,2 oranında bakır ilavesi ile çeliğin korozyon direnci artırılabilir [63].

#### 2.2.7.2. Tasarım

Korozyondan korunmak için en maliyetsiz yöntem, bu durumu oluşturabilecek faktörlerin

tasarım aşamasında düşünülerek avantaj sağlanmasıdır. Tasarım ile korozyon başlamadan önlem alınabilir. Korozyon bölgesinde yapımına başlanacak yeni bir bina için tasarım aşamasında hesaplamalar buna göre yapılmalıdır. Korozyon etkisiyle doğacak maliyetler ve kazalar tasarım yapılırken düşünülüp çözülebilir [63].

#### 2.2.7.3. Elektrokimyasal Yöntemler

Bu yöntemi anodik koruma ve katodik koruma olarak ikiye ayırabiliriz. Anodik koruma: metali korozyon etkisinden korumak için uygulanan elektrokimyasal yöntemdir. Bu uygulama da metale anot yönünde bir dış akım uygulanır. Metal pasif potansiyel duruma geçmesi beklenir. Bu yöntem asıl olarak bir pasifleştirme olayı olarak görülebilir. Bu sebeple anodik koruma sadece pasifleşme özelliği gösteren malzemelere uygulanır. Sistemin potansiyel ve akım kontrolünün çok iyi ayarlanması önemlidir. Aksi takdirde sistem üzerinde oluşacak arızalar, metalin hemen korozyona uğramasına neden olur [63].

Katodik koruma yöntemi, metal parçaları korozyonun zararlı etkilerinden korumak için kullanılan en etkin yöntemlerdendir. Katodik korumada, elektrokimyasal hücreden bir akım geçince anotta yükseltgenme tepkimesi, katotta ise karşılık olacak şekilde indirgeme tepkimesi oluşur. Bu durum karşısında katotta hiçbir zaman korozyon olayı oluşmaz. Buna göre seçilen bir metalin yüzeyindeki anodik bölgeleri katot bölgesine dönüştürerek korozyon olayı önlenmiş olur [63].

#### 2.2.7.4. Metalik Kaplama Yöntemleri

Metallerin yüzeyinin, kullanılan esas metale göre korozyon direnci yüksek daha farklı bir metalik malzeme ile kaplanması işlemidir. Bunlar; ana malzemenin yüzeyini kaplayacak olan metalin uygulama yöntemine göre püskürtme yöntemiyle metalik kaplama, elektrolit yöntemiyle metalik kaplama ve sıcak daldırma yöntemiyle metalik kaplama olarak sınıflandırılırlar. Ayrıca inorganik ve organik kaplamalar da vardır.

- **Püskürtme Yöntemi İle Metalik Kaplama;** Metalin, oksit - asetilen tabancalarda eritilerek yüzeye püskürtülmesi yöntemiyle yapılır. Yüzeye kaplanacak olan metale ait özellik, ergime sıcaklığının düşük olmasıdır. Püskürtme yönteminde yüzeyde boşluk oluşma durumu olabilmektedir. Bu boşlukların işlem sonrası astar boya kullanılarak doldurulmaları gerekmektedir. Büyük metalik yapıların kaplanmasında tercih edilen bir yöntemdir. İyi bir yüzey birleşiminin gerçekleşmesi için; işlem öncesi çelik yüzeyinin kumlama yöntemi ile temizlenmesi gerekmektedir. Bunun ardından sıcak püskürtme uygulamasın

yapılması gereklidir. Bu yöntemle yapılan Uygulama sonrası yapılan ölçümler neticesinde kaplama kalınlığının 75-200 mikron arasında olabildiği görülmektedir [64]. Şekil 2.31’de püskürtme yönteminin görseli verilmiştir.



Şekil 2.31. Püskürtme yöntemi [65].

- **Elektrolit Yöntemiyle Metalik Kaplama;** Bu sisteme örnek olarak elektro galvaniz kaplama verilebilir. Havuz içine yerleştirilmiş ve anot görevi yapan çinko kimyasal alaşımlar ile yüzeyden kopardığı çinko parçacıklarını katot görevi yapan malzemenin yüzeyine yapıştırır. Yüzeyi kaplanan malzeme parlak bir görüntü almıştır. Kaplama kalınlığı 12-15  $\mu$  arasında değişiklik gösterebilir. Galvaniz kaplama kalınlığı malzemenin hizmet ömrü için önemli bir kriterdir [65].

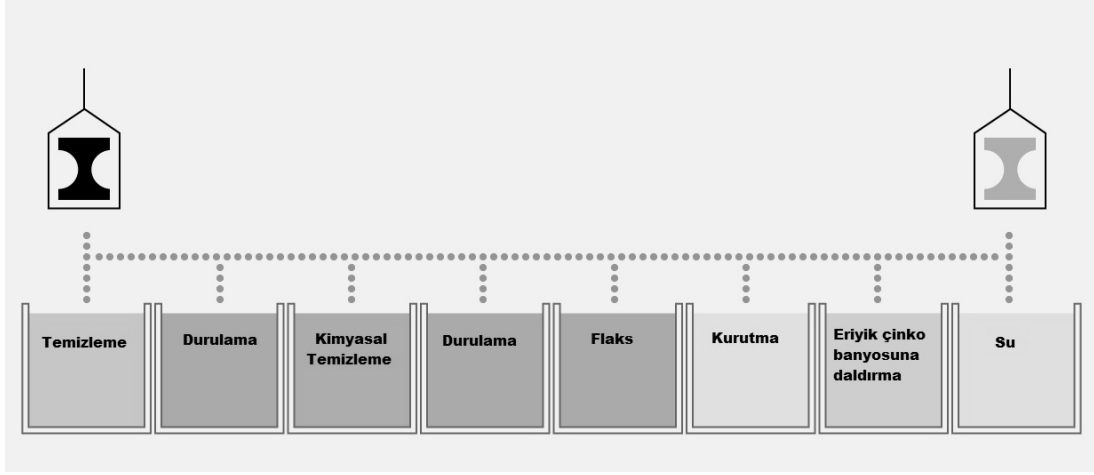
Şekil 2.32’de elektrolit galvaniz havuzu ve anot görevi yapan çinko külçe gösterilmiştir.



Şekil 2.32. Elektrolit galvaniz havuzu ve anot görevi yapan çinko külçe [66].

- **Daldırma Yöntemiyle Metalik Kaplama;** Sıcak daldırma galvaniz işlemi; yüzeyi temizlenen, yağı alınmış metal malzemenin eritilmiş çinko havuzuna daldırılması ve yüzeyini çinko metali ile kaplama olayıdır. Bu kaplama işleminde kullanılan metal normal şartlar altında 420 °C’ de erimesine rağmen havuzun sıcaklığı 450 °C civarlarındadır. Sıcak daldırma galvaniz işlemi 430-475 °C sıcaklıkları arasında uygulanır. Bundan daha fazla sıcaklıklarda çinko havuzu ve tankına zarar verdiği bilinmektedir. Ayrıca bu durumda kötü bir galvanizleme işlemi gerçekleşir [67]. Saf demir ve çinko arasında gerçekleşen kaplama işleminde düzgün ve kaliteli bir yüzey oluşması için çelik yüzeyindeki pas mutlaka temizlenmelidir. Bu temizleme işleminde asit kullanılır. Malzemeler asit banyosu sonrasında su ile yıkanmalıdır. Bunun nedeni olarak; demir tozlarının asit banyosundan çıktığı sırada malzemenin yüzeyine yapışarak flaks havuzunu bozmasıdır. Flaks işlemi; kurutma ile çinko banyosu arasında ki zaman süresince malzemeleri korozyondan korur.

Şekil 2.33’te sıcak daldırma galvaniz kaplama prosesi gösterilmiştir.



Şekil 2.33. Sıcak daldırma galvaniz kaplama prosesi [68].

- **İnorganik Kaplama;** Kaplama yapılacak malzemeler uygun bileşimde hazırlanan banyolar içine daldırılır. Bu sayede ortam ile tepkimeye girerek yüzeyinde tuzdan oluşmuş bir katman oluştururlar. Bu duruma verilebilecek örnek fosfatlama işlemidir. Boya yapılacak yüzeylerin hazırlanması amacıyla da kullanılırlar. Yüzeydeki boya aşınsa bile fosfat tabakası koruyuculuk görevini devam ettirir. Fosfatlamadan sonra, krom atlama işlemi uygulanır. Krom atlama sadece Al ve Zn gibi metallere uygulanabilir [69].
- Organik kaplamaların başlıca olanı boyalardır. Her çeşit metali ve tüm metalik yüzeyleri korozyondan korumak için en yaygın olarak kullanılan yöntemdir. Uygulama kolaylığı ve düşük maliyetleri bunun en önemli nedenleridir. Boyalar, metal yüzeyini dış ortam şartlarından yalıtıp su ve oksijenin metal yüzeyine gelmesini önler. Boya seçiminde dikkat edilecek hususlar ortamın korozif özelliği ve metalin işletme ömrüdür. Boya uygulaması; fırça, elektrostatik yöntem, daldırma ve püskürtme yöntemi gibi çeşitli şekillerde yapılabilir. Kaplanacak sistem yüzeyinin boyaya hazırlanması için doğru ve uzun ömürlü olması bakımından önemlidir. Metal yüzey ve boya katma arasındaki bağlantının sağlam olması için metal yüzeyi boyadan önce uygun yöntemlerle temizlenmeli ve bekleme yapılmadan boyanmalıdır [69].

### **3. MALZEME VE METOT**

Tez çalışmasının bu bölümünde; deneyde kullanılan çelikler, hızlandırılmış korozyon mekanizmaları, güçlendirme malzemeleri, deney parametreleri ve deney işleyişi anlatılmaktadır.

Düşük karbonlu St37 çeliklerinin yapılarında mangan, silisyum, kükürt ve fosfor gibi elementler bulunur. Fakat bunların oranları çok düşük derecededir. Kullanım yerleri genelde inşaat ve imalat olduğundan dolayı imalat çelikleri adıyla da bilinirler. Bu çalışma içerisinde, fiber katkılı beton (GRC: Glassfibre Reinforced Concrete) ile elektro galvaniz kaplamalı ve kaplama işlemi yapılmamış St37 kalite çelik malzemelerin, %3,5 sodyum klorür içeren (NaCl) ortamdaki korozyon direnci Elektrokimyasal Empedans Spektroskopisi yöntemi (EIS) ve Potansiyodinamik Polarizasyon (TP) yöntemi uygulanarak incelenmiştir.

Fiber takviyeli betonların inşaat sektöründe kullanımlarının artmasının nedeni fiziksel ve mekanik özelliklerinin iyi olmasıdır [70]. Bu çalışmada betonların ana yapıya montajında kullanılan elektro galvanizli ve galvanizsiz ankraj elemanlarının yapay asit yağmuru ile etkileşmesi; Elektrokimyasal Empedans Spektroskopisi yöntemi (EIS) ve Potansiyodinamik Polarizasyon (TP) yöntemi uygulanarak incelenmiştir. Deney sonrasında yüzeyler yüksek çözünürlüklü optik resimler kullanılarak incelenmiştir.

Demir ve çelik gibi malzemelerin atmosferik ortamdan hızla etkilenmeleri ile kimyasal özelliklerini kaybederler ve korozyona uğrarlar. Kullanılan bu demir ve çelikleri korumak amacıyla bazı yöntemler geliştirilmiştir. Sıcak daldırma galvanizleme yöntemi ile çinko kaplama bilinen en koruyucu kaplamadır. Bu çalışmada, %3,5 NaCl ortamında St37 sıcak daldırma galvaniz kaplı çeliğin korozyona karşı direnci elektrokimyasal empedans spektroskopisi (EIS), SEM ve EDS teknikleri ile araştırma yapılmıştır.

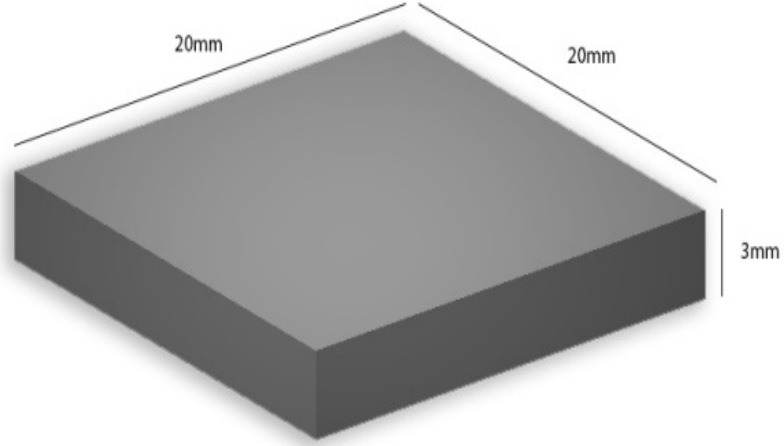
#### **3.1. DENEYLERDE KULLANILAN MALZEME**

Elektro galvanizli St37 çeliğinin kimyasal bileşimi Çizelge 3.1’de gösterildiği gibidir. Deneyde kullanılan St37 kalite çelik, Erk Demir Çelik San. Ve Tic. A.Ş tarafından sağlanmıştır [1, 2, 3, 71]. Ateş Galvaniz firmasında ise elektro galvaniz kaplama işlemi

uygulanmıştır. [1, 2, 3, 72]. Elektro galvaniz kaplama kalınlığı 10-15  $\mu$  olarak ölçülmüştür. Bu ölçümde Elcometer 456 F cihazı kullanılmıştır. Şekil 3.1’de testlerde kullanılan St37 çelik numunelerin ebatları verilmiştir.

Çizelge 3.1. ST 37 metalinin kimyasal bileşimi.

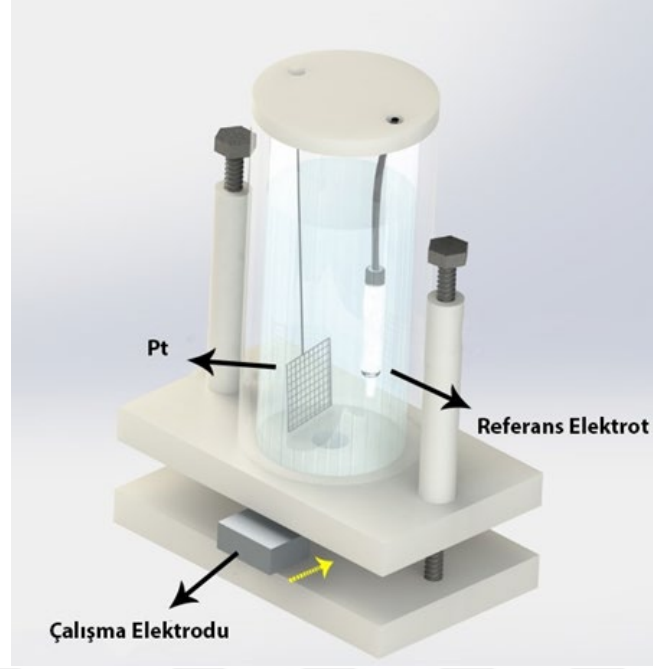
| Metal | C    | Mn   | P    | N     | S     | Si   |
|-------|------|------|------|-------|-------|------|
| St37  | 0,22 | 1,40 | 0,05 | 0,009 | 0,045 | 0,30 |



Şekil 3.1. Testlerde kullanılan St37 çelik numunelerin ebatları [1, 2, 3].

### 3.2. TESTLER İÇİN KULLANILAN DENEY DÜZENEĞİ

Şekil 3.2’de deneyde kullanılan BAB marka ters mikroskop gösterilmiştir. Burada kullanılan çalışma elektrotunun yüzeyi deney öncesi ve TP yöntemi sonrası ters mikroskopla incelenmiştir. Bu inceleme oda sıcaklığında ve 20X/0.35 (S) objektif ile ve 100x büyütme yapılarak tamamlanmıştır.



Şekil 3.2. Elektrokimyasal testler için kullanılan deney düzeneği [1, 2, 3].

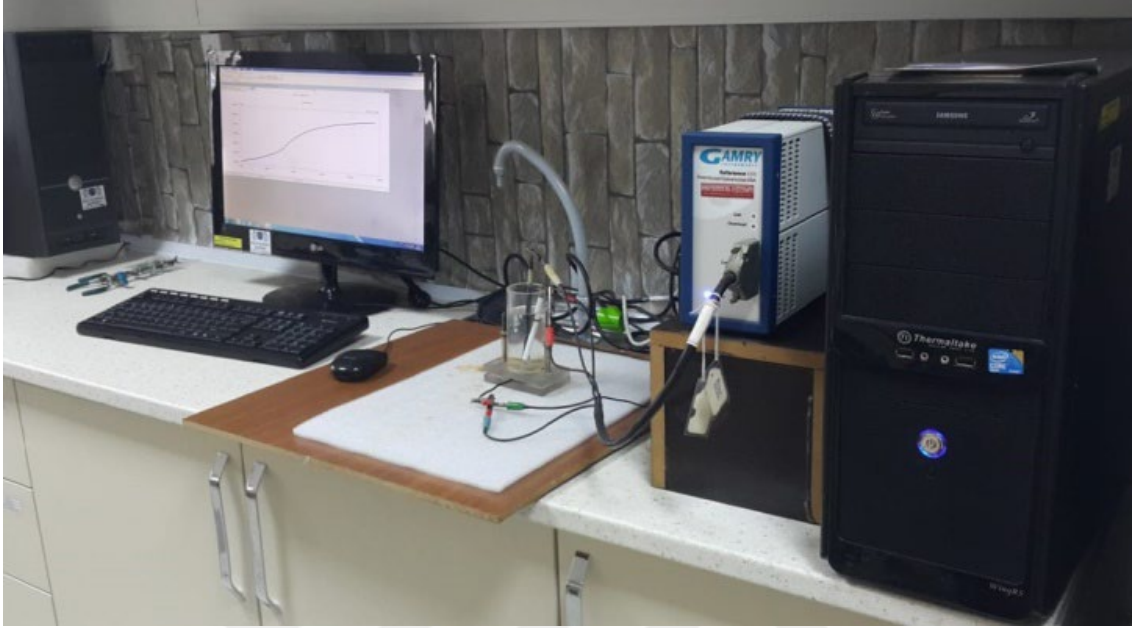
Yapay asit yağmuru hazırlanırken sırayla  $\text{SO}_4^{2-}$  ve  $\text{NO}_3^-$  karıştırılmıştır. Kütlece kullanım oranı 9/1'dir. Deney için hazırlanmış asit yağmuru çözeltisinin pH değeri 2,5 olarak belirlenmiştir [1, 2, 3, 73, 74]. Şekil 3.3'te ters metalürji mikroskobu cihazı gösterilmiştir.



Şekil 3.3. Ters metalürji mikroskobu [1, 2, 3].

Referans malzemesi olarak elektrot olarak gümüş klorür ( $\text{AgCl}$ ) elektrotu kullanılmıştır.  $2 \text{ cm}^2$  alana sahip platin elektrot karşıt elektrot olarak kullanılmıştır. Elektrokimyasal

ölçümler için GAMRY PC3/600 potansiyostat/galvano stat/ZRA makinasıyla işlem yapılmıştır [1, 2, 3]. Şekil 3.4'te bu deneyler için hazırlanan düzenek gösterilmektedir.



Şekil 3.4. Elektrokimyasal deneylerin yapıldığı düzenek [1, 2, 3].

EIS ölçümleri için Gamry a Instruments Company potansiyostat/galvanostat (model: Referans 600) cihaz ile yapılmıştır. Ölçümler oda sıcaklığında üç geleneksel elektrot sistemi ile gerçekleştirilmiştir. Deneyin kararlı durum koşulları altında gerçekleştirilmesi için OCP ölçümleri deneyden 1 saat önce yapılmıştır [1, 2, 3, 75]. Sıcak daldırma galvaniz kaplı St37 çelik numune, referans elektrot ve bir platin plaka ölçüm alanında kullanılan malzemelerdir. St37 çelik numunenin 0,5 cm<sup>2</sup>'si açıkta kalacak şekilde deney düzeneğine yerleştirilmiştir.

### 3.3. YÖNTEM

Öncelikli olarak deneyde kullanılan çalışma elektrotu standartlara uygun olarak hazırlanmıştır. Elektrokimyasal empedans spektroskopisi ve Potansiyodinamik Polarizasyon deneyleri öncesi önce 2 saat süre ile Açık Devre Potansiyeli değeri ölçümleri yapılmıştır [1, 2, 3, 75]. EIS ölçümleri için frekans aralığı 0,1 MHz -0,01 Hz olarak yapılmıştır. Daha sonra Potansiyodinamik Polarizasyon deneyleri anodik ve katodik yönde  $\pm 250$  mV potansiyel verilerek yapılmıştır. Hız olarak 1 mV/sn tarama hızı seçilmiştir.

Potansiyodinamik Polarizasyon ölçümleri (OCP) sonrası EIS ve TP deneyleri aynı numune üzerinde yapılmıştır. Her ölçüm bu uygulama için 7 kez tekrarlanmıştır. Burada sunulan veriler ortalama değere en yakın olanlardır. Çalışma elektrotunun yüzey pürüzlülüğü iyi bir şekilde zımpara ile zımparalanarak giderilmiştir. Sonrasında, numune arındırılmış suyla yıkanmış ve aseton ile silinmiştir. Tam olarak kuruması sağlanmıştır. Yapay korozyon ortamı için hazırlanan %3,5 NaCl çözeltisi, 10 dakika süre boyunca manyetik bir karıştırıcı ile iyice karıştırılarak sisteme eklenmiştir.

Desikatörde 2 saat kurutulan metaller için taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve enerji dağılım spektroskopisi (EDS) yöntemleri kullanılarak araştırma yapılmıştır. Yüzey morfolojisi için, Quanta FEG 250 (FEI, Hollanda) model cihaz kullanılmış ve bu işlem yüksek vakum modu uygulanarak yapılmıştır [2, 76]. Metal yüzey üzerindeki topografik bulguları incelemek için Optik profilometre (OP) yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemde yüzey bir çizgi boyunca taranır ve üç boyutlu (3B) görüntülenmesi sağlanır. Bu çok önemli bir yüzey inceleme yöntemidir. Metal yüzeyin topografyasındaki yükseklikler ve pürüzlülük değerleri, metalin korozyon mekanizması için önemli veriler sunar [2, 77].



## 4. BULGULAR

Bu çalışmada St37 çeliğinin üç aşamalı korozyon mekanizmasının incelenmesi amaçlanmıştır. Bu aşamalar sırasıyla;

- Elektro galvanizli veya galvanizsiz çeliğin korozyon mekanizmasının incelenmesi,
- Asit yağmurları etkisinde korozyon mekanizmasının incelenmesi,
- Sıcak daldırma galvanizli ve galvanizsiz çeliğin korozyon mekanizmasının incelenmesi.

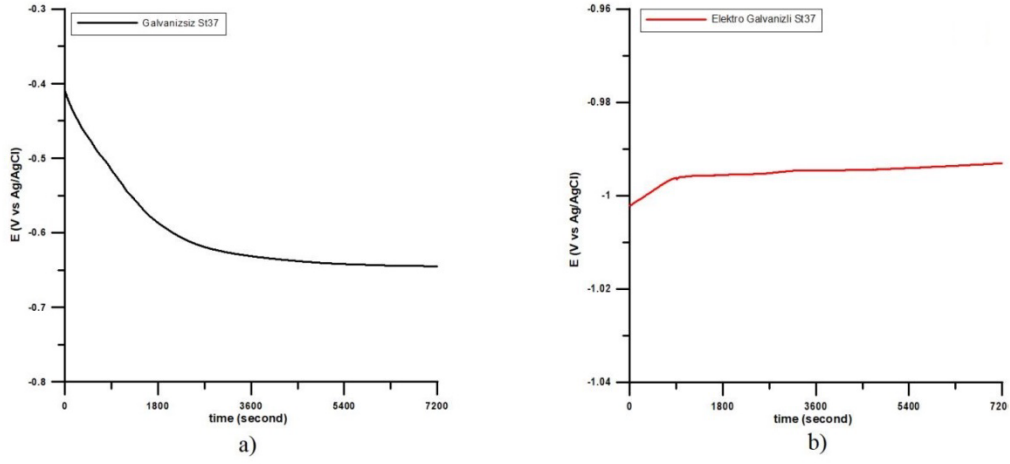
Üç aşamalı yapılan deneylerde St37 çeliğinin korozyona karşı göstermiş olduğu davranışlar OCP Analizi, EIS Analizi, TP Analizi, SEM-EDS analizi ve Optik Görüntüleme Analizi kullanılarak numuneler incelenmiş ve elde edilen bulgular ayrıntılı olarak sunulmuştur [1, 2, 3].

### 4.1. ELEKTRO GALVANİZLİ VE GALVANİZSİZ ÇELİĞİN KOROZYON MEKANİZMASININ İNCELENMESİ

#### 4.1.1. OCP Analizi

Galvanizsiz çalışma elektrotuna ait potansiyel değeri katodik yönde 60 dakika boyunca azalma göstermiştir. Deney öncesinde -410 mV olarak ölçülen elektrot potansiyeli, 60 dakika sonra -630 mV okunmuştur. Değerler bize deney sistemin sabit olmadığını göstermektedir. İlk 60 dakika boyunca bu durum gerçekleşmiştir. Sistem bu süre sonunda dengeye gelmiş ve elektrot potansiyeli ölçümü -645 mV olarak bulunmuştur. Deney 120 dakika sürmüştür. Bu değer bekleme süresinin doğru olduğunu göstermektedir [1].

Şekil 4.1’de 2 saat süresince numunelerin referans elektrota karşı potansiyel değişimleri verilmiştir.

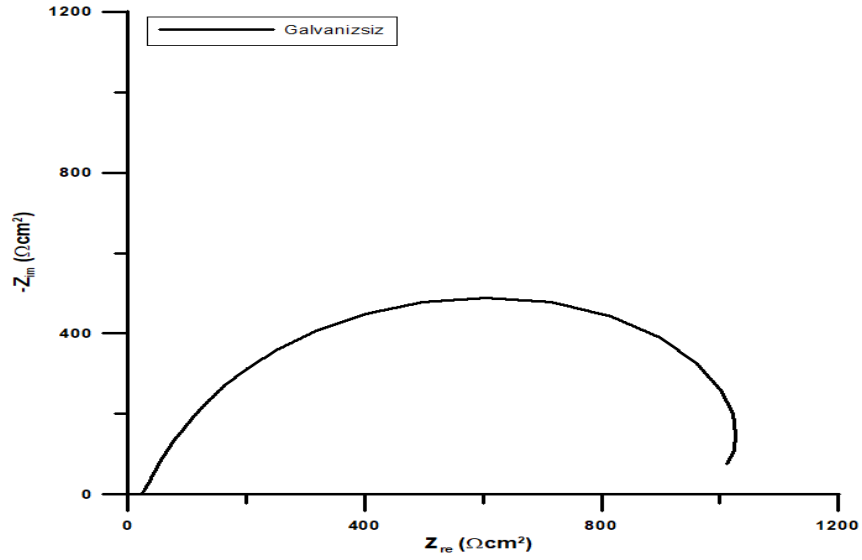


Şekil 4.1. (a) Galvanizsiz ve (b) galvanizli çalışma elektrotların süreye bağlı olarak değişimi [1].

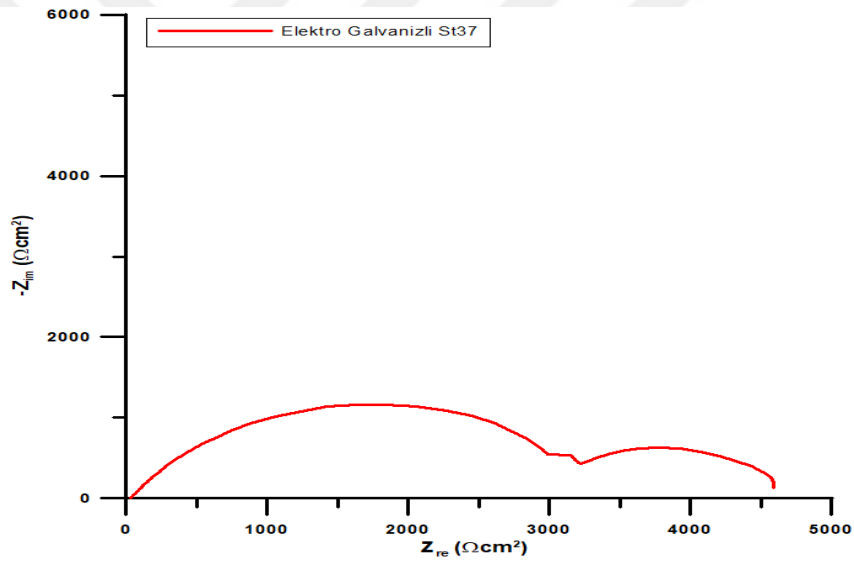
Elektro galvanizli numunenin potansiyeli deney öncesi -1002 mV olarak ölçülmüştür. Deney sonrası korozyon etkisiyle bu değer 9 mV olarak değişmiştir. Potansiyel değişikliğin iyi bir şekilde anlaşılması için Şekil 4.1’de gösterilen galvanizsiz elektrotun zamana bağlı potansiyel değişimine bakmak faydalı olacaktır [1].

#### 4.1.2. EIS Analizi

Potansiyodinamik Polarizasyon ölçümleri (OCP) sonrası elektrokimyasal empedans spektroskopisi (EIS) ölçümleri frekans aralığı olarak 100.000-0.01 Hz arasında yapılmıştır. Elektrokimyasal empedans spektroskopisi (EIS) ölçümleri sonucunda Nyquist eğrileri elde edilmiştir. Galvanizli ve galvanizsiz numune değerleri için bu eğriler Şekil 4.2 ve Şekil 4.3’te gösterilmektedir [1].

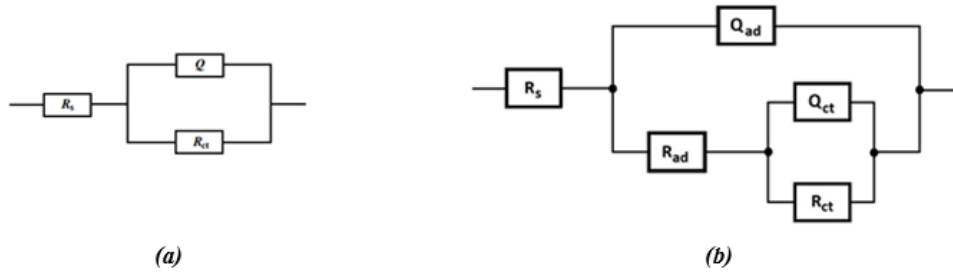


Şekil 4.2. EIS ölçümleri sonucunda Galvanizsiz numuneden elde edilen Nyquist diyagramı [1].



Şekil 4.3. EIS ölçümleri sonucunda Galvanizli numuneden elde edilen Nyquist diyagramı [1].

Uygun devre belirlenerek Nyquist eğrilerinin doğru analiz edilmesi sağlanır [1, 78]. Doğru analiz yapabilmek için ZSimpWin 3.21 yazılımı kullanılmıştır. Deneyde bulunan değerlerle yazılımda kullanılan devrenin verdiği verilerin uyumunun maksimum derecede olması istenmektedir. Şekil 4.2’de gösterilen Nyquist diyagramı galvanizsiz numune için R(QR) devresi kullanılmaktadır. Galvanizli numuneye ait R(Q(R(QR))) devresi kullanılmıştır. Kullanılan sistemine ait diyagramları Şekil 4.4’te belirtilmiştir. [1, 79].



Şekil 4.4. (a) Galvanizsiz ve (b) elektro galvanizli St37 kalite ankraj numunesinin %3,5 NaCl şartları altında korozyon mekanizmasının EIS yöntemi ile analizi [1].

Bu sistemde her parametrenin bir anlamı vardır. R(QR) devresinde;  $R_s$ : çözelti direncini,  $Q$ : sabit faz ögesini ve  $R_{ct}$ : Metaldeki yük transfer mukavemetini göstermektedir [1].

Bu devrelerle bulunan değerler Çizelge 4.1 ve Çizelge 4.2’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.1. Galvanizsiz St37 kalite ankraj numunesinin %3.5 NaCl ortamında korozyon mekanizmasının EIS yöntemi ile analizi [1].

| Ortam     | $R_s$<br>( $\Omega \text{ cm}^2$ ) | $Y_0 \times 10^{-3}$<br>( $\mu\Omega s^n \text{ m}^{-2}$ ) | $n$  | $R_{ct}$<br>( $\Omega \text{ cm}^2$ ) |
|-----------|------------------------------------|------------------------------------------------------------|------|---------------------------------------|
| %3,5 NaCl | 24,16                              | 1.07                                                       | 0.81 | 1169                                  |

Çizelge 4.2. St37 kalite elektrog galvaniz kaplı ankraj numunesinin %3.5 NaCl ortamında korozyon mekanizmasının EIS yöntemi ile analizi [1].

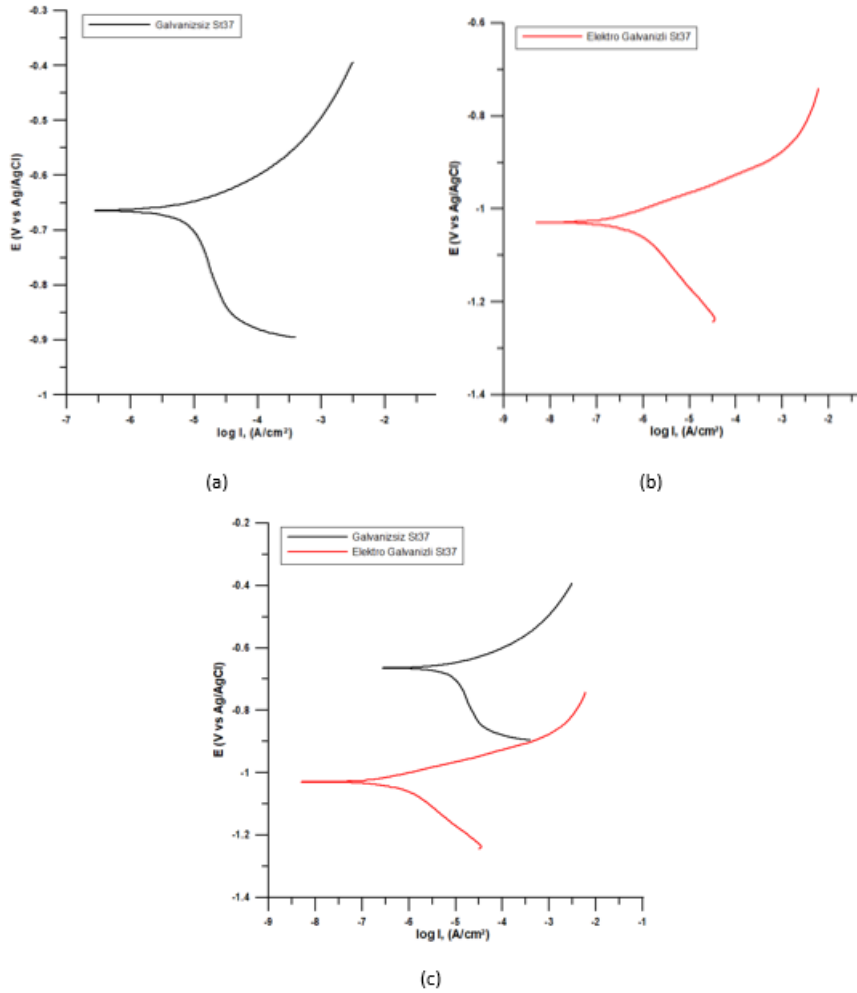
| Ortam     | $R_s$<br>( $\Omega \text{ cm}^2$ ) | $Y_0 \times 10^{-3}$<br>( $\mu\Omega s^n \text{ m}^{-2}$ ) | $R_{ct}$<br>( $\Omega \text{ cm}^2$ ) | $n$ | $R_{ad}$<br>( $\Omega \text{ cm}^2$ ) |
|-----------|------------------------------------|------------------------------------------------------------|---------------------------------------|-----|---------------------------------------|
| %3,5 NaCl | 30,31                              | 1.69                                                       | 3593                                  | 1   | 997                                   |

Çizelge 4.1’de  $R_{ct}$  değeri  $1169 \Omega \text{ cm}^2$ , yüzey pürüzlülüğü “n” değeri 0,81 olduğu anlaşılmaktadır. “n” yüzey pürüzlülüğü  $0 < n < 1$  olduğundan bu değer Çizelge 4.2’de görüldüğü gibi 1 değeri elektro galvaniz işleminin metali korozyon etkilerine karşı korunduğunu göstermektedir. Elektro galvaniz kaplama sayesinde metalde  $997 \Omega \text{ cm}^2$  değerinde kaplama direnci oluşmuştur. Buna ek olarak elektro galvaniz kaplama ile metale ait  $R_{ct}$  değeri, 3,07 kat artmıştır. Değer  $3593 \Omega \text{ cm}^2$  olmuştur [1].

#### 4.1.3. TP Analizi

EIS ölçümleri yapıldıktan sonra sistem bozulmadan TP yapılmıştır [1, 81]. Bulunan Tafel

diyagramları Şekil 4.5'te gösterilmiştir. Gamry Echem Analyst V6.33 cihazı ile bulunan değerler Çizelge 4.3'te verilmiştir.



Şekil 4.5. (a) St37 kalite Galvanizsiz ve (b) St37 kalite elektro galvaniz kaplı çelik numunelerinin %3,5 NaCl ortamında korozyon mekanizmasının TP yöntemi ile bulunan Tafel diyagramları, (c) Bulunan iki diyagram karşılaştırılması [1].

Çizelge 4.3. St37 kalite Galvanizsiz ve St37 kalite elektro galvaniz kaplı çelik numunelerinin %3,5 NaCl ortamında korozyon mekanizmasının TP yöntemi ile analizi [1].

| Numune             | $E_{corr}$<br>(mV/Ag/AgCl) | $i_{corr}$<br>( $\mu$ A/cm <sup>2</sup> ) | $\beta_a$<br>(mV/dec) | $\beta_c$<br>(mV/dec) |
|--------------------|----------------------------|-------------------------------------------|-----------------------|-----------------------|
| Galvanizsiz        | -664                       | 21                                        | 72                    | 350                   |
| Elektro Galvanizli | -1030                      | 1,9                                       | 40                    | 62                    |

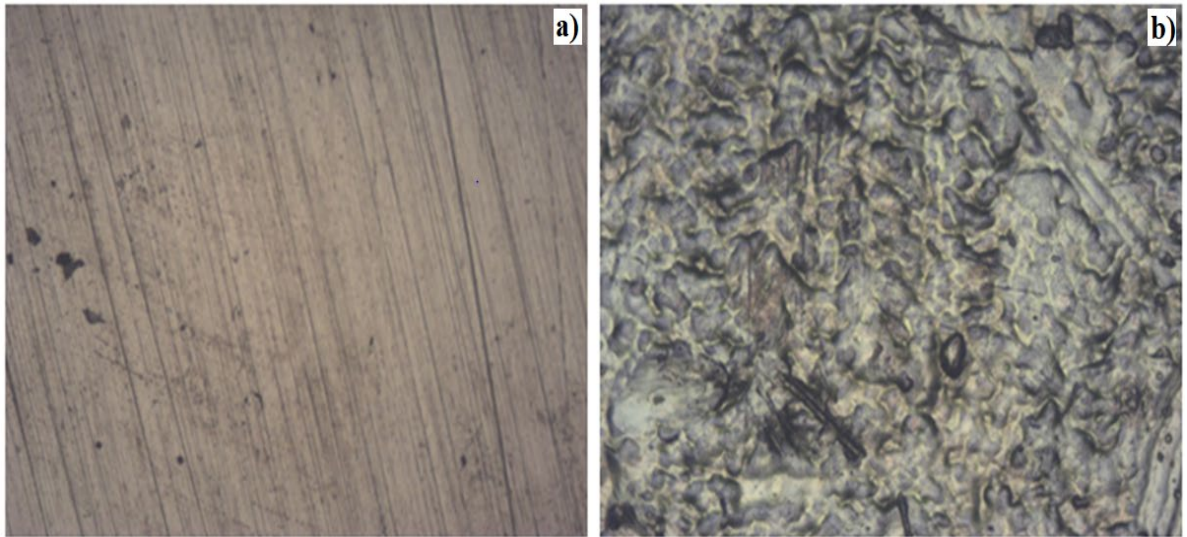
Elektro galvaniz kaplama işlemi  $i_{corr}$  değerinde 11.05 kat azalmaya sebep olmuştur. Bu değerdeki azalmanın sistemin daha az korozyona maruz kaldığını göstermektedir. Elektro

galvaniz işlemi sayesinde Ecorr değerimiz -1030 mV değerine ulaşmış ve sistem daha katodik yöne doğru kaymıştır. Tafel sabiti iki tip numune için çok değişmemiştir. Bu sistemin katodik olarak devam ettiğini göstermektedir. Bulunan bu değerler EIS verilerini doğrulamaktadır [1].

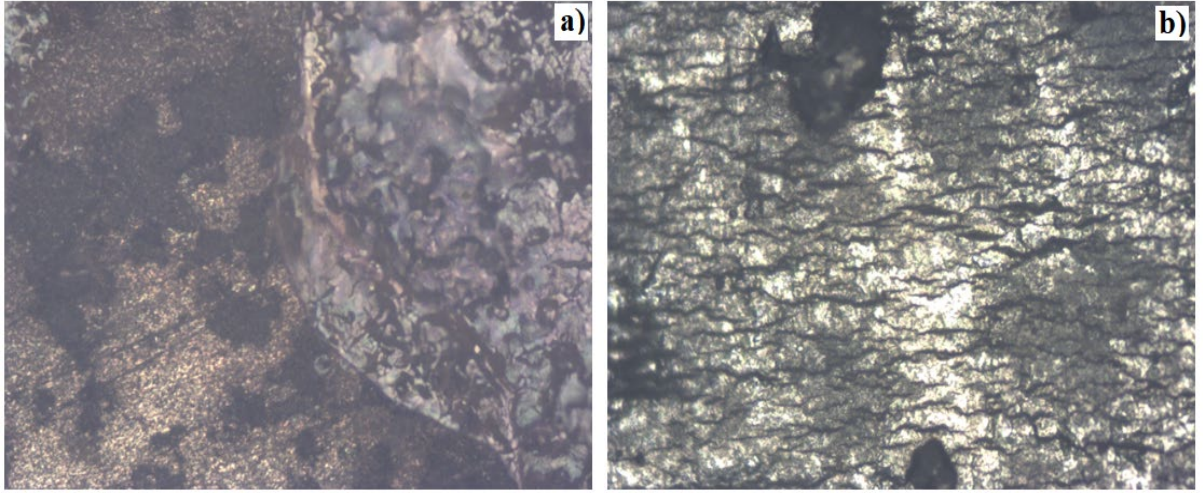
#### 4.1.4. Optik Görüntüleme Analizi

Bu analiz için çelik parçalardan elde edilen görüntüler Şekil 4.6'da verilmiştir. Deney öncesi (a) St37 kalite galvanizsiz numuneyi, (b) ise St37 kalite elektro galvanizli numuneyi temsil etmektedir. İlk deney sonrasındaki veriler Şekil 4.7'de verilmiştir [1].

Bu verilerin analizine göre; Şekil 4.6'da belirtilen görüntülerde görüleceği üzere elektro galvaniz kaplama işlemi sonucu net bir şekilde görünmektedir. Deney sonrasında yapılan görüntü karşılaştırması neticesinde galvaniz yapılmayan numunenin çok daha fazla korozyona maruz kaldığı, elektro galvaniz kaplı numunenin ise daha az korozyona uğradığı görülmektedir (Şekil 4.7). Bu sonuçlara göre elektro galvaniz kaplama işlemi %3,5 NaCl ortamında korozyona karşı koruyucudur. Optik görüntüleme verilerine göre deneyden önce ve deneyden sonra çelik ankraj yüzeyindeki değişimler elektrokimyasal verileri desteklediği görülmüştür [1].



Şekil 4.6. Deneyden önce; (a) St37 kalite galvanizsiz çelik ve (b) St37 kalite elektro galvaniz kaplı çelik [1].

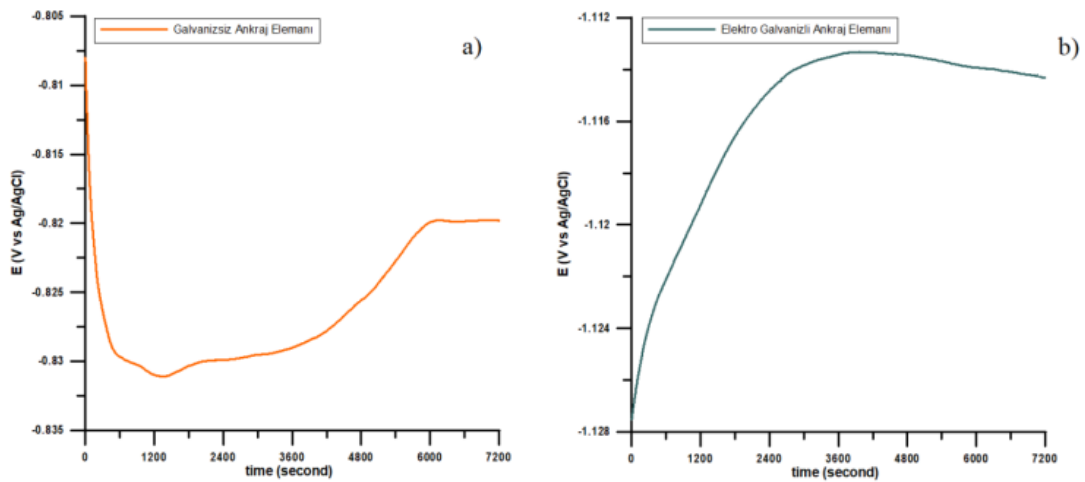


Şekil 4.7. Deneyden sonra; (a) St37 kalite galvanizsiz çelik ve (b) St37 kalite elektro galvaniz kaplı çelik [1].

## 4.2. ASİT YAĞMURLARININ OLUŞTURDUĞU KOROZYON MEKANİZMASININ İNCELENMESİ

### 4.2.1. OCP Analizi

Elektrokimyasal deneyler öncesi çalışma elektrotu ile referans elektrot arasındaki potansiyelin zamanla nasıl değiştiğini gösteren bu ölçüm, araştırılan metalin korozyon mekanizması hakkında detaylı bilgi edinmemizi sağlamaktadır. Şekil 4.8’de galvanizsiz ve elektro galvanizli ankraj elemanlarının OCP ölçümleri verilmiştir.



Şekil 4.8. Galvanizsiz ve elektro galvanizli ankraj elemanlarının OCP ölçümleri [3].

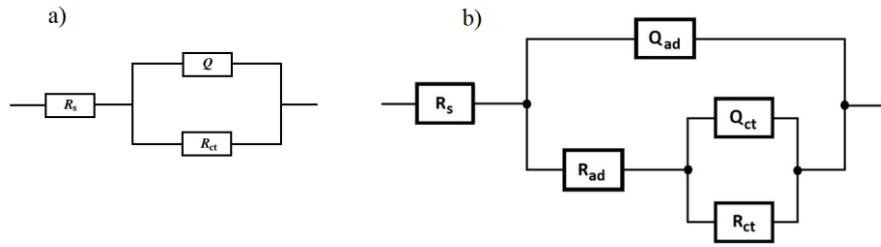
Şekil 4.8-(a)’da; yapay asit yağmurunun etkisiyle galvanizsiz ankraj elemanın Ag/AgCl referans elektroda karşı ölçülen potansiyeli -808 mV değerinden 1200 saniye boyunca

katodik yönde -831 mV değerine kadar düşmesi hızlı bir korozyon sürecini işaret etmektedir. Deneye başladıktan 6000 saniye sonra potansiyel değişimi -819 mV dolayında stabil kalmıştır [3].

Şekil 4.8-(b)'de; elektro galvaniz kaplamanın potansiyel değişimi galvanizsiz numuneye göre daha uzun sürmüştür. Yaklaşık ilk bir saat, yapay asit yağmuru ile reaksiyona giren metalin potansiyeli -1128 mV'tan anodik yönde kayarak -1114 mV olmuştur. Deneye başladıktan 4200 saniye sonra potansiyel değişimi deney bitimine kadar sadece 2 mV değişmesi, metalin yüzeyinde tekrar oluşan bir oksit filminin varlığını işaret etmektedir [3].

#### 4.2.2. EIS Analizi

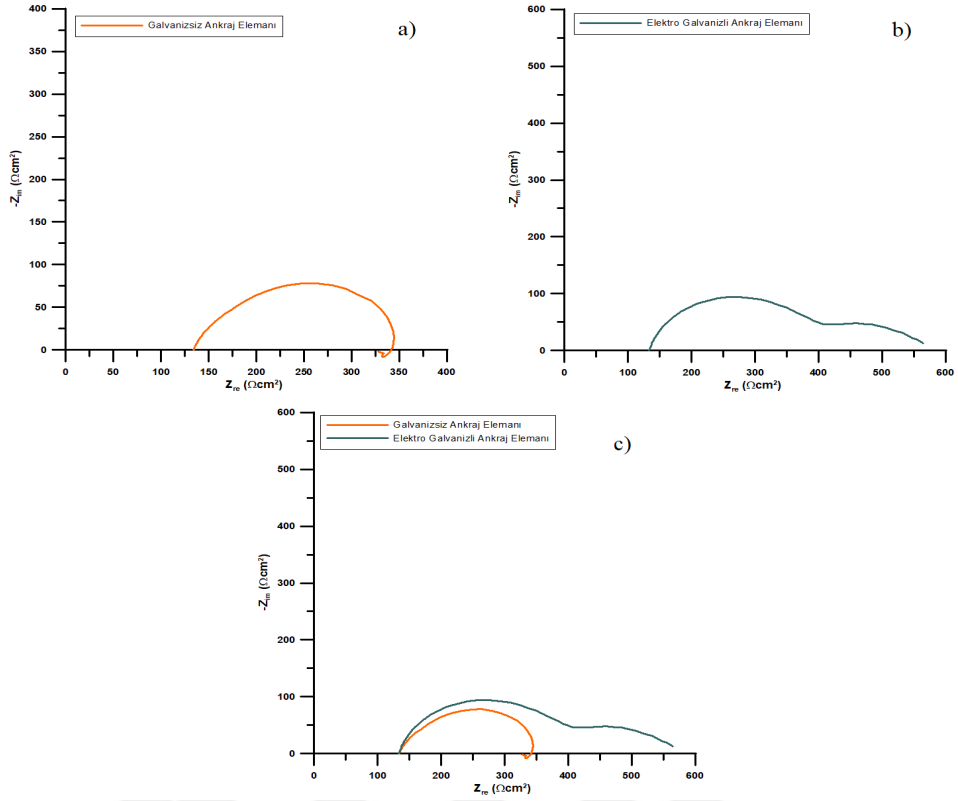
EIS verileri, ZSimpWin 3.21 yazılımı kullanılarak analiz edilmiştir [3, 78]. DeneySEL veriler en iyi uyumu Şekil 4.9'da belirtilen devrelerle vermiştir. Galvanizsiz ve galvanizli numeneler için sırasıyla R(QR) ve R(Q(R(QR))) devresi kullanılmıştır [3]



Şekil 4.9. (a) Galvanizsiz ve (b) elektro galvanizli ankraj elemanının yapay asit yağmurunda korozyonunun EIS yöntemiyle bulunan değerlerin analizi [3].

Yapay asit yağmurunun etkisiyle galvanizsiz ve elektro galvaniz kaplamalı ankraj elemanlarının farklı elektrokimyasal tepkime verdikleri EIS-Nyquist diyagramlarından görülmektedir. Galvanizsiz numunenin gerçek impedans ( $Z_{re}$ ) değerinin, apsis ekseninin altına geçmesi metal yüzeyinde pitting oluşumunu göstermektedir.

Elektro galvaniz yapılmış elektrotun Nyquist diyagramında iki loop (döngü) oluşumu görülmektedir. Yüksek frekans bölgesinde gözlemlenen ilk döngü yük transfer direncine ( $R_{ct}$ ) diğer döngü kaplama direncini ( $R_{dl}$ ) tanımlamaktadır [3]. Şekil 4.10'da galvanizsiz ve elektro galvanizli ankraj elemanlarının EIS-Nyquist diyagramları verilmiştir.



Şekil 4.10. Galvanizsiz ve elektro galvanizli ankraj elemanlarının EIS-Nyquist diyagramları [3].

Çizelge 4.4 ve Çizelge 4.5'te bulunan çözelti direnci ( $R_s$ ) hemen hemen aynı kabul edilebilir. Çizelge 4.4'te “n” simgesiyle gösterilen ve yüzey pürüzlülüğünü de ifade edebilen değerin 0.81 olduğu görülmektedir. Elektro galvanizli ankraj pad numunenin “n” değerinin 1 olması ana metal yüzeyin korozyona uğramadığını göstermektedir. Nitekim  $R_{ct}$  değeri de  $263 \Omega \text{ cm}^2$  ile galvanizsiz numuneden sadece  $54 \Omega \text{ cm}^2$  yüksek olduğu görülmektedir. Ana metal yüzeyinde bulunan kaplamanın direnci ise  $171 \Omega \text{ cm}^2$ 'dir [3].

Çizelge 4.4. Galvanizsiz ankraj pad elemanının yapay asit yağmurunda korozyonunun EIS yöntemi ile bulunan analiz sonuçları [3].

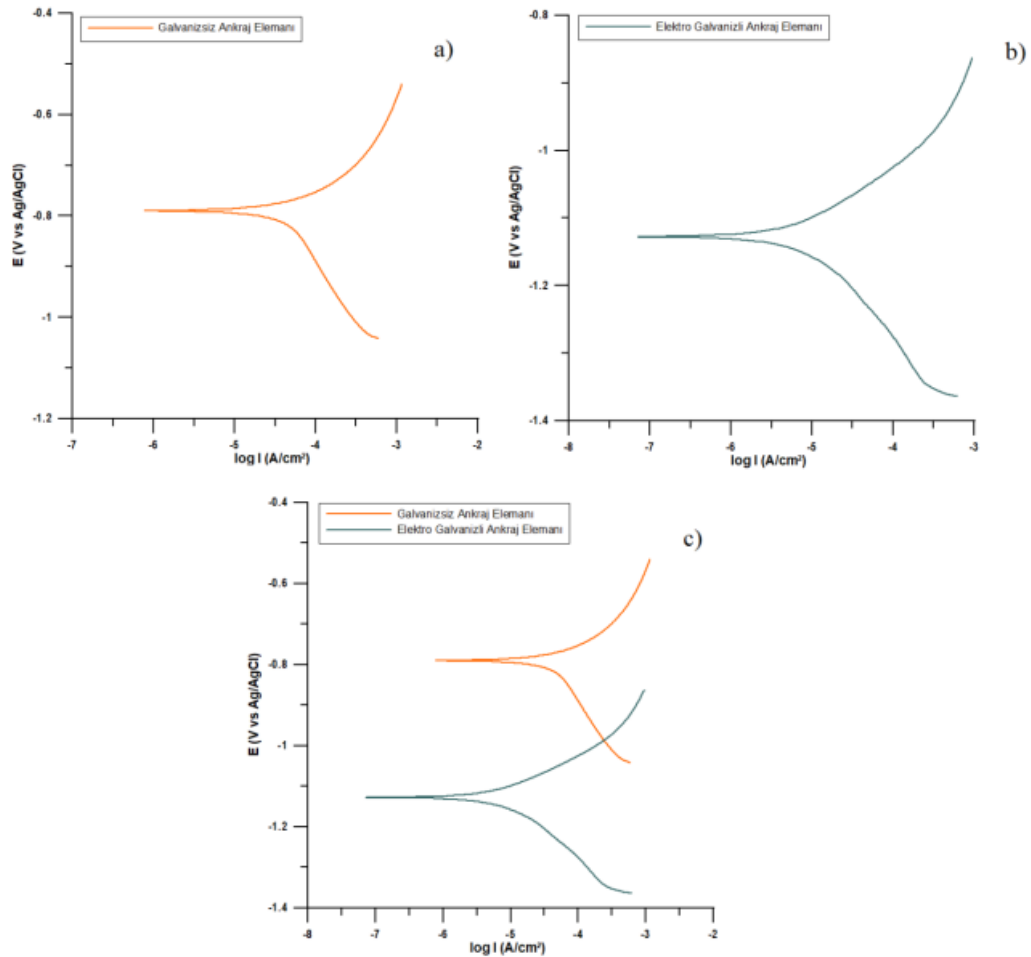
| Ortam              | $R_s$<br>( $\Omega \text{ cm}^2$ ) | $Q-Yo$<br>( $\mu\Omega \text{s}^n \text{ m}^{-2}$ ) | $n$  | $R_{ct}$<br>( $\Omega \text{ cm}^2$ ) |
|--------------------|------------------------------------|-----------------------------------------------------|------|---------------------------------------|
| Yapay asit yağmuru | 135                                | $4.42 \cdot 10^{-4}$                                | 0.81 | 209                                   |

Çizelge 4.5. Elektro galvanizli ankraj pad elemanının yapay asit yağmurunda korozyonunun EIS yöntemi ile bulunan analiz sonuçları [3].

| Ortam              | $R_s$<br>( $\Omega \text{ cm}^2$ ) | $Q_{-Yo}$<br>( $\mu\Omega s^n \text{ m}^{-2}$ ) | $R_{ct}$<br>( $\Omega \text{ cm}^2$ ) | $n$ | $R_{ad}$<br>( $\Omega \text{ cm}^2$ ) |
|--------------------|------------------------------------|-------------------------------------------------|---------------------------------------|-----|---------------------------------------|
| Yapay asit yağmuru | 133                                | $7.54 \cdot 10^{-5}$                            | 263                                   | 1   | 171                                   |

#### 4.2.3. TP Analizi

Korozyon potansiyeli ( $E_{corr}$ ) belirlendikten sonra anodik ve katodik yönde akım uygulanarak elde edilen TP diyagramları Şekil 4.11’de gösterilmiştir. Gamry Echem Analyst V6.33 programı ile elde edilen elektriksel parametreler Çizelge 4.6’da verilmiştir [3].



Şekil 4.11. Galvanizsiz ve elektro galvanizli ankraj elemanlarının TP diyagramları [3].

Korozyon akım yoğunluğu değeri ( $i_{corr}$ ), korozyon hızı hakkında bilgi veren önemli bir bulgudur [62]. Korozyon akım yoğunluğundaki azalma; test edilen parçanın daha düşük oranda korozyon yaşadığını belirtmektedir [63]. Galvanizsiz numunenin  $84,5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$

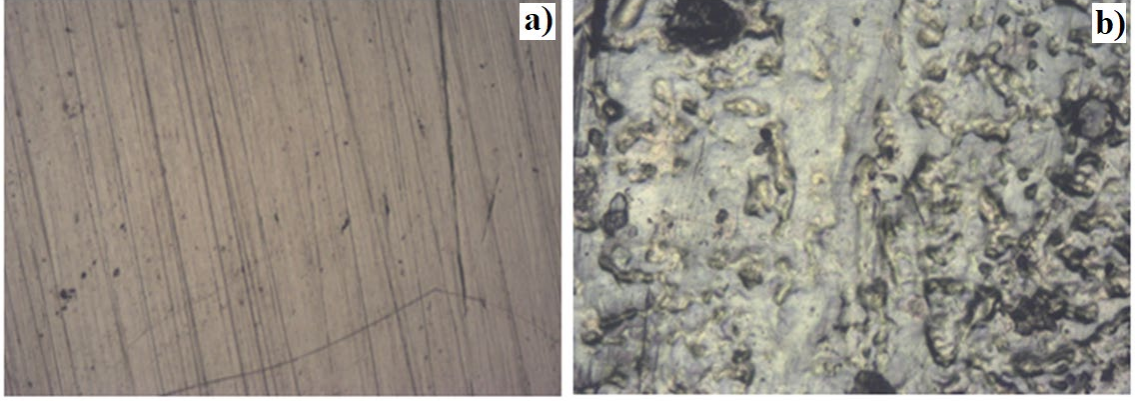
değerle elektro galvanizli numuneye kıyasla daha çok korozyona uğradığı görülmektedir [3].

Çizelge 4.6. Elektro galvanizli ankraj pad elemanının yapay asit yağmuru altında korozyonun mekanizmasının EIS metoduyla analizi [3].

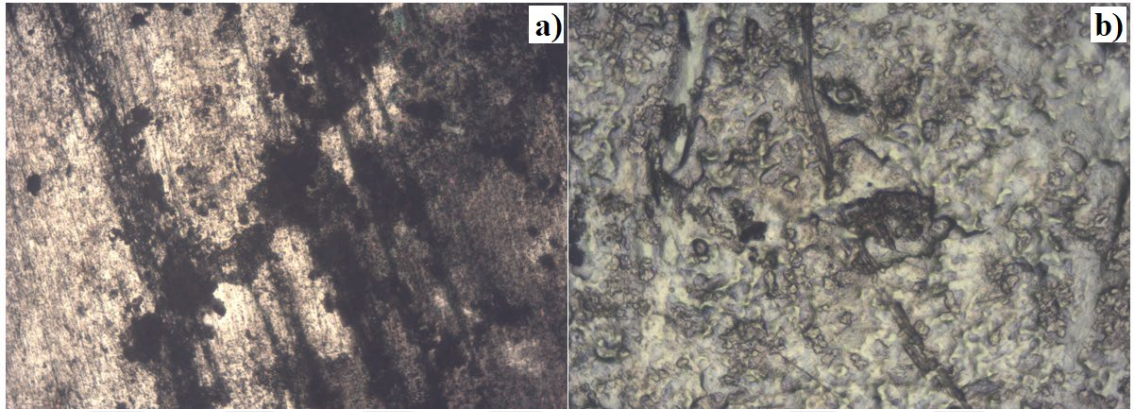
| Numune             | $E_{corr}$<br>(mV/Ag/AgCl) | $i_{corr}$<br>( $\mu A/cm^2$ ) | $\beta_a$<br>(mV/dec) | $\beta_c$<br>(mV/dec) |
|--------------------|----------------------------|--------------------------------|-----------------------|-----------------------|
| Galvanizsiz        | -790                       | 84,5                           | 111                   | 414                   |
| Elektro Galvanizli | -1130                      | 28,1                           | 92                    | 125                   |

#### 4.2.4. Optik Görüntüleme Analizi

Optik görüntüleme analizi için test parçalarından alınan görüntüler Şekil 4.12’de deney öncesinde (a) Galvanizsiz ve (b) Elektro galvanizli olarak verilmiştir. Şekil 4.13’te ise deney sonrası (a) St37 kalite galvanizsiz çelik ve (b) St37 kalite elektro galvaniz kaplı çelik olarak belirlenmiştir. Optik görüntüleme analizine göre; deney öncesinde (Şekil 4.12) yapılan görüntü incelemesinde Galvanizsiz (a) ile elektro galvanizli (b) arasında çok bariz bir biçimde elektro galvaniz kaplamanın olumlu etkileri görünmektedir. Deney sonrası (Şekil 4.13) yaptığımız görüntü analizine göre, St37 kalite galvanizsiz çelik (a) ile St37 kalite elektro galvaniz kaplı çelik (b), deney öncesi sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Buna göre St37 kalite Galvanizsiz çeliğin net bir biçimde daha çok korozyona uğradığı, genel olarak çukurcuk korozyonu (Pitting corrosion) olduğu görülmüştür. St37 kalite elektro galvaniz kaplı çeliğin ise daha az korozyona uğradığı görülmüştür. Galvanizsiz numunenin değişiminin elektro galvaniz kaplama işlemi uygulanmış numuneye göre daha fazla olduğu görülmüştür. Deneyden önce ve deneyden sonra optik görüntülere göre oluşan deformasyonların elektrokimyasal verileri destekler nitelikte olduğu gözlenmiştir [3].



Şekil 4.12. Deneyden önce; St37 kalite galvanizsiz çelik (a), St37 kalite elektro galvaniz kaplı çelik (b) [3].

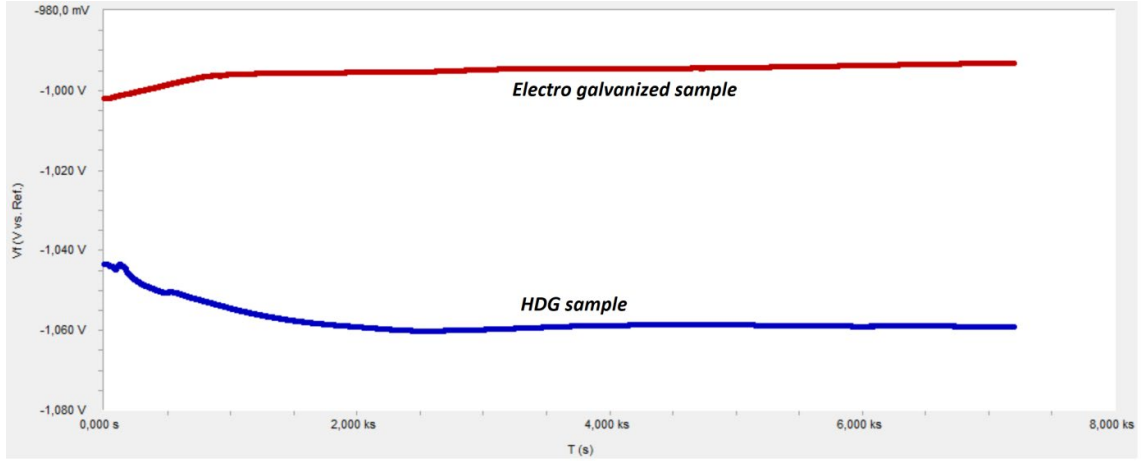


Şekil 4.13. Deneyden sonra; St37 kalite galvanizsiz çelik (a), St37 kalite elektro galvaniz kaplı çelik (b) [3].

### 4.3. SICAK DALDIRMA GALVANİZLİ ST37 ÇELİĞİNİN KOROZYON MEKANİZMASININ İNCELENMESİ

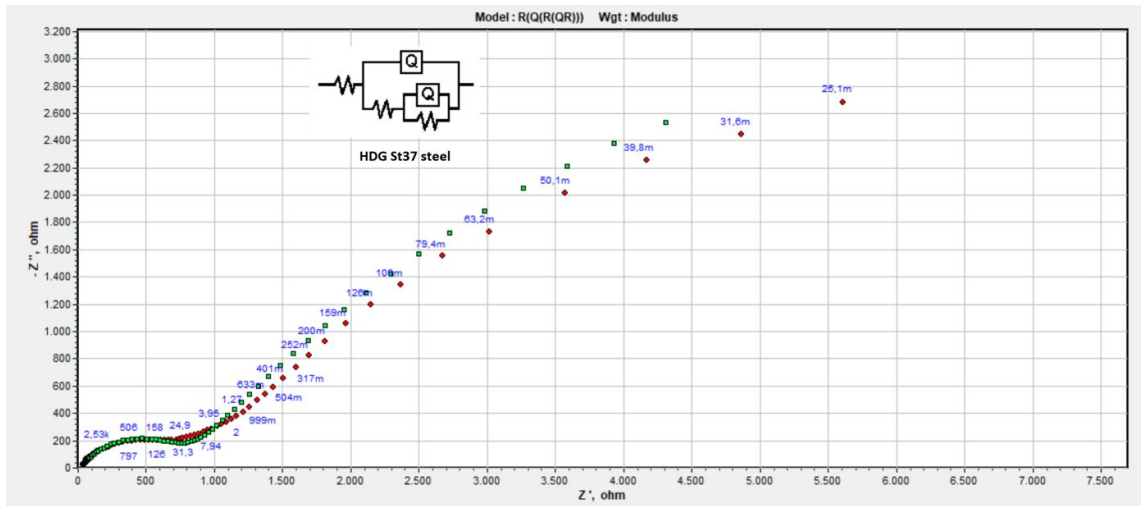
#### 4.3.1. EIS Analizi

Sıcak daldırma galvanizli St37 çeliğinin %3,5 NaCl ortamındaki korozyon davranışı önce 2 saat boyunca açık devre potansiyeli ölçülerek incelenmiş (Şekil 4.14), yüzey görüntüleme yöntemleri tarafından EIS ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Nyquist diyagramı iki kapasitif yay gösterdi (Şekil.4.15). Yüksek frekanstaki birinci kapasitif ark,  $R_{ct}$ 'ye karşılık gelir ve ikinci kapasitif ark, St37 metali üzerindeki sıcak daldırma galvaniz kaplamanın direncini ( $R_{ad}$ ) belirtir [2].



Şekil 4.14. Elektro-galvanizli ve HDG St37 çeliğinin %3,5 NaCl çözeltisi içinde OCP ölçümü [2].

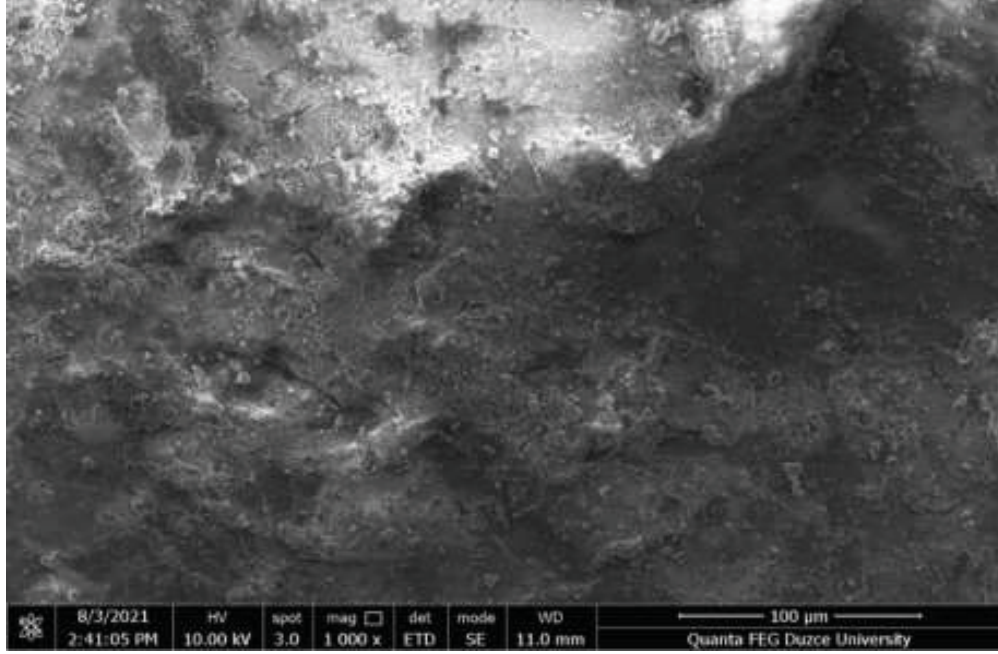
St37 metal üzerine yapılan HDG kaplamanın direncinin  $11600 \Omega \text{ cm}^2$  olduğu hesaplanmıştır. Elektro galvanizli numune ile yaptığımız önceki çalışma ile karşılaştırıldığında, bu değer yaklaşık 3.22 kat daha yüksektir [1, 2].



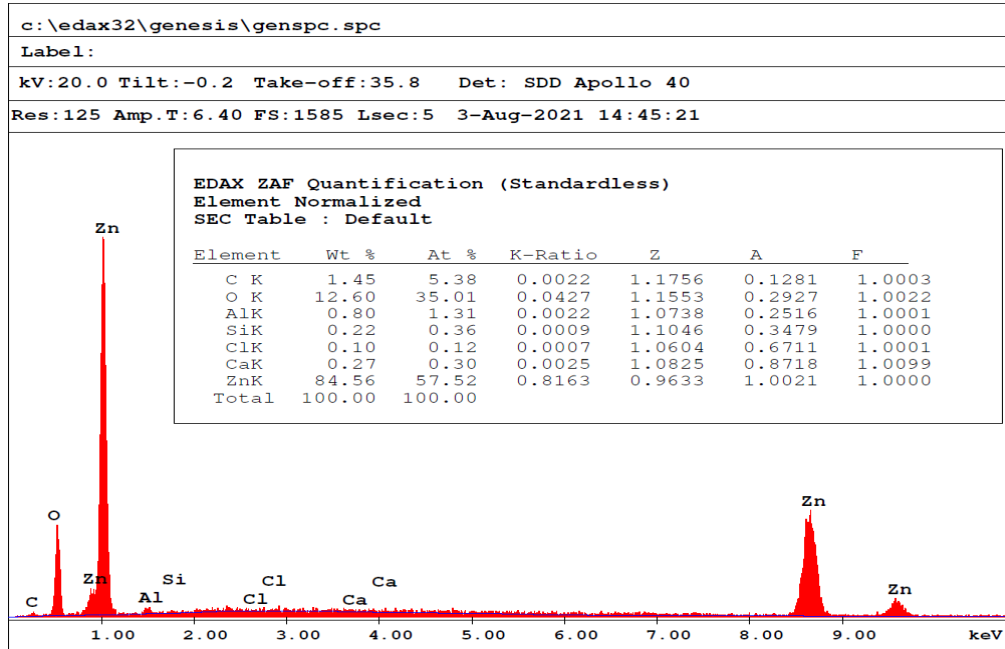
Şekil 4.15. Sıcak daldırma galvanizli St37 çeliğinin nyquist diyagramı [2].

#### 4.3.2. SEM ve EDS Analizleri

İncelenen örneğin EIS ölçümü öncesi SEM görüntüsü Şekil 4.16'da gösterilmektedir. Yüzeyin genel EDS analizi incelendiğinde, yüzeyde yaklaşık %85 Zn ve %13 O bulunması, yüzeyde olası ZnO veya Zn(OH)<sub>2</sub> oluşumunu desteklemektedir (Şekil 4.17).



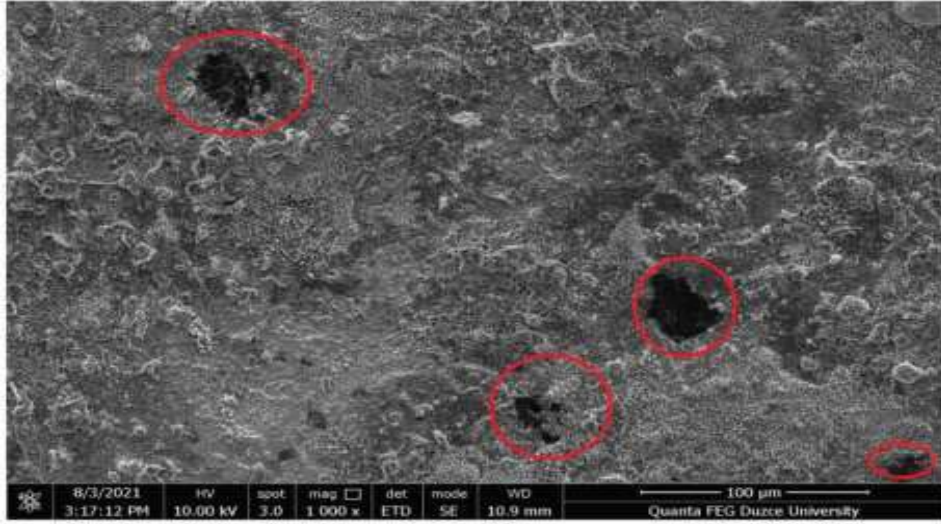
Şekil 4.16. Sıcak daldırma galvanizli St37 çeliğinin SEM görüntüleri (EIS ölçümü öncesi) [2].



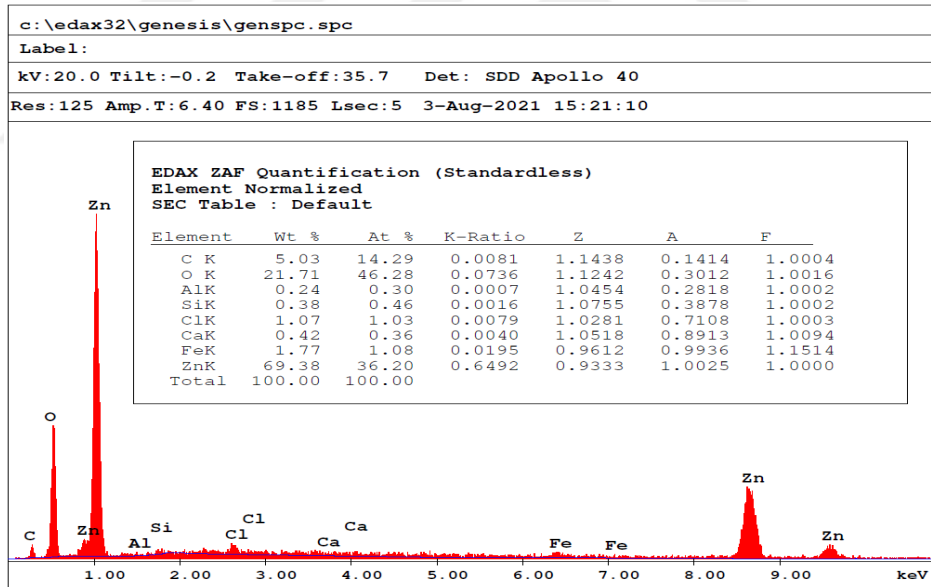
Şekil 4.17. Sıcak daldırma galvanizli St37 numunesinin genel EDS analizi (EIS ölçümünden önce) [2].

EIS deneyi sonunda alınan SEM görüntüsünde (Şekil 4.18), metal yüzeyinin bazı bölgelerinde oksit filminin kaybolduğu görülmektedir. Bu bölgeler Şekil 4.18'de işaretlenmiştir. EDS yöntemi sonuçları da bu görsel bulguyu destekler niteliktedir. Şekil

4.19’da görüldüğü üzere EIS deneylerinden önce metal yüzeyindeki Zn oranının %20 oranında azaldığı, EIS deneyinden sonra ise %69,7’ye düşmüştür [2].



Şekil 4.18. Sıcak daldırma galvanizli St37 numunenin SEM görüntüleri (EIS ölçümünden sonra) [2].



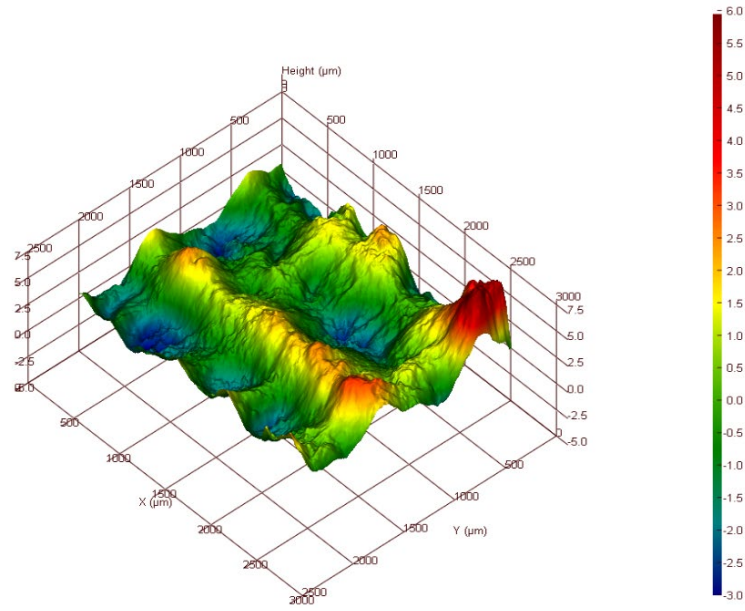
Şekil 4.19. Sıcak daldırma galvanizli St37 numunesinin genel EDS analizi (EIS ölçümünden sonra) [2].

EIS deneyleri sonunda oksijen miktarının %72,30 artışla %21,71’e ulaştığı görülmektedir. Bu artışın “Fe” miktarındaki artışa paralel olması dikkat çekicidir. Deney öncesinde yüzeyde “Fe” ölçülemezken (Şekil 4.17) deney sonrasında bu değerin %1,77 olduğu görülmektedir (Şekil 4.19). Bu bulgu, çinko oksit bileşiklerinin yanı sıra yüzeyde demir oksit bileşiklerinin de oluştuğunu göstermektedir [2].

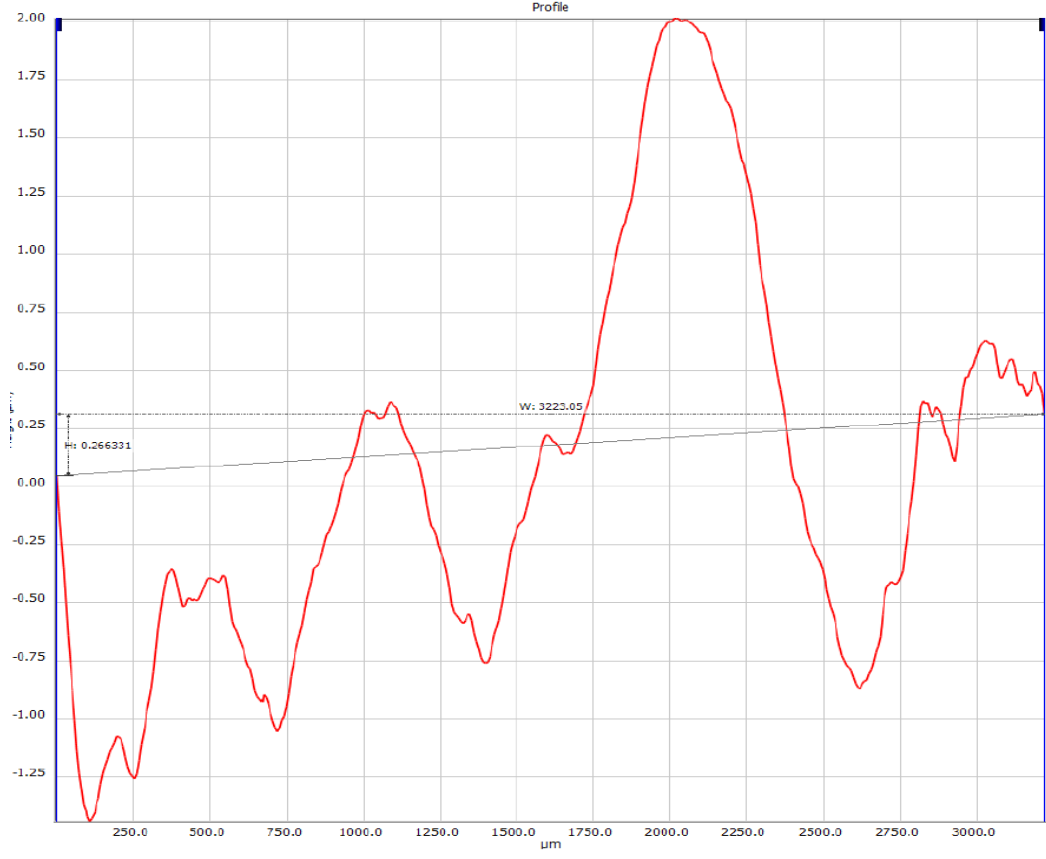
### 4.3.3. OP Analizi

Optik profilleme, çalışılan metal yüzey üzerindeki yüzey pürüzlülüğü, malzeme kaybı ve çukur istatistiklerini bilmek ve korozyonun metal üzerindeki etkisini anlamak için yapılmıştır. şekil 4.20 ve şekil 4.22’te örneklerin EIS deneyinden önceki ve sonraki üç boyutlu görüntüleri verilmiştir [2].

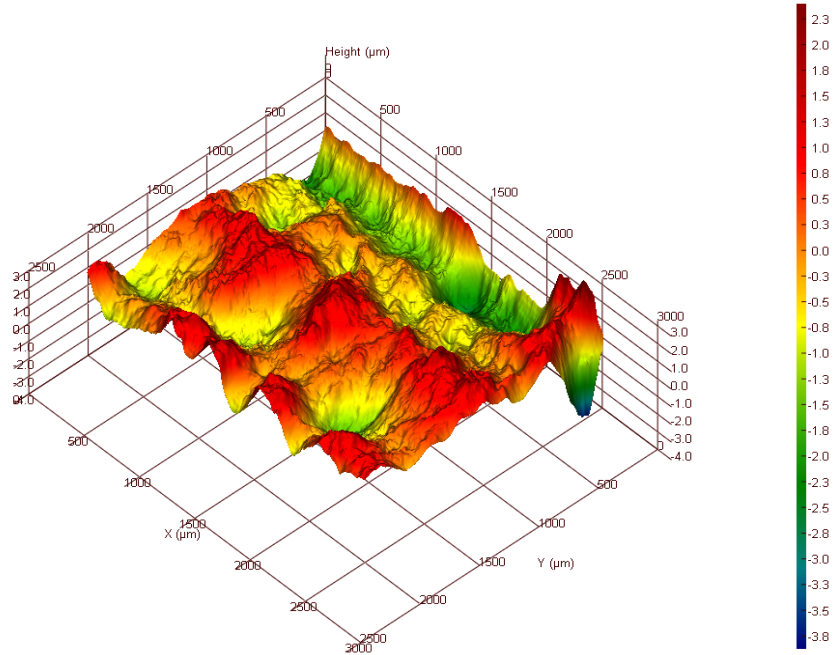
şekil 4.21 EIS lm öncesi yüzey pürüzlülüğü değışimini ve şekil 4.23 ise EIS lmnden sonra yüzey pürüzlülüğü değışimini göstermektedir.



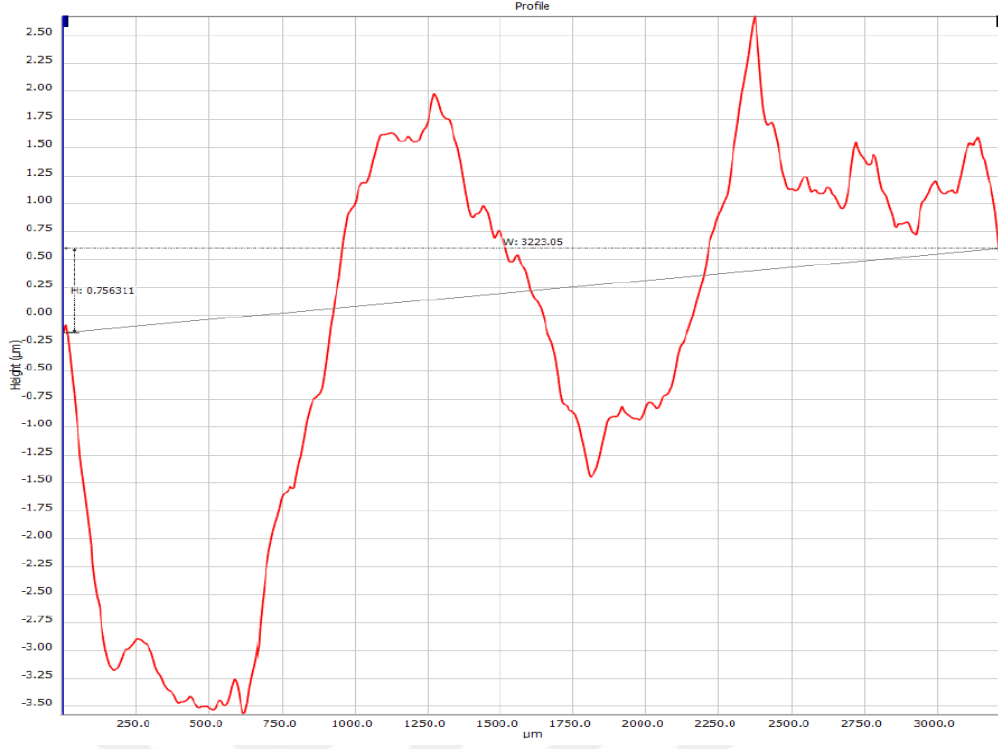
şekil 4.20. Sıcak daldırma galvanizli St37 numunesinin OP analizi (EIS lmnden önce) [2].



Şekil 4.21. EIS ölçümü öncesi yüzey pürüzlülüğü değişimi [2].



Şekil 4.22. Sıcak daldırma galvanizli St37 numunesinin OP analizi (EIS ölçümünden sonra) [2].



Şekil 4.23. EIS ölçümünden sonra yüzey pürüzlülüğü değişimi [2].

## 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, St37 çeliğinin korozyon davranışlarının incelenmesinde üç farklı deneysel çalışma yapılmıştır ve yapılan bu deneyler ışığında ortaya çıkan sonuçlar aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

Elektro galvanizli ve galvanizsiz çeliğin korozyon mekanizması;

- OCP değerleri ile korozyonun ne ölçüde devam ettiği bilinebilir.
- TP analizlerinde elektro galvaniz kaplama işleminin anot tepkimesinin blokladığı görülmüştür.
- EIS yöntemiyle bulunan parametrelerin uyumlu olduğu sonucuna varılmıştır. Elektro galvaniz kaplama işleminin metalin daha az korozyona uğramasına yardımcı olduğu gözlemlenmiştir.
- BAB marka ters metalürji mikroskobu yardımıyla bulunan ve incelenen görüntüler ile sisteme uygulanan elektrokimyasal verilerin sonuçları karşılaştırılmıştır. Buna göre iki durumda birbirini destekler nitelikte olduğu görülmüştür. St37 kalite galvanizsiz çelik numune üzerindeki korozyon etkisi çok daha fazla olmuştur.
- 3 mm kalınlığındaki St37 kalite çelik numunelere ait kaplama kalınlığının korozyona etkisi ayrıca araştırılmalı ve her iki kaplama yöntemi için de hesaplanmalıdır. Elektro galvaniz için 10-15  $\mu$  arasındadır. HDG için bu değer 45-55  $\mu$  arasındadır.

Asit yağmurlarının oluşturduğu korozyon mekanizması;

- Elektro galvaniz kaplama yapılmış numunenin galvanizsiz numuneye göre yapay asit yağmuru ortamında daha az korozyona uğradığı uygulanan EIS ve TP yöntemleri ile açıkça anlaşılmaktadır.
- OCP ölçümlerinden, Elektro galvaniz kaplamanın yapay asit yağmuru ortamında ilk 4200 saniye boyunca çözündüğü görülmüştür.
- Yapay asit yağmurunun galvanizsiz ankraj elemanın çukurcuk korozyonu

oluşturduğu EIS ve TP deneylerinden anlaşılmaktadır. Nitekim optik resimlerde bunu desteklemektedir.

- Kullanılan elektrokimyasal ölçüm yöntemleri sonuçları ile metal yüzeyini görüntülemeye kullanılan optik resimlerin birbirini desteklediği görülmüştür.
- EIS yönteminin metal ile çözelti arasında meydana gelen reaksiyonları anlamada daha kapsamlı bilgi verdiği bir kez daha bu çalışma ile ortaya konulmuştur. Uygun devre seçimi ile görüleceği üzere hem metal hem de kaplama hakkında detaylı bilgi edinilmiştir.
- Elektro galvaniz kaplamanın tek başına uzun süreli bir koruma sağlamadığı TP yöntemi ile bulunan (İcorr) değerinden anlaşılmaktadır.
- Elektro galvaniz kaplamanın tam olarak ne zaman korumasını yitirdiği, zamana bağlı yapılacak EIS veya Dinamik Elektrokimyasal Empedans Spektroskopisi (DEIS) kullanılarak yapılmalıdır.

Sıcak daldırma galvanizli St37 çeliğinin korozyon mekanizması;

- Galvanizleme işleminin uygulandığı sıcaklık, havuzlardaki kimyasalların standardı ve uygun kurutma işleminin kaplamanın metal yüzeye yapışma kalitesini arttırdığı göz ardı edilmemelidir.
- EIS sonuçları, uygulanan diğer yüzey görüntüleme sonuçlarıyla paralel ve destekleyicidir.
- Sonuçlar, sıcak daldırma galvaniz işleminin St37 metalini korozyondan korumanın etkili bir yöntem olduğunu göstermiştir.
- SEM, EDS ve OP sonuçları, EIS testinin sonunda metal yüzeyde çok küçük deformasyonların başladığını göstermiştir. Ancak, bu bozulmalar endişe verici değildir. Yüzeydeki Zn miktarı korumanın uzun süre devam edeceğini gösterir.
- Korozyonun HDG ile işlenmiş metal üzerindeki etkisi zamana bağlı XRD çalışmaları ile araştırılmalıdır.

## 6. KAYNAKLAR

- [1]Marasli, M., Akmaz, V., Kam, M., Dikmen, K., Gerengi, H., “Investigation of the Effect of Electro Galvanizing Process on Corrosion Mechanism of St37 Anchorage Element”, Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, DOI: 10.29130/dubited.938836. c. 10, say 1, ss 367-378, 2022.
- [2]Marasli, M., Dikmen, K., Özdal, V., Akmaz, V., Gerengi, H., “Investigation of the corrosion behavior of hot dip galvanized (HDG) St37 steel in 3.5% NaCl solution”, 8th International Congress on Engineering, Architecture and Design, Oral presentation/ Oral presentation book, ISBN 978-625-7367-31-8, ss. 681-690, 2021.
- [3]Marasli, M., Dikmen, K., Akmaz, V., Kam, M., Gerengi, H., “Investigation of the effect of acid rain on the corrosion mechanism of the anchorage element used in glass fiber reinforced concrete”, 7th International Congress on Engineering, Architecture and Design, Oral presentation/ Oral presentation book, ISBN 978-625-7367-12-7, ss. 103-112, 2021.
- [4]DTEL. (2021, 10 Mayıs). St37 çelik nedir? [Online]. Erişim: <https://www.dtel.com.tr/st37>,
- [5]Uslular Hadde. (2021, 10 Mayıs). Yapı çelikleri nedir? [Online]. Erişim: <https://www.uslularhadde.com/yapi-celikleri-nedir>
- [6]Fibrobeton. (2021, 29 Nisan). Fibrobeton [Online]. Erişim: <https://fibrobeton.com.tr/markalar-fibrobeton%C2%AE-8>.
- [7]PCI Committee on Precast Sandwich Wall Panels, State of the Art of Precast/Prestressed Sandwich Wall Panels, Precast, Prestressed Concrete Institute, Chicago, 1997.
- [8]Einea A., “Structural and thermal efficiency of precast concrete sandwich panel systems”, ETD collection for University of Nebraska, 1992.
- [9]Precast Concrete. (2021, 10 Mart). Precast concrete lifting anchor systems [Online]. Erişim: [http://wn.com/Precast\\_concrete\\_lifting\\_anchor\\_systems\\_lifting\\_considerations](http://wn.com/Precast_concrete_lifting_anchor_systems_lifting_considerations).
- [10]Gerengi, H., Ugras, H. I., Solomon, M. M., Umoren, S. A., Kurtay, M., & Atar, N. “Synergistic corrosion inhibition effect of 1-ethyl-1-methylpyrrolidinium tetrafluoroborate and iodide ions for low carbon steel in HCl solution”, Journal Of Adhesion Science and Technology, c. 30, say 21, ss. 2383-2403, 2016.

- [11]Özkul, M.H. Doğan, Ü.A., “İlki, Beton bileşim ve geçirimsizlik özelliklerinin donatı korozyonu üzerine etkisi”, TÜBİTAK MAG Proje, 104I022, ss. 1-35, 2016.
- [12]Gerengi, H. Bereket, G. Kurtay. “A morphological and electrochemical comparison of the corrosion process of aluminum alloys under simulated acid rain conditions”, Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, c. 58, ss. 509, 2015.
- [13]Huang, P., Bao, Y., Yao, Y., “Influence of HCl corrosion on the mechanical properties of concrete”, Cement and Concrete Research, c. 35, say 3, ss. 584, 2005.
- [14]Tansuğ, G., “Bronz Yapıtların Atmosferik Korozyonunda Hava Kirleticilerin Etkisi ve İnhibitörle Korunması”, Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, c. 31, sayı 2, ss. 401-414, 2016.
- [15]Mendoza, A.R., Corvo, F., “Outdoor and Indoor Atmospheric Corrosion of Non-ferrous Metals”, Corrosion Science, c. 42, ss. 1123-1147, 2000.
- [16]M. Rizvi, H. Gerengi, M. Yıldız, M. Kekeçoğlu and M. M. Pehlivan, “Investigation of Propolis as a Green Inhibitor of SAE 1010 Carbon Steel Corrosion in 3.5% NaCl Environment” Industrial & Engineering Chemistry Research, c. 59, say 19, ss. 9328-9339, 2020.
- [17]Aras, M. Yapıştırıcı Türünün Ankraj Çekme Kuvvetine Etkisi ve Sonlu Elemanlar ile Modellenmesi. (Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi). Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bilecik, 2015.
- [18]Özkul H., Mutlu M., ve Sağlam A. R., “Beton ankrajları”, Teknik Bülten Say 4, 2001.
- [19]Muratlı H., Klingner R. E., ve Graves H.L., “Breakout capacity of anchors in concrete-Part 2: shear”, ACI Structural Journal, Technical Paper, c. 101, say 6, ss. 821-829, 2004.
- [20]Bayülke N., “Depremlerde hasar gören yapıların onarım ve güçlendirilmesi”, İnşaat Mühendisleri Odası İzmir Şubesi Yayın No:15, İzmir, 2001.
- [21]İnsapedia (2021, 10 Mayıs) Ankraj Nedir? Beton Ankrağı ile İlgili Genel Bilgiler [Online]. Erişim: <https://insapedia.com/ankraj-nedir-beton-ankrağı-ile-ilgili-genel-bilgiler/>
- [22]Özdemir Ö., Çekme Kuvvetleri Etkisindeki Kimyasal Ankrajlarda Grup Etkisi, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Eskişehir Teknik Üniversitesi ile Ortak Program, Yüksek Lisans Tezi, Bilecik, 2022.
- [23]Doruk, M., “Korozyon ve Önlenmesi”, Ankara, Ortadoğu Teknik Üniversitesi Yayını, Ankara, ss. 239, 1982.
- [24]Yaşar, H., “Metaller İçin Yüzey İşlemleri”, KOSGEB Eğitim Merkezi Yayını, Ankara, ss. 239, 1995.

- [25] Yazan. A., Pirinç Alaşımlarının Çinkosuzlaşma Korozyonuna Alüminyum, Nikel ve Kalay Alaşım Elementlerinin Etkileri, İstanbul Teknik Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 2014.
- [26] Çil I., D.E.Ü. Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi, c. 8, say 1, ss. 59, 2006. Cheng A., Huang R., Wu J.K., Chen C.H., Materials Chemistry and Physics, c. 93, say 2-3, ss. 404, 2005. Akinyemi O.O., Alamu O.J., The Pacific Journal of Science and Technology, c. 10, say 1, ss. 462, 2009. Hoşhan P., Beton içindeki çeliğin korozyonunun üç elektrot yöntemi ile incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara-Türkiye, 1994.
- [27] Aydın E, (2022, 10 Mayıs). Korozyon Nedir? Betonarme Yapılarda Korozyon Çatlakları, [Online]. Erişim: <https://www.emirhanaydin.com.tr/2021/06/korozyon-nedir.html>
- [28] Çakır, A. F., “Türkiye’nin Metalik Korozyon Kaybı”, 4. Korozyon Sempozyumu Bildirileri, İstanbul, ss. 1-8, 1994.
- [29] Kurtkaya N., (2022, 10 Mayıs). Bilim ve Mühendislik Alanı Olarak Korozyon, [Online]. Erişim: <https://docplayer.biz.tr/2075780-Bilim-ve-muhendislik-alani-olarak-korozyon.html>
- [30] Doruk, M., “Metalik Malzemeler ve Korozyon”, Korozyon Derneği Yayını, Ankara, ss. 3-5, 2014.
- [31] Yalçın, H. Koç, T., “Mühendisler İçin Korozyon”, TMMOB Kimya Mühendisleri Odası, ss. 2-8, 1997.
- [32] Oğuz, B., “Demirdışı Metallerin Kaynağı”, Oerlikon Yayınları, 1990.
- [33] Acar, F., Kaynaklanmış Paslanmaz Çelik ve Karbon Çeliğinin Mekanik Özelliklerine Taneler Arası Korozyonun Etkisi, Karabük Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Yüksek Lisans Tezi, Karabük, 2020.
- [34] Çakmen, Z., Atmosferik Korozyonun Çinko Kaplama (Galvanizleme) Direncine Etkilerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, ss. 145, 2003.
- [35] Şimşek, M., “Gerçek Örnekler Üzerinden Korozyon ve Korozyondan Korunma Eğitimi”, Kimya Mühendisleri Odası, İstanbul, 2019.
- [36] Aeshah H. Alamri, A., “Localized corrosion and mitigation approach of steel materials used in oil and gas pipelines – An overview”, Engineering Failure Analysis 116, 104735, 2020.
- [37] Doruk, M., “Korozyon ve Önlenmesi”, Ortadoğu Teknik Üniversitesi Yayını, Ankara, ss.239, 1982.

- [38]Yalçın, H. Koç, T., “Mühendisler İçin Korozyon”, TMMOB Kimya Mühendisleri Odası ss. 2-17, 1997.
- [39]Koushik, B., “Review on modelling of corrosion under droplet electrolyte for predicting atmospheric corrosion rate”, Vrije Universiteit Brussel, Belgium, 2020.
- [40]Scott, J.C. and Searls C.L., “Weathering steel in twentieth-century building materials history and conservation”, New York: McGraw-Hill, ss. 73-77, 1995.
- [41]Üneri, S., “Korozyon ve Önlenmesi”, Korozyon Derneği Yayını, Ankara, ss. 413, 1998.
- [42]Fontana, M. G., “Corrosion Engineering”, McGraw Hill Publishing, New York, ss. 545, 1986.
- [43]Çakır, A. F., “Metalik Korozyon İlkeleri ve Kontrolü”, Makine Mühendisleri Odası Yayını, Ankara, ss. 364, 1990.
- [44]Özbaş, M., Uygun Tasarım ve Metal Seçimi İle Korozyondan Korunma, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, ss. 126, 1997.
- [45]Roberge P. R., “Handbook of Corrosion Engineering”, The McGraw-Hill Companies Publishing, New York, ss. 1129, 2000.
- [46]Critchley M., Javaherdashti R., “Materials, microorganisms and microbial corrosion-Areview” Corrosion and Materials, c. 30, ss. 8-11, 2005.
- [47]Yalçın, H. Koç, T., “Mühendisler İçin Korozyon”, TMMOB Kimya Mühendisleri Odası, ss. 2-26, 1997.
- [48]T.C. Milli Eğitim Bakanlığı, Kimya Teknolojisi, “Yüksek Sıcaklık ve Erozyon Korozyonu”, Ankara, ss. 1-38, 2012.
- [49]Korkmaz, K., Çakır, A., “Mikro-ark oksidasyon yöntemi ile oksitlenen 2017A alüminyumun erozyon-korozyon direncinin incelenmesi”, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 16. Uluslararası Malzeme Sempozyumu Özel Sayısı, c. 23, say 8, ss. 979-983, 2017.
- [50]Paksoy, A.K., Çelik yapıların, atmosferik korozyona karşı korunmasında epoksi bazlı boya ve kaplamaların kullanımı ve performansı, Doktora tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, ss. 4-26, 2008.
- [51]Tan, Y.J., Fwu, Y., Bhardwaj, K., Bailey, S., Gubner, R., “Review of critical issues incarbon dioxide corrosion testing and monitoring techniques”, NACE Corrosion/2010, No. 10155, 2010.
- [52]Walter G.W., “Corrosion Science”, c. 15, ss. 47, 1975.

- [53]Gerengi, H., Kurtay, M., “Dinamik Elektrokimyasal Empedans Spektroskopisi”, (DEIS), Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, 2013.
- [54]Erbil, M., “Korozyon İlkeler-Önlemler”, Korozyon Derneği Yayını, ss. 171, 2012.
- [55]Topaktaş Konuş, M., Alüminyum-Bakır Silisyum Alaşımlarının Sulu Ortamlardaki Korozyonuna Lantanitlerin Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2005.
- [56]Bereket, G., Gerengi, H., “Korozyon Araştırmalarında Elektrokimyasal Ölçümler Ne Derece Doğru Değerlendiriliyor? ”, Korozyon, c. 21, say 1-3, ss. 33-44, 2015.
- [57]Mansfeld,F., “Polarization Resistance”, Rockwell International Science Central Publication, ss. 67, 1986.
- [58]Küstü, C., Asitli Ortamdaki Korozyona Karşı Schiff Bazı Temelli Bazı Yeni İnhibitörler Geliştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2008.
- [59]Orta Doğu Teknik Üniversitesi (2022, 20 Haziran) Tahribatsız Muayene Yöntemleri [Online]. Erişim: <http://ndt.wtndt.metu.edu.tr/tahribatsiz-muayene-yontemleri>
- [60]Sezer NDT (2022, 20 Haziran) Ultrasonik Muayene [Online]. Erişim: <https://www.sezerndt.com/ultrasonik-muayeneut/>
- [61]ODTÜ Teknik Mühendislik (2022, 20 Haziran) Manyetik Parçacık Testi [Online]. Erişim: <http://odtumuhendislik.com/manyetik-parcacik-testi/>
- [62]Konuş, M.T., Alüminyum-Bakır-Silisyum Alaşımlarının Sulu Ortamlardaki Korozyonuna Lantanitlerin Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2005.
- [63]Yüksel, E., Çelik Malzemelerin Aşınma ve Korozyon Dayanımı Arttırmak İçin Çeşitli Kimyasal Kaplamaların İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, ss. 42-53, 2005.
- [64]Çizmecioğlu, Z., “İsale Hatlarının Katodik Korunması”, İstanbul Su Kanalizasyon İdaresi (İSKİ) Yayını, İstanbul, ss. 219, 1998.
- [65]Kaya, M.T., Hafif Çelik Yapıların Bulon, Vida ve Perçinli Birleşimlerinde Farklı Seviyelerdeki Korozyonun Etkileri, Konya Teknik Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Konya, 2019.
- [66]Kaftan, M.A., Çelik yapılarda korozyon oluşumu ve korozyondan korunma yöntemlerinin maliyet açısından karşılaştırılması, Yüksek lisans tezi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli, ss. 4-39, 2006.
- [67]Çakmen, Z., Atmosferik Korozyonun Çinko Kaplama (Galvanizleme) Direncine Etkilerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, ss. 145, 2003.

- [68]Akman, S.B., “Sıcak Daldırma Galvanizle Sürdürülebilir Korozyon Koruması”, 6. Çelik Yapılar Sempozyumu, ss. 145, 2015.
- [69]Çakır, A.F., “Yüzey İşlemleri ve Korozyon”, 5. Korozyon Sempozyumu Bildirileri, Ankara, ss. 124-138, 1996.
- [70]Ali, A.M., Arslan, M.H., & Altın, M., “Cam lif takviyeli betonun yangın dayanımlarının çeşitli parametreler açısından irdelenmesi”, Doğal Afetler ve Çevre Dergisi, c. 5, say 2, ss. 198-213, 2019.
- [71]Erk Demir Çelik San.ve Tic. A.Ş. (2021, 5 Nisan). Erk Demir Çelik [Online]. Erişim: <http://www.erkdemircelik.com>
- [72]Ateş Galvaniz Elektro Metal Kaplama San. ve Tic. Ltd. Şti. (2021, 15 Nisan). Ateş Galvaniz [Online]. Erişim: <http://www.atesgalvaniz.com>
- [73]Kong, F. X., Zhou, C. L., & Liu, Y., “Biochemical and cytological responses of ectomycorrhizae in Pinus massoniana to artificial acid rain”, Chemosphere, c. 37, say 1, ss. 179-187, 1998.
- [74]Lu, C., Zhou, Q., Wang, W., Wei, S., & Wang, C., “Freeze-thaw resistance of recycled aggregate concrete damaged by simulated acid rain”, Journal of Cleaner Production, 124396, ss. 280, 2021.
- [75]Rizvi, M., Gerengi, H., Kaya, S., Uygur, I., Yıldız, M., Sarıoğlu, I., El Ibrahim, B., “Sodium nitrite as a corrosion inhibitor of copper in simulated cooling water”, Scientific Reports, c.11, say 1, ss. 1-16, 2021.
- [76]Lahbib H., Hassen B.S., Gerengi H., Rizvi M., Amor Y.B. “Corrosion inhibition performance of dwarf palm and Cynara cardunculus leaves extract for St37 steel in 15% H2SO4: a comparative study”, Journal of Adhesion Science and Technology. c. 35, say 7, ss. 691–722, 2021.
- [77]Kurtay M., Gerengi H., Chidiebere A., Yıldız M., “Corrosion inhibition of reinforcement steel in mixture water by caffeine and L- arginine”, 2021, <https://doi.org/10.1080/01694243.2021.1916251>.
- [78]Gerengi, H. Uğraş, H.I. Yıldız, M., “Bor katyonu içeren iyonik sıvıların 0.1 M HCl ortamında korozyon inhibitörü olarak kullanılması”, Journal of Advanced Technology Sciences, c. 6, ss. 11-12, 2017.
- [79]Ryl, J., Wysocka, J., Cieslik, M., Gerengi, H., Ossowski, T., Krakowiak, S., & Niedzialkowski, P., “Understanding the origin of high corrosion inhibition efficiency of bee products towards aluminium alloys in alkaline environments”, Electrochimica Acta, c. 304, ss. 263-274, 2019.
- [80]Gerengi H., “Anticorrosive Properties of Date Palm (*Phoenix dactylifera* L.) Fruit Juice on 7075 Type Aluminum Alloy in 3.5% NaCl Solution,” Industrial & Engineering Chemistry Research, c. 51, say 39, ss. 12835-12843, 2012.

- [81]Gerengi H., Cakmak R., Dag B., Solomon M. M., Tuysuz H. A., Kaya E. “Synthesis and anticorrosion studies of 4-[(2-*nitroacetophenonylidene*)-*amino*]-antipyrine on SAE 1012 carbon steel in 15 wt.% HCl solution” Journal of Adhesion Science and Technology, c. 34, say 20, ss. 2448–2466, 2020.

