

**BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ DOKTORA PROGRAMI**

**DOĞALGAZ HATLARINDA KULLANILAN X 65 ÇELİK
BORULARDA ZEMİNDEN KAYNAKLI VE YAPIYA DIŞARIDAN
ETKİ EDEN FAKTÖRLER İNCELENEREK KOROZYON HIZININ
MODELLENMESİ VE DEĞERLENDİRİLMESİ**

HAZIRLAYAN

ÇAĞATAY ÜNAL

DOKTORA TEZİ

ANKARA – 2023

**BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ DOKTORA PROGRAMI**

**DOĞALGAZ HATLARINDA KULLANILAN X 65 ÇELİK
BORULARDA ZEMİNDEN KAYNAKLI VE YAPIYA DIŞARIDAN
ETKİ EDEN FAKTÖRLER İNCELENEREK KOROZYON HIZININ
MODELLENMESİ VE DEĞERLENDİRİLMESİ**

HAZIRLAYAN

ÇAĞATAY ÜNAL

DOKTORA TEZİ

TEZ DANIŞMANI

DR. ÖĞR. ÜYESİ CENK BALÇIK

ANKARA – 2023

BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Doktora Programı çerçevesinde Çağatay ÜNAL tarafından hazırlanan bu çalışma, aşağıdaki jüri tarafından Doktora Tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Savunma Tarihi: 29 /05/2023

Tez Adı: Doğalgaz Hatlarında Kullanılan X 65 Çelik Borularda Zeminden Kaynaklı ve Yapıya Dışarıdan Etki Eden Faktörler İncelenerek Korozyon Hızının Modellenmesi ve Değerlendirilmesi

Tez Jüri Üyeleri (Unvanı, Adı - Soyadı, Kurumu)

İmza

Dr. Öğr. Üyesi Cenk BALÇIK (Başkent Üniversitesi)

.....

Prof. Dr. Faruk ELALDI (Başkent Üniversitesi)

.....

Prof. Dr. Kadri AYDINOL (Orta Doğu Teknik Üniversitesi)

.....

Doç Dr. Ebru SARALOĞLU GÜLER (Başkent Üniversitesi)

.....

Dr. Öğr. Üyesi Cemal Merih ŞENGÖNÜL (Atılım Üniversitesi)

.....

ONAY

Prof. Dr. Faruk ELALDI

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

Tarih : ... / ... /

BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLER ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS / DOKTORA TEZ ÇALIŞMASI ORJİNALLİK RAPORU

Tarih: 13 / 06 / 2023

Öğrencinin Adı, Soyadı: Çağatay ÜNAL

Öğrencinin Numarası: 21210310

Anabilim Dalı: Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Programı: Doktora

Danışmanın Unvanı/Adı, Soyadı: Dr. Öğr. Üyesi Cenk BALÇIK

Tez Başlığı: Doğalgaz Hatlarında Kullanılan X 65 Çelik Borularda Zeminden Kaynaklı ve Yapıya Dışarıdan Etki Eden Faktörler İncelenerek Korozyon Hızının Modellenmesi ve Değerlendirilmesi

Yukarıda başlığı belirtilen Doktora tez çalışmamın; Giriş, Ana Bölümler ve Sonuç Bölümünden oluşan, toplam 101 sayfalık kısmına ilişkin, 13 /06/ 2023 tarihinde tez danışmanım tarafından Turnit in adlı intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan orijinallik raporuna göre, tezimin benzerlik oranı % 3'dür. Uygulanan filtrelemeler:

1. Kaynakça hariç
2. Alıntılar hariç
3. Beş (5) kelimeden daha az örtüşme içeren metin kısımları hariç

“Başkent Üniversitesi Enstitüleri Tez Çalışması Orijinallik Raporu Alınması ve Kullanılması Usul ve Esaslarını” inceledim ve bu uygulama esaslarında belirtilen azami benzerlik oranlarına tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edileceği muhtemel durumda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve yukarıda vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Öğrenci İmzası:.....

ONAY

Tarih: ... / ... / 20...

Dr. Öğr. Üyesi Cenk BALÇIK

.....

TEŞEKKÜR

Sayın Dr. Öğr. Üyesi Cenk BALÇIK’a (tez danışmanı), çalışmanın sonuca ulaştırılmasında ve karşılaşılan güçlüklerin aşılmasında her zaman yardımcı ve yol gösterici olduğu için teşekkür ederim.

Deney ve saha çalışmalarım süresince teknik konularda bana destek olan tüm iş arkadaşlarıma teşekkür ederim.



ÖZET

Çağatay ÜNAL

**DOĞALGAZ HATLARINDA KULLANILAN X 65 ÇELİK BORULARDA
ZEMİNDEN KAYNAKLI VE YAPIYA DIŞARIDAN ETKİ EDEN FAKTÖRLER
İNCELENEREK KOROZYON HIZININ MODELLENMESİ VE
DEĞERLENDİRİLMESİ**

Başkent Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

2023

Doğalgaz ve Petrol taşımacılığında kullanılmakta olan çelik Boru Hatları, farklı zemin özellikleri ve yapısına sahip lokasyonlardan geçmekte olup geçtiği güzergâhlardaki toprak yapısı ve dışarıdan maruz kaldığı korozyon faktörlerinin etkisi ile korozyona uğrama ihtimaline sahiptir.

Yapılan tez çalışmasında; metalin içerisinde bulunduğu zeminden kaynaklı faktörler ile yapıya dışarıdan etki ederek korozyon hızını etkileyen faktörlerden; nemlilik, tuzluluk, pH seviyesi, AC potansiyel seviyesi ve metalik yapıya uygulanan Katodik koruma seviyesi incelenmiştir. Bu faktörlerin, X 65 çelik yapı üzerinde meydana getirdiği korozyona ait hız değerleri; oluşturulan deney düzeneğinde bu faktörlerin farklı seviyelerde uygulanması sonucunda korozyon kuponları vasıtasıyla ölçülmüştür.

Gerçekleştirilmesi gereken deney sayısına, Taguchi istatistiksel metodu ile deney tasarımı yapılması sonucunda ulaşılmıştır. Korozyona etki eden 5 faktörün 4 farklı seviyesi için L16 ortogonal dizini kullanılmış ve 16 farklı deney çalışması yapılarak, her biri için ayrı korozyon hız değerine ulaşılmıştır. İstatistiksel analiz sonucunda, toprak nemlilik yüzdesinde meydana gelen değişimlerin korozyon hızı üzerine olan etkisinin diğer parametrelere kıyasla daha yüksek olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Yer altı boru hatlarının genellikle nötr ortamların içerisinde geçtiği (pH 6-8 seviyesi) göz önüne alındığında pH seviyesindeki değişimin korozyon hızı üzerindeki etkisinin diğer parametrelere kıyasla daha az olduğu tespit edilmiştir.

Ayrıca Minitab programında gerçekleştirilen regresyon analizi ile korozyon hızının bulunmasını sağlayacak doğrusal ve doğrusal olmayan regresyon denklemleri oluşturulmuştur. Regresyon denklemi ile elde edilen korozyon hız sonuçları, farklı deney

ortamlarında gerçekleştirilen deney sonuçları ile kıyaslanmıştır. Korozyon hızının farklı faktörlere bağlı olarak bulunması sonucunda boru hattı güzergâhının seçimi veya güzergâhın değiştirilmesi, malzeme et kalınlığının seçimi ile boru hattı kontrol ve bakım süreç planlamaları en ideal şekilde yapılabilecektir.

Ayrıca korozyon hız değerlerinin literatür bulguları ile karşılaştırılması ile deneyler sonucunda elde edilen hızların, elik malzemelerin korozyon direnç sınıflandırmasına göre çok iyi ve iyi aralığında değiştiği tespit edilmiştir.

ANAHTAR KELİMELEER: Korozyon hızı, elik boru hattı, toprak karakteri, istatistiksel analiz, deneysel.



ABSTRACT

Çağatay ÜNAL

MODELLING AND EVALUATION OF CORROSION RATE IN X 65 STEEL PIPES USED IN NATURAL GAS LINES BY EXAMINING FACTORS ORIGINATING FROM THE GROUND AND AFFECTING THE STRUCTURE FROM OUTSIDE

Baskent University Institute of Science and Engineering

Department of Mechanical Engineering

2023

Steel pipelines that used for transportation of natural gas and petroleum usually pass from different places having different soil characteristics. Due to different soil structures and other corrosive factors, pipelines are tend to corrode at different rates.

In this study, the effects of moisture content, salinity content, pH, AC potential and cathodic protection levels on the corrosion rate were investigated as the factors affect corrosion in steel structures originating from the ground and external sources. The rate of the corrosion caused by these factors on the X 65 steel structure was mesaured by corrosion coupons in experimental set up with application of the factors at different levels

The number of experiments to be carried out was reached as a result of experimental design with the Taguchi statistical method. L16 orthogonal array was used for 4 different levels of 5 corrosion rate affecting factors and 16 different experimental studies were conducted to obtain corrosion rate values for each experiment. Based on the statistical analysis results, effect of the changes in moisture content of the soil on corrosion rate was higher compare to other factors. Considering the underground pipelines usually pass inside the neutral environments (pH levels between 6-8) effect of changes in pH value on corrosion rate is the less than the other factors.

In addition, with the regression analysis performed in the Minitab program, linear and non-linear regression equations were created to calculate the corrosion rates. Corrosion rate results obtained with the regression equations were compared with the test results performed in different test environments. By calculating the corrosion rate depending on different factors; selection or changing of pipeline route, selection of material wall thickness and planning of pipeline control and maintenance periods can be made in the most ideal way.

Also comparison of corrosion rates with literature findings shows that corrosion rate levels change between outstanding and good classification ranges according to corrosion resistance classification of steel materials.

KEY WORDS: Corrosion rate, steel pipeline, soil characteristic, statistical analysis, experimental.



İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	i
ÖZET.....	ii
ABSTRACT	iv
İÇİNDEKİLER.....	vi
TABLolar LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	xiii
1. GİRİŞ.....	1
2. KOROZYON.....	5
2.1. Korozyon Mekanizması.....	5
2.1.1. Katot	6
2.1.2. Anot.....	7
2.1.3. Elektrolit.....	7
2.2. Korozyon Termodinamiği.....	8
2.3. Korozyon Kinetiği.....	10
2.3.1. Karma potansiyel teorisi.....	10
2.3.2. Aktivasyon polarizasyonu.....	11
2.3.3. Konsantrasyon polarizasyonu.....	12
2.3.4. Karma polarizasyon.....	13
2.3.5. Ohmik polarizasyon.....	15
2.4. Korozyon Türleri.....	16
2.4.1. Genel korozyon.....	17
2.4.2. Çukurcuk korozyon.....	18
2.4.3. Çatlak korozyonu.....	18
2.5. Metal Korozyonuna Etki Eden Ortam Kaynaklı Faktörler.....	18
2.5.1. Ortamın pH değeri.....	18
2.5.2. Ortamın tuzluluk seviyesi.....	19
2.5.3. Ortamda bulunan çözünmüş gazlar.....	21
2.5.4. Ortamdaki nem miktarı.....	21
2.5.5. Redoks potansiyeli.....	22
2.5.6. Zemin direnci.....	22
2.5.7. Ortamdaki oksijen konsantrasyonu.....	23

2.6. Metal Korozyonuna Etki Eden Çevresel Faktörler.....	23
2.6.1. Tellürik enterferans etkisi.....	24
2.6.2. DC raylı sistemlerin etkisi.....	25
2.6.3. AC enterferans etkisi.....	27
2.6.4. Diğer yapılardan kaynaklanan enterferans etkisi.....	28
2.7. Metalleri Korozyona Karşı Koruma Yöntemleri.....	30
2.7.1. Koruyucu kaplama ile koruma.....	31
2.7.2. Uygun malzeme seçimi ve tasarımı.....	33
2.7.3. Korozyon inhibitörleri.....	34
2.7.4. Katodik koruma.....	35
2.7.5. Katodik koruma kriterleri.....	39
3. TAGUCHI METODU İLE DENEY TASARIMI.....	41
3.1. Ortogonal Dizi Seçimi.....	43
3.2. Sinyal Gürültü Oranları.....	45
4. LİTERATÜR ÇALIŞMALARI.....	47
5. DENEY ÇALIŞMALARI.....	55
5.1. Deney Ortamının Hazırlanması.....	55
5.2. Katodik Koruma ve AC Voltajın Uygulanması.....	60
5.3. Zeminden Kaynaklı Faktörlere İlişkin Yapılan Çalışmalar.....	65
6. DENEY SONUÇLARI VE KOROZYON HIZ TAHMİNİ MODELLEME ÇALIŞMALARI.....	68
6.1. Zemin pH Değişimi ve Korozyon Hız Bağıntısı.....	68
6.2. AC Potansiyel Seviyesi ve Korozyon Hız Bağıntısı.....	69
6.3. Katodik Koruma Seviyesi ve Korozyon Hız Bağıntısı.....	71
6.4. Tuzluluk Yüzde Değişimi ve Korozyon Hız Bağıntısı.....	72
6.5. Nemlilik Yüzde Değişimi ve Korozyon Hız Bağıntısı.....	73
6.6. Taguchi Yönteminin Uygulanması.....	77
6.7. Doğrusal Regresyon Analizinin Yapılması.....	78
6.8. Doğrusal Olmayan Regresyon Analizinin Yapılması.....	80
6.9. Deney Çalışmalarının Yapıldığı Farklı Test Ortamlarına İlişkin Bilgiler.....	90
6.10. Deney Çalışmalarının Yapıldığı Farklı Saha Ortamlarına İlişkin Bilgiler.....	90
7. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	92

7.1.Taguchi Deney Tasarımı ile Gerçekleştirilen Deneylere ait Sonuçlar ...	92
7.2. Farklı Test Ortamlarında Gerçekleştirilen Deneylerin Denklem	
Sonuçları ile Kıyaslanması.....	94
7.3. Farklı Saha Ortamlarında Gerçekleştirilen Deneylerin Denklem	
Sonuçları ile Kıyaslanması.....	95
7.4.Tartışma.....	95
8. SONUÇLAR.....	99
KAYNAKLAR.....	101



TABLolar LİSTESİ

Tablo 2.1. Metallerin EMF serileri.....	6
Tablo 2.2. Katodik reaksiyonlar	7
Tablo 2.3. Dış akım kaynaklı katodik koruma sisteminin avantaj ve dezavantajları	37
Tablo 2.4. Galvanik anotlu katodik koruma sisteminin avantaj ve dezavantajları.....	38
Tablo 3.1. Ortogonal dizi seçim tablosu	44
Tablo 5.1. Çalışma yapılan toprağa ait analiz sonuçları.....	56
Tablo 5.2. Deney süresince kullanılan başlıca ekipmanlar	57
Tablo 5.3. X 65 çelik malzeme kimyasal kompozisyonu	58
Tablo 5.4. Çelik malzemelerin korozyon hızları ile korozyon dirençlerinin kıyaslanması	67
Tablo 6.1. pH seviyeleri, korozyon hızları ve standart sapma miktarları.....	69
Tablo 6.2. AC voltaj seviyeleri, korozyon hızları ve standart sapma miktarları	70
Tablo 6.3. Katodik koruma seviyeleri, korozyon hızları ve standart sapma miktarları	72
Tablo 6.4. Tuzluluk yüzdeleri, korozyon hızları ve standart sapma miktarları.....	73
Tablo 6.5. Nemlilik yüzdeleri, korozyon hızları ve standart sapma miktarları	74
Tablo 6.6. K.Maraş bölgesinden getirilen toprak ortamdaki deney çalışması-1	75
Tablo 6.7. K.Maraş bölgesinden getirilen toprak ortamdaki deney çalışması-2	75
Tablo 6.8. K.Maraş bölgesinden getirilen toprak ortamdaki deney çalışması-3	76
Tablo 6.9. K.Maraş bölgesinden getirilen toprak ortamdaki deney çalışması-4	76
Tablo 6.10. Taguchi deney tasarımında incelenen 5 faktör ve seviyeleri	77
Tablo 6.11. L 16 Ortogonal dizisi	78
Tablo 6.12. Faktörler ve belirlenen semboller	79
Tablo 6.13. Katodik koruma seviye değişimine bağlı elde edilen korozyon hızları	81
Tablo 6.14. pH seviye değişimine bağlı elde edilen korozyon hızları	82
Tablo 6.15. AC seviye değişimine bağlı elde edilen korozyon hızları	83
Tablo 6.16. Tuzluluk seviye değişimine bağlı elde edilen korozyon hızları	84
Tablo 6.17. Nemlilik seviye değişimine bağlı elde edilen korozyon hızları	85
Tablo 6.18. Nemlilik ve katodik korumaya ait seviyeler ve korozyon hızları	87
Tablo 6.19. Nemlilik ve pH seviyesine ait seviyeler ve korozyon hızları	87
Tablo 6.20. AC ve katodik korumaya ait seviyeler ve korozyon hızları	87
Tablo 6.21. AC ve neme ait seviyeler ve korozyon hızları	87

Tablo 6.22. Deney ortamındaki faktörlere ait seviyeler	90
Tablo 6.23. Saha ortamındaki faktörlere ait seviyeler	91
Tablo 6.24. Kıyaslaması yapılan denklem türleri ve test ortamları	91
Tablo 7.1. Ortogonal dizine göre gerçekleştirilen deney sonuçları	93
Tablo 7.2. Regresyon analiz sonuçları	94
Tablo 7.3. Denklemler ile hesaplanan ve deney ortamında ölçülen korozyon hızları	94
Tablo 7.4. Deney ortamı ve denklemler arasındaki korozyon hız farkları	94
Tablo 7.5. Denklemler ile hesaplanan ve saha şartlarında ölçülen korozyon hızları	95
Tablo 7.6. Saha ortamı ve denklemler arasındaki korozyon hız farkları	95



ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Çeliğin korozyon döngüsü	5
Şekil 2.2a. Suyun termodinamik stabilitesi asit, indirgeyici,	9
Şekil 2.2b. Suyun termodinamik stabilitesi oksitleyici bölgeler	9
Şekil 2.3. Demirin 25 °C' deki potential/pH diagramı	9
Şekil 2.4. Karma polarizasyon eğrisi	14
Şekil 2.5. Tespit yöntemlerine göre korozyon türleri	16
Şekil 2.6. Ph değerine bağlı olarak korozyon hızındaki değişim miktarı	19
Şekil 2.7. Sodyum klorür miktarının korozyon hızı üzerindeki etkisi	20
Şekil 2.8. Tellürik akımların zemin içerisindeki davranışları	25
Şekil 2.9. Tren ve tranvay hatlarının sebep olduğu kaçak akımlar	26
Şekil 2.10a. Tek bir metal üzerindeki enterferans etkisi	29
Şekil 2.10b. Çoklu metal yapılar arasındaki enterferans etkisi	29
Şekil 2.11a. Anot yataklarından kaynaklanan enterferanslar	30
Şekil 2.11b. Katottan kaynaklanan enterferans	30
Şekil 2.11c. Karma enterferans	30
Şekil 2.11d. Karma enterferans etkisi	30
Şekil 2.11e. İzole joint kaynaklı enterferans	30
Şekil 2.12. Metal yüzeyinin FBE kaplama malzemesi ile fabrikasyon kaplanması	32
Şekil 2.13. Dış akım kaynaklı katodik koruma sistemi	36
Şekil 2.14. Galvanik anotlu katodik koruma sistemi	38
Şekil 5.1a. Paketlenmiş toprak ortam	56
Şekil 5.1b. Çalışma öncesi hazırlanmış toprak ortam	56
Şekil 5.2a. Boruya yapılan manometre bağlantısı	59
Şekil 5.2b. Boru uç kısmına yapılan kaplama	59
Şekil 5.3a. Deney öncesi temizliği yapılan korozyon kuponu	60
Şekil 5.3b. Korozyon kupon bağlantısının yapılması.....	60
Şekil 5.4a. Deney sonrası çıkarılan korozyon kuponu	60
Şekil 5.4b. Deney sonrası temizliği yapılan korozyon kuponu	60
Şekil 5.5a. Katodik koruma redresör ünitesi ekran modülü	62
Şekil 5.5b. Katodik koruma redresör ünitesi güç modülü	62

Şekil 5.6a. Katodik koruma ünitesi	62
Şekil 5.6b. Tüp anodun konumlandırılması	62
Şekil 5.7. Deney süresince kullanılan seyyar tip elektrotlar	62
Şekil 5.8. Deney çalışmalarında kullanılan AC trafo	63
Şekil 5.9a. Katodik koruma ölçümünün alınması.....	64
Şekil 5.9b. AC voltaj ölçümü alınması.....	64
Şekil 5.10. Deney düzeneğinin şematik gösterimi	64
Şekil 5.11a.Nemlilik seviyesinin ölçümü	65
Şekil 5.11b.Zemin direnç seviyesinin ölçümü	65
Şekil 6.1. Korozyon hızı ile pH seviyesi arasındaki bağıntı	69
Şekil 6.2. Korozyon hızı ile AC seviyesi arasındaki bağıntı	70
Şekil 6.3. Nemlilik yüzdesinin düşük olduğu durumda AC voltaj değerine karşılık gelen AC akım yoğunluk değerleri	71
Şekil 6.4. Nemlilik yüzdesinin yüksek olduğu durumda AC voltaj değerine karşılık gelen AC akım yoğunluk değerleri	71
Şekil 6.5. Korozyon hızı ile Katodik koruma potansiyel seviyesi arasındaki bağıntı	72
Şekil 6.6. Korozyon hızı ile tuzluluk yüzdesi arasındaki bağıntı	73
Şekil 6.7. Korozyon hızı ile nem yüzdesi arasındaki bağıntı	74
Şekil 6.8. Doğrusal regresyon modelinin gösterimi	80
Şekil 6.9. Katodik koruma seviyeleri ile fark korozyon hızları arasındaki bağıntı	81
Şekil 6.10. pH seviyeleri ile fark korozyon hızları arasındaki bağıntı	82
Şekil 6.11. AC seviyeleri ile fark korozyon hızları arasındaki bağıntı	83
Şekil 6.12. Tuzluluk yüzdeleri ile fark korozyon hızları arasındaki bağıntı	84
Şekil 6.13. Nemlilik yüzdeleri ile fark korozyon hızları arasındaki bağıntı	85
Şekil 6.14. Korozyon hız ölçüm çalışması yapılan boru hattı güzergâhı	91
Şekil 7.1. S/N Oranı için faktör etkileri grafiği	93

SİMGELER VE KISALTMALAR

A	Kupon Yüzey Alanı
A_c	Alternatif Akım
b	Tafel Eğiminden Gelen Sabit Değer
CSE	Bakır/Bakır Sülfat Elektrot
D	Difüzyon Sabiti
D_c	Doğru Akım
F	Faraday Sabiti
$\bar{I}$	Akım Yoğunluğu Değeri
i_0	Değişen Akım Yoğunluğu
i_L	Limitlenmiş Akım Yoğunluğu
Km	Kilometre
M_c	Nemlilik Yüzdesi
Mds	Kurutulmuş Toprak Ağırlığı
Mms	Nemli Toprak Ağırlığı
N	Gürültü
n	Reaksiyon Süresince Ortaya Çıkan Elektron Sayısı
R	Elektrik Direnci
S	Sinyal
SCE	Sature Edilmiş Kalomel Elektrot
T	Zaman
V	Volt
W	Kütle Değişimi
Y	Kalite Değişkeni
α	Sabit
β_a	Anodik Tafel Sabiti.
β_c	Katodik Tafel Sabiti
η_A	Aktivasyon Polarizasyonunu
η_a	Anodik Reaksiyon İçin Aşırı Potansiyel Değeri
η_c	Katodik Reaksiyon İçin Aşırı Potansiyel Değeri.
η_Ω	Aşırı Potansiyel Değeri
η_t	Toplam Polarizasyon Değeri

1. GİRİŞ

Korozyon, metallerin çevresel etkilere bağılı olarak meydana gelen kimyasal reaksiyonlar sonucunda bozunarak özelliklerini kaybetmesi sürecidir. Korozyon süreci ve bunun geri döndürülemez etkileri sebebiyle her yıl dünya çapında ülkelerin gayri safi milli hasıllarının (GSMH) yaklaşık % 3-5 arasındaki bir oran harcanmakta olup korozyon sebebiyle yaşanan iş gücü kayıpları da ilave edildiğinde bahse konu rakam daha yüksek seviyelere çıkabilmektedir. [1]

Metal korozyon sürecini, hem metalin içerisinde bulunduğu ortam hem de dış etmenler etkileyebilmektedir. Özellikle petrol ve doğalgaz taşımacılığında kullanılan boru hatları, uzun mesafeler boyunca farklı özelliklere sahip zemin yapılarının içerisinde geçmeleri ve yüksek gerilim iletim hatları, yabancı boru hatları, tren hatları vb. dış etmenlerle kesişmeleri veya paralel gitmeleri sebebiyle korozyona uğrama ihtimaline sahiptirler.

Çelik boru hatları, genellikle toprak altında izolasyonlu olarak tesis edilmekte olup izolasyonda hasar oluşması sonucunda boru hattı yüzeyinde, hattın yer aldığı zeminden veya dışarıdan gelebilecek etkileşimlerden kaynaklı dış korozyon oluşmaktadır. Hatların geçtiği toprak zemine ait nemlilik yüzdesi, pH seviyesi, tuzluluk yüzdesi, sıcaklık, mikroorganizmalar vb. etmenlerin hat üzerinde oluşabilecek dış korozyona etki ettiği geçmiş yapılan çalışmalardan anlaşılmaktadır [2]. Boru hatlarında bulunduğu zemin özelliklerden kaynaklı korozyon sürecinin ve zemin özelliği ile korozyon hızı arasındaki bağıntının incelenmesi neticesinde, metal yapılarda zeminden kaynaklı dış korozyonu etkileyen faktörlerin fazla olması ve bu faktörlerin zamana bağılı olarak değişkenlik göstermesi dış korozyon sürecini karmaşık bir hale getirmektedir [2].

Metal korozyonuna etki eden parametrelerden biri olan nemlilik yüzdesinin çalışma yapılan bölgelere ve mevsim şartlarına göre değişkenlik göstermesi, korozyon hızlarında farklılık yaratmaktadır. Çalışma yapılan zaman dilimine göre toprak içerisindeki nemliliğin değişim göstermesi, boru yüzeyi ile toprak arasındaki etkileşimin ölçülmesini ve dolayısıyla metalde meydana gelen korozyonun kontrol edilmesini zorlaştırmaktadır. Bu sebeple zemin içerisindeki faktörlerdeki değişimlerin kontrol edilmesi özellikle katodik korumalı ve kaplamalı boru hatlarındaki korozyon davranışının anlaşılması için önemlidir [3].

Zemin pH seviyesi metal yapılarda, zeminden kaynaklı korozyonu etkileyen faktörlerden bir diğeridir. Toprağın pH değeri genellikle 3 ile 10 arasında değişmekte olup

toprak içerisindeki nemli organik materyaller ile yüksek yoğunluğa sahip metaller (demir ve alüminyum) toprağın asidik hale gelmesine sebep olmaktadır. Mineralli toprak zeminler, alkali katyonların (kalsiyum, magnezyum, sodyum ve potasyum) yağmur suyu tarafından ortamdaki uzaklaştırılması ve karbondioksitin çözülerek yeraltı sularına karışması ile daha asidik hale gelebilmektedir [3]. Çelik boru hatlarında ölçülen korozyona zemin pH seviyesindeki değişimin yaptığı etki, diğer faktörlere göre daha kısıtlı olmaktadır [4,5].

Toprağın tuzluluk yüzdesi, metalin içerisinde bulunduğu ortamdaki kaynaklı korozyonu etkileyen ve genellikle topraktaki klor iyonlarının varlığıyla ilişkili olan bir faktördür. Klor iyonları ise metal yapı yüzeyinde meydana gelen anodik çözülme reaksiyonlarını etkilemektedir. Zemin içerisinde bulunan klor iyonları, jeolojik süreçler neticesinde var olabileceği gibi buzlama önleme çalışmaları sırasında karayollarına uygulanan tuzlama çalışmaları sonucunda da ortama yayılabilmektedir [6].

Çelik malzemelerde dış etkileşim sebebiyle meydana gelen korozyon süreçleri genellikle çelik boru hatlarının yüksek gerilim hatlarının yaygın olarak bulunduğu bölgelerden geçmesi sonucu meydana gelmektedir. Korozyon, yüksek gerilim hatlarında yer alan AC akımların zemin altındaki boru hattına etkileşimde bulunması sonucu meydana gelir. Çelik yapı üzerinde ölçülen AC potansiyel ve akımın TS EN ISO 18086 standardında belirtilen kriterlerden yüksek olması halinde standarda göre kabul edilemez seviyeye ulaşmakta ve AC etkileşimin çelik üzerinden kontrollü şekilde deşarj edilmesi gerekmektedir [7]. AC etkileşim sebebiyle üzerinde kaplama olan boru hatlarında, çıplak boru hatlarına kıyasla daha fazla korozyon görülmektedir. Bu durum, AC akımın kaplama hasarlarında yoğunlaşarak yüksek akım yoğunluklarına sebebiyet vermesi sonucu oluşmaktadır.

Yeraltında bulunan çelik boru hatlarında korozyona sebebiyet veren tüm bu faktörlere karşı önlem amacıyla boru hattı kaplaması ve katodik koruma sistemi bir arada kullanılmaktadır. Boru hattı üzerindeki kaplamada hasar meydana gelmesi durumunda, katodik koruma sistemine ait anot yataklarından çıkan akımlar, hasarlı bölgelerde çıplak çelik yüzey ile korozif ortam arasındaki teması engelleyerek korozyon hızını azaltmaktadır. Korozyon hızındaki azalmayı sağlayan en ideal katodik koruma seviyesi; BS ISO 15589-1:2015 standardına göre -850 ile -1200 mV (CSE) anlık OFF potansiyel değer aralığı olarak tanımlanmaktadır [8].

Korozyon hızlarının belirlenmesi amacıyla korozyona etki eden faktörlerin farklı seviyeler ve kombinasyonlar ile uygulanması, çok fazla sayıda deney çalışmasının yapılmasını gerektirmektedir. Her bir ölçüm için ayrı korozyon süreci takibinin yapılması

gereken durumlarda, deney sayısının azaltılması için istatistiksel analiz metotları kullanılabilir. Bu durum için en yaygın olarak kullanılan istatistiksel metotlardan biri Taguchi metodu ile deney tasarımıdır. Taguchi yöntemi, metallerin korozyon hızlarının ölçülmesinde deney sayısının azaltılması için tercih edilen bir yöntemdir. Özellikle korozyon araştırmalarının uzun zaman aldığı deney çalışmalarında daha fazla tercih edilmektedir. Taguchi metodu, metallerin kaynak bölgelerindeki galvanik çiftler arasında meydana gelen korozyon süreçlerinin araştırılmasında ve NaCl konsantrasyonu, sıcaklık ve çözelti hızının, metal korozyon hızına olan etkisinin incelenmesi süreçlerinde deney sayılarının azaltılması için kullanılmıştır [9,10].

Tez kapsamında öncelikle korozyon mekanizması, korozyona sebebiyet veren faktörler ve metal yapılarda korozyona karşı alınan önlemlere ilişkin temel bilgilere yer verilecektir. Ayrıca yine tez kapsamında; pH, tuzluluk, nemlilik, AC etkileşim ve katodik koruma gibi korozyona etki eden faktörlerin metal yapılara farklı seviyelerde uygulanması sonucunda metal korozyon hızına yaptıkları etkileri inceleyen literatür çalışma sonuçlarına yer verilecektir.

Literatür çalışmalarında; zeminden veya dış etkileşimlerden kaynaklı olarak çelik malzemelerde meydana gelen korozyon süreçleri, faktörlerin bağımsız olduğu durum veya en fazla iki faktörün bir arada uygulandığı durumlar için incelenmiştir. Ayrıca yapılan çalışmalarda, özel seçilmiş kısıtlı sayıda faktörün korozyon hızlarına yaptıkları etki analiz edilmiştir. İstatistiksel analiz yöntemlerinin uygulandığı çalışma sayısı kısıtlı olup istatistiksel analiz ile deney tasarımı yapılan çalışmalarda, faktörlere ait az sayıda seviye incelenmiştir. Çalışmalarda genellikle az sayıdaki faktörün ayrıntılı analiz edilmesi yoluna gidilmiştir. Ayrıca literatür araştırmasında, farklı faktörlere bağlı olarak korozyon hızlarının ön görülebilmesi için korozyon hızı hesaplama denklemlerinin oluşturulmasına yönelik çalışmalara rastlanmamıştır.

Bu çalışmanın amacı; katodik korumalı doğalgaz boru hatlarının, içerisinde bulunduğu toprak zeminden ve dış etkileşimlerden kaynaklı olarak uğradığı korozyon miktarının ön görülebilmesi amacıyla istatistiksel analiz yöntemlerinin yardımıyla korozyon hızı hesaplama denklemlerinin oluşturulmasıdır. Elde edilen denklemler, hem deney ortamında hem de saha şartlarında gerçekleştirilen deneyler ile kıyaslanarak oluşturulan denklemler içerisinde gerçek korozyon hızını en yakın tahmin edebilen denklemin hangisi olduğu bulunmuştur.

Tez çalışmasında, zemin koşullarından ve dış etkenlerden kaynaklanan 5 adet faktörün korozyon sürecine yaptıkları etki bir arada deney ortamında incelenmiştir. Deney çalışması

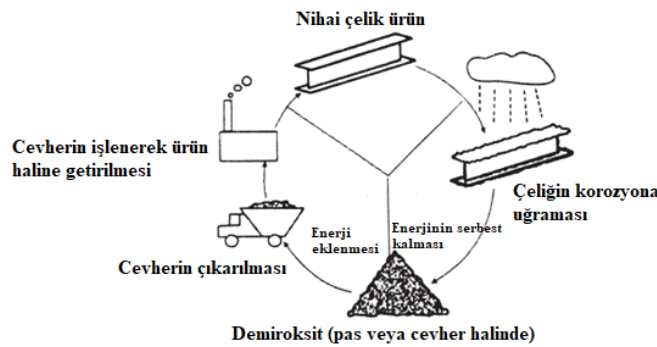
yapılan toprak zeminin, boru hatlarının geçtiği bölgelerden getirilmiş olması ile sahadaki koşulların deney ortamında oluşturulması sağlanmıştır. İstatistiksel analiz yönteminin uygulanması ile değişkenlik seviyeleri içeren 5 faktörün etkisi sonucu boru hatlarında meydana gelen korozyon hızlarının belirlenmesi imkânı oluşmuştur. Ayrıca çalışma süresince, çelik boru hattı korozyonuna etki eden başlıca faktörler farklı seviyelerde, kontrol edilebilir test ortamında uygulanarak korozyon hızları ölçülmüştür. Oda sıcaklığında toprak ortam içerisine yerleştirilen boruya, farklı seviyelerdeki faktörler aynı anda uygulanmış ve boruya bağlanan korozyon kuponları ile meydana gelen korozyon hızları belirlenmiştir. Korozyon hızlarının, laboratuvar koşullarında korozyon kuponları ile ölçülmesi, test parametrelerinin kontrol edilebilirliği açısından uygun bir yöntemdir. Çalışmada incelenen faktör ve faktör seviye sayıları göz önüne alınarak Taguchi metodunda L16 ortogonal dizini seçilmiştir. Deneyler sonucunda hesaplanan korozyon hız değerleri, doğrusal ve doğrusal olmayan regresyon analizleri ile incelenerek 5 faktöre ve bu faktörlerin birbirleriyle olan etkileşimlerine bağlı olarak korozyon hızı hesaplama denklemleri elde edilmiştir. Doğrusal olmayan denklem modelinin oluşturulması amacıyla ortogonal dizinde yer alan deneyler haricinde ilave deney çalışmaları yapılmıştır. Farklı zemin özelliklerine sahip toprak ortamda gerçekleştirilen deneyler sonucunda bulunan korozyon hızları ile denklemler yardımıyla hesaplanan korozyon hızları karşılaştırılmıştır. Ayrıca, gerçek saha koşullarında yer alan doğal gaz boru hattı üzerindeki farklı bölgelerde korozyon kuponları ile korozyon hızı ölçümleri yapılarak, denklemler ile hesaplanan korozyon hızları ile kıyaslanmıştır. Bununla birlikte; MİNİTAB istatistiksel analiz programı ile çalışma yapılan faktörler içerisinde çelik korozyon hızına en çok etki eden faktör ve seviyeleri belirlenmiştir. Çalışmanın hem deney ortamında hem de gerçek saha koşullarında gerçekleştirilerek, korozyon hızları ile ilgili kıyaslamaların yapılması, bu çalışmanın incelenen diğer literatür araştırmalarına göre daha ayrıntılı analiz ve sonuçlar içermesini sağlamıştır.

2. KOROZYON

Metal yapılarda meydana gelen korozyon süreçleri; korozyonun oluşumundan korozyona karşı alınan tedbirlere kadar; korozyon mekanizması, korozyon termodinamiği, korozyon kinetiği, korozyona etki eden faktörler, korozyona karşı alınan tedbirler konu başlıkları altında incelenmiştir.

2.1.Korozyon Mekanizması

Metal yapılar, çevresel etkilere bağlı olarak korozyona uğrayarak doğada ilk bulundukları durum olan cevher haline dönme isteği içerisinde olurlar (Şekil 2.1.). Bu sebeple metaller, birtakım reaksiyonlara uğrayarak bozunurlar ve işlevsiz hale gelirler. Korozyon, metal malzemeler ile çevreleri arasında sürekli devam etmekte olan elektrokimyasal reaksiyonlar sürecidir. Bu reaksiyonların meydana gelebilmesi için elektron hareketini sağlayan metal yapı, anot, katot ve elektrolit ortamın birarada bulunması gerekmektedir. Bununla birlikte; reaksiyonun meydana gelebilmesi için bir başlangıç enerjisinin itici güç olarak sürece katkıda bulunması gerekmektedir. Metalin kendisi korozyon sürecinin başlaması için itici güç olarak süreçte önemli rol oynamaktadır. Bu güç metalin üretim sürecinde içerisinde depolanmış halde bulunan enerjidir. Bahse konu bu enerjinin miktarı metalden metale değişim göstermekte olup bu sayede metallerin korozyona yatkınlığı da farklılık arz etmektedir. Metallerin birbirlerine göre korozyona uğrama yatkınlıklarını gösterir sıralama metallerin EMF serileri, Tablo 2.1.' de gösterilmektedir. EMF serisine göre, potansiyel değer olarak daha negatif seviyede bulunan metal, korozyona uğramaya daha yatkın olarak değerlendirilmektedir.



Şekil 2.1. Çeliğin korozyon döngüsü [11]

Tablo 2.1. Metallerin EMF serileri [12]

	Metal	Volts ¹	
Metal üretimi için daha fazla enerji gereksinimi	Magnesium	-2.37	Korozyona uğrama ihtimalinde artış
	Aluminum	-1.66	
	Zinc	-0.76	
	Iron	-0.44	
	Tin	-0.14	
	Lead	-0.13	
	Hydrogen	0.00	
	Copper	+0.34 to +0.52	
	Silver	+0.80	
	Platinum	+1.20	
Metal üretimi için daha az enerji gereksinimi	Gold	+1.50 to +1.68	Korozyona uğrama ihtimalinde azalış

Bununla birlikte; korozyon süreci için gerekli olan enerji, metallerin bulundukları ortama göre olan potansiyelleri ölçülerek belirlenebilmekte olup bu enerji metal korozyona uğrar iken açığa çıkacak olan enerji ile yakından ilişkilidir.

2.1.1.Katot

Korozyon mekanizması kısmında ele alınan ve korozyon sürecinin meydana gelebilmesi için gerekli olan ana unsurlardan biri katottur. Katot, korozyon reaksiyonları sürecince metalin korozyona uğramayan kısmı olarak olarak isimlendirilir. Katodik bölgeler anodik bölgeler ile aynı metal üzerinde olabileceği gibi galvanik çiftlerde katot, diğer metale göre daha soy (korozyona uğrama yatkınlığı daha az) metal olarak da bulunabilir. Korozyon prosesi boyunca anodik bölgede oluşan elektronlar, anottan katot yüzeyine doğru bir yol izlerler ve bu elektronlar katot yüzeyinde çözelti içerisindeki pozitif iyonlar tarafından tüketilirler. Katot yüzeyinde meydana gelen reaksiyonlar, Tablo 2.2.' de özetlenmektedir.

Tablo 2.2. Katodik reaksiyonlar [11]

Katodik reaksiyonlar	Özet bilgi
$O_2 + 2H_2O + 4e \longrightarrow 4OH^-$	Oksijen indirgenme reaksiyonudur. Genellikle nötral veya alkali ortamlarda meydana gelir.
$O_2 + 4H^+ + 4e \longrightarrow 2H_2O$	Oksijen indirgenme reaksiyonudur. Genellikle asidik ortamlarda meydana gelir.
$2H_2O + 2e \longrightarrow H_2 + 2OH^-$	Hidrojen gazı çıkış reaksiyonudur. Genellikle nötral sulu ortamlarda meydana gelen reaksiyon türüdür.
$2H^+ + 2e \longrightarrow H_2$	Hidrojen gazı çıkış reaksiyonu. Genellikle asidik ortamlarda görülen reaksiyon türüdür.
$M^{+3} + e \longrightarrow M^{+2}$	Metal iyonu indirgenme reaksiyonudur.
$M^+ + e \longrightarrow M$	Metal kaplama reaksiyonudur.

2.1.2. Anot

Korozyon süresince meydana gelen kimyasal reaksiyonlar sonucunda metal yüzeyinde çözünme meydana gelen kısma anot adı verilir. Bu kısımda anodik reaksiyonlar sonucunda metal iyonları ve elektronlar ortaya çıkmakta olup iyonlar metalin bulunduğu ortamdaki elektrolite, elektronlar ise aynı metal yüzeyinde bulunan katodik bölgeye transfer olurlar. Katodik bölgeye ilerleyen elektronlar burada Tablo 2.2.'de gösterilmekte olan katodik reaksiyonlara katılırlar.

Anodik reaksiyonlar sonucunda açığa çıkan metal iyonları ise metalin bulunduğu elektrolit içerisindeki diğer iyonlarla reaksiyona girerek, demir oksit, demir klorür gibi farklı korozyon ürünleri meydana getirirler. Anodik çözünme reaksiyonuna en tipik örnek Eşitlik 2.1. ile gösterilmektedir. Bu reaksiyon ile demir metali demir iyonuna dönüşerek 2 adet elektron vermektedir. Anodik reaksiyon, her metal türü için benzer şekilde meydana gelmekle birlikte açığa çıkan elektron sayısı farklılık göstermektedir.



2.1.3. Elektrolit

Korozyon sürecinin meydana gelebilmesi gerekli olan bir diğer parametre elektrolittir. Elektrolitler, metal malzemenin içerisinde bulunduğu su, toprak vb. ortamlar olabilmektedir. Metalin bir elektrolit içerisinde olması reaksiyonlar sonucu açığa çıkan iyonik akım akışının sağlanması için gereklidir. Bir metal üzerinde anot, katot ve elektrolitin olmasıyla birlikte korozyon hücresi için gerekli ortam sağlamış olur ve metal korozyonu başlar. Elektrolitin

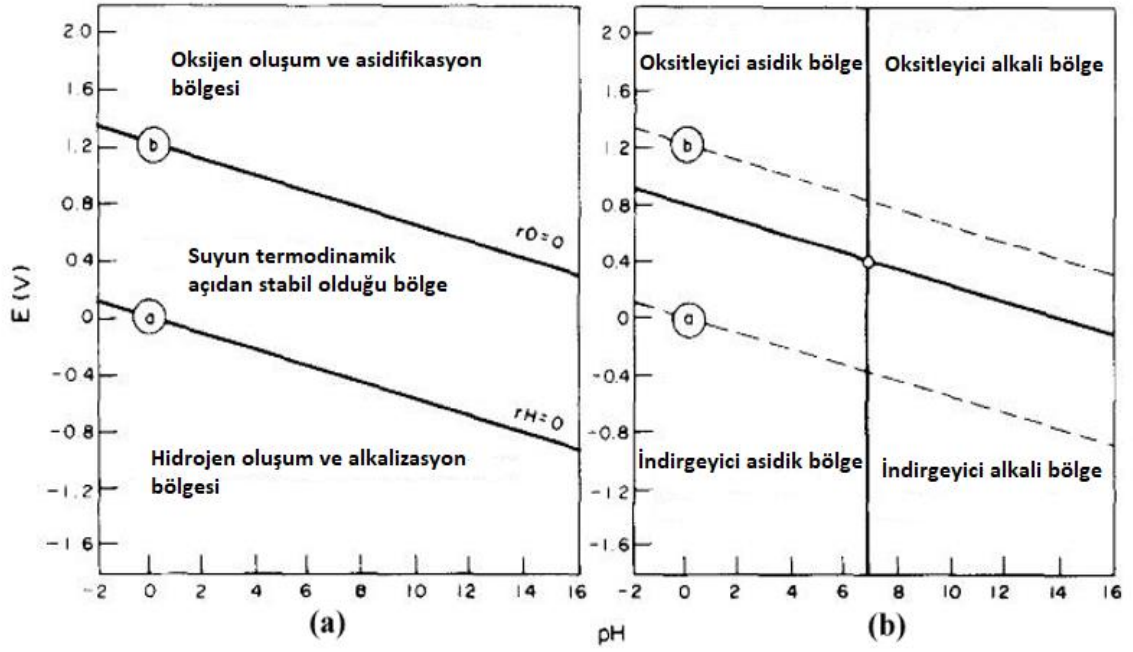
iletkenlik seviyesi anot ile katot arasındaki iyonik akımın seviyesini etkilemektedir. Anot ile katot arasında yüksek iletkenli bir ortamın olması (tuzlu su vb.) iyon akışını hızlandırırken düşük iletkenli ortam (tatlı su vb.) ise bu hızı nispeten yavaşlatmaktadır.

2.2.Korozyon Termodinamiği

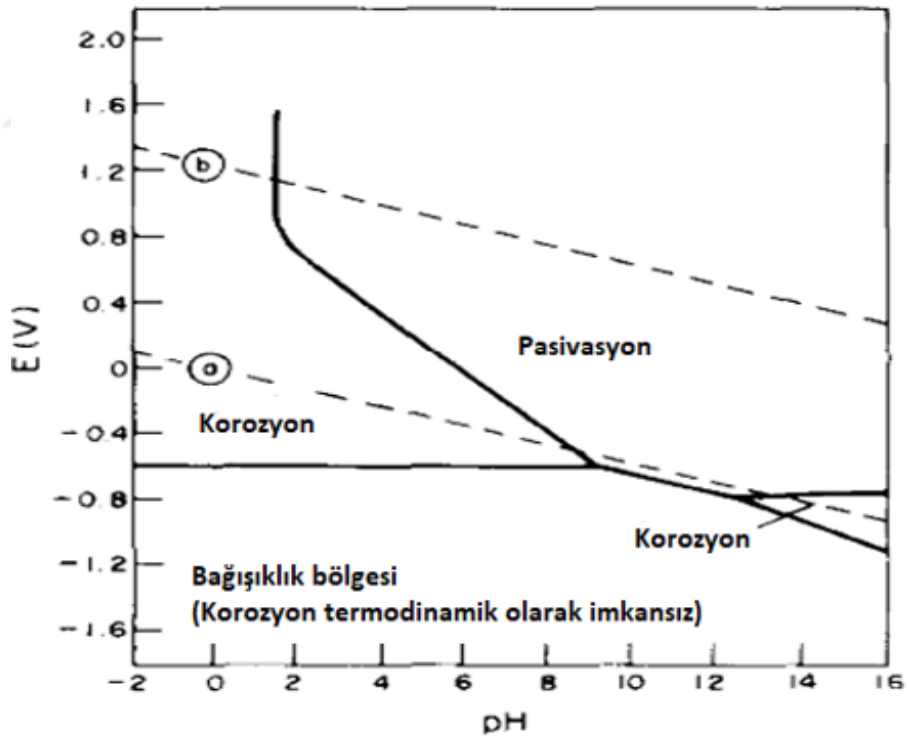
Korozyon termodinamiğinin incelenmesi, metal yapıların içerisinde bulundukları ortamda korozyona uğrayıp uğramayacakları konusunda bilgi sağlamakta olup bu konuda ana gösterge olarak pourbaix diyagramları kabul edilmektedir. Bu diyagramlar; ortamın pH değeri ile metalin ölçülen potansiyeline bağlı olarak, metalin termodinamik açıdan davranışını göstermektedir [1].

Şekil 2.2a.' da görüldüğü üzere pH-Potansiyel diyagramlarında, su a ve b çizgileri arasında ve 1 atm basınç altında stabil bir karakter sergilemektedir. Bu çizgilerin altında ve üzerinde su, hidrojen oluşum reaksiyonu ile indirgenmekte veya oksijen oluşum reaksiyonu ile oksitlenmektedir. [13]. Şekil 2.2b.' de ise pH ve potansiyel değerlere bağlı olarak meydana gelebilecek ve metalin maruz kalacağı oksitleyici asidik, oksitleyici alkalın, indirgeyici asidik ve indirgeyici alkalın ortamlar gösterilmektedir.

Şekil 2.2a. ile Şekil 2.2b.' de yeralan diyagramlarının birleşimi ise Pourbaix diyagramını ortaya çıkarmaktadır (Şekil 2.3.). Pourbaix diyagramı üzerinde yer alan bölgeler, metalin korozyon yönüyle stabilitesini göstermektedir. Bu kapsamda; demir Fe yapısında iken termodinamik açıdan stabil ve korozyona uğrama ihtimali bulunmamaktadır. Demir metalinin; Fe^{+2} , Fe^{+3} , FeO_2H^- iyonik yapılarından birine sahip olması durumunda metal korozyona uğramaktadır, Demir metalinin Fe_2O_3 veya Fe_3O_4 bileşikleri halinde bulunduğu durumlarda ise metal pasif halde olup korozyona uğramamaktadır [13].



Şekil 2.2. Suyun termodinamik stabilitesi (a), asit, alkalın, oksitleyici, indirgeyici bölgeler (b) [13]



Şekil 2.3. Demirin 25 °C' deki Potential/pH diagramı[13]

2.3. Korozyon Kinetiği

Korozyon kinetiği, korozyon sürecinin hızını tarif etmek için kullanılan bir terim olup korozyon hızı, ortamda meydana gelen iyonik akım transferine bağlıdır. Korozyon hücresindeki iyonik akım artışı metalin çözünme reaksiyonlarını hızlandırmakta olup katodik reaksiyonlar da, metal çözünme reaksiyonları ile aynı zamanda korozyon hücresi içerisinde meydana gelmektedir. Meydana gelen anodik ve katodik reaksiyonlar birbirleriyle bağlantılı olup bu reaksiyonların biri durduğunda diğer reaksiyonda durur ve korozyon hızı sıfıra yaklaşır.

2.3.1. Karma potansiyel teorisi

Karma potansiyel teorisi, ortamın ve malzemenin korozyon üzerine olan etkisini incelemektedir. Bu yaklaşım; anodik ve katodik reaksiyon hızının aynı olması gerektiğini ve bu reaksiyonların bir arada veya ayrı ayrı incelenebileceğini ifade etmektedir [11]. Anodik reaksiyonda sistem kendi serbest enerjisini düşürmeye çalışmaktadır. Bu enerji türü sistemdeki elektrokimyasal potansiyel seviyesine bağlıdır. Serbest enerjide meydana gelen değişim, korozyon süreci için itici güç olan elektrokimyasal aşırı potansiyeli tanımlamaktadır. Aşırı potansiyel aynı zamanda metal yüzey potansiyeli ile reaksiyonun denge potansiyeli arasındaki fark olarak tanımlanmaktadır. Eşitlik 2.2. ve Eşitlik 2.3.' de gösterilmekte olan anodik reaksiyon ve katodik reaksiyonlar, birbirlerinden bağımsız olarak değerlendirildiğinde aşırı potansiyel ile akım arasında liner olmayan bir bağıntı elde edilmektedir.

$$\eta_a = \alpha_a + \beta_a * \log i \quad (2.2)$$

$$\eta_c = \alpha_c + \beta_c * \log i \quad (2.3)$$

η_a : Anodik ve katodik reaksiyonlar için aşırı potansiyel değerini,

η_c : Katodik reaksiyon için aşırı potansiyel değerini,

β_a : Anodik tafel sabitini,

β_c : Katodik tafel sabitini,

i : Akım yoğunluğu değerini,

α : Sabiti, belirtmektedir.

Bir korozyon sürecinde farklı polarizasyon türleri meydana gelmekte olup polarizasyon türünün tanımlanması, korozyon mekanizmasının tanımlanması için önemlidir. Örneğin bir korozyon sürecinin kontrolü konsantrasyon polarizasyonunda ise korozyon hızı, metal yüzeyindeki difüzyonun hızına bağlıdır. Difüzyon hızının artırılması için ise metalin içerisinde bulunduğu ortam karıştırılabilir. Bu durumun aksine, bir korozyon sürecinin kontrolü aktivasyon polarizasyonunda ise korozyonun meydana geldiği ortamın karıştırılması korozyon hızını arttırmayacaktır [14].

2.3.2. Aktivasyon polarizasyonu

Aktivasyon polarizasyonu, metal yüzeyi ile metalin içerisinde bulunduğu ortam arasında meydana gelen reaksiyon serileri tarafından yönetilen elektrokimyasal mekanizma olarak tanımlanmaktadır [15]. Aktivasyon polarizasyonun hakim olduğu korozyon süreçlerindeki reaksiyonlar, genellikle ortamdaki iyonların metal yüzeyine tutunması ile meydana gelmektedir. Bununla birlikte aktivasyon polarizasyonu, korozyon reaksiyonları yavaş adım tarafından kontrol edildiği zaman baskın hale gelmektedir. Korozyon reaksiyonları içerisinde yavaş olan adım, korozyon sürecinin kinetiğini ve metal yüzeyinde meydana gelen elektron akış hızını da etkilemektedir [16]. Örneğin, metallerin korozyon süreçlerinde meydana gelen reaksiyonlardan biri olan hidrojen indirgenme reaksiyonları içerisinde yavaş olan adım, tüm korozyon sürecini kontrol etmektedir [17]. Hidrojen iyonları metal yüzeyine gelerek anodik reaksiyonlar sonucu açığa çıkan elektronları kullanırlar (2.4.). Ayrıca hidrojen indirgenme reaksiyonu sonucu açığa çıkan hidrojen atomları, metal yüzeyine tutunarak birbirleri ile reaksiyona girerler (2.5.). Hidrojen atomlarının reaksiyona girmesi ile metal yüzeyinde büyük miktarda hidrojen gazı açığa çıkmaktadır.



Bu reaksiyonlardan bir tanesi reaksiyonların kontrolünü alarak aktivasyon polarizasyonunu başlatır. Bu polarizasyon türü hem anodik hem de katodik reaksiyonlarda görülebilir. Bununla birlikte, korozyon reaksiyonlarının devamı için anot ve katot bölgelerinin sürekli aktif halde olması gerekmektedir. Korozyon süreci devam ederken anodik ve katodik reaksiyonları hızlandırmak veya yavaşlatmak mümkün olmaktadır.

Katodik reaksiyonları hızlandırmak için metalin sahip olduğu potansiyel değerini daha negatif bir hale getirmek gerekmektedir. Bu durumun aksine metal çözünme reaksiyonu, metal potansiyeli daha pozitif bir değere getirilerek hızlandırılmaktadır. Elektrotun bu şekilde farklı potansiyel değerlere polarize edilmesi ile korozyon reaksiyon hızı değiştirilebilmekte olup aktivasyon polarizasyonu ile korozyon hızı arasındaki ilişki, tafel eşitliği ile gösterilmektedir (2.6.) [18]. Eşitlik 2.6.' da yeralan b terimi tafel denkleminin eğiminden kaynaklanan bir sabit olup negative veya pozitif değer alabilmektedir. Eğimin negatif olması katodik reaksiyonları, pozitif olması ise anodik reaksiyonları sembolize etmektedir. Bu durumda eğimin yönüne göre hangi reaksiyon türünün belirleyici olduğu anlaşılabilmektedir.

$$\eta_A = b \log_{10} i/i_0 \quad (2.6)$$

η_A : Aktivasyon polarizasyonunu,

i: Akım yoğunluğu değerini,

b:Tafel eğiminden gelen sabit değeri

i_0 : Değişen akım yoğunluğunu belirtmektedir.

2.3.3. Konsantrasyon polarizasyonu:

Konsantrasyon polarizasyonu genellikle metalin içerisinde bulunduğu ortamdan, metal yüzeyine doğru olan iyon difüzyonu tarafından yönetilmektedir. Hidrojen oluşum reaksiyonu, metal yüzeyine gerçekleşen difüzyon tarafından kontrol edilen reaksiyonlara örnek olarak verilebilir. Hidrojen oluşum reaksiyonunda reaksiyon hızına bağlı olarak hidrojen iyonu tüketim veya hidrojen iyonu indirgenme sayısı değişim göstermektedir. Metal yüzeyinde gerçekleşen hidrojen oluşum reaksiyonu çok hızlı devam eder ise, yüzeyde bulunan hidrojen atomları çok hızlı tükenir ve yüzeydeki iyon sayısı kısıtlanmış olur. Yüzeyde hidrojen iyon sayısının düşük olması, korozyon reaksiyon hızını sınırlandırmış olup bu hız, Eşitlik 2.7.' de gösterildiği üzere limitlenmiş akım yoğunluğu ifadesi ile anlatılmaktadır [15].

$$i_L = D * n * F * C_B / x \quad (2.7)$$

D: Difüzyon sabitini,

i_L : Limitlenmiş akım yoğunluğunu,

C_B : Ortamdaki iyon konsantrasyonunu,

X: Metal yüzeyinde oluşan difüzyon tabakası kalınlığını,

F: Faraday sabitini,

N: Reaksiyon süresince ortaya çıkan elektron sayısını belirtmektedir.

Korozyon reaksiyonları süresince metalin içerisinde bulunduğu ortamdaki iyon artışı, metal yüzeyine daha fazla iyon gelmesine sebebiyet vererek yüzeyde devam etmekte olan reaksiyonların hızını arttırır. Ancak iyon difüzyonu sebebiyle metal yüzeyindeki difüzyon tabakasının kalınlaşması ise yüzeye olan akım akışını sınırlandırarak korozyon hızını düşürür. Bununla birlikte yüzeyde oluşan difüzyon tabakasının kalınlığı, metalin şekli ve ortamın karıştırılması ile yakından ilişkilidir [15]. Genellikle katodik reaksiyonlar için gözlenmekte olan metal yüzeyinde gerçekleşen reaksiyon hızının difüzyon hızına bağlı olması durumu, anodik reaksiyonlar için söz konusu olmamaktadır. Anodik reaksiyonların meydana gelerek sonucunda elektron çıkışının sağlanması için metalin kendisi sınırsız bir kaynak oluşturmaktadır. Konsantrasyon polarizasyon mekanizması genellikle hidrojen oluşum reaksiyonu için örneklendirilmiş olsada metalin içerisinde bulunduğu elektrolit ortama bağlı olarak oksijen indirgenme reaksiyonu içinde benzer süreçler geçerlidir. Sınırlı sayıdaki oksijen atomunun metal yüzeyine gelmiş olması metal yüzeyindeki katodik reaksiyon hızının azalmasına sebebiyet vermekte olup bu durum metal yüzeyindeki akım yoğunluğunu sınırlandırmaktadır.

2.3.4. Karma polarizasyon

Bir koroziv ortam içerisinde, konsantrasyon ve aktivasyon polarizasyonunun meydana getirdiği etkinin birleşimi, karma polarizasyona sebebiyet vermektedir (2.8.). Metal yüzeyinde, her ne kadar her iki polarizasyon türü aynı anda meydana geliyor olsa da polarizasyon türlerinin baskın olması durumu ortam koşullarına göre değişmektedir. Korozyon mekanizması içerisinde reaksiyon hızlarında meydana gelen artış, konsantrasyon polarizasyonunun belirleyici olduğunu ifade etmekte olup aktivasyon polarizasyonunun baskın olduğu durumlarda ise reaksiyon hızında azalma meydana gelmektedir.

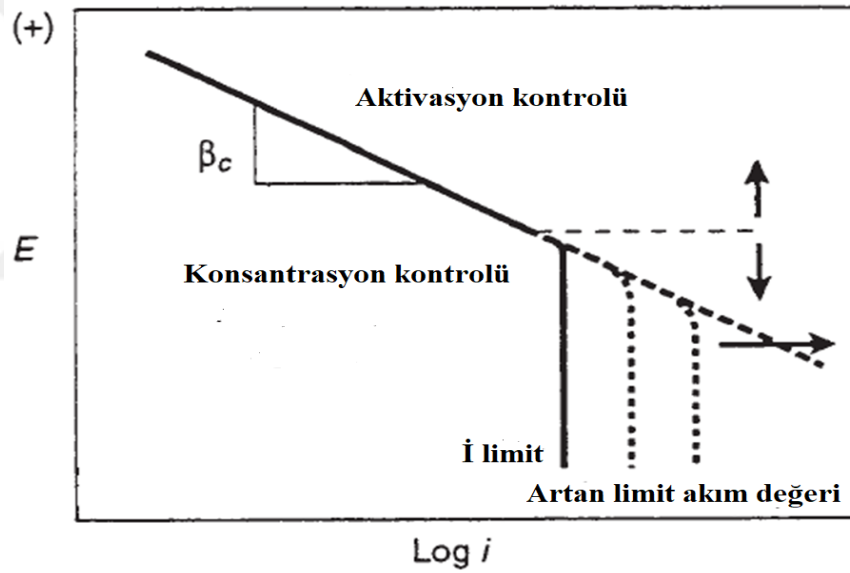
$$\eta_T = \eta_a + \eta_c \quad (2.8)$$

η_T : Toplam polarizasyonu

η_a : Aktivasyon polarizasyonunu

η_c : Konsantrasyon polarizasyonunu belirtmektedir.

Konsantrasyon polarizasyonu, metallerin bozunma (anodik) reaksiyonlarında baskın olmamaktadır. Ancak katodik reaksiyonlarda her iki polarizasyon türü de aynı eğri üzerinde görülebilmektedir. Her iki polarizasyon türünün de gözlemlenebileceği ve potansiyel ile akım arasında çizilmiş olan eğri Şekil 2.4.' de gösterilmektedir. Eğri üzerinde yer alan yatay kesikli çizgi, aktivasyon ve konsantrasyon polarizasyon reaksiyonlarının sınır çizgisi olarak tanımlanmaktadır. Aktivasyon polarizasyonu bu çizgi üzerinde baskın hale gelir iken çizginin altında konsantrasyon polarizasyonu baskın hale gelmektedir.



Şekil 2. 4. Karma polarizasyon eğrisi [11]

Ayrıca Şekil 2.4.' de görüldüğü üzere, metal yüzeyindeki akımlar limit değerine ulaştığında, korozyon hızında düşüş meydana gelmekte olup korozyon hızı potansiyel değerinden etkilenmemektedir. Bu durumda asıl belirleyici olan elektrolit ortamdan metal yüzeye gelen iyon akışı ve korozyon reaksiyonu sonucunda oluşan korozyon ürünlerinin, elektrolit ortama geri difüzyonudur. Şekil 2.4.' de yeralan I_{limit} değeri sıcaklık, konsantrasyon ve ortamdaki iyon akışının artması ile artmaktadır. Buna sebep olarak sıcaklığın, konsantrasyonun ve elektrolit akışının artması ve bu sebeple metal yüzeyinde oluşan difüzyon tabakası kalınlığının azalması gösterilebilir.

2.3.5. Ohmik polarizasyon

Bu polarizasyon türü genellikle metalin içerisinde bulunduğu elektrolitin, metal yüzeyine doğru gelen elektrik ve iyon akışına karşı gösterdiği direnç sonucu oluşmaktadır. Ayrıca elektriksel direnç, Ohm kanunu ile gösterilen bir aşırı potansiyel yaratmaktadır (2.9.).

$$\eta_{\Omega} = I \cdot R \quad (2.9)$$

I: İyonik akımı,

R: Elektrik direncini,

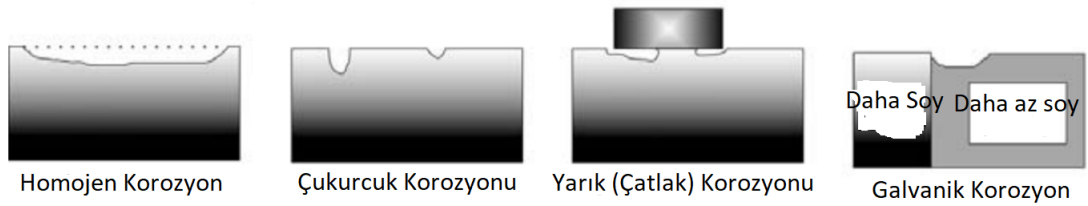
η_{Ω} : Aşırı potansiyeli tanımlamaktadır.

Ohmik direncin temel sebebi anot ve katot bölgeleri arasındaki mesafedir. Bu mesafenin artması elektrolitin iyon ve elektrik akışına karşı direncini arttıracak olup bu durum direncin, mesafe ile doru orantılı olmasından kaynaklanmaktadır. Ohmik direncin düşürülebilmesi, anot ve katot bölgelerinin olabildiğince yakın olmasına ve korozyon sistemindeki akımın kesilebilmesine bağlıdır. Bu durum, akımın olmadığı bir yerde akıma karşı koyacak bir direncin oluşmasının mümkün olmaması ile açıklanmaktadır. Ohmik direnç özellikle, anot ile katot arası mesafenin fazla olduğu yerlerde metalin katodik koruma potansiyelinin doğru şekilde ölçülmesini etkilemektedir. Anot ile katotun içerisinde gömülü olduğu toprak ortamın direncinin fazla olması durumunda ölçülen potansiyel değerin, direnç etkisi altında olduğu bilinerek potansiyelin direktten arındırılmış şekilde ölçülmesi gerekmektedir. Bu durumda, katodik koruma akımlarının anlık olarak kesilmesi ve potansiyel değerlerin, anlık kesinti (off) anında okunması gerekmektedir. Ayrıca ohmik direnç, özellikle üretim tesislerindeki potansiyel ölçümlerinde önemli seviyede enerji kaybına sebebiyet vermektedir.

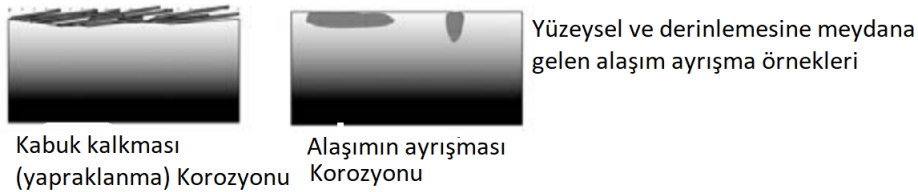
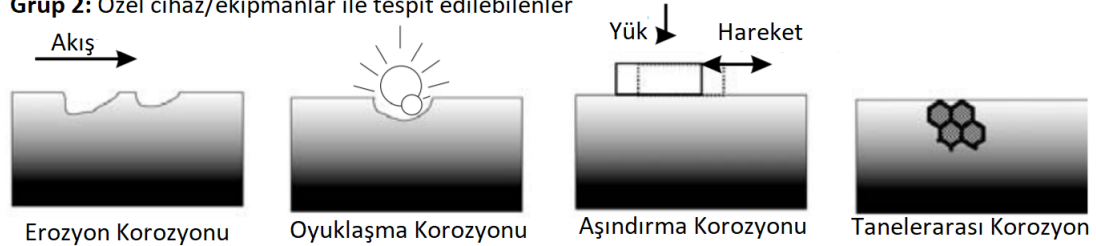
2.4.Korozyon Türleri

Metallerde görülmekte olan korozyon süreçleri farklı formlarda meydana gelmektedir. Her bir korozyon formunun, kendine özgü oluşum mekanizması ve oluşum süreci bulunmaktadır. Bahse konu korozyon türleri Şekil 2.5.' de görüldüğü üzere temelde 3 şekilde incelenip tespit edilebilir. Bunlar görsel inceleme ile tespit edilebilen korozyon türleri, özel cihaz/ekipmanlarla tespit edilebilen korozyon türleri ve mikroskopik inceleme neticesinde tespit edilebilen korozyon türleridir.

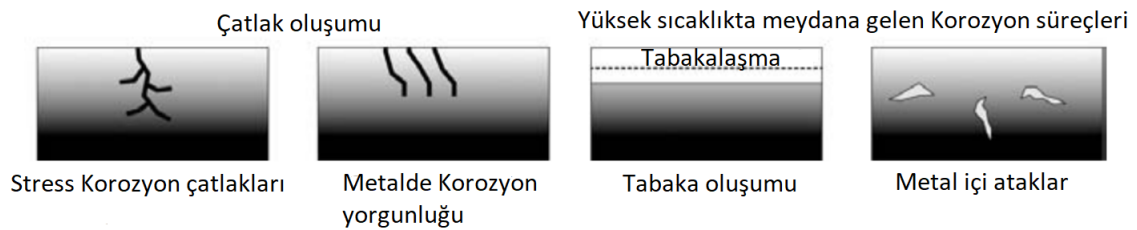
Grup 1: Görsel inceleme ile tespit edilebilenler



Grup 2: Özel cihaz/ekipmanlar ile tespit edilebilenler



Grup 3: Mikroskopik inceleme ile tespit edilenler



Şekil 2.5. Tespit yöntemlerine göre korozyon türleri [19]

Şekil 2.5.' de gösterilmekte olan korozyon türlerinden; homojen korozyon, çukurcuk korozyonu ve çatlak korozyonu metal malzemelerde yaygın olarak meydana gelmektedir [19].

2.4.1. Genel korozyon

Genel korozyon (homojen korozyon), diğer türlere göre daha az korkulan ve metalin servis ömrü boyunca etkisi ve hızı genellikle öngörülebilir bir türdür. Ancak uygun olmayan metal malzeme seçimi ve korozif ortamda meydana gelebilecek büyük değişimler korozyon hızının ve sürecinin tahminini zorlaştırabilmektedir. Boru Hatları gibi gömülü durumda bulunan metal malzemelerin iç veya dış yüzeylerinde gözlemlenebilecek bir korozyon türüdür.

2.4.2. Çukurcuk korozyon

Çukurcuk korozyonu, metal yüzeyinde küçük çukur veya deliklerin oluşumuna sebebiyet veren ve tespiti ile gözlemlenmesinin genel korozyona göre daha zor olduğu bir korozyon türüdür. Bu tür korozyonda küçük bir alandaki metal kaybının fazla olması metali daha kısa sürede görevini yapamaz bir duruma getirebilmektedir. Çukurcuk korozyonda korozyona uğrayan metal kısmın üzerinde korozyon ürünlerinden bir katman meydana gelerek altta meydana gelen çukurcuğun tespitini zorlaştırabilmektedir. Bu gibi durumlarda korozyon türü nodüler veya tüberküloz şeklinde tanımlanabilmektedir. Çukurcuk korozyon mekanizması göz önüne alındığında, metal yüzeyinde meydana gelen çukurcuk sayısı arttıkça çukurcuğun derinliğinde azalma tespit edilmektedir. Ayrıca metal yüzeyinde büyük katodik bölgelerin yakınında küçük anodik bölgelerin varlığı, bu anodik bölgelerin daha hızlı korozyona uğramasına ve bölgesel ancak derin bir korozyonla karşılaşılmasına sebebiyet vermektedir.

Çukurcuk korozyonu, metalin kullanım yeri ve metalde meydana gelen diğer korozyon türleri ile yakından ilişkilidir. Örneğin bir sıvı altında kullanılan metallerde, metal yüzeyinden sıvı akışının olduğu bölgelerde çukurcuk korozyonu görülmemekte olup su birikimlerinin olduğu bölgelerde ise çukurcuk korozyonu hızlanmaktadır. Buna ilaveten bazı metal türlerinde (alüminyum/lityum) çukurcuk korozyonunun bitiş noktasından itibaren metalin iç kesimlerine doğru taneler arası korozyonun da ilerlediği tespit edilmiştir. Benzer şekilde, çukurcuk korozyonun çatlak (yarık) korozyonuyla da ilgisi bulunmakta olup çatlak korozyonu, çukurcuk korozyonunun daha ilerlemiş safhası olarak kabul edilmektedir. Ayrıca özellikle AC kaçak akımların (AC enterferans) olduğu bölgelerde kullanılmakta olan metal yapıların üzerinde AC akımların çıkış yaptığı bölgelerde çukurcuk korozyon örneklerine rastlanmaktadır.

2.4.3. Çatlak korozyonu

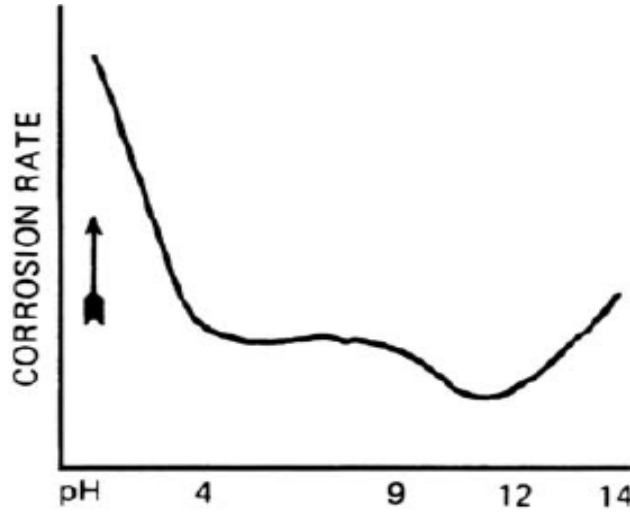
Yarık (çatlak) korozyonu genellikle metallerin birbirleri ile birleştirildiği yüzeylerde arada boşluk kalması durumunda meydana gelmektedir. Birleştirilen yüzeylerin her ikisi de metal olabileceği gibi bir tanesi metal olmayan malzeme olabilir. Bu gibi durumda metal ile metal olmayan (yalıtım malzemesi vb.) malzeme arasına su girmesi halinde korozyon yalıtım malzemesi altında metal yüzeyinde devam ederek metalin kullanım dışı kalmasına sebebiyet verebilir. Benzer şekilde metal üzerindeki conta ve cıvata bölgelerinde metal ile contanın birleşim noktalarında arada oluşabilecek boşluklarda korozyon ilerleyebilmektedir. Bununla birlikte yarık korozyonu tamamen gömülü bir metal yüzeyinde gözlemlenebileceği gibi atmosferik koşullara maruz kalan metal yüzeylerinde de görülebilmektedir. Yarık korozyonu genellikle çatlak başı ve sonu arasındaki oksijen konsantrasyonu farklılıklarından meydana gelmektedir. Çatlak başında oksijen miktarının fazla, çatlak sonunda ise daha kısıtlı olması arada mikro düzeyde bir konsantrasyon hücresi oluşturarak korozyona sebebiyet vermektedir. Bu gibi korozyon hücrelerinde çatlak başı (dışarıya açık yüzey) katot, çatlak sonu ise anot gibi davranmakta ve çatlak ilerlemektedir. Ayrıca çatlak giriş noktasında ve son noktasında pH seviyesinde farklılıklar olabileceği ve pH kaynaklı korozyonun da meydana gelebileceği düşünülmektedir.

2.5.Metal Korozyonuna Etki Eden Ortam Kaynaklı Faktörler

Korozyon, zamana bağlı olarak gerçekleşen ve birçok faktörden etkilenen bir süreçtir. Korozyonun etkilendiği faktörler, metalin bulunduğu ortama ve metalin yüzey koşullarına bağlı olarak değişir.

2.5.1.Ortamın pH değeri

pH, genellikle bir ortamın asidik veya bazik olma durumunu tanımlayan bir ifade olup aynı zamanda elektrolit içerisindeki hidrojen iyon konsantrasyonunu göstermektedir. Nötral ortamlar için pH değeri genel olarak 6,5-7, asidik ortamlar için 7 ve altı, bazik ortamlar için ise 7 ve üzeri olarak kabul edilmektedir. Ortamın asidikliği, 0 değerine doğru artmakta olup bazikliği ise 14 değerine doğru artmaktadır.



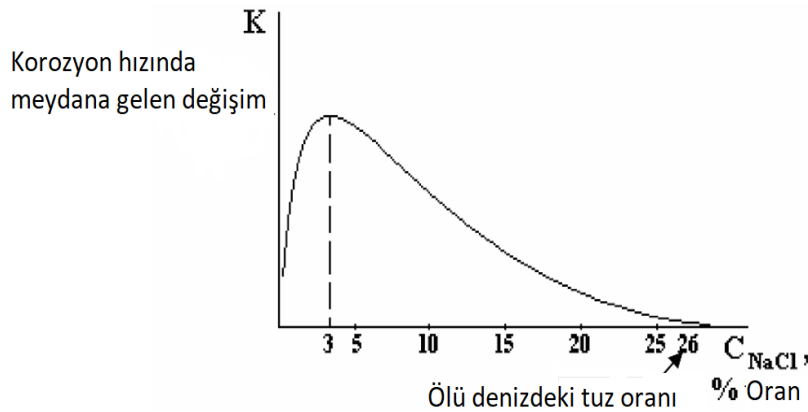
Şekil 2.6. pH değerine bağlı olarak korozyon hızındaki değişim miktarı [12]

Metallerin korozyon hızında olan değişim pH miktarına bağlı olmakla birlikte Şekil 2.6.' da görüldüğü gibi pH nötral seviyelerde iken korozyon hızında belirgin bir değişim meydana gelmemekte ancak grafiğin 0-4 ile 12-14 pH aralıklarında korozyon hızında artış görülmektedir. pH değişimine bağlı olarak korozyon hızında meydana gelen bu değişimler, metal yüzeyinde meydana gelen reaksiyonların etkisiyle olmaktadır. Özellikle içeriğindeki tuz konsantrasyonunun düşük olduğu sulu ortamlarda, pH seviyesi genellikle 4 ile 10 arasında olmakta ve korozyon hızında belirgin bir değişim olmamaktadır. Bu durum, bahse konu pH aralığında, korozyon hızının oksijen difüzyonu kontrolünde olması ve metal yüzeyinde bir bariyer görevi gören tabakalaşmaların meydana gelmesiyle açıklanabilmektedir. pH değerinin 4' ün altında olduğu durumlarda ise demir korozyonu hidrojen indirgenme reaksiyonu sebebiyle hızlanmaktadır. pH seviyesinin 10' un üzerinde olduğu durumlarda, metal yüzeyinde pasifleşme meydana gelmesi, korozyon hızının asidik ortama göre düşük olmasına sebebiyet vermektedir [20].

2.5.2. Ortamın tuzluluk seviyesi

Korozif toprak zeminlerde çözülebilen tuz konsantrasyonunun genellikle fazla olduğu gözlemlenmektedir. Bu durum, tuz miktarındaki artışa bağlı olarak zemin iletkenliğindeki artış (düşük elektriksel direnç) ve dolayısıyla korozyon reaksiyon hızındaki artış ile açıklanabilmektedir [11]. Metalin bulunduğu ortamda farklı birleşiklere sahip tuzlar bulunmakta olup bunlardan metal korozyon sürecine doğrudan etki eden başlıcaları aşağıda verilmektedir.

- Asidik ve alkali tuzlar; bu tuz çeşitleri su ile reaksiyona girmeleri sonucunda ortamda asit veya baz oluştururlar ve bu durum, ortam pH değerinin değişmesine sebebiyet verir. Örnek olarak FeCl_3 tuzunun su ile reaksiyonu sonucunda hidroklorik asit oluşarak ortam pH değerinde azalma meydana gelir.
- Nötral tuzlar; bu tuz çeşitlerinin su veya diğer ortamlara eklenmesi sonucunda korozyon hızında doğrudan bir yükseliş meydana gelmektedir. NaCl gibi nötral tuzların elektrolite eklenmesi sonucunda ortam pH değerinde değişme olmamakla birlikte, bu tuzlar elektrolit iletkenliğini arttırarak korozyon reaksiyonlarını hızlandırmaktadırlar. Ancak tuz miktarının belirli bir kritik değere ulaşması sonucunda elektrolit içerisinde bulunan oksijen konsantrasyonunda azalmanın başlaması, katodik reaksiyonlar için gerekli oksijenin sağlanamayarak korozyon hızının yavaşlamasına sebebiyet verir. Özellikle tuz içeriğindeki klor iyonları, metalin anodik çözünme reaksiyonlarında yer alarak korozyon sürecine doğrudan etki etmektedirler [24]. Klor iyonları ortamda, doğal yollarla bulunabileceği gibi kış aylarında karayollarının tuzlama çalışma sonucunda da ortama eklenmektedirler. Ayrıca ortamda bulunan klor iyon konsantrasyonu, ortam nemlilik seviyesine bağlı olarak büyük değişimler gösterebilmektedir [21]. Şekil 2.7.' de görüldüğü üzere, karbon çelikleri için maksimum korozyon hızına, NaCl ' nin ağırlık olarak %3 olduğu noktada ulaşılmaktadır. Bu oran genellikle deniz veya okyanuslarda gözlemlenen yüzde tuz ağırlıdır. Bu sebeple tuz yüzdesinin korozyona etkisiyle ilgili gerçekleştirilen birçok test % 3 NaCl içeriğine sahip ortamlarda gerçekleştirilmektedir [16].



Şekil 2.7. Sodyum klorür miktarının korozyon hızı üzerindeki etkisi [16]

2.5.3. Ortamda bulunan çözünmüş gazlar

Metallerin bulunduğu ortamdaki O_2 , CO_2 ve H_2S gibi çözünmüş gazlar ortamda meydana gelen korozyon süreciyle yakından ilgilidir. Bu gazlar içerisinde O_2 en koroziv olanıdır. Düşük miktarda bulunan oksijen gazı bile, hızlı ve güçlü oksitleme özelliği sebebiyle ciddi korozyon problemlerine sebebiyet verebilmektedir. Aynı zamanda oksijen, katodik reaksiyonlar içerisinde yer alarak korozyonu doğrudan etkileyebilmektedir. Katodik reaksiyonların hızlı seyretmesi anodik reaksiyonları da hızlandıracağı için korozyon hızında artışa sebebiyet verir. Metalin bulunduğu ortamda oksijen gazı ile birlikte karbondioksit gazı da genellikle bulunmakta olup oksijenin aksine karbondioksit daha az koroziv özellik sergilemektedir. Ancak Karbondioksitin su ile olan tepkimesi sonucunda karbonik asit oluşur ve bundan dolayı ortam pH seviyesi düşer ki bu durum da korozyon hızını arttıran etmenlerdendir [12].

Ortamdaki H_2S varlığı metalde genellikle sülfür stress çatlaklarına sebebiyet vererek metalin mekanik dayanımında azalmalara sebebiyet verebilmektedir. Hidrojen sülfür aynı zamanda metal yüzeyinde FeS tabakası meydana getirerek metali korozyona karşı korumaktadır. Ancak koruyucu etki, demir sülfür tabakasının çok kararlı olmaması ve pürüzlü yapısı sebebiyle kalıcı olmamaktadır [12].

2.5.4. Ortamdaki nem miktarı

Ortam nemliliği, korozyon sürecince meydana gelen elektrokimyasal reaksiyonların başlaması ve devam etmesi için gerekli olan elektrolit ortamı sağlamaktadır. Bu sebeple nemin varlığı, korozyon sürecinin tamamen kuru bir ortamda meydana gelmeyeceği düşünüldüğünde metaldeki korozyon sürecinin başlaması için önem arz etmektedir [15]. Topraktaki nemlilik içeriğine ve bu içeriğin korozyon hızına etkisi ile ilgili yapılan çalışmalarda, sabit nemlilik yüzdesine sahip 3 farklı ortamda bulunan metallerdeki kütle kayıpları ölçüldüğünde, metal kaybı ile nemlilik arasında bir bağıntı olduğu tespit edilmiştir [25]. Ayrıca karbon çeliğin toprak içerisindeki korozyon hızının ölçülmesi süresinde, toprak içerisindeki nemlilik arttırıldığında korozyon hızında artış gözlemlenmiş ancak nemlilik yüzdesi %10' dan daha fazla olduğu durumlarda ise korozyon hızının nispeten düştüğü görülmüştür [26].

Metalin içerisinde bulunduğu toprak zeminin su ve nem tutabilme özelliğinin olması, bu gibi zeminlerde korozyonun daha hızlı ilerlemesini sağlamaktadır. Bu kapsamda genellikle ince yapılı kil toprakta nem olma ihtimali kaba taneli kum ortama göre daha fazla olmaktadır. Bu durum, birinci ortamda yer alan metallerin nemden dolayı korozyona uğrama ihtimalini arttırmaktadır [1].

2.5.5. Redoks potansiyeli

Redoks potansiyeli, metalin içerisinde bulunduğu ortamın oksitleme veya indirgeme kapasitesi olarak tanımlanmaktadır. Bu potansiyel değeri genellikle kalomel referans elektrot ile ölçülmekte olup oksitleyici ortamlarda, oksijen oranının 1 mg/l değerini aşması halinde redoks potansiyelinin 300-500 mV aralığında ölçülmesi beklenmektedir. İndirgeyici ortamlarda ise ortam potansiyelinin 100 mV ve daha altında ölçüldüğu durumlarla karşılaşılmaktadır. Ayrıca zeminde meydana gelen mikrobiyal faaliyetler, zemin potansiyelinin -300 mV seviyelerinde ölçülmesine sebebiyet vermektedir [27].

Topraktaki oksijen miktarı redoks potansiyelinin belirlenmesinde en önemli parametrelerden bir tanesidir. Yüksek oksijen olan bir ortamda redoks potansiyeli yükselirken tam tersi durumda ise redoks potansiyeli düşük ölçülmektedir. Oksijenin toprağın içerisine difüze olması veya içeriden dışarıya oksijen çıkışı durumları da redoks potansiyelini etkilemekte ve potansiyeli dengesiz hale getirmektedir [1]. Toprak redoks potansiyeli, zemin içerisindeki çözünmüş oksijen miktarına bağlı olmakla birlikte toprak içerisindeki indirgeyici bakterilerin sülfat üretilip üretilmediği konusunda da fikir vermektedir [22]. Düşük redoks potansiyeline sahip toprak, oksijensiz ortamda gerçekleştirilen mikrobiyal faaliyetler için uygun ortam sağlamaktadır [28].

2.5.6. Zemin direnci

Metallerdeki korozyon süreci ile zemin direnci arasındaki ilişki sebebiyle zemin direnci, toprak korozivitesi ile alakalı yapılan çalışmalarda başlıca değişkenler arasında yer almaktadır [18]. Korozyon sürecinin tamamlanması için gerekli olan akım akışı, metalin bulunduğu ortam direnciyle doğrudan alakalıdır. Genel olarak, yüksek dirençli zeminlerde korozyon hızı zeminden akım geçişinin kısıtlanması sonucu nispeten azalmaktadır. Zemin direnç değeri ise ortamda bulunan su miktarı ve iyonik element konsantrasyonunun artması ile ters orantılı olarak düşmektedir. Ortamdaki direnç farklılıkları, mikro korozyon hücreleri meydana getirerek, metal yüzeyinde farklı bölgelerde anodik/katodik alanlar oluştururlar.

Farklı karakterdeki bu alanlar, metalin belirli bir bölgesinin korozyona uğramasına sebebiyet verirler. Zemin direnç değerlerinin belirlenmesinde, “Wenner Four-pin” ölçüm yöntemi, elektromanyetik ölçümler ve “soil box” metotları yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yöntemlerinden elektromanyetik ölçüm, özellikle farklı derinlikteki zemin direnç değerlerinin ölçülmesi için kullanılmaktadır. “Soil box” yöntemi ise genellikle sahadan toprak numunesinin alınarak laboratuvar ortamında analiz edilebilmesine olanak sağlamaktadır [1].

Korozyon hızına etkisi yönüyle zemin korozivitesi, 0’ dan 10’a kadar sınıflandırılmış bir skala kapsamında değerlendirilir. Bu skalada, “0” değeri en düşük korozyon riskini “10” değeri ise en yüksek korozyon riskini ifade etmektedir. Bahse konu sınıflandırma sistemine göre 700 Ω .cm ve daha düşük değerler 10 puan ile gösterilmekte olup 2000 Ω .cm ve daha yüksek direnç değerlerinde ise korozyon riski 0 noktasına gerilemektedir [29].

2.5.7. Ortamdaki oksijen konsantrasyonu

Toprak ortamın derinliği değiştikçe oksijen konsantrasyonunda farklılıklar meydana gelmektedir. Toprak içerisinde bulunan gazların miktarı genel olarak derinliğin artışına bağlı olarak azalmaktadır. Toprak içerisindeki oksijen konsantrasyonunun fazla olması korozyon hızını arttırıyor olsa da toprak içerisinde oksijen olmadığı durumlarda da korozyon hızında artış görülebilmektedir. Bu durum, topraktaki bakteriyel aktivitelere, özellikle sülfat indirgeyici bakterinin varlığına bağlıdır. Oksijenin olmadığı bir ortamda bakteriyel faaliyetlerden kaynaklı olarak metal üzerinde ciddi korozyon hasarları tespit edilmektedir. Ayrıca toprak içindeki oksijen miktarı, toprak türüyle de yakından ilişkilidir. Oksijen, kaba taneli kuru toprak içerisine, suya doymun toprak türüne göre daha rahat difüze olmaktadır [1]. Toprak ortamın derinliği ve toprak türü dışında, toprağın kazılması da oksijen konsantrasyonunu arttırmaktadır. Bu sebeple, kazılarak havalandırılmış toprak içerisindeki metal yapıda işlem yapılmamış toprağa göre korozyon hızı daha fazla olmaktadır.

2.6.Metal Korozyonuna Etki Eden Çevresel Faktörler

Metal yapılar, bulundukları ortam içerisinde var olan korozif etkiler sebebiyle korozyona uğradıkları gibi çevresel faktörler (dış faktörler) sebebiyle de korozyona uğramaktadırlar. Bu etmenler genellikle enterferans etkisi yaratarak metal üzerinde belirli bölgelerde korozyon sürecinin hızlanmasına sebebiyet verirler. Metal korozyonuna sebep olan bu faktörler, metalin bulunduğu ortama göre referans elektrotlar ile ölçülen potansiyel

değerini değiştirerek BS ISO 15589-1’ de belirtilen kriterlerin dışına çıkmasına ve böylelikle korozyona uğramasına sebebiyet verirler. Dış faktörler genellikle AC veya DC akım/potansiyel oluşturarak metalin ölçülen potansiyeline olumsuz yönde etki yaparlar.

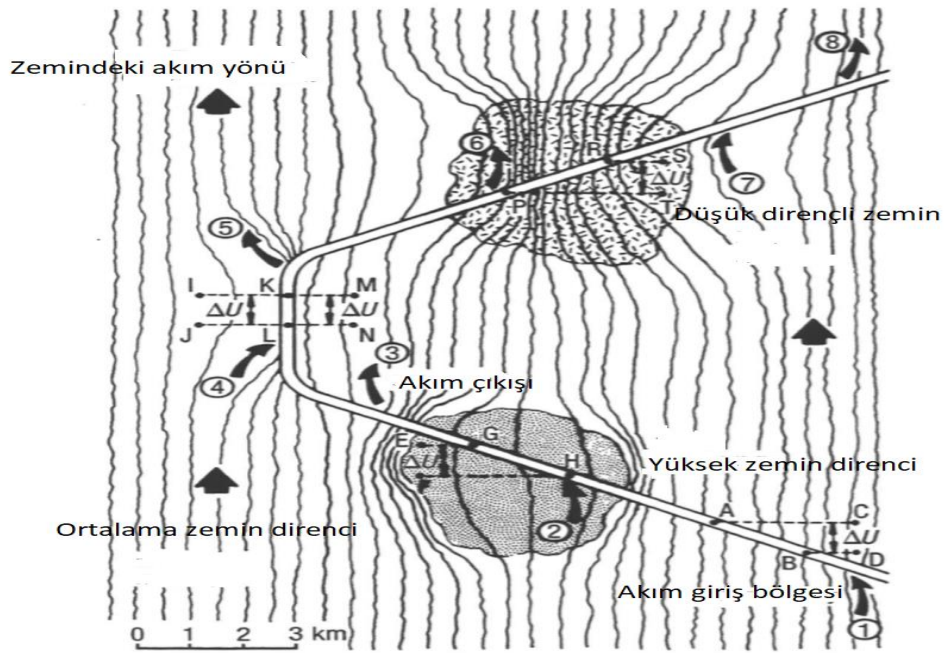
2.6.1. Tellürik enterferans etkisi

Dünyanın manyetik alanı, güneşten gelen proton ve elektron gibi yüklü parçacık akışından doğrudan etkilenmektedir. Bu manyetik alan, güneşten gelmekte olan parçacıklar ve radyasyonun şiddetine göre yeniden şekillenmekte ve etki gücü değişmektedir. Bu durum, dünyanın manyetik alanında manyetometreler ile ölçülebilen değişimler yaratmaktadır. Manyetik alandaki bu değişimler, zeminin jeolojisi ve özgül direncine göre zemin içerisinde 0,1 V/Km seviyelerine varan potansiyel değişimlere sebebiyet vermektedir. Bu elektrik alan içerisinde, özellikle iyi kaplanmış bir metal yapı, uç kısımları farklı potansiyel karakter sergileyen bir durumda bulunur. Kaplamada meydana gelen hasarlar, elektrik akımlarının çıkabileceği uygun ortam yaratmakta olup hasardan akım çıkışının büyük olması, metal yapının üzerindeki potansiyel değişimin büyük olmasına sebebiyet verir. Bahse konu akım çıkışı, katodik korumalı metal yapılarda, katodik koruma akımları ile birleşerek ortam şartlarına göre artma veya azalma özelliği gösterebilir [30]. Tellürik enterferans özellikle uzun kilometreler boyunca devam etmekte olan metal petrol ve doğal gaz boru hatlarının potansiyelini etkilemekte ve kaplama hasarı bulunan bölgeler ile metal üzerinde yer alan zayıf noktalarda korozyona sebebiyet vermektedir.

Şekil 2.8.’ de görüldüğü üzere tellürik akımlar, farklı zemin direnci gösteren güzergâhtan geçmekte olan boru hattına giriş yaparak potansiyelde değişimlere sebebiyet vermektedir. Şekil 2.8.’deki boru hattı, 1 noktasından güzergâhına girmekte olup 8 noktasından çıkış yapmaktadır. Tellürik akımlar ise boru hattına 1 noktasına yakın bir bölgeden giriş yaparak 8 noktasına doğru devam ederler. Tellürik akımların 1 noktasına yakın bir konumdan boru hattına girme sebebi, C ve D noktaları arasında oluşan potansiyel farkı olup potansiyel farkının fazla olması giren akım büyüklüğünün de fazla olması anlamına gelmektedir.

Yüksek zemin direncine sahip bölgelerde akım yoğunluğu, dirençten kaynaklı şekilde düşerken zemindeki potansiyel gradienti artmaktadır. Şekil 2.8.’ de gösterilen 2 numaralı kısımda, tellürik akım boru hattı üzerine girerek 3 numaralı bölgede çıkış yapmaktadır. Şekil 2.8.’ de gösterilen düşük dirençli bölgelerde ise zemindeki tellürik akım yoğunluğu daha fazla olmaktadır. Düşük zemin dirençli bölgelerde tellürik akımlar, boru hattından ayrılarak

nispeten yüksek dirençli bölgelerde boru hattına tekrar girişimde bulunurlar. Tellürik akımlardaki değişimlerin yavaş ilerlemesi ve Zeminde var olan akımların gidiş yönüne göre farklı karakter sergilemeleri sebebiyle, Tellürik akımlar; Boru Hattı kaplama hasar bölgelerinde sonu gelmeyen potansiyel dalgalanmalara sebebiyet verirler [31]. Şekil 2.8.' de gösterilmekte olan ve akım giriş/çıkışlarından kaynaklı bu potansiyel dalgalanmalar, metalin katodik olarak korunamamasına ve potansiyel değerlerin katodik koruma kriterlerinin dışına çıkmasına sebep olur. Bu durum metalin, korozyona karşı korunamamasının yanı sıra potansiyel değişimler sonucunda boru hattı üzerinde ölçülen değerlerin pozitif gelmesi durumunda metalin anot olarak davranarak korozyona uğramasına sebebiyet verir.

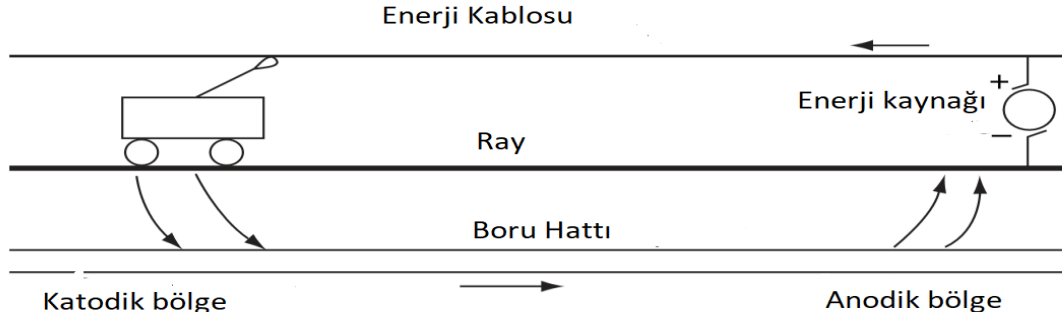


Şekil 2.8. Tellürik akımların zemin içerisindeki davranışları [31].

2.6.2.DC raylı sistemlerin etkisi

DC akım kaynağı ile enerjilendirilmiş olan tren/tramvay hatlarını kesen veya bu hatlara paralel doğrultuda tesis edilmiş olan metal yapılar, DC akımların etkisi altında kalarak korozyona uğramaktadırlar. Bu süreç, raylarda bulunmakta olan DC akımların bir kısmının nispeten daha az dirençli toprak zemine geçmesi ve zeminde yer alan boru hattı ve metalik yapıların, DC kaçak akımlardan etkilenmesi sonucu oluşur. Zemin içerisinde yer alan metal yapıların izolasyonlu olması, kaçak akımların metal yapı üzerinde daha uzun süre kalmasına sebep olmaktadır. Boru hattı üzerindeki DC akımlar, izolasyon hasarı olan bölgelerden zemine doğru çıkış yapar ve çıkış yaptıkları bölgelerde metal korozyonuna

sebeup olurlar. Metale giriş yapan kaçak akımlar, giriş bölgelerinde metal yapıyı katodik yönde etkiler iken, çıkış yaptıkları kaplama hasar bölgelerinde ise anodik yönde etkilerler (Şekil 2.9.) [32].



Şekil 2.9. Tren ve tramvay hatlarının sebep olduğu kaçak akımlar [32].

Ray üzerindeki DC akımların toprak zemine geçiş sürecinde, ray ile zemin arasında yer alan ve yalıtım amacıyla tesis edilmiş olan ahşap malzemenin yalıtım özelliğinin zaman içerisinde kaybolması etkilidir. Arada yalıtımın sağlanamaması sonucunda ray ile zemin arasında doğrudan bir elektriksel bağ oluşmaktadır. Ayrıca ray üzerindeki metal bağlantı noktaları, ray ile zemin arasındaki akım geçişi için daha kısa bir yol oluşturmaktadır. Rayın altındaki zeminde oluşan su birikintileri de ray ile zemin arasında yalıtım malzemesi olsa da bu yalıtımın devre dışı kalmasına ve dolayısıyla ray ile zeminin doğrudan temas halinde olmasına sebebiyet vermektedir.

Raylı sistemlerin dinamik yapısı sebebiyle, tren/tramvayın geçiş sıklığı ve süresi sistemden zemine geçiş yapan DC akımların büyüklüğünü belirlemektedir. Bu akımların metal yapıya geçişi sebebiyle, metalin bakır/bakırsülfat (Cu/CuSO_4) referans elektrotlar ile zemine göre ölçülen potansiyelinde değişimler meydana gelmektedir. Bu değişimin, ölçülen ortalama potansiyel değerini, raylı sistemin geçtiği en yoğun saatte 100 mV ve daha fazla aşmaması durumunda metal yapıda korozyon yönü ile risk olmadığı düşünülmektedir [33]. Ayrıca metal yapıların raylı sistemlerin etkisi ile enterferansa maruz kalıp kalmadığının tespiti amacıyla potansiyel değerler, 24 saatlik sürelerle ölçülerek kayıt altına alınır. Ölçülen bu potansiyellerde, raylı sistemlerin devreye girmesi ile birlikte değişim tespit edilmesi ve potansiyel değerlerin, akımların metal yapıya giriş ve çıkış yaptığı bölgelere bağlı olarak pozitif (anodik) ve negatif (katodik) yönlerde değişmesi, muhtemel enterferansın kanıtı olarak görülmektedir [1].

Raylı sistemlerden kaynaklı enterferansın giderilmesi amacıyla metal yapı ile DC enterferans kaynağı arasında metalik bir bağ oluşturularak, metal yüzeyinden deşarj olacak akımların kontrollü şekilde kaynağına geri yönlendirilmesi sağlanmaktadır [34].

2.6.3. AC enterferans etkisi

Yüksek gerilim iletim hatları ve AC akım ile çalışan tren/tramvay hatları başta olmak üzere AC akım kaynakları ile metal yapıların arazi şartları gereği birbirlerine paralel veya kesişerek tesis edilmesi durumunda, AC akım kaynağı metal yapıyı etkileyerek yapının üzerinde ölçülen AC potansiyelin artmasına ve tedbir alınmaması durumunda özellikle izolasyonlu yapılarda, izolasyon hasarının bulunduğu kısımlarda metal korozyonunun oluşmasına sebebiyet verebilmektedir.

AC enerji kaynakları sebebiyle oluşan enterferans durumları genellikle kapasitif, kondüktif (iletken) ve indüktif (endükleyici) olarak tanımlanmakta olup indüktif enterferansın dominant karaktere sahip olması, metal yapılarda indüktif enterferansın görülmesine sebebiyet vermektedir. Endükleyici enterferans, metal yapı ile AC akım kaynağı arasında manyetik bir etkileşimin meydana gelmesi sonucu oluşmaktadır. Metal yapının akım kaynağı ile uzun süre paralel gitmesi veya kesişmesi durumlarında önemli ölçüdeki AC potansiyel normal işletmecilik koşullarında veya sistemde oluşan hatalar sonucunda metal yapıyı endükleyerek yapının potansiyelini değiştirmektedir. Bu endükleme sonucunda metal yapı üzerinde bulunan AC potansiyelin seviyesine göre, başta insan için tehlike oluşmakla birlikte (dokunma gerilimi) metal yapıda da AC korozyon süreci meydana gelebilmektedir [35].

Bununla birlikte, AC korozyon süreci metal yapının içerisinde bulunduğu ortamın özelliklerine göre farklılık göstermekte olup metal yapının, yüksek iyon içeriğine sahip kil toprak içerisinde bulunması durumunda oluşacak korozyonun şiddeti az, yüksek dirençli ve kumlu toprak zemin içerisinde bulunması durumunda ise metal korozyon seviyesi daha fazla olmaktadır. AC kaçak akımlar, karbon çelik malzemelere korozyon yönüyle zarar verebildiği gibi paslanmaz çelik gibi aktif-pasif özellik gösteren metallerin de pasif tabakasına zarar vererek korozyon dirençlerini kaybetmesine sebebiyet vermektedirler [36].

AC enterferans kaynaklı olarak metal yapı üzerinde korozyon sürecinin meydana gelip gelmeyeceği hususu, endüklenme sonucunda yapıya girişimde bulunan AC akımın seviyesi, metal yapı üzerinde kaplamanın varlığı ve yapının katodik olarak korunması durumları ile yakından ilgilidir. Bu konuyla alakalı yapılan araştırmalara göre endüstriyel olarak tavsiye

edilen en az -850 mV katodik koruma seviyelerinde dahi metal yapılar AC kaçak akımlardan kaynaklı olarak korozyona uğrayabilmektedirler [37]. AC etkileşimde meydana gelen artış, metal yapıyı korumak için gerekli olan katodik koruma seviyesinin de arttırılmasını gerektirmektedir [38].

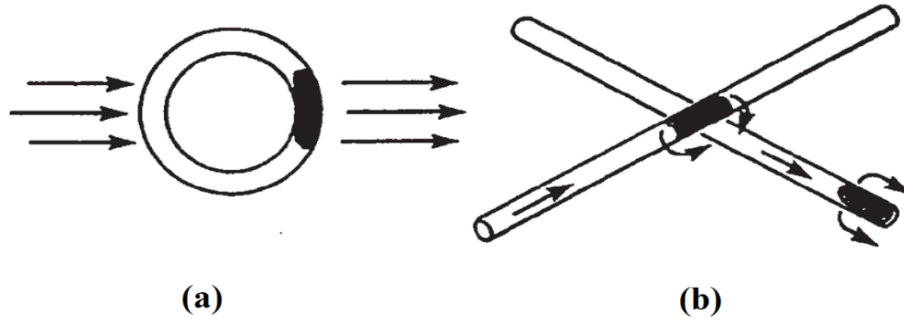
AC enterferans sebebiyle korozyona uğramış olan karbon çelik yapı analiz edildiğinde, metal yapıda korozyon sürecinin meydana geldiği ve AC akımların deşarj olduğu anodik bölgelerde, akımlar sebebiyle kalın ancak metal yüzeyine sıkı şekilde bağlı olmayan bir korozyon tabakasının oluştuğu gözlemlenmiştir. Ayrıca AC enterferans sebebiyle karbon çelikler üzerindeki anodik bölgelerde gözlemlenen korozyon, genellikle çukurcuk korozyonudur [39].

Metal yüzeyinde AC akımlar sebebiyle meydana gelen korozyon süreci, AC akımların deşarj olduğu alanın azalması ve dolayısıyla AC akım yoğunluğunun artmasına ile hızlanmaktadır. Bu sebeple özellikle izolasyon malzemesi ile kaplı metalik yapılardaki kaplama hasarlarının boyutu, AC korozyon şiddetinin belirlenmesinde önemli olmaktadır. Kaplama hasarı olan bölgelerden deşarj olan AC akım yoğunluğunun 30 A/m² ve daha fazla ölçülmesi durumunda, ölçüm alınan metal yapıda EN 18086 standardına göre AC korozyon riskinin olduğu değerlendirilmektedir [7]. Metal yapıda oluşan AC korozyon riskinin minimuma indirilebilmesi amacıyla, AC enterferansa maruz kalan metal parçasının diğer kısımlardan ayrılması ve metal yapıdaki AC akımların kontrollü şekilde bir topraklama sistemi tesis edilerek deşarj edilmesi yöntemleri uygulanmaktadır. Metal yapıdaki AC akımların topraklama sistemi üzerinden deşarj edilmesi genellikle 250 ohm.m ve daha yüksek dirençli ortamlarda kullanışlı olmaktadır [35].

2.6.4. Diğer metal yapılardan kaynaklanan enterferans etkisi

Metal yapıların, bulunduğu ortam içerisinde diğer metal yapılarla arasında meydana gelen potansiyel farklardan dolayı korozyona uğrama veya diğer metal yapıyı korozyona uğratma ihtimalleri mevcuttur. Metal yapılar arasındaki etkileşimler genellikle potansiyel farkların meydana getirdiği elektrik akımları sebebiyle meydana gelmekte olup oksijen konsantrasyonu veya pH gibi çevresel etkilerden bağımsızdır. Diğer metal yapılardan veya enterferans kaynaklarından çıkan kaçak akımlar, toprak içerisinde ilerleyerek zemin direncinin zayıf olduğu bir noktada metal yüzeyindeki kaplamasız alandan metale giriş yaparlar ve metalden çıkış yaptıkları yerde ise korozyona sebebiyet vererek metal yüzeyinde hasara yol açarlar. Birden çok metal yapının kesiştiği veya paralel gittiği yerlerde, yapıların

eski/yeni olması veya katodik korumaya sahip olup olmamaları durumlarına göre metal yapılar arasında elektron geçişi olur. Birbirleri ile kesişen metal yapılarda genellikle kesişim bölgesinde bir yapıdan diğerine elektron girişi olup bu elektronlar, kaplama hasarının olduğu veya zemin direncinin uygun olduğu bir noktadan metali terkederler (Şekil 2.10.) . İki metal yapı arasında bir elektron geçişi olmaması amacıyla, metal yapılar birbirlerine bağlanarak aralarındaki potansiyel farklar enaz seviyeye indirilir.

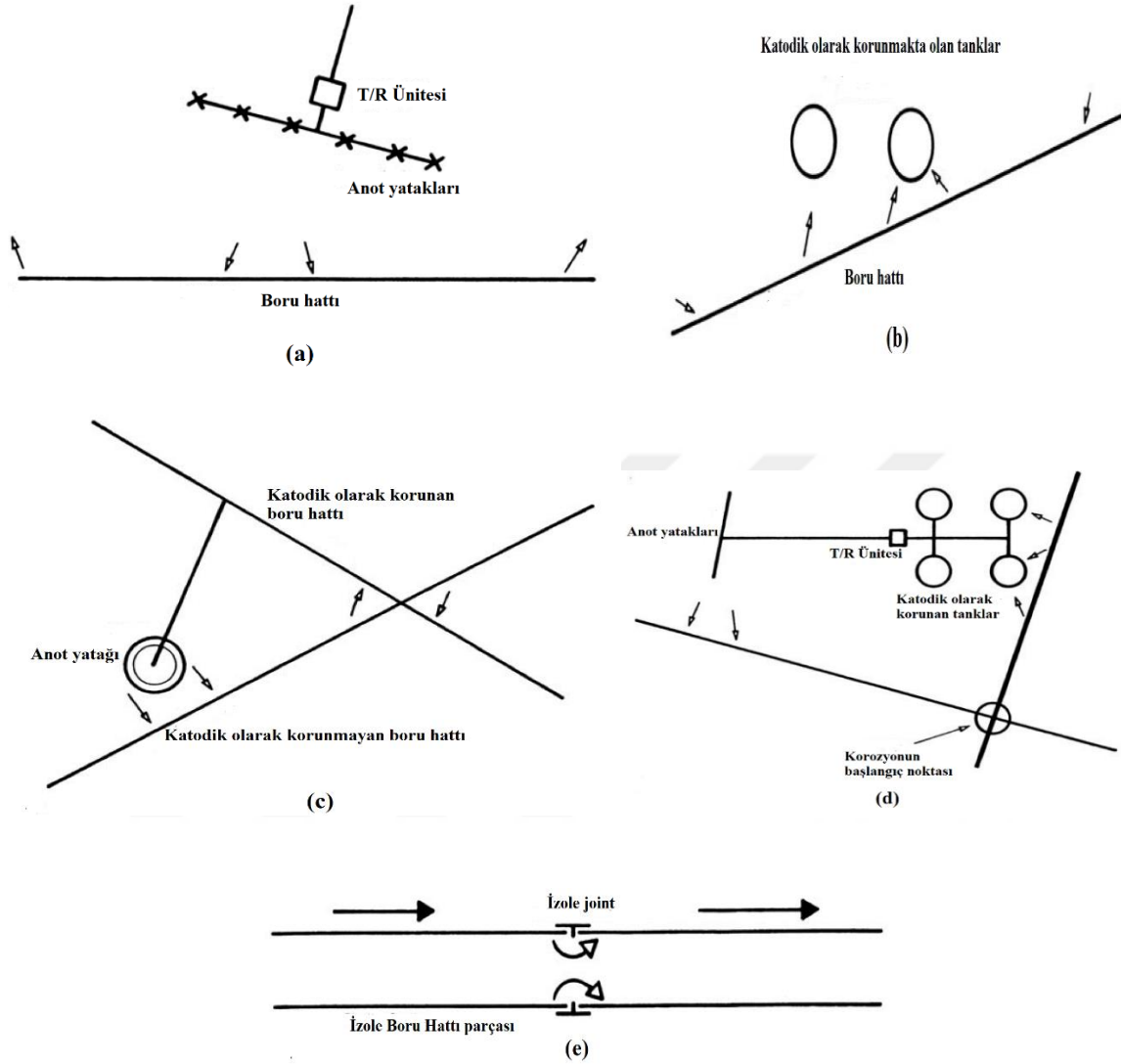


Şekil 2.10. Tek bir metal yapı üzerindeki enterferans etkisi (a), Çoklu metal yapılar arasındaki enterferans etkisi (b) [11]

Metal yapılar üzerinde gözlemlenen kaçak akımların bir diğer kaynağı ise katodik olarak korunmakta olan diğer metallerin anot yataklarıdır. Bir anot yatağının yakınından geçmekte olan boru hattı gibi metal yapıda anot yataklarından kaynaklı etkileşimler sıklıkla görülmektedir. Anot yataklarının korumakta olduğu metal yapıya bağlı olmayan diğer metal yapı, anot yataklarına yakın olduğu yerde anotlardan çıkan akımların etkisi altında kalmakta ve kapalı elektrik devresinin bir elemanı olmadığı için de korozyona uğramaktadır. Katodik olarak korunmakta olan metal yapının bulunduğu ortamdaki potansiyel negatif yönde değişmektedir. Bu bölgeye yakın bir noktadan geçmekte olan metale, uzak noktalardan girişim yapmış olan akımlar, metalin korunan yapıya yaklaştığı noktada ayrılarak, ayrıldığı noktada korozyona sebebiyet verir.

Boru hattı gibi uzun mesafeler boyunca devam eden metal yapılar, güzergâhları boyunca önce anot yataklarına yakın bölgelerden geçip daha sonrada başka bir metal yapıya yakın bir noktadan geçebilmektedir. Bu gibi durumlarda, boru hattının anot yataklarına yaklaştığı yerlerde anotlardan boru hattı üzerine akım giriş meydana gelmekte olup bu akımlar boru hattının diğer metal yapı ile yaklaştığı bölgelerde boru üzerinden çıkış yapmaktadır. Birden çok metalin veya enterferans kaynağının etkileşim halinde olduğu

durumlara karma enterferans ismi verilmekte olup farklı durumlardaki akımların giriş ve çıkış yönlerinin gösterimleri Şekil 2.11.' de verilmektedir.



Şekil 2.11. Anot yataklarından kaynaklanan enterferanslar (a), katottan kaynaklanan enterferans (b), karma enterferans (c, d), izole joint kaynaklı enterferans(e) [40].

2.7. Metalleri Korozyona Karşı Koruma Yöntemleri

Metallerin bulundukları ortam içerisinde farklı korozyon etmenlere maruz kalmaları sonucunda korozyon süreçleri hızlanmakta ve metalin kullanım/işletme ömürleri büyük oranda azalmaktadır. Petrol/doğalgaz gibi doğrudan enerji arzına hitap eden sektörler başta olmak üzere birçok alanda kullanılan metal malzemelerin korozyona uğrayarak işlevselliğini yitirmesi, hem büyük oranda iş gücü kayıplarına hem de maddi kayıplara sebebiyet vermektedir. Bu sebeple, metal korozyonuna karşı alınacak bir takım tedbirler ile korozyon hızının literatürde kabul edilen limitlerin altına çekilmesi, bahsedilen kayıpların önüne

geçilebilmesi adına önemlidir. Korozyon hızının düşürülmesi amacıyla metal malzemelere uygulanan temel yöntemler arasında koruyucu kaplama ile koruma, kullanım alanına göre malzeme seçimi ve katodik koruma yer almaktadır. Yaygın olarak kullanılmakta olan bu yöntemlerin hepsinin bir arada uygulanması korozyona karşı maksimum koruma sağlamaktadır.

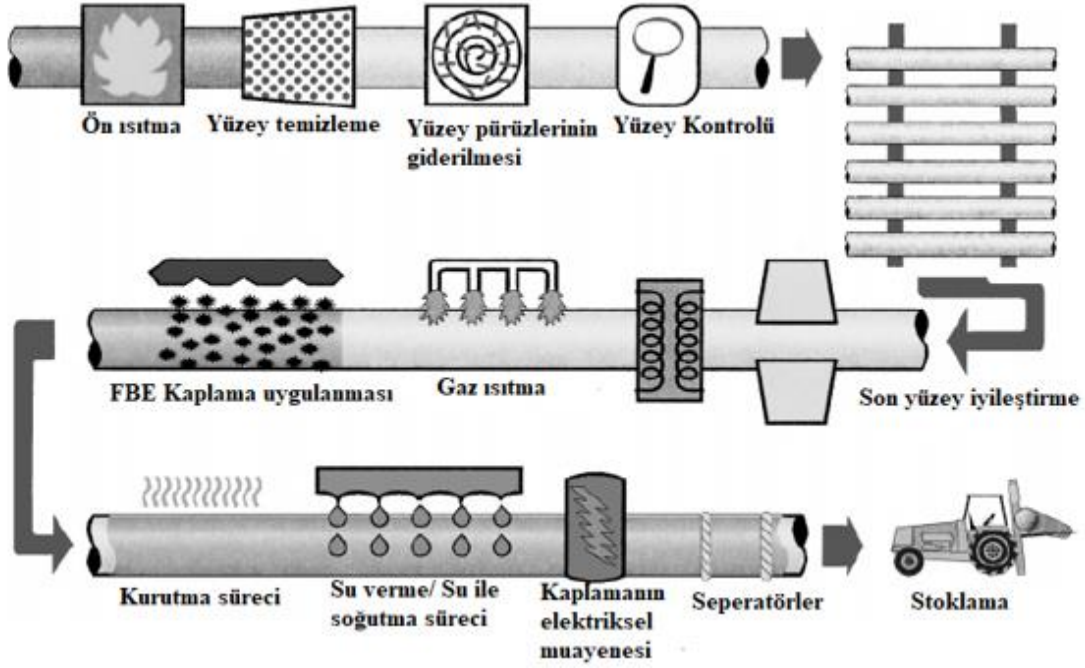
2.7.1.Koruyucu kaplama ile koruma

Kaplama ile koruma, metal malzemelerin korozyona karşı korunması sürecinde yaygın olarak kullanılmakta olan bir yöntemdir. Kaplamalar temel olarak organik kaplama, inorganik kaplama ve metalik kaplamalar olarak sınıflandırılmaktadırlar. Organik kaplamalar (boyalar, plastik veya lastik kaplamalar) Şekil 2.12.' de gösterildiği üzere boru hatları başta olmak üzere birçok metal türüne fabrikasyon olarak uygulanmaktadır. İnorganik kaplamalar (beton, seramik ve cam kaplamalar) ayrı ayrı uygulanabildiği gibi birkaç malzeme türü katmanlar halinde metal yüzeyine uygulanabilmektedir. Metal yüzeyine uygulanan kaplamalar, metalin korozyona karşı korunması, yüzeyin estetik görünüm kazanması, metalin darbe ve aşınma dayanımı kazanması ve elektriksel izolasyon vb. birçok özellik sunmaktadır. Metal yüzeyine uygulanan kaplama ve astar malzeme, alttaki metali 3 temel mekanizma ile korumaktadır. Bunlar; bariyer koruma, kimyasal engelleme ve galvanik korumadır.

Bariyer koruma, metal yüzeyinin içerisinde bulunduğu ortam ile arasındaki temasın kesilmesi ile sağlanmaktadır. Böylelikle metal yüzeyinde, dışarıdaki korozyon etmenleri veya farklı ortam koşulları sebebiyle anodik/katodik bölgeler oluşmayarak korozyon reaksiyonları başlamayacaktır.

Kimyasal engelleme, metal yüzeyine uygulanacak boya veya kaplamalara eklenecek korozyon engelleyici pigmentler ile anti-korozyon bir yüzey oluşturma yöntemidir. Korozyon engelleyici pigmentler, bağımsız olarak metal yüzeyine uygulanabilmekte ve bariyer görevi görecektir. Molekül katmanları oluşturarak metal ile ortam arasındaki bağı kesmektedirler.

Galvanik Koruma, metal yüzeyine Tablo 2.1.' de gösterilmekte olan EMF serisine göre korunacak metalden daha aktif başka bir metalin uygulanması ile gerçekleştirilmektedir. Bu durumda kaplama uygulanan metal, korozyon hücresinin katodu haline getirilerek koruma altına alınmaktadır. Karbon çelik üzerine ince bir film tabakası halinde uygulanan metalik çinko bu koruma türüne örnek olarak verilebilir [11].



Şekil 2.12. Metal yüzeyinin FBE (Fusion Bonded Epoxy) kaplama malzemesi ile fabrikasyon kaplanması [41].

Metal malzemeye uygulanacak kaplamanın seçiminde, kaplama uygulanması planlanan metal malzemenin hangi şartlar altında hizmet vereceği hususu önemlidir. Malzemenin kullanım yerine göre uygulanan kaplamalar temelde 3 kategoride değerlendirilir.

- Atmosferik kaplamalar genellikle güneş ışığına, ıslak/kuru şartlara, sıcaklık değişimlerine, fiziksel darbe ve atmosferik kirleticilere maruz kalan yapılar için tercih edilmektedir. Kaplama uygulanmadan önce metal yüzeyinin nemden arındırılması ve temiz bir yüzey elde edilmesi oldukça önemlidir. Kaplama altında kalan nemli bölgeler, metal malzemeyi kaplama altından korozyona uğratarak hasara sebep olmaktadır.
- Daldırma yöntemiyle uygulanan kaplamalar genellikle tank, tekne, tüp şeklinde imal edilmiş olan metal yapıların kaplanması için tercih edilmekte olup metalin kaplama malzemesi içerisine daldırılması ile bir iç kaplama katmanı elde edilmesi amacıyla uygulanmaktadır. Hava ile kurutma, fırınlama ve fusion bonded uygulamaları yapılabilen kaplama malzemeleri bu tür kaplama şekline uygundur.
- Yeraltı ve gömülü yapılar için uygulanan kaplamalar genellikle boru hattı kaplamaları olarak isimlendirilmektedir. Bu tür kaplamalar, korozif toprak ortamlarına, taş, kaya vb. kaplamalara zarar verebilecek malzemelere ve katodik koruma sisteminden kaynaklı kaplamanın kalkması durumlarına dayanabilecek

niteliktedir. Bu kaplamalar, metalin bulunduğu alanda elle veya uygun teçhizat ile metal üzerine bantlar şeklinde uygulanabildiği gibi fabrikasyon sarım şeklinde de uygulanabilmektedir [12].

2.7.2.Uygun malzeme seçimi ve tasarımı

Korozyona karşı dayanım için uygun malzeme seçimi ve tasarımı sürecinde, korozyon termodinamiğine göre korozyonun gerçekleşme ihtimali en fazla olan koşullar göz önüne alınmalıdır. Örneğin, asidik bir ortamda yüksek korozyon dayanımı gösteren altın, gümüş, platin gibi metallerin kullanılması uygun olmakla birlikte bu tür metallerin kullanım alanlarının kısıtlı olması ve yüksek maliyetleri sebebiyle asidik ortamlara karşı metallerin korozyon dayanımlarının arttırılması için genellikle yüzey filmlerinin uygulanması veya yüzeyde oksit tabakalarının oluşturulması tercih edilmektedir. Bununla birlikte, korozyona karşı dirençli ve mühendislik dayanımı yüksek malzemeler elde edilmesi amacıyla alaşımlandırmaya yaygın olarak gereksinim duyulmaktadır. Örneğin, pourbaix diyagramlarına göre nikel ve nikel alaşımlarının alkali ortamlarda korozyona karşı dirençli olduğu anlaşılmakta olup alüminyum ve alüminyum alaşımları ise nikelin aksine alkali ortamlarda düşük korozyon dayanımı göstermektedir [42]. Karbon çelik malzemelerin korozyon dayanımları incelendiğinde ise karbon çelik türleri, deniz suyu ve toprak içerisinde içeriklerindeki bakır element miktarının aynı olması durumunda aynı korozyon dayanımı göstermektedirler. Ancak çelik yüzeyinde yer alan çok sayıdaki homojen olmayan fazlar, lokal korozyon hücreleri yaratarak çeliğin korozyon direncini azaltmaktadır. Ayrıca çeliğin korozyonu sonrasında yüzeyde oluşan korozyon tabakasının gözenekli olması ve yüzeye iyi yapışmaması, korozyonun ilerlemesine sebep olmaktadır. Bunun aksine alüminyum ve diğer hafif metaller, yüzeylerinde oluşturdukları oksit tabakaları yardımıyla korozyona karşı daha dirençli bir hale gelmektedirler. Karbon çeliklerin korozyon dayanımının diğer birçok metal malzemeye kıyasla düşük olmasına rağmen tercih edilmesine sebep olarak; düşük maliyetli olması, iyi mekanik dayanıma sahip olması ve kolay üretilabilir olması gösterilebilir [1].

Kullanım yerine göre uygun malzeme seçiminde dikkate alınan en önemli husus; malzeme seçiminin korozyon hızına göre yapılmasıdır. Homojen korozyonun baskın olduğu bir ortamda, kabul edilebilir korozyon hızının altında korozyona uğrayan metal bir yapının kullanılması uygundur. Ancak korozyon hızı göz önüne alınırken malzemenin kolay üretilabilir olması, şekil verilebilir olması, ucuz olması vb. hususlar düşünülmelidir. Düşük maliyetli karbon çelik yapılar, kabul edilebilir korozyon hızının 0,25 mm/yıl ve daha az

olduğu toprak altı ortamlarda uzun yıllar hizmet verebilmektedir. Bununla birlikte, daha yüksek maliyetli metallere olan 300 serisi östenitik çelik, paslanmaz çelik, bakır ve nikel alaşımlı çelik yapılar için kabul edilebilir maksimum korozyon hızı 0,1 mm/yıl olarak belirlenmiş olup metaller, bu hızın altında korozyona uğrayacakları bir ortamda kullanım amaçları göz önüne alınarak uzun yıllar hizmet verebilmektedir. Malzeme seçiminde korozyon hızı her ne kadar bir kriter olarak değerlendirilse de bazı durumlarda aşım oranı yüksek ve daha maliyetli bir metalin uğrayacağı korozyon, karbon çelik malzemeye göre daha fazla olabilmektedir. Bu duruma en iyi örnek, tuzlu sulu ortamda östenitik paslanmaz çelik aşırı derecede çukurcuk korozyonuna maruz kalırken, karbon çelik bir malzeme 0,1 ile 0,2 mm/yıl aralığında homojen korozyona uğrayarak kabul edilebilir sınırlar içerisinde görevini sürdürmektedir.

Ayrıca malzeme seçiminde, malzemenin içerisinde taşınacağı veya saklanacağı akışkanın saflığı da önemli bir kriterdir. Metal, kabul edilebilir seviyeler içerisinde korozyona uğramasına rağmen, süreç sonucunda korozyon ürünlerinin ortaya çıkması ve bu ürünlerin akışkana karışması, ürün kalitesini etkileyebilmektedir. Oda koşullarında sülfürik asit depolamak için kullanılmakta olan karbon çelik tank, 0.25 mm/yıl ve daha az korozyona uğramasına rağmen ortaya çıkan korozyon ürünleri, asidin rengini değiştirerek ürün kalitesini olumsuz anlamda etkilemektedir. Bu gibi durumlarda kullanılacak karbon çeliğin üzerine aside dayanıklı ince bir film tabakası çekilerek demir iyonlarının ürüne karışması engellenebilmektedir [43].

2.7.3.Korozyon inhibitörleri

Korozyon inhibitörleri, metal korozyonunu yavaşlatmak amacıyla metalin içerisinde bulunduğu ortama ilave edilen kimyasal maddelerdir. İnhibitörlerin etkinliği, metalin ve metalin içerisinde bulunduğu ortamın türüne bağlı olarak değişmektedir. Korozyona karşı kullanılan inhibitörlerin anodik, katodik, organik ve gaz fazında türleri bulunmaktadır. Ayrıca kromatlar gibi bazı inhibitörler ise toksit olarak değerlendirilerek kullanımı kısıtlanmıştır [43].

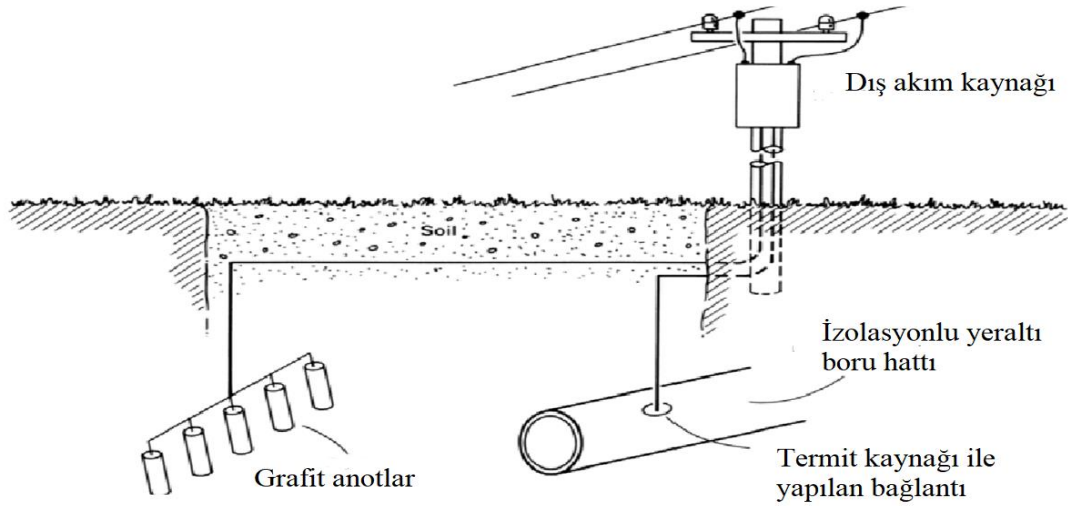
2.7.4.Katodik koruma

Katodik koruma, metal malzemeleri korozyona karşı korumak için uygulanan bir yöntemdir. Bu yöntem ile koruyucu akımlar yapıya verilerek korozyon hızının düşürülmesi amaçlanmaktadır.

Metal yapılar üzerinde meydana gelen potansiyel farklılıklar, yüzeyde anodik ve katodik bölgelerin oluşumuna sebebiyet vermektedir. Bu bölgelerin oluşumu ile korozyon sürecinin başlaması ve devamı için gerekli olan anodik ve katodik reaksiyonlar meydana gelmektedir. Metal yüzeyindeki korozyon sürecinin durdurulması, anodik ve katodik bölgeler arasındaki potansiyel farklılıkların eşitlenmesi veya enaz seviyeye indirilmesi ile mümkün olmaktadır. Metal yapıya, katodik koruma yönteminin uygulanması ile tüm metal yüzeyinde homojen bir potansiyel dağılımı sağlanmakta ve potansiyel farklılıklar giderilmektedir [44].

Metal yüzeyinde meydana gelen anodik ve katodik reaksiyonlardan, anodik reaksiyon sonucunda metal çözünme süreci meydana gelmekte ve elektron açığa çıkmaktadır. Anodik reaksiyon sonucunda oluşan elektronlar ise katodik reaksiyonlar sonucunda tüketilmektedir. Metal yüzeyine dış akım kaynağı ile elektron verilmesi, katodik reaksiyonlarda tüketilen elektronların, anodik reaksiyonlar yerine dışarıdan teminini sağlamaktadır. Bu durum, anodik bölgedeki reaksiyonların ve elektron üretiminin azalmasına sebebiyet vererek katodik bölgedeki reaksiyonların enaz seviyeye indirilmesini sağlar. Metal yüzeyinde, anodik ve katodik reaksiyonların enaz seviyeye indirilmesi veya durdurulması ile metal korozyonunun önüne geçilmektedir. Metal yapılara, dış akım kaynaklı ve kurban anotlu sistem olmak üzere 2 şekilde katodik koruma uygulanmaktadır.

Dış akım kaynağı ile yeraltı metal yapılara katodik koruma uygulanması, anot ve katodun aynı elektrolit ortam içerisine konularak korunacak yapının, akım kaynağının negatif kutbuna, anotların ise akım kaynağının pozitif kutbuna bağlanması ile yapılmaktadır. Katodik koruma uygulamasında, akım kaynağı olarak doğrultucu ünitesi (T/R ünitesi) kullanılmakta olup doğrultucunun alternatif akımı, doğru akıma çevrilmesi ile sisteme enerji sağlanmaktadır. Korunacak yapı ile anotların aynı ortam içerisinde yer alması, anotlardan metal yapı yüzeyine iyonik akım geçişinin sağlanması için gereklidir. Dış akım kaynaklı katodik koruma sisteminde anot malzemesi olarak düşük tükenme hızına sahip, verimliliği yüksek ve anodik reaksiyonlar sonucunda kolay şekilde oksijen ve klor gazı oluşturabilme kabiliyetine sahip grafit anotlar genellikle tercih edilmektedir (Şekil 2.13.).



Şekil 2.13. Dış akım kaynaklı katodik koruma sistemi [45].

Katodik koruma sisteminin kurulması sonucunda anodik reaksiyonlar, metal yüzeyi yerine anotlar üzerinde devam etmekte olup anotların bulundukları elektrolit ortama göre reaksiyon türü değişmektedir. Elektrolit ortamın az miktarda klor iyonu içermesi durumunda baskın anodik reaksiyon, suyun oksidasyon reaksiyonu olup reaksiyon sonucunda hidrojen iyonu ile elektron açığa çıkmaktadır (2.10).



Ayrıca klor iyonlarının bulunduğu ortamda, klor oksidasyon reaksiyonu (2.11) ile klor gazının anotların bulunduğu ortamdaki su ile reaksiyona girmesi sonucunda hidroklorik asit ve hipokloröz asit oluşumu reaksiyonları (2.12) meydana gelebilmektedir.



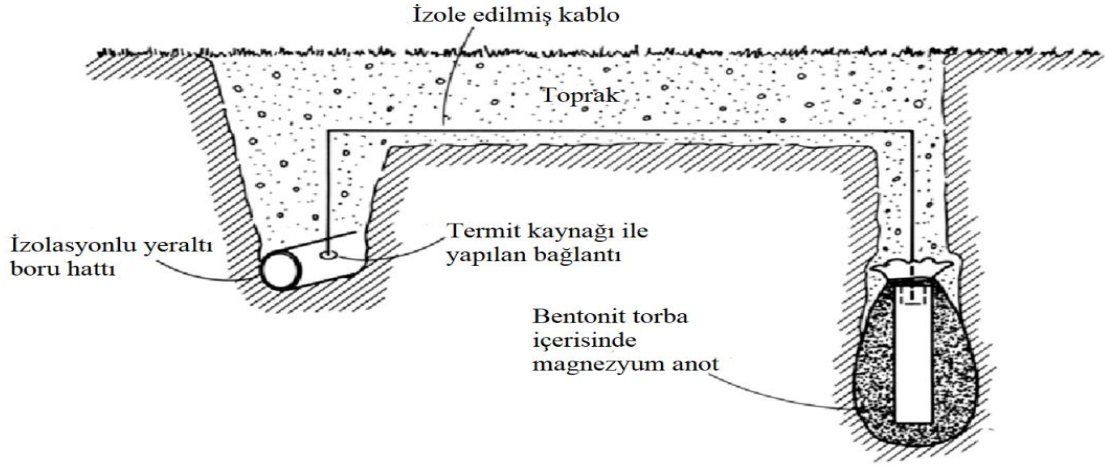
Dış akım kaynaklı katodik koruma sistemleri, yeraltı metalik yapıları işletme süreleri boyunca korozyona karşı korumak için tesis edilmekte olup katodik koruma sisteminin kullanım ömrü, bakım onarım maliyetleri, işletmecilik şartları vb. hususlar göz önüne alındığında birtakım avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır (Tablo 2.3.).

Tablo 2.3. Dış akım kaynaklı katodik koruma sisteminin avantaj ve dezavantajları [46]

Avantajlar	Dezavantajlar
Geniş aralıklı voltaj ve akım ayarlama imkânı bulunmakta olup tüm ayarlamalar akım kaynağının kontrol panelinden otomatik/manuel şekilde yapılmaktadır.	Yüksek akım değerlerinde, aşırı koruma sebebiyle metal yüzeyinde hidrojen kırılgenliğine veya kaplama hasarına sebebiyet vermektedir.
Sistemin bir noktadan tesis edilmesi büyük yüzey alanlarının korunması için yeterli olmaktadır.	Metal yapı üzerindeki kaçak akımlar ve diğer enterferans problemleri, katodik koruma sisteminin verimli şekilde çalışmasını etkilemektedir.
Üzerinde kaplaması bulunmayan veya zayıf kaplamalı metal yapıların katodik koruması etkili şekilde yapılabilir.	Dış akım kaynaklı katodik koruma sisteminin kurulması, galvanik anotlu sisteme göre daha pahalı olmakta ve sistem kurulumu için tecrübeli teknik personel gerekmektedir.
Dış akım kaynaklı katodik koruma sistemi çok yüksek dirençli (100.000 Ω .cm ve üzeri) zeminlerde kullanılabilir.	Dış akım kaynağına bağımlı olması sebebiyle alternatif enerji kaynaklarının bulunmaması durumunda elektrik kesintilerinde kullanım dışı kalmaktadır.
Sistem tamir ve bakım/onarımı genellikle yerinde yapılmaktadır.	Anotların tesis edileceği yer konusunda problemler yaşanabilmektedir.

Galvanik anotlu sistem, katodik olarak korunacak metal yapının anot görevi görecek başka bir metale bağlanması ile tesis edilmektedir (Şekil 2.14.). Kullanılan anotlar ile korunan yapı arasındaki potansiyel fark, katodik koruma için itici güç görevi görmektedir.

Bu sebeple sistemin kurulması amacıyla dış akım kaynağına gereksinim duyulmamaktadır. Korunacak metal yapının türüne göre tercih edilecek anotlar, EMF serisine göre belirlenmektedir. Korunacak metalin potansiyeli, anot olarak tercih edilen metale göre daha pozitif yani daha soy olmalıdır. Bu sebeple, çelik bir malzemenin galvanik sistem ile korunması amacıyla EMF serisine göre çinko, alüminyum ve magnezyum anot tercih edilmelidir.



Şekil 2.14. Galvanik anotlu katodik koruma sistemi [45].

Korunan yapı ile galvanik anot, arada iyonik akımın gerçekleşebilmesi amacıyla aynı elektrolit ortama yerleştirilmektedir. Ayrıca anodik reaksiyonlar (metalın çözünme reaksiyonu) sonucunda oluşan elektronların, metal yüzeyinde meydana gelen katodik reaksiyonlarda kullanılabilmesi amacıyla metal ile anot birbirine doğrudan bağlanarak elektron geçişi sağlanmaktadır. Anotlar, toprak ile arasındaki iletkenliğin artırılması amacıyla bentonit bir torba içersine konularak ortama yerleştirilmektedir.

Galvanik sistem genellikle tank tabanı korumaları, geçici boru hattı korumaları, gemilerin deniz su ile temas eden kısımlarının korumaları vb. amaçlarla kullanılmakta olup sahip olduğu avantaj ve dezavantajlar Tablo 2.4.' de gösterilmektedir.

Tablo 2.4. Galvanik anotlu katodik koruma sisteminin avantaj ve dezavantajları [46].

Avantajlar	Dezavantajlar
Dış akım kaynağına ihtiyaç duyulmadan tesis edilirler ve daha ucuzdurlar.	Sistemin akım çıkışı limitlidir.
Sistemin tesis edilmesi nispeten kolaydır ve tecrübeli teknik personele ihtiyaç duyulmamaktadır.	İzolasyonsuz veya zayıf izolasyonlu metal yapıların korunması için çok sayıda anoda gereksinim duyulmaktadır.
Aşırı katodik koruma riski bulunmamaktadır.	Yüksek zemin direncine sahip yerler için uygun değildir.
Enterferansın sistem üzerindeki etkisi limitlidir.	Sistemde meydana gelen sorunun belirlenmesi ve bakım/onarım faaliyetlerinde bulunmak dış akım kaynaklı sisteme göre daha zordur.
Akım genellikle homojen olarak dağılır.	-

2.7.5.Katodik koruma kriterleri

Çelik yapılara uygulanan katodik korumanın korozyon hızına yaptığı etki, metal et kalınlığının ölçülmesi veya görsel incelemelerle belirlenebilmektedir. Ancak metal yüzeyinde görsel inceleme veya et kalınlık ölçümü her zaman uygulanabilir olmamaktadır. Bu sebeple katodik koruma verimliliğinin belirlenmesi amacıyla farklı kriterler oluşturulmuştur. Çelik yapının bu kriterlerin en az birini karşılıyor olması, uygulanan katodik korumanın istenilen seviyelerde olduğunu ve dolayısıyla metal yüzeyindeki korozyon sürecini azalttığını ifade etmektedir [47].

Çelik yapılara uygulanan kriterlerden biri 100 mV kayma kriteri olup Çelik yapıya katodik koruma uygulanırken, akımın anlık olarak kesildiği durumda alınan potansiyel değeri ile korumanın tamamen kesilmesi sonucunda metal yüzeyindeki potansiyelin depolarizasyonu sonucunda alınan doğal potansiyel değeri arasındaki farkın en az 100 mV olması durumunda bu kriterin sağlandığı kabul edilmektedir. Bununla birlikte 100 mV kayma kriterinin test edilmesi amacıyla uygulanan bir diğer yöntem gere; katodik koruma uygulandıktan hemen sonra alınan değer ile birkaç saat sonra alınan potansiyel değer arasındaki farkın en az 100 mV olması gerekmektedir. Ancak kriterin test edilmesi sürecinde, metal depolarizasyonun bazı koşullarda uzun zaman alması, kaçak akım etkileşiminin olduğu bölgelerdeki metal yapılarda kriterin uygulanabilir olmaması, farklı metal çiftlerinden oluşan yapılarda her metal için ayrı şekilde kriter testinin yapılmasında yaşanabilecek güçlükler vb. kriterin test edilmesinde yaşanabilecek kısıtlamalardır [41].

Bir diğer kriter 300 mV kayma kriteri olup çelik yapının katodik koruma uygulanmadan önceki doğal potansiyel değerinden negatif yönde en az 300 mV' luk bir kayma sağlanması bu kriterin karşılanması için yeterli görülmektedir [40]. Bununla birlikte, Denny Jones [48]' a göre çeliğin doğal potansiyel değerine göre 200 mV ile 300 mV aralığındaki negatif kayma, yeterli katodik koruma sağlamaktadır. Bu kriter genellikle çıplak çelik yapıların dış akım kaynaklı katodik koruma seviyelerinin test edilmesi için uygulanmaktadır. 300 mV kayma kriterinin uygulanmasıyla ilgili yaşanabilecek kısıtlamalar, 100 mV kayma kriteri ile benzerlik göstermekte olup yüksek pH değerine sahip ortamlar ile stress korozyon çatlağı bulunan çelik yapılarda 300 mV kayma kriterinin uygulanması uygun görülmemektedir [41].

Katodik koruma uygulanmış olan elik yapının potansiyel değeri, koruma kesildikten sonra anlık olarak -850 mV ile -1200 mV (CSE) aralığında ölçülecek şekilde ayarlanmalıdır. Bu aralığı sağlayan katodik koruma potansiyel seviyesi BS ISO 15589:2015 standardına [8] göre yeterli olarak değerlendirilmektedir. Bu potansiyel aralığından daha negatif değerlerde katodik koruma uygulanması, aşırı korumaya sebebiyet vererek bazı metallerde hidrojen kırılğanlığı, kaplamada hasar vb. problemlere sebebiyet vermektedir. Daha düşük (pozitif) potansiyel değerlerde ise katodik koruma yetersiz olmaktadır.



3. TAGUCHI METODU İLE DENEY TASARIMI

Deney tasarımı, istatistik biliminin kurucusu sayılan Ronald Fisher tarafından 1920’lerde tarım alanında bir araştırma yapılırken bulunmuş ve geliştirilmiştir. Ronald Fisher ayrıca deney verilerinin analizinde klasik uygulama sayılan “Varyans Analizi” (ANOVA) yöntemini de geliştirmiştir. Bu yöntem, Amerika’da tarım sektöründe üretimin geliştirilmesi için uygulanmış ve Amerika’nın bu alanda öncü konumuna gelmesine önemli katkı sağlamıştır. Bu yöntem, Tarım alanında çeşitli gübreler ve gübre dozları ile iklim koşulları ve sulama düzeylerinin farklı ürünlere olan etkilerinin belirlenmesi amacıyla uygulanmıştır [49]. Bir deney tasarımı yapılırken temel süreç aşağıda belirtilen adımları kapsamalıdır [50].

- Problemin saptanması; deney çalışmasının yapılmasına sebep olan faktörlerin ve deneyin amacının belirlenmesi, deney sürecinin kurgulanması için önemlidir.
- Faktörlerin ve seviyelerinin seçimi; tasarımda kullanılacak faktörler, deney esnasında sabit tutulacak faktörler ve değişmesine izin verilebilecek faktörler belirlenmelidir. Bu faktörlere ait seviyeler ile faktör seviyelerinin kontrol altında tutulma şekli ve ölçümlerinin hangi şartlar altında yapılacağı önemlidir.
- Deney tasarımının seçilmesi; bu aşama, örnek büyüklüğünün ve tekrar sayılarının belirlenmesi gibi hususları içermektedir. Deney tasarımının seçiminde, faktör sayıları ve seviyeleri istatistiki bilgisayar programına giriş yapılarak en uygun yöntem belirlenebilmektedir.
- Deneyin gerçekleştirilmesi; herşeyin önceden planlandığı gibi yapıldığı süreç takip edilerek kontrol edilmelidir. Deney süresince uygulanacak yöntemler ve kullanılacak ekipmanlar daha önceden belirlenmeli ve bununla alakalı bir prosedür hazırlanmalıdır. Deney uygulamalarında, yapılacak hataların deneyin geçerliliğini ortadan kaldıracabileceği göz önüne alınarak deney öncesinde test deneyleri yapılarak sistemin çalıştığından emin olunmalıdır.
- Verilerin istatistiksel analizi; verilerin analizi için istatistikî metodların kullanılması, elde edilen verilerin güvenilirliğinin sağlanması için önemlidir. Bu sebeple, uygun istatistiksel analiz metotlarından birinin seçilerek (ANOVA, gözleme metodu, sıralama metodu vb.) verilerin işlenmesi ve deney koşullarında elde edilen sonuçların, istatistik analiz ile elde edilen sonuçlarla kıyaslanarak veri doğruluğunun teyidi önemlidir.

- Sonuç ve öneriler; Sonuç verilerinin analizinden sonra elde edilen sonuçlara dayanarak çıkarımlar yapılmalıdır. Yapılan çıkarımlar, yeni hipotezlerin üretilmesi için kullanılmalıdır.

Deney tasarım yöntemlerinden biri olan ve birçok alanda başarı ile uygulanan Taguchi yöntemi, 1960 yılından itibaren Japon mallarının kalitesini arttırmak amacıyla ile kullanılan, kalite stratejisinin bir parçası olarak ortaya çıkan ve Dr. Genichi Taguchi tarafından geliştirilen bir yöntemdir. Taguchi yöntemi, ürünlerin üretimin hemen ardından kontrol edilerek, standartlara uymayanların elenmesine dayanan eski kalite kontrol yönteminin yerine, kalitenin tasarım aşamasında değerlendirilmesi gerektiğini öne süren yeni bir yaklaşım geliştirmiştir. Taguchi yöntemi, ürün kalitesinin artmasına yönelik kullanılan deney tasarımı kavramında öncü olmuştur. Taguchi yönteminden önce uygulanan istatistiksel analiz yöntemlerinin çok sayıda deneysel çalışma gerektirmesi uygulanabilirliğinin kısıtlı olmasına sebebiyet vermiştir. Taguchi yöntemi ile istatistiksel analiz yöntemlerinin daha kolay uygulanabilir olması ve standartlaşması sağlanmıştır [51]. Taguchi, deneysel tasarımın önemini aşağıdaki başlıklarla özetlemiştir.

- Ortalama veya hedef değere göre farkın en aza indirilmesi,
- Farklı çevre koşullarında kullanılabilen sağlam ürünler üretilmesi,
- Parçalarda varyansa duyarlı olmayan ürünlerin üretilmesi,
- Ürünlerin uzun ömürlülüğünün test edilmesidir. İlk üç başlık, Taguchi'nin parametre tasarımı olarak ifade ettiği hususlardır.

Taguchi, deneysel tasarımda ürünün veya sürecin performansını ve karakteristiğini etkileyen faktörleri ise aşağıdaki başlıklar altında sınıflandırmıştır.

- Kontrol edilebilir faktörler (tasarım faktörleri), değerleri tasarım veya proses mühendisi tarafından kolaylıkla belirlenebilen faktörlerdir.
- Kontrol edilemeyen faktörler (gürültü faktörleri), genellikle üretim ortamıyla ilişkili varyans kaynaklarıdır.

Taguchi methodu ile deney tasarımı, deney çalışmalarını etkileyen kontrol edilemez faktörlere karşı kontrol edilebilir faktör seviyelerinin en uygun kombinasyonlarını belirleyerek kontrol edilemez faktörlerin etkisinin azaltılmasını amaçlamaktadır. Farklı faktörler ve faktör seviyelerine bağlı olarak çok fazla sayıda deney çalışmasının yapılması gerektiği durumlarda, Taguchi methodu ile deney tasarımı, enaz sayıda deney ile sonuca

ulaşmayı sağlamakta olup farklı faktörlerin farklı seviyeleri arasında en ideal kombinasyonun saptamak için oldukça faydalı bir yöntemdir [52].

Kaliteyi iyileştirmek için atılması gereken birinci adım, ürün karakteristiklerinin hedeflenen değerler etrafında dağılmasını sağlamaktır. Taguchi, bunu gerçekleştirmek için özel olarak hazırlanmış ve ortogonal diziler olarak adlandırılan tabloları kullanarak deneyler tasarlamıştır. Bu tabloların kullanımı deney tasarımını basit ve kolay anlaşılır hale getirmiştir.

İkinci olarak, ideal değerlere uygun ürünler üretebilmek için hedef değer etrafındaki sapmaları azaltmak gerekir. Bu amacı gerçekleştirmek için Taguchi, gürültü faktörleri kavramını ele almaktadır. Taguchi, gürültü Faktörlerini prosesin kalite değişkenini etkileyen ve kontrol altına alınmaları ekonomik olarak mümkün olmayan faktörler olarak tanımlamaktadır. Hava koşulları, tezgah yıpranmaları vb. faktörler, sapmaların (varyasyon) başlıca sebebi olan gürültü faktörleridir. Her bir parametrenin, her bir seviyesini içeren tüm kombinasyonlar için oldukça fazla deneysel çalışma yapılması gereken durumlarda, Taguchi yöntemi kullanılarak çok daha az sayıda deneysel çalışma ile sonuca ulaşmak mümkün olmaktadır. Taguchi deneysel tasarım metodunda geliştirilen yöntem üç temel kavramdan oluşur bunlar; sistem tasarımı, parametre tasarımı ve tolerans tasarımıdır [52]. Taguchi methodunun uygulanması sürecinde; deney çalışmasında kullanılacak faktörlerin ve seviyelerinin belirlenmesi, faktörlerin birbirleri ile olan etkileşimlerinin belirlenmesi, ortogonal dizi seçimi, deneylerin yapılması, faktörlerin deney sonuçları üzerindeki katkı seviyelerinin belirlenmesi gibi temel aşamalar takip edilmektedir.

3.1.Ortogonal Dizi Seçimi

Ortogonal dizi seçimi ile kontrol edilemeyen faktör sayısının en az seviyeye indirilmesi ve çalışmaların en az sayıdaki deney ile yapılması amaçlanmaktadır [53]. Ortogonal diziler, temel olarak hangi denemede, hangi faktörün hangi düzeyinin kullanılacağını belirlemek için kullanılırlar.

Ortogonal dizinlerde, parametre seviyeleri genellikle ikiden beşe kadar değişmekte olup en çok tercih edilen iki veya üç seviyeli olanlardır. Bazı durumlarda, iki farklı seviyenin bir arada kullanıldığı karışık seviyeli dizinler uygulanabilmektedir. En çok kullanılan 2 seviyeli ortogonal dizinler; L4, L8, L16, L32 ve en çok kullanılan 3 seviyeli ortogonal dizinler, L9 ve L18'dir [54]. Deney çalışmalarında kullanılacak faktör ve faktör seviye sayısına bağlı olarak Tablo 3.1.' de yer alan en uygun ortogonal dizi seçilerek çalışma matrisi

oluşturulur. Bu tabloya göre, bir araştırmacı 5 parametreye sahipse ve her bir parametrenin 4 seviyesi olduğu kabul edilirse en uygun dizin L16 olarak seçilir. Tablonun dışında kalan parametre ve seviyeler için deney sayısı çok fazla olacağından parametre ya da seviye sayılarının azaltılarak uygun dizine getirilmesi gerekmektedir.

Bununla birlikte, deney tasarımında uygun ortogonal dizi bulunurken serbestlik derecesi de dikkate alınmaktadır. Toplam serbestlik derecesi, deney sürecinde ele alınacak kontrol edilebilen faktörlerin serbestlik derecelerinin toplamı ile bulunur. Bir faktöre ait serbestlik derecesi ise faktör seviye sayısının bir eksiği olup toplam yapılacak deney sayısı, toplam serbestlik sayısına bir eklenerek bulunur [55].

Tablo 3.1. Ortogonal dizi seçim tablosu [56].

	SEVİYE SAYISI							
	2		3		4		5	
PARAMETRE SAYISI	P:2,S:2 P:3,S:2	L4	P:2,S:3 P:3,S:3 P:4,S:3	L9	P:2,S:4 P:3,S:4 P:4,S:4 P:5,S:4	L16	P:2,S:5 P:3,S:5 P:4,S:5 P:5,S:5 P:6,S:5	L25
	P:4,S:2 P:5,S:2 P:6,S:2 P:7,S:2	L8	P:5,S:3 P:6,S:3 P:7,S:3 P:8,S:3	L18	P:6,S:4 P:7,S:4 P:8,S:4 P:9,S:4 P:10,S:4	L32	P:7,S:5 P:8,S:5 P:9,S:5 P:10,S:5 P:11,S:5 P:12,S:5	L50
	P:8,S:2 P:9,S:2 P:10,S:2 P:11,S:2	L11	P:9,S:3 P:10,S:3 P:11,S:3 P:12,S:3 P:13,S:3	L27				
	P:12,S:2 P:13,S:2 P:14,S:2 P:15,S:2	L16	P:14,S:3 P:15,S:3 P:16,S:3 . . P:23,S:3	L36				
	P:17,S:2 P:18,S:2 . . . P:30,S:2 P:31,S:2	L32						

3.2. Sinyal Gürültü Oranları

Taguchi deney tasarımı metodunda, ölçülmek istenen sinyalin (S), gürültü faktörüne (N) oranı, kalite karakteristiklerinin değerlendirilmesinde kriter olarak kullanılmaktadır. Sinyal, sistemin verdiği ve ölçülmek istenen gerçek değeri, gürültü faktörü ise ölçülen değer içerisindeki istenmeyen faktörleri temsil etmektedir. Bu sebepten dolayı, gürültünün sistem üzerindeki etkisinin mümkün olduğunca az olması gerekmektedir. S/N oranı bulunurken, bazı kabuller yapılmaktadır. Bu kabuller; en küçük en iyi, hedef değer en iyi, en büyük en iyi olmak üzere üç tanedir. Buradaki amaç, S/N oranını büyütmek ve sinyali arttırırken, gürültüyü enaz seviyeye getirmektir [57]. Ayrıca, Taguchi tasarımlarda en büyük en iyi veya en küçük en iyi problem tiplerine bakılmaksızın, sinyal/gürültü grafiğinde, problemi iyileştirmek için gerekli olan faktör seviyelerini belirlemede, her zaman için en üst nokta alınmaktadır [58]. En küçük en iyi; kalite değişken değerinin küçük olmasının istendiği durumlarda bu yaklaşım uygulanır. Bu durumda, kalite değişkenine ait değer küçüldükçe tasarım iyileşmektedir. En küçük en iyi tür problemlerde, kalite değişkeni Y'nin hedef değeri sıfırdır. Bu aşamada sinyal/gürültü oranı, Eşitlik 3.1.'de gösterilen ifade ile belirlenmektedir.

$$S/N \text{ Oranı} = -10.\log(\Sigma Y^2 / n) \quad (3.1.)$$

Y: Gözlenen veriyi,

n: Gözlem sayısını tanımlamaktadır.

- En büyük en iyi; kalite değişken değerinin büyük olmasının istendiği durumlarda bu yaklaşım uygulanır. Bu durumda, kalite değişkenine ait değer büyüdüğüçe tasarım iyileşmektedir. En büyük en iyi tür problemlerde, Y'nin hedef değeri sonsuzdur ve sinyal/ gürültü oranı, Eşitlik 3.2.' de gösterilen ifade ile belirlenmektedir.

$$S/N \text{ Oranı} = -10.\log [\Sigma (1/Y^2) / n] \quad (3.2.)$$

Y: Gözlenen veriyi,

n: Gözlem sayısını tanımlamaktadır.

- Hedef değeri en iyi; kalite değeri değişken değeri önceden belirlenmiş nominal bir değere yakın olması istenir. Bu tür problemlerde Y için belli bir hedef değeri (ürün boyutları vb.) verilir ve sinyal/gürültü oranı Eşitlik 3.3.' de gösterilen ifade ile belirlenmektedir.

$$S/N \text{ Oranı} = 10 \cdot \log(Y^2 / S^2) \quad (3.3.)$$

S: Standart sapmayı,

Y: Gözlenen veriyi tanımlamaktadır.

Herhangi bir deneyin amacı, sonuç değeri için en yüksek S/N oranına erişmektir. Yüksek bir sinyal gürültü oranı, sinyalin gürültü faktörlerinin rastsal etkilerine karşı daha yüksek olduğunu gösterir. Ürün ya da süreç tasarımı, yüksek bir S/N oranına sahipse, optimum kaliteyi ve minimum değişimi vermektedir.

4. LİTERATÜR ÇALIŞMALARI

Tez çalışmaları kapsamında incelenen; metalin içerisinde bulunduğu zemindeki faktörlerin ve dış etkileşim kaynaklarının sebep olduğu korozyon süreçlerine ilişkin literatür de yer alan çalışmalar araştırılmıştır. Literatür çalışmalarında özellikle; pH, AC etkileşim, tuzluluk, nemlilik ve katodik koruma faktörlerinin metal korozyonuna ayrı şekilde veya en fazla iki faktörün bir arada yaptığı etkinin çalışıldığı görülmektedir. Konuyla ilgili yapılan literatür çalışmalarına aşağıda yer verilmektedir.

Topraktaki nemlilik içeriğinin, çelik korozyonuna etkisini inceleyen çalışmada, sabit nemlilik yüzdelere sahip 3 farklı ortamda 6 ay süreyle testler yapılarak metaldeki kütle kaybı ölçülmüş ve kütle kaybı ile nemlilik içeriği arasında yakın bir ilişki tespit edilmiştir [25]. Aynı çalışmada, nemlilik yüzdesinin yükselmesi sonucunda çelikteki metal kaybının hızlı bir şekilde arttığı ve nemlilik yüzdesinin, toprağın su tutma kapasitesinin %65' i seviyesine ulaştığı zaman korozyon hızında azalma başladığı tespit edilmiştir. Toprak içindeki boru hatlarının korozyonuna ilişkin Noor ve Al-Moubaraki [26] tarafından yapılan bir diğer çalışmada, X60 çeliğine ait korozyon hız değerlerinin çalışma yapılan her toprak zemin içerisinde, nemlilik yüzdesinin artması ile artış gösterdiği belirlenmiştir. Ancak zemin nemlilik yüzdesinin %10' dan daha fazla olduğu durumlarda, nemliliğin artışına bağlı olarak korozyon hızında düşüş meydana gelmiştir.

Zemin pH seviyesi metal yapılarda zeminden kaynaklı korozyonu etkileyen faktörlerden bir diğeridir. Ortam pH seviyesinin, metal yapılarda meydana gelen korozyon sürecine etkisini inceleyen bir çalışmada, 33 adet düşük karbonlu çelik kupon farklı toprak zeminler içerisine 20 yıl süre ile konularak, her toprak türü için hem pH hem de toplam asitlik seviyeleri belirli sürelerde ölçülmüştür. Ancak toplam asitlik seviyesi ve korozyon hızı arasında doğrudan bir bağlantı bulunamamıştır [4]. Amerikan su çalışmaları kurumu için yürütülen bir proje kapsamında, farklı pH koşulları altında saha şartlarında kullanılan dökme demir borularda meydana gelen korozyon hızları, boru hattının kalan ömrünün tahmin edilmesi metodunun geliştirilmesi kapsamında ölçülmüştür. Ancak boru üzerinde tespit edilen çukurcuk korozyonları ile toprak pH seviyesi arasında doğrudan bir bağlantı bulunamamıştır [5]. Toprak pH seviyesi ile boru hattı korozyon hızı arasında doğrudan bir bağlantı bulunamamasına karşın toprak pH seviyesi, Amerikan su çalışmaları kurumunun toprak korozivitesine etki eden parametreler listesinde yer alan kriterlerden biri olarak değerlendirilmektedir. Bununla birlikte pH seviyesi, tek başına çelik yapıların korozyon

hızına etki eden kuvvetli bir faktör olmayıp düşük pH seviyelerine sahip zeminlerde, diğer parametrelerle birlikte korozyonun oluşması için etkili olabilmektedir [2]. Tuha petrol üretim sahasında, AISI 1020 çeliğinden üretilen boru hatlarının iç ve dış korozyonuna; klor iyonu, sıcaklık ve pH parametrelerinde meydana gelen değişimlerin etkisi araştırılmıştır. Korozyona pH etkisiyle ilgili olarak; çelik malzemede meydana gelen korozyonun, düşen pH değeriyle arttığı ancak pH seviyesinin 5,5 ile 6,5 aralığına inmesi ile korozyon hızında belirgin bir değişiklik yaşanmadığı belirlenmiştir. Bununla birlikte; boru hattı malzemesi ile temas halinde olan ortamın pH seviyesi, 4,5 ile 5,5 aralığında iken çelik korozyonunda hızlı bir artış meydana gelmektedir. Ancak ortamın pH seviyesi, 4,5 değerine geldiğinde korozyon sürecinin devam etmesi ile birlikte çelik yüzeyinde bir korozyon tabakası oluşmaktadır. Bu tabaka, asidik ortam ile temas eden çelik yüzey alanı azaltmakta ve bu sebeple pH seviyesi 3,5 ile 4,5 aralığında iken korozyon hızında belirgin bir değişim meydana gelmemektedir [59]. Bir diğer literatür çalışmasında, yer altı çelik boru hatlarının geçtiği ortamdaki pH seviyesinin 5 ile 8 arasında değiştiği ve bu koşullarda toprağın korozivitesinin pH dışındaki diğer etmenler tarafından belirlendiği ifade edilmiştir. Aynı çalışmada, toprağın pH seviyesinin çelik üzerinde meydana gelen korozyon ürünlerinin çözünürlüğünü etkilediği ve bu sebeple genellikle bataklık veya çamurlu zeminlerde ölçülen düşük pH seviyelerinde, çelik yüzeyinde koruyucu pas tabakası oluşmayacağı için çelik korozyon hızının nispeten daha fazla olacağı belirtilmektedir [21]. Tibu ve De Oliveria [23]' ya göre toprak pH değerinin 4 ile 8.5 aralığında olduğu durumda, pH korozyon mekanizmasında baskın karakterde olmamaktadır. Bu iki görüş arasındaki farklılığa rağmen toprak içerisindeki metal yapıların korozyon süreçleriyle ilgili yapılan saha çalışmaları, çelik gibi metal yapıların asidik ortamlardaki korozyon riskinin, nötral ortamlara kıyasla çok daha yüksek olacağı konusunda ortak sonuca ulaşmaktadır. Toprak tuzluluk yüzdesinin çelik yapılarda meydana gelen korozyona etkisi bu çalışma kapsamında incelenmiş bir diğer konudur. Tuzluluk seviyesi ile çelik malzemede meydana gelen korozyon arasındaki ilişkiyi inceleyen çalışmada; AISI 1020 çelik boru hattının sulu ortam içerisinde maruz kaldığı klor iyon yüzdesinin, 8,4' den 10,4 seviyesine çıkarılması sonucunda korozyon hızında meydana gelen değişimin 0,02 mm/yıl seviyesinde olduğu tespit edilmiştir. Korozyon hızında meydana gelen kayda değer değişim ise yaklaşık 0,5 mm/yıl ile klor iyon yüzdesinin 14,4 seviyelerine çıkarılması sonucunda meydana gelmiştir. Klor iyonuna bağlı olarak korozyon hızındaki asıl değişim ise %14,4 seviyesi ve bunun üzerinde gerçekleşmiştir [59].

Çelik malzemelerde dış etkileşim sebebiyle meydana gelen korozyon süreçleri genellikle çelik boru hatlarının yüksek gerilim hatlarının yaygın olarak bulunduğu

bölgelerden geçmesi sonucu meydana gelmektedir. Korozyon, yüksek gerilim hatlarında yer alan AC akımların zemin altındaki boru hattına etkileşimde bulunması sonucu meydana gelir. AC etkileşim sebebiyle üzerinde kaplama olan boru hatlarında, çıplak boru hatlarına kıyasla daha fazla korozyon görülmektedir. Bu durum, AC akımın kaplama hasarlarında yoğunlaşarak yüksek akım yoğunluklarına sebebiyet vermesi sonucu oluşmaktadır. Toprak içerisine gömülü Q235 çelik boru hattı üzerinde farklı büyüklüklerdeki kaplama hasarlarında, AC etkileşim sonucu meydana gelen korozyon süreçlerini inceleyen çalışmada, boru hattı üzerindeki kaplama hasarlarını temsilen 20x20 mm ile 80x80 mm arasında değişen farklı ebatlarda korozyon kuponları laboratuvar ortamında kullanılmıştır. Kaplamalı çelik boru yüzeyinde farklı boyutlarda hasarların olması durumunda AC etkileşim, hasarlı bölgelerde DC akım çıkışına sebebiyet vererek küçük kaplama hasarından büyük hasara doğru bir DC akım geçişi meydana getirmiştir. Bu akım geçişi metalin çözünme reaksiyonlarını başlatarak nispeten küçük kaplama hasarına sahip olan bölgede korozyona sebebiyet vermektedir [60]. X70 çelik malzemeye laboratuvar ortamında, AC+DC akımların aynı anda ve ayrı ayrı uygulandığı durumlarda meydana gelen korozyon hızları, kütle kaybı metodu ile bulunmuştur. AC ve DC akım yoğunluklarının 30 A/m² olarak uygulandığı durumda meydana gelen korozyon hızı ile DC akım yoğunluğu sabit tutulup AC akım yoğunluk değerinin kademeli olarak 500 A/m² seviyesine getirildiğinde meydana gelen korozyon hızları; 0,467 mm/yıl ve 1,278 mm/yıl olarak belirlenmiştir. Korozyon hızında meydana gelen bu artış, sadece AC etkileşimin arttırılması ile çelik korozyon hızında meydana gelen değişimin bir göstergesidir [61]. Toprak ortam içerisinde pH ve AC seviyelerindeki değişime bağlı olarak çelik korozyonunda meydana gelen değişimler, farklı pH seviyelerine sahip test düzenekleri içerisinde AC akım yoğunluklarının değiştirilmesi ile Q235 karbon çelik korozyon kuponları ile ölçülmüştür. AC etkileşim altında olmayan ve pH değerinin 6,4 olduğu bir ortamda korozyon hızı 0,35 mm/yıl olarak ölçülmüş iken pH değeri 11 olduğunda ise korozyon hızının 0,26 mm/yıl seviyelerine düştüğü gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, pH değerinin 6,4 olduğu bir ortamda, AC akım yoğunluğunun 30 A/m² den 200 A/m² değerine getirilmesi ile; korozyon hızı 0,91 mm/yıl' dan 1,74 mm/yıl seviyelerine gelmektedir. Sonuç olarak çelik malzemelerde belirli bir pH değerine kadar pH artışına bağlı olarak korozyon hızında düşüş görülmekte ancak AC akım yoğunluğu seviyesinin arttırılması ile korozyon hızında artış meydana gelmektedir [62]. Xu et al. [63] tarafından gerçekleştirilen çalışmada; -0,85 V ve -1 V (SCE) seviyelerinde katodik koruma uygulanmış 16 Mn çelik korozyon kuponları aynı zamanda 0 – 600 A/m² arasındaki seviyelerde AC akım yoğunluklarına maruz bırakılmıştır. Kütle kaybı yöntemi ile ölçülen korozyon hızları

incelendiğinde; 100 A/m² AC akım yoğunluğu altında ve sadece -0,85 V (SCE) katodik koruma seviyesindeki korozyon hızının 0,1 mm/yıl' dan daha düşük seviyede gerçekleştiği görülmüştür. Koruma potansiyeli, -1 V (SCE) seviyesine çıkarıldığında ise test yapılan tüm AC akım yoğunluklarında, korozyon hızı 0,1 mm/yıl değerinden daha düşük seviyede ölçülmektedir. Ayrıca nötral pH seviyelerindeki toprak ortam içerisinde yer alan katodik korumalı X 65 karbon çelik malzemenin 20 A/m² AC etkileşime maruz kalması durumunda, koruma için -950 mV (CSE) seviyesi yeterli olmaktadır. Ancak AC akım yoğunluğunun 20 A/m² seviyesini aşması durumunda, yeni bir koruma seviyesinin belirlenmesi gerektiği anlaşılmaktadır [38]. Bununla birlikte yüksek gerilim hatları ile kesişen veya paralel giden gömülü boru hatlarında tespit edilen AC etkileşim ile ilgili yapılan saha çalışmasında; boru hattının özellikle yüksek gerilim hattıyla paralel gittiği veya kesiştiği kısımlarında, boru hattı üzerinden ölçülen AC akım yoğunluğunun 20 A/m² ve daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Aşırı AC akım yoğunluğunun tespit edildiği kaplama hasar bölgelerinde, çukurcuk korozyonunu hızlandığı ve korozyonun yavaşlatılması için AC akımların boru hattı üzerinden polarizasyon hücreleri ile kontrollü şekilde deşarj edilmesi gerektiği ifade edilmektedir. Boru hattı üzerindeki deşarj bölgelerinin belirlenmesi sürecinde, boru üzerine endüklenmiş olan AC voltajın referans elektrotlarla ölçülmesi ve boru hattının bölümlere ayrılarak çalışması gerekmektedir. Ayrıca boru hatlarının geçtiği güzergâhlarda ölçülen zemin dirençlerinin AC etkileşimi etkilediği, zemin direncine göre boru üzerinden ölçülen AC voltajın değiştiği ifade edilmektedir [64]. Literatür çalışmalarından anlaşıldığı üzere AC etkileşim çelik yapılarda korozyona sebebiyet vermekte ve AC akımların artması ile korozyon hızı da artmaktadır. AC etkileşimin sebebiyet verdiği korozyon süreci boru hatlarını korozyona karşı korumak için tesis edilmiş olan katodik koruma sistemi devredeyken bile devam etmektedir.

Çelik korozyonu sürecine etki eden dış faktörlerden olan ve korozyon hızını azaltmak için kullanılan katodik koruma sistemleri için en ideal koruma seviyesi; BS ISO 15589-1:2015 standardına göre -850 ile -1200 mV (CSE) anlık OFF potansiyel değer aralığı olarak tanımlanmaktadır [8]. Lilly et al. [65] tarafından gerçekleştirilen ve boru hatlarında katodik koruma sisteminin uygulanması ve korozyon hızına olan etkisini inceleyen çalışmaya göre; Nijerya' da ham petrol taşımacılığı için kullanılan ve ortalama %30 nemlilik seviyesindeki bir ortamda yer alan katodik korumasız bir boru hattındaki korozyon hızı, 0,1 mm/yıl olarak tespit edilmiştir. Petrol boru hattına katodik koruma sisteminin tesis edilmesinin ardından boru hattı üzerinde meydana gelen metal kayıpları, 18 aylık süre boyunca ultrasonik et kalınlığı ölçüm cihazları ile takip edilmiştir. Bu sürenin sonunda, tasarım aşamasında 4,26

mm olarak belirlenmiş olan boru hattı et kalınlığında, korozyon sebebiyle en fazla % 0,23 seviyesinde bir azalma tespit edilmiştir. Bu miktar, 5 yıllık süre zarfında et kalınlığında %1 seviyelerinde metal kaybını ifade etmekte olup katodik koruma uygulanmadan önceki korozyon hızına kıyasla korozyon hızında azalma meydana geldiğini göstermektedir. Katodik koruma uygulanan metal yapılarıdaki korozyon hızı, ortam sıcaklığına bağlı olarak değişim göstermektedir. Bu ilişkiyi inceleyen çalışmada; oda sıcaklığında sentetik su içerisindeki SPW 400 çelik kuponlara uygulanan katodik korumanın -773 mV (SCE) seviyesinden, -1350 mV (SCE) seviyesine getirilmesi durumunda korozyon hızının, 0,044 mm/yıl seviyesinden 0,003 mm/yıl seviyesine gerilediği tespit edilmiştir. Sıcaklığın artırılması durumunda ise uygulanan katodik koruma seviyelerinin yeterli olmayacağı ve artırılması gerektiği sonucuna ulaşılmıştır [66]. Bu sonuç sıcaklığın sabit olduğu bir deney ortamında katodik koruma seviyesinin artırılmasının, korozyon hızını azaltmaya etkisi olduğunu göstermektedir. Allahkaram et al. [67] tarafından gerçekleştirilen ve katodik korumalı boru hatlarında dış etkileşimlerden kaynaklanan korozyon sürecinin incelendiği çalışmada, toprak zemin içerisine gömülü boru hatlarının katodik koruma seviyelerinde meydana gelen değişimlerin, korozyon hızına etkisi korozyon kuponları ile ölçülmüştür. Ayrıca dış etkileşim altında bulunan katodik korumalı boru hattında meydana gelen korozyon hızı, aynı ortam şartlarında boru hattına bağlı olmaması sebebiyle korumasız durumda bulunan korozyon kuponunda meydana gelen korozyon hızı kıyaslanmıştır. Bu durumda, katodik korumalı boru hattında tren hatlarından kaynaklı meydana gelen değişimler sonucu ölçülen korozyon hızı 0.1067 mm/yıl olur iken katodik koruması yapılmamış korozyon kuponunda meydana gelen korozyon miktarı ise 0,066 mm/yıl olarak ölçülmüştür. Bu sonuç, boru hatlarında katodik koruma uygulanmasının korozyon hızını azaltıcı etkisinin bulunmasına karşın, dinamik dış etmenler sebebiyle katodik korumada meydana gelen salınımların, korumasız duruma göre korozyon hızını arttırdığını göstermektedir. Boru hatlarına katodik koruma uygulanmasının yanı sıra korumanın sabit şekilde sağlanması da korozyon hızını azaltmak için önemlidir.

Taguchi yöntemi ile deney tasarımı yapılması, korozyona etki eden farklı faktörlere maruz kalan çelik malzemelerin korozyon hızlarının araştırılmasında uygulanan bir yöntemdir. Bu yöntem ile, uygulanacak deney sayısı ve en ideal faktör kombinasyonları belirlenerek fazla sayıda deney yapılmasının önüne geçilmektedir. Ayrıca Taguchi yönteminde kullanılan sinyal/gürültü oranı, deney sonucuna en fazla etki eden faktör seviyelerinin belirlenmesi için kullanılmaktadır. Literatürde, çelik malzemelerde korozyon

süreçlerine ilişkin Taguchi yöntemi ile deney tasarım uygulama örnekleri sınırlı sayıda yer almakta olup yapılan çalışmalara aşağıda yer verilmektedir.

NaCl yüzdesinin, sıcaklığın ve ortam karıştırma hızının 3 farklı seviyede çelik malzemenin korozyon hızına yaptığı etkiyi deney ortamında inceleyen çalışmada, farklı parametre seviyelerine bağlı olarak korozyon hızlarının belirlenmesi için gerçekleştirilen deneyler, Taguchi deney tasarımına göre seçilmiştir. Deney tasarımında 3 farklı parametre için L9 ortogonal tablosu kullanılmıştır. Ayrıca deney sonuçları, Minitab programı ile analiz edilmiş olup Signal/gürültü oranının belirlenmesinde en küçük en iyi yaklaşımı kullanılmıştır. Deney sonucuna göre korozyon hızına etki eden en belirgin faktörün, NaCl konsantrasyonu olduğu anlaşılmıştır. Ayrıca çalışma sonucunda, Taguchi yönteminin, deney dizaynı için sistematik ve etkili bir metodoloji olduğu ayrıca çelik malzemeyi korozyona karşı korumak için gerekli faktör seviyelerinin daha az deney çalışmasıyla ideal şekilde bulunabildiği sonucuna ulaşılmıştır [68]. Birçok alanda yaygın olarak kullanılmakta olan karbon çelik malzemelere uygulanan kaynak işlemi, metalde korozyona sebebiyet verebilmektedir. Fatchurrohman et al. [69] tarafından yapılan çalışmada, kaynak parametrelerinden uygulama voltajı, kaynak yöntemi ve kaynak tekrar sayısının metal korozyonuna etkisi araştırılmıştır. Bu kapsamda, Taguchi deney tasarımı ile oluşturulan L9 ortogonal dizinine göre farklı faktör seviyeleri altındaki korozyon hızları ölçülmüş ve korozyon hızına en fazla etki eden faktör belirlenmiştir. Kaynak süresince korozyon hızının en düşük çıkması için gerekli olan parametre seviyeleri, sinyal/gürültü oranının en küçük en iyi olarak seçilmesi ile belirlenmiştir. Kaynak sonucunda en az korozyona uğrayan çelik numuneye uygulanan faktör seviyeleri; 9 V voltaj ve 3 tekrarlı kaynak uygulaması olarak belirlenmiştir. Ayrıca sinyal/gürültü tablosuna göre kaynak kalitesini en çok etkileyen faktörün voltaj seviyesi olduğu belirtilmiştir. Çelik malzemelerde korozyonun bir başka çeşidi olan izolasyon altı korozyon sürecine etki eden parametreler, Taguchi deney tasarımı yöntemi ile incelenmiştir. Uygulama sıcaklığının ve enerjinin korunması gereken işlemlerde çeliğin üzerinde izolasyon malzemeleri kullanılabilir. İzolasyon altındaki çelik yüzeyinde koroziyon faktörleri sebebiyle özellikle çukurcuk korozyonu oluşmakta ve bu durum, geç fark edilmesi halinde işletmecilik sürecinde problemlere sebebiyet vermektedir. İzolasyon altı korozyona etki eden 3 faktörün 3 farklı seviyesi için deney tasarımı ve ortogonal dizin oluşturulmuştur. Deney sonuçlarına ve sinyal/gürültü tablosuna göre izolasyon altı korozyonuna en çok etki eden faktörün izolasyon türü olduğu ardından servis sıcaklığı geldiği belirtilmektedir [70].

Bununla birlikte çelik malzemelerde, içerisinde bulundukları ortamın ve dış etkileşim kaynaklarının etkisiyle meydana gelen korozyon süreçlerinin tahminine yönelik çeşitli modelleme çalışmaları yapılmıştır. Bu çalışmalar kapsamında korozyona etki eden faktörler ve faktör seviyelerinin korozyon hızı ile olan bağıntıları, doğrusal ve doğrusal olmayan regresyon analizleri ile incelenmiş ve farklı faktörler ile korozyon hızı arasındaki bağıntıyı belirleyen denklemler oluşturulmuştur. Nwigbo et al. [71] tarafından gerçekleştirilen çalışmada, farklı pH seviyelerinde zamana bağlı olarak karbon çelik malzemede meydana gelen korozyon süreci doğrusal olmayan korozyon hız modellemesi ile araştırılmıştır. HCl solisyonu içerisinde 3 ile 6 arasında değişen pH aralıklarında zamana bağlı olarak ölçülen korozyon hızının, doğrusal olmayan model ile oluşturulan denklemin hesapladığı korozyon hızına yakın sonuçlar verdiği ifade edilmekte olup iki korozyon hızı arasındaki farkın en fazla %7 olduğu belirtilmektedir. Bir başka çalışmada; petrol ve doğalgaz boru hatlarında meydana gelen korozyon hızları, doğrusal ve doğrusal olmayan (kuadratik) model ile tahmin edilmiştir. Korozyon hız tahmininde, ortam pH seviyesi, sıcaklık, çalışma basıncı ve CO₂ basıncı faktörlerini içeren denklemler kullanılmıştır. Polynomial model olarak isimlendirilen doğrusal ve doğrusal olmayan modeller ile tahmin edilen korozyon hızları, yapay sinir ağı olarak isimlendirilen bir başka modelleme sisteminden elde edilen sonuçlar ile kıyaslanmıştır. Doğrusal olmayan model denklemleri, korozyon hızını etkileyen faktörlerin ikili etkileri de içerecek şekilde tasarlanmış olup elde edilen sonuçların, korozyon hız sonuçları ile örtüştüğü ifade edilmektedir. Doğrusal model ile bulunan korozyon hız sonuçları, doğrusal olmayan model ile kıyaslanmış olup doğrusal modelin çizildiği grafikte dağılım oranının 0,50 ve korelasyon oranının 0,70 seviyelerinde olmasının bu modelin tahminlerindeki hata payını arttırdığı belirtilmektedir. Bu oranlar, doğrusal olmayan model için sırasıyla 0,92 ve 0,96 seviyelerinde olup bu istatistiksel göstergeler, doğrusal olmayan model ile yapılacak tahminlerin, gerçek korozyon hız verilerine yakın sonuçlar vereceğini kanıtlamaktadır [72]. Khaled et al. [73] tarafından yapılan çalışmada; toprak nemlilik yüzdesi ve zamana bağlı olarak karbon çelik malzemede meydana gelen korozyon hızının matematik model ile tahmini yapılmıştır. Saha şartlarında 3 farklı bölgede kütle kaybı yöntemi ile korozyon hızları hesaplanmış ve matematik model ile bulunan sonuçlarla kıyaslanmıştır. Saha çalışmaları sonucunda nemlilik artışı ile birlikte korozyon hızında artış meydana geldiği anlaşılmıştır. Ayrıca nemlilik ve zamana bağlı olarak korozyon hızındaki değişim doğrusal regresyon analizi ile incelenmiş olup doğrusal modelin oluşturulduğu grafikteki R² dağılım oranı 0,94 ile 0,99 arasında değişmektedir. Bu dağılım aralığı, doğrusal regresyon analizi sonucunda oluşturulan matematik modelin, sahadan alınan sonuçlara yakın

değerler verebileceğini göstermektedir. Çalışma sonucunda farklı bölgelerde korozyon kuponları ile ölçülen korozyon hız değerleri ve doğrusal regresyon denklemleri ile hesaplanan korozyon hızları arasında en fazla %20 seviyesinde bir farkın meydana geldiği görülmektedir. Düşük karbonlu çelik malzemenin atmosferik şartlardaki korozyon davranışının incelendiği ve korozyon hız tahmininin yapıldığı çalışma kapsamında; 6 farklı korozyon hızı tahmin modeli oluşturularak; sıcaklık, nemlilik, güneş ışığı, rüzgâr hızı, klor iyon birikimi, SO₂ birikimi ve zaman faktörlerine bağlı olarak çelik korozyon hızı hesaplanmıştır. Modeller arasında yer alan ve korozyonu etkileyen faktörler ile korozyon hızı arasında doğrusal bir model oluşturan MLR yöntemi, doğrusal modelde faktörlerin bağımlı olduğu durumu inceleyen RR yöntemi ve doğrusal olmayan model oluşturan SVR yöntemlerinin uygulama sonuçları incelendiğinde, doğrusal modelin oluşturulduğu grafikte R² oranlarının deney sonucu ve uyarlanan sonuçlar için 0,33 ile 0,566 aralığında olduğu görülmektedir. Ayrıca doğrusal regresyon modelinde, 0 ile 0,2 mm/yıl arasında değişen korozyon hız skalası içerisinde deney sonuçları ile model tarafından uyarlanan korozyon hızları arasındaki yanılma payının en fazla 0,019 mm/yıl seviyelerinde gerçekleştiği tespit edilmiştir. Doğrusal olmayan modelde ise R² dağılım oranlarının 0,48 ile 0,90 olduğu belirlenmiş olup oluşturulan model ile deney sonuçları arasında tespit edilen farkın 0 ile 0,2 mm/yıl skala aralığında en fazla 0,014 mm/yıl olarak gerçekleştiği görülmektedir [74].

5. DENEY ÇALIŞMALARI

Deney çalışmalarına başlanılmadan önce çalışma kapsamında kullanılacak toprak ortamın seçimine ve teminine ilişkin araştırmalar yapılmıştır. Deneyin yapılacağı ortamın hazırlanması akabinde deney ortamında kullanılan boruya katodik koruma uygulanabilmesi için katodik koruma devresi oluşturulmuştur. AC trafonun kurulumu yapılarak boruya farklı kademelerde AC potansiyel uygulanmış ve boruya bağlı kuponlar üzerinden korozyon hız tespitleri yapılmıştır. Toprak ortamının tuzluluk yüzdesi, nemlilik yüzdesi ve zemin pH seviyeleri farklı oranlarda değiştirilmiş ve uygulanan AC ve katodik koruma ile birlikte çelik korozyon hızına olan etkileri araştırılmıştır.

5.1. Deney Ortamının Hazırlanması

Korozyon hız ölçümünün deneyler süresince birçok defa yapılacağı ve her ölçüm sonucunda deney ortamındaki toprağın değiştirilerek yeni toprağın konulacağı göz önüne alındığında çalışmalar sırasında kullanılacak toprak, deney çalışmalarının yürütüldüğü Ankara bölgesine yakın bir boru hattı güzergâhı üzerinden alınmıştır. Boru hatlarının geçtiği, Ankara bölgesine yakın farklı güzergâhlardan toprak örnekleri alınarak analiz ettirilmiş olup tuzluluk ve nemlilik yüzdelerinin en düşük olduğu toprak ortam çalışmalar süresince kullanılmıştır. Alınan topraklar, paketlenerek deney yapılacak ortama kullanılmak üzere getirilmiştir (Şekil 5.1.). Alınan toprağın içeriğinde yer alan ve korozyona etki etmesi beklenen başlıca faktörlere ait seviyelerin tespiti amacıyla yaptırılan analizin sonuçları Tablo 5.1.'de gösterilmektedir. Deney çalışmaları sırasında, toprak ortam kaynaklı korozyona etki eden faktörlerden; pH, nem ve tuzluluk yüzdelerinin metal korozyon hızına yaptıkları etki ile dış etkileşim kaynaklı AC ve DC voltajın korozyon hızına olan etkileri araştırılmıştır. Bununla birlikte; deney çalışmalarında kullanılmayan magnezyum, kalsiyum, elektriksel iletkenlik, klor ve sülfat parametreleri de toprak içerisinde metal korozyonunu etkileyebilecek diğer faktörlerin anlaşılması amacıyla analiz ettirilmiştir. Deney çalışmaları, korozyona etki eden faktörlerin farklı seviyeleri için sürdürülürken değiştirilen faktörlerin dışında kalan ve incelenmeyen diğer faktörlerin sabit olarak kaldığı varsayılmaktadır. Korozyona etki eden faktörlerin, çelik kuponların korozyona hızlarına yaptıkları etkilerin araştırılması sürecinde deney ortamı içerisinde kullanılan başlıca malzeme ve ekipmanlar Tablo 5.2.'de gösterilmektedir.



Şekil 5.1. Paketlenmiş toprak ortam (a), çalışma öncesi hazırlanmış toprak ortam

Tablo 5.1. Çalışma yapılan toprağa ait analiz sonuçları.

Analiz edilen parametreler	Analiz sonucu	Analiz metodu
Nem (%)	0,5	AOAC 2000
pH seviyesi	7,92	Mt 5.4.2.T 55 Saturasyon çamurunda pH analiz Metodu
(Elektriksel iletkenlik ds/m)	0,16	TS ISO 11265
Tuz (%)	0,0036	TS 8334
Kalsiyum (ppm)	4,04	Ekstrakte edilebilir
Magnezyum (ppm)	1,88	Ekstrakte edilebilir
Sülfat (SO ₄ -me/l)	1,98	Gravimetrik
Klor (me/l)	4,11	Titrimetrik

Tablo 5.2. Deney süresince kullanılan başlıca ekipmanlar

Kullanılan Ekipman/Malzeme adı	Ekipman Sayısı	Kullanım amacı/özellik
X 65 çelik boru	1	Boru hatlarını simüle edebilmek amacıyla, gerçek boru hatlarıyla aynı malzeme türünde, yaklaşık 1 metre, 4" çapında, polietilen kaplı çelik boru kullanılarak çalışmalar yapılmıştır.
Trafo redresör ünitesi (50 V / 20 Amper DC)	1	Boru hattına farklı kademelerde katodik koruma uygulanabilmesi amacıyla kullanılmıştır.
AC akım trafosu (Max 50 V AC)	1	Korozyon hızı – AC potansiyel arasındaki bağıntının oluşturulabilmesi için çeşitli seviyelerde AC potansiyel uygulayabilmek amacıyla kullanılmıştır.
Cam havuz	1	Deney ortamı, yaklaşık 2,5 metrekairelik bir cam havuz içerisinde oluşturulmuştur.
Karma metal oksit titanyum tüp anot	1	Boruya katodik koruma uygulanabilmesi için oluşturulan devrenin tamamlayıcı elemanı olarak kullanılmıştır.
pH ve nem ölçer	1	pH seviyesi ve nemlilik ile korozyon hızı arasındaki bağıntının oluşturulabilmesi için ortamın pH ve nem seviyeleri bu cihaz ile ölçülerek kayıt altına alınmıştır.
Voltmetre/ multimetre cihazı	1	Boruya uygulanan AC potansiyel ve katodik koruma potansiyelleri ile AC ve DC akımların ölçülebilmesi için kullanılmıştır.
(Cu/CuSO ₄)seyyar ve sabit tip referans elektrotlar	2	Boruya uygulanan AC ve DC potansiyel ve akım seviyelerinin ölçülmesi amacıyla kullanılmıştır.
Korozyon kuponları	150	Boru üzerindeki, korozyon hızını ölçmek amacıyla boru Hattı ile aynı malzemedan 40 x 40 x 7 mm ebatlarında hazırlanmış olan çelik kuponlardır.
Toprak direnç ölçüm megeri	1	Deney sürecinde pH seviyesi ve Nemliliği değiştirilen toprak ortamın direnç değişimini Ohm. cm mertebesinde ölçmek için kullanılmıştır.

Deney çalışmalarının gerçekleştirildiği ve özellikleri Tablo 5.1’ de gösterilen toprak ortamda hesaplanan korozyon hız sonuçlarının karşılaştırılması amacıyla Türkiye’nin farklı bölgelerinden toprak ortamlar paketlenerek deneylerin gerçekleştirildiği yere getirilmiştir. Farklı boru hattı güzergâhlarından getirilen toprak ortamlar, boru hattının zemin içerisine gömülü olarak bulunduğu yaklaşık 1 metrelik derinlikten alınmıştır. Böylelikle boru hattının içerisinde bulunduğu ortam ile birebir aynı özelliklere sahip toprak örnekleri ile çalışma yapılması imkânı olmuştur.

Türkiye’ de doğal gaz taşımacılığında özellikleri Tablo 5.3.’ de gösterilmekte olan X 65 çelik boru hatları kullanılmakta olup deneyde kullanılan korozyon kuponları için boru hatlarıyla aynı malzeme türü seçilmiştir. Çalışmalarda kullanılan korozyon kuponları, 4x4x0,7 cm boyutlarında kesilerek hazırlanmış olup referans toprak içerisinde yaklaşık 30 cm derinliğe yerleştirilmiş olan polietilen kaplı 4 inç çapında, 1 metre uzunluğundaki çelik boruya 2,5 mm² kesit alanına sahip kablo ile bağlanmıştır. Bağlantı yapılan kablonun ucuna timsah uç (kıskaç) monte edilerek korozyon kuponunu kavraması sağlanmıştır. Ayrıca, korozyon kuponuna temas eden bağlantı ucu, korozyon sürecine dâhil olmaması için boyanmıştır.

Tablo 5.3. X65 çelik malzeme kimyasal kompozisyonu

C	Si	Mn	P	S	V	Nb	Ti
0,16	0,45	1,65	0,020	0,010	0,09	0,05	0,06

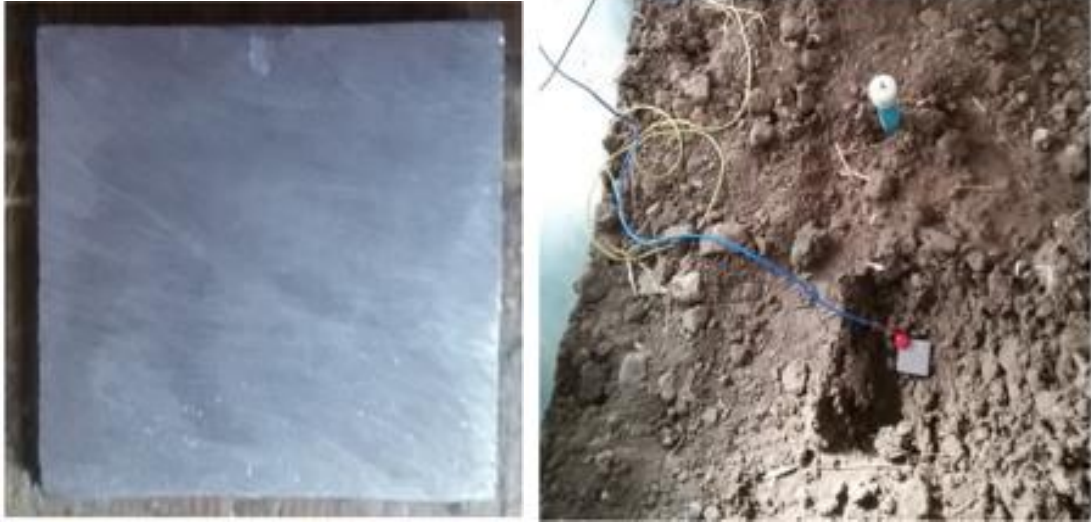
Çalışmada kullanılan boru, daha önce saha ortamında kullanılmamış olup üzerinde kaplama hasarı bulunmamaktadır. Ayrıca boru kaplamasının kontrolü, deney çalışmalarına başlanmadan önce yapılmış olup kaplama hasarının olmadığı tespit edilmiştir. Deney çalışmalarına başlanılmadan önce planlama aşamasında, boru hattı korozyonuna etki eden ve çalışmalarda kullanılan 5 faktöre ilaveten 6. faktör olarak boru hattı basıncının, çelik korozyon hız değişimine olan etkisinin incelenmesi düşünülmüştür. Bu kapsamda Şekil 5.2’ de görüldüğü üzere boru içindeki gaz basıncının ölçülmesi amacıyla borunun bir ucuna manometre bağlantısı yapılmış olup borunun diğer ucu kapatılmıştır. Borunun kapatılan ucunda açık çelik yüzey alanı kalmaması amacıyla, boru hatlarında kaplama malzemesi olarak kullanılan polietilen temin edilerek pürmüz yardımıyla borunun üzerine kaplanmıştır. Böylelikle boru yüzeyindeki tüm alanların aynı malzeme türü ile boşluk kalmayacak şekilde kaplı olması sağlanmıştır. Boruya manometre bağlantısı yapılması sonrasında, farklı basınç seviyelerindeki gaz ile basınçlandırılmış borunun, deney ortamında uzun süre bulundurulmasının çalışma güvenliği açısından risk yaratacağı düşünülerek basınç

faktörünün korozyon hızı üzerindeki etkisinin incelenmemesine karar verilmiştir. Ayrıca çalışmalar süresince borunun manometre ile bağlantısının yapıldığı kısmı, toprak üzerinde bırakılmış olup bu kısmın, korozyon süreçlerine dâhil edilmemesi sağlanmıştır.



Şekil 5.2. Boruya yapılan manometre bağlantısı (a), Boru uç kısmına yapılan kaplama işlemi (b)

Boruya bağlanan korozyon kuponları test öncesinde, üzerinde herhangi bir pürüzlülük veya kalıntı kalmaması amacıyla zımpara kâğıdı ile zımparalanmış ve ardından saf su ve aseton ile temizlenmiştir. Temizlenen kuponlar hava ve ardından kuru bir bez yardımıyla üzerinde nem kalmayacak şekilde tamamen kurutulmuştur. Her çalışma sonucunda, toprak zemin içerisinde 1 hafta süreyle test edilmiş olan korozyon kuponları çıkartılarak metal yüzey temizliği ASTM G-1-03 “Korozyon ürünleri temizleme metodu” standardına göre yapılmıştır [75]. Deney için hazırlanmış olan korozyon kuponunun; zemine yerleştirilmesi ve deney sonrası çıkarılarak temizlenmesi süreci Şekil 5.3. ve Şekil 5.4.’ de gösterilmektedir. Deney öncesi ve sonrasında tüm korozyon kuponlarına ait kütle ölçümleri, SF-400C hodbehot marka elektronik tartı ile 0,01 gram hassasiyetle alınmış ve her bir ölçümün 10 defa tekrarlanması sonucunda ortalama kütle değeri belirlenmiştir.



Şekil 5.3. Deney öncesi temizliği yapılan korozyon kuponu (a), korozyon kupon bağlantısının yapılması (b)



Şekil 5.4. Deney sonrası çıkarılan korozyon kuponu (a), deney sonrası temizliği yapılan korozyon kuponu (b).

5.2. Katodik Koruma ve AC Voltajın Uygulanması

Toprak zeminden kaynaklı korozyona etki eden faktörlerin dışında, metal yapılara dışardan etki eden AC enterferans ve katodik koruma faktörleri çelik boruya farklı seviyelerde uygulanarak korozyon hızına olan etkileri araştırılmıştır. AC ve DC akımların boruya uygulanması ve boru üzerindeki AC ve DC akım ve volt değerlerinin kupon aracılığı ile ölçülmesi, borunun manometre ile olan bağlantı kısmından gerçekleştirilmiştir. Bu kısım, saha koşullarında AC ve DC ölçümlerin alınması için tesis edilen ve boruya bağlantılı olup yer üstünde yer alan ölçü kutularının görevini görmektedir.

Deney ortamında, -800 mV ile -1500 mV limit değerleri arasındaki farklı katodik koruma seviyeleri çalışılmıştır. Bu değerler, BS ISO 15589-1:2015 standardında [8] yer alan kriterleri ve doğal gaz boru hatlarının işletmecilik koşullarını kapsayacak şekilde seçilmiştir. İşletmecilik şartlarında -1500 mV (CSE) seviyesinden daha negatif değerlerin, aşırı korumaya sebebiyet vereceği değerlendirilmektedir. Çelik malzemelerin aşırı korunması, katodik koruma akımlarına bağlı olarak metalde hidrojen kırılabilirliği veya boru hattı kaplamasında kavlamaya sebebiyet verebilmektedir.

Katodik koruma sisteminin çalıştırılarak kapalı devrenin oluşturulabilmesi için otomatik/manuel ayarlama yapılabilen 4Z marka katodik koruma redresör üniteleri kullanılmaktadır. Deney süresince katodik koruma akımlarının toprak zemin içerisindeki boruya uygulanabilmesi için kullanılan redresör ünitesi dışında 1 adet redresör ünitesi de yedek amaçlı deney ortamında bulundurulmuştur. Redresör üniteleri 50 volt/20 amper kapasiteli olup borunun istenilen katodik koruma seviyesine çıkarılabilmesi için gerekli ayarlamaların yapılmasını sağlayan ekran ve güç modüllerine sahiptir (Şekil 5.5.). Katodik koruma devresinin oluşturulabilmesi için 1,6 cm x 50 cm ebatlarındaki karma metal oksit titanyum tüp anot ve bakır/bakır sülfat (Cu/CuSO_4) sabit tip referans elektrot deney ortamı içerisine yerleştirilmiştir (Şekil 5.6). Redresör ünitesinin belirlenen limit değerler içerisinde katodik koruma potansiyelini doğru şekilde verebilmesi için sabit tip elektrot, anot yatağının etkisi altında kalmayacak şekilde konulmuştur. Katodik koruma devresi oluşturulur iken redresör ünitesinin güç modülü üzerinde bulunan eksi (-) kutup (katot kutbu) boruya, artı (+) kutup (anot kutbu) titanyum tüp anoda ve referans ucu ise sabit tip Cu/CuSO_4 elektroda bağlanmıştır. Çalışma yapılacak katodik koruma potansiyel seviyeleri, redresör ünitesi üzerindeki ekran modülünden ayarlanarak boruya verilmiştir. Redresör ünitesi üzerinden ayarlanan potansiyel değerlerin, boruyu polarize ederek sabit şekilde kaldığının tespitinin ardından deney çalışmalarına geçilmiştir. Katodik koruma potansiyel ölçümleri toprak zemin üzerinden seyyar tip referans elektrotlar vasıtasıyla alınmıştır. Kullanılan seyyar tip elektrotlara ilişkin örnek Şekil 5.7.' de gösterilmektedir. Kullanılan seyyar tip elektrotlar, zemin direncinin minimuma indirilmesi ve dolayısıyla ölçüm netliğinin sağlanması amacıyla borunun üzerindeki toprak zemine denk gelecek ve ucu nemli şekilde yerleştirilmiştir.



Şekil 5.5. Katodik koruma redresör ünitesi ekran modülü (a) güç modülü (b)



Şekil 5.6. Katodik koruma redresör üniteleri (a), titanyum tüp anot (b)

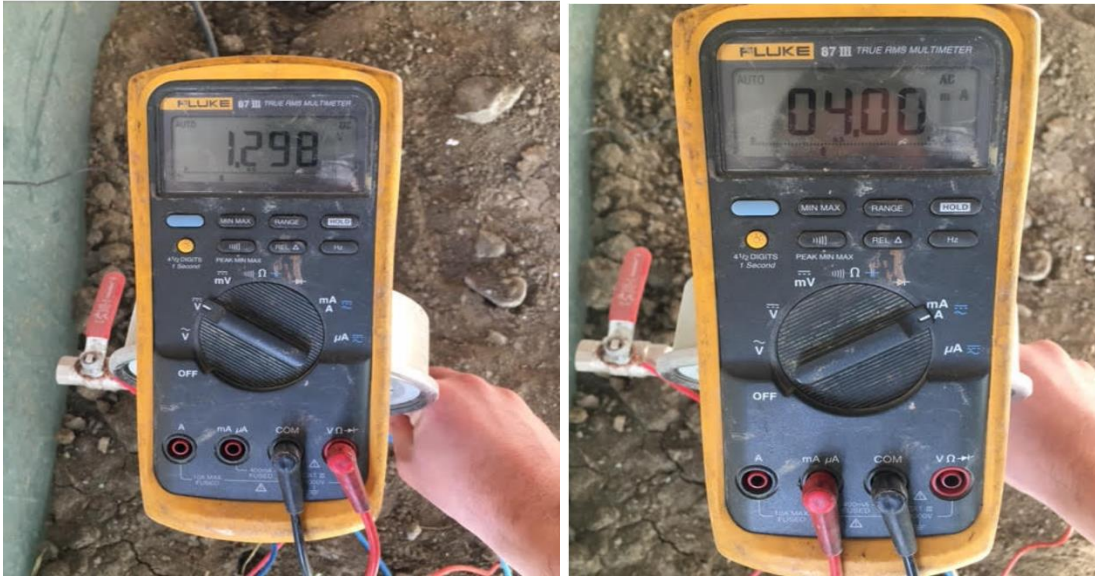


Şekil 5.7. Deney süresince kullanılan seyyar tip elektrotlar

Deney ortamı içerisindeki boruda dışardan gelen AC etkileşim sonucunda oluşacak korozyonun tespiti amacıyla, boruya AC/AC trafo ile voltaj uygulanmış ve boruya bağlı kupon üzerinden korozyon hızları ölçülmüştür. Boruya uygulanan AC voltaj seviyeleri, 0 ile 40 volt aralığında seçilmiş ve bu iki değer arasındaki farklı kademeler için korozyon hız ölçümleri yapılmıştır. Deney ortamında çalışılan limit potansiyel değerleri, doğal gaz boru hatlarının işletmecilik koşullarında tespit edilen minimum ve maksimum AC voltaj seviyeleri dikkate alınarak belirlenmiştir. Kullanılan AC trafo, 50 V/50 A kapasiteli ve 0-50 V aralığında farklı kademe ayarlarına sahip olup Şekil 5.8.' de gösterilmektedir. Kapalı devre oluşturularak boruya AC voltaj aktarılabilmesi için trafonun faz kısmı boruya, nötr kısmı ise topraklama amacıyla deney ortamından ayrı bir bölgede zemine gömülen bakır levhalara bağlanmıştır. Ayrıca farklı seviyelerde AC voltaj ile sürdürülen deneylerde, AC trafo ile boru arasına 50 V, 1000 μ F kapasiteli kapasitör yerleştirilerek ortamdaki DC akımların, AC güç kaynağını etkilemesinin önüne geçilmiştir. Boruya AC voltaj verilmesi sonucunda borudan korozyon kuponuna geçiş yapan AC akımların ölçümü, yüksek iç dirençli ve AC/DC filtreleme özelliğine sahip fluke marka voltmetre yardımıyla yapılmıştır (Şekil 5.9.). Boru ve kupon arasında ölçülen akımlar, AC akım yoğunluğunun belirlenebilmesi için kullanılan kuponun yüzey alanına bölünmüştür. Elde edilen akım yoğunluk değerleri, AC akım yoğunluğuna göre korozyon riskinin değerlendirilmesi amacıyla kullanılmıştır.

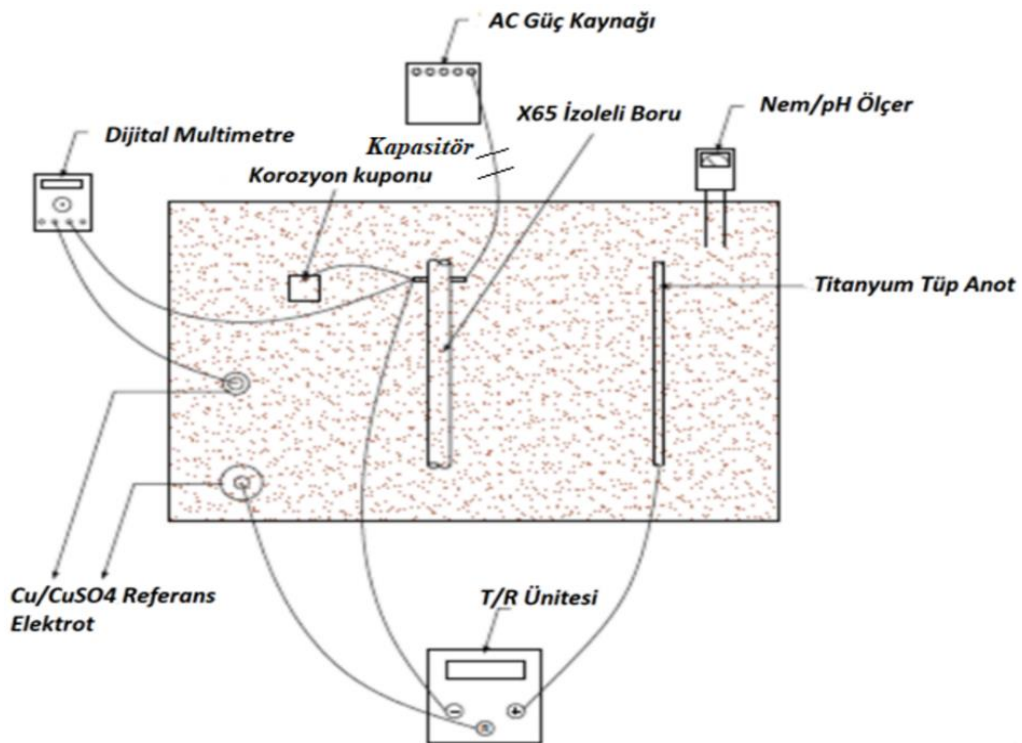


Şekil 5.8. Deney çalışmalarında kullanılan AC trafo



Şekil 5.9. Katodik koruma ölçümünün alınması (a), AC voltaj ölçümü alınması (b)

Deney süresince kullanılan katodik koruma redresör ünitesi, AC voltaj kaynağı, referans elektrotlar, titanyum tüp anot, pH/nem ölçer, boru, voltmetre (multimetre) ve korozyon kuponundan oluşan deney düzeneği ve kullanılan ekipmanların yerleşimi Şekil 5.10.' da gösterilmektedir.



Şekil 5.10. Deney düzeneğinin şematik gösterimi

5.3. Zeminden Kaynaklı Faktörlere İlişkin Yapılan Çalışmalar

Deney ortamında çalışılan bir diğer faktör olan nemlilik yüzdesine ait limit değerler, 0,5 ile 10 olarak belirlenmiş olup bu iki değer arasındaki farklı kademelerde kuponların korozyon hızları ölçülmüştür. Referans ortamdaki toprağın nemlilik yüzdesi alt limit, literatür çalışmalarında belirtilen ve saha şartlarında genellikle ıslak ortamda ölçülen nemlilik yüzdesi ise üst limit olarak alınmıştır [26]. Deney çalışmaları süresince değiştirilen toprak nemlilik yüzdesinin kontrolü amacıyla, korozyon kuponlarının içerisine konulduğu toprak zeminden numuneler alınarak tartılmış ve akabinde 2 saat süreyle 105 °C sıcaklıktaki etüvde bekletilerek tartım işlemi tekrarlanmıştır [76]. Toprağın nemlilik yüzdesi, iki tartım arasındaki kütle kaybından Eşitlik 5.1’ de gösterilen ifade ile hesaplanmaktadır. Nemlilik yüzdesi, her değiştirildiğinde ve 24 saatlik sürelerde hesaplanmış olup ayrıca $\pm 0,1$ hassasiyetli nemlilik ölçer cihaz ile de 6 saatlik periyotlarda ölçülerek takip edilmiştir. Çalışma yapılan ortamın kapalı olması nemliliği değiştirebilecek faktörlere karşı kısmen çözüm olmaktadır. Ayrıca zemin nemlilik seviyesinde meydana gelen değişimlerin zemin direnç seviyesini ne ölçüde etkilediği toprak megeri ile yapılan ölçümler ile tespit edilmiştir. Direnç değeri tespit edilirken megere ait proplar boruya dik olacak şekilde yaklaşık 20 cm aralıklarla açılmış ve direnç okuması cihaz ekranından yapılmıştır (Şekil 5.11.). Deney sürecinde nemlilik yüzdesinde nemölçer cihaz ile bir değişim tespit edilmesi durumunda, istenilen zemin nemlilik seviyesine ulaşmak için su ilavesi veya kurutma ile gerekli ayarlamalar yapılmıştır.



Şekil 5.11. Nemlilik seviyesinin ölçümü (a) zemin direnç seviyesinin ölçümü (b)

$$M_c = \left(\frac{M(ms)}{M(ds)} \right) \times \%100 \quad (5.1)$$

M_c : Nemlilik yüzdesi,

$M(ms)$: Nemli toprak ağırlığı.

$M(ds)$: Kurutulmuş toprak ağırlığını belirtmektedir.

Çalışılan tuzluluk yüzde limit değerleri; 0,0036 ile 3,5 olarak belirlenmiş olup deney ortamında bu iki değer arasındaki farklı tuzluluk yüzdelerinde, kuponlarda oluşan korozyon hızları ölçülmüştür. Ankara bölgesinde farklı boru hattı güzergâhları üzerinden alınan toprak numuneleri içerisinde en düşük tuzluluk değerine sahip toprak numunesi tercih edilmiş ve referans olarak kullanılmıştır. Referans toprak, tuzluluk etkisinin görülebileceği karayolları, tuz sahaları vb. alanlardan uzak bir noktadan alınmıştır. Bununla birlikte denizsel bölgelere yakın yeraltı boru hatlarındaki korozyon hızının deney ortamında ölçülebilmesi için deniz ortamındaki tuzluluk yüzdesini ifade eden ve görece korozyon hızının en fazla olduğu yaklaşık %3,5 seviyesi üst limit olarak kullanılmıştır [20]. Toprak içerisindeki tuzluluğun korozyona etkisini belirlemek amacıyla farklı seviyelerdeki sodyum klorür, saf su ile karıştırılarak toprak zemine eklenmiş ve istenilen tuzluluk yüzdelerine ulaşılmıştır.

Tuzun su içerisine ilave edilerek toprak zemine konulması homojen dağılımın sağlanması için tercih edilmiştir. Tuzlu suyun ortama eklenmesi ile nemlilik seviyesinde değişim meydana gelmesi durumunda, nemlilik seviyesinin ayarlanabilmesi için gerektiğinde kurutma işlemi yapılmıştır.

Değişen pH seviyelerine bağlı olarak meydana gelen korozyon hızları ölçülürken 3 ile 10 limit değer olarak seçilmiş olup değer aralıkları, literatür çalışmaları ile boru hattı güzergâh seçimi sürecinde saha şartlarında ölçülen pH değerlerinin incelenmesi neticesinde belirlenmiştir [3].

Çalışma limitleri içerisinde farklı seviyelerdeki pH değerlerinin ayarlanabilmesi için çeşitli solüsyonlar kullanılmıştır. Düşük pH değerleri için (pH 3-6) asetik asit solüsyonu (küttelece %5) toprak içerisine katılarak pH değerleri ayarlanmıştır. pH değerinin 6-10 arasında ayarlanması için ise farklı pH seviyelerine sahip tampon çözeltileri toprak ortam içerisinde kullanılmış olup bazik değerlere ulaşılması, NaOH solüsyonlarının kullanılması ile mümkün olmuştur. pH seviyesinin takibi +/- 0,1 hassasiyetli pH ölçer ile her 6 saatlik sürede gerçekleştirilmiştir.

Gerçekleştirilen deneylerin sayısı ve çalışılacak faktör seviyeleri, Taguchi deney tasarımı yöntemiyle bulunmuştur. Korozyon hız tahmini için doğrusal ve doğrusal olmayan regresyon analiz modelleri oluşturulmuştur. Doğrusal olmayan regresyon modelinin oluşturulabilmesi için ilave deney çalışmaları yapılmıştır. Ayrıca regresyon denklemleri ile hesaplanan sonuçlar, deney çalışmaları ve saha şartlarında hesaplanan korozyon hız değerleri ile kıyaslanmıştır. Elde edilen korozyon hızları, Tablo 5.4.' de gösterilmekte olan çelik malzemelerin korozyon dirençlerinin korozyon hızına göre değişim sınıflandırması dikkate alınarak yorumlanmıştır. Böylelikle deney çalışmalarında kullanılan X65 çelik korozyon kuponlarının, uygulanan faktör ve seviyeleri sonucunda oluşan korozyon hızına ne ölçüde dirençli olabileceği ve çeliğin dayanım göstereceği faktör seviyeleri belirlenmiştir.

Tablo 5.4. Çelik malzemelerin korozyon hızları ile korozyon dirençlerinin kıyaslanması

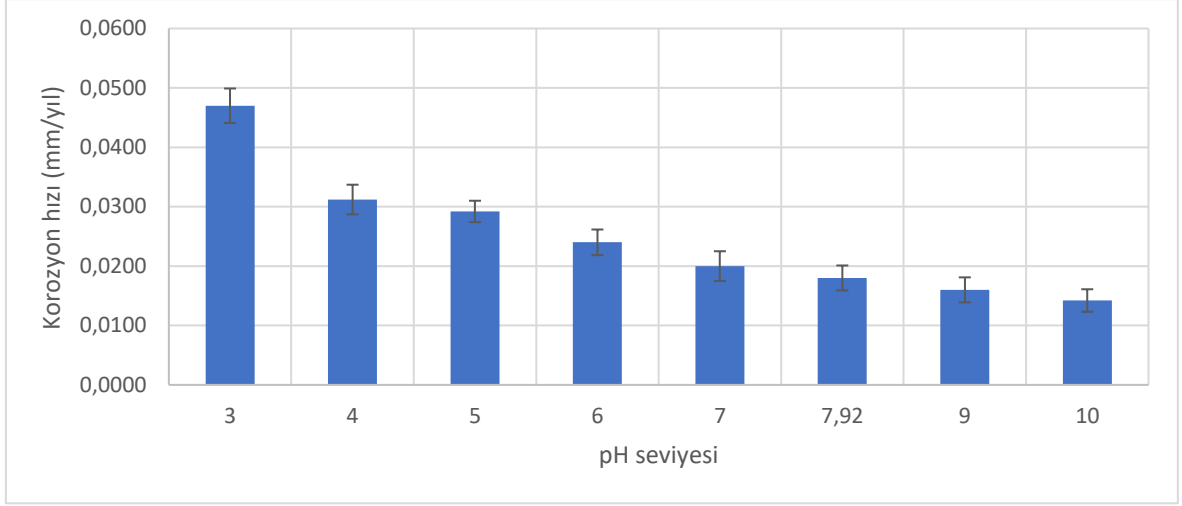
Malzemenin korozyon direnci	Korozyon hızı (mm/yıl)
Çok iyi	< 0,02
Oldukça iyi	0,02 – 0,1
İyi	0,1 – 0,5
Orta	0,5 – 1
Zayıf	1-5
Kabul edilemez	5 +

6. DENEY SONUÇLARI VE KOROZYON HIZ TAHMİNİ MODELLEME ÇALIŞMALARI

Oluşturulan deney ortamı içerisinde farklı seviyelerde uygulanan pH, nemlilik ve tuzluluk faktörleri ile AC etkileşim ve katodik koruma faktörlerinin; X 65 çelik malzemenin korozyon hızlarına yaptıkları etki araştırılmıştır. Deney çalışmalarında; her bir faktöre ait seviye değiştirilirken, değiştirilen faktör seviyelerine karşılık gelen korozyon hızları, boruya aynı anda bağlanmış olan 3 adet korozyon kuponu ile ölçülmüş ve ortalama korozyon hızları alınmıştır. Ayrıca çalışma yapılan 5 farklı faktörün seviye değişimlerine bağlı olarak korozyon hızı tahminlerinin yapılabilmesi için doğrusal ve doğrusal olmayan regresyon analizleri ile denklemler oluşturulmuştur. Gerçekleştirilen deneyler ve elde edilen denklemler aşağıda verilmektedir.

6.1. Zemin pH Değişimi ve Korozyon Hız Bağıntısı

Değişen pH seviyeleri ile çelik korozyonu arasındaki bağıntı Şekil 6.1.' de gösterilmekte olup kuponlar ile ölçülen korozyon hızları ve standart sapma miktarları Tablo 6.1.' de verilmektedir. Nötral ve nötrale yakın ortamlarda bulunan çelik kuponlarda meydana gelen korozyon miktarının kayda değer bir artış sergilemediği ve pH kaynaklı korozyondaki artışın pH seviyesinin 6' dan daha düşük olduğu ortamlarda meydana geldiği anlaşılmaktadır. Bununla birlikte; deney çalışmasının yapıldığı minimum ve maksimum pH değerleri (pH 3-10) arasında, yaklaşık 3 katlık bir korozyon hız farkının meydana geldiği tespit edilmiş olup deney çalışması yapılan pH aralıkları içerisinde maksimum korozyon hızına, asidik ortamda ve 0,045 mm/yıl seviyesi ile ulaşılmaktadır.



Şekil 6.1. Korozyon hızı ile pH seviyesi arasındaki bağıntı

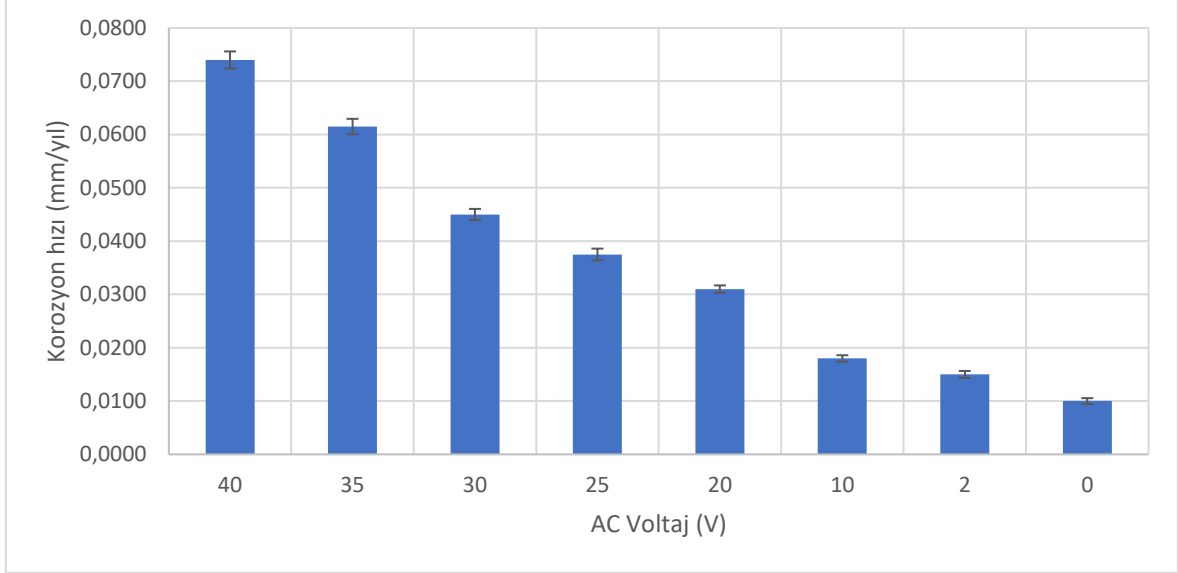
Tablo 6.1. pH seviyeleri, korozyon hızları ve standart sapma miktarları

pH seviyesi	Korozyon hızı	Standart sapma
3	0,0470	0,0029
4	0,0312	0,0025
5	0,0292	0,0018
6	0,0240	0,0022
7	0,0200	0,0025
7,92	0,0180	0,0021
9	0,0160	0,0021
10	0,0142	0,0019

6.2. AC Potansiyel Seviyesi ve Korozyon Hız Bağıntısı

AC etkileşim ile korozyon hızı arasındaki bağıntı Şekil 6.2’ de gösterilmekte olup kuponlar ile ölçülen korozyon hızları ve standart sapma miktarları Tablo 6.2.’ de verilmektedir. Korozyon kuponlarının bulunduğu ortamda AC enterferans olmaması durumu ile 40 Volt AC tespit edilmesi arasında, korozyon hızı yönü ile yaklaşık 5,5 katlık bir fark tespit edilmiştir. Bununla birlikte; referans ortamda yapılan her deney çalışmasında ölçülen AC voltaj değerine karşılık gelen AC akım değerleri ölçülmüş olup kupon yüzey alanına bölünerek AC akım yoğunluk değerleri bulunmuştur. Referans ortamda Tablo 5.1.’ de analiz sonuçları verilmekte olan zemin şartlarında ölçülen AC akım yoğunluk değerleri Şekil 6.3.’ de gösterilmektedir. Ayrıca referans ortamda nemlilik yüzdesinin çalışma limitleri içerisinde en üst seviyeye getirilmesi ile ölçülen AC akım yoğunluk değerleri Şekil

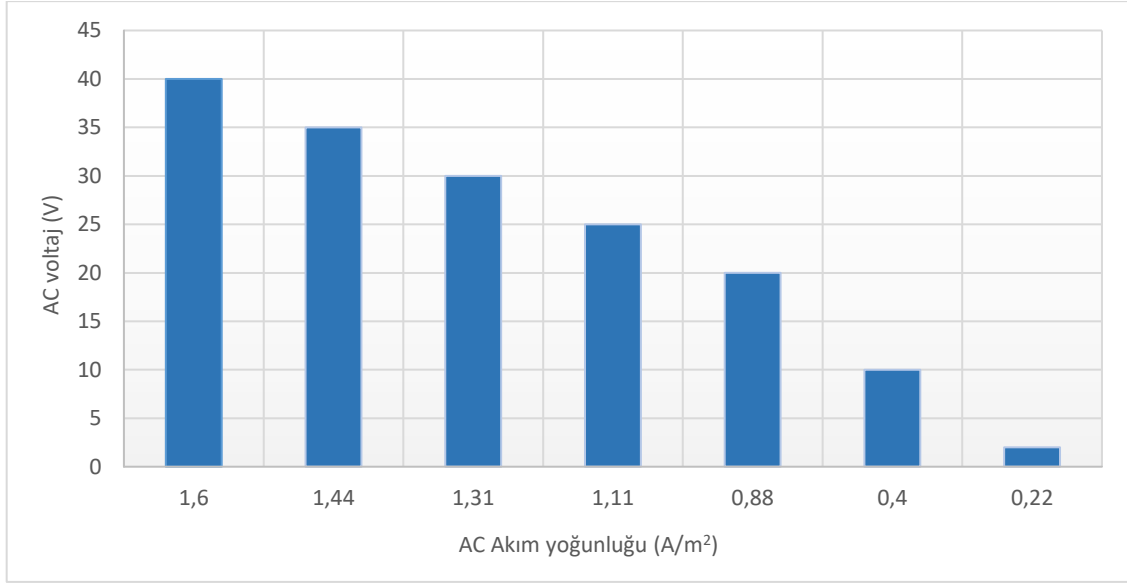
6.4.'de gösterilmektedir. Nemlilik yüzdesinin artırılması ile birlikte en yüksek AC voltaj değeri olan 40 volta karşılık gelen AC akım yoğunluğu $1,6 \text{ A/m}^2$ seviyesinden 92 A/m^2 seviyesine çıkmaktadır.



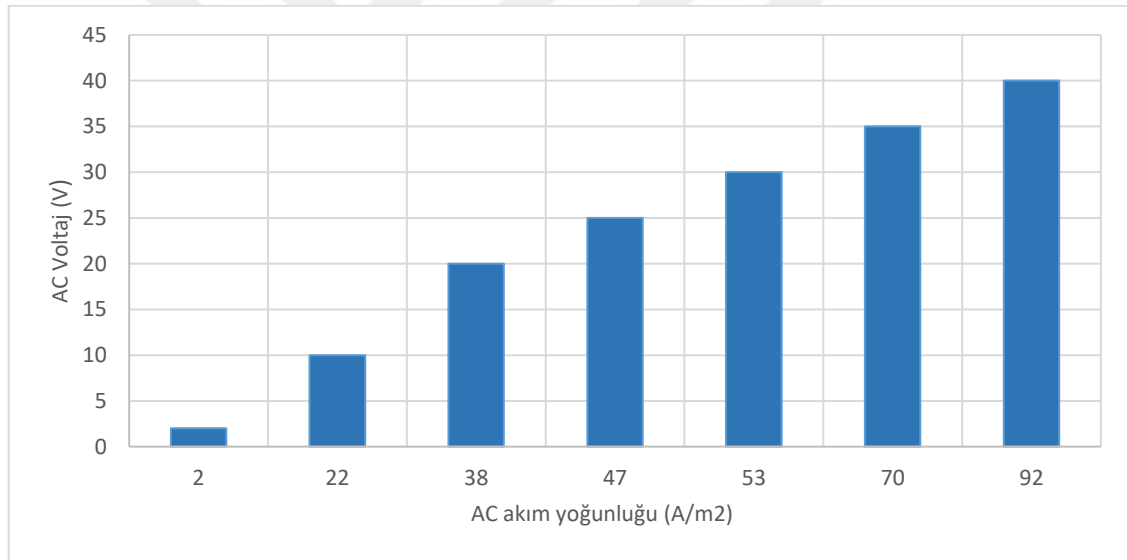
Şekil 6.2. Korozyon hızı ile AC seviyesi arasındaki bağıntı

Tablo 6.2. AC voltaj seviyeleri, korozyon hızları ve standart sapma miktarları

AC voltaj seviyesi	Korozyon hızı	Standart sapma
40	0,0740	0,0016
35	0,0615	0,0015
30	0,0450	0,0011
25	0,0375	0,0011
20	0,0310	0,0007
10	0,0180	0,0006
2	0,0150	0,0007
0	0,0100	0,0006



Şekil 6.3. Nemlilik yüzdesinin düşük olduğu durumda AC voltaj değerine karşılık gelen AC akım yoğunluk değerleri.

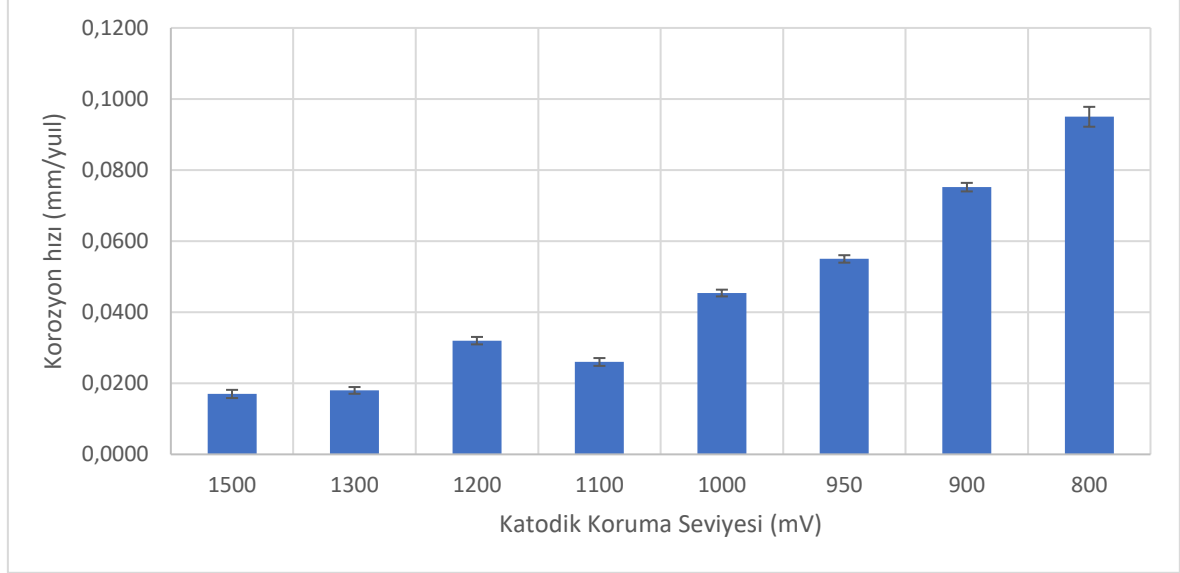


Şekil 6.4. Nemlilik yüzdesinin yüksek olduğu durumda AC voltaj değerine karşılık gelen AC akım yoğunluk değerleri.

6.3. Katodik Koruma Seviyesi ve Korozyon Hız Bağıntısı

Deney ortamında uygulanan katodik koruma potansiyel değerleri ile korozyon hızı arasındaki bağıntı Şekil 6.5’ de gösterilmekte olup kuponlar ile ölçülen korozyon hızları ve standart sapma değerleri Tablo 6.3.’ de verilmektedir. En düşük korozyon hızına, koruma seviyesinin -1300 ile -1500 mV (Cu/CuSO₄) aralığında olduğu durumda ulaşılmaktadır. Korozyon kuponuna katodik koruma uygulanmaması durumunda ise korozyon hızla artmaktadır. Ayrıca farklı seviyelerde katodik koruma uygulanması sonucunda, korozyon

kuponunda tespit edilen minimum korozyon hız değeri ile boruya katodik koruma uygulanmaması durumunda elde edilen korozyon hızı arasında yaklaşık 14 katlık bir fark oluşmaktadır.



Şekil 6.5. Korozyon hızı ile katodik koruma potansiyel seviyesi arasındaki bağıntı

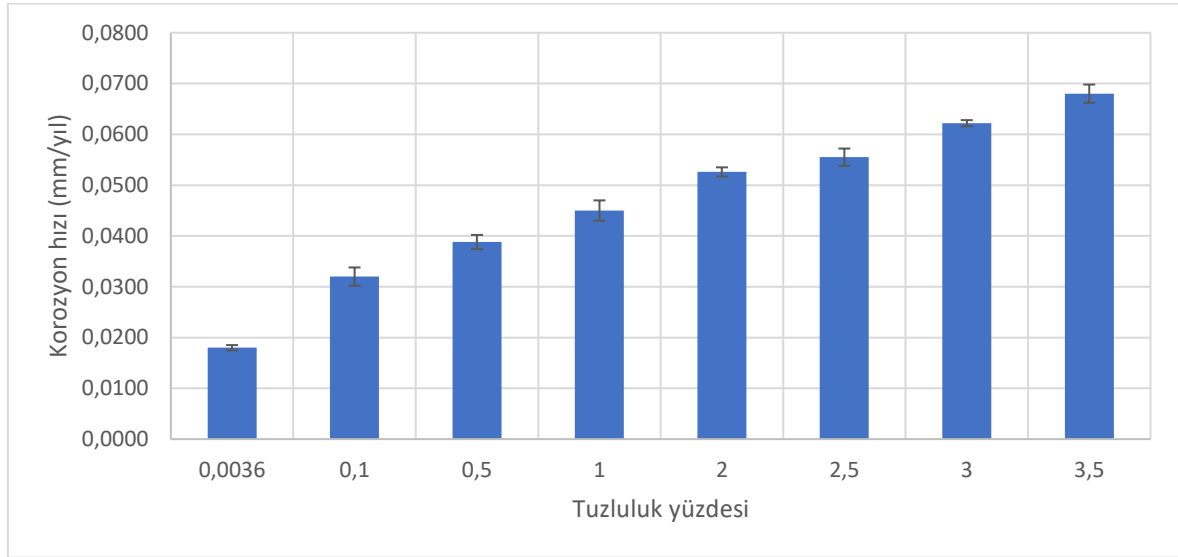
Tablo 6.3. Katodik koruma seviyeleri, korozyon hızları ve standart sapma miktarları

Katodik koruma seviyesi	Korozyon hızı	Standart sapma
1500	0,0170	0,0012
1300	0,0180	0,0010
1200	0,0320	0,0011
1100	0,0260	0,0011
1000	0,0454	0,0010
950	0,0550	0,0011
900	0,0752	0,0012
800	0,0950	0,0028

6.4. Tuzluluk Yüzde Değişimi ve Korozyon Hız Bağıntısı

Zemin tuzluluk seviyesi ile korozyon hızı arasındaki bağıntı Şekil 6.6.'da gösterilmekte olup kuponlar ile ölçülen korozyon hızları ve standart sapma değerleri Tablo 6.4.' de verilmektedir. Zemin tuzluluk seviyesinin artması ile birlikte korozyon hızı da artmaktadır. Referans ortamda gerçekleştirilen deney çalışmasında, tuzluluk en yüksek değer olan % 3,5 seviyesine getirildiğinde korozyon hızı 0,0680 mm/yıl seviyesine

ulaşmaktadır. En alt ve en üst çalışma limitleri arasındaki korozyon hız farkı ise yaklaşık 3 kat olmaktadır.



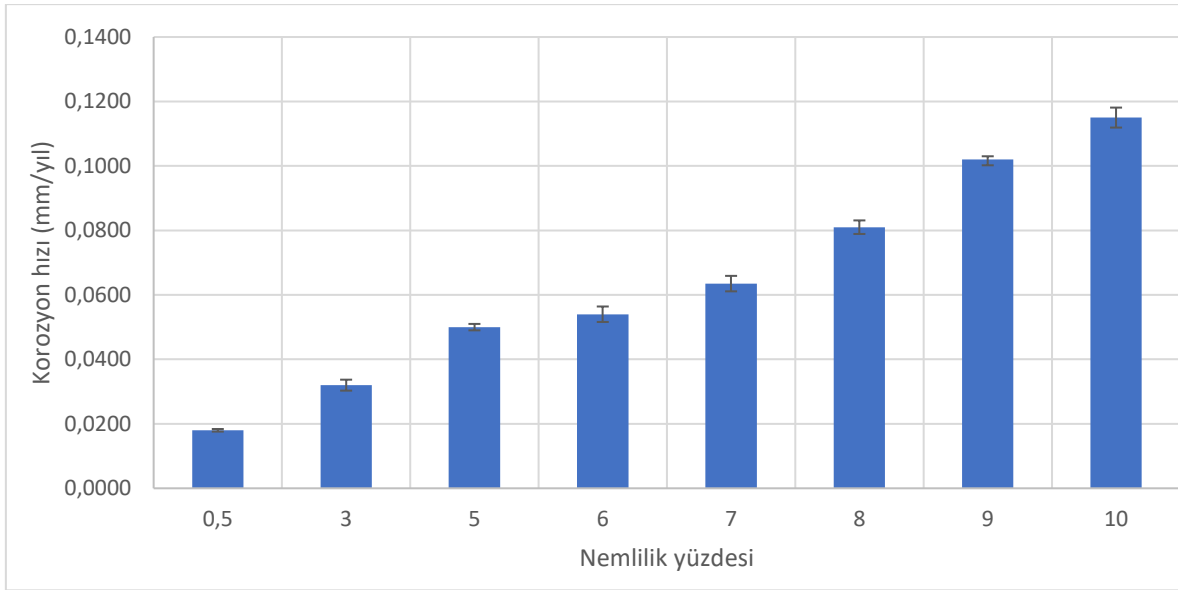
Şekil 6.6. Korozyon hızı ile tuzluluk yüzdesi arasındaki bağıntı

Tablo 6.4. Tuzluluk yüzdeleri, korozyon hızları ve standart sapma miktarları

Tuzluluk miktarı	Korozyon hızı	Standart sapma
0,0036	0,0180	0,0005
0,1	0,0320	0,0018
0,5	0,0388	0,0014
1	0,0450	0,0020
2	0,0526	0,0009
2,5	0,0555	0,0017
3	0,0622	0,0006
3,5	0,0680	0,0018

6.5. Nemlilik Yüzde Değişimi ve Korozyon Hız Bağıntısı

Zemin nemlilik yüzdesi ile korozyon hızı arasındaki bağıntı Şekil 6.7’ de gösterilmekte olup kuponlar ile ölçülen korozyon hızları ve standart sapma miktarları Tablo 6.5.’ de verilmektedir. Deney çalışmasının yapıldığı referans ortamın kuru olması sebebiyle korozyon hızı nispeten düşük seviyelerde tespit edilmiş olup nemliliğin artırılarak %10 seviyesine getirilmesi durumunda korozyon hızla artmaktadır. Bununla birlikte kuru ve nemli ortam arasında tespit edilen korozyon hız farkının yaklaşık 6,5 kat olduğu görülmekte olup en yüksek korozyon hızı, 0,1150 mm/yıl olarak tespit edilmiştir.



Şekil 6.7. Korozyon hızı ile nem yüzdesi arasındaki bağıntı

Tablo 6.5. Nem yüzdeleri, korozyon hızları ve standart sapma miktarları

Nem yüzdesi	Korozyon hızı	Standart sapma
0,5	0,0180	0,0004
3	0,0320	0,0017
5	0,0500	0,0010
6	0,0540	0,0024
7	0,0635	0,0024
8	0,0810	0,0021
9	0,1020	0,0010
10	0,1150	0,0031

Korozyona etki eden faktörlerin seviye değişimlerine bağlı olarak çelik korozyon hızında meydana gelen değişimlerin tespiti, Tablo 5.1.' de özellikleri verilen referans toprak ortam içerisinde yapılmıştır. Bununla birlikte; deney tasarımı ve Taguchi yöntemleri ile çalışma yapılmadan önce farklı boru hattı güzergâhları üzerinden alınan toprak ortam içerisinde test amaçlı korozyon hızı hesaplama çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalar kapsamında; toprak zemin içerisinde konulmuş olan çelik kupona; katodik koruma (DC potansiyel) ve AC potansiyel uygulanmış ve referans elektrotlar ile voltmetre kullanılarak AC/DC akım ve potansiyeller ölçülmüştür. Ayrıca korozyon hızının tespiti için kuponların ilk ve son ağırlıkları tartılarak kayıt altına alınmıştır. Uygulama pratiği olması amacıyla gerçekleştirilen deney çalışmalarına ilişkin veriler Tablo 6.6. ile Tablo 6.9. aralığında gösterilmektedir.

Tablo 6.6. K.Maraş bölgesinden getirilen toprak ortamdaki deney çalışması -1

Boru hattına uygulanan Katodik Koruma seviyesi (mV)	1300
Boru hattına Uygulanan AC Voltaj (V)	50
Boru hattı üzerinde ölçülen AC Voltaj (V)	35
Korozyon öncesi ortalama kupon ağırlığı (gr)	91.015
Korozyon sonrası ortalama Kupon ağırlığı (gr)	90.950
Kupon üzerindeki AC akım yoğunluğu (A/m ²)	18
Kupon üzerindeki DC akım yoğunluğu (A/m ²)	0.22
Kupon yüzey alanı (mm ²)	4446
Korozyon hızı (mm/yıl)	0.0970

Tablo 6.7. K.Maraş bölgesinden getirilen toprak ortamdaki deney çalışması -2

Boru hattına uygulanan Katodik Koruma seviyesi (mV)	1200
Boru hattına Uygulanan AC Voltaj (V)	50
Boru hattı üzerinde ölçülen AC Voltaj (V)	40
Korozyon öncesi ortalama kupon ağırlığı (gr)	89.510
Korozyon sonrası ortalama Kupon ağırlığı (gr)	89.440
Kupon üzerindeki AC akım yoğunluğu (A/m ²)	25
Kupon üzerindeki DC akım yoğunluğu (A/m ²)	0.45
Kupon yüzey alanı (mm ²)	4383
Korozyon hızı (mm/yıl)	0.1059

Tablo 6.8. K.Maraş bölgesinden getirilen toprak ortamdaki deney çalışması -3

Boru hattına uygulanan Katodik Koruma seviyesi (mV)	1100
Boru hattına Uygulanan AC Voltaj (V)	50
Boru hattı üzerinde ölçülen AC Voltaj (V)	40
Korozyon öncesi ortalama kupon ağırlığı (gr)	92.175
Korozyon sonrası ortalama Kupon ağırlığı (gr)	92.113
Kupon üzerindeki AC akım yoğunluğu (A/m ²)	17.8
Kupon üzerindeki DC akım yoğunluğu (A/m ²)	0.44
Kupon yüzey alanı (mm ²)	4490.8
Korozyon hızı (mm/yıl)	0.0916

Tablo 6.9. K.Maraş bölgesinden getirilen toprak ortamdaki deney çalışması -4

Boru hattına uygulanan Katodik Koruma seviyesi (mV)	1100
Boru hattına Uygulanan AC Voltaj (V)	20
Boru hattı üzerinde ölçülen AC Voltaj (V)	12
Korozyon öncesi ortalama kupon ağırlığı (gr)	90.565
Korozyon sonrası ortalama Kupon ağırlığı (gr)	90.545
Kupon üzerindeki AC akım yoğunluğu (A/m ²)	10.40
Kupon üzerindeki DC akım yoğunluğu (A/m ²)	0.45
Kupon yüzey alanı (mm ²)	4427.8
Korozyon hızı (mm/yıl)	0.030

6.6 Taguchi Yönteminin Uygulanması

Çalışma yapılan faktörlerin her birinin çelik korozyon hızına olan etkisi ayrı şekilde incelenmiş olup aynı anda birden fazla faktörün değişmesi sonucunda oluşacak toplam etkinin tespiti için ise deney tasarımına gerek duyulmaktadır. Deney tasarımı, 5 farklı faktörün 4 farklı seviyesi için hangi kombinasyonlarda deney yapılması gerektiği bilgisini sağlamaktadır. Doğalgaz boru hatlarında zeminden kaynaklı veya dış etkileşimler sebebiyle meydana gelen korozyon süreçlerine etki eden değişkenlerden olan nemlilik, tuzluluk, pH, katodik koruma ve AC potansiyel, Taguchi metodu ile deney tasarımında incelenmiş olup çalışılan faktörler ve seviyeleri Tablo 6.10.' de gösterilmektedir.

Tablo 6.10. Taguchi deney tasarımında incelenen faktörler ve seviyeleri

Korozyona etki eden faktörler	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3	Seviye 4
Katodik koruma (mV)	800	1100	1300	1500
Tuzluluk (%)	0,0036	1	1,5	3,5
AC potansiyel (V)	2	10	20	40
Nemlilik (%)	0,5	3	5	10
pH	3	5	7,92	10

Farklı 5 faktörden oluşan deney tasarımına uygun matris yapısı, Minitab programına girilen faktör ve seviye sayılarına göre program tarafından belirlenmiştir. Çalışma yapılan 5 faktör ve 4 seviye için en uygun Taguchi deney tasarımı, Tablo 6.11.' de gösterilen 16 deneyli Taguchi L16 ortogonal dizisi ile oluşturulmuştur. Ayrıca ortogonal dizinin seçiminde faktör grubunun toplam serbestlik derecesine bakılmaktadır. Bu durumda, çalışma yapılan her bir faktörün serbestlik derecesi, faktör seviye sayısının bir eksiği olan 3 olarak belirlenmiş olup toplam serbestlik derecesi ise 15 olmaktadır. Toplam serbestlik derece sayısı ile belirlenen dizin sayısı, Minitab programı ile belirlenen L16 ortogonal dizin sayısı ile örtüşmektedir.

Tablo 6.11. L16 Ortogonal dizisi

Katodik koruma	Tuzluluk	AC	Nemlilik	pH
1	1	1	1	1
1	2	2	2	2
1	3	3	3	3
1	4	4	4	4
2	1	2	3	4
2	2	1	4	3
2	3	4	1	2
2	4	3	2	1
3	1	3	4	2
3	2	4	3	1
3	3	1	2	4
3	4	2	1	3
4	1	4	2	3
4	2	3	1	4
4	3	2	4	1
4	4	1	3	2

Deneyler süresince faktör seviyelerinde yapılan değişikliklerin, diğer faktörleri etkilememesi amacıyla seviyeler periyodik olarak ölçülerek takip edilmiştir. Taguchi deney tasarımı, farklı faktör seviyelerinde gerçekleştirilen deneylerde kontrol edilemeyen faktörlerin etkisini azaltmak için, Sinyal/Gürültü oranı kavramı kullanılmaktadır. Bu oranın kullanılması ile kontrollü şekilde çalışılan faktörlerin, kontrol altında olmayan faktörlere karşı duyarlılığının azaltılması hedeflenmektedir.

Boru hatlarında meydana gelen korozyon süreçlerinin minimum seviyede gerçekleşmesi, boru hattı işletmecilik süresinin uzaması ve bakım-onarım maliyetlerinin azalması için istenen bir durumdur. Bu sebeple çalışma sırasında S/N oranları belirlenirken korozyona etki eden faktörlerin en küçük seviyede olmasının korozyon süreci açısından en iyi durum olduğu varsayılmış ve S/N oranı en küçük en iyi şeklinde belirlenmiştir.

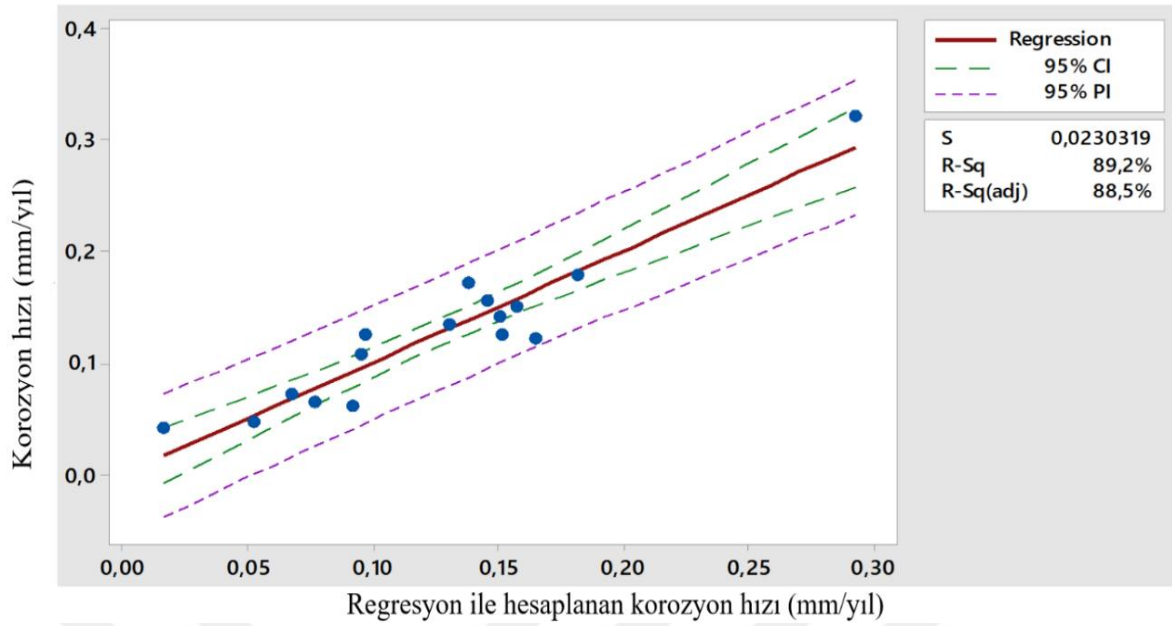
6.7. Doğrusal Regresyon Analizinin Yapılması

Regresyon analizi, farklı değişkenler ile bir bağımlı faktörün veya birden fazla bağımsız değişkenin arasında bir ilişkinin olması durumunda bunu modelleyen ve analiz eden bir yöntemdir [77]. Korozyona etki eden ve deney çalışmalarında incelenen 5 faktörden korozyon hızına en az ve en çok etki edenlerin belirlenmesi amacıyla Minitab programı ile doğrusal regresyon analizi gerçekleştirilmiş ve her bir faktörün olasılık (P) değerleri

bulunmuştur. Olasılık değerleri içerisinde 0,05' den küçük olanlar %95 güven seviyesinde deney sonucu üzerinde etkili olarak değerlendirilmektedir [78]. Ayrıca korozyona etki eden 5 faktör için farklı semboller kullanılarak her bir faktör bir sembol ile tanımlanmıştır (Tablo 6.12.). Bu faktörler bir arada iken meydana gelen korozyon hızının bulunabilmesi amacıyla Eşitlik 6.1 ile gösterilen doğrusal regresyon denklemi, Şekil 6.8.' de gösterilen grafik dikkate alınarak oluşturulmuştur. Eşitlik 6.1' de gösterilmekte olan doğrusal regresyon denklemi oluşturulurken korozyona etki eden 5 faktörün birbirini etkilemediği varsayılmıştır. Deneyler süresince bir faktör seviyesi değiştirildiğinde diğer faktör seviyelerinin istenilen değerde kalması için önlemler alınmış ve yapılan ölçümler sonucunda değişimlerin yaşanmadığı veya enaz seviyede kaldığı teyit edilmiştir. Bununla birlikte hem deney hem de saha uygulamaları sonucunda bazı faktörlerin birbirleri ile etkileşim halinde olabileceği anlaşılmaktadır. Özellikle; AC seviyesinde meydana gelen değişimlerin, toprak zeminden ölçülen katodik koruma seviyesinde değişime sebebiyet verebileceği, zemin nemlilik seviyesinde meydana gelen değişimlerin ölçülen katodik koruma seviyesini değiştirebileceği, zemin nemlilik seviyesindeki değişime bağlı olarak ölçülen AC voltajın değişebileceği ve zemin nemlilik seviyesindeki değişimin pH seviyesini etkileyeceği düşünülmektedir. Bu sebeple bazı faktör çiftlerinin birbirleri ile etkileşim halinde olduğu göz önüne alınarak doğrusal regresyon denklemleri hem faktörlerin bağımsız olduğu hem de etkileşim halinde olduğu durumlar için oluşturulmuş ve kıyaslama yapılmıştır. Eşitlik 6.2 faktör çiftlerinin birbirlerini etkilediği durum için Minitab programda yapılan analiz sonucunda oluşturulmuştur.

Tablo 6.12. Faktörler ve belirlenen semboller

Deney çalışmalarında kullanılan faktörler	Faktörler için belirlenen semboller
Katodik koruma seviyesi (mV)	$\Delta_{K.K.}$
pH	γ_{pH}
AC voltaj (V)	B_{AC}
Tuzluluk yüzdesi (%)	$\alpha_{Tuzluluk}$
Nemlilik yüzdesi (%)	$\delta_{Nemlilik}$



Şekil 6.8. Doğrusal regresyon modelinin gösterimi

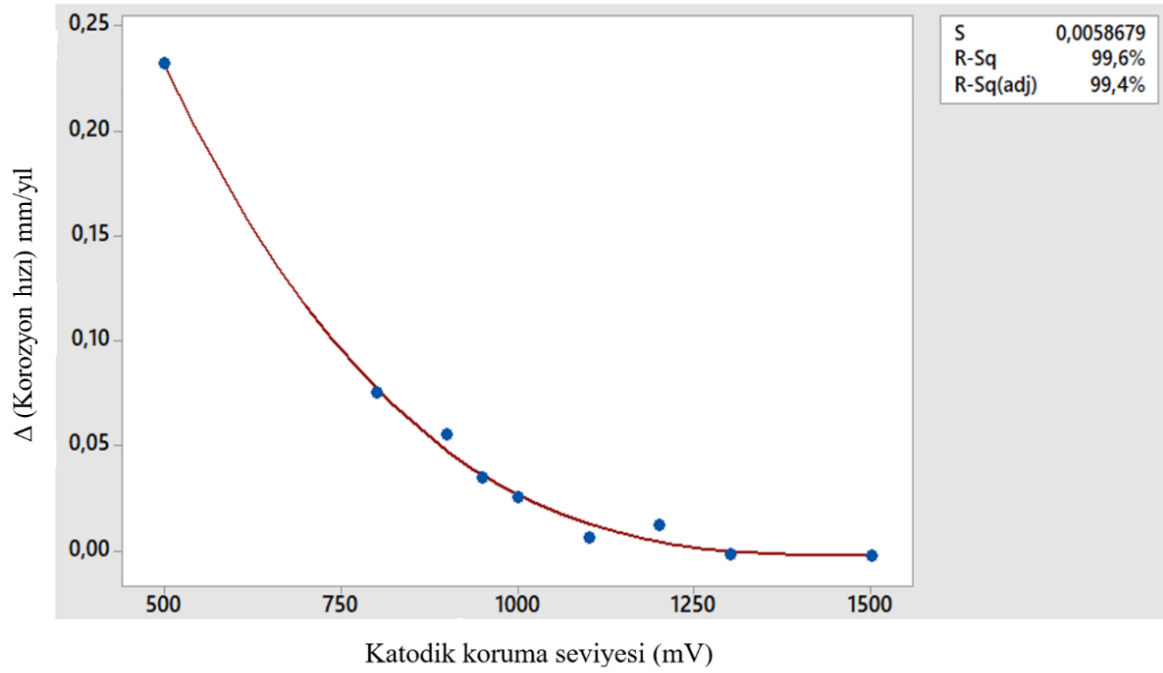
$$\text{Korozyon hızı} = 0,2126 - 0,000143 \cdot \Delta_{K.K.} + 0,01591 \cdot \alpha_{\text{Tuzluluk}} + 0,001575 \cdot B_{AC} + 0,01105 \cdot \delta_{\text{Nemlilik}} - 0,00345 \cdot \gamma_{\text{pH}} \quad (6.1)$$

$$\begin{aligned} \text{Korozyon hızı} = & 0,166 - 0,000067 \cdot \Delta_{K.K.} + 0,0077 \cdot \alpha_{\text{Tuzluluk}} + 0,00472 \cdot B_{AC} + 0,0098 \cdot \\ & \delta_{\text{Nemlilik}} - 0,0058 \cdot \gamma_{\text{pH}} - 0,000003 \cdot \Delta_{K.K.} \cdot B_{AC} - 0,000002 \cdot \Delta_{K.K.} \cdot \delta_{\text{Nemlilik}} + 0,000101 \cdot \\ & B_{AC} \cdot \delta_{\text{Nemlilik}} + 0,00009 \cdot \delta_{\text{Nemlilik}} \cdot \gamma_{\text{pH}} \end{aligned} \quad (6.2)$$

6.8. Doğrusal Olmayan Regresyon Analizinin Yapılması

Referans ortamda çalışılan her bir faktör seviyesine bağlı olarak korozyon hızında meydana gelen değişimler, Minitab programı ile oluşturulan ve Şekil 6.9. ile Şekil 6.13. arasında yer alan grafikler üzerinde gösterilmektedir. Grafiklerin elde edilmesi amacıyla ortogonal tabloda yer alan deneyler haricinde ilave deney çalışmaları yapılmıştır. Grafik eğimlerine göre oluşturulan grafik denklemleri fonksiyon olarak tanımlanmıştır. Bu fonksiyonlar, Eşitlik 6.3 ile Eşitlik 6.7 arasında gösterildiği üzere grafiklerin parabolik değişimlerine göre 2. ile 4. derece aralığında farklı mertebelere sahiptir. Bu sebeple öncelikli olarak grafiklerin artış eğilimleri incelenerek fonksiyonların mertebeleri tespit edilmiş ve akabinde Minitab programı ile bu grafiklere ait fonksiyonlar oluşturulmuştur. Bu fonksiyonlar oluşturulurken, grafik eğimlerinin daha net şekilde belirlenebilmesi için bazı parametre seviyeleri için ilave deney çalışmaları yapılmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda

tespit edilen korozyon hızları, uyarlanan korozyon hızları ve denklem katsayıları; Tablo 6.13. ile Tablo 6.17. arasında yer alan tablolar ile gösterilmektedir.

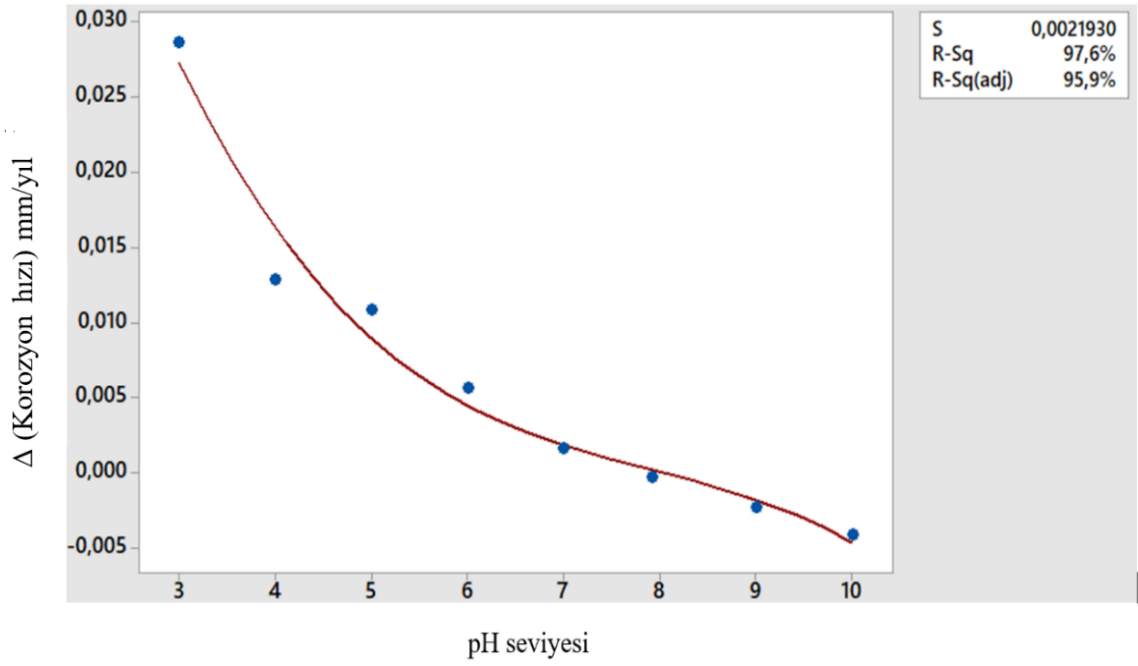


Şekil 6.9. Katodik koruma seviyeleri ile fark korozyon hızları arasındaki bağıntı

$$\Delta F \text{ Korozyon hızı}_{(K.K.)} = 0,7972272 - (0,001614 * \Delta_{K.K.}) + (0,00000109 * (\Delta_{K.K.})^2) - (0,000000000246 * (\Delta_{K.K.})^3) \quad (6.3)$$

Tablo 6.13. Katodik koruma seviye değişimine bağlı elde edilen korozyon hızları

Katodik koruma seviyesi (mV)	Δ Korozyon hızı	Korozyon hızları farkı	Uyarlanan korozyon hızı	Denklem katsayıları
1500	-0,0025	-5,3E-05	-0,00245	0,7972272
1300	-0,0021	-0,002108	8,26E-06	-0,001614
1200	0,0119	0,007507	0,004393	1,09E-06
1100	0,0059	-0,006952	0,012852	-2,46E-10
1000	0,0253	-0,001562	0,026862	
950	0,0349	-0,00151	0,03641	
900	0,0551	0,0071996	0,0479	
800	0,0749	-0,002544	0,077444	
500	0,2319	2,314E-05	0,231877	

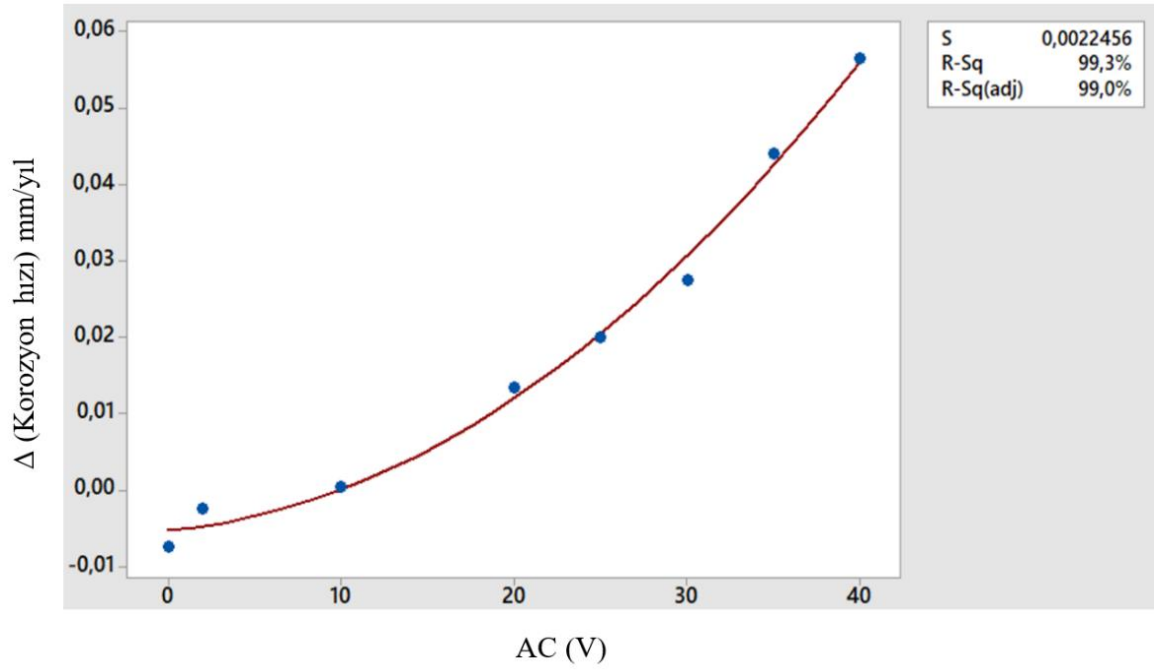


Şekil 6.10. pH seviyeleri ile fark korozyon hızları arasındaki bağıntı.

$$\Delta F \text{ Korozyon hızı}_{(pH)} = 0,092172478 - (0,031454029 * \gamma_{pH}) + (0,003752358 * (\gamma_{pH})^2) - (0,000157471 * (\gamma_{pH})^3) \quad (6.4)$$

Tablo 6.14. pH seviye değişimine bağlı elde edilen korozyon hızları

pH seviyesi	Δ Korozyon hızı	Korozyon hızları farkı	Uyarlanan korozyon hızı	Denklemler katsayıları
3	0,0287	0,0013284	0,02733	0,0921725
4	0,0129	-0,003458	0,016316	-0,031454
5	0,0109	0,0018309	0,009027	0,0037524
6	0,0057	0,0011388	0,004519	-0,000157
7	0,0017	-0,000189	0,001847	
7,92	-0,0003	-0,00054	0,000198	
9	-0,0023	-0,000573	-0,00177	
10	-0,0041	0,0004611	-0,0046	

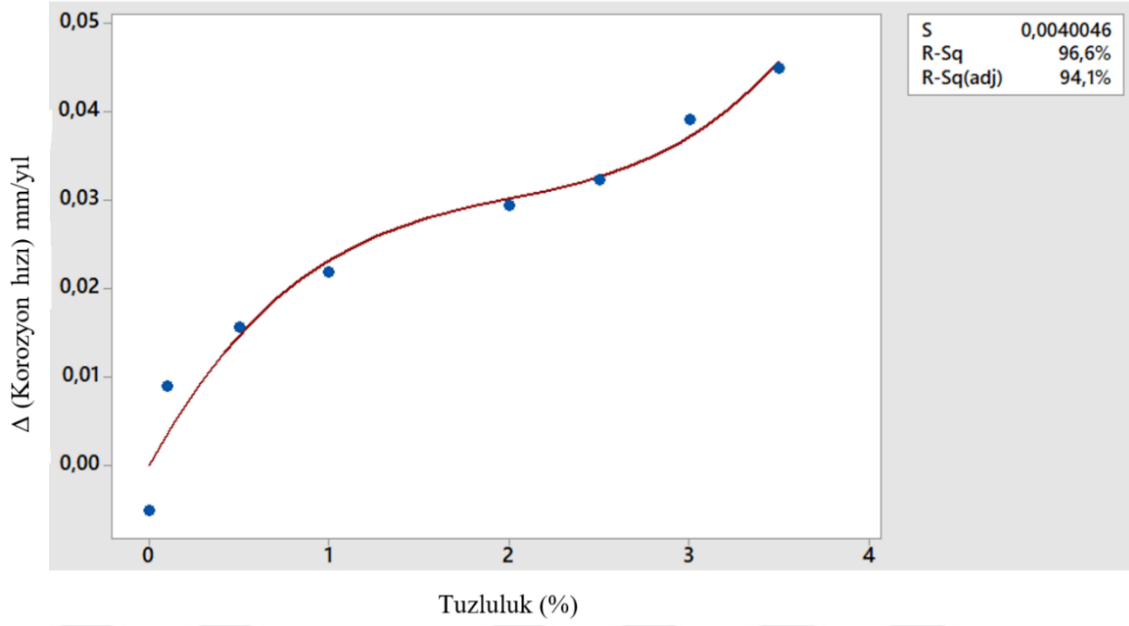


Şekil 6.11. AC seviyeleri ile fark korozyon hızları arasındaki bağıntı.

$$\Delta F \text{ Korozyon hızı}_{(AC)} = -0,005245531 + (0,000189204 * B_{AC}) + (0,0000335349 * (B_{AC})^2) \quad (6.5)$$

Tablo 6.15. AC seviye değişimine bağlı elde edilen korozyon hızları

AC seviyesi (V)	Δ Korozyon hızı	Korozyon hızları farkı	Uyarlanan korozyon hızı	Denklem katsayıları
40	0,0564	0,0004547	0,055978	-0,005246
35	0,0439	0,0014763	0,042457	0,0001892
30	0,0274	-0,003179	0,030612	3,353E-05
25	0,0199	-0,000511	0,020444	
20	0,0134	0,0014806	0,011953	
10	0,0004	0,0004332	-3,5E-18	
2	-0,0026	0,0021661	-0,00473	
0	-0,0076	-0,002321	-0,00525	

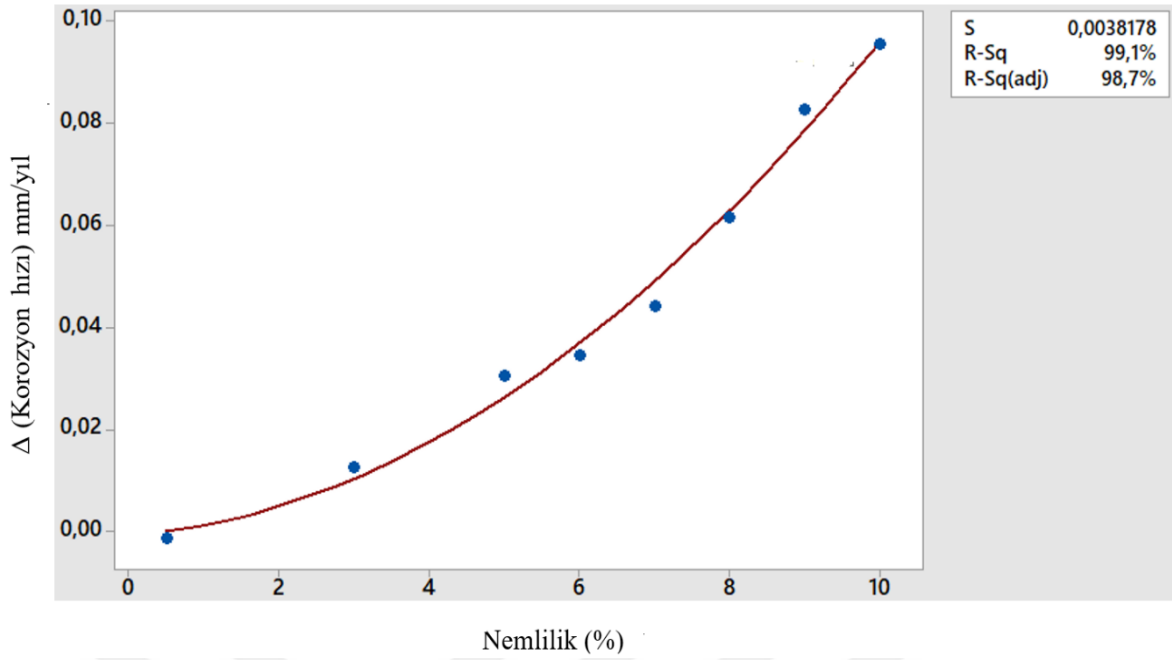


Şekil 6.12. Tuzluluk yüzdeleri ile fark korozyon hızları arasındaki bağıntı

$$\Delta F \text{ Korozyon hızı } (\alpha_{\text{Tuzluluk}}) = -0,000132745 + (0,036932503 * \alpha_{\text{Tuzluluk}}) - (0,01633626 * (\alpha_{\text{Tuzluluk}})^2) + (0,002723331 * (\alpha_{\text{Tuzluluk}})^3) \quad (6.6)$$

Tablo 6.16. Tuzluluk seviye değişimine bağlı elde edilen korozyon hızları

Tuzluluk yüzdesi (%)	Δ Korozyon hızı	Korozyon hızları farkı	Uyarlanan korozyon hızı	Denklem katsayıları
0,0	-0,0051	-0,005145	-1E-17	-0,000133
0,1	0,0089	0,0054554	0,0034	0,0369325
0,5	0,0157	0,0010654	0,01459	-0,016336
1,0	0,0219	-0,001332	0,023187	0,0027233
2,0	0,0295	-0,000719	0,030174	
2,5	0,0324	-0,000294	0,032649	
3,0	0,0391	0,0018869	0,037168	
3,5	0,0449	-0,000919	0,045775	



Şekil 6.13. Nemlilik yüzdeleri ile fark korozyon hızları arasındaki bağıntı

$$\Delta F \text{ Korozyon hızı}_{(\text{Nemlilik})} = - 0,000796736 + (0,001168506 * \delta_{\text{Nemlilik}}) + (0,000849932 * (\delta_{\text{Nemlilik}}^2)) \quad (6.7)$$

Tablo 6.17. Nemlilik seviye değişimine bağlı elde edilen korozyon hızları

Nemlilik yüzdesi (%)	Δ Korozyon hızı	Korozyon hızları farkı	Uyarlanan korozyon hızı	Denklem katsayıları
0,5	-0,0015	-0,001452	-6,9E-18	-0,000797
3	0,0125	0,0021901	0,010358	0,0011685
5	0,0305	0,0042542	0,026294	0,0008499
6	0,0345	-0,002264	0,036812	
7	0,0440	-0,004981	0,049029	
8	0,0615	-0,001399	0,062947	
9	0,0825	0,003984	0,078564	
10	0,0955	-0,000333	0,095882	

Çalışma yapılan 5 faktörün farklı seviyeleri ve bu seviyelere karşılık gelen korozyon hızları arasında elde edilen grafiklere ait denklemler, fark fonksiyonları (ΔF Korozyon hızı) şeklinde tanımlanmıştır. ΔF ifadeleri, Eşitlik 6.8’ de gösterilen korozyon hızı hesaplama denkleminde yer alan referans korozyon değerinin, her faktör için oluşturulan korozyon hızı hesaplama denklemlerinden çıkartılması sonucu bulunmuştur. Bu sayede korozyon hızları hesaplanırken, referans korozyon hız değerinin tekrar yazılmasının önüne geçilmektedir. Referans korozyon hız değeri ise Tablo 5.1’ de gösterilmekte olan referans şartlarda hesaplanan korozyon hız değeri olarak tanımlanmaktadır.

$$\text{Korozyon hızı} = \text{Referans korozyon değeri} + \sum \Delta F_{\text{Korozyon hızları}} + \sum \emptyset \text{ Faktör etkileşimleri} \quad (6.8)$$

Eşitlik 6.8’de gösterilmekte olan $\emptyset$ katsayıları, her bir faktörün diğer bir faktör ile olan etkileşimini ortaya koymak amacıyla formüle eklenmiştir. Bu katsayılar öncelikli olarak, faktörlerin birbiri ile etkileşim içerisinde olmadığı ve her faktörün bağımsız olduğu durum için 0 alınarak Eşitlik 6.8’ de yerine konulmuştur. Bu durumda Eşitlik 6.8 ifadesi, Eşitlik 6.9. şekline dönüşmektedir.

$$\text{Korozyon hızı} = \text{Referans korozyon hız değeri} + \sum \Delta F_{\text{Korozyon hızları}} \quad (6.9)$$

Korozyona etki eden her bir faktörün korozyon hızına olan bağımsız etkilerini içeren denklemler, Eşitlik 6.9’ da yerlerine konularak korozyon hızı hesaplama denklemi oluşturulmuştur (6.10).

$$\begin{aligned} \text{Korozyon hızı} = & 0,018 - 0,000796736 + (0,001168506 * \delta_{\text{Nemlilik}}) + (0,000849932 * (\delta_{\text{Nemlilik}}^2)) - 0,005245531 + (0,000189204 * B_{\text{AC}}) + (0,0000335349 * (B_{\text{AC}})^2) + 0,7972272 - \\ & (0,001614 * \Delta_{\text{K.K}}) + (0,00000109 * (\Delta_{\text{K.K}})^2) - (0,000000000246 * (\Delta_{\text{K.K}}^3)) - 0,000132745 + \\ & (0,036932503 * \alpha_{\text{Tuzluluk}}) - (0,01633626 * (\alpha_{\text{Tuzluluk}})^2) + (0,002723331 * (\alpha_{\text{Tuzluluk}})^3) + \\ & 0,092172478 - (0,031454029 * \gamma_{\text{pH}}) + (0,003752358 * (\gamma_{\text{pH}})^2) - (0,000157471 * (\gamma_{\text{pH}})^3). \end{aligned} \quad (6.10)$$

Bununla birlikte; çalışma yapılan faktörlerin birbirlerinden bağımsız olmadığı ve bir faktör değiştirilir iken başka bir faktörün daha bu değişimden etkilendiği varsayılarak ikili faktör etkisini içeren korozyon hızı hesaplama denklemleri oluşturulmuştur. Denklemlerin oluşturulabilmesi için farklı faktör çiftleri ile deney ortamında çalışmalar yapılmıştır. Deney çalışması yapılan faktör çiftleri; nem yüzdesi-katodik koruma, nem yüzdesi-pH, AC voltaj-katodik koruma ve nem yüzdesi-AC voltaj şeklinde belirlenmiş olup deney çalışması yapılan faktör seviyeleri, Tablo 6.18. ile Tablo 6.21. arasında gösterilmektedir. Deneyler süresince referans ortamdaki diğer parametreler sabit tutularak sadece iki faktörün değiştirilmesi sonucunda oluşan korozyon hızları belirlenmiştir. Faktör çiftlerinin seçiminde; ikili etkileşimin daha fazla olduğu düşünülen ve korozyon hızını diğer faktör çiftlerine kıyasla daha fazla arttıran parametreler tercih edilmiştir.

Tablo 6.18. Nemlilik ve katodik koruma faktör çiftine ait seviyeler ve korozyon hızları

Nemlilik yüzdesi (%)	Katodik Koruma seviyesi (mV)	(Δ) Korozyon hızı
0,5	1500	0,0004
0,5	1300	-0,0008
3	1100	-0,0058
5	1200	0,0016
9	1000	-0,0087
10	800	-0,0237

Tablo 6.19. Nemlilik ve pH faktör çiftine ait seviyeler ve korozyon hızları

Nemlilik yüzdesi (%)	pH seviyesi	(Δ) Korozyon hızı
0,5	10	0,0025
3	7,95	0,0028
5	6	0,0026
9	10	-0,0056
10	3	-0,0088

Tablo 6.20. AC ve katodik koruma faktör çiftine ait seviyeler ve korozyon hızları

AC Seviyesi (V)	Katodik Koruma seviyesi (mV)	(Δ) Korozyon hızı
2	1500	0,0051
2	1300	0,0021
10	1200	0,0049
20	1100	-0,0084
30	950	-0,0093
40	800	0,0162

Tablo 6.21. AC ve nem faktör çiftine ait seviyeler ve korozyon hızları

AC Seviyesi (V)	Nem yüzdesi (%)	(Δ) Korozyon hızı
2	0,5	0,0009
20	5	-0,0031
2	10	-0,0050
40	10	-0,0020
40	0,5	-0,0062

Faktörlerin ikili etkilerinin korozyon hızı hesaplama formülüne dâhil edilmesi sürecinde, Eşitlik 6.8’ de gösterilen korozyon hızı hesaplama formülünde yer alan ϕ katsayıları tek bir sayısal değer yerine bir fonksiyon (ΔF) olarak ele alınmıştır. Faktörlerin

bağımsız olduğu durum ile faktör çiftlerinin bir arada korozyon hızına yaptıkları etkinin fonksiyon şeklinde tanımlandığı denklem 6.11' de gösterilmektedir.

$$\begin{aligned} \text{Korozyon hızı} = & \text{Referans korozyon hız değeri} + \Delta F_{\text{NEM}} + \Delta F_{\text{AC}} + \Delta F_{\text{K.K.}} + \Delta F_{\text{TUZLULUK}} + \Delta F_{\text{pH}} \\ & + \Delta F (\text{Nem yüzdesi ve K.K.}) + \Delta F (\text{K.K. ve A.C Voltaj}) + \Delta F (\text{pH seviyesi ve Nem yüzdesi}) + \Delta F (\text{AC Voltaj ve Nem yüzdesi}) \end{aligned} \quad (6.11)$$

Faktörlerin ikili etkilerini gösterir denklemlerin oluşturulması aşamaları, nem ve katodik koruma faktör çifti (ΔF Nem yüzdesi, K.K.) için örnek olarak gösterilmiştir. Nem ve katodik koruma faktör çifti için oluşturulan ve Eşitlik 6.12' de gösterilen fonksiyona, a ve b çarpanları eklenmiş olup bu çarpanların bulunabilmesi amacıyla nem ve katodik koruma parametre çiftlerine ait % 0,5 ve 1300 mV seviyeleri, limit değer olarak kullanılmıştır.

$$\Delta F (a,b, \text{Nem}, \text{K.K.}) = (a \times \text{Nem} + b \times \text{K.K.}) \times (\text{Nem} - 0,5) \times (\text{K.K.} - 1300) \quad (6.12)$$

Ayrıca Eşitlik 6.12' nin çözülerek a ve b katsayılarının bulunabilmesi için nem ve katodik korumanın farklı seviyelerinin yer aldığı iki farklı denklem oluşturulmuştur. Bu denklemler, Eşitlik 6.13 ve Eşitlik 6.14 ile gösterilmekte olup denklemlerde; toprak nem yüzdesinin 3 ve katodik korumanın 1100 mV olduğu seviyeler ile toprak nem yüzdesinin 10 ve katodik korumanın 800 mV olduğu seviyeler kullanılmıştır. Denklemlerde kullanılan katodik koruma ve nem seviyelerinin belirlenmesi sürecinde fonksiyonu sıfıra getirmeyecek şekilde, çalışılan faktör seviyelerinin en üst ve en alt seviyelerine yakın olan değerler seçilmiştir.

$$\Delta F (a, b, \text{Nem}, \text{K.K.}) = (3a + 1100 b) \times (3-0,5) \times (1100 - 1300) = - 0,0058 \quad (6.13)$$

$$\Delta F (a,b, \text{Nem}, \text{K.K.}) = (10a + 800 b) \times (10-0,5) \times (800 - 1300) = - 0,0237 \quad (6.14)$$

Eşitlik 6.13 ve 6.14' de yer alan a ve b çarpanlarına ulaşılabilmesi amacıyla, A ve B matrisleri oluşturulmuş ve matris çözümleri yapılarak çarpanlar bulunmuştur. Çarpanların bulunması ile nemin katodik korumaya, katodik korumanın da neme olan etkisi tek bir fonksiyon üzerinde ifade edilmiştir (6.15).

$$A = \begin{vmatrix} -1500 & -550000 \\ -47500 & -3,8e6 \end{vmatrix} ; \quad B = \begin{vmatrix} -0,0058 \\ -0,0237 \end{vmatrix} ; \quad A^{-1} B = \begin{vmatrix} -4,408812729 * 10^{-7} \\ 1,174785802 * 10^{-8} \end{vmatrix}$$

$$\Delta F_{\text{Korozyon}} (\text{Nem}, \text{K.K.}) = (-4,408812729 * 10^{-7} * \delta_{\text{Nemlilik}} + 1,174785802 * 10^{-8} * \Delta_{\text{K.K.}}) * (\delta_{\text{Nemlilik}} - 0,5) * (\Delta_{\text{K.K.}} - 1300) \quad (6.15)$$

Nem yüzdesi ve katodik koruma ikilisi için örnek olarak oluşturulan korozyon hızı fonksiyon ifadesi, seçilen 4 parametre çifti için ayrı ayrı hesaplanmıştır. Bununla birlikte nem ve katodik koruma parametre çiftinin haricinde, çalışılan diğer parametre çiftlerinin korozyon hızına olan etkisini tanımlayan denklemler Eşitlik 6.16, Eşitlik 6.17 ve Eşitlik 6.18’ de gösterilmektedir.

$$\Delta F_{\text{Korozyon}} (\text{pH}, \text{Nem}) = (-0,00000000087791952 * \gamma_{\text{pH}} + 0,000045165138 * \delta_{\text{Nemlilik}}) * (\gamma_{\text{pH}} - 7,92) * (\delta_{\text{Nemlilik}} - 0,5) \quad (6.16)$$

$$\Delta F_{\text{Korozyon}} (\text{AC}, \text{K.K.}) = (0,000000015954 * B_{\text{AC}} - 0,000000002156013699 * \Delta_{\text{K.K.}}) * (B_{\text{AC}} - 10) * (\Delta_{\text{K.K.}} - 1300) \quad (6.17)$$

$$\Delta F_{\text{Korozyon}} (\text{Nem}, \text{AC}) = (0,00000696214 * \delta_{\text{Nemlilik}} - 0,00000191598 * B_{\text{AC}}) * (\delta_{\text{Nemlilik}} - 0,5) * (B_{\text{AC}} - 10) \quad (6.18)$$

Faktörlerin korozyon hızı üzerinde yaptıkları bağımsız etkiler ile faktör çiftlerinin yaptıkları ikili etkileri gösteren yukarıdaki tüm denklemler, Eşitlik 6.11.’ de gösterilen genel ifadede yerlerine konularak korozyon hızı hesaplama denklemi tamamlanmıştır (6.19).

$$\begin{aligned} \text{Korozyon hızı} = & 0,018 - 0,000796736 + (0,001168506 * \delta_{\text{Nemlilik}}) + (0,000849932 * \delta_{\text{Nemlilik}}) \\ & - 0,005245531 + (0,000189204 * B_{\text{AC}}) + (0,0000335349 * (B_{\text{AC}})^2) + 0,7972272 - (0,001614 \\ & * \Delta_{\text{K.K.}}) + (0,00000109 * (\Delta_{\text{K.K.}})^2) - (0,000000000246 * (\Delta_{\text{K.K.}})^3) - 0,000132745 + \\ & (0,036932503 * \alpha_{\text{Tuzluluk}}) - (0,01633626 * (\alpha_{\text{Tuzluluk}})^2) + (0,002723331 * (\alpha_{\text{Tuzluluk}})^3) + \\ & 0,092172478 - (0,031454029 * \gamma_{\text{pH}}) + (0,003752358 * (\gamma_{\text{pH}})^2) - (0,000157471 * (\gamma_{\text{pH}})^3) - \\ & 4,408812729 * 10^{-7} * \delta_{\text{Nemlilik}} + 1,174785802 * 10^{-8} * \Delta_{\text{K.K.}} * (\delta_{\text{Nemlilik}} - 0,5) * (\Delta_{\text{K.K.}} - 1300) + \\ & (0,000000015954 * B_{\text{AC}} - 0,000000002156013699 * \Delta_{\text{K.K.}}) * (B_{\text{AC}} - 10) * (\Delta_{\text{K.K.}} - 1300) - \\ & 0,00000000087791952 * \gamma_{\text{pH}} + 0,000045165138 * \delta_{\text{Nemlilik}} * (\gamma_{\text{pH}} - 7,92) * (\delta_{\text{Nemlilik}} - 0,5) + \\ & (0,00000696214 * \delta_{\text{Nemlilik}} - 0,00000191598 * \text{AC Seviyesi}) * (\delta_{\text{Nemlilik}} - 0,5) * (B_{\text{AC}} - 10) \end{aligned} \quad (6.19)$$

6.9. Deney Çalışmalarının Yapıldığı Farklı Test Ortamlarına İlişkin Bilgiler

Test ortamında gerçekleştirilen deney çalışmaları sonucunda korozyon kuponları ile bulunan korozyon hız değerleri, hem doğrusal hem de doğrusal olmayan regresyon denklemleri yardımıyla bulunan korozyon hız değerleri ile karşılaştırılmıştır. Korozyon hızlarının karşılaştırılması için oluşturulan deney ortamındaki toprak, boru hattı korozyon süreçlerinin yaygın olarak görüldüğü Türkiye'nin farklı bölgelerinden getirilmiştir. Karşılaştırma yapılan deney ortamlarına ait analiz verileri ile uygulanan katodik koruma ve AC seviyeleri Tablo 6.22.' de gösterilmektedir.

Tablo 6.22. Deney ortamındaki faktörlere ait seviyeler

Faktörler	Saha Toprağı - 1	Saha Toprağı – 2 (referans ortam)	Saha Toprağı - 3
Katodik koruma (mV)	900	1300	1100
pH	8,18	9	8,79
AC (V)	40	10	20
Tuzluluk (%)	0,0122	0,0036	0,0201
Nem (%)	1,24	0,5	0,56

6.10. Deney Çalışmalarının Yapıldığı Farklı Saha Ortamlarına İlişkin Bilgiler

Sahada yer alan 24” doğal gaz boru hattının farklı ölçüm noktalarına yerleştirilmiş olan korozyon kuponları ile belirlenen korozyon hız değerleri, doğrusal ve doğrusal olmayan regresyon denklemleri ile hesaplanan korozyon hızları ile karşılaştırılmıştır. Şekil 6.14.' de gösterilen çalışma alanı boyunca yaklaşık 110 km' lik boru hattı, 4 farklı bölümde incelenmiştir. Her bölümde, korozyon kuponlarının yerleştirildiği zeminden toprak numune alınarak içeriği analiz ettirilmiş olup sonuçlar, Tablo 6.23.' de gösterilmektedir.

Korozyon kuponları, burgu ile delinmiş olan zemin içerisine boru hattının yakınına yaklaşık 1 metre derinliğe yerleştirilmiş ve boru hattı üzerinde yer alan ölçüm noktaları üzerinden boru hattına bağlanmıştır. Çalışmalar süresince özellikle yağışlardan kaynaklı olarak zemin nemlilik seviyesinde değişim olmaması için çalışma yapılacak hat güzergâhındaki hava koşulları takip edilmiştir.

Korozyon kuponları, 2 haftalık süre boyunca zemin içerisinde kalmış olup sonrasında çıkartılarak korozyon kuponlarına uygulanan temizleme metotları uygulanmış ve tartılmıştır. Korozyon kuponlarında meydana gelen kütle kayıpları belirlenerek korozyon hızları hesaplanmıştır.

Saha ve deney ortamında korozyon kuponları ile tespit edilen korozyon hızları, oluşturulan denklemlerle bulunan hızlar ile kıyaslanmış olup kıyaslaması yapılan denklemler Tablo 6.24.' de özet olarak gösterilmektedir.



Şekil 6.14. Korozyon hız ölçüm çalışması yapılan boru hattı güzergâhı

Tablo 6.23. Saha ortamındaki faktörlere ait seviyeler

Faktörler	Birimler	Ölçüm Noktası- 1	Ölçüm Noktası – 2	Ölçüm Noktası - 3	Ölçüm Noktası-4
Katodik koruma	mV	1100	1150	1200	1200
pH	-	8,11	8	7,5	7,5
AC	V	20	17	35	23
Tuzluluk	%	0,0324	0,0250	0,0550	0,0175
Nem	%	2,98	0,75	2	3

Tablo 6.24. Kıyaslaması yapılan denklem türleri ve test ortamları

Kıyaslanan korozyon hızları		
Doğrusal olmayan regresyon denklemi ile hesaplanan (Faktörler bağımsız)	Deney ortamında bulunan korozyon hızları	Saha şartlarında bulunan korozyon hızları
Doğrusal olmayan regresyon denklemi ile hesaplanan (İkili faktör etkisi)		
Doğrusal regresyon denklemi ile hesaplanan (Faktörler bağımsız)		
Doğrusal regresyon denklemi ile hesaplanan (İkili faktör etkisi)		

7. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Deney çalışmaları öncesinde ve sonrasında korozyon kuponlarının ağırlık tartımları gerçekleştirilerek kuponların ağırlıklarında korozyona bağlı meydana gelen azalma miktarı, Eşitlik 7.1 ile mm/yıl olarak bulunmuştur [62]. Korozyon kuponlarının ebatları aynı ölçüde olmasına rağmen kupon yüzey alanının hassas şekilde hesaplanabilmesi için kupon kesitleri kumpas ile ölçülmüştür. Böylelikle kupon hazırlanırken ebatlarda meydana gelebilecek olası değişimler göz önüne alınmıştır.

$$R_{corr} = 87,6 \times \left(\frac{W}{DAT} \right) \quad (7.1)$$

A: Kupon yüzey alanını,

D: Metal yoğunluğunu,

W: Kütle değişimini,

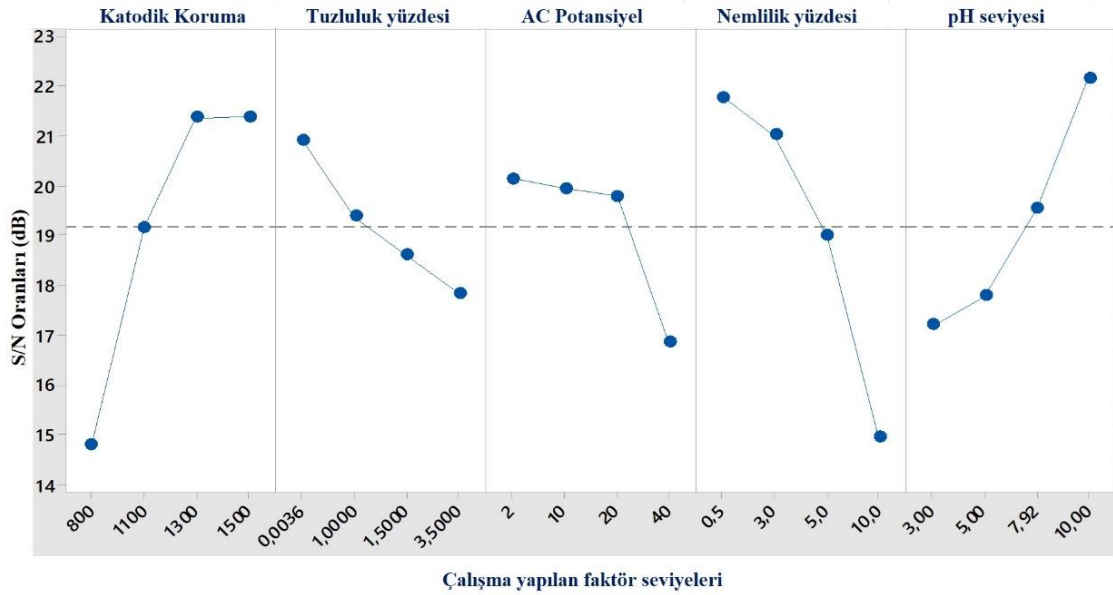
T: Zamanı tanımlamaktadır.

7.1. Taguchi Deney Tasarımı ile Gerçekleştirilen Deneylere ait Sonuçlar

Taguchi deney tasarımı ile oluşturulan ortogonal dizisindeki sıralamalar dikkate alınarak, referans ortam içerisinde deneyler gerçekleştirilmiş ve ortalama korozyon hızları elde edilmiştir. Deneyler sonucunda bulunan korozyon hız değerleri ve standart sapmalar Tablo 7.1.' de gösterilmektedir. Ayrıca Taguchi istatistiksel analizinde en küçük en iyi olarak seçilen S/N oranları, çalışma yapılan her faktör seviyesi için Şekil 7.1.' de gösterilmektedir.

Tablo 7.1. L16 Ortogonal dizinine göre gerçekleştirilen deney sonuçları.

Katodik Koruma (mV)	Tuzluluk (%)	AC potansiyel (V)	Nemlilik (%)	pH seviyesi	Ortalama korozyon hızı (mm/yıl)	S/N	Standart sapma (mm/yıl)
800	0,0036	2	0,5	3	0,125	18,06	0,009
800	1	10	3	5	0,155	16,19	0,009
800	1,5	20	5	7,92	0,178	14,99	0,015
800	3,5	40	10	10	0,320	9,89	0,035
1100	0,0036	10	5	10	0,060	24,43	0,013
1100	1	2	10	7,92	0,150	16,47	0,020
1100	1,5	40	0,5	5	0,134	17,45	0,019
1100	3,5	20	3	3	0,122	18,27	0,012
1300	0,0036	20	10	5	0,127	18,06	0,014
1300	1	40	5	3	0,140	17,07	0,013
1300	1,5	2	3	10	0,047	26,55	0,011
1300	3,5	10	0,5	7,92	0,065	23,74	0,009
1500	0,0036	40	3	7,92	0,071	22,97	0,009
1500	1	20	0,5	10	0,041	27,74	0,008
1500	1,5	10	10	3	0,171	15,34	0,010
1500	3,5	2	5	5	0,107	19,41	0,014



Şekil 7.1. S/N Oranı için faktör etkileri grafiği

Deney çalışmalarında incelenen faktörlerin, korozyon hızına yaptıkları katkı oranları ve olasılık değerleri Tablo 7.2.'de gösterilmektedir.

Tablo 7.2. Regresyon analiz sonuçları

Korozyona etki eden faktörler	Katodik koruma	Tuzluluk	AC potansiyel	Nemlilik	pH
Korozyon hızına etkisi	31,64	9,53	11,62	34,46	1,99
Olasılık değeri (P)	0,0002	0,0140	0,0080	0,0001	0,2040

7.2. Farklı Test Ortamlarında Gerçekleştirilen Deneylerin Denklem Sonuçları ile Kıyaslanması

Farklı deney ortamlarında korozyon kuponları ile tespit edilen korozyon hız değerleri ile doğrusal ve doğrusal olmayan regresyon denklemleri yardımıyla hesaplanan korozyon hızları Tablo 7.3.' de gösterilmekte olup denklem sonuçları ve deney sonuçları arasındaki hız farkları Tablo 7.4.' de gösterilmektedir.

Tablo 7.3. Denklemler ile hesaplanan ve deney ortamında ölçülen korozyon hızları

Korozyon hızları (mm/yıl)	Saha toprağı 1	Saha toprağı 2	Saha toprağı 3
Deney ortamında ölçülen	0,133	0,017	0,045
Doğrusal olmayan model	0,124	0,016	0,042
Doğrusal olmayan model (İkili faktör etkisi)	0,135	0,016	0,046
Doğrusal model	0,132	0,016	0,063
Doğrusal model (İkili faktör etkisi)	0,154	0,039	0,075

Tablo 7.4. Deney ortamı ve denklemler arasındaki korozyon hız farkları

Denklem türleri	Korozyon hızı fark değerleri (mm/yıl)		
Doğrusal model	0,001	0,001	0,018
Doğrusal model (İkili faktör etkisi)	0,021	0,022	0,030
Doğrusal olmayan model	0,009	0,001	0,003
Doğrusal olmayan model (İkili faktör etkisi)	0,002	0,001	0,001

7.3. Farklı Saha Ortamlarında Gerçekleştirilen Deneylerin Denklem Sonuçları ile Kıyaslanması

Saha koşullarında tekrarlanan deneyler sonucunda korozyon kuponları yardımıyla bulunan korozyon hızları ile doğrusal ve doğrusal olmayan regresyon denklemleri yardımıyla elde edilen korozyon hızları Tablo 7.5.' de verilmekte olup elde edilen korozyon hız farkları Tablo 7.6.' da gösterilmektedir.

Tablo 7.5. Denklemler ile hesaplanan ve saha şartlarında ölçülen korozyon hızları.

Korozyon hızları (mm/yıl)	Ölçüm Noktası 1	Ölçüm Noktası 2	Ölçüm Noktası 3	Ölçüm Noktası 4
Saha ortamında ölçülen	0,055	0,030	0,115	0,065
Doğrusal olmayan model	0,054	0,035	0,072	0,051
Doğrusal olmayan model (İkili faktör etkisi)	0,053	0,037	0,074	0,050
Doğrusal model	0,092	0,102	0,093	0,084
Doğrusal model (İkili faktör etkisi)	0,104	0,071	0,104	0,099

Tablo 7.6. Saha ortamı ve denklemler arasındaki korozyon hız farkları

Denklem türleri	Korozyon hızı fark değerleri (mm/yıl)			
Doğrusal model	0,037	0,072	0,027	0,019
Doğrusal model (İkili faktör etkisi)	0,049	0,042	0,016	0,034
Doğrusal olmayan model	0,001	0,005	0,043	0,014
Doğrusal olmayan model (İkili faktör etkisi)	0,002	0,007	0,041	0,015

7.4. Tartışma

Doğrusal regresyon denklemine ait dağılım aralığı (R-Sq) deney çalışmaları sonucunda bulunan korozyon hızları için % 89, 2 seviyesinde hesaplanmış olup bu değer, uyarlanmış korozyon hızları için 88,5 olarak bulunmuştur. Ayrıca doğrusal olmayan regresyon analizleri sonucunda hesaplanan dağılım aralıkları, farklı faktörler için % 96,6 ile % 99,6 aralığında değişmekte olup regresyon programı tarafından uyarlanan korozyon hız dağılım aralıkları ise %94,1 - % 99,4 aralığında değişmektedir. Bu değerler, hem doğrusal hem de doğrusal

olmayan regresyon analizlerinin, deney koşullarında elde edilen sonuçlarla en fazla % 2,5 fark ile örtüştüğünü göstermektedir.

Taguchi istatistiksel analiz metodu ile oluşturulan faktör etkileri (S/N) grafiklerine göre en düşük korozyon hız değerinin; katodik koruma seviyesinin -1500 mV, zemin tuzluluk yüzdesinin 0,0036, AC voltajın 2V, nemlilik yüzdesinin 0,5 ve pH değerinin 10 olduğu durumlarda gerçekleşeceği anlaşılmaktadır. Bu seviyelere yakın saha toprağı 2 ortamında gerçekleştirilen deneyler sonucu bulunan korozyon hızı, tüm deneyler içerisinde elde edilen en düşük korozyon hızını oluşturmuştur. Boru hattı güzergâhları belirlenirken, boru hattı yapım işleri için ön görülen bütçe durumu da göz önüne alınarak alternatif güzergâhlar içerisinde ideale en yakın olarak tespit edilen bu seviyeler dikkate alınmalıdır.

Hem değer hem de oransal olarak en yüksek korozyon hız farkı, saha toprağı 3 ortamında yapılan deneyler ile doğrusal regresyon analizi sonucu bulunan korozyon hız değerleri arasında tespit edilmiştir. Saha toprakları kendi arasında karşılaştırıldığında saha toprağı 3 ortamında diğerlerine göre en farklı değer tuzluluk olduğu görülmektedir. Yüksek hata sebebinin de bu tuzluluğu oluşturan ve toprak ortamın tuzluluğuna etki eden farklı mineral ve bileşik içeriğinden kaynaklandığı değerlendirilmektedir [11].

Saha toprağı 3' de doğrusal regresyon ile deney sonucu arasında tespit edilen nispeten yüksek korozyon hız farkının, doğrusal olmayan regresyon analizi ile deney sonuçları arasında olmadığı görülmekte olup doğrusal olmayan regresyon analizi ile elde edilen denklemlerin, bu farkı en az seviyeye indirecek şekilde hesaplama yaptığı anlaşılmaktadır.

Boru hattı güzergâhı üzerindeki farklı ölçüm noktalarından korozyon kuponları ile ölçülen korozyon hızlarına en yakın değer, doğrusal olmayan regresyon denklemleri ile hesaplandığı görülmektedir. Doğrusal olmayan regresyon ile korozyon hız farkının en fazla olduğu ölçüm noktası 3' de diğer ölçüm noktalarına göre tuzluluğun ve AC etkileşimin daha fazla olduğu görülmektedir. Bu durumda korozyon hız farkını, AC etkileşimin ve tuzluluk seviyesinin arttırabileceği değerlendirilmektedir. Ayrıca korozyon hız farkının en fazla olduğu değer, hem boru hatları bakım onarımı için dikkate alınan sınıflandırmayı hem de çelik malzemelerin korozyon dirençleri tablosunda yer alan sınıflandırmayı değiştirecek seviyede olmamaktadır.

Faktörlerin korozyon hızına yaptıkları katkı oranları incelendiğinde; nemlilik faktörünün korozyon hızına yaptığı etkinin en fazla, pH faktörünün ise en az olduğu görülmektedir. Ayrıca pH' a ait olasılık değeri, 0,05' den daha büyük bulunmuştur. Bu durum, çalışma yapılan faktörler ve faktör seviyeleri içerisinde sadece pH' ın istatistiksel açıdan deney sonuçları üzerinde etkisi olmadığını göstermektedir. Literatür çalışmalarında nemlilik ile

korozyon hızı arasında yakın bir ilişki olduğu ve nemliliğin artması sonucunda korozyonun hızlı bir şekilde artacağı ifade edilmektedir [25]. Bu durumda, nemliliğin korozyon üzerindeki etkisinin fazla olması, literatür bulguları ile uyumluluk göstermektedir. pH faktörünün korozyon hızına yaptığı etkinin en az olması, literatür çalışmalarında yer alan pH' ın korozyon hızı üzerinde doğrudan bir etkisinin olmaması ve ancak diğer faktörlerle birlikte korozyonun oluşmasında etkili olabileceği sonucu ile uyumluluk göstermektedir [2,4,5,59].

Deney çalışmaları sonucunda tespit edilen en yüksek korozyon hızı, 0,320 mm/yıl olarak gerçekleşmiştir. Bu değer, Tablo 5.4' e göre “iyi” seviyede yer almaktadır. Deneyler sonucunda elde edilen en düşük korozyon hızında (0,017 mm/yıl) çelik malzemenin korozyon direnci ise “oldukça iyi” seviyede yer almaktadır. Deneyler sonucunda bulunan tüm korozyon hız değerleri, malzemenin korozyon direncine göre “iyi” ve “oldukça iyi” seviyelerde yer almakta olup deneylerin gerçekleştirildiği ortamda “orta”, “zayıf” ve “kabul edilemez” seviyelere ulaşamamıştır. Deneylerin toprak ortam yerine tuzlu sulu ortamda gerçekleştirilmiş olması veya korozyon hızına etki eden ve bu çalışma kapsamında incelenmeyen diğer faktörlere ait miktarların değiştirilmesi durumlarında bu seviyelerin görülmesinin mümkün olabileceği değerlendirilmektedir.

AC etkileşimin çelik malzemelerin korozyon hızına yaptıkları etkileri inceleyen literatür çalışmalarında; malzemede meydana gelen korozyon riski, çelik üzerinde ölçülen AC akım yoğunluk değerleri ile ilişkilendirilmiştir [38,61]. Türkiye’ deki doğalgaz boru hattı işletmeciliğinde AC korozyon riskinin değerlendirilmesi, AC akım yoğunluğu ve AC potansiyel değerlerinin birlikte boru hattı üzerinden ölçülmesi sonucunda yapılmaktadır. Bu sebeple tüm deney çalışmalarında her iki değer de alınmıştır. Deney süresince boru üzerinden ölçülen AC voltaj, 40 volt seviyesinde sabit tutulduğunda AC akım yoğunluğu değerlerinin 1,6 A/m² ile 92 A/m² arasında değiştiği belirlenmiştir. Ölçülen akım yoğunluklarından 1,6 A/m² değeri, toprak nemlilik yüzdesinin 0,5 olduğu durumda 92 A/m² değeri ise toprak nemlilik yüzdesinin 10 olduğu durumda tespit edilmiştir. Bununla birlikte; çalışma yapılan değerler içerisinde AC voltajın en az olduğu 2 volt seviyesinde ölçülen akım yoğunluklarının 0,2 A/m² ile 2 A/m² arasında değiştiği tespit edilmiştir. Bu değerler sırasıyla toprak nemlilik yüzdesinin 0,5 ve 10 olduğu durumlarda ölçülmüştür. Toprak nemlilik seviyesinin artması ile toprak direncinde azalma meydana gelmektedir [21]. Düşük dirence sahip olan zeminlerde ise borudan korozyon kuponuna geçiş yapan AC akımlarda artış meydana gelmekte olup düşük zemin direncine sahip ortamlarda yüksek AC akım yoğunluklarının ölçüldüğü, konuyla ilgili yapılan çalışmalarda ifade edilmektedir.

Zemin nemlilik seviyesine bağı olarak dirençte meydana gelen değişimler toprak direnç megeri ile ölçülmüş olup direnç değerinin, nemlilik arttıkça yaklaşık 5.000 ohm.cm seviyelerinden 2.500 ohm.cm seviyelerine düştüğü tespit edilmiştir. Bu sebeple çalışma sonucunda elde edilen AC akım yoğunluğu ile nemlilik arasındaki ilişki, literatür çalışmaları ile uygunluk göstermektedir.

Çelik malzemelerde AC etkileşim sonucunda meydana gelen korozyon riskini sınıflandıran EN ISO 18086 standardında [7]; korozyon kuponu üzerinde belirli bir sürede (ör; 24 saat) ölçülen AC akım yoğunluk değerinin 30 A/m² ve daha fazla olması halinde korozyon riskinin mevcut olduğu ifade edilmektedir. Bu standart dikkate alındığında, %10 nemlilik seviyesine sahip ortamda yaklaşık 20 volt ve üzerindeki AC potansiyel ölçümlerde, AC korozyonunun değerlendirilmesi gerekmektedir. Bununla birlikte deney yapılan zemin nemlilik yüzdesinin en az olduğu (% 0,5) durumda, çalışma aralığının en üst limiti olan 40 volta kadar hiçbir AC voltaj seviyesinde AC korozyon riski mevcut değildir. Korozyon riski açısından kritik olarak değerlendirilen 30 A/m² ve üzeri seviyelere, referans deney şartlarında AC voltajın yanında nemlilik yüzdesinin de arttırılması ile ulaşılabilir.

Deney çalışmaları sırasında, pH değerinin istenilen seviyelerde ayarlanabilmesi amacıyla farklı buffer solüsyonları kullanılmıştır. Kullanılan solüsyonlar, pH değerini istenilen çalışma seviyelerine getirmiş olsa da aynı zamanda zeminin nemlilik seviyesini çalışma öncesinde değiştirmektedir. Özellikle pH değerinin değiştirilip nemliliğin değiştirilmeden gerçekleşmesi gereken deneylerde bu bir problem olarak görülmektedir. Bu durum çalışma öncesinde, ortamda kısa süreli kurutmanın uygulanması ile çözülmeye çalışılmıştır. Benzer şekilde zemin nemlilik yüzdesinde yapılan değişiklikler, zemin pH değerini limitli bir şekilde etkilemiştir. Ancak deney süresince nemliliğin sabit şekilde tutulması, pH değerinin de sabit şekilde kalmasını sağlamıştır.

Deney çalışmaları sırasında çalışma yapılan faktörler dışında toprak ortamın korozifliğini etkileyen magnezyum, kalsiyum, sülfat ve elektriksel iletkenlik gibi farklı faktörler de mevcuttur. Çalışılan toprak ortam analiz edilirken bu faktörlere ait seviyeler de bulunmuş ancak bu faktörlerin korozyon hızına olan etkisi deney çalışmalarında araştırılmamıştır. Bu faktörlere ait seviyeler, zeminden kaynaklı korozyona etki eden diğer faktörlerle ilgili yapılacak farklı araştırmalara temel oluşturması için belirlenmiştir.

8.SONUÇLAR

Saha şartlarında X65 çelik borularda meydana gelen korozyon süreçleri, kontrollü deney ortamında 5 faktörün değişimi için farklı bölgelerden alınan toprak örnekleri içerisinde takip edilmiş ve korozyon hızları ölçülmüştür. Faktörlerin seviye değişimine bağlı olarak çelik malzemede gerçekleşen korozyon hız tahminleri, Taguchi yöntemi ile deney tasarımı kullanılarak gerçekleştirilen deney çalışmaları sonucunda yapılmıştır.

Çelik boru hatlarında meydana gelen korozyon sürecine, çalışılan faktörler içerisinde en fazla ortam nemliliğinin etki ettiği anlaşılmaktadır. Ayrıca boru hatlarında katodik koruma uygulanmasının korozyon hızına yaptığı etkinin, zemin nemlilik yüzdesine yakın derecede önemli olduğu tespit edilmiştir. AC etkileşim ve ortam tuzluluğunun korozyon hızına yaptıkları etki birbirlerine yakın olmakla birlikte nemlilik ve katodik korumadan sonra gelmektedir. Boru hatlarının geçtiği güzergâhlardaki pH değerlerinin genellikle 5-8 aralığında olduğu göz önüne alındığında, boru hattı korozyonuna pH etkisinin en az olduğu anlaşılmaktadır.

AC etkileşimin, çelik korozyonu üzerindeki etkisinin nemlilik yüzdesi ve katodik korumaya göre daha az olduğu belirlenmiş olsa da, yüksek nemlilik yüzdesine sahip güzergâhlardan geçen boru hatları üzerindeki kaplama hasarlarından daha fazla AC akım çıkışı meydana gelmektedir. Bu durum, çelik malzemedeki korozyon riskini arttırmakta ve AC etkileşimin zemin nemlilik yüzdesi ile birlikte değerlendirilmesi gerekliliğini ortaya koymaktadır.

Sinyal/gürültü oranına göre en düşük korozyon hızının elde edilmesine en büyük katkının, boru hattına uygulanan katodik koruma seviyesinin -1300 mV ile -1500 mV (SCE) aralığına getirilmesi ile yapılacağı anlaşılmaktadır. Bu değer aralıkları, doğal gaz boru hattı işletmeciliğinde korozyonu azaltmak için kullanılan katodik koruma seviyelerinin belirlenmesinde dikkate alınmalıdır.

Doğrusal ve doğrusal olmayan regresyon denklemleri ile 5 faktöre bağlı olarak çelik korozyon hızları tahmin edilebilmektedir. Toprak zemin içerisinde X65 boru korozyon hızını değiştiren ve önemli olarak görülen 5 faktörle yapılan deney çalışmaları sonucunda bulunan korozyon hızları ile denklem yardımıyla hesaplanan korozyon hızları birbirlerine yakın çıkmaktadır. Korozyon hız denklemlerinin oluşturulması sürecinde, faktörlerin korozyon hızı üzerindeki bağımsız ve ikili etkileri dikkate alınmıştır. Korozyon hızına ve birbirlerine en çok etki eden faktör çiftlerinin birarada olduğu durumda elde edilen korozyon

hızı hesaplama denklemi, tüm faktörlerin bağımsız şekilde korozyon hızını etkilediği durumu tanımlayan denkleme göre korozyon hızını, saha ve deney koşullarında ölçülen hıza göre daha yakın olarak hesaplamaktadır. Bu durumda çelik boru hatlarında korozyon hız tahminlerinin yapılması sürecinde, çalışılan faktörlerin korozyon hızına yaptıkları bağımsız etki ile ikili etkileri aynı anda göz önüne alınmalıdır. Faktör çiftlerinin korozyon hızına etkisinin belirlenmesi için, L16 ortogonal dizindeki deneyler haricinde de birçok ilave deney çalışması gerçekleştirilmiştir. Bu sayede faktörlerin ikili etkileşimleri sonucunda korozyon hızında meydana gelen değişimler daha sağlıklı şekilde tespit edilmiştir.

Korozyon hızlarının denklemler yardımıyla tahmin edilebilmesi ile boru hattı planlama ve işletmecilik aşamalarında korozyon hızları ön görülebilecek olup bu sayede boru hattı güzergâhının seçimi, güzergâhın değiştirilmesi, malzeme et kalınlığının seçimi ile boru hattı kontrol ve bakım süreç planlamalarının en ideal şekilde yapılabilmesi sağlanacaktır.

KAYNAKLAR

- [1] P.R. Roberge, "Introduction," in *Handbook of Corrosion Engineering*, 1th ed. Newyork, USA: McGraw-Hill Professional, 2000, ch. 1, sec. 1.1, pp. 1-3.
- [2] M. Wasim, S. Shoaib, N.M. Mubarak, A.M. Asiri, "Factors Influencing Corrosion of Metal Pipes in Soils," *Environmental Chemistry Letters*, vol. 16, no. 1, pp. 861- 879, Mar. 2018.
- [3] Quej-Aké, N. Nava, M.A. Espinosa-Medina, H.B. Liu, J.L. Alamilla, E. Sosa, "Characterisation of soil/pipe interface at a pipeline failure after 36 years of service under impressed current cathodic protection," *Corrosion Engineering, Science and Technology*, vol. 50, no. 4, pp. 311-319, Aug. 2015.
- [4] H.R. Penhale, "Corrosion of mild steel plates in some New Zealand soils after 20 years," *New Zealand Journal Science*, vol. 27, no. 134, pp. 57-68, Mar. 1984.
- [5] B. Rajani, J. Makar, "A methodology to estimate remaining service life of grey cast iron water mains," *Institute for Research in Construction, National Research Council Canada*, vol. 27, no. 6, pp. 1259-1272, Dec. 2000.
- [6] K. Marušić, K. Kekez, S. Martinez, "Comparison of soil properties measurements in pipeline corrosion estimation," *Materials and Corrosion*, vol. 70, no.9, pp. 1700-1707, Apr. 2019.
- [7] *Corrosion of metals and alloys - determination of AC corrosion- protection criteria*, EN ISO 18086, European Standard, Geneva, December 2020.
- [8] *Petroleum, petrochemical and natural gas industries - cathodic protection of pipeline systems on - land pipelines*, BS ISO 15589-1, British Standard, London, March 2015.
- [9] M. Jula, R. Dehmlaei, S.R.A. Zaree, "Statistical approach to the corrosion behavior of dissimilar welds of A 387-Gr 91/AISI 316 steels with PCGTAW process," *Journal of Advanced Materials and Processing*, vol. 5, no. 1, pp. 3- 12, Mar., 2017.

- [10] N. K. Zedin, M.A. Mahdi, R.A.K. Salman, "Optimization corrosion protection parameters of steel pipeline by using taguchi experimental design," *Engineering and Technology Journal*, vol. 34, no. 4, pp.754-761, Apr., 2016.
- [11] J.R. Davis, "Principles of aqueous corrosion," in *Corrosion understanding the basics*, 1th ed. Ohio, USA: ASM International, 2000, ch. 3, sec. 1, pp. 50-95.
- [12] H.G. Byars, "Corrosion basics," in *Corrosion Control in Petroleum Production*, 2th ed. Houston, USA: NACE International, 1999, ch. 2, sec. 3, pp. 23-37.
- [13] M. Pourbaix, "Thermodynamics and corrosion," in *Corrosion Science*, vol. 30, no.10, pp. 963-988, Mar., 1990.
- [14] P.R. Roberge, "Corrosion kinetics and application of electrochemistry to corrosion," in *Corrosion Engineering: Principles and Practice*, 1th ed. New York, USA: McGraw-Hill, 2008, ch.5, sec. 5.1., pp. 85-106.
- [15] M.G. Fontana, "Corrosion prenciples," in *Corrosion Engineering*, 1th ed. Singapore: McGraw-Hill Book Company, 1987, ch. 2, sec. 2.3., pp. 12-38.
- [16] A. Groysman, "Corrosion mechanism and corrosion factors," in *Corrosion for Everybody*, 1th ed. Newyork, USA: Springer, 2010, ch.1, sec. 1.8., pp. 37-47.
- [17] D.A. Jones, "Electrochemical kinetics of corrosion," in *Principles and Prevention of Corrosion*, 2th ed. NJ, USA: prentice-hall Inc, 1996, ch.3, sec. 3.2., pp. 80-86.
- [18] S.A. Bradford, "Electrochemical corrosion theory," in *Corrosion Control*, 1th ed. NY, USA: VNR, 1993, ch.3, sec. 3.3., pp. 33-47.
- [19] P.R. Roberge, "Corrosion detectability," in *Corrosion Inspection and Monitoring*, 1th ed. NY, USA: John Wiley & Sons, 2007, ch.2, sec. 2.2., pp.45-52.
- [20] E. Bardal, "Corrosion in different environment," in *Corrosion and Protection*, 1th ed., UK: Springer, 2004, ch 8, sec. 8.1., pp. 193-217.
- [21] A.I.M Ismail, A.M. El-Shamy, "Engineering behaviour of soil materials on the corrosion of mild steel," *Applied Clay Science*, vol. 42, no. 3, pp. 356-362, Jan. 2009.

- [22] R. Baboian, "Soils and Corrosion," in *Corrosion Test and Standards: Application and Interpretation*, 1th ed. West Conshohocken, USA: ASTM International, 2005, ch 32, sec. 32.1, pp. 387-404.
- [23] T. Tiba, E.M. De Oliveira, "Utilization of cathodic protection for transmission towers through photovoltaic generation," *Renewable Energy*, vol. 40, no.1, pp. 150-156, Apr. 2012.
- [24] D.G. Li, Z.Q. Bai, J.W. Zhu, M.S. Zheng, "Influence of temperature, chloride ions and chromium element on the electronic property of passive film formed on carbon steel in bicarbonate/carbonate buffer solution," *Electrochimica Acta*, vol.52, no.27, pp.7877-7884, Nov. 2007.
- [25] S.K. Gupta, B.K. Gupta, "Critical soil-moisture content in the underground corrosion of mild-steel," *Corrosion Science*, vol. 19, no.3, pp. 171-178, 1979.
- [26] E.A. Noor, A.H. Al-Moubaraki, "Influence of soil moisture content on the Corrosion behaviour of X60 steel in diffrent soils," *Arab Journal Science Engineering*, vol. 39, no.1, pp. 5421-5435, Apr. 2014.
- [27] M. Søndergaard, "Redox Potential," in *Encyclopedia of inland waters*, G. E. Likens, Ed., UK: Academic Press, 2009, pp. 852-859.
- [28] N. Yahaya, N.M. Noor, S.R. Othman, L.K. Sing, M.M. Din, "New Technique for Studying Soil-Corrosion of Underground Pipeline," *Applied Sciences*, vol. 11, no. 9, pp.1510-1518, May. 2011.
- [29] J.D. Palmer, "Environmental Characteristics Controlling the Soil Corrosion of Ferrous Piping, " in *Effect of Soil Characteristics on Corrosion*, J.D. Chaker, Ed., Philadelphia, USA: American Society for Testing and Materials, 1989, pp.5-17.
- [30] A.L. Smart, "The Trans Alaska Pipeline – potential measurements and telluric current " *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 18, no. 5, pp.557-567, Oct. 1982.

- [31] W.V.Baeckmann, W.Prinz, “Stray Current Interference and Stray Current Protection,” in *Handbook of Cathodic Corrosion Protection*, 3th ed. Burlington, USA: Elsevier Science, 1997, ch 15, sec. 15.1, pp.347-366.
- [32] J. Riskin, A. Khentov, “Corrosion by stray currents and methods of protection ” in *Electrocorrosion and Protection of Metals*, 2th ed. Burlington, USA: Elsevier Science, 2019, ch 1, sec.3, pp. 49-59.
- [33] Protection against corrosion by stray current from direct current systems, EN 50162, European Standard, Geneva, January 2004.
- [34] P.A. Schweitzer, “Forms of metallic corrosion” in *Fundamentals of Corrosion: Mechanisms, Causes, and Preventative Methods*, UK: CRC Press, 2009, ch.3, sec.3.1., pp. 27-76.
- [35] L. Fickert, E. Schmutz, R. Braunstein, M. Lindinger, “Reduction of the electrical potential of interfered pipelines due to currents of high voltage power lines and electric railways”, *Elektrotechnik und Informationstechnik*, vol. 127, no.1, pp. 362-366, Dec. 2010.
- [36] S.L. Pohlman, “Stray-Current Corrosion,” in *ASM Handbook*, ASM International Handbook Committee Ed. Ohio, USA: ASM International, 2003, pp. 194-195.
- [37] Y. Hosokawa, “Overcoming the new threat to pipeline integrity- AC Corrosion assesment and its mitigation”, Proc. 23rd World gas conference, Amsterdam, Holland, 2006, pp. 1-18.
- [38] A.Q. Fu, Y.F. Cheng, “Effect of alternating current on corrosion and effectiveness of cathodic protection of pipelines”, *Canadian Metallurgical Quarterly*, vol. 51, no.1, pp.81- 90, Nov. 2012.
- [39] S. Goidanich, L. Lazzari, M. Ormellese, “AC corrosion. Part 2: Parameters influencing corrosion rate”, *Corrosion Science*, vol. 52, no.3, pp. 916-922, March 2010.
- [40] J.H. Morgan, “Stray current, corrosion, interference and electrolysis,” in *CathodicProtection*, 2th ed. Houston, USA: NACE, 1987, ch 9, sec. 9.1., pp. 409 444.

- [41] A.W. Peabody, "Pipeline coating," in *Control of Pipeline Corrosion*, 2th ed. Houston, USA: NACE, 2001, ch.2, sec.2.1., pp. 7-21.
- [42] S. Lampman, "Materials selection and design," in *ASM Handbook*, 1th ed. UK: Taylor and Francis, 1997, ch.20., pp. 19-20.
- [43] P. Natishan, "Introduction to Corrosion Resistance of Bulk Materials, Corrosion: Fundamentals, Testing, and Protection," in *ASM Handbook*, 2th ed. Ohio, USA: ASM International, 2003, ch. 13A, pp. 687-688.
- [44] Z. Ahmad, "Cathodic protection," in *Principles of Corrosion Engineering and Corrosion Control*, 1th ed. UK: Butterworth-Heinemann, 2006, ch.5, sec. 5.1, pp. 271-351.
- [45] R.H. Heidersbach, "Cathodic protection," in *ASM Handbook*, 2th ed. Ohio, USA: ASM International, 2003, vol. 13A, pp. 855-870.
- [46] B.H. Popov, S.P. Kumaraguru, "Cathodic Protection of Pipelines". in *Handbook of Environmental Degradation of Materials*, NY, USA: William Andrew Publishing, 2005, ch.11, sec. 1, pp. 503-521.
- [47] *Control of External Corrosion on Underground or Submerged Metallic Piping Systems*, NACE 0169, American Standard, Houston, USA, November 2002.
- [48] D.A. Jones, "The application of electrode kinetics to the theory and practice of cathodic protection," *Corrosion Science*, vol.11, no.1, pp. 439-451, June 1971.
- [49] B. Gökçe, S. Taşgetiren, "Kalite İçin Deney Tasarımı," *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, vol.6, no.1, pp. 71-83, 2009.
- [50] D.C. Montgomery, "A brief history of statistical design," in *Design and Analysis of Experiments*. 8th ed. NY, USA: John Wiley & Sons, 2005, ch.1, sec. 1.5., pp. 21-24.

- [51] G.Karapınar, “Gıda makinelerindeki merdane üzerine yapışan hamur kalıntısını sıyıran bıçakların imalatında, yüzey kalitesinin iyileştirilmesi için taguchi metodu kullanılarak optimum imalat parametrelerinin belirlenmesi”, Yüksek lisans tezi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Karamanoğlu Mehmet Bey Üniversitesi, Karaman, Türkiye, 2020.
- [52] G. Güral, “Gazaltı Kaynağında Proses Parametrelerinin Optimizasyonu”, Yüksek lisans tezi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir, Türkiye, 2003.
- [53] I. Kotcioglu, M.N. Khalaji, A. Cansiz, “Heat transfer analysis of a rectangular channel having tubular router in different winglet configurations with Taguchi method,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 132, pp. 637-650, Mar. 2017.
- [54] R. Azadi, Y. Rostamiyan, “Experimental and Analytical Study of Buckling Strength of New Quaternary Hybrid Nanocomposite Using Taguchi Method for Optimization, Construction and Building Materials,” *Construction and Building Materials*, vol.88, pp. 212-224, July 2015.
- [55] Ş. Mercan, “Deney Tasarımı ve Yapay Zekâ Tekniklerinden Yararlanarak Ürün Kalitesinin İyileştirilmesi”, Yüksek lisans tezi, Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, Balıkesir Üniversitesi, Balıkesir, Türkiye, 2019.
- [56] B. Gökçe, S. Taşgetiren, “Kalite İçin Deney Tasarımı”, *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, vol.6, no.1, pp. 71-83, 2009.
- [57] Ş. Kasman, “Lazer Mikro İşleme Parametrelerinin Yüzey Kalitesine Etkisinin Deney Tasarım Yöntemiyle Belirlenmesi,” in 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'09), Karabük, TÜRKİYE, 2009, pp. 1-5.
- [58] Y. Yalçındağ, “Gıda işletmelerinde Taguchi yöntemi ile süreç iyileştirme ve bir uygulama,” *Journal of Yaşar University*, vol.18, no.69, pp.105-131, Febr. 2023.

- [59] L. Yucheng, B. Zhang, Y. Zhang, L. Ma, P. Yang, "Electrochemical polarization study on crude oil pipeline corrosion by the produced water with high salinity," *Engineering failure Analysis*, vol. 60, pp. 307-315, Febr, 2016.
- [60] Z. Jiang, Y. Du, M. Lu, Y. Zhang, D. Tang, L. Dong, "New findings on the factors accelerating AC corrosion of buried pipeline," *Corrosion Science*, vol. 81, no.1, pp. 1-10, Apr., 2014.
- [61] C. Wen, J. Li, S. Wang, Y. Yang, "Experimental study on stray current corrosion of coated pipeline steel," *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, vol. 27, no.3, pp. 1555-1561, Nov. 2015.
- [62] D.Z. Tang, Y.X. Du, M.X. Lu, Y. Liang, Z.T. Jiang, L. Dong, "Effect of pH value on corrosion of carbon steel under an applied alternating current," *Materials and Corrosion*, vol. 66, no.12, pp. 1467-1479, Oct. 2015.
- [63] L. Xu, X. Su, Y.F. Cheng, "Effect of alternating current on cathodic protection on pipelines," *Corrosion Science*, vol. 66, no.1, pp. 263-268, Jan. 2013.
- [64] O.E. Goudaa, A. Z. El Deinb, M.A.H. El- Gabalawy, "Effect of electromagnetic field of overhead transmission lines on the metallic gas pipe-lines," *Electric Power Systems Research*, vol. 103, no.15, pp. 129-136, October 2013.
- [65] M.T. Lilly, S.C. Ihekwoaba, S.O.T. Ogaji, S.D. Probert, "Prolonging the lives of buried crude-oil and natural-gas pipelines by cathodic protection," *Applied Energy*, vol. 84, no.9, pp. 958-970, September 2007.
- [66] J.G. Kim, Y.W. Kim, "Cathodic Protection Criteria of thermally insulated pipeline buried in soil," *Corrosion Science*, vol. 43, no.11, pp. 2011-2021, November 2001.

- [67] S.R. Allahkaram, M.I. Zakaria, M. Derakhshani, M. Samadian, H. S. Rasaey, A. Razmjoo, "Investigation on corrosion rate and a novel corrosion criterion for gas pipelines affected by dynamic stray current," *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, vol. 26, no.44, pp. 453-460, July 2015.
- [68] N. Korde, R.A. Kaream, M.A. Mahdi, "Optimization Corrosion Protection Parameters of Steel Pipeline by Using Taguchi Experimental Design," 2nd Conference on Environment and Sustainable Development, Baghdad, Iraq, 2015, pp. 754-761.
- [69] N. Fatchurrohman, L. T. Chin, J. Na'am, "Taguchi method applied for the investigation of corrosion level on metal inert gas welding of mild steel," *Journal of Mathematics and Its Application*, vol.16, no.3, pp. 845-852, Sep. 2022.
- [70] N.R.A. Burhani, M. Muhammed, M.C. Ismail, M.A. Mahed, "An experimental analysis using taguchi method in resolving the significant factors subject to corrosion under insulation," *Journal of Engineering and Applied Sciences*, vol. 11, no.20, pp. 11966-11970, Oct. 2016.
- [71] M.N. Nwigbo, J.R. Beradam, R.A. Ejimofor, "Corrosion rate model for mild steel in hydrochloric acid," *European Journal of Mechanical Engineering Research*, vol. 4, no.2, pp. 42-48, Oct. 2017.
- [72] C.O. Nwankwo, C.C. Ihueze, "Corrosion rate models for oil and gas pipeline systems: A numerical approach," *International Journal of Engineering Research and Technology*, vol.7, no.8, pp. 277-286, Aug. 2018.
- [73] N.I.Khaled, H.H. Majed, J.S. Aziz, "Mathematical modelling and experimental study of corrosion rate on carbon steel affected by soil moisture content and time," AIP Conference Proceedings 2213, Basra, Iraq, 2020, pp. 1-10.
- [74] L.Yan, Y.Diao, Z. Lang, K. Gao, "Corrosion rate prediction and influencing factors evaluation of low-alloy steel in marine atmosphere using machine learning approach," *Science and Technology of Advanced Materials*, vol. 21, no.1, pp. 359-370, June 2020.

- [75] Standard practice for preparing, cleaning, and evaluation corrosion test specimens, ASTM G1-03, American Standard, Pensilvanya, Nov., 2017.
- [76] T.H. Shabangu, A.A. Ponnle, K.B. Adedeji, B.T. Abe, P.A. Olubambi, A.A. Jimoh, “Effects of soil properties on corrosion of buried steel pipeline,” in *AFRICON*, Addis Ababa, ETHIOPIA, 2015, pp. 1-5.
- [77] E. Nas, N.A. Ozbek, “Optimization the machining parameters in turning of hardened hot work tool steel using cryogenically treated tools,” *Surface Review and Letters*, vol. 27, no. 5, pp. 1-14, Nov. 2019.
- [78] M. Yurdakul, S. Güneş, Y.T. İç, “Honlama prosesinde yüzey kalitesinin Taguchi methodu ile iyileştirilmesi,” *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, vol. 31, no. 2, pp. 347-360, June 2016.
- [79] R.G. Wakelin, R.A. Gummov, S.M. Segal, “AC corrosion – case histories, test procedures and mitigation,” *NACE international*, Ontario, Canada, 1998, pp.1-14.